

# ПРИРОДА и КУЛЬТУРА



У. Г. БРАГГ

## О ПРИРОДЕ ВЕЩЕЙ



---

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

*А. Лео.*

---

# ПРИРОДА И КУЛЬТУРА

КНИГА ДВАДЦАТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

---

У. Г. БРАГГ

## О ПРИРОДЕ ВЕЩЕЙ

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО  
А. А. ЛЕОНТЬЕВОЙ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ  
проф. Г. В. ВУЛЬФА



---

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКВА ☆ 1926 ☆ ЛЕНИНГРАД



## ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

В последних числах 1924 года, на рождественских каникулах, мне случилось быть в Лондоне, и я посетил Королевский институт. Директор института, сэр Уильям Брагг, автор этой книги, показывая мне институт, обратил мое внимание на картину, изображающую Фарадэя, окруженного толпой подростков, которым он читает одну из первых рождественских лекций в институте, ставших с его времени обычными, а также на висящий неподалеку портрет Менделеева. Я заметил, что Менделеев изображен держащим в руке портрет Ломоносова, и объяснил Браггу все символическое значение этого сочетания двух великих людей моей родины, что и было им занесено в записную книжку. Из расположенной по соседству аудитории доносились шум и веселые голоса юной публики, собравшейся слушать одну из лекций рождественской серии.

В кабинете директора я увидел кучку новых одинаковых книг, помеченных уже 1925 годом, которые оказались только что вышедшим изданием таких же рождественских лекций самого сэра Уильяма Брагга „О природе вещей“. Один из экземпляров был любезно предоставлен мне, и я привез его с собой в Москву. Теперь книга выходит в свет в русском переводе.

Упомянутые здесь имена, связанные в моих воспоминаниях с этой книгой, принадлежат к ряду крупнейших вех, которым следовала человеческая мысль по пути к познанию природы вещей. Ломоносов — гений, опередивший свой век более чем на 150 лет, первый предвидел то тесное единение химии и физики, которое осуществилось теперь в области учения об атомах. Менделеев, его прямой научный потомок, первый расположил атомы в стройный периодический ряд. Фарадэй

первый тесно связал химические явления с электрическими, и, основываясь на его открытиях, мы теперь нашли разгадку правильности Менделеевского ряда в электрической природе атомов. Сэр Уильям Брагг основал спектральный анализ рентгеновских лучей и тем самым проторил нам путь к недрам атома и первый научил нас определять положение атома в кристаллах.

В своей книге Брагг является талантливым популяризатором атомистической теории в ее современном состоянии. Многие места книги вполне оригинальны, будучи основаны на личных исследованиях автора и его сотрудников. Это придает книге громадную научную ценность, а живой, образный язык делает чтение книги увлекательным. Все это, несомненно, придает книге большой интерес.

*Проф. Г. Вульф.*

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

В моих рождественских лекциях, читанных в Королевском Обществе в 1923 — 1924 г.г., 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. Интересны потому, что вскрывают красоту природы, и ценны потому, что проливают свет на многие старые загадки и, несомненно, помогут разрешить немало вновь встающих проблем. Я не закрываю глаз на два особых затруднения, которые могут здесь встретиться. Первое, 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 попытаются построить модели тех немногих кристаллов, которые упоминаются в этой книге, а может быть 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.

В конце книги приложено краткое наставление к изготовлению моделей.

---

# СОДЕРЖАНИЕ

---

	<i>Стр.</i>
<i>Предисловие к русскому изданию . . . . .</i>	III
<i>Предисловие автора . . . . .</i>	V
Л Е К Ц И Я I.	
<i>Об атомах, из которых построены вещи . . . . .</i>	
Л Е К Ц И Я II.	
<i>О природе газов . . . . .</i>	2
Л Е К Ц И Я III.	
<i>О природе жидкостей . . . . .</i>	56
Л Е К Ц И Я IV.	
<i>О природе кристаллов: алмаз . . . . .</i>	78
Л Е К Ц И Я V.	
<i>О природе кристаллов: снег и лед . . . . .</i>	108
Л Е К Ц И Я VI.	
<i>О природе кристаллов: металлы . . . . .</i>	136
<i>Приложение . . . . .</i>	164

---



## ЛЕКЦИЯ ПЕРВАЯ.

### ОБ АТОМАХ, ИЗ КОТОРЫХ ПОСТРОЕНО ВЕЩЕСТВО.

Приблизительно две тысячи лет тому назад Лукреции, известный латинский поэт, написал свой трактат „*De rerum natura*“ („О природе вещей“). В этом сочинении он проводит мысль о том, что воздух, земля, вода и все существующее состоит из бесчисленного множества малых телец, или частичек, каждая из которых слишком мала, чтобы быть видимой, и все эти частицы находятся в состоянии быстрого движения. Лукреций пытается показать, что этих предположений достаточно для объяснения свойств материальных вещей. Сам он не был создателем идей, развитых им в его поэме; он хотел распространить воззрения одной из философских школ того времени — воззрения, которые сам считал правильными. Существовал противоположный взгляд, по которому, как бы мы пристально ни изучали материю, мы никогда не можем вывести никаких заключений об ее структуре: мы можем, например, представить себе воду, налитую в какой-нибудь сосуд, разделенной на капли, которые в свою очередь делятся на еще более мелкие капли, но каждая самая мелкая капля во всех своих свойствах подобна воде, взятой в большом количестве. Согласно взглядам Лукреция, продолжая деление материи достаточно далеко, мы должны притти к отдельным частицам или атомам; слово атом здесь употреблено в его первоначальном смысле — неделимое.

Между указанными двумя воззрениями имеется глубокая разница. По одному из них мы ничего не выигрываем, изучая ближе строение вещества, потому что, идя по этому пути, мы ни к чему новому не приходим. По другому — природа вещей, насколько мы ее знаем, зависит от свойств атомов, из которых они построены: поэтому очень интересно и важно узнать — если это возможно, — что представляет собой атом. Этот последний взгляд на природу вещей более близок к истине, нежели первый;

кроме того он открывает широкие возможности для того, кто любит исследовать законы природы.

Лукреций, однако, не имел представления об атомной теории, в ее современной форме. Он не знал, что сами атомы могут быть различного рода и что атомы одного и того же сорта все одинаковы. Эта идея сравнительно нова: она была развита с большой ясностью Джоном Дальтоном в начале девятнадцатого века. Благодаря ей сделались возможными огромные успехи, достигнутые в новейшее время химией и всеми науками, так или иначе с нею связанными. Легко видеть, почему эта новая мысль упростила изучение вещества. Это потому, что мы имеем дело только с конечным и притом небольшим числом различных сортов атомов. Можно было бы притти в отчаяние, если бы, например, оказалось, что кусок меди состоит из множества различных атомов. Но если мы узнаем, что чистая медь состоит из атомов одного только сорта и что различных сортов их вообще немного, мы можем надеяться, что нам удастся изучить свойства атомов и законы их соединений. Ибо, конечно, в этих соединениях заключается самая существенная и важная сторона дела. Атомы можно сравнить с буквами алфавита, которые могут быть комбинированы всевозможными способами для образования слов; подобно этому атомы различных сортов, соединяясь друг с другом, образуют то, что названо молекулами. Мы можем развить эту аналогию несколько дальше и сказать, что соединения слов в фразы и суждения подобны комбинациям молекул всех сортов и во всевозможных отношениях, образующим материалы во всем их бесконечном внешнем и внутреннем разнообразии.

Атомная теория Лукреция не содержала в себе, следовательно, той идеи, которая оказалась существенно необходимой для ее дальнейшего роста и развития. Она заглохла, и слово „атом“ стало употребляться в неопределенном и неправильном смысле для обозначения очень маленьких вещей; так, например, им пользуется Шекспир в своих пьесах. В совершенно другой области „атомная“ теория Лукреция оказалась очень плодотворной. Он думал, что болезни вызываются также особыми частицами. В эпоху Возрождения Фракасторо, вдохновленный поэмой Лукреция, создал атомную теорию инфекционных заболеваний. Эта теория была забыта, и тайна бактериологии была вновь открыта Пастером.

Представим себе природу зодчим, строящим все, что мы видим, из атомов определенного конечного числа сортов; подобно тому как архитектор строит дом из небольшого числа различных вещей — кирпичей, шифера, досок, стекол,— так и все вещи построены примерно из девяноста сортов различных атомов, при чем довольно большое число из этих сортов встречается очень редко. Чрезвычайно удивительным и поражающим является то обстоятельство, что все вещи на свете и во всей вселенной, насколько мы ее знаем, построены из столь малого числа элементов. Вселенная, такая богатая в своем многообразии, земля и все, что на ней существует и произрастает, воды океанов, воздух и облака, все живое население земли, морей и воздуха, наше тело и его органы, Солнце, Луна и звезды,— одним словом, всякая вещь, существующая в мире, построена из атомов разных родов, число сортов которых очень невелико. Правда нам могут возразить, что, как архитектор, имеющий в своем распоряжении кирпичи, известь и железные стропила, может строить самые разнообразные вещи — дворцы, дома, мосты,— так и природа из небольшого числа элементов может создать все разнообразие видимого мира. Не надо забывать, однако, что архитектор, собирающийся строить, имеет выработанный заранее план постройки и дает соответствующие указания рабочим, выполняющим его задания. Здание растет, и архитектор следит за его ростом с планом в руках. Все же структурные планы природы заключены в самих атомах: только ими самими и тем, что в них заложено, обуславливается все многообразие вселенной. Мы не можем теперь ставить вопрос о том, как они сделались такими своеобразными хранилищами сокровищ. Мы хотели бы знать, что представляют собой атомы; и этот вопрос возникает даже теперь, когда уже более ста лет прошло с тех пор, как была выяснена вся принципиальная важность атомной теории. Имеют ли они размеры, форму и другие характеристики, подобно окружающим нас телам? Сейчас мы и займемся этим вопросом.

Прежде всего надо указать на то, что за последние двадцать пять лет мы, так сказать, получили в свое распоряжение новые глаза. Открытие радиоактивности и рентгеновых лучей изменило самым существенным образом положение дела: этим, между прочим, и определился подбор материала для настоящих лекций. Мы можем теперь понять множество вещей, которые

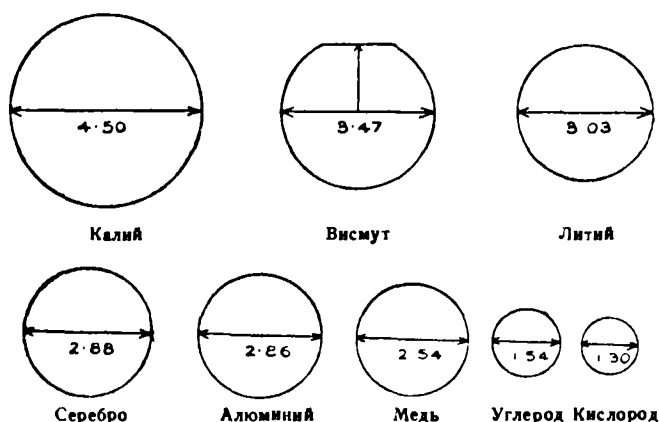
были темны до этих открытий; в то же время перед нами открылся целый новый мир, требующий исследования. Я не думаю, что проникновение в него и путешествие в этом мире сопряжено с большими затруднениями. В самом деле новые знания осветили почву, по которой мы шли, и сделали простым и легким то, что до этого казалось трудно-достижимым. Правда, что идя по новым путям, мы можем столкнуться с новыми трудностями, но в этом-то и заключается весь интерес и смысл исследований. Попробуем сделать первые шаги в этой новой области, с тем, чтобы приобщиться к знанию, уже ранее добытому и день ото дня все быстрее развивающемуся.

Возвратимся к вопросу об атомах. Еще гораздо раньше нового периода в науке ответ на поставленный вопрос о размерах атомов был дан с большой точностью, по крайней мере для некоторых атомов. С этой кафедры Королевского Института лорд Кельвин читал несколько речей о свойствах атомов вообще и, в частности, об их размерах. Путем остроумных косвенных соображений он пришел к заключениям, которые теперь могут быть проверены самыми точными методами. Эта проверка показывает, насколько близко он подошел к истине. Было, конечно, гораздо труднее судить о размерах отдельного атома, чем решить вопрос о том, во сколько раз один атом больше другого. Так, например, размеры атомов калия и углерода могут быть, правда очень грубо, сравнены, принимая во внимание относительные веса равных объемов твердого металлического калия и алмаза, который представляет собой чистый углерод. Калий легче воды, алмаз в три с половиной раза тяжелее ее. Но из химических опытов мы знаем, что каждый индивидуальный атом калия немного больше чем в три раза тяжелее атома углерода. Если считать, что атомы в обоих веществах расположены одинаково (как мы теперь знаем, это приблизительно верно), то мы можем сказать, что атомы калия больше атомов алмаза, потому что хотя каждый из них более тяжел, но в веществе они располагаются так, что образуют более легкий материал.

Оценить размеры отдельного атома гораздо труднее, но все четыре приема лорда Кельвина помогают ему получить очень близкие к истине результаты. „Атомы или молекулы вещества могут иметь диаметры в пределах от  $\frac{1}{10\ 000\ 000}$  до  $\frac{1}{100\ 000\ 000}$  сантиметра“. Наши новые методы исследования говорят нам,

что диаметр атома углерода равен 1,54 стомиллионных долей сантиметра, а диаметр атома калия—4,50 стомиллионных долей сантиметра. Мы видим, что оценка размеров атомов по лорду Кельвину очень близка к истине, — факт тем более удивительный, что он получил свои размеры атомов неточными и косвенными путями.

На фиг. 1 даны сечения некоторых атомов в масштабе 1 к 5 миллионам. Каждый чертеж дает расстояние в стомиллионных долях между центрами двух соседних атомов чистого вещества. Так, например, расстояние между двумя атомами углерода в алмазе равно 1,54 стомиллионных долей сантиметра. В слу-



Фиг. 1. Сечения некоторых атомов.

Диаметры выражены в стомиллионных долях сантиметров.

чае кислорода соответствующий диаметр был вычислен из структуры кристаллов, содержащих кислород. Если бы аудитория Королевского Института была увеличена в том же масштабе, как атомы на фиг. 1, то ее высота была бы больше расстояния от Земли до Луны. Очень полезно провести такое сравнение для того, чтобы наглядно представить себе, как малы все эти вещи, о которых идет речь. В то же время мы должны помнить, что как бы малы они ни были, пренебрегать ими нельзя, потому что они являются актуальными элементами, из которых строится вселенная, и их малые размеры не лишают их того громадного значения, которое они имеют. Но эта малость легко объясняет ту трудность исследования их, с которой мы столкнулись, когда уже вполне оценили их значение. Вся ценность новых методов исследования, о которых я предполагаю говорить, заключается

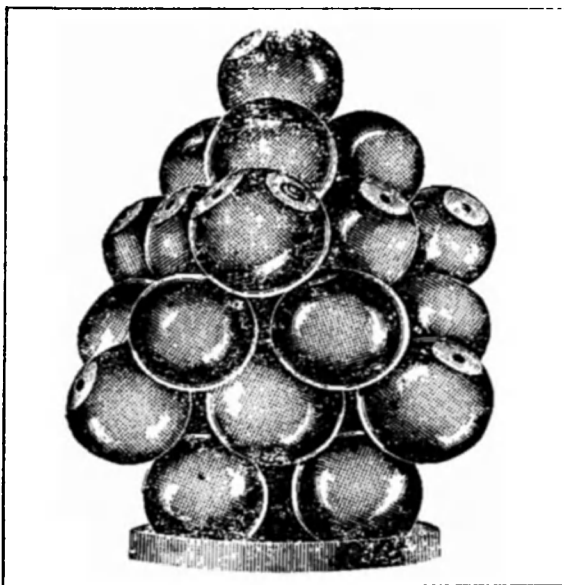
в том, что благодаря им удалось распознавать отдельные атомы, несмотря на их малые размеры.

Мы можем теперь дать точный ответ 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.

Химик, занятый изучением соединений атомов, очень редко сталкивается с необходимостью иметь представление о форме атома; на своих диаграммах он не дает им никакой определенной формы. Это не значит, что форма атома не имеет существенного значения; это указывает скорее на бессилие старых методов определить ее. Есть, однако, такие обстоятельства, когда химику приходится задуматься над вопросом о форме атома. Атомы в соединениях располагаются в определенном порядке, который характеризует соединение. Если бы можно было видеть их расположение и зарисовать его, то пришлось бы давать пространственное изображение вещества. К изображению таких пространственных распределений атомов приходится прибегать особенно часто в органической химии. В этом случае недостаточно дать плоскую картину, не давая пространственной; плоский чертеж является неполным и несовершенным во всякого рода химической картине. К сожалению мы должны прибегать к плоскостным изображениям: пространственные модели сделать трудно и дорого, тогда как нет ничего проще прибегнуть к помощи бумаги и карандаша. Курьезно подумать, что такое чисто техническое затруднение мешает изучению таких существенно важных вопросов. Однако если мы хотим описать расположение атомов относительно их соседей и говорим, что один сосед лежит в этом направлении, а другой должен лежать в том, мы тем самым приписываем атомам определенную форму,—по крайней мере, это все, что мы можем говорить в настоящее время об их формах. Больше этого мы не можем ничего сказать, пока мы не знаем внутренней структуры самого атома—из каких частей он состоит и в каком отношении друг к другу находятся его части.

В новейших работах, как мы увидим, расположение атомов изучено гораздо ближе, и впервые были измерены расстояния между ними. Мы считаем необходимым строить модели, потому что мы не видим пространственного расположения с достаточной ясностью, если ограничиваемся только описанием его

на бумаге. Атомы мы представляем в виде шариков; с помощью такой модели нам удастся дать наглядные представления большей части наших открытий в этой области. Вполне естественным и самым собой напрашивающимся является представление о том, что если соседями атома являются атомы того же сорта, то все они находятся друг от друга на равных расстояниях; это и наблюдается в действительности. Существуют, однако, исключения, одним из которых является кристалл чистого вис-



Фиг. 2. Модель кристалла висмута.

Модель дает расположение атомов в кристалле висмута. Каждый атом представлен шариком с тремя плоскими срезами.

мута: в нем каждый атом имеет шесть соседей, из которых три расположены к нему ближе, чем остальные три. Моделью атома висмута может служить шарик с тремя плоскими срезами (фиг. 2).

Спросим себя, что связывает атомы друг с другом в различных соединениях и структурных формах. Подобно нашему архитектору, мы имеем под руками материал для постройки — кирпичи, шифер, стропила, — мы имеем атомы различных сортов. Но если мы будем искать в веществе цемент или гвозди, то мы ничего подобного не найдем. Природа не нуждается ни в каком материале, подобном цементу. Атомы сцепляются

друг с другом сами собой. Химик скажет нам, что для этого они должны быть представлены друг другу в подходящих условиях, из которых некоторые встречаются очень редко. Соединение атомов, однако, происходит, и то, что удерживает их в соединении, когда выполнены все надлежащие условия, есть нечто, свойственное самим атомам. Вся химия собственно занимается изучением природы этих условий и результатов их выполнения.

Атомы различных сортов стремятся сцепиться друг с другом так же, как стремятся притянуться два магнита, обращенные друг к другу противоположными полюсами, или два электрических заряда разных знаков. В самом деле нельзя сомневаться в том, что в атомах проявляются и электрические и магнитные притяжения. Мы не можем считать себя совершенно несведущими относительно характера этого притяжения, но мы знаем гораздо больше о законах соединений — так сказать, о фактической стороне химии, — чем о самом процессе притяжения атомов друг к другу. Однако мы можем пока не смущаться этими вопросами; мы можем просто считать, что существуют некоторые силы, притягивающие атомы друг к другу.

Может возникнуть вопрос, почему же, если существуют такие силы, все атомы не соединятся в одну твердую массу? Почему вообще существуют разные газы и даже жидкости? Как может существовать атом, не соединившийся со своими соседями? Что предохраняет Землю от падения на Солнце и всю вселенную от превращения в одно твердое тело?

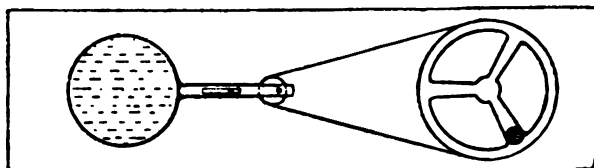
Земля не может упасть на Солнце, потому что она вращается около него, или, что более правильно, потому что и Земля и Солнце вращаются друг около друга. Именно это движение удерживает их на определенном расстоянии; если мы взглянем внимательнее на дело, то найдем, что движение играет роль первостепенной важности во всем, что мы видим, так как оно само действует против тех притягательных сил, которые стремятся соединить все атомы в один комок. В газах движение особенно сильно; атомы их движутся так быстро, что никакие комбинации их не успевают возникнуть: может случиться, что атомы готовы соединиться — они, так сказать, протянули друг другу руки, — но движение их слишком быстро, и через мгновение оба они оказываются уже далеко друг от друга. Даже в жидкостях, где атомы все время находятся в соприкосновении



и где легче могут возникнуть комбинации их, движение еще настолько велико, что никакое соединение их не может быть прочным.

В твердых телах роль и значение притягательных сил и движения меняются: притяжение берет верх над движением; атомы и молекулы прикреплены к своим местам. На самом деле, однако, даже в твердом теле атомы никогда не остаются в покое. Они колеблются и дрожат около некоторого среднего своего положения так же, как дрожат части стального моста, когда по нему идет поезд. Трудно свыкнуться с представлением, что атомы и молекулы вещей, которые находятся, повидимому, в совершенном покое — атомы в столе, в куске бумаги, в воде, налитой в стакан, — все время движутся. Однако уже многие из старых философов ясно понимали это. Так, например, Гук, английский физик семнадцатого века, объясняет при помощи наглядной аналогии разницу между твердыми и жидкими телами, приписывая ее тому, что движение атомов тела в жидком состоянии сильнее, чем в твердом. „Прежде всего,—говорит он,— что является причиной перехода в жидкое состояние? Я думаю, что не что иное, как быстрые и сильные движения частиц тела (вероятность этого я обосновал в другом месте); вследствие движения, частицы тела теряют связь друг с другом, расходятся и приобретают способность легко перемещаться. Тело становится жидким. Я могу разъяснить это несколько с помощью следующего грубого уподобления. Пусть у нас есть слой песку, насыпанный на теле, которое может сильно раскачиваться и трястись быстрым колебательным движением, например верхний жернов, быстро вращающийся относительно нижнего, или туго натянутый барабан, по которому сильно и резко ударяют палочкой. Благодаря этому песок, казавшийся неподвижным, приобретает свойства совершенной жидкости. Вы уже не можете сделать в нем углубление, вдавливая его пальцем, — оно сейчас же заполняется, и поверхность песка выравнивается. Вы не можете также зарыть в него какое-нибудь легкое тело, например пробку, потому что она сейчас же появляется и плавает на поверхности; точно также нельзя на поверхность песка положить что-нибудь тяжелое, вроде кусочка свинца; он погружается в песок и падает на дно. Невозможно также сделать дырочку в стенке сосуда с песком, так как при тряске он высыпается до уровня отверстия. Таким

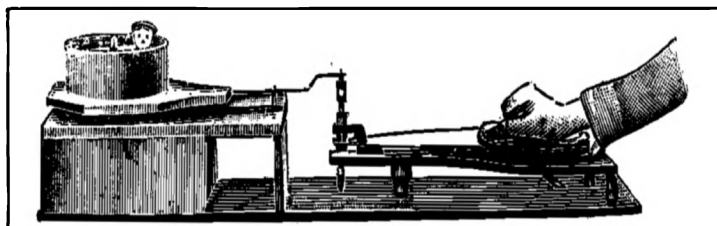
образом песок, не имеющий ни одного свойства жидких тел, ведет себя, как жидкость; и это все обуславливается только быстрыми движениями сосуда, в который он насыпан. Благодаря этому движению каждая песчинка приходит в колебательное пляшущее движение, так что никакое тяжелое



Фиг. 3. Схема опыта Гука.

тело не может оставаться в покое на нем, если оно не поддерживается стенками сосуда, и никакое тело не может быть под ним кроме тех, которые тяжелее его самого“.

Опыт Гука можно повторить в несколько измененном виде. Металлическая цилиндрическая коробка, в двадцать пять сантиметров шириной и около восьми сантиметров глубины, устанавливается на платформе, сидящей на металлических шариках и потому удобоодвижной. Платформа эксцентрически соединена с вращающимся колесом, как показано на фиг. 3. Когда колесо вращается быстро, ящик и песок, находящиеся в нем,



Фиг. 3а. Колеблющаяся коробка с песком.

Цилиндрическая коробка находится налево; изображены также целлулоидные фигурки.

сильно встряхиваются, как это описано у Гука. Подробности механизма можно легко понять из рассмотрения рисунка. Тяжелый металлический шар, помещенный на поверхности песка, тонет в нем, а легкие предметы вроде шариков из целлулоида держатся на поверхности. Очень забавно ведут себя в дви-

жушемся песке погруженные в него целлулоидные фигурки с тяжелым основанием, которые никогда не могут опрокинуться,—Ваньки-встаньки. Они медленно поднимаются из него и, наконец, становятся вертикально (фиг. 3 и 3а).

Мы знаем теперь, что теплота есть движение атомов тела; чем быстрее они движутся или колеблются, тем горячее становится тело. Когда мы нагреваем нашу руку, поднося ее к огню, мы, собственно говоря, ускоряем за счет излучаемой огнем энергии движение атомов нашего тела. Охлаждая какое-нибудь вещество, мы задерживаем движение его частиц. Если бы мы захотели совершенно прекратить это движение, мы должны были бы понизить температуру тела до предела, который невозможно перейти,—до абсолютного нуля, как его обычно называют, лежащего на  $273^{\circ}$  ниже нуля.

Как я уже сказал, мы нашли новых союзников — радиоактивность и рентгеновы лучи — в нашем стремлении увидеть атомы. Они увеличили тонкость нашего зрения в несколько десятков тысяч раз. Микроскоп дал нам все, что можно было от него получить; но те мельчайшие предметы, которые мы рассматриваем с его помощью, все-таки составлены из биллионов атомов. В изготовлении линз для микроскопа нельзя уже ожидать никаких усовершенствований; здесь уже развитие техники достигло своего высшего предела. Трудности, которые здесь возникают, обусловлены тем, что свет есть волновое движение, а волны света могут сделать видимыми только такие детали предметов, которые во много раз больше их самих. Мы ждали нового света с очень короткими волнами. Он явился в виде рентгеновых лучей. В то же самое время радиоактивность пришла к нам на помощь и показала, как можно обнаружить отдельные атомы, если они находятся в движении с огромными скоростями. Мы можем теперь с полной достоверностью, хотя и не непосредственно, видеть отдельные атомы и следить за их дальнейшей судьбой. Рентгеновы лучи помогают нам в первом, радиоактивность — во втором. Я хочу объяснить вам, как оба эти агента могут быть использованы, и начну с радиоактивности.

Атом радия может быть, грубо конечно, представлен одним из этих больших шаров, которые лежат перед вами. Он является одним из самых тяжелых и больших атомов; совокупность этих атомов образует вещество—металл, подобный золоту и железу. Атом радия не обнаруживает никаких особенностей,

пока он остается атомом радия, но вдруг по причинам, которые нам неизвестны, наступает момент, когда он разрывается. Часть его выбрасывается, как ядро из пушки, остаток отбрасывается назад, как самая пушка. То, что остается после взрыва, не есть радий, это уже атом меньших размеров, имеющий совершенно другие свойства. Радий превратился в новое вещество. Новое вещество представляет собой газ, а вылетевший из атома радия снаряд оказывается атомом вещества с очень малым атомным весом, занимающим второе место в ряду атомных весов; оно называется гелием. Никто не знает, как происходит взрыв атома радия; никто не знает способа ускорить или задержать момент взрыва. Атом радия взрывается совершенно одинаково в определенный момент, независимо от того, окружен ли он жидким воздухом или помещен в пылающий горн. Это постоянство и независимость от окружающих условий момента взрыва атома подтверждается и подчеркивается тем, что соединения радия с другими веществами никак на нем не сказываются. Химические соединения или молекулярные образования связаны, конечно, с каким-то внешним распределением атомов: но взрыв атома происходит внутри него самого.

Старые алхимики искали средство обращать один атом в другой, главным образом свинец в золото. То, что происходит с радием, есть трансмутация — если употреблять это старое выражение, — об одном из видов которой мечтали алхимики.

Однако это не совсем то, чего они добивались, и по двум причинам. Во-первых, это превращение не может быть направлено по желанию человека, — что очень удивительно, так как немного есть вещей, о которых можно было бы это сказать.

Ведь даже тогда, когда мы не понимаем вполне происходящего перед нами явления, мы можем часто рассчитать, случится оно или нет. Мы не в состоянии понять, как прорастает семя, тем более мы не можем приготовить его, но мы можем как угодно долго задержать его прорастание. Однако взрыв атома радия не хочет считаться с нами.

С другой стороны, трансмутация, наблюдающаяся в атомах радия, кончается не золотом, а как раз свинцом. Газ, который состоит из атомов радия, выбросивших один атом гелия, очень недолговечен: средняя продолжительность существования его атома немного менее четырех дней, тогда как средняя продолжительность жизни атома радия около двух тысяч лет. Второй

взрыв „превращает“ атом газа в новое вещество, названное радием А, при чем освобождается второй атом гелия. Затем идет целая последовательность взрывов, разделенных неправильными промежутками, и конечным продуктом распада является не золото, а свинец. Газ, который получается из радия, Резерфорд, открывший его, назвал „эманацией радия“.

Все это превращение чрезвычайно удивительно, но я хочу обратить сейчас ваше внимание на то, что происходит с нашим снарядом — атомом гелия, — когда он оставляет пушку — атом радия. Скорость, с которой он выбрасывается, так велика, что трудно даже было предположить, что частицы материи могут обладать ею. Гюйгенс в споре с Ньютоном о природе света отвергал предположение Ньютона о том, что свет представляет собой поток частиц, именно на том основании, что материальные частицы не могут двигаться с такими большими скоростями, как скорость света, которая тогда только что была определена. Любопытно отметить факт, что мы теперь встретились с атомами, движущимися со скоростями, только в десять, двадцать раз меньшими той, которая считалась для них невозможной. Существуют еще частицы особого рода, так называемые электроны, также выбрасываемые радиоактивными веществами, которые в некоторых случаях обладают скоростями, очень близкими к скорости света. Очень интересным является то обстоятельство, что и второй аргумент Гюйгенса оказался несостоятельным благодаря открытию радиоактивных явлений. Он говорил, что по теории Ньютона два человека не могут видеть глаз друг друга, потому что частицы, вылетающие из глаз каждого, должны сталкиваться друг с другом и падать. Мы покажем, что и это возражение приходится отвергнуть на основании новых фактов, полученных при изучении радиоактивности.

Скорость, с которой атом гелия начинает свой полет, равна приблизительно 20 000 километрам в секунду. Меньше минуты потребовалось бы ему, чтобы долететь до Луны и обратно, если бы скорость его оставалась постоянной, но оказывается — и это очень любопытный факт, — что скорость и энергия, с которыми он вылетает, сохраняются недолго, когда он проходит через вещество. Даже тогда, когда он принужден кончить свой путь в воздухе, его скорость падает до обычных средних значений на протяжении пяти или семи сантиметров

пути. Путь атомов гелия, вообще говоря, строго прямолинеен; и это весьма важное обстоятельство, которое мы должны рассмотреть с особым вниманием. На первый взгляд может показаться непонятным, почему мы считаем столь замечательным фактом прямолинейность пути атома; каждый вспоминает о пуле, пронизывающей кусок дерева и оставляющей цилиндрический канал в нем, или о прямолинейном полете пуль в воздухе. Это сравнение, однако, неправильно. Пуля представляет собой массу свинца, бесконечно большую и тяжелую по сравнению с массами встречных молекул; она раскидывает их в стороны. Но атом гелия легче и меньше атомов азота и кислорода, из которых, главным образом, состоит воздух; поэтому мы должны подыскать более верную аналогию. Представим себе несколько бильiardных шаров, лежащих на столе; пусть они изображают молекулы воздуха. Если бы они двигались, паша картина более бы соответствовала действительности, но это последнее обстоятельство несущественно. Пустим теперь по столу один шар, нацелясь им в определенное место противоположной стороны стола, и посмотрим, что произойдет, когда шару придется пробираться через скопление лежащих на столе шаров, движущихся или покоящихся. Он заденет один из шаров и отклонится в сторону; после нескольких последовательных столкновений он совершенно потеряет первоначальное направление своего движения. Что будет, если теперь его толкнуть посильнее? Не сохранит ли он дольше прямолинейность своего пути? Попробуем сделать это; мы увидим, что результат будет тот же. Прямолинейность пути не может быть сохранена увеличением скорости, хотя бы и большим.

Эта картина или модель гораздо ближе соответствует действительности, чем летящая пуля, и ясно выявляет замечательные свойства радиоактивных процессов. Атом гелия может столкнуться с очень большим числом молекул воздуха, двигаясь по прямолинейному пути, особенно если он имеет именно те ничтожные размеры, какие мы у него предполагали. В самом деле молекулы воздуха лежат гораздо чаще и теснее на пути атома, чем мы это могли представить на нашей бильiardной модели. Можно подсчитать, сколько молекул воздуха, частью кислорода, частью азота, пересечет прямая в семь с половиной сантиметров длиной, проведенная в слое воздуха в какой-нибудь данный момент времени. Результат подсчета выразится в сотнях тысяч

молекул. Как может атом гелия пронестись по прямому пути через такую густую кучу молекул, каждая из которых тяжелее его самого? Это, однако, так, и нам надо дать этому факту объяснение.

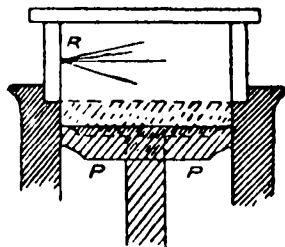
Можно было бы думать, что прямолинейность пути атома гелия только кажущаяся и что если бы мы могли достаточно тщательно проследить его путь, то увидели бы, что он состоит из бесчисленных зигзагов, сделанных атомом при обходе встречных молекул. Однако минутное размышление покажет нам, что такое предположение нелепо: атом не может обладать сознательностью живого существа, которая бы дала ему возможность вернуться к первоначальному направлению движения. Если бы речь шла о кондитерской на противоположной стороне многолюдной улицы, и если бы вы дали мальчику денег и послали бы его в кондитерскую, то он, несомненно, переходил бы улицу по прямому пути, хотя ему приходилось бы увертываться от встречных прохожих и экипажей. Мы не можем, конечно, думать, что атом гелия способен проделать нечто подобное во время своего путешествия в веществе. Остается единственное объяснение этого чуда прямолинейности пути: мы должны предположить, что атом гелия проходит сквозь встречные молекулы и может это делать благодаря той огромной скорости, с которой он движется.

Эта мысль кажется сначала очень смелой и поразительной, но все остальные предположения неудовлетворительны. Кроме того, если принять такое объяснение, то можно с помощью его объяснить целый ряд других фактов. Поэтому мы можем быть уверены, что идем правильным путем.

Теперь, пожалуй, следует посмотреть на самом деле это явление: те выводы, к которым мы пришли, так новы, необычайны и полны значения, что было бы желательно демонстрировать самые явления и убедиться непосредственно в существовании прямолинейных путей атомов гелия. Мы обязаны К. Т. Вильсону прекрасным прибором, который дает живую картину всего явления и который мы вам сейчас продемонстрируем. Этот опыт является, по моему мнению, одним из самых замечательных в науке. Мы увидим действительные пути атомов гелия, каждый из которых начинает свой полет со скоростью в двадцать тысяч километров в секунду и заканчивает его, пройдя слой воздуха в 7,5 см толщиной. Сначала

мы дадим некоторые объяснения относительно устройства и действия самого прибора, в конструкцию которого вложено много остроумных идей.

В нем имеется прежде всего цилиндрический латунный ящик со стеклянной крышкой и подвижным дном, вдвигая и выдвигая которое, мы можем менять глубину ящика (фиг. 4). Тут имеется целая система передач, кривошипов и рычагов, с помощью которых дно ящика может быть очень быстро выдви-



Фиг. 4. Разрез камеры для разрежения в приборе Вильсона для измерения следов атомов гелия (см. также фиг. 5).

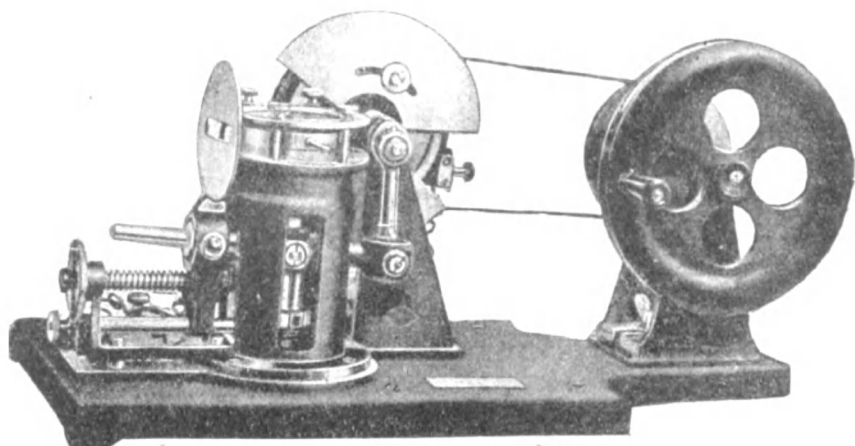
Поршень  $PP$  быстро опускается из положения, отмеченного пунктиром, до положения, отмеченного сплошной чертой. Таким образом воздух в камере сразу охлаждается благодаря расширению, и туман осаждается вдоль путей атомов гелия, выброшенных радием, помещенным в  $R$ .

нужно заметить кстати, что тут мы наглядно убеждаемся в том, как много атомов содержится в самом маленьком кусочке вещества. Воздух в камере поддерживается влажным; следовательно охлаждение, вызванное расширением, должно вызвать в нем образование тумана. Туман же всегда предпочитает осаждаться на твердых частицах различного рода, а не образовывать отдельные капли, висящие в воздухе. Мелкие частицы пыли, если таковые имеются, являются удобными центрами конденсации, чем и объясняется легкое образование туманов в пыльной атмосфере. Но охотнее всего

нуто на определенную длину (фиг. 5). Всякий раз, как это происходит, воздух или другой какой-нибудь газ, содержащийся в ящике, охлаждается вследствие быстрого расширения. Мы разберем явления этого рода более подробно в ближайшей лекции. Внутри ящика на одной из его сторон помещен маленький препарат, крупинка радия. Каждое мгновение какой-нибудь из его атомов распадается и освобождает атом гелия, часть которых выбрасывается прямо в ящик. Диаметр ящика достаточно велик для того, чтобы атом гелия мог окончить свое путешествие в воздухе, находящемся в ящике. Средняя продолжительность жизни радия так велика, что если бы наш прибор действовал в течение двух тысяч лет, то успела бы распасться только половина крупинки радия. Каждую секунду десять, двадцать, сто атомов теряются в виде выброшен-



Влага осаждается на тех атомах, через которые прошел атом гелия. Причина этого заключается в том, что такие атомы оказываются несколько измененными; от них отделена очень маленькая часть их. Эта выброшенная часть есть то, что называется теперь „электроном“; она заряжена отрицательным электричеством, а, стало быть, атом, который ее потерял, заряжается положительным. Освобожденный электрон раньше или позже сядет на один из соседних атомов; таким образом получается два заряженных атома, отрицательный и положитель-



Фиг. 5. Прибор Шимизу—Вильсона.

Прибор для демонстрации путей атомов гелия, выброшенных радием. Камера, изображенная схематически на фиг. 4, видна вверху слева. Диск налево представляет собой экран с отверстием. Свет от фонаря, не изображенного на фигуре, проходит через отверстие и освещает туманные следы. Второй экран вращается и пропускает лучи радия, т.-е. атомы гелия, в камеру, как раз перед разрежением. Справа расположен мотор.

ный, тогда как сначала совсем не было заряженных атомов. Атом, несущий на себе заряд, имеет большую склонность к влажности, и туман особенно легко образуется на таких атомах. Если, следовательно, атом гелия пронесся по прямолинейному пути через газ и оставил за собой заряженные атомы вдоль своего пути и если в то же время внезапное расширение вызовет охлаждение, то туман осядет вдоль пути атома гелия. Если осветить ярким пучком лучей нашу камеру, то направления, в которых осел туман, становятся видимыми как светлые прямые линии на темном фоне камеры. Они держатся в течение нескольких минут, после чего частицы тумана

медленно рассеиваются. Если атом гелия кончает свой путь как-раз перед тем, как образовался туман, то линии особенно резки и отчетливы, потому что заряженные атомы не успели еще уйти с пути атома гелия. Если же атомы гелия прошли через воздух до того, как он был разрежен, то туманные линии более размыты. Не надо забывать, что атомы гелия выбрасываются все время, днем и ночью, и что только тогда, когда произведено разрежение, их пути становятся видимыми<sup>1)</sup>.

Если мы подождем следующего разрежения, то увидим, что следы атомов гелия, совершенно прямые на большей части их протяжения, претерпевают иногда внезапные резкие отклонения, особенно тогда, когда путь атома гелия близок к концу. Это явление весьма замечательно, и мы сейчас к нему и перейдем.

Попробуем представить себе, как надо изменить наше первоначальное представление об атоме для того, чтобы иметь возможность объяснить те явления, которые мы только что видели.

Атомы должны быть устроены таким образом, чтобы при встречах друг с другом в обычных условиях, например при столкновениях молекул кислорода в воздухе, они вели себя так, как будто у каждого из них есть такая область, куда другой проникнуть не может. Даже в том случае, когда они тесно связаны между собой, как например в твердых телах, они все-таки занимают такое пространство, которое достаточно для того, чтобы все их разместить. Но когда один атом — атом гелия, который всегда служит нам примером, — выбрасывается с достаточной скоростью в пространство, занятое другими атомами, то он проникает через них так, как будто для него пали все укрепления, защищавшие заповедную область. Мы можем удовлетворительно объяснить это, если представим себе атом в виде маленькой солнечной системы. В нем есть ядро, соответствующее солнцу, и вокруг ядра — спутники, или планеты, которые мы называем электронами. Ядро заряжено положительным электричеством; каждый электрон заряжен отрицательно, и все они совершенно одинаковы. Положительный заряд ядра имеет

---

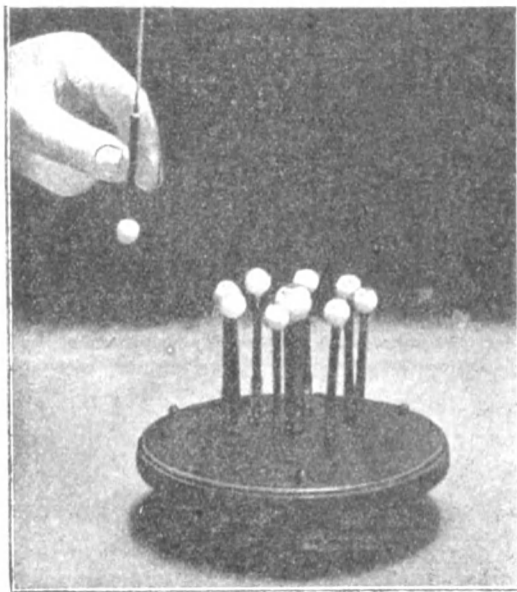
<sup>1)</sup> Во время лекций действие прибора Вильсона было показано на кинематографической ленте, специально для этого изготовленной. Был показан ряд последовательных разрежений, каждое из которых давало новую серию линий, подобных изображенным на фиг. 8.

как-раз такую величину, что компенсирует сумму отрицательных зарядов электронов. Предполагается, что электроны все время движутся так же, как планеты вокруг солнца; это движение, конечно, очень сложно, но вопросом о его природе мы сейчас заниматься не будем. Таким образом вместо твердого шарика определенных размеров — нашей первой грубой модели атома мы имеем нечто подобное солнечной системе в миниатюре. Мы понимаем теперь, что атом, устроенный таким образом, может проходить через другой такой же; точно также мы легко можем представить себе, что одна солнечная система может проникнуть в другую, не разрушая ее, если только одно из тел одной системы не столкнется непосредственно с телом другой системы и если они движутся достаточно быстро. Последнее условие необходимо, потому что если одна солнечная система остается возле другой достаточно долго, то движение ее планет испытывает сильные возмущения.

Но теперь нам приходится задать себе вопрос о том, как же атом, устроенный таким образом, может не пускать другие атомы в область пространства, занятую им самим. Как он сам может удерживать за собой определенное пространство и не допускать в него вторжения других атомов, когда скорости, которыми они обладают при встрече, малы? Ответ на этот вопрос станет очевидным, когда мы обратим внимание на распределение положительного и отрицательных зарядов. Каждый атом окружен слоем или оболочкой из электронов; при столкновении двух атомов прежде всего встречаются их оболочки. Так как одноименные заряды отталкиваются, то и между двумя атомами возникнут силы, которые будут удерживать их на определенном расстоянии; другими словами, каждый атом будет противиться захвату его собственной области. Это, конечно, только очень грубая картина того, что происходит в действительности, и на самом деле очень трудно определить величину этих сил сопротивления на основании таких простых предположений. Если же два атома приближаются друг к другу с большими скоростями, то система электронов и ядро одного из них проходят через систему второго. Все здесь сказанное можно иллюстрировать на модели.

На фиг. 6 представлено несколько прямых магнитов, укрепленных на пружинах и установленных вертикально. Верхним концом среднего магнита служит его северный полюс, у внеш-

них же магнитов кверху обращены их южные полюса. Эта модель представляет ядро, окруженное кольцом электронов. В нашей модели все лежит в одной плоскости; в атоме это не



Фиг. 6. Прямые магниты на пружинах.

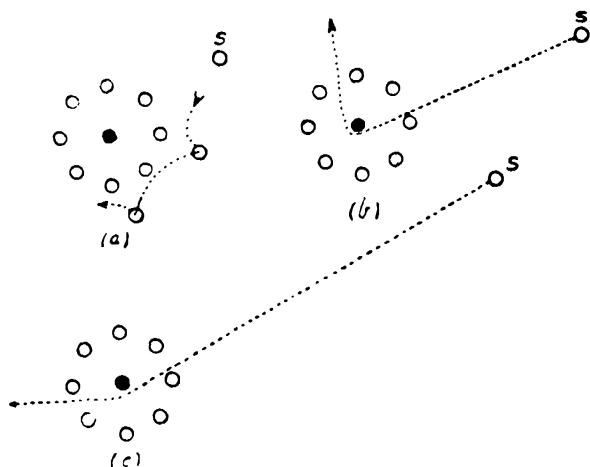
так, но существенно-го значения это упрощение не имеет. Еще один магнит подвешивается на длинной нитке вертикально над „ядром“. Его нижний конец — южный полюс; длина нити подобрана так, чтобы он двигался свободно над неподвижными магнитами. Подвижному магниту в положении  $S$  (см. фиг. 7, а) дается толчок — не очень сильный, — от которого он начинает двигаться по направлению к неподвижным магнитам, но войти в кольцо

их не может. Он, так сказать, стучится подряд во все двери, но везде его гонят. Точно так же напрасно ударяется электрон во внешнюю защитную оболочку атома, если он не ударяется достаточно сильно. Легко можно себе представить вместо одного подвижного магнита систему магнитов, подобную нашей неподвижной; явление от этого не изменится. Таким образом тут мы действительно имеем модель атома, каким мы теперь его себе представляем, сталкивающегося с другими и отталкивающегося от них; каждый из них занимает определенное пространство и препятствует проникновению в него другого атома.

Если подвижный магнит подтолкнуть достаточно сильно так, что он приобретет большую скорость, чем в первом опыте, то в тот момент, когда он достигнет неподвижных магнитов, он будет еще обладать таким количеством движения, которое позволит ему пройти через них. Если его скорость очень велика, то движение его не претерпевает существенных измене-

ний во время его прохождения (см. фиг. 7, *c*). Если скорость его не слишком велика, то изменения его в пути могут быть значительны (фиг. 7, *a*, *b*). Он выходит наружу со скоростью гораздо меньшей той, какую он имел, входя в магнитное кольцо; изменяется направление его движения, и, очевидно, он теряет часть своей энергии, так как неподвижные магниты начинают немного качаться после его прохождения. Все это происходит одинаковым образом независимо от того, каким полюсом обращен вниз подвижный магнит, и ясно, что тот же эффект будет наблюдаться при замене одного подвижного магнита более сложной системой из ядра со спутниками.

Наша модель помогает нам предсказать, что мы должны наблюдать, когда атом, устроенный по нашему новому плану, сталкивается с другим таким же. Если они приближаются с умеренной скоростью, то они могут отразиться друг от друга; при больших скоростях они проходят друг через друга, и чем больше скорость, тем больше шансов за то, что прохождение ничего не изменит. Но всегда возможно, что ядро движущегося атома пройдет так близко от ядра того атома, через который он проходит, что путь атома заметно отклонится от первоначального направления.



Фиг. 7. (a) (b) и (c); объяснение см. в тексте стр. 20 и 21.

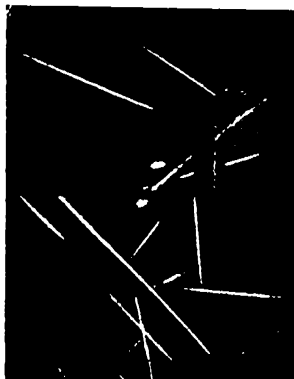
чального направления. Чем меньше ядра, тем менее вероятно, что это произойдет.

Вы теперь легко догадываетесь, что вы действительно видели эти отклонения на кинематографической ленте, точно такие же,

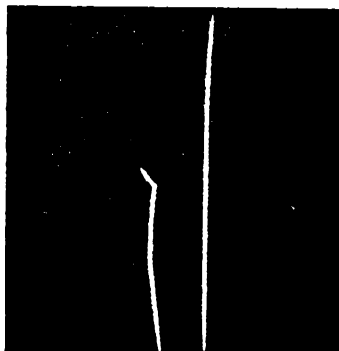
какие представлены на фиг. 8 от А до С. Следы атомов гелия, вообще говоря, представляют собой прямые линии, но на них встречаются изломы, обыкновенно не больше двух на каждом. Главным образом изломы появляются к концу следа атома. Этого, конечно, и следовало ожидать, так как движение к концу



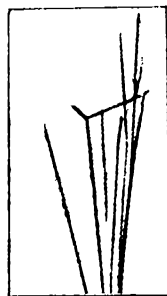
А



В



С



D

Фиг. 8. Пути  $\alpha$ -лучей.

становится медленнее. Некоторые из этих изломов видны на фотографии А фиг. 8, очень хороший образец такого следа воспроизведен в большем масштабе на фиг. 8, С. На левом следе заметно небольшое отклонение на некотором расстоянии от конца его и более резкое ближе к концу. Почти на каждом следе можно заметить такие отклонения возле конца. Таким, образом

наше новое представление о строении атома объясняет удовлетворительно все наблюдающиеся явления.

Странно подумать, что в атоме так же много незаполненного материей пространства, как в солнечной системе. Атом не есть круглое твердое и совершенно непроницаемое тело: он представляет собой комбинацию ядра и электронов, которые занимают определенное пространство так же, как армия занимает страну. Солдаты вовсе не должны заполнять всю область от границы до границы для того, чтобы в нее не проникли неприятельские шпионы.

Эти в высшей степени характерные снимки являются результатом долгих и тщательных наблюдений. Изломы следов атомов гелия наблюдаются при всяком разрежении в приборе Вильсона, но надо дожидаться действительно хороших следов. Прекрасная фотография дана на фиг. 8, *D*. Она сделана Блеккетом. В этом случае камера была наполнена гелием вместо воздуха. Ядра летящего атома гелия, пронизывая атомы гелия в камере, ударяются прямо о ядро неподвижного атома. Оба атома после толчка начинают двигаться с неравными скоростями, и оба дают следы, как показывает фотография. На фотографии *C* фиг. 8, если всмотреться внимательно, можно заметить маленький след в сторону на последнем изгибе пути атома гелия, который объясняется тем, что атом азота или кислорода, отклонив атом гелия, сам несколько смещается назад. Его след очень короток, потому что он гораздо тяжелее атома, ударившего его, и, следовательно, получает после удара гораздо меньшую скорость.

Есть еще любопытные особенности на некоторых фотографиях, которые требуют объяснения. На некоторых следах есть разрывы, как будто бы конденсировавшийся тут пар уже испарился. Это так на самом деле и есть: здесь нет осевшей влаги потому, что в этом направлении несколько раньше уже прошел один атом гелия и использовал всю влагу, которая там была. На фотографии *B* фиг. 8 показаны следы, образованные атомами эманации радия. Они не выходят из одного какого-нибудь определенного места, так как атомы эманации бродят по всей камере, прежде чем столкнутся с атомом воздуха.

Ближайший вопрос, который возникает при таком представлении об атоме, есть вопрос о числе электронных спутников, которыми может обладать ядро атома. Тут мы сталкиваемся с другим чрезвычайно замечательным новым открытием.

Нет необходимости входить в подробное объяснение его; мы ограничимся только его описанием.

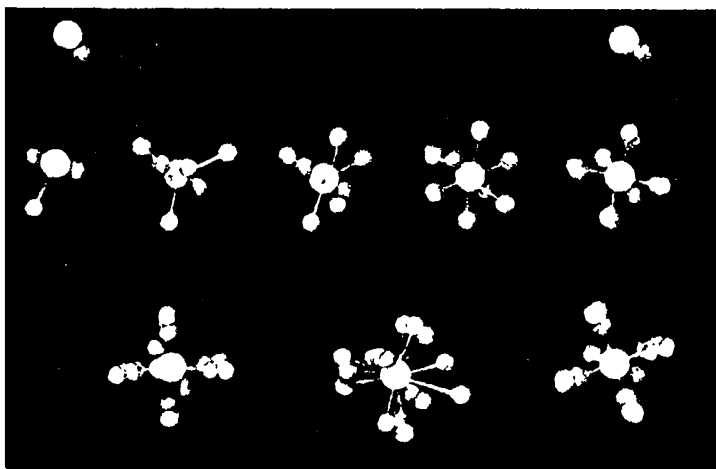
Теперь мы знаем, что в атоме имеется ядро, положительно-заряженное; величина его заряда как раз компенсирует отрицательные заряды связанных с ним электронов. Все электроны, как мы это уже говорили, совершенно одинаковы. Оказывается, что атомы отличаются числом электронов, которые они могут удерживать, и что это число характеризует атом вполне. Так, например, атом углерода может удерживать шесть электронов; положительный заряд ядра его равен и противоположен шести единицам отрицательного заряда. Обратно, каждый атом, который может удерживать шесть электронов, есть атом углерода: никаких других определений для атома углерода не требуется. Точно также атом с семью электронами есть атом азота, восьми-электронный атом — атом кислорода и т. д. Все почти — лишь за немногими исключениями — атомы с числами электронов от одного — водородный атом, — до девяносто двух — атом урана, были найдены в природе. Недостающие номера будут, вероятно, найдены когда-нибудь; это, конечно, в большей или меньшей степени, дело случая.

Можно построить, грубую правда, модель таких атомов. Ядра (фиг. 9) представлены белыми каучуковыми шарами, электроны — шариками меньших размеров, сидящими на булавках, воткнутых в центральный шар. Булавки должны быть различной длины.

Чрезвычайно удивительно, что все бесконечное разнообразие природы разрешается в ряде простых чисел. Одно время думали, что атомы различных сортов обязаны своим разнообразием чему-нибудь большему, чем только число электронов, и было большой неожиданностью, что разница между ними такого простого характера. Постоянная, неизменная особенность атома каждого сорта есть положительный заряд его ядра. Величиной этого заряда определяется соответствующее число электронов, окружающих ядро. Мы должны ожидать, что они распределяются определенным образом относительно ядра; позже мы увидим, что это так и есть в действительности. Вопрос о распределении электронов в каждом отдельном случае и о природе сил, проявляющихся при этом, очень труден; мы пока отложим его решение в общем виде и ограничимся только одним или двумя простыми частными случаями.



Прежде всего очень интересно посмотреть, как будут соединяться маленькие вертикальные магниты, плавающие в этой чашке (фиг. 10). Они держатся на поверхности воды, на полых целлулоидных шариках от настольного тенниса, выкрашенных черным, и, как это вы легко можете видеть, несут на себе такие же белые шарики. Все магниты совершенно одинаковы, поэтому они должны отталкиваться друг от друга и располагаться по краям чашки. Но внизу, под чашкой, помещен электромагнит;

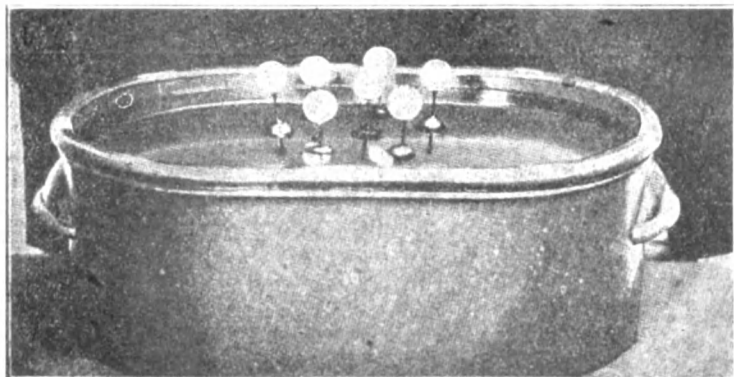


Фиг. 9. Модели атомов с электронами.

когда он приведен в действие, то все маленькие магниты тянутся к центру чашки. Окончательное их расположение обусловлено отчасти притяжением к центру, отчасти взаимным отталкиванием. Нечто подобное должно иметь место и в атоме, но мы не можем проводить слишком тесную аналогию в этом случае, потому что силы, действующие в атоме, не те, которые проявляются в нашей модели. Мы ограничимся только замечанием, что если магнитов плавает немного, то они располагаются в кольцо; если же их число велико, то образуются концентрические кольца. Очень любопытно увеличивать число магнитов, постепенно опуская в чашку с водой по одному магниту, и смотреть, как величественно он плывет к своему месту в кольце.

Такая же группировка в концентрические слои была обнаружена и в расположении электронов вокруг центрального ядра атома. Мы рассмотрим этот вопрос подробнее в ближайшей

лекции. Опыты, сделанные в этом направлении, не доказали непосредственно, что такое расположение непременно должно быть, но показали все-таки, что оно весьма вероятно. Мы можем теперь яснее представить себе, что происходит, когда атом гелия разрушает атомы, через которые он проходит, и делает их способными концентрировать на себе водяной пар, образуя туманное облако. Оказывается, что, действительно, атом может



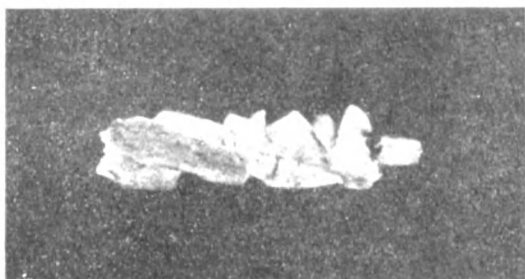
Фиг. 1а Плавающие магниты.

Если число плавающих магнитов невелико, они располагаются в одно кольцо, если же число их возрастает, они образуют concentric rings

being deprived of one of its electrons. Losing one, it strongly resists the loss of the second; still more difficult for it to lose the third. When a helium atom moves along its path, it tears electrons from one atom or another. The freed electron is left to itself. However, its independent existence does not last long; it is soon attracted to another atom. An atom that has lost an electron is positively charged; an atom that has gained an electron acquires together with it a negative charge. Both atoms can level the number of their electrons, if they approach each other sufficiently closely; moving through the gas, positively and negatively charged atoms give and receive electrons, by which the gas as a whole remains uncharged.

Мы закончим эту лекцию следующим прекрасным опытом. Когда атомы гелия бомбардируют некоторые вещества, они возбуждают в них свечение. Присматриваясь ближе к этому свечению, мы видим на самом деле множество маленьких вспышек,

вызываемых ударами отдельных атомов; под микроскопом это явление напоминает то, что происходит, когда бросают камешки в фосфоресцирующее море. Стеклянная трубочка (фиг. 11) содержит кристаллы, фосфоресцирующие под ударами быстро движущихся атомов гелия, например сернистый цинк или виллемит. В другой трубочке содержится некоторое количество эманации радия, газа, который, как мы помним, является ближайшим и непосредственным потомком радия. Перелив его в трубочку с кристаллами, мы увидим, что они ярко светятся. Наша фотография получена в свете фосфоресценции самих кристаллов.



Фиг. 11. Кристаллы в трубке, содержащей эманацию.

Явления радиоактивности, как мы видим, позволили нам глубоко заглянуть в структуру атома и дали возможность ее изучить именно потому, что тут имеются все основания для ее изучения. Ученые уже давно свыклись с существованием различных атомов с их свойствами, но они никогда не видели ни одного из них, никогда не наблюдали действия отдельного атома. Они имели дело только со множествами атомов. Когда химик заставляет атомы войти в соединение или анализирует сложное тело, он оперирует каждый раз с огромными скоплениями атомов, настолько большими, что он их видит. В явлениях же радиоактивных мы наблюдаем в каждый данный момент действия одного атома, и в этом заключается причина успеха новых методов изучения материи. Скорость гелиевых бомб, в сто тысяч раз превышающая скорость движения атомов газа в обычных условиях, делает ощутимым каждый отдельный атом.

Когда мы смотрим на облачные следы атомов гелия, мы наблюдаем действие отдельных атомов; мы видим нечто, что могло бы исполнить удивления и радости ранних последователей

атомной теории. Атом гелия проходит через атом кислорода, например, выходит с другой его стороны, и оба они могут служить очевидцами происходящего там столкновения. Естественно, что мы воспользовались такими очевидцами для того, чтобы исследовать природу атома. Атом гелия подобен разведчику, отправившемуся во враждебную страну и вернувшемуся оттуда с донесениями.

---

## ЛЕКЦИЯ ВТОРАЯ.

### О ПРИРОДЕ ГАЗОВ.

Мы видели, что все существующее построено из девяноста сортов различных атомов и что именно в атомах заложены все загадки и все возможности бесконечного разнообразия материального мира. В каждом атоме имеется положительно заряженное ядро; вокруг ядра расположены электроны, из которых каждый представляет собой единицу отрицательного заряда. Положительный заряд ядра есть кратное некоторого единичного заряда, равного заряду электрона, но с противоположным знаком. Число электронов, которыми обладает каждый атом в нормальных условиях, в точности уравнивает положительный заряд ядра, так что атом в целом не имеет заряда,—его положительные и отрицательные заряды уравновешены. Вращаются ли электроны вокруг центрального ядра, подобно тому как планеты вращаются вокруг солнца, или же они обладают более сложным движением—этот вопрос является для нас пока несущественным. Относительно него кое-что выяснено, но в общем он представляет большие затруднения. Те следствия, вытекающие из этого устройства атома—ядра с электронами вокруг него,—которые мы хотим здесь рассмотреть, могут быть выведены, не принимая во внимание возможного движения электронов. Одно из таких следствий есть то, что в обычных условиях атомы не могут вторгнуться в область, занятую другими атомами. Каждый из них окружен снаружи как шубой слоем электронов; если два атома подходят слишком близко один к другому, то возникают силы, противодействующие их сближению, которые мы можем представлять себе как силы взаимного отталкивания слоев электронов. Но если два атома брошены друг на друга с достаточно большой скоростью, внешнее заграждение может быть разрушено, и атомы пройдут друг через друга. После встречи атомы

могут опять разойтись и идти каждый своим путем, как если бы между ними совсем не было столкновения; один из них или оба могут потерять один или два электрона, но эта потеря может быть скоро вознаграждена. Только в том случае, когда ядро одного слишком близко подойдет к ядру другого, наблюдается изменение движения, подобное тому, которое происходит при столкновениях двух шаров. Изменения такого рода настолько редки, что мы принуждены считать размеры ядра весьма малыми. С такими проникновениями во внутреннюю область атомов мы встретились впервые в явлениях радиоактивности, как мы уже говорили в первой лекции; они имели существенно важное значение для установления структуры атома в виде солнечной системы, с большими пустыми промежутками между ядром и электронами. Такие изменения движения при встречах атомов в обычных условиях никогда не происходят, потому что скорости движений атомов в этих случаях слишком малы. Пространство, которое каждый атом ограждает от вторжения соседей, имеет диаметр в несколько стомиллионных долей сантиметра; в этой-то маленькой области движутся электроны и ядро. Легкие атомы имеют меньшие размеры, тяжелые — несколько бблыпие; переходя от самых легких к тяжелым, мы должны изменить множитель перед стомиллионными долями сантиметра от трех до четырех.

Я уже сказал, что атомы всегда движутся и что существует постоянная борьба между силами сцепления, стремящимися соединить атомы друг с другом, и движениями атомов, сохраняющими их независимость. Существование сил сцепления, о которых мы тут говорим как о весьма важном факторе в жизни природы, не согласуется, повидимому, с только что рассмотренной нами структурой атома, потому что, как мы предполагаем, внешние электронные оболочки атомов противодействуют сближению атомов. Это — трудно примиримое противоречие, так как оба эти факта безусловно верны. Конечно только наше невежество относительно природы сил, проявляющихся при взаимодействиях атомов, мешает нам понять эти явления с полной ясностью. Мы видели, каким образом может произойти, что при приближении двух атомов друг к другу с большими скоростями они проникают друг через друга, в то время как при средних скоростях они отскакивают друг от друга, как бильiardные шары. Мы можем пойти несколько дальше и представить себе, что при очень малых скоростях они должны на самом деле

удариться друг о друга. Существуют колеблющиеся затворы, которые при больших колебаниях движутся взад и вперед, на самом деле не запирая. Если же скорость внезапно уменьшится, то щеколда падает на свое место, затвор останавливается и прекращает движение. Мы можем объяснить то, что происходит при встречах атомов по аналогии с таким запиранием. Когда два атома встречаются, то, вообще говоря, они отталкиваются друг от друга благодаря действию их электронных оболочек; если же их движения слишком медленны и атомы остаются долго в соседстве друг с другом, то за это время могут произойти изменения во внутреннем устройстве обоих атомов, подобные захлопыванию щеколды запора, и атомы удерживаются вместе. Все это зависит от особенностей структуры атома, которые обуславливают известную неоднородность его поверхности, имеющую такой характер, что обыкновенно получается отталкивание; но оно может перейти в притяжение, если оба атома имеют достаточно времени для того, чтобы произвести надлежащие перераспределения внутри себя, или даже если с самого начала они были расположены один относительно другого надлежащим образом. Мы рассмотрим дальше несколько интересных примеров таких возможностей.

В этой лекции мы будем рассматривать только те случаи, когда силы сцепления между атомами не проявляются, может быть, потому, что слишком мало время их пребывания друг возле друга, или потому, что они слабы, или по другой какой-нибудь причине. Скопление атомов в этом случае и представляет собой газ.

Таких атомных скоплений существует очень много. Между ними есть некоторые атомы с очень интересными свойствами; они могут быть обозначены рядом: 2, 10, 18, 36, 54, 86. Это значит, что они имеют ядра с положительными зарядами, выражающимися одним из этих чисел, и что в обычных условиях они удерживают столько же электронов. Эти атомы имеют весьма слабое стремление соединиться с атомами других сортов. Они не входят в соединение с другими атомами; другими словами, они не образуют химических соединений. Мы можем назвать их „необщительными“ атомами. Они мало участвуют в создании мира, и самое их существование еще не так давно было совершенно неизвестно. Только после того, как лорд Рэлей произвел тщательные измерения атомного веса азота, по-

лученного различными способами, он заметил, что есть малая, но несомненная разница в плотности азота, полученного химически при разложении азот содержащих соединений, и азота, полученного из воздуха, из которого были удалены все известные газы. Согласно тому, что было известно в то время о составе воздуха, конечным продуктом должен был бы явиться чистый азот. Оказалось, что атмосферный воздух содержит очень малый процент одного из этих „необщительных“ газов; номер его — 18, следовательно его ядро заряжено восемнадцатью единицами положительного электричества. Таким образом тщательные измерения Рэлея привели к открытию неизвестного ранее вещества. Оно было названо аргоном — „недеятельным“. Однако это имя не дает его полной характеристики; атом аргона движется так же быстро, как и всякий другой атом таких же размеров. Воздух этой аудитории Королевского Института весит около 750 килограммов; он содержит около 8 килограммов аргона. Если бы этот газ обладал самым малым стремлением образовать химические соединения, то такое количество его, хотя и очень малое, легко было бы открыто тонкими методами аналитической химии.

Атом гелия, самый малый в этом ряду „необщительных“, идентичен атому, выбрасываемому радием и другими радиоактивными веществами в процессе распада. В обычном состоянии он имеет два электрона, но, когда он, выброшенный радием, летит через материю, он на время лишается своей электронной оболочки. Положительный заряд ядра не изменяется при полете, так что, когда атом кончает его, недостаток электронов легко восполняется: всегда есть блуждающие электроны, которые он может захватить. Тогда атом начинает спокойное и независимое существование, так характерное для него. Возможно, что большая часть гелия, существующего в мире, скопилась из атомов, выброшенных один за другим радиоактивными веществами. По крайней мере его находят в тех местах, где должны были происходить разложения радиоактивных элементов. Гелий теперь собирают в больших количествах в Америке и Канаде, где он находится растворенным в некоторых источниках. Им пользуются для наполнения баллонов дирижаблей; для этой цели он по своим свойствам более пригоден, чем все остальные газы. Он легкий, его подъемная сила почти так же велика, как у водорода, атома с одним электроном. Подъемная сила газа, как мы знаем,



зависит не от плотности газа, но от разницы между плотностью газа и плотностью воздуха. Плотности водорода, гелия и воздуха находятся в отношении  $1 : 2 : 14,4$ ; подъемные силы водорода и гелия — в отношении  $13,4 : 12,4$ . Но самое главное достоинство гелия то, что он не воспламеняется. Атом водорода весьма общителен и в особенности энергично соединяется с кислородом. Достаточно маленькой искры в смеси водорода с кислородом, чтобы произошло соединение с выделением огня и со взрывом. Баллоны, наполненные водородом, очень опасны; гелий же не стремится к изменениям и безопасен в смысле пожара. Своим именем этот газ обязан тому, что он был открыт прежде всего на Солнце. Одна из блестящих линий солнечного спектра не могла быть отождествлена с линиями ни одного известного на земле элемента. Поэтому-то имя „гелий“, или „солнечное вещество“, и было дано неизвестному элементу, которому должна была принадлежать эта линия. И только в последнее время оказалось, что гелий является членом того семейства газов, которое стали исследовать лорд Рэлей и Вильям Рамзай после опытов Рэрея с азотом.

Атом с десятью электронами, неон, „новый“, еще меньше распространен, чем аргон. Он обладает замечательным свойством легко возбуждаться к свечению и очень ярко светиться под влиянием электрического разряда; поэтому он часто употребляется в электрических лампах: мы все видели красновато-оранжевое сияние неоновой лампы.

Криптон (36) — „тайный“ и ксенон (54) — „незнакомый“ — встречаются очень редко. Последний член этой семьи, в обычных условиях имеющий восемьдесят шесть электронов, есть эманация, тяжелый остаток распавшегося атома радия. Подобно всем остальным он стремится к независимому существованию; таким образом радий, распадаясь, превращается в два газа. На некоторых Вильсоновских фотографиях (фиг. 8, А, В) следов атомов гелия мы можем видеть след, начинающийся со середины камеры; он обязан своим происхождением распаду атома, „эманации“, этого тяжелого газа, который также радиоактивен. В самом деле средняя продолжительность его существования равна только трем с половиной дням.

Не следует думать, что эти странные атомы не могут соединяться друг с другом ни при каких условиях. Можно заставить

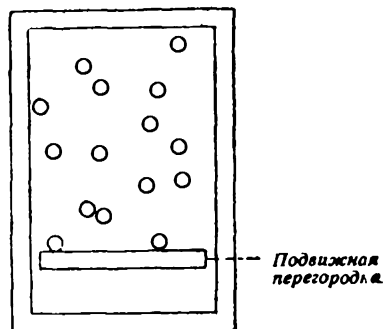
их образовать жидкости, но только при чрезвычайно низких температурах. При обычных температурах все они находятся в газообразном состоянии. Сжижение гелия есть одно из последних достижений лаборатории Камерлинг-Оннеса в Лейдене, где способы получения низких температур доведены до высокой степени совершенства.

Существуют другие атомы—водород, азот, кислород и т. д.,— из которых охотно образуются маленькие совокупности, или молекулы, каждая из которых почти свободна от всякого стремления соединиться с другими молекулами того же рода и в большинстве случаев с молекулами других сортов так же, как атомы гелия и аргона. Два атома водорода образуют очень устойчивую и „необщительную“ молекулу; то же можно сказать и о двух атомах азота или кислорода. В таком случае вещество при обыкновенных температурах обладает всеми свойствами газа. Сжижение водорода было произведено Дж. Дьюаром в лаборатории этого Института; вся установка до сих пор еще цела. В вестибюле есть картина, изображающая Дьюара, переливающего жидкий водород из одного своего вакуумного сосуда в другой во время чтения лекции в этом самом зале. Воздух состоит, главным образом, из смеси молекул азота и кислорода. Другие хорошо известные молекулы, образующие в обычных условиях газы, суть окись углерода— $\text{CO}$ , двуокись углерода— $\text{CO}_2$ , метан— $\text{CH}_4$  и прочие. Если две из этих молекул сталкиваются друг с другом со скоростями, свойственными им в обычных температурных условиях, они отскакивают от толчка и таким образом сохраняют свое независимое существование. То, чем мы теперь займемся, и будут выводы, какие мы должны ожидать вследствие соблюдения этого условия независимости.

Представим себе закрытый сосуд, содержащий множество атомов или молекул, все время движущихся,—сосуд, содержащий газ, как мы говорим. Молекулы все время сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда и ведут себя, как движущиеся на столе бильiardные шары, если бы движение последних было без трения и, следовательно, было вечным. В самом деле очень удобно пользоваться в качестве иллюстрации таким столом, и м-р Борро и м-р Уатт любезно предоставили в наше распоряжение один такой стол. Шары скоро останавливаются, так как борта стола, также как и сам стол, не вполне упруги;

кроме того их движение ослаблено трением, хотя они движутся по довольно гладкому сукну. Несмотря на все это, движение, раз начавшись, продолжается достаточно долго, чтобы дать представление о том, что происходило бы, если бы оно продолжалось неопределенно долго (фиг. 12).

Очень естественным является вопрос, как влияет на движение атомов в нашем баллоне сила тяжести. Не должна ли она заставить их все упасть? Почему газ заполняет одинаково как нижнюю, так и верхнюю часть сосуда? Ответ гласит, что тяжесть, действительно, влияет на движение атомов газа, но это влияние слишком слабо, чтобы можно было его заметить в нашем частном случае. Если бы можно было себе представить, что вся теплота отнята у газа, что движение его атомов вследствие этого прекращается, и что можно пренебречь силами сцепления, то атомы, конечно, должны были бы упасть на дно сосуда. Если бы теперь им сообщить малое количество теплоты, то они начали бы прыгать вверх и вниз, как совершенно упругие шары на совершенно упругой доске. Если бы повышение температуры было около одной тысячной градуса, то они подпрыгивали бы на высоту около двадцати сантиметров. При достаточном количестве теплоты они начали бы ударяться о крышку сосуда; мы можем предположить их настолько малыми, что они не очень часто ударяются друг о друга. При обыкновенных температурах их движение становится настолько быстрым — около 2 000 метров в секунду, — что разница между скоростями движущихся вверх молекул и молекул, теснящих вниз, обусловленная действием тяготения, ничтожна, и в каждый данный момент их может быть одинаково много как вверху, так и внизу. Если молекулы в нашем сосуде так же многочисленны, как молекулы воздуха в обычных условиях, то они должны сталкиваться друг с другом гораздо чаще, чем со стенками. В воздухе средняя длина пути молекул между двумя последовательными столкновениями равна приблизительно двум



Фиг. 12. Маленький бильярдный стол.

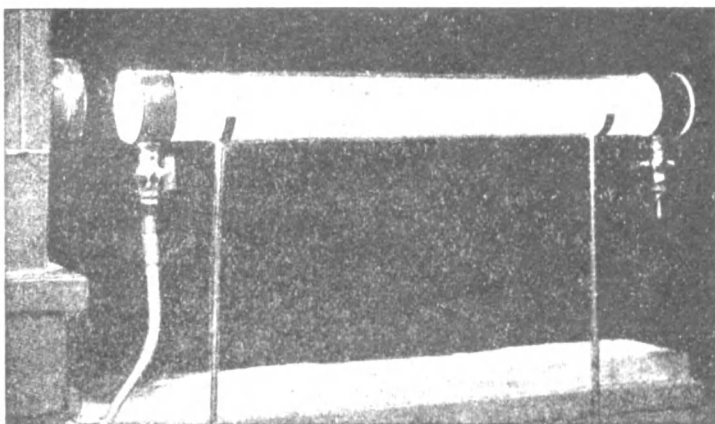
Если шары движутся, они толкают перегородку перед собой и теряют при этом часть своей энергии. Если, наоборот, перегородка быстро вдвинута, энергия движения шаров возрастает.

миллионным долям сантиметра. Так как тяготение не оказывает заметного влияния, то бильярдный стол, как модель, еще более выигрывает; мы можем воспроизвести аналогию с тяготением, дав ему небольшой наклон, но это не представляет особого интереса.

Если атомы или молекулы газа все время непрерывно ударяются о стенки сосуда, то последние должны всегда испытывать давление: в самом деле мы говорим о давлении газа на его оболочку. Растяжение воздушного шара обусловлено бомбардировкой молекулами его оболочки. Если поместить подвижную перегородку на наш бильярдный стол и покатить к ней шары, то от удара перегородка откатится назад. Если бы шаров было вдвое больше, то и их давление было бы вдвое больше. Это и есть хорошо известный закон пропорциональности давления и плотности газов при прочих равных условиях. Давление на перегородку можно увеличить, ускоряя движение шаров; точно так же давление газа возрастает с возрастанием температуры. Предположим теперь, что я внезапнодвигаю вперед перегородку в то время, как шары движутся и ударяются о нее. Очевидно, что движение их усилится. Точно также, если вдвинуть одну из стенок сосуда, например опуская поршень в цилиндр, то движение атомов возрастает. Другими словами, возрастает температура газа. Всем нам хорошо известно, как разогревается велосипедный насос, когда мы им накачиваем воздух в шину. Обратные заключения также справедливы. Если перегородка на нашем столе смещается назад в то время, как молекулы ударяются о нее, их движение ослабевает. Если вы играли в крикет, вы знаете, что, если вы хотите поймать мяч, вы должны отступить несколько назад, когда он подлетает к вашим рукам: отодвигая руку, вы значительно уменьшаете движение шара. Если вы будете держать руку неподвижно, то шар отскочит назад, отразившись от нее. Точно также игрок в лакросс ловит мяч, опуская вниз свою сетку, когда мяч к ней подлетает, и постепенно останавливает его на протяжении двух или трех футов его пути. Ракетка для тенниса может также служить для ловли мяча, только здесь нужна особенная точность всех действий, так как теннисная ракетка очень жестка. В случае газов соответствующее явление есть охлаждение их при расширении. Мы видели это на приборе Вильсона, где внезапное увеличение пространства, наполненного влажным воздухом, вызывает такое

охлаждение, что влага сгущается в туман вдоль следов атомов гелия. Расширение должно произойти очень быстро, потому что в противном случае успеет притечь теплота снаружи и мы не достигнем желаемого понижения температуры.

Расширение больших масс воздуха в атмосфере часто является причиной дождя и снега. При постоянном движении вследствие ветров может случиться, что большой объем влажного воздуха расширяется в пространство с пониженным давлением и так сильно охлаждается при этом, что водяной пар начинает конденсироваться. Легко воспроизвести это явление в малых размерах. Стекло́нная трубка, изображенная на фиг. 13, содер-

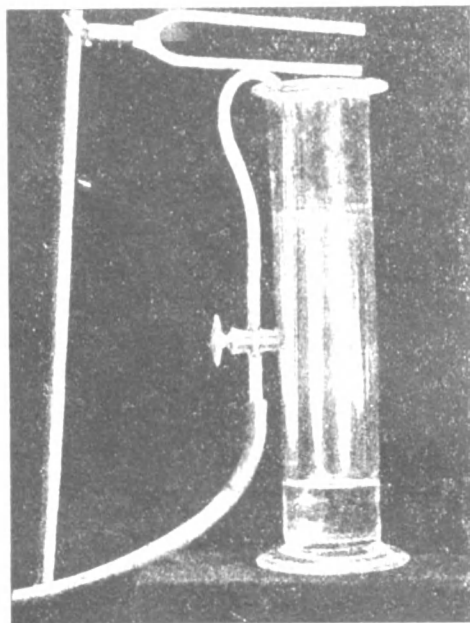


Фиг. 13. Прибор для образования тумана  
Длинная стеклянная трубка наполняется туманом.

жит воздух, насыщенный влагой, которую он захватил, проходя по пути к трубке через воду. Приток воздуха в трубку может быть остановлен запирающим краном. На другом конце трубки имеется второй кран, который в данный момент заперт и отделяет трубку от воздушного насоса. Если открыть второй кран, то воздух в трубке расширится, и она сразу станет белой и мутной. Пучек света из фонаря проходит через трубку, освещая туман. Мы можем выкачать воздух с помощью насоса и повторять опыт сколько угодно раз. Каждый раз как мы наполняем трубку влажным воздухом, очищенным от взвешенных частиц пыли и дыма, мы наблюдаем ту же белую дымку, которую мы видим в ясных сухих странах. Но если мы впустим в трубку комнатный воздух, не профильтровав его предварительно, то расшире-

ние вызывает густой туман, который так часто бывает в лондонском воздухе, как мы все это слишком хорошо знаем.

Есть еще целый ряд свойств газов, которые нам поможет понять наша модель—бильярдный стол. Примешаем к обыкновенным бильярдным шарам несколько легких шариков и приведем их все в движение. Мы видим, что в этом общем движении легкие шарики приобретают большие скорости, чем тяжелые. Всякий раз, когда газ состоит из атомов двух сортов, тяжелых и легких, последние при постоянном обмене количе-



Фиг. 14. Камертон над цилиндром.

ствами движения приобретают более высокую среднюю скорость, чем первые. В смеси водорода с кислородом молекулы водорода, действительно, движутся в среднем в четыре раза быстрее молекул кислорода. Расчет, в который мы здесь входить не будем, учит нас, что атомы, которые мы примешиваем друг к другу, все обладают одной и той же средней энергией, причем легкие выигрывают в скорости за счет своей малой тяжести. Даже если газы не перемешаны и заключены в отдельные сосуды, тот же закон имеет место, если только темпера-

туры их одинаковы; хотя атомы двух газов и не могут в этом случае обменяться энергией непосредственно и уравнивать ее, но они могут это выполнить различными способами, посредством материальных тел, соединяющих их друг с другом,—стенок сосудов, стола, на котором оба они стоят, атмосферы. Среднее количество движения атома всегда определяется температурой.

Мы легко можем дать иллюстрацию этого явления. Звук представляет собой движение, которое передается от атома к атому в газе, где звук проходит, так же, как цепь рабочих передает друг другу ведро на пожаре. Чем быстрее ра-

бочие двигают руками, тем быстрее движется вода. Совершенно так же звук распространяется быстрее, когда скорость атомов больше, или, что сводится к тому же, когда атомы легче.

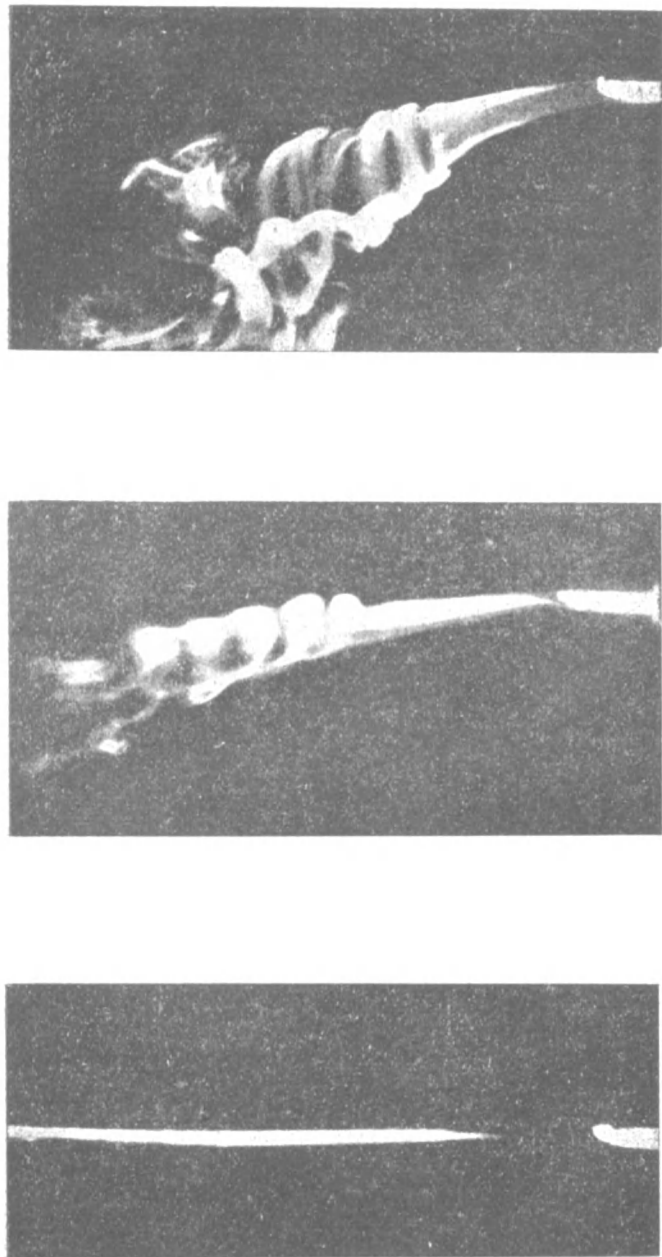
Органная труба, наполненная светильным газом, издает более высокий тон, чем труба, наполненная воздухом, потому что молекулы более легкого газа движутся быстрее и колебания трубы более часты. Простой опыт поможет нам это разъяснить. Тут на столе стоит стеклянный цилиндр, в который налито такое количество воды, что воздух, находящийся над ним, громко отзывается на колебания камертона, помещенного над цилиндром (фиг. 14). Волны в воздухе идут в цилиндре взад и вперед в такт с колебаниями камертона; собственный период цилиндра точно такой же, как период звука, издаваемого камертоном, в чем я могу убедиться, ударяя слегка по верху цилиндра и извлекая из него слабый звук. Теперь введем с помощью каучуковой трубки светильный газ в наш цилиндр, и мы услышим, что он отвечает на камертон гораздо слабее. Колебания в цилиндре происходят теперь гораздо быстрее, и собственный период короче периода камертона. Если теперь отлить немного воды из банки и наполнить ее снова воздухом, то мы не услышим усиления звука до тех пор, пока не впустим туда немного светильного газа. Как только смесь будет иметь такой состав, что период колебания газа в цилиндре совпадет с периодом колебания камертона, мы опять услышим отчетливо усиление звука.

Пусть теперь в стенке сосуда, содержащего газ, проделано маленькое отверстие. Каждый момент какой-нибудь атом или, если угодно, молекула, попадает в отверстие, проходит через него и не возвращается в сосуд. Ясно, что легкий газ улетучится быстрее, чем тяжелый, так как его атомы движутся в сосуде с большей скоростью и большее число их попадает в отверстие каждую секунду. Этим явлением часто пользуются для разделения двух газов, когда все остальные средства не годятся. Так, например, Рэлей и Рамзай применили его для отделения аргона от азота, смесь которых была остаточным продуктом атмосферного воздуха, из которого все остальные газы были удалены. Смесь эту заставляли течь через целый ряд мундштуков глиняных табачных трубок, и азот проникал через поры глины гораздо быстрее, чем аргон. Атомы аргона в сорок раз тяжелее атома водорода, молекулы азота — тяжелее в двадцать восемь раз; азот, следовательно, гораздо быстрее и легче проходит

через пористые глиняные стенки трубки, а потому газ, выходящий из другого конца системы трубок, богаче аргоном, чем газ, поступающий в трубку. Процесс диффузии одного газа в другой имеет в точности тот же характер, так как промежутки между атомами и молекулами каждого газа могут быть уподоблены порам глиняных стенок. Диффузия есть очень медленный процесс несмотря на то, что атомы движутся так быстро. Причина ее медленности заключается в том, что атомам приходится испытывать множество столкновений друг с другом. Обыкновенно склонны думать, что газ диффундирует довольно быстро в газовую же среду на том основании, что если оставить открытым кран газопровода, то запах газа быстро распространяется по всей комнате. Это растекание газа обуславливается, однако, скорее конвекционными токами, чем диффузией, так как газ течет в комнатный воздух в виде струй. Это явление хорошо видно на дыме, поднимающемся от папиросы (фиг. 15). Если папироса лежит на краю пепельницы, тонкий поток голубого дыма подымается от нее извилистой струей, которая растягивается, изгибается и закручивается, образуя тонкие спирали и кривые поверхности. Перемешивание дыма с воздухом и является примером конвекции. Диффузия между струей воздуха, пропитанной дымом, и чистым воздухом, несомненно, существует, но этот процесс идет так медленно, что края дыма остаются резко очерченными долгое время. Точно так же, когда помещение нагревается горячим воздухом, распространение тепла происходит при помощи конвекционных токов, струй горячего воздуха, просачивающихся в холодный. Нагревание комнаты вовсе не есть результат проникновения отдельных молекул горячего воздуха, независимо проходящих между молекулами холодного, — это явление тоже идет параллельно конвекции, но оно происходит очень медленно. Конвекция — более действительный способ, чем теплопроводность.

Движения масс горячего газа в холодном подчинены, конечно, законам тяготения: легкие тела, если они держатся вместе, стремятся всплыть над тяжелыми. Дым от папиросы поднимается потому, что воздух над горячим ее концом прогревается и становится легким. Токи холодного воздуха устремляются со всех сторон на его место и, соединяясь друг с другом, подымаются вокруг тонкого слоя дыма. Тонкий слой дыма есть их общая граница; если воздух спокоен и токи устойчивы,





С

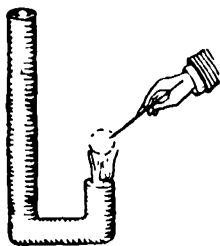
В

А

Фиг. 15. Дым от папиросы.

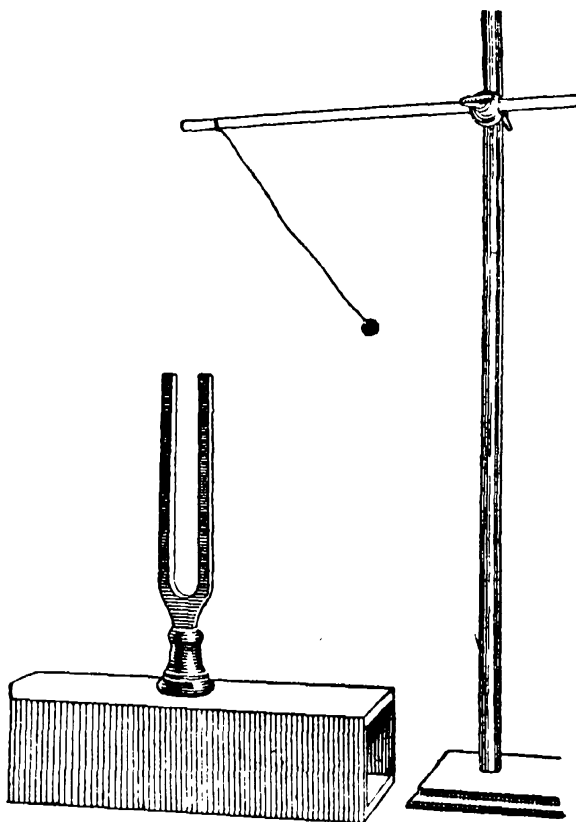
**А** — Дым поднимается ровной колонной. Весь воздух вокруг него увлекается вместе с ним, хотя на фотографии этого не видно; тут образуется восходящий ток, центр которого составляет дым. **В** и **С** — Здесь папироса была резко сдвинута, как раз перед съемкой. Токи поднимающегося воздуха, которые раньше 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.

дым подымается в виде длинной восходящей колонны; но самое легкое движение папиросы уже нарушает ровность течения, и колонна разбивается на ряд красивых извилистых струй. Печная труба, создавая тягу, действует, конечно, таким же точно образом. Интересно, однако, будет посмотреть один старый опыт Фарадея, относящийся к этому явлению.



Фиг. 16. Воспроизведена из книги Фарадея „История свечи“.

Кусочек пакли, пропитанный спиртом, зажигается над отверстием короткого колена согнутой трубки, как показано на фиг. 16. Раздувая пламя, мы заставим его идти по короткому колену трубки вниз и подниматься по длинному; раз начавшись, движение в этом направлении не прекращается даже тогда, когда мы перестаем раздувать огонь. Дымовые трубы



Фиг. 17. Камертон и шарик.  
Шарик сильно отбрасывается звучащим камертоном.

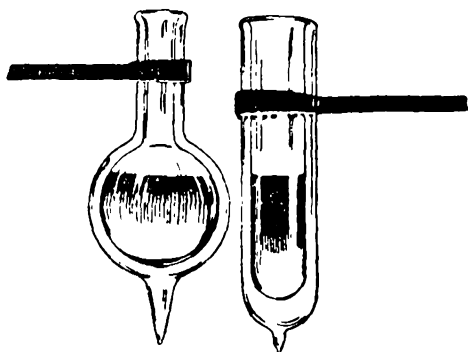
с решетками в госпитальных палатах устраиваются часто таким образом, при чем тяга устраивается под пол. Движение в этом случае обусловлено тем, что горячий воздух в длинной трубе легче, чем воздух снаружи ее. Обратное движение случается иногда в домах, когда дымоход холоднее, чем воздух снаружи, и, падая в трубе, последний приносит в комнату дым.

Нечто подобное процессу теплопроводности происходит тогда, когда газ, заключенный в сосуд, нагревается от его стенок. Молекулы газа, сталкиваясь со стенками сосуда вследствие своего движения, получают импульсы от колеблющихся молекул твердого тела, подобно тому как шарик на нашем рисунке (фиг. 17) получает сильные удары от ножек колеблющегося камертона.

Когда сэр Джемс Дьюар строил свои „пустотные сосуды“ для хранения жидкого воздуха, он сделал стеклянные сосуды с двойными стенками, между которыми воздух был выкачан (фиг. 18). Он не оставил молекул, которые могли бы получить энергию от внешних стенок и перенести ее ко внутренним.

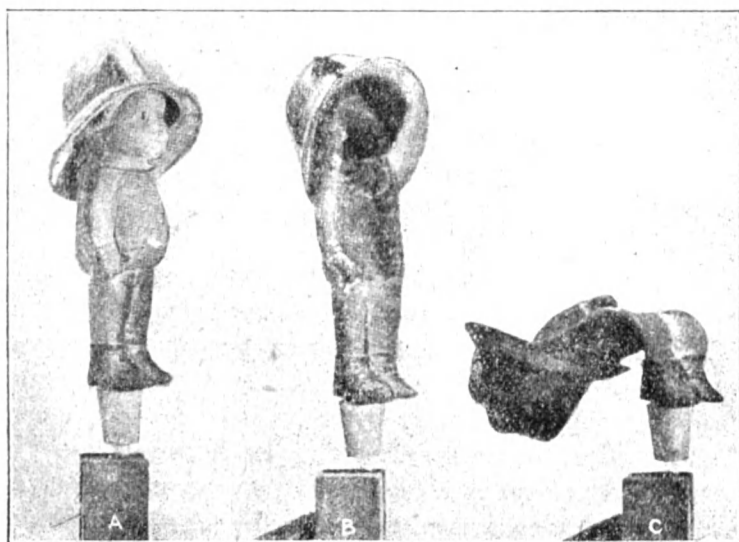
Самое малое количество теплоты не может быть сообщено жидкому воздуху ни через теплопроводность ни через конвекцию. Теплота может, правда, передаваться через лучеиспускание в эфире, но это можно предупредить серебрением стеклянной поверхности снаружи и изнутри. Если это все выполнено, то изоляция воздуха может считаться почти совершенной.

Полная независимость атомов и молекул газа друг от друга обуславливает его совершенную делимость. Когда мы режем твердое тело ножом, мы должны употребить усилие на разъединение молекул друг от друга; в газе же силы сцепления ничтожны. Если какое-нибудь тело движется в воздухе, оно встречает сопротивление только потому, что необходимо привести часть воздуха в движение, а это требует затраты энергии. Газы легки, и энергия, требующаяся для приведения их в движение, соответ-



Фиг. 18. Сосуды Дьюара. Заметна трубка снизу, в дне сосуда, через которую был откачан воздух из пространства между двойными стеклянными стенками обоих сосудов.

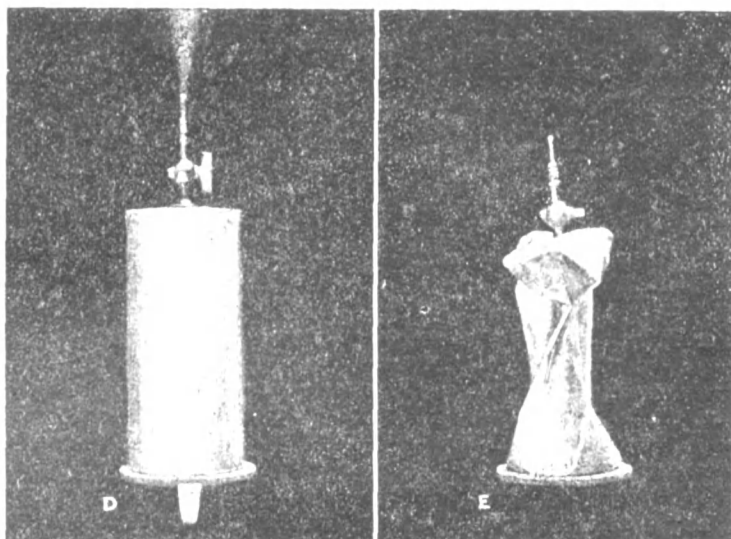
ственно мала. Малый вес воздуха и легкость, с которой мы через него проходим, заставляют нас забывать, как велико давление воздуха на поверхность земли и как тяжел воздух в таком большом объеме, как, например, эта комната. Воздух развивает давление около одного килограмма на каждый квадратный сантиметр нашего тела, то 000 кг на квадратный метр; то, что мы не расплющиваемся под таким давлением, объясняется тем, что воздух внутри нашего тела имеет такое же давление, как наружный. Маленькая резиновая кукла, изображенная на фиг. 19, совершенно сплющивается, если из нее выкачать воздух. Тонкий жестяной сосуд, показанный на фиг. 20, содержал сначала немного воды, которая была нагрета до кипения, причем ток пара выгнал из него весь воздух. Закроем теперь отверстие, выпускающее пар, и обольем сосуд снаружи холодной водой. Пар, оставшийся внутри сосуда, сконденсируется, давление его сильно уменьшится, становясь почти исчезающе малым. Под влиянием внешнего давления наша жестянка комкается и мнется. Для того чтобы конкретно представить себе



Фиг. 19. Резиновые фигурки, сжимающиеся, когда из них удален воздух

величину давления воздуха, мы приведем такой разительный пример. Представим себе железный брусок в квадратный сантиметр сечением и приблизительно в 125 см длиною, стоящий

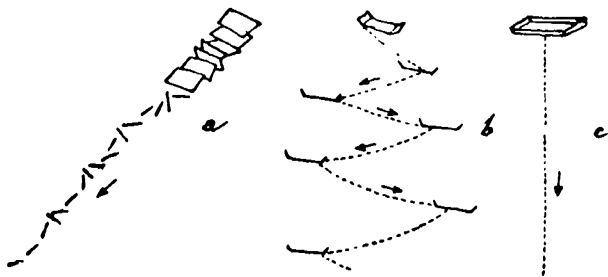
вертикально: давление такого стержня на квадратный сантиметр поверхности под ним, обусловленное его весом, не больше давления воздуха на ту же площадь.



Фиг. 20. Вода в жестянке сильно кипела в тот момент, когда бунзеновская горелка была отставлена и кран закрыт. Будучи облита холодной водой, она сплющивается.

Если, следовательно, мы правильно оценим тяжесть воздуха, то для нас не будет ничего удивительного в том, что для приведения его в быстрое движение нужны большие силы, или в том, что при быстром движении он может оказывать сильное давление на тела, попадающие на его пути. Мы все знаем, с какой силой давит ветер и какие разрушения может произвести шторм. Точно также вращающийся аэропланый винт гонит назад с большой скоростью массы воздуха, и большая сила реакции слоев воздуха сообщает необходимую скорость аэроплану. И вот, когда он летит, его крылья, подобно тому как это бывает у птицы, все время стремятся упасть и увлечь за собой массы газа, лежащие под ними и вокруг них. Но так как существуют силы, стремящиеся привести массы газа в движение, то в слоях его развиваются силы реакции, которые и сообщают несущим поверхностям движение вверх. Если аэроплан не имеет поступательного движения, он довольно скоро создает нисходящее движение слоев воздуха,

лежащих под ним, и падает вместе с ними, но его крылья все время скользят по новым массам воздуха, которые еще не начинали падать. Следующий простой опыт иллюстрирует все сказанное здесь. Кусочек бумаги надлежащих размеров, на-



Фиг. 21. 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.

пример восемь сантиметров на два, брошен, как показано на фиг. 21; он вращается во время падения, которое совершается по отлогому пути. Направление вращения связано с направлением скольжения таким же образом, как для шара, если бы он скатывался по нижней стороне наклонной плоскости. Объяснение такого падения листка бумаги заключается в том, что конец его, идущий впереди, движется по новым слоям воздуха, которые еще не начали падать, в то время как задняя его поло-

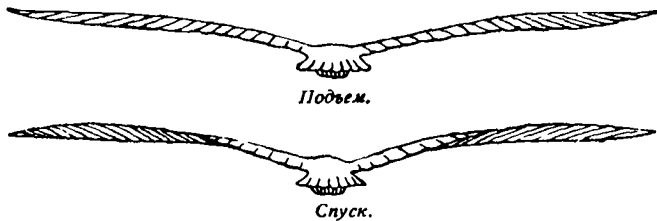


Фиг. 22. Рисунки Лилиентала, показывающие перья, раскрытые для пропуска воздуха при подъеме (верхний рисунок) и сложенные для задержки воздуха при спуске (нижний).

вина скользит по воздуху, который уже получил движение вниз благодаря тому, что передний конец листка только что опирался на него. Таким образом задняя половина листка падает, передняя же не падает, и это вызывает вращение листка,

как показано на рисунке, до тех пор пока бумага не начинает двигаться снова вперед. Но теперь уже задняя половина листка становится на место передней и обратно.

Бумага, падая, все время вращается; причиной такого движения является ее простая форма. Птицы или аэропланы, скользя, движутся в определенном постоянном направлении без вращения; как оказалось по исследованиям конструкторов аэропланов, форма и устройство крыльев очень сложны. Форма несущих поверхностей, в особенности ведущего конца, имеет огромное значение. Крылья птицы служат не только для скольжения, но и для удара и снабжены для этой цели очень остроумным механизмом. Крыло представляет собой целый ряд створок, которые раздвигаются, когда крыло поднимается, и сдвигаются, когда оно опускается; таким образом давление на крыло меньше при подъеме, чем при спуске. Крылья, следовательно, действуют



Фиг. 22 а. Летящая птица.

При спуске крылья повертываются, открывая нижнюю сторону; этот поворот дает толчок вперед.

так же, как перепончатая нога утки, которая растягивается и сильнее давит на воду при отталкивании от нее, чем тогда, когда она вытянута вперед; способы же действия в первом и втором случае совершенно разные. Ребро пера никогда не лежит в середине, оно всегда смещено в сторону: ряд перьев так прикреплен, что они могут раскрываться и немного поворачиваться около своего ребра. При подъеме крыла они раскрываются подобно створчатому окну, и воздух проходит через него; когда крыло опускается, они сдвигаются, крепко прижимаясь друг к другу. На фиг. 22 и 22 а представлены рисунки, заимствованные из книги Отто Лилиентала „Полет птиц“, стр. 101. Они представляют собой сечения крыльев кондора. „Каждый, кто наблюдал полет аиста,—говорит Лилиенталь,—знает, что сквозь его крылья можно смотреть через определенные промежутки времени“. Даже самые мелкие части пера при-

нимают участие в этом процессе. Ясно, что с помощью такого механизма простой удар крылом может сообщить птице движение вверх. Поступательное движение обусловлено наклоном жесткой передней части крыла, как видно на фотографиях крыльев чайки во время полета („Полет птиц“, стр. 96). Они были сделаны в солнечный день. Когда крыло поднимается, его задняя половина наклоняется назад, и оно оборачивается к нам верхней блестящей поверхностью; когда же оно опускается, оно изги-



Фиг. 23. Полет мяча для гольфа.

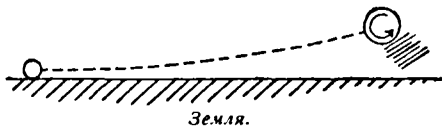
Штрихи изображают уплотнение воздуха около вращающегося и движущегося мяча, и это уплотнение заставляет мяч отклоняться вправо.

бается так, что к нам обращена его нижняя темная поверхность. Ясно поэтому, что птица может подниматься даже тогда, когда ее крылья только раскинуты, но не двигаются, если при этом в воздухе имеются слабые движения, струи и колебания. Удивительная способность птиц парить в воздухе на протяжении многих миль, не двигая крыльями и без всякого видимого усилия, стоит в связи с этими движениями в воздухе; можно сказать, что парение не могло бы осуществиться, если бы воздух был совершенно спокоен.

Очень хорошие примеры применения законов аэродинамики можно найти в движении вращающихся мячей, которые отклоняются от прямого полета; этот вопрос может заинтересовать большинство из вас. Мы все видели это отклонение и пользуемся им почти во всякой игре, но особенно заметно оно в игре в гольф, так как в этом случае скорость мячей очень велика. Представим себе, что игрок в гольф „режет“ мяч; вместо того чтобы двигаться по прямому пути в направлении, по которому он, повидимому, брошен, мяч идет по некоторой кривой, сворачивая с прямого пути. При этом мяч вращается; передняя сторона мяча для наблюдателя, смотрящего ему вслед, вращается слева направо; задняя половина — наоборот. Ясно, что игрок ударил свой мяч неверно, не в центр; может быть мяч скользнул в момент удара и потому уже не может двигаться правильно. Когда мяч движется вперед, он встречает сильное сопротивление воздуха, который не успевает уйти с его пути. Когда мяч вращается, то его левая сторона (для

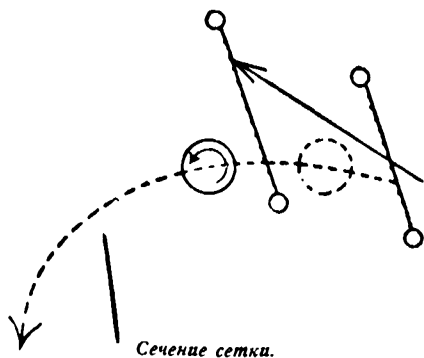


наблюдателя, смотрящего сзади) поворачивается вперед в направлении полета; правая же сторона движется в противоположном направлении (фиг. 23). В результате оказывается, что вследствие трения воздух на левой половине увлекается вперед сильнее, чем справа; давление воздуха на переднюю часть мяча сильнее слева, чем справа. Следовательно мяч должен отклониться вправо <sup>1)</sup>.



Фиг. 24. Правильный полет мяча для гольфа.

Сжатый воздух, изображенный на рисунке штрихами, поддерживает мяч.



Фиг. 25. Действие удара ракеткой, вызывающее вращение мяча и заставляющее его падать быстро, пройдя над сеткой. — Направо дан разрез ракетки и мяча перед ударом; стрелка указывает направление движения ракетки.

Долгий полет мяча гольфа обусловлен вращением особого рода; удар должен быть сделан так, чтобы мяч вращался около горизонтальной оси, при чем его нижняя часть должна двигаться в направлении полета. В таком случае мяч во время полета стремится подниматься. В самом деле, иногда мы видим, что его путь представляет кривую линию, выпуклую к земле (фиг. 24). Если бы не было этого эффекта, то мяч не проходил бы и половины того расстояния, которое он должен пройти. Если бы не было совсем воздуха, полет мяча был бы в два или три раза больше обычного, так как сопротивление воздуха быстро движущемуся мячу очень велико. Мы могли бы бросать мячи гораздо дальше, если бы могли уничтожить сопротивление воздуха; но

так как мы этого сделать не можем, то должны уметь извлекать выгоду из создавшегося положения, приводя мяч во вращение.

<sup>1)</sup> В настоящее время совершенно аналогичное явление используется технически в так называемом „роторном корабле“ Флеттнера. Подробное изложение всех относящихся к этой области вопросов, в популярной форме, читатель может найти в книге Аккерета. Роторный корабль. Госиздат. М. 1925.

Полет футбольного мяча, подобно полету быстро вращающегося мяча гольфа, часто загибается вверх, когда удар направлен снизу мяча, и, хотя, конечно, этот изгиб кверху более заметен, когда удар направлен против ветра, я все же думаю, что он может быть заметен и в спокойном воздухе. При игре в теннис игроки часто проводят ракеткой по мячу сверху, сообщая ему вращение в направлении, противоположном только что рассмотренному, при котором верхушка мяча движется вперед быстрее, чем его нижняя сторона, — и мяч „ныряет“ на площадку тотчас же за сеткой, несмотря на большую силу удара (фиг. 25). Тяжелые мячи отклоняются меньше, чем легкие, движущиеся с той же скоростью; мы все знаем, какое отклонение можно дать крикетному мячу; отклонение, которое опытный пинчер может сообщить главному мячу, представляет чудесное зрелище. Из всех способов изучения этого явления самый удобный и простой — на игрушечных мячах, которые теперь делаются очень упругими и могут выдержать толчки. Очень легко, ударяя их рукой или, если угодно, ракеткой, дать им любое вращение и наблюдать все случаи отклонения их полета.

Различные свойства газов, которые мы рассмотрели, все могут быть объяснены в предположении, что атомы, составляющие некоторые из них, имеют очень слабое стремление соединяться с другими атомами того же рода или какого-нибудь другого; я назвал такие атомы „необщительными“. Другие же атомы, например водородные и кислородные, очень общительные сами по себе, стремятся образовать более или менее необщительную молекулу. Так воздух состоит из смеси необщительных атомов и молекул: в нем есть молекулы кислорода, каждая из которых состоит из двух атомов, молекулы азота, аналогично построенные, немного молекул двуокиси углерода, состоящих из одного атома углерода и двух атомов кислорода, некоторое число отдельных атомов аргона и, вероятно, малые проценты других газов. Все они образуют газы, вследствие малого стремления к соединению; эта независимость, которую атомы и молекулы, таким образом, сохраняют, вместе с их движением и объясняют вполне свойства газов.

Спросим себя теперь, нельзя ли поставить в связь свойства этих атомов с той общей идеей строения атома, которая была развита в предыдущей лекции. Каким образом представление

об атоме как о солнечной системе может быть связано с этим стремлением соединяться или не соединяться, образовывать молекулы с такими же стремлениями и т. д.? Полный ответ на эти вопросы может дать химия на основании своих последних достижений, но вдаваться в подробности в этом отношении не входит в наши намерения. Существуют, однако, простые закономерности, которые, хотя и не могут быть объяснены и, по-видимому, часто нарушаются, но дают нам руководящую нить для установления связи между фактами. Вернемся к нашим необщительным атомам, с номерами 2, 10, 18, 36, 54, 86. Первое, что поражает нас в этом ряде, это любопытное соотношение между порядковыми числами их. Если выписать последовательные разницы между ними, то получается ряд: 2, 8, 8, 18, 18, 32. Эти числа равны удвоенным квадратам чисел 1, 2, 3 и 4. Мы уже говорили, что разница между атомами различных видов есть разница в числах электронов, сидящих в них. Я не буду пытаться давать экспериментальные и теоретические определения числа электронов в различных атомах: они очень сложны, тогда как результат их прост и достаточен для наших целей. Так как число электронов в атоме, или, лучше, число, выражающее положительный заряд ядра, имеет само по себе такое огромное значение, мы должны думать, что под этой любопытной численной разницей, которую мы подметили, скрывается нечто весьма существенное. Вероятность этого соображения еще более возрастает, если мы рассмотрим дело с другой точки зрения.

Химики уже давно заметили, что существует замечательная аналогия в свойствах атомов различных видов. Для наших целей нам удобнее выразить эти наблюдения в числовых соотношениях. Мы выпишем некоторые из них таким образом: напишем в ряд восемь атомов по порядку их номеров, начиная с гелия; под ними поместим восемь следующих, начиная с неона. Мы имеем, таким образом, продолжая эти ряды до номера 20 (см. модель на фиг. 9), следующую табличку:

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

Мы выписали, таким образом, часть „периодической системы элементов“. Она составлена таким образом, что атомы гелия,

неона и аргона, которые так походят друг на друга в главном свойстве — необщительности, стоят в одном и том же вертикальном столбце. Оказывается, что литий, натрий и калий, также очень сходные между собой, стоят в соседней колонне, и что остальные члены наших строк группируются таким же замечательным образом. Взаимное сходство веществ одной и той же колонны проверено и подтверждено различными способами: оно является одним из важнейших свойств элементов. Указанная группировка элементов получила название периодической системы их, — название, в котором заключается описание самого факта.

Мы можем теперь сделать вполне основательное предположение, что свойства атома, обнаруживаемые им во взаимоотношениях с другими атомами, вполне определяются особым расположением его электронов, и в особенности тех, которые ближе к поверхности атома и прежде всего сталкиваются с другим атомом. Литий, натрий и калий, по всей вероятности, ведут себя одинаково потому, что обладают одинаковым распределением внешних электронов; то же можно сказать об углероде и кремнии, фторе и хлоре и т. д. Такие соображения привели к следующим гипотезам. Пусть оба электрона гелия расположены симметрично по обе стороны от ядра гелия. Пусть каждый следующий атом имеет такое же устройство внутри и, кроме того, внешнюю электронную группу. Тогда атом лития будет иметь два электрона, как и гелий, и еще один, принадлежащий к внешней группе. Бериллий имеет два во внешней группе, бор — три, углерод — четыре, азот — пять, кислород — шесть и фтор — семь. Мы предположим далее, что список добавочных электронов кончается с восьмым электроном неона и что для всех атомов с большим номером внутренняя группа из двух и вполне заполненная группа из восьми электронов сохраняется; электроны же сверх этого числа образуют новую группу. Так натрий, подобно литию, имеет один электрон во внешней группе, магний — два, подобно бериллию и т. д. Хлор, подобно фтору, имеет во внешней группе неполное (до восьми) число электронов, в то время как аргон, аналогично неону, имеет все восемь. Начиная с калия, появляется новая группа электронов: кальций имеет два электрона в этой новой группе и т. д. Последняя группа заполняется уже восемнадцатью электронами; так учат нас опытные данные. Мы можем, впрочем, не рассматривать этот вопрос дальше, тем более, что он очень усложняется.

Рассуждая таким образом, мы можем понять, почему члены одного и того же столбца должны быть подобны по своим свойствам. Мы можем спросить себя, как индивидуальные особенности атома зависят от числа электронов в его внешней оболочке, которое остается одним и тем же для всех атомов одной и той же колонны. На этот вопрос мы можем дать приблизительный ответ следующим образом. Рассматривая накопленный химией огромный фактический материал относительно способности атомов давать соединения и при надлежащих условиях разрушать существующие соединения, создавая новые, можно установить ряд законов, которые непосредственно связаны с числом электронов во внешних группах. Прежде всего, всегда имеется стремление заполнить пустые места в неполных группах. Так, если бы хлор имел одним электроном больше в своей внешней группе, эта группа была бы полна, в том смысле, что никаких новых электронов к ней уже не может быть присоединено. Следовательно хлор все время, так сказать, ищет недостающий ему электрон и очень энергично отнимает его у других атомов, которые не держат его достаточно прочно. Правда, что при этом равновесие электрических зарядов в атоме нарушается: лишний электрон сообщает ему отрицательный заряд. Но несмотря на это существует все-таки сила — происхождения ее мы не понимаем, — которая стремится дополнить число электронов внешней оболочки до восьми. Это — та сила, которая заставляет атом хлора отрывать электрон у других атомов и присоединять его к себе, разрушая и изменяя их соединения так, чтобы они могли отдать электрон хлору, который благодаря этой силе является таким активным разрушителем. Точно также сера нуждается в заполнении двух пустых мест, и этим определяются в значительной мере ее свойства.

С другой стороны, у лития, натрия, калия внешние группы только начали образовываться: каждый из них имеет во внешней группе только по одному электрону. Связь этого электрона с атомом слаба, и поэтому, когда атом хлора требует его, электрон охотно меняет хозяина. В результате такого перемещения внешние группы каждого атома оказываются вполне заполненными: хлор становится подобен аргону, и, если первым атомом был натрий, он становится подобен неону. Но оба атома теперь заряжены электричеством: хлор — отрицательным,

так как он имеет один лишний электрон, натрий — положительным, так как у него теперь нехватает одного электрона для того, чтобы уравнять положительный заряд ядра и отрицательные заряды оставшихся электронов. Вследствие этого между атомами возникают силы электрического притяжения: они образуют теперь молекулу обыкновенной поваренной соли. Натрий есть мягкий белый металл. Как мы увидим дальше, характерной особенностью металлов является то, что они обладают одним или двумя электронами, которые легко могут быть оторваны от них. При таком соединении белый металл и ядовитый газ образуют прозрачную кристаллическую соль. Все свойства их изменяются в корне, но это не должно удивлять нас, если мы вспомним, что расположение электронов в наружном слое молекулы может быть совершенно отличным от распределения их в атомах до их соединения, и что свойства атома и молекулы определяются этим распределением.

Можно привести бесчисленное множество примеров соединений такого рода. Как пример более сложный мы возьмем фтористый кальций — кристалл, известный под именем плавикового шпата. В нем два атома фтора, каждый из которых нуждается в одном электроне (см. таблицу выше), присоединяют их, отнимая их у кальция, обладающего двумя электронами во внешней группе, и каждый атом фтора захватывает по одному электрону кальция в свою собственную систему. Молекула плавикового шпата содержит, следовательно, три атома. В соединениях алюминия, например в кристаллах рубина и сапфира, два атома алюминия принуждены были отдать по три электрона своего внешнего кольца трем кислородным атомам, каждый из которых забирает по два электрона.

Кроме отдачи и захвата электронов, есть еще другой способ, при помощи которого атомы могут заполнить свои внешние группы: они могут иметь общие электроны; каждый из атомов может считать их принадлежащими к своей собственной системе, так же как два дома могут иметь одну общую стену. Так два атома водорода, каждый из которых содержит по одному электрону, соединяются так, что образуется группа из двух электронов, как у гелия, и эта комбинация является молекулой водорода. Два атома кислорода тоже соединяются и образуют молекулу кислорода, в которой каждый атом кислорода окружен восьмью электронами, четыре из которых

удерживаются обоими атомами одновременно. В молекуле алмаза, как мы увидим, каждый атом углерода окружен четырьмя другими углеродными атомами, с каждым из которых он делится двумя электронами. Таким образом атом обладает внешней оболочкой с восьмью электронами, которые не все принадлежат ему безраздельно. Такой способ соединения, вообще говоря, очень прочен: молекулы, так образованные, очень устойчивы. Больше того — многие молекулы, так образовавшиеся, удовлетворены, так сказать, сами собой: они имеют очень слабые стремления соединяться с другими молекулами. Они образуют газы. Но наиболее постоянными газами являются те самые, атомы которых имеют уже целиком заполненные внешние группы — гелий, аргон, неон и другие. Они обнаруживают наиболее полное развитие газовых свойств, которые мы рассматривали как результат слабости их стремлений к соединениям и перевеса над этими стремлениями — движения.

---

## ЛЕКЦИЯ ТРЕТЬЯ. О ПРИРОДЕ ЖИДКОСТЕЙ.

Различие между газами и жидкостями заключается в том, что в газе атомы и молекулы движутся по всем направлениям совершенно независимо друг от друга, тогда как в жидкостях они всегда находятся в соприкосновении, хотя все время меняют своих соседей. В жидкостях, в борьбе между притягательными силами и движением, последнее уже не имеет безусловного преимущества: притягательные силы еще не настолько велики, чтобы удержать все молекулы в соприкосновении друг с другом, но они все же удерживают большинство их, так что образуется определенный объем жидкости, имеющий видимые границы. С другой стороны, влияние притягательных сил тоже не безгранично: в жидкостях все время идет процесс, который мы называем испарением. Представим себе чашку с водой в пустой комнате. Молекулы воды постоянно движутся — колеблются, вращаются, меняя все время своих соседей. Их движение, вообще говоря, не настолько сильно, чтобы оторвать их друг от друга, но на границах жидкостей создаются особые условия. Таким образом молекулы держатся вместе так, что тело получает определенный объем и существуют границы этого объема. Только на свободной поверхности эти границы неопределенны: в постоянном обмене количествами движения может случиться так, что наружные молекулы получают импульсы, достаточные для того, чтобы порвать их связь с нижележащими молекулами, и оставят поверхность жидкости. Если бы это произошло с молекулой внутри жидкости, она была бы снова поймана. Таким образом комната, в которой стоит чашка с водой, содержит все увеличивающееся число молекул воды, летающих в воздухе независимо друг от друга,— так же, как молекулы газов. Если комната заперта со всех сторон, возрастание числа молекул воды в воздухе не продолжается безгранично, потому что

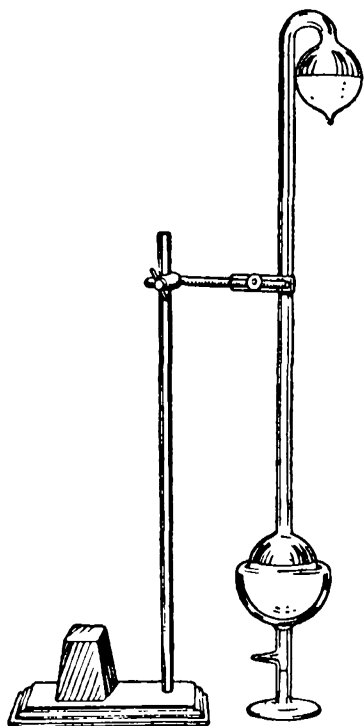


настанет момент, когда число свободных молекул воды будет так велико, что ударяющихся о ее поверхность и снова попадающих в воду будет столько же, сколько вылетающих из воды. Пространство тогда становится насыщенным водяным паром. Это может произойти еще до того, как чашка опустеет; но если воздух в комнате все время перемешивается, унося с собой пары воды, вода в чашке через некоторое время испарится вся.

Молекулы, оставляющие поверхность жидкости, обладают запасом энергии большим, чем средняя энергия частиц жидкости; часть этого запаса расходуется на отрывание их от своих соседей. В результате средняя энергия всего тела все время падает во время процесса испарения. Другими словами, вода становится все холоднее. Мы все хорошо знакомы с этим явлением. Размахивая мокрой рукой, мы чувствуем холод: мы чересчур энергично заставляем идти тот процесс, которым пользуется природа для охлаждения нашего тела до надлежащей температуры. Наше тело требует пополнения той энергии, которую унесли с собой испарившиеся молекулы. Охлаждение может быть сделано еще большим, если взять жидкости, испаряющиеся быстрее воды; так, например, врачи иногда употребляют эфир для местных охлаждений. В теплых сухих странах питьевая вода охлаждается в мешках из пористой ткани, которые подвешиваются в тени и на ветру, и чем теплее и суше ветер, тем холоднее становится вода. В жаркое лето в Австралии можно видеть такие мешки, подвешенные на верандах домов или под крышами станций городских железных дорог. Вода просачивается через ткань и быстро испаряется благодаря ветру; остальная вода в мешке сильно охлаждается.

Мы можем сделать очень показательный опыт на нашем лекционном столе. Два шара, изображенные на фиг. 26, содержат только воду; воздух из них удален. Вода сначала переливается в верхний шар, нижний же погружается в жидкий воздух. Через две-три минуты вода замерзает, хотя верхний шар не был даже близок к жидкому воздуху. Объяснение этого явления заключается в том, что молекулы воды, вылетающие с ее поверхности, спускаются по трубке в нижний сосуд. Это должно случиться, конечно, независимо от того, окружен ли нижний шар жидким воздухом или нет; но если бы жидкого воздуха не было, то молекулы — по крайней мере большая

часть их — вернулись бы в верхний шар, принося с собой и свою энергию. Таким образом вода охлаждалась бы очень мало. Если же в нижнем шаре поддерживается температура жидкого воздуха, то молекулы не могут вернуться. Они теряют свое движение и собираются в нижнем шаре сначала в воду, которая потом становится льдом. Вода в верхнем шаре очень



Фиг. 26. Криофор.  
Нижний шар, пустой, погружен в жидкий воздух. Верхний — содержит воду, быстро замерзающую.

быстро охлаждается и скоро замерзает. Воздух должен быть удален из всего сосуда для того, чтобы дать дорогу молекулам воды и, следовательно, ускорить испарение. Если весь процесс идет слишком медленно, то теплота успевает передаваться внешним окружающим воздухом, и вода в шаре не замерзнет. Присутствие воздуха не может препятствовать наиболее подвижным молекулам оставить поверхность, но оно затрудняет их дальнейший путь процессом диффузии, который мы уже рассмотрели.

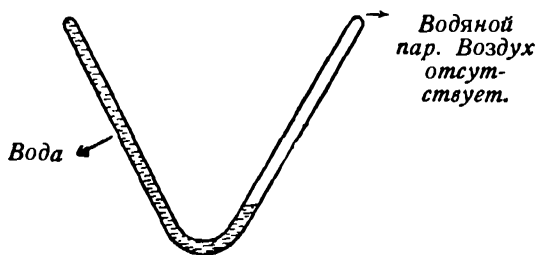
Когда жидкость кипит, температура ее должна быть настолько высока, чтобы испаряющиеся молекулы были многочисленны и обладали скоростями, достаточными для того, чтобы вылетать в воздух с поверхности жидкости. Тут уже не

отдельные молекулы прокладывают себе путь через скопление их. Весь процесс кипения так резко отличается по внешнему виду от процесса испарения, что нужно еще установить их тесное родство. Температура, при которой жидкость кипит, зависит от давления, которое должны преодолеть испаряющиеся молекулы; на вершине Монблана вода кипит при температуре на  $15^{\circ}$  С более низкой, чем внизу:

Теплота, необходимая для испарения жидкости, служит мерой энергии, требующейся для отрывания молекул друг от

друга. Возможно, что вы недооцениваете действия сил сцепления, каждая из которых сама по себе мала, но которые так могущественны в целом; вспомним, однако, сколько тепла требуется для превращения воды в пар и какую работу может этот пар совершить. Силы сцепления могут быть продемонстрированы непосредственно на каждой висящей капле воды или какой-нибудь другой жидкости. Молекулы в капле сцеплены друг с другом, как пчелы в рое. Те связи, которыми молекулы последнего слоя удерживаются на поверхности, с которой свисает капля, уравнивают вес капли. Этот простой пример, может быть, недостаточно убеждает нас в том, что силы сцепления велики и имеют чрезвычайно важное значение. Следующий опыт может еде-

лать это более ощутительным. Тут у нас имеется изогнутая стеклянная трубка с водой, но без воздуха (фиг. 26 а). Вода наполняет целиком одно колено; если бы в ней оказался маленький

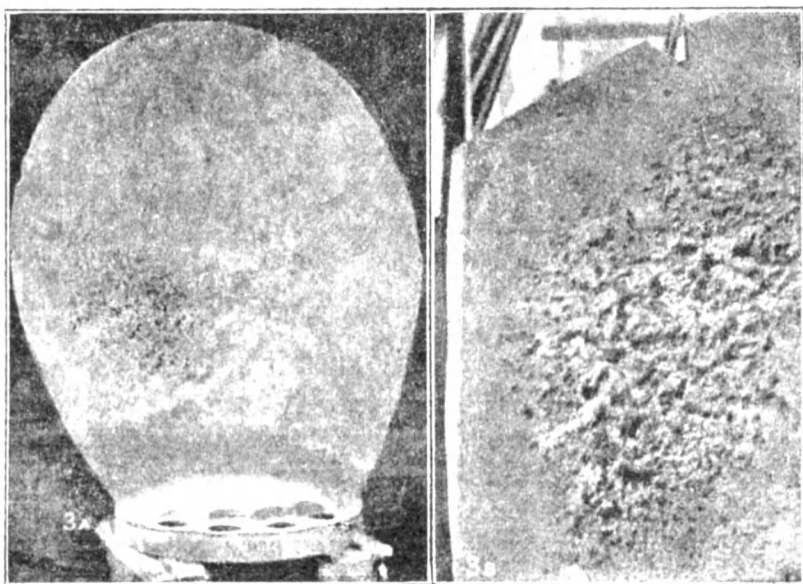


Фиг. 26 а. (См. в тексте).

пузырек воздуха, то его можно было бы выгнать в другое колено, наклоняя трубку надлежащим образом и постукивая ею по столу. Когда это сделано, трубка устанавливается так, чтобы уровень свободной поверхности воды был значительно ниже уровня воды в другом колене, где она пристает к концу стеклянной трубки. Вес поднятого столба воды уравнивается сцеплением молекул воды и стекла и молекул воды друг с другом. В самом деле, тут мы имеем каплю воды в фут длиной. Мы не можем получить каплю такой же длины, заставляя стекать воду с наших пальцев, потому что вода разрывается при изменении ее формы. Если это предупреждено, как в нашей стеклянной трубке, величина молекулярных сил сцепления становится более очевидной. Когда мы пробуем растянуть железный стержень, мы видим по тем усилиям, какие безуспешно делаем, насколько велики силы, удерживающие вместе молекулы твердого железа; если же мы думаем, что легко растянуть массу воды, то мы заблуждаемся. Легко заставить воду изменить свою форму, но чрезвычайно трудно разорвать

слой молекул, находящихся и непосредственном соприкосновении друг с другом. Вода, на самом деле, одинаково неподатлива—как по отношению к сжатию, так и по отношению к разрыву.

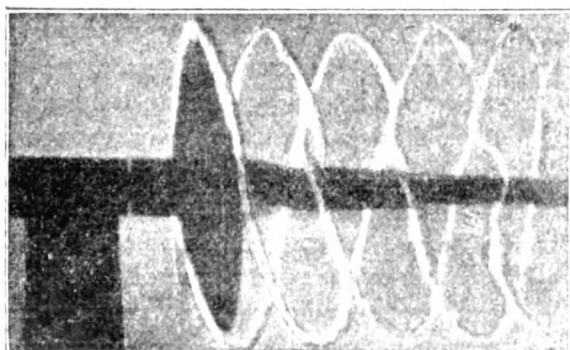
Мы сделаем теперь маленькое отступление в ходе наших рассуждений для того, чтобы показать одно любопытное явление с этой же изогнутой трубкой. Если трубку наклонить так, чтобы вода полилась и упала сразу на другой ее конец, то мы услышим звук удара, такой же, как при ударе двух твердых тел; рука, держащая трубку, тоже чувствует толчок. Этот опыт описан и под названием водяного молотка; его объяснение очень просто. Воздуха в трубке нет, и вода ударяется о конец



Фиг. 27. Правый снимок изображает разъеденную часть лопасти винта „Мавритании“. Маленькие выбоины на краю лопасти особенно хорошо видны на левом снимке.

трубки, как если бы она была твердым телом; и в самом деле она ведет себя, как твердое тело, так как она несжимаема. Обращаться с такой трубкой нужно очень осторожно, потому что легко пробить ее концы водой, в нее налитой; это — все равно, что ударить молотком по стеклянной посуде. Очень поучительный и важный пример того же явления был обнаружен в последнее время в случаях порчи лопастей винтов на кора-

блях, снабженных быстро вращающимся винтом. Разъедание лопастей винта „*Мавритании*“ показано на фиг. 27. Явление наблюдалось впервые после того, как парсоновские паровые турбины увеличили скорость вращения винта и, следовательно, скорость хода корабля. В первый раз в технике увеличение



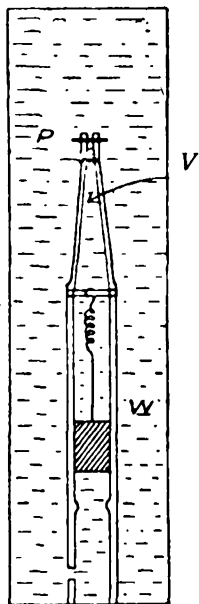
Фиг. 28. Фотография полостей, образуемых винтом опытного судна Парсон и коми.

Винт имеет форму диска; он изображен слева на нашей фотографии. Он оставляет за собой три пенистые винтовые линии. Мы видим те места винта, откуда начинаются спирали.

скорости явилось причиной больших денежных потерь. Объяснение этого явления заключается в том, что пароходы начали двигаться так скоро и винты их вращаться так быстро, что вода не успевает заполнять пустоты, которые лопасти пропеллера оставляют позади себя. Фотографии на фиг. 28 показывают полости, которые образовывал винт при испытании в Ньюкэстле на *Turbinia work*. Они располагаются по спиралям; на фотографии можно проследить спирали, образованные каждой лопастью винта.

Эти полости смыкаются под давлением окружающей воды, и, так как в них нет воздуха, стенки полостей ударяются одна о другую так же жестко, как вода в нашей трубке ударяется о стекло. Если часть лопасти винта как раз служит стенкой полости, удар может быть так силен, что куски металла отрываются. Многих трудов стоило добиться полного объяснения этих разрушений лопасти винта и еще труднее было их устранить; лопасти винтов делаются теперь из особого сплава, способного противостоять разрушениям, и в то же время самое устройство их усовершенствовано. Чрезвы-

чайно интересный опыт, произведенный во время этих изысканий, показан на фиг. 29. Крепкий металлический сосуд, изображенный в середине, наполнен водой и падает на дно резервуара, также наполненного водой, при чем его движение внезапно прекращается. Количество движения воды в конической части прибора, сложенное с количеством движения груза  $W$ , достаточно для того, чтобы привести воду в движение и оставить пустоту в вершине конуса  $V$ . Вода, конечно, потечет снова в сосуд под давлением окружающих слоев воды и, попав в конус, увеличивает свою скорость, стремясь пройти через узкое отверстие; при этом она ударяет с такой силой, что пробивает отверстие в медной пластинке, помещенной в  $P$ .



Фиг. 29. Парсоновский водяной молот.

При заполнении полостей, образованных винтом, вода шумит так, что корабль можно услышать на большом от него расстоянии при помощи подводных приемников звука.

Многие из моих слушателей непосредственно знакомы с ударами, которые можно получить от водяных масс, вследствие их несжимаемости; они ударяют довольно сильно тех, кто неумело прыгает в воду с высоты.

Так как молекулы жидкости стремятся сблизиться под влиянием сил сцепления, то жидкость должна принимать форму шара, если она представлена самой себе. Это и наблюдается на самом деле, когда ртуть проливают на стол и она разбивается в шаровые капли, катающиеся по столу, как если бы они были твердыми шариками. С водой можно было бы получить то же самое, если бы она не смачивала стола; вообще говоря, она смачивает почти все твердые тела, но существуют и исключения, например пыльные поверхности. Что собственно представляет из себя смачивание и что под этим разумеют, мы должны еще выяснить; это очень важная часть нашей задачи. Сила тяжести противодействует стремлению жидкостей собираться в шарики. Если капля ртути очень мала, она кажется совершенно круглой, но большие массы ртути похожи скорее на толстые диски с закругленными краями (фиг. 30). Если мы хотим наблюдать образование хороших шаров под действием сил сцепления,

то должны постараться уничтожить и смачивание и силу тягости. Маленькая капелька ртути служит хорошей иллюстрацией. Другим примером может служить производство свинцовой дроби. Расплавленный свинец падает в виде дождя с высоты и, падая, собирается в круглые капли, подобно тому как собираются дождевые капли.

Может показаться, что это противоречит только что сказанному: тяготение не исключено и действует вполне, и тем не менее капли образуются. Однако вредное действие тяготения проявляется косвенно, а именно сопротивление тяготению препятствует образованию правильных шаров. В случае больших капель ртути их сплюсненность обусловлена не самим тяготением непосредственно, а давлением вверх со стороны стола, которое противодействует тяготению. Когда капли свинца падают на дно дроболитни, они попадают в воду, где и затвердевают в том виде, какой они приобрели.

Чтобы иллюстрировать все здесь сказанное, мы покажем такой опыт. Темная жидкость, орто-толуидин, не смешивается с водой, или, другими словами, вода не смачивает ее; плотность этой жидкости такова, что капля свободно плавает в

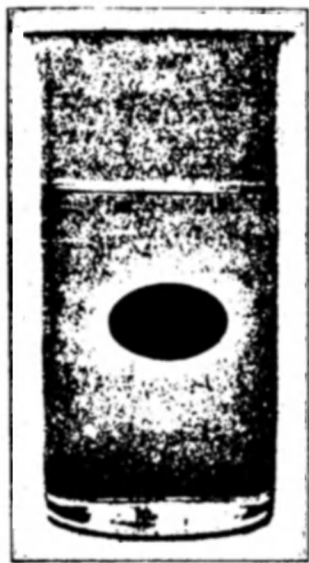


Фиг. 30. Капли ртути на столе.

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

слое чистой воды, налитой на слой раствора соли (фиг. 31). Капля орто-толуидина поддерживается в каждой точке окружающей водой, а не в одном только месте, как это мы наблюдаем в капле ртути, когда она, в виде шарика, лежит на твердой поверхности. В условиях нашего опыта ни смачивание ни тяготение не действуют, и поэтому образуется большая капля, — она имеет почти пять сантиметров в диаметре. Если надавить на нее стеклянной палочкой, она медленно расправляется или же, пройдя через ряд различных странных форм, рассыпается на мелкие шарики. Если надавить на нее слегка, то на ее поверхности образуется впадина; стремление толуидина образовывать сферическую каплю препятствует вначале образованию впадины, но потом он приспособляется, насколько возможно, к существующим обстоятельствам. Точно также, когда мы пускаем твердое тело — например железный шар — плавать на поверхности ртути, около него образуется впадина. Поверх-

ность ртути возле шара имеет форму, показанную на фиг. 32. Если присмотреться к форме ртутной поверхности вблизи стенок сосуда, содержащего ее, мы увидим ту же самую линию.



Фиг. 31. Большая капля ортолуидина, плавающая в воде поверх слоя раствора соли.

Если положить стеклянную пластинку на самое дно чашки со ртутью и придавить ее так, чтобы ртуть раздвинулась и не оставалась между пластинкой и дном чашки, то пластинка будет лежать там, где мы ее положили, и, чтобы сдвинуть ее с места, надо приложить большое усилие (фиг. 34). Объяснение этого факта очень просто и основано на тех принципах, которые мы только что рассмотрели. Для того чтобы пластинка могла подняться, ртуть должна проникнуть под нее; иначе пластинка не может подняться, потому что, если даже под ней не совершенная пустота, то во всяком случае очень мало воздуха, и давление его быстро падает, когда пластинка поднимается. Так как давление на верхнюю сторону пластинки больше атмосферного, то силы, прижимающие ее ко дну, гораздо больше тех, которые ее могут поднять. На границах пластинки форма ртутной поверхности такова, как она изображена на фиг. 34: ртуть отказывается проникнуть в тонкий слой между пластинкой и дном сосуда.

Каплю жидкости, которая стремится принять форму шара, можно представлять себе заключенной в упругую оболочку. Атомы ртути на поверхности находятся в других условиях, чем атомы внутри, так как все они связаны силами сцепления

Есть, однако, разница между смачиванием жидкостью стенок сосуда, заключающего ее, и смачиванием тела, плавающего в ней. Если налить чистой воды в чистый стеклянный сосуд, то вода поднимается у стенок его. Это уже более сложное явление, — тут, очевидно, действуют притягательные силы между стеклом и водой.

Если положить стеклянную пластинку на самое дно чашки со ртутью и придавить ее так, чтобы ртуть раздвинулась и не оставалась между пластинкой и дном чашки, то пластинка будет лежать там, где мы ее положили, и, чтобы сдвинуть ее с места, надо приложить большое усилие (фиг. 34). Объяснение этого факта очень просто и основано на тех принципах, которые мы только что рассмотрели. Для того чтобы пластинка могла под-

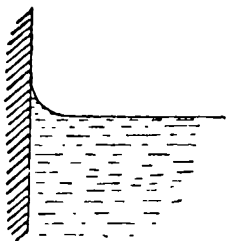


Фиг. 32. Железный шар, плавающий в ртути (разрез).



только с одной стороны. В этом только смысле и можно говорить о существовании здесь поверхностной пленки. Мы пользуемся тем не менее представлением о поверхностной пленке, считая его удобным термином, и говорим об ее стремлении сохраниться и о ее натяжении. Иногда, впрочем, поверхности, отличные по строению от внутренних частей жидкости, действительно образуют пленку; над такими пленками можно сделать много интересных наблюдений. Наиболее известным примером образования поверхностной пленки служит мыльный пузырь. Мы растворяем в воде кусочек мыла и сбиваем эту мыльную воду в пену или выдуваем из нее пузыри. Какова роль мыла в этих явлениях? Ответ на это можно найти в свой-

ствах молекулы мыла. Она имеет очень занятную форму; длина ее во много раз больше ее толщины. Она состоит из це-



Фиг. 33. Вода, поднимающаяся у стенки стеклянного сосуда, которую она смачивает.

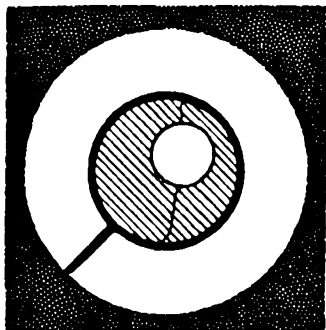


Фиг. 34. Стеклянная пластинка на дне сосуда сортутью. Пластинка слегка поднята над дном для того, чтобы показать, что ртуть не проникает в образовавшееся таким образом пространство.

почки атомов углерода, окаймленной по всей ее длине атомами водорода и оканчивающейся с одной стороны маленьким пучком из трех атомов водорода, с другой стороны — группой из атомов кислорода и натрия. Первый из этих пучков ведет себя очень сдержанно; его стремление к другим атомам и молекулам очень слабо. Другой же вовсе не так необщителен; это — активная группа, стремящаяся соединиться с другими; особенно сильно ее стремление соединиться с молекулами воды, почему мыло и растворяется в воде. Таким образом только один конец цепочки является активным в этом смысле, другой конец и стороны цепочки индифферентны, — поэтому молекула мыла предпочитает расположиться на внешней границе воды, если встретит ее во время своего странствования. Таким образом на поверхности воды образуется реально существующая пленка, состоящая из молекул мыла, стоящих, так сказать, на одном конце; один конец их погружен в воду, другой выставлен

в воздух. Они располагаются вместе бок о бок подобно колосьям в поле или ворсинкам на куске бархата, но они не независимы друг от друга, как волоски шерсти: они связаны между собой особыми силами притяжения, возникающими между ними, когда они располагаются друг относительно друга таким образом. Мы встретимся с этим явлением при других обстоятельствах, о которых мы скажем позже. Таким образом молекулы мыла образуют на поверхности воды нечто вроде кольчуги,— на самом деле существующую оболочку. Оболочка эта может увеличиваться, при чем новые длинные молекулы входят в раствор и занимают свое место рядом с прежними. Мыльный пузырь есть тонкостенный шаровой слой мыльного раствора, ограниченный снаружи и изнутри мыльными пленками; именно бла-

годаря этим пленкам он и держится так долго. Он сжимается, если воздух, наполнявший его, выходит каким-нибудь образом; очевидно длинные молекулы стремятся, насколько возможно, сблизиться с молекулами воды. Но внешняя граница все же должна существовать; поэтому там, где встречаются молекулы мыла и воды, длинные цепочкообразные молекулы мыла образуют внешний слой.



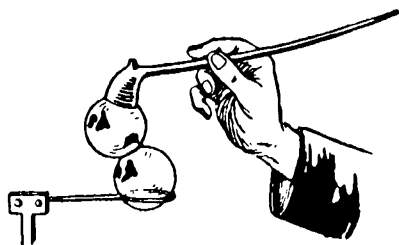
Фиг. 35. Петля из очень тонкой нити, плавающая на мыльной пленке.

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

тянутую на нем. На пленке плавает петля из тонкой шелковинки, привязанная к проволоке еще до погружения ее в мыльный раствор. Если проколоть пленку внутри нитяной петли, прикоснувшись к ней накаленной иглой, то петля сейчас же принимает форму правильного круга, как показано на фиг. 35. Из этого опыта ясно, что вся пленка находится в состоянии натяжения и стремится сократиться.

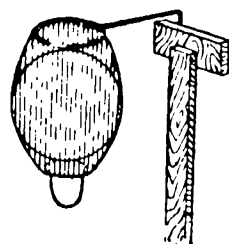
Очень любопытным свойством мыльных пузырей является их неспособность соединяться с другими пузырями. Можно посадить пузырь на кольцо (см. фиг. 36), выдуть другой и толкнуть

им первый с такой силой, что, повидимому, они должны были бы лопнуть оба. Однако пузыри отскакивают друг от друга, как если бы они были резиновыми шарами. Вероятное объяснение этого явления заключается в том, что внешние слои обоих пузырей состоят из таких концов молекул мыла, которые, как мы уже сказали, имеют очень слабое стремление соединиться с другими молекулами или частями молекул. Поэтому два пузыря совершенно не стремятся соединиться, если мы их прижмем друг к другу, так как при этом мы приводим в соприкосновение прежде всего их части, которые не могут



Фиг. 36. 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 недеятельные концы молекул.



Фиг. 36 а.

притягивать друг друга. То же самое можно очень наглядно показать на прекрасном опыте Бойса <sup>1)</sup>. Пузырь выдувается на кольцо, укрепленном в штативе (фиг. 36 а); на его нижнюю часть накладывается маленькое кольцо с очень маленьким грузом, как показано на рисунке. Затем стеклянную трубку наполняют мыльным раствором и вводят ее через верхушку пузыря внутрь его; если подуть через трубочку, то внутри первого пузыря появляется новый. Когда он достигает определенных размеров, раздувание его прекращают. Внутренний пузырь остается в нижней части первого пузыря, касаясь его по окружности, не проходящей по дну пузыря.

Это сделано намеренно; именно для этого подвешен к внешнему пузырю маленький груз. Оба пузыря не могут слиться, хотя они касаются друг друга по целой линии, конечно вследствие того, что они обращены друг к другу поверхностями из недеятельных, или необщительных, концов цепочкообразных молекул. Если бы внешнему пузырю не была бы придана такая форма, оба они

<sup>1)</sup> Ч. В. Бойс. Мыльные пузыри. Перевод под ред. проф. А. П. Афанасьева.

коснулись бы друг друга своими нижними точками. На внутреннем пузыре образуется всегда капля мыльного раствора; если она коснется внешнего — пузыри сольются. Капля раствора некоторым образом образует мост между ними. Если пропустить стеклянную трубочку через внешний пузырь и снять ею каплю с внутреннего, то они тогда могут касаться друг друга в своих нижних точках, не разрушаясь (фиг. 37).

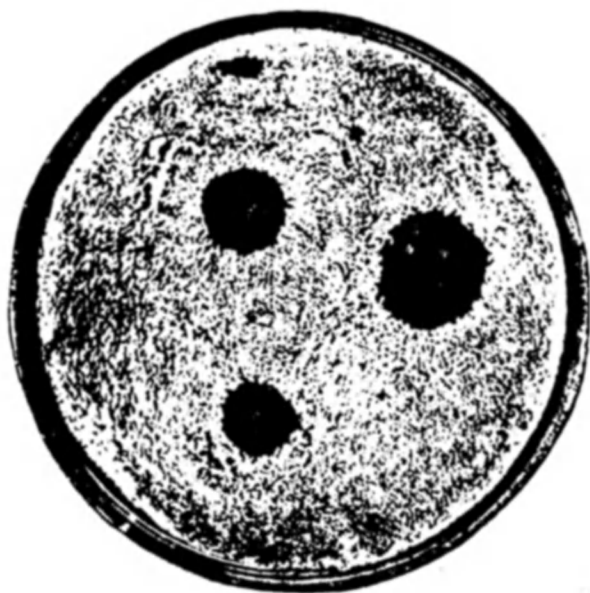


Фиг. 37. Мыльный пузырь остается внутри другого, так же как на фиг. 36, и по тем же причинам они не сливаются.

Пенистость жидкостей часто бывает обусловлена присутствием молекул, обладающих свойством образовывать пленки на поверхности. Пена, собирающаяся на поверхности ручьев, объяснена своим происхождением присутствию в воде молекул разных сапонинов — цепочкоподобных образований, которые находятся во многих травах и деревьях. Точно так же пена на морском берегу представляет собой собрание таких же молекул, образующихся в морской растительности.

Мы очень много узнали об образовании таких длинных молекул за последние годы. В особенности обязаны мы этими знаниями покойному лорду Рэлею, Гарди и Адаму в Англии, Дево во Франции, Лэнгмьюру в Америке, которые исследовали, что происходит при растекании масел по поверхности воды. Мы здесь воспроизведем один или два опыта для того, чтобы дать представление о величине эффекта, о котором говорим. Пусть имеется чистая поверхность воды, то-есть поверхность, свободная от масла и жира. Для получения такой поверхности удобно к водопроводному крану привязать каучиковую трубку и положить ее свободный конец на дно сосуда, чтобы вода плескалась и переливалась через его края, унося с собой всю пыль, осевшую на поверхности. Рассыплем теперь на поверхности тонко измельченный порошок талька или другого подходящего вещества. Затем погрузим тонко

оттянутый стеклянный кончик или иголку в масло — например оливковое — и, сняв предварительно почти все масло, погрузим кончик слегка жирной иголки в воду. Сейчас же около него образуется прозрачный круг (фиг. 38). Длинные молекулы жира располагаются бок о бок на поверхности, как и раньше — в мыльном растворе; только в мыльных пузырях они выталкивались на поверхность из самого раствора, а тут мы их вносим снаружи. Каждая молекула стремится погрузиться в воду своим активным концом и выпрямиться, как если бы она была водяным растением, растущим из воды. В конце концов это им всем удастся, и образуется тонкий слой, в одну молекулу тол-



Фиг. 38. Блестящие круги от маленьких капель масла.

щиной, покрывающий поверхность воды; его толщина — порядка одной десятиллионной доли сантиметра. Измеряя вес взятого масла — трудная задача, так как он очень мал — и покрытую им площадь, можно определить порядок толщины пленки. Этим методом и пользовались перечисленные выше ученые. Теперь же для точных измерений той же величины оказалось возможным воспользоваться новым методом, основанным на применении рентгеновых лучей, и я надеюсь показать вам, как это делается. На основании результатов старых работ можно было

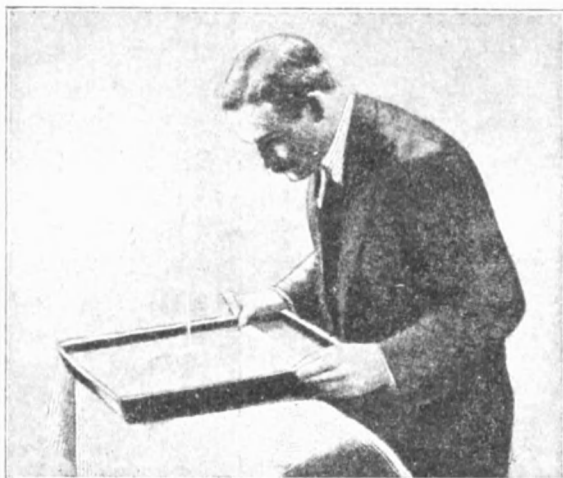
ожидать, что толщина слоя должна быть порядка размеров одной молекулы; это подтверждалось еще тем, что если на поверхность воды помещать разные вещества, о которых химики знают, что они представляют собой цепочковые молекулы различной длины, то толщина слоя меняется с длиной молекулы, как это и должно быть.

Если капля масла достаточно мала и порошок тонко размельчен,—светлое пятно на поверхности имеет форму правильного кружка. Если уколоть иголкой поверхность воды в другом месте, то образуется другой круг. Каждый круг существует независимо от других кругов. Этим воспользовался Дево, чтобы показать, что действие каждой капли сосредоточено вблизи нее на той части поверхности, по которой расплылось масло: это не есть действие общее, влияющее на всю массу жидкости. Конечно вполне естественно ожидать, что капля масла на поверхности воды растекается до тех пор, пока не станет достаточно тонкой; дальнейшее ее растекание тогда прекращается. Пуская большие капли, мы видим на воде большие блестящие участки. Мы можем, например, выпустить сразу несколько капель в широкий сосуд и покрыть слоем масла всю поверхность воды. Если слой порошка на поверхности воды разорван на маленькие участки несколькими маленькими каплями, выпущенными в разных местах, и если не вся поверхность покрывается масляной пленкой, то можно наблюдать скорость растекания масла, прикасаясь к поверхности иглой на малых расстояниях от плавающей кучки порошка и следя за тем, как быстро убегают порошок от масляного пятна.

Импульсы, которые сообщаются таким образом частичкам порошка, служат также причиной быстрых движений кусочков камфары, брошенных на поверхность воды,—это, как известно, старый опыт. При растворении камфары раствор растекается по поверхности воды, образуя пленку, а самая камфара отходит назад подобно орудью, из которого произведен выстрел, или ракете, из конца которой вытекают горячие газы. Иногда кусочки камфары мечутся из стороны в сторону, иногда забавно вращаются. Можно пустить на воду маленькую лодочку, на корме которой прикреплен кусочек камфары, касающийся воды (фиг. 39). Очень занятно видеть, как несколько таких лодочек и кусочков камфары, все времядвигающихся, внезапно останавливаются, если пустить немного

масла на поверхность воды. Масляная пленка моментально покрывает воду; растекание же растворенной камфары по поверхности прекращается.

Мы все слышали о том, что волнение на море стихает, если на воду вылить масло. Мы можем воспроизвести это явление, получив ряд волн, бегущих вдоль длинного сосуда, которым пользовался некогда лорд Рэлей для той же цели; вентилятор служит для производства ветра, и мы видим, что на воде поднимается сильная буря (фиг. 40 А и В). Она чудесным образом

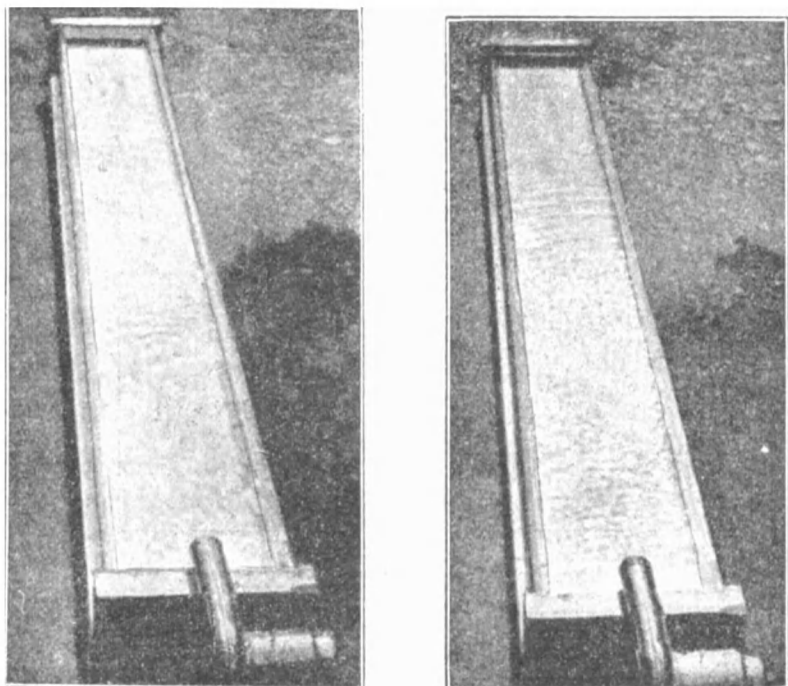


Фиг. 39. Камфарная лодочка.

Маленький кусочек камфары укрепляется на корме легкой лодочки; при растворении ее на поверхности образуется пленка. Она образуется так энергично, что толкает лодочку, стремясь захватить себе место. Если пустить на воду немного масла, то оно растекается по воде в виде тонкого слоя, и лодочка останавливается. Если масло покрывает часть поверхности, лодочка останавливается тогда, когда полоска, которую держат в руках на нашем снимке, убирается так, что масло покрывает всю поверхность слева от нее

усмиряется несколькими каплями масла, выпущенными в центр шторма; через несколько минут масляный слой сносится ветром к концу сосуда, и волны снова вздымаются. Мы можем повторить опыт еще и еще раз. Мы можем сказать, что в этом случае ветер не может „укусить“ воду. Как мы знаем, вода покрыта пленкой масла, внешняя поверхность которой образована неактивными концами длинных молекул; очень возможно, что молекулы воздуха, ударяясь об этот слой, отскакивают от

него, как от гладкой поверхности. Шероховатая поверхность должна была сместиться под толчками молекул воздуха. Под шероховатой поверхностью мы понимаем такую, на которой расстояние между образующими ее молекулами того же порядка, что и молекула, ударяющаяся о нее. Если поверхность масляной пленки очень гладкая и имеет слабое стремление удерживать молекулы, ударяющиеся о нее, то воздух не может ударять о нее сильно и поднимает на ней только маленькие волны,

**А****В**

Фиг. 40. *А.* Буря. *В.* Масло, успокаивающее бурю. Вентилятор вызывает волнение, бегущее вдоль сосуда. Капля масла успокаивает волнение, и поверхность воды становится гладкой. Заметно белое пятно в *В*. Спустя некоторое время масло сдувается к концу сосуда, и волны поднимаются снова. Фотографии были ретушированы для того, чтобы было заметно отражение света от волн.

которые потом, когда масляная пленка исчезнет, вырастают в большие. Таким образом масло умиряет волны, останавливая действие ветра, и движение волн прекращается вследствие большого собственного трения.

Мы переходим теперь к вопросу о смачивании поверхностей. Мы знаем, например, что чистая поверхность стекла смачивается



водой, загрязненная же жиром — не смачивается, даже если слой жира невидим. Молекулы воды совершенно отказываются соединяться с молекулами жира. В этом нет ничего удивительного, так как мы видели, что, по крайней мере, в некоторых случаях длинные молекулы, из которых построены жиры и масла, выставляют наружу свои неактивные концы, которые очень слабо притягиваются молекулами воды. Поэтому вода, налитая на жирную поверхность, собирается в капли так же, как ртуть, налитая на столе: форма водяных капель обусловлена притяжением ее молекул друг к другу. Смазанная маслом иголка может быть осторожно положена на воду; вокруг нее образуется углубление, как если бы на поверхности воды была оболочка, вдавливающаяся слегка под тяжестью иголки. Более удивительным, однако, представляется нам плавание проволочного сита, покрытого жиром. Сито погружается в расплавленный парафин, встряхивается так, чтобы отверстия прочистились, и высушивается; не следует касаться его пальцами в это время. Сито может плавать и нести в себе груз около 10 граммов, как показал Бойс в своих рождественских лекциях много лет тому назад. Оно может быть также наполнено (фиг. 41) водой, но вода

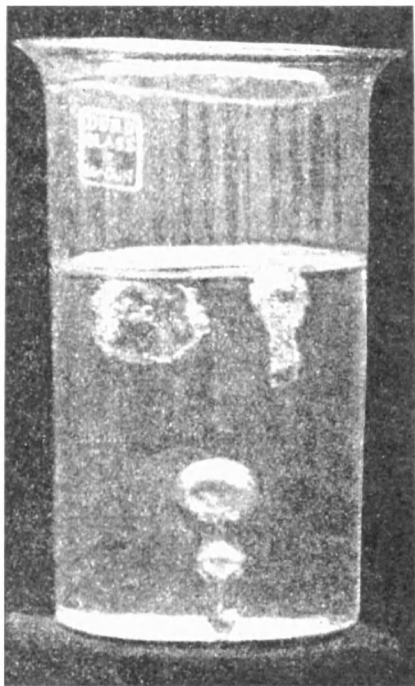


Фиг. 41. Сито, залитое парафином.

должна быть налита осторожно, и лучше всего наливать ее на вложенный в сито лист бумаги, который потом можно удалить. Для того чтобы показать, что отверстия сита действительно совершенно свободны, дадим ситу резкий толчок, водяная пленка сдвигается, и вода тяжелым потоком вытекает на пол.

Если содовая вода налита в чистый гладкий стакан, то на поверхность ее из глубины стакана поднимается очень мало пузырьков газа. Если же стенки грязны или шероховаты, мы видим целые потоки поднимающихся пузырьков. Есть прекрасный давно известный опыт, иллюстрирующий это явление, — опыт „с виноградиной и шампанским“. Мы можем вместо шампанского употребить содовую воду. Виноградина не смачивается водой, и когда она опущена в стакан, она падает на дно его, где скоро собирает вокруг себя множество пузырьков (фиг. 42). Вскоре она вся покрывается слоем пузырьков, становясь

похожей на жемчужину; вследствие своей легкости пузырьки выносят ее на поверхность воды. Виноград немного тяжелее воды и не требует многого для того, чтобы всплыть. Поднявшись на поверхность, виноградина теряет часть своих пузырьков, которые лопаются в воздухе; это происходит до тех пор, пока она снова не утонет, снова соберет на себе пузырьки газа и снова всплывет наверх. Процесс этот повторяется сам собой довольно долгое время, пока в содовой воде есть газ.



Фиг. 42. Виноградина в содовой воде.  
Виноградины и бусинка, смазанные жиром, всплывают наверх, благодаря осевшим на них пузырькам газа; чистая бусинка не собирает пузырьков и остается на дне.

Очень любопытно бросить в стакан с содовой водой две бусинки вместо винограда. Они были предварительно хорошо вымыты в воде с мылом. Этого достаточно, чтобы сделать их чистыми. Никаких пузырьков на них не образуется, и они остаются на дне стакана. Вынем одну из них, потрем жирным пальцем, и она начинает вести себя так же, как виноград, — собирать пузырьки, всплывать, терять их, снова падать и т. д.

Мы можем представлять себе образование пузырьков углекислого газа в содовой воде таким образом, что молекулы газа собираются вместе, расталкивая попадающиеся им на пути молекулы воды. Но молекулы воды очень прочно держатся друг за друга и сопротивляются разъединению.

По этой причине мы не видим образования пузырьков внутри самой воды. На краях, если стекло чисто, вода смачивает стекло, или, другими словами, молекулы воды сцеплены со стеклом сильнее даже, чем одна с другой. Пузырьки не могут при таких обстоятельствах образоваться и здесь, потому что им пришлось бы отрывать молекулы от стекла. Но дело обстоит иначе, если поверх-

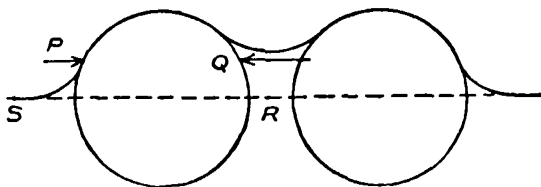
ность жирна и молекулы не могут совершенно на ней держаться, находясь только под давлением остальной воды позади их. В этом случае пузырьки газа могут найти подходящее место для того, чтобы образоваться там, и быстро увеличиваются в размерах. Растолкать окружающую воду уже гораздо легче, когда пузырьки несколько выросли. Это можно очень хорошо показать на других опытах 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 лопнет. В массе пузырьков на стенках стакана или на виноградине большие стремятся поглотить маленькие и соединиться в один большой.

Те маленькие потоки пузырьков, которые мы иногда видим поднимающимися из определенных точек поверхности стакана, обязаны своим образованием каким-нибудь шероховатостям на поверхности стекла — может быть маленьким выступам, — на которых пузырек, желающий образоваться, проходит свои ранние стадии маленьких диаметров.

Эта способность посторонних тел собирать в воде пузырьки и всплывать на поверхность сделалась в последнее время основной целой металлургической промышленности. Различные металлические руды, стертые в порошок, представляют собой смесь обломков каменных пород, например кварца и других силикатов и металлических сульфитов. Оказалось возможным обрабатывать эти смеси при помощи обволакивания содержащихся в них металлических частиц тонкой масляной пленкой, которую вода не смачивает, в то время как частицы горных пород остаются чистыми, и вода смачивает их. Вся масса затем сбивается в пену. Частицы, содержащие металл, становятся легкими благодаря образованию на них пузырьков и всплывают наверх в виде пенистой накипи; остатки руды остаются на дне чана, и таким образом обе части легко разделяются.

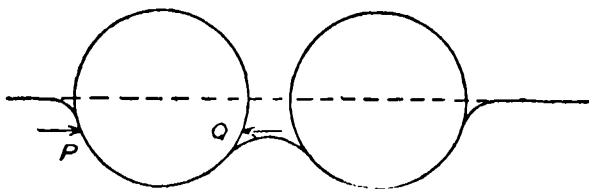
Есть еще другой опыт, который поможет нам разъяснить все вышесказанное. Мы знаем, что вода сама приподнимается у стенок чистого стеклянного сосуда, содержащего ее. Молекулы прилипают к стеклу и, так сказать, влезают друг другу на плечи, стремясь пристать к стенкам. Если погрузить бок о бок в воду две стеклянные пластинки, вода устанавливается выше в пространстве между ними, чем вне их. Те молекулы, которые

уже взообразились на одну стенку, помогают тем, которые карабаются на другую. Говорят, что это явление есть „действие капиллярности“; название это получилось оттого, что явление это особенно заметно в тонких, или „капиллярных“, трубках. Вода



Фиг. 43. Два полых стеклянных шара, плавающих в воде. Давление в  $Q$  меньше, чем давление в  $R$ , потому что  $Q$  лежит на более высоком уровне воды. Давление в  $R$  и  $S$  одинаково, так как они лежат на одном уровне. Давление в  $S$  представляет собою атмосферное, таково же оно и в  $P$ . Таким образом давление в  $P$  больше, чем давление в  $Q$ , и оба стеклянные шара притягиваются друг к другу.

в тонких каналах поднимается на большую высоту, например в случае трубки диаметром около 1 мм—до 2,5 см. Если пустить на поверхность воды маленький пустой стеклянный шарик, вода поднимается около него. Если приблизить друг к другу два такие плавающие шарика, они сами на малом расстоянии, приблизительно около 1 см, начинают двигаться друг к другу и очень заметно сближаются. Мы легко поймем это явление, если рассмотрим чертеж на фиг. 43. Два стеклянные шарика пущены плавать по воде. Давление в  $Q$  меньше, чем давление на пунктирной линии, так как  $Q$  лежит на более высоком уровне воды. Давление на уровне пунктирной линии есть давление атмосферы, так как это есть линия свободной поверхности

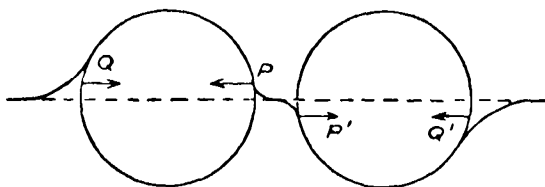


Фиг. 44. Два шара, покрытые жиром, в воде. Давление в  $P$  больше атмосферного и, следовательно, больше давления в  $Q$ ; оба шара притягиваются.

воды. Поэтому и оба давления в точках  $P$ , равные давлению атмосферы, превышают давление в  $Q$  и заставляют оба шарика сближаться.

Если пустить на воду оба шарика из парафина или два

стеклянных шарика, покрытых парафином, то они притягиваются друг к другу, как и чистые стеклянные шарики, но самое действие тут несколько иное (фиг. 44). Как показано на рисунке, между шариками теперь образуется углубление; если теперь сообразить, какие силы действуют между шариками, то опять окажется, что результирующие давления таковы, что заставят шарики сближаться. Но чистый стеклянный шарик убегает от шарика парафинированного. Это явление несколько сложнее, но его можно проследить по фиг. 45, на которой показано расположение действующих сил. Если сосуд, куда налита вода, чист и вода прилипает к его стенкам, чистые стеклянные шарики притягиваются к стенке сосуда так же, как они притягиваются друг к другу. Наоборот, парафинированные шарики



Фиг. 45. Левый шар смачивается водой; правый покрыт жиром и не смачивается. Давление в  $P$  больше давления в  $Q$ , в  $P'$  больше, чем в  $Q'$ . Шары расходятся.

избегают стенок сосуда. Если теперь мы наполним наш сосуд водой так, чтобы вода доходила до его краев и была готова вылиться из него, при чем она уже не поднимается у стенок, а переливается через края сосуда, то чистый стеклянный шарик остается в середине, а парафиновый уходит к стенкам и там останавливается.

Все явления, рассмотренные нами здесь, иллюстрируют один и тот же принцип, на котором основано образование жидкостей, именно — действие сил сцепления между атомами и молекулами, которые достаточно уже велики для того, чтобы удерживать их в постоянной связи друг с другом, но еще не настолько, чтобы связать их в одно твердое тело. Очень важно помнить при этом, что молекулы притягиваются друг к другу только в особых точках своей поверхности; только одна определенная часть молекулы может быть способна притянуть и удержать прочно такую же особую часть другой молекулы. Будучи сближены как-нибудь иначе, они проявляют или очень слабое стремление к соединению или совсем отказываются от него.

## ЛЕКЦИЯ ЧЕТВЕРТАЯ.

### О ПРИРОДЕ КРИСТАЛЛОВ. АЛМАЗ.

Мы видели, что в тех случаях, когда действие движения превосходит силы взаимного притяжения, атомы и молекулы имеют независимое существование и образуют газы, и что далее, когда действие сил притяжения становится несколько больше или движение — слабее, молекулы могут прилипнуть друг к другу и образовать жидкость. Мы предполагаем, что в этом состоянии связи между молекулами еще достаточно слабы, так что они могут легко менять свое положение и своих соседей. Теперь мы займемся последним из возможных состояний вещества, в котором притягательные силы окончательно берут верх над движением. Связи между молекулами становятся многочисленнее и сильнее: каждая молекула связана со своими соседями более чем в одной точке, вследствие чего она прикрепляется к определенному месту. Таким образом получается твердое тело.

Молекулы, вообще говоря, очень сильно разнятся одна от другой своей формой и силами, с которыми они действуют друг на друга. Если эти силы велики, то для того, чтобы предохранить молекулы от соединения в твердое тело, движение должно быть очень сильно; другими словами, точка плавления тела должна быть сравнительно высока. В веществах, подобных алмазу или вольфраму, из которого делают волоски в лампочках накаливания, связи так крепки, что надо повысить температуру тела до нескольких тысяч градусов по стоградусной шкале для того, чтобы освободить молекулы от этих связей. Такие вещества, как сливочное масло или нафталин, едва только остаются твердыми при обычных температурах и уже плавятся при незначительном повышении температуры; другие же, вроде двуокиси углерода или, лучше, водорода и кислорода, должны быть очень охлаждены, прежде чем перейдут в твердое состояние. Все это — вопрос соотношения между двумя противоположными

агентами,—движением и взаимным притяжением,—и легко понять, что точки плавления для разных веществ могут быть чрезвычайно различны.

Кроме того не надо думать, что молекула представляет собой тело, имеющее неопределенную и изменчивую форму, и что притяжение ею своих соседей направлено как-нибудь случайно. При встрече двух молекул они могут или не могут связать друг друга: каждый раз это зависит от того, как они подошли одна к другой. Каждая молекула имеет определенную форму и очертания, можем мы сказать, хотя, употребляя эти выражения, надо помнить, что их применение требует, как оказывается при более внимательном взгляде на дело, большой осторожности. Молекулы соединяются друг с другом так, как если бы на каждой из них были особые точки, способные притягиваться; наличие соединения молекул предполагает, что именно эти точки были расположены надлежащим образом. Взаимодействие между молекулами нельзя сравнивать просто с притяжением двух противоположно наэлектризованных тел; оно больше походит на скрепление двух частей механизма или постройки, например, двух частей железного моста. Совершенно так же, как в этом последнем случае отдельные части должны находиться в определенных относительных положениях для того, чтобы скрепы попали на свои места, две молекулы твердого тела располагаются так, чтобы определенная часть одной была связана, и очень жестко, с соответствующей частью другой. Существует, конечно, более одного способа соединения молекул между собой, и, следовательно, одни и те же молекулы могут образовать различные структурные формы; так, например, существуют различные модификации серы, кварца и многих других веществ. Часто случается, что одна модификация возникает при одной температуре, другие же свойственны другим температурным условиям.

Из всего этого можно вывести такие следствия. Если молекула содержит много атомов и, следовательно, имеет сложную структуру и форму, твердое тело, образованное соединениями таких молекул, представляет собой пространственное образование, подобное кружеву. Мы можем сравнить его с железным мостом из отдельных перекладин и балок; это весьма рыхлое строение, так как каждый элемент его имеет особую форму, вообще говоря длинную и узкую, и соединен с соответствующими элементами в определенных точках. Многие орга-

нические вещества, вроде нафталина или некоторых твердых парафинов, имеют такое сложное строение и, вследствие рыхлости структуры, — малую плотность. Немногие органические вещества тяжелее воды. Если же молекулы менее сложны, менее неправильны в очертаниях, они укладываются гораздо теснее. Если молекула содержит только один или два атома, подобно молекуле рубина или железного пирита, тем более если она содержит только один атом, так что атом и молекула представляют собой одно и то же, как в случае золота или железа, то расположение их должно быть чрезвычайно тесным, и мы имеем относительно тяжелые вещества.

Бесконечное разнообразие свойств твердых веществ, которые встречаются в мире, есть результат бесконечного разнообразия способов, какими атомы и молекулы могут быть связаны друг с другом, а также прочности их связей. Мы не поймем тех материалов, которыми пользуемся каждый день, и вместе с тем не сумеем вполне овладеть ими до тех пор, пока не установим окончательно расположения атомов и молекул в твердом теле и не изучим напряжений и прочих характеристик сил, связывающих молекулы и атомы между собой.

В последнее время открытие рентгеновых лучей доставило нам возможность глубоко заглянуть в тайны структуры твердых тел и исследовать детально их строение. Мы сделали большой шаг вперед по пути к поставленной нами цели — к возможности знать, почему вещество, составленное из таких-то атомов, имеет такие-то характеристики — плотность, твердость, упругость, электро- и теплопроводность и т. д.; или, другими словами, почему оно реагирует определенным образом на электрические и магнитные, на механические силы, на тепло и свет. Как далеко заведут нас наши новые возможности, мы еще не знаем, но несомненно, что они позволяют нам глубоко проникнуть в структуру тел и дадут нам совершенно новое представление о ней и о том, что и как происходит в материальных вещах, будь это механические процессы или процессы в живых организмах. Новые методы исследования особенно легко применять к твердым телам; я надеюсь описать их применение в этой и следующих лекциях, где мы будем иметь дело главным образом с твердым состоянием. Применение это основано на свойствах кристаллов и рентгеновых лучей, и мы должны немного познакомиться с теми и другими. Начнем с кристаллов.



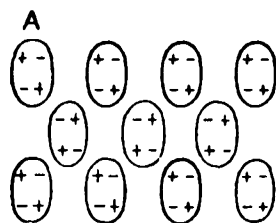
Представим себе медленно охлажденную жидкость, достигшую того состояния, о котором я уже говорил. В этом состоянии тепловое движение настолько слабо, что молекулы и атомы начинают уже прочно соединяться друг с другом. Они располагаются рядом и притом так, чтобы притяжение между какими-нибудь точками одной молекулы и соответствующими точками другой было, насколько возможно, использовано целиком. Мы можем представить себе две молекулы, уже связанные вместе в одной точке, колеблющимися одна около другой; движение их постепенно ослабляется, пока, наконец, не возникнет вторая связь, может быть совершенно неожиданно. Вскоре после этого появится и третья связь, соединяющая их друг с другом или одну из них с какой-нибудь третьей молекулой; положение ее в таком случае вполне определяется и закрепляется. Таким образом во время охлаждения жидкости молекула за молекулой занимает свое место рядом с уже прочно связанными молекулами, и образуется твердое тело.

Может быть также, что твердое тело выпадает из раствора, где оно было растворено. Растворитель испаряется, и молекулы чаще сталкиваются друг с другом, а это способствует их соединению. Когда жидкость совершенно исчезает, остается твердое вещество. Если испарение происходило медленно, молекулы, блуждая в растворе, попадают туда, где уже несколько молекул соединились друг с другом, и пристают к ним, спокойно и осторожно выбирая окончательное положение и отказываясь занять место, прежде чем они не ориентируются друг относительно друга надлежащим образом.

Мы можем себе представить, что в таком случае в расположении их должна наблюдаться определенная правильность.

Пусть какое-нибудь плоское тело, имеющее форму тела А (фиг. 46), обладает четырьмя центрами притяжения: двумя положительными и двумя отрицательными, как показано на рисунке. Если поместить несколько таких фигур в плоскости и соединять их друг с другом так, чтобы каждый раз соприкасались положительные и отрицательные центры каждого тела, то мы получим расположение, изображенное на фиг. 46.

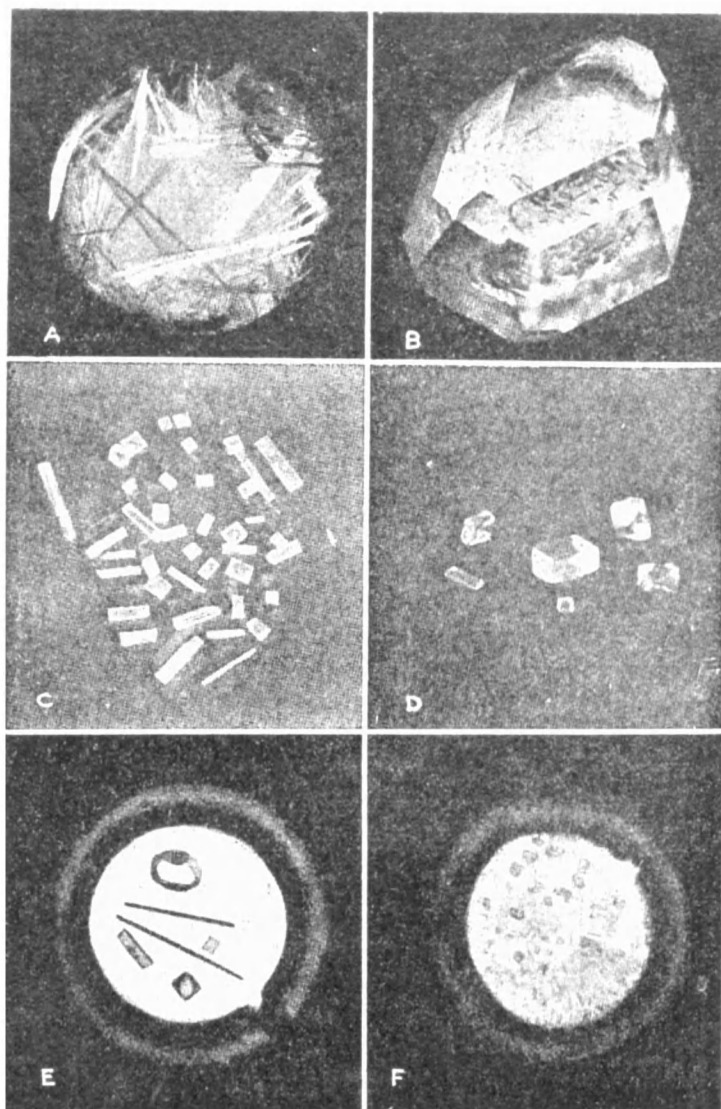
Каким бы расположением мы ни задались, мы в конце



Фиг. 46.

концов, найдем в нем некоторую правильность, как на нашем рисунке. И, повидимому, природа действует таким же образом: молекулы располагаются в правильные ряды. Это — весьма важное обстоятельство. Порядок и правильность являются следствиями полностью использованного притяжения между двумя атомами или молекулами. Когда такой комплекс молекул вырастает до размеров, видимых в микроскоп или даже невооруженным глазом, правильность его конструкции сказывается в его форме: твердое вещество образует то, что мы называем кристаллом. Оно ограничено рядом плоских граней, часто на вид прекрасно отполированных, и то, что сообщает кристаллу особую прелесть, и есть именно правильность его контура и блеск его граней. Мы чувствуем, что какая-то тайна и красота скрыта под теми свойствами кристалла, которые нас привлекают, и это, действительно, так. Природа рассказывает нам в них о том, как она располагает молекулы, когда соблюдены все благоприятные условия для их соединения. Обыкновенно каждая структурная единица складывается из двух-трех молекул; каждая такая единица обладает свойствами целого кристалла, так как сам он представляет собой совокупность этих единиц, в каждой из которых расположение молекул в точности повторяется. Глядя на кристаллы, мы видим, следовательно, первичные структурные формы природы, хотя наши глаза не могут рассмотреть их, так сказать, без очень сильных очков, которыми являются рентгеновы лучи. Несколько кристаллических форм изображено на фиг. 47.

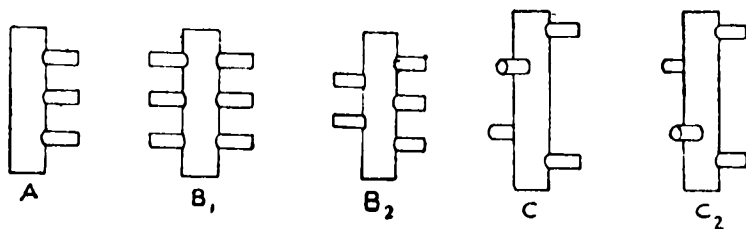
Таким образом существуют три формы строения материи: отдельный атом — как в газах (гелий), молекула — как она изучается химиками, и кристалл — который мы исследуем теперь с помощью рентгеновых лучей. Возьмем для примера атомы кремния и кислорода. Они могут образовать молекулу двуокиси кремния, содержащую на каждую единицу кремния две единицы кислорода, расположенных, несомненно, определенным образом. Наконец, существует вещество — кварц, в котором каждая кристаллическая единица состоит из трех молекул двуокиси кремния, расположенных тоже определенным образом, — как мы теперь знаем, по винтовой поверхности. Кристалл кварца содержит бесчисленное множество таких кристаллических единиц. Каждая из них обладает всеми свойствами кварца и на самом деле есть кварц; но каждая молекула двуокиси кремния



Фиг. 47. Кристаллические формы.

**А.** Кристаллы серного ангидрида, полученные из его паров в стеклянном сосуде. **В.** Эритритоловые кристаллы, выпавшие из раствора. **С.** Хлористый аммоний; правильные и искаженные кубические кристаллы из раствора, содержащего мочевины. **Д.** Кристаллические формы: аверсит, кокозит. **Е.** Кристаллические формы: ализарин, рубидиевые квасцы, хлористый натр, сернокислая соль аммония и кобальта, фталевая кислота. **Ф.** Хлористый аммоний; кристаллы октаэдрические и кубические из раствора, содержащего мочевины.

не есть кварц. Так, например, одно из наиболее известных свойств кварца есть его способность вращать плоскость поляризации света; это свойство связано с тем, что строение кристаллической единицы имеет характер винта. В каждой из этих единиц три молекулы образуют винт. Если вбить в круглый брусок гвозди, как показано на фиг. 48, и сделать их совершенно одинаковыми и одинаково расположенными, то-есть если структурная единица будет содержать только один гвоздь, то мы получим расположение, изображенное под буквой А на фиг. 48. Если на каждую структурную единицу придется два гвоздя, то их можно расположить двумя способами, как в  $B_1$  и  $B_2$  на фиг. 48. Три гвоздя мы можем вставить так, как указано в случае С, тоже двумя способами  $C_1$  и  $C_2$ , или, как это обычно называют, по правому и левому винту. Рентгеновы лучи, действительно, открыли нам, что структурная единица кварца содержит три молекулы, и что они расположены по винту, с чем вполне согласуется внешняя форма кристалла кварца, которая существует в двух разновидностях, как показано на фиг. 48 а. В одной из них есть последовательность граней  $x, s, r'$ , которые повернуты вправо, тогда как в другой они закручиваются влево. Мы, конечно, должны были и заранее ожидать, что обе эти разновидности кварца существуют в природе так, как существует два рода винтовых линий; но мы еще не можем сказать, почему именно эти грани кристалла кварца расположены по одной из них. Кварц, или „горный хрусталь“, был назван



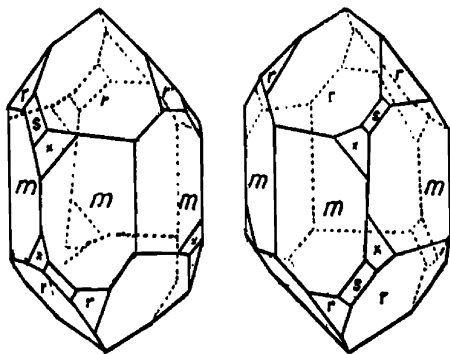
Фиг. 48. Модель винтовой структуры.

А. Один сорт гвоздей, т.-е. все они одинаковы и одинаково расположены.  $B_1$  и  $B_2$ : каждый имеет два сорта гвоздей; часть гвоздей вставлена с правой стороны, часть с левой. Две вариации расположения  $C_1$  и  $C_2$ : три сорта гвоздей, расположенных в трех различных положениях;  $C_1$  и  $C_2$  представляют собой правый и левый винты.

греками „кристаллос“; это название было дано также льду, так как эти два вещества смешивали друг с другом. Мы поступили поэтому правильно, выбрав кварц как иллюстрацию для

выяснения понятия кристаллической структуры и кристаллической единицы.

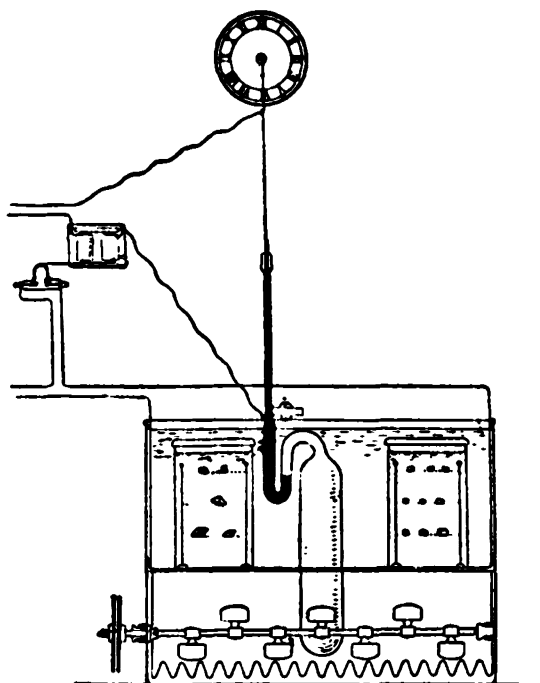
Мы можем спросить теперь себя: если правильное расположение молекул естественно, то почему не все тела обладают кристаллической формой. На это мы можем ответить, что большие правильные кристаллы вырастают тогда, когда имеется маленький центр для их образования. Трудно сказать, что задерживает относительное движение двух или трех молекул в охлаждающейся жидкости, заставляя их соединиться



Фиг. 48а.

вместе и образовать центр, к которому присоединяются потом другие молекулы. Может быть это просто случайная встреча; может быть такой базой служит маленькая частица другого вещества, случайно попавшая в раствор, или какая-нибудь неправильность в стенке сосуда, содержащего раствор. Если таких центров имеется много, то вырастает много кристаллов, и так как они неспособны ориентироваться друг относительно друга, соединяясь вместе, то в конце концов получается бесформенная масса мелких кристаллов, а не отдельный кристалл. Кристаллики эти настолько малы, что вся масса их представляется нашему глазу в виде твердого тела, не имеющего правильной формы. Для образования большого правильного кристалла необходимо, чтобы молекулы могли скопиться только на небольшом числе отдельных центров. Правильный кристалл должен расти очень медленно и спокойно, так, чтобы каждая молекула имела время попасть надлежащим образом на свое место. Кроме того молекулы должны обладать свободой движения, позволяющей им сделать правильный выбор. Все эти условия выполняются в тех способах, которые употребляют кристаллографы для выращивания кристаллов. Если, например, кристаллограф хочет получить большой кристалл поваренной соли из соляного раствора, он подвешивает в рассол маленький правильный кристаллик соли и поддерживает температуру рассола именно такой, какой она

должна быть для того, чтобы атомы натрия и хлора имели только одно желание — потерять свою свободу, соединяясь с комплексом атомов, уже расположенных в совершенном порядке, — другими словами, соединяясь с подвешенным кристалликом. Если раствор слишком горяч, то подвешенный кристаллик рас-



Фиг. 49. Термостат.

Температура ванны, в которую помещен сосуд, содержащий растущий кристалл, не должна испытывать резких и неправильных колебаний и должна медленно понижаться день ото дня. Температура поддерживается электрической грелкой; если она слишком возрастает, ток прерывается благодаря расширению жидкости в большом термометре, помещенном также в ванне. Поднятием ртути замыкается цепь, содержащая электромагнит, который притягивает к себе ключ. Часовой механизм опускает очень медленно проволоку навстречу ртути в термометре с целью постепенного понижения температуры, до которой нагрелась грелка. Грелка помещается в дне ванны, часовой механизм над ней.

творится в ненасыщенном растворе, если же он слишком холоден, кристаллы начинают расти сразу во многих местах. Иногда жидкость слегка помешивают для того, чтобы с затравкой — подвешенным кристаллом — соприкасались различные ее части. Самые главные условия роста кристалла: достаточно долгое

время и спокойствие; раствор, из которого легко выпадают компоненты; температура и концентрация раствора, подобранные правильно; присутствие малого совершенного кристалла и легкое перемешивание жидкости около него. Мы, конечно, совершенно не представляем себе, как те или другие из этих условий выполняются во время роста алмаза или рубина; но они оказываются необходимыми в наших лабораториях, когда мы сами хотим вырастить кристалл. Если эти условия соблюдаются только отчасти, мы получим множество мелких кристалликов, расположенных в беспорядке; в таких случаях может получиться и совершенно неправильная структура — аморфное вещество, если употреблять обычное выражение. Этих соображений достаточно для объяснения кажущейся редкости кристаллических форм; кроме того мы должны помнить, что многие тела весьма сложны и состоят из веществ, каждое из которых имеет свою естественную форму. Рентгеновы лучи показали нам, что кристаллическая форма вовсе не такая редкость, как мы склонны думать, так как даже там, где нет видимой кристалличности, природа попыталась создать правильность расположения, и если мы его все-таки не видим, то в этом виновато несовершенство наших методов исследования. Правильность структурных форм природы обнаруживается сама собой в видимых нами кристаллах, но она должна быть открыта нами в других случаях. Именно эта правильность и оказалась одной из основ успеха новых методов исследования.

Обратимся теперь к изучению рентгеновых лучей. В общих чертах мы расскажем о том, как они могут помочь нам в этих исследованиях. Рентгеновы лучи представляют собой одну из форм света, от которого они отличаются только длиной волны. Длины световых волн, посылаемых нам Солнцем, лампой накаливания, свечой и воспринимаемых нашим глазом, укладываются в очень узкий интервал. Наиболее длинная из них составляет восемь сотысячных сантиметра, наиболее короткая приблизительно равна ее половине. Эти длины волн вполне подходят для той цели, которой они служат. Нужно вспомнить, что когда мы видим что-нибудь, мы, собственно говоря, видим те изменения, которые данный предмет вызывает в свете, идущем от источника и попадающем в наш глаз. Наши глаза и мозг приобрели благодаря долговременной практике удивительную ловкость в обнаружении и истолковании таких изменений света. Однако мы становимся бессильны, если предмет слишком мал,

и это не только потому, что малый предмет необходимо вызывает малые изменения в свете. Есть еще вторая и более важная причина этого: природа самого явления меняется, когда размеры предмета становятся равными или даже меньше длины волн. Представим себе, что мы ходим по берегу моря, глядя на бегущие к нам волны. Мы можем, конечно, найти такое место, где волны сделаются слабее, и, если мы поищем причину этого, мы заметим риф, прикрывающий взморье. Проведем параллель между действием рифа и явлением оптической тени: далекий шторм, поднявший волны, можно сравнить с Солнцем; берег, о который ударяются они, — с освещенной Землей, а риф — с облаком, отбрасывающим тень. Оптическая тень поможет нам открыть присутствие облака; тишина на взморье заставляет нас подозревать присутствие рифа. Но размеры рифа по всей вероятности гораздо больше длины волны. Если бы вместо рифа на поверхности воды выставился шест, вбитый в дно, эффект был бы слишком слаб, чтобы мы могли его заметить. Это, конечно, очевидно. Если бы даже мы могли поместить так много шестов, что эффект увеличился и сделался бы равным эффекту рифа, то все-таки по результирующему теневому действию мы ничего не могли бы сказать о действии каждого отдельного шеста. Диаметр шеста слишком мал в сравнении с длиной волны, чтобы вызвать в волне постоянное изменение; волна обтекает ее и снова смыкается, и этим все кончается. Если, однако, море спокойно и только легкая зыбь бежит по нему от ветра, то каждый шест может отбросить тень, которая охватит небольшое пространство с подветренной стороны его. Ширина зыби меньше, чем диаметр кольев, и, следовательно, от каждого из них получается тень.

Точно так же световые волны, обтекая молекулы, меньшие их самих, не получают никаких изменений, которые могли бы быть восприняты нашим глазом и мозгом как действие отдельных молекул. И в этом отношении совершенно бесполезно стараться преодолеть затруднения, прибегая к помощи приборов. Микроскоп увеличивает нашу способность воспринимать мелкие объекты: с его помощью мы можем обнаружить предметы в тысячи раз меньшие, чем те, которые мы видим простым глазом. Но он становится бесполезным, когда мы хотим рассмотреть вещи, размеры которых сравнимы с длиной световой волны, и никакие технические усовершенствования не могут нам помочь

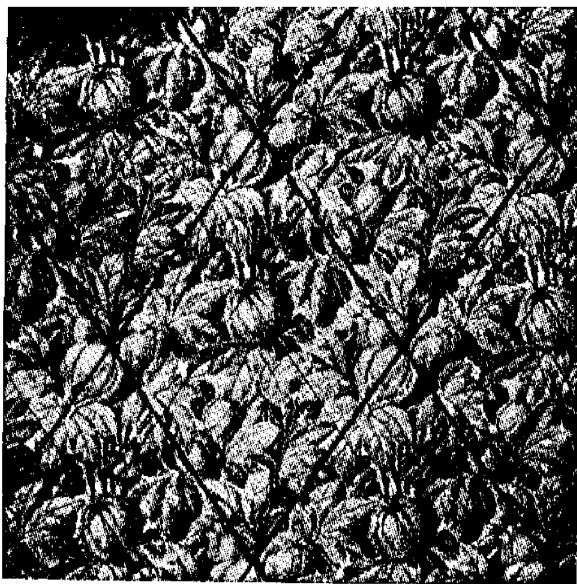


в этом. Рентгеновы же лучи в десять тысяч раз короче видимого света; падая на особые чувствительные вещества, эти лучи могут быть обнаружены глазом. Пользуясь ими, мы можем в десять тысяч раз глубже проникнуть в тонкости структуры вещества. Они очень просто вводят нас в область атомов и молекул, размеры которых в различных направлениях имеют порядок стомиллионных долей сантиметра,—а это есть также порядок длины волны рентгеновых лучей. Вообще говоря, открытие рентгеновых лучей увеличило остроту зрения в десять тысяч раз, и мы можем теперь „видеть“ отдельные атомы и молекулы. Мы можем теперь установить связь между рентгеновыми лучами и кристаллической структурой. Сначала рассмотрим вопрос в общем виде. Хотя отдельные молекулы могут влиять на рентгеновские лучи так же, как в нашем сравнении отдельные колья, отбрасывающие тень от мелкой ряби, однако каждый такой отдельный эффект очень слаб. В кристаллах же имеется огромное число молекул, правильно расположенных, и может случиться, что, когда поток рентгеновых лучей падает на кристалл, действия отдельных молекул складываются и становятся, таким образом, заметными. Для объяснения мы опять можем прибегнуть к аналогии. Когда один солдат делает какое-нибудь движение своей винтовкой со штыком, то солнечный блик, вызванный движением, не будет замечен на расстоянии мили вследствие его слабости. Но если бы наш солдат был одним из множества, идущих в одном и том же направлении в строгеом порядке,—солдат, которые все делают в одно и то же время одинаковые движения, то суммарный эффект мог бы быть легко замечен. Малая длина рентгеновых волн позволяет каждому атому или молекуле произвести подобный эффект; правильное же строение кристалла суммирует все эти эффекты.

Рассмотрим теперь более подробно, как сочетаются свойства рентгеновых лучей и кристаллов в новых методах исследования. Объяснение этих явлений представляет некоторую трудность, и я попробую изложить то, что этому объяснению предшествует, и то, что из него вытекает, так, чтобы самое объяснение могло быть пропущено теми, кто хочет его отложить на время. Оно должно быть, однако, усвоено рано или поздно всяким, кто хочет овладеть новыми методами.

Мы видели, что атомы и молекулы кристалла расположены правильными рядами, и даже нашли причины ожидать этого

заранее. Представим себе, что мы стоим перед комнатной стеной и рассматриваем рисунок обоев, наклеенных на ней. Он представляет собой повторение одного и того же элемента (фиг. 50). Отметим те точки нашего куска обоев, где снова повторяется элемент рисунка; если нельзя сделать этого на самом деле, то мы можем расставить эти точки мысленно. Оказывается, что они располагаются в ромбическую сетку и что она имеет ту же форму, независимо от того, ка-



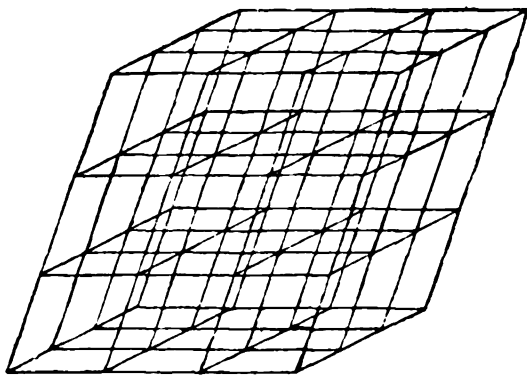
Фиг. 50. Рисунок обоев.

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

кие точки рисунка были выбраны и отмечены. Ромбы могут иметь различные размеры и форму на различных обоях, хотя всегда их четыре стороны равны между собой; может случиться также, что ромбы будут иметь прямые углы. Но никто не мог бы привыкнуть к обоям, у которых нельзя было бы выделить подобной сетки. Вся система отмеченных точек составляет то, что названо „решеткой“. Каждый ромб содержит целиком элемент рисунка со всеми его деталями, но не более.

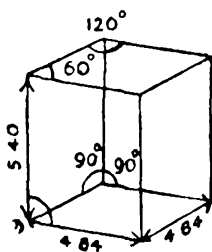
Распределение в пространстве кристаллических единиц подобно расположению на стене элементов рисунка обоев с той

только разницей, что плоская решетка заменена здесь „пространственной“ (фиг. 51). Каждая ячейка решетки ограничена шестью плоскостями, попарно параллельными. Ячейка имеет ребра определенной длины и углы определенной величины; наиболее простая и правильная ее форма — куб. Каждая ячейка содержит целый элемент структуры со всеми его деталями и не более того: она представляет собою кристаллический элемент, кристаллическую единицу, которая обладает

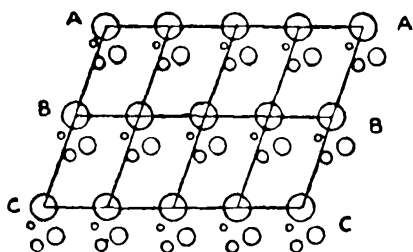


Фиг. 51. Пространственная решетка.

всеми свойствами кристалла, как бы велик он ни был. В случае кварца, например, она имеет особую форму, изображенную на фиг. 52, и состоит из трех молекул двуокиси кремния. Все это было установлено исследованием рентгеновыми лучами, так же как величина и размеры ячейки, как мы увидим далее; но, во-



Фиг. 52. Размеры и форма ячейки кристалла кварца (в стомиллионных долях сантиметра).



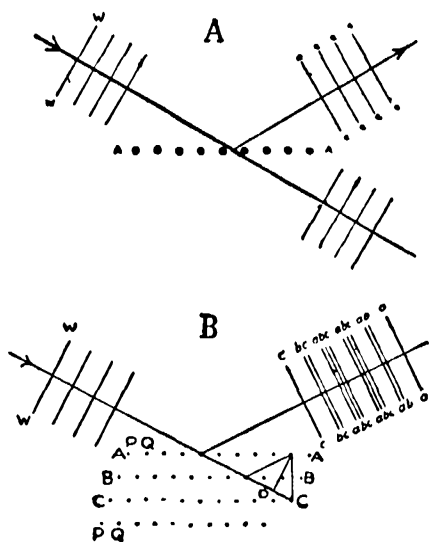
Фиг. 52а. С каждой точки решетки связана группа атомов.

обще говоря, обнаружение расположения атомов и молекул в отдельной ячейке представляет большие трудности <sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Собственно говоря, пространственная решетка состоит из „узлов“ — общих вершин ячеек, которые в тексте названы точками решетки. Ячейки являются лишь вспомогательными образами, определяющими положение „узлов“.

Прим. Г. В.

Предположим, что мы обладаем возможностью смотреть сквозь кристалл вдоль одного из ребер ячейки, изображенной на фиг. 51, и постараемся воспроизвести то, что мы видим, способом, указанным на фиг. 52 а. На ней представлены группы атомов, связанных с каждой точкой решетки, в виде совершенно произвольной группы кругов. Форма группы и ее содержание не имеют для нас значения; она может содержать то или другое число атомов или молекул, но самое существенное во всем этом то, что точно такая же группа связана с каждой точкой решетки, как один и тот же рисунок связан с каждой точкой



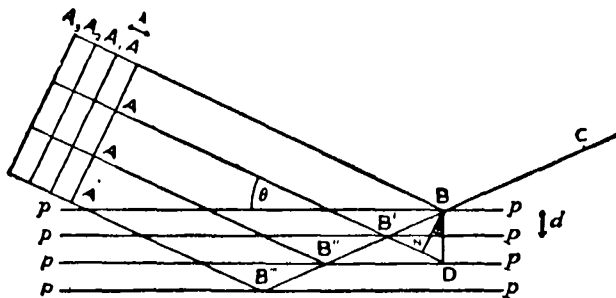
Фиг. 53. Отражение рентгеновских лучей.

обоев. Пусть поток волн рентгеновского света попадет на кристалл; на фиг. 53, А и В он представлен прямой  $ww$  и ей параллельными. Когда эти волны падают на ряд групп, расположенных по  $AA$ ,—каждая группа изображена теперь точкой,—новая серия таких же волн пойдет от каждой группы подобно тому, как каждый столб, вбитый в дно моря, становится центром возмущения, когда через него проходит волна. На малом расстоянии от  $AA$  эти маленькие возмущения соединяются вместе в по-

ток волн, представленный прямыми, параллельными  $aa$ . Явление аналогично отражению звука от столбов забора или куска натянутой ткани. В обоих случаях большая часть волн продолжает свой путь, но есть и отраженная волна, которая образует с отражающей поверхностью такой же угол, как и падающая. Отраженные волны образуют поток волн той же длины, что и падающее излучение, но гораздо слабее, конечно. Можно было думать, что при отражении получится просто нерегулярная последовательность импульсов, но это не так. В непосредственной близости каждой группы, действительно, происходит некоторое смещение волн, но несколько дальше по направлению отражен-

ного луча отдельные волны образуют правильный, движущийся целиком в определенном направлении, поток  $aa$ . Позади ряда атомных групп, расположенных вдоль  $AA$ , есть ряд других групп, в точности подобных первым, расположенных по  $BB$  (фиг. 53.В). Падающие волны, которые, как показывает опыт, очень мало ослабляются первым рядом атомов  $AA$ , встречают ряд  $BB$ ; тут снова происходит отражение; отраженные волны изображены рядом параллельных линий  $bb$ . Позади  $BB$  стоит ряд  $CC$ , образующий поток волн  $cc$ , и ряд  $DD$ , от которого идет  $dd$ , и т. д.

Как правило, линии  $aa$ ,  $bb$ ,  $cc$  не должны совпадать друг с другом. Но если длина волны падающих лучей, расстояние между  $AA$  и  $BB$  (которые представляют собой следы плоскостей, перпендикулярных к плоскости чертежа) и углы, под которыми волны встречают  $AA$  и  $BB$ , подобраны надлежащим



Фиг. 54. Закон отражения рентгеновских лучей.

образом, то линии  $aa$ ,  $bb$  и т. д. должны совпасть. В действительности в этом явлении участвуют тысячи плоскостей, и если отдельные отраженные волны в данном направлении совпадают в точности друг с другом, то и общее отражение будет интенсивно. Если же все перечисленные величины подобраны неправильно, что как раз изображено на фиг. 53, то отражения, складываясь, не могут дать заметного эффекта; для некоторых из них гребни волн или то, что соответствует гребням волн на воде, попадает во впадины других волн, и происходит взаимная интерференция и уничтожение. Подбор этих условий должен быть чрезвычайно точным, так как тут имеется множество отражающих плоскостей, расположенных друг за другом. Легко вывести формулу, выражающую условия правильности подбора и, следовательно, условия, при которых получится интенсивное отражение. Прямая  $A'B'$  (фиг. 54) должна быть

длиннее  $AB$  на целое число волн. Если  $\lambda$  — длина волны,  $d$  — расстояние между плоскостями, или период, как его обыкновенно называют, и  $\theta$  — угол, отмеченный на чертеже, то:

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

где  $n$  — целое число.

Как я уже сказал, читателю нет необходимости проделывать только что приведенные расчеты, из которых выводится основное уравнение. Важно заметить, что при постепенном изменении направления падающих лучей относительно плоскостей  $AA$ ,  $BB$  и т. д. (фиг. 53) нет заметного отражения, пока не достигнут определенный наклон их; как только это произошло, сразу появляется отраженный свет. Угол наклона определяется на опыте, и, если, как это всегда делается при анализе кристаллов, длина волны лучей тоже известна, является возможность измерить расстояние между отражающими плоскостями. Отраженные лучи не могут быть, конечно, обнаружены глазом, но они могут оставить след на фотографической пластинке или быть наблюдаемы другими способами, которых мы здесь рассматривать не будем. Прибор, построенный для таких опытов, носит название спектрометра для рентгеновских лучей. С его помощью можно измерять углы, под которыми происходит отражение; этими измерениями воспользовались прежде всего для определения расстояния между плоскостями,  $p, p, \dots$ , а затем для определения углов между различными плоскостями кристалла. Так, например, это измерение дает не только расстояния между  $AA$ ,  $BB$ , но также между  $PP$ ,  $QQ$  (см. фиг. 53, В) и углы между  $AA$  и  $PP$ . Можно определить таким образом размеры и форму единичной ячейки.

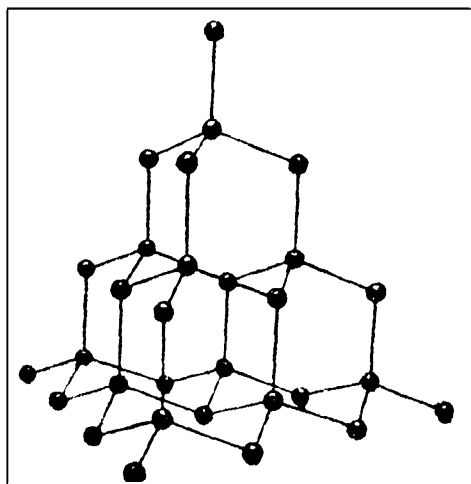
Как известно, определение плотности кристалла не представляет затруднений; зная же размеры ячейки, мы можем определить вес вещества, в ней содержащегося. Так как мы всегда знаем вес молекулы, то по этим данным легко подсчитать, сколько молекул содержится в каждой структурной единице; как было уже сказано, число это всегда невелико. Более того, измерения при помощи спектрометра для рентгеновых лучей дают нам некоторые сведения об относительном расположении молекул в структурной единице. Они могли бы сказать нам гораздо больше, если бы мы умели понимать все, что они нам говорят, но мы еще очень неопытны в этом. Мы нашли путеводитель

по неизвестной стране, но пока еще только учимся новому языку. Из того, что здесь сказано, особенно важно помнить, что рентгеновы лучи позволяют нам определить расстояния от одной плоскости, по которой распределены группы атомов, до соседней, в точности подобной первой, на которой, следовательно, размещены такие же группы атомов. Это расстояние есть вместе с тем расстояние между противоположными гранями структурной единицы. Мы можем выделить эту единицу, ячейку, несколькими способами, соединяя различные узлы пространственной решетки. В кристалле, таким образом, следует измерять не три таких расстояния, но на самом деле целый ряд их; обыкновенно же мы удовлетворяемся определением немногих из них.

Только в небольшом числе случаев анализ кристаллов проведен так далеко, что мы знаем положение каждого атома в ячейке. Для того чтобы получить эти сведения, мы воспользовались не только анализом рентгеновыми лучами, но многими данными химии и физики. Я не буду описывать здесь методы анализа во всех подробностях в каждом частном случае; того общего объяснения, которое я дал выше, достаточно, чтобы дать нам понятие о них. Результаты же таких анализов должны быть, я думаю, нам очень интересны.

Прежде всего займемся алмазом, „королем кристаллов“. Он не только прекрасная драгоценность; его строение раскрывает причины многих важнейших явлений, найденных химией, в особенности химией органической. Алмаз построен из атомов одного только углерода, но этот атом имеет для нашей жизни огромное значение. Он является основной составляющей нашей пищи и топлива, красок и взрывчатых веществ, нашего тела и многих других вещей. Структура алмаза замечательно проста, хотя, подобно всем пространственным образам, ее трудно представить себе сразу. Мы так привыкли к плоским чертежам, бумага и карандаш так удобны, что мы легко схватываем все детали плоского образа. Рисовать же в пространстве мы не умеем; мы можем только построить модели с большими затратами времени и энергии, так как наше пространственное воображение очень слабо вследствие недостаточного упражнения его. Немногие имеют такой дар от природы; некоторые, занимаясь кристаллографией, приучили себя думать в трех измерениях. Большинство же сталкивается с большими трудностями, стараясь в первый раз представить себе расположение атомов и

молекул в кристалле. Несмотря на это, строение алмаза, изображенное на фиг. 55, станет ясным после краткого рассмотрения. Черные шарики изображают атомы углерода только по их расположению, а не по размерам и форме, о которой мы знаем очень мало. Каждый атом углерода находится в центре тяжести четырех остальных; эти четыре сидят в вершинах четырехугольной пирамиды, или тетраэдра, и каждый атом углерода отстоит от соседних четырех на одинаковом расстоянии. Мы имеем все основания думать, что связи между атомами весьма прочны и что существует только один вид связи во всем кристалле. В этой простоте, однородности и правильности структуры мы,



Фиг. 55. Модель алмаза. Модель дает только расположение атомов, но не размеры или форму их.

по всей вероятности, должны видеть причину того, что алмаз занимает первое место в шкале твердости. Если им надавить на другой какой-нибудь кристалл, то разрушится этот последний, а не алмаз. Алмаз имеет плоскость спайности. На нашем рисунке эта плоскость параллельна плоскости стола, на котором стоит модель. Есть четыре таких плоскости, каждая из которых параллельна одной из граней тетраэдра. Модель может быть повернута и поставлена на одну из

этих четырех граней, и вид ее от этого не изменится. Расстояния между центральным атомом углерода и атомами, сидящими в вершинах, равно 1,54 единицам Ангстрёма; каждая такая единица составляет стомиллионную долю сантиметра. Нас не должно удивлять, что эта плоскость, на которой стоит модель, есть плоскость спайности, потому что она пересекает под прямым углом вертикальные соединения горизонтальных слоев нашей модели. Каждый такой слой должно представлять как шестиугольную сетку. Кристалл же представляет собой совокупность слоев, параллельных одной из четырех граней тетраэдра, а не той плоскости, на которой модель случайно стоит.



Существование спайности хорошо известно гранильщикам алмазов, которые избавляют себя от лишней работы, пользуясь этим свойством кристалла. В Лондоне, в Тауэре, можно видеть прибор, в котором большой куллинановский алмаз был расколот во время его огранения. На фиг. 56 изображен алмаз в трех кусках, на фиг. 57—прибор, которым пользовались для его обработки. Можно расколоть алмаз по другой плоскости, которая должна проходить через ребро тетраэдра перпендикулярно к другому его ребру; эта операция, однако, трудна и редко производится.

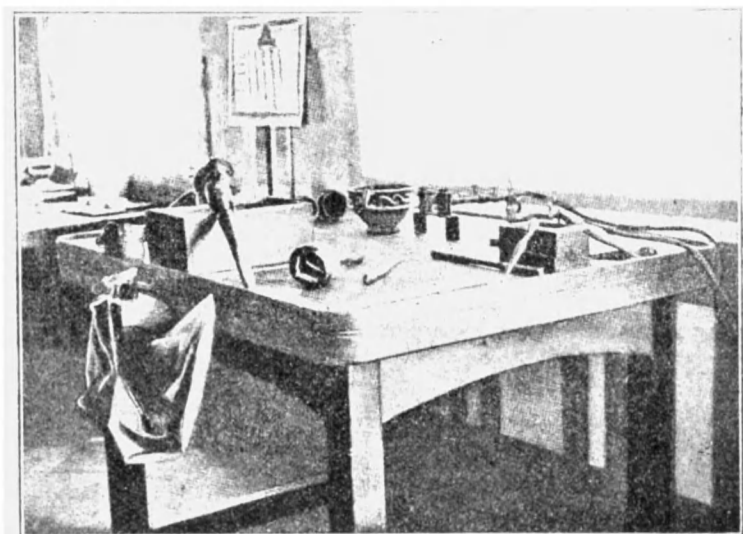
Изучая строение алмаза, мы не можем не отметить любопытной особенности, заключающейся в распределении атомов угле-



Фиг. 56. Куллинановский алмаз, расколотый на три части.— Он имел размеры небольшого кулака.

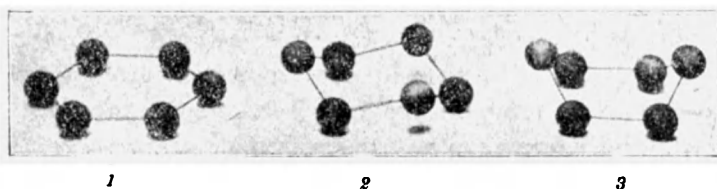
рода в шестиугольные кольца. Если выделить один из них, то он будет иметь вид (как показано на фиг. 58) правильного шестиугольника, если смотреть на него сверху, но не плоского. Вообще кольцо из шести атомов углерода играет в химии весьма важную роль. Никто, конечно, никогда не видел его: оно слишком мало. Но химики могут доказать его существование чрезвычайно остроумными и любопытными соображениями. Даже те, кто совершенно не знает химии, не встретят затруднений, знакомясь с этими доказательствами. Так, например, уже в половине прошлого столетия было хорошо известно, что в некоторых молекулах основной служит ряд, или цепочка, атомов углерода, к которым присоединены водородные атомы так, что каждый атом углерода связан с четырьмя другими атомами. Узнали это потому, что такая молекула не может уже присоединить

к себе ни одного атома водорода; она, как говорят химики, „насыщена“, так как каждый атом углерода „насыщается“ четырьмя атомами, связанными с ним, как, например, в случае



Фиг. 57. Стол и инструменты для раскалывания алмазов.

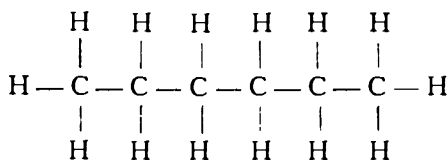
светильного газа или метана,  $\text{CH}_4$ . Относительное число атомов углерода и водорода во всех таких молекулах всегда в точности оказывалось тем, какое ожидалось на основании этого предположения. Для шести атомов углерода потребовалось бы четырнадцать атомов водорода, как видно из нашей диаграммы (фиг. 59) и как в действительности обнаружено экспериментально. Такие вещества названы „парафинами“ (см. последнюю часть следующей



Фиг. 58. Вероятные формы кольца бензола.—  
Атомы водорода не показаны.

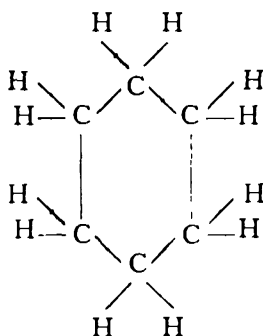
лекции); различные члены этого семейства обладают различным числом атомов углерода в цепочке. Одно из таких веществ, структура которого изображена на фиг. 59, называется гексаном.

В 1825 г. Фарадей выделил из остаточных продуктов в газовой реторте вещество, которое он назвал бикарбуретом водорода; оно известно теперь под именем бензола. Несколько капель первого препарата Фарадея хранятся как историческая реликвия в Королевском Институте. Молекула этого ве-



Фиг. 59. Гексан.

щества содержит шесть углеродных атомов, подобно гексану, и шесть водородных. Она может присоединить к себе еще шесть водородных атомов, следовательно всего двенадцать, но не больше; новая молекула в большинстве своих химических свойств подобна гексану. Однако она не может иметь ту же структуру, что гексан, потому что у нее нехватает двух водородных атомов. Загадка была решена Кекуле в 1867 г., который предположил, что в основе молекулы бензола лежит не цепочка, а кольцо из шести атомов углерода; мы можем представить себе, что оно образовалось из цепочки, изображенной

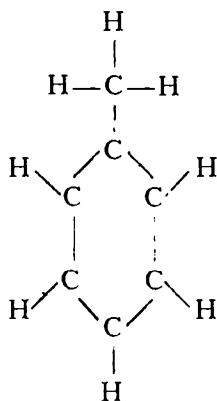


Фиг. 60. Гексагидробензол.

на фиг. 59, при чем два атома водорода на концах ее были удалены, а сама она согнута так, чтобы концы ее встретились и соединились. Мы получаем тогда структуру, представленную на фиг. 60. Ее химическое название — гексагидробензол. Сам бензол имеет только один водород, связанный с каждой вершиной

шестиугольника. Углеродная цепочка и углеродное кольцо служат основными признаками двух больших подразделений органической химии. Молекулы в форме цепочек найдены не только в парафинах, но также в жирах, маслах, мылах и во многих других веществах. Кольцо же является основой многих тысяч известных нам молекул,— молекул красящих и взрывчатых веществ, лекарств (хинин и сахарин) и т. д.

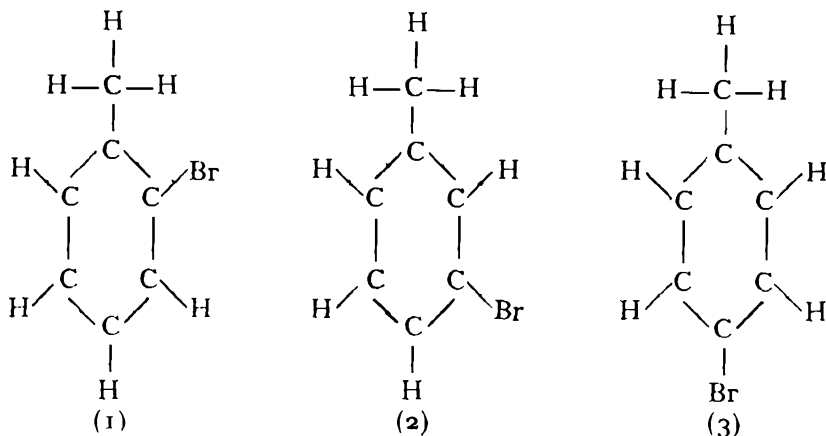
Представление о замкнутом гексагональном кольце приводит нас к простым и изящным объяснениям целого ряда замечательных химических фактов, из которых мы выберем один для примера. Молекула бензола состоит из гексагонального кольца атомов углерода с одним атомом водорода в каждой вершине. Каждый атом углерода в этой молекуле окружен только тремя соседями; он мог бы присоединить к себе четвертый, так что в целом к такой молекуле могли бы присоединиться шесть новых атомов или групп атомов в каждой ее вершине. Но молекула бензола существует благополучно и без них. Имея дело с молекулой бензола, как она есть, химики нашли, что она способна легко менять свой состав, отдавая один или более атомов водорода и замещая его другими атомами или группами атомов. В особенно важном и хорошо изученном случае один



Фиг. 61. Толуол.

водород удален и заменен группой, состоящей из одного углерода и трех водородов, известной под именем метильной группы. Структура новой молекулы изображена на фиг. 61; она называется толуолом, имеет очень важные применения и при обык-

новенных температурах представляет собой жидкость. Второй водород тоже может быть удален из нашей кольцевой молекулы и замещен атомом брома; новое вещество, полученное таким образом, носит название бромотолуола. Замечательно, что при этом



Фиг. 62. Бромотолуол.

получаются три разные вещества, которые все имеют один и тот же состав: шесть атомов углерода, четыре атома водорода, один атом брома и одну метильную группу, которая во время реакции остается нетронутой (фиг. 62). Как объяснить существование всех трех веществ, обладающих различными свойствами и имеющих одинаковый состав? Гипотеза основного структурного кольца непосредственно дает нам ответ на поставленный вопрос. Дело в том, что возможны три, и только три, способа замещения бромом, изображенные на фиг. 62. Атом брома может сидеть рядом с метильной группой, через один водород от нее или через два. Три молекулы на фиг. 62 имеют различный вид, и мы, следовательно, должны ожидать, что они обладают различными свойствами; и действительно, они образуют три различные вещества. Химики могут различать их одно от другого. Можно было бы дать множество подобных примеров, но этот один достаточно наглядно выявляет нам как значение состава, так и значение положения атомов; три молекулы трех разных веществ отличаются только положением замещающих друг друга атомов. Методы рентгеновского анализа оказываются чрезвычайно плодотворными в подобных случаях, так как при их помощи можно измерить расстояния в той

структурной единице, в которую складываются молекулы, и обнаружить влияние изменения формы и вида молекулы. Маленький пример такого рода был уже дан выше.

Очень интересно отметить, что для молекул, имеющих вид цепочек, число атомов углерода меняется в широких пределах; масляная кислота, образующаяся в прогорклom масле, содержит четыре углеродных атома, в то время как в пальмитиновой кислоте, найденной в пальмовом масле и других веществах, их шестнадцать (см. последнюю часть следующей лекции). С другой стороны, кольцеобразные молекулы с шестью углеродными атомами встречаются гораздо чаще каких-либо других. Такая молекула легко образуется и обладает большой прочностью структуры. Алмаз является единственным кристаллом, за исключением графита, который состоит только из атомов углерода, располагающихся в гексагональные кольца. Очень естественно предположить, что причины образования кольца из шести атомов должны быть обнаружены при исследовании структуры алмаза. Структура же алмаза определяется требованием, чтобы каждый атом углерода был окружен четырьмя другими, симметрично расположенными по отношению к нему. Прямые, которые соединяют каждый углеродный атом с двумя его соседями, наклонены друг к другу под углом, равным, как это легко вычислить,  $109^{\circ} 28'$ . Для соединения двух атомов углерода с третьим существует правило, по которому прямые, их соединяющие, должны образовать именно этот угол (фиг. 83); тогда самое короткое кольцо, которое может сомкнуться, должно содержать шесть углеродных атомов. (Для иллюстрации можно построить модель. Деревянные шарики достаточно правильной формы можно получить в большом количестве на пуговичной фабрике. В каждом шарике просверливают четыре отверстия в соответствующих местах; для соединения их можно использовать графитовые иголки. Таким образом можно построить модель алмаза и различных цепочко- и кольцеобразных молекул.) Пять атомов углерода, лежащие в одной плоскости, почти образуют кольцо, так как угол пятиугольника равен  $108^{\circ}$ . Но если угол между прямыми равен  $109^{\circ} 28'$ , необходимо шесть атомов, расположенных, как показано на фиг. 58. Должно ли кольцо бензола при всех обстоятельствах сохранять именно эту форму, или же иногда оно становится плоским, при чем угол делается равным  $120^{\circ}$  (фиг. 58, 1), или даже принимает форму, показанную

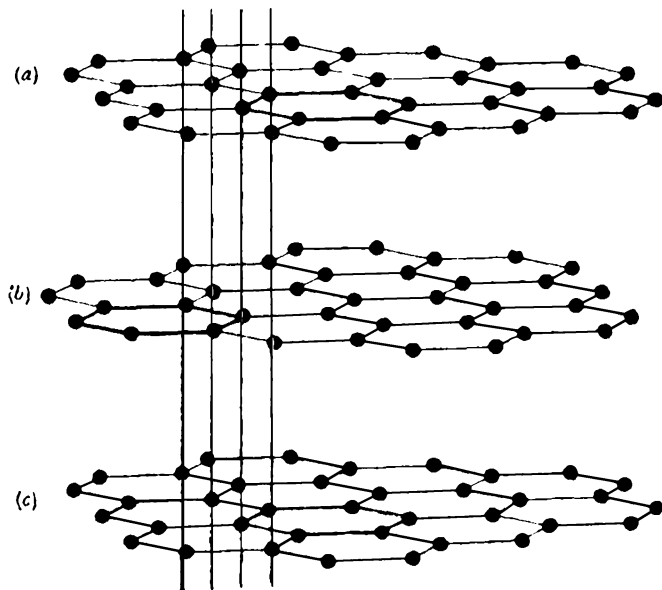
на фиг. 58, 3, которая тоже основана на углах тетраэдра, мы теперь затрудняемся говорить об этом с уверенностью. Опытные данные все накаплиются, но не могут еще дать решительного ответа на этот частный вопрос; вероятно существуют все три формы одновременно. Тем не менее многие факты, полученные в современных исследованиях, вполне определенны и чрезвычайно интересны.

Одно из замечательных веществ — графит — построен подобно алмазу только из атомов углерода. Он гораздо легче алмаза — плотность его около 2,3, тогда как плотность алмаза 3,52. Ясно, что в графите произошли какие-то перераспределения атомов, при чем расстояние между атомами в среднем увеличилось. Рентгеновы лучи показали нам, что расстояния увеличились только в одном направлении. Оказалось, что графит состоит из таких же слоев, как и алмаз (фиг. 63). Глядя на эти слои сверху, мы увидим ту же шестиугольную сетку, и даже стороны шестиугольников имеют почти ту же длину, как и в алмазе. Но расстояния от слоя до слоя заметно увеличились; это и есть то изменение, которое сделало вещество более легким. Последние исследования заставляют думать, что слои в графите плоские, так что каждый углерод окружен тремя другими, лежащими в одной плоскости. Если связи между атомами каждого слоя в графите вообще изменились, то они ничего не потеряли в прочности, но зато связи между соседними слоями очень ослабели. По этой причине слои легко скользят друг по другу, но каждый слой очень прочен сам по себе. Эти два свойства делают графит таким хорошим смазочным средством; важна не только легкость скольжения, но также и прочность слоев, благодаря которой они не легко растираются в порошок. Если провести ногой по графитовому камню камина, то часть слоев останется в покое, часть пристанет к подошве вашего сапога; это как раз те слои, которые скользили друг по другу. Чрезвычайно интересно, что только это одно изменение — сущность которого, однако, загадочна — может превратить вещество, служащее примером твердости, в вещество, служащее прекрасной смазкой.

Другая серия фактов, которые также подтверждают реальность существования кольца, имеющего измеримые размеры, получена из сравнения двух кристаллических веществ — нафталина и антрацена. Эти вещества играют важную роль в фабрикации красок; первое из них употребляется при получении

искусственного индиго, второе — при добывании ализарина, главной составной части марены.

Нафталин всем известен; большей части из нас он хорошо знаком в форме белых остро пахнущих кристалликов, которые кладутся в сундуки для уничтожения моли. Если нафталин растворить в эфире и дать раствору медленно испаряться, то из него выпадают кристаллы нафталина. По внешнему виду они походят на кристаллы, изображенные на фиг. 47 D.



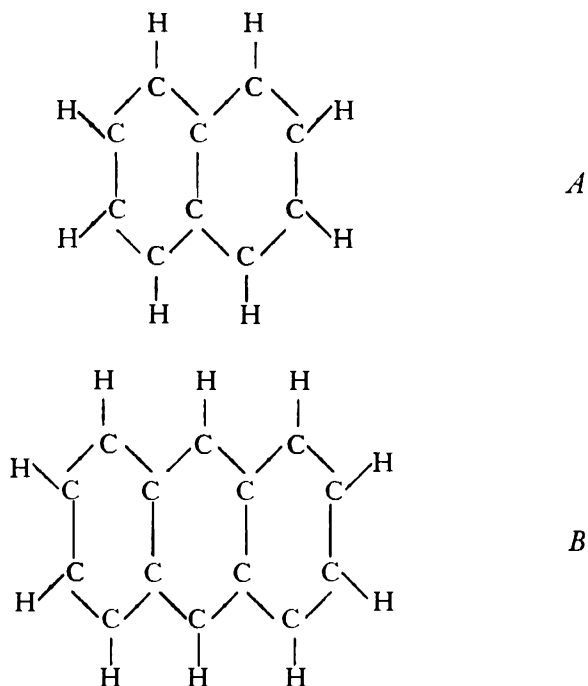
Фиг. 63. Слои в кристалле графита.

(a) и (c) подобны во всех отношениях; (b) становится тождественным (a) при повороте в его собственной плоскости на  $180^\circ$  (два прямых угла) около любой из вертикальных осей, показанных на рисунке.

Химики нашли, что нафталин построен из двойного кольца бензола, как показано на фиг. 64, A; антрацен же состоит из тройного кольца (фиг. 64, B). Анализ этих кристаллов рентгеновыми лучами показал, что их структурные единицы содержат по две молекулы и что каждая ячейка пространственной решетки их имеет вид, изображенный на фиг. 65. Размеры ячеек дацы внизу рисунка. Сравнивая их между собой, мы замечаем любопытное обстоятельство, что два ребра в каждой ячейке имеют почти одинаковую длину, третьи же ребра сильно разнятся. Отсюда вытекает естественное заключение, что двойные

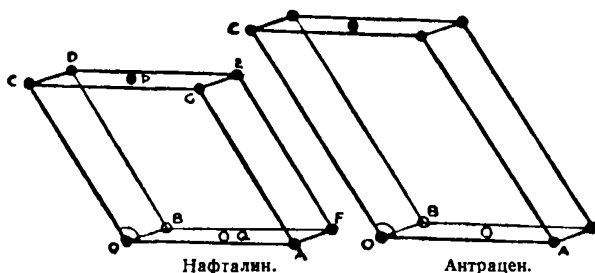


и тройные молекулярные кольца расположены по ребрам  $OC$  в каждой клетке и что разница в длине между 11,8 и 8,69 анг-



Фиг. 64. Нафталин и антрацен.

стрёмов должна быть приписана избытку длины молекулы. Молекула антрацена содержит на одно кольцо больше, чем на-



Фиг. 65. Ячейки нафталина и антрацена, изображенные в одинаковом масштабе.

	$OA$	$OB$	$OC$	
Нафталин	8,34	6,05	8,69	} единицы Ангстрема
Антрацен	8,58	6,02	11,89	

фталин, что и дает избыток длины в 2,49 ангстрёма. Если же измерять диаметр кольца в алмазе, то он окажется равным 2,50.

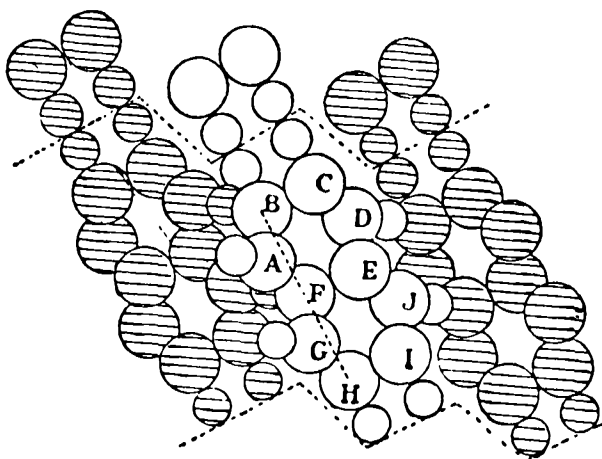
В этом мы опять находим подтверждение тому, что кольцо имеет определенную форму и почти постоянные размеры; таким образом мы получаем руководящую нить для определения структуры кристаллов, в образовании которых участвуют кольцевые молекулы. Рентгеновы лучи дают нам возможность определить размеры и форму каждой ячейки, число молекул в ней и даже отчасти относительное расположение молекул. Если мы знаем более или менее точно размеры кольца, из которого построена молекула, мы можем пуститься в дальнейшее исследование структуры, предполагая, что тела определенных размеров слагаются из ячеек определенного вида. Исследования подобного рода представляют чрезвычайный интерес, так как они дают нам новые сведения относительно расположения атомов в молекулах органических веществ и сил, которые соединяют атомы в молекулы и молекулы в кристаллы. Здесь перед нами открывается обширное поле для исследований; результаты их частью определенны и ясны, частью непонятны и трудно истолковываемы, особенно пока наш опыт в этой области невелик.

Таким образом молекулы органических веществ представляются нам рядом легких твердых сеток, из которых каждая очень прочна сама по себе, но слабо соединена со своими соседями в кристалле. Органические вещества почти все очень легки,—немного тяжелее воды. То, что плотность нафталина равна 1,15, указывает на присутствие пустот в его структуре. Даже алмаз полон полостей, подобно губке. Если бы полости алмаза были заполнены атомами углерода, плотность его выросла бы вдвое, так как каждая из полостей достаточно велика, чтобы вместить один атом углерода, а их самих столько же, сколько атомов.

Слабость связей между молекулами является причиной мягкости органических веществ и легкости, с которой они могут быть расплавлены. По этой же самой причине нафталин „сублимируется“: он испаряется в твердом состоянии. Целые молекулы отрываются от твердого тела и образуют пар, который снова кристаллизуется в холодной части сосуда, содержащего вещество. Нафталин и антрацен имеют сложную структуру; они обладают, как говорится, хорошо выраженной спайностью. Пунктирные линии на фиг. 66 представляют собой плоскости спайности, по которым кристаллы раскалываются; ясно, что мо-

лекулы отрываются легче в концах, перпендикулярно к длине, а не в направлении своей длины. В каждом слое молекулы стоят почти вертикально, подобно колосьям, склоняющимся от ветра.

Общее заключение, к которому приводят нас все эти соображения, есть то, что бензольное кольцо действительно суще-



Фиг 66. Взаимное расположение трех молекул нафталина и частей, соседних с ними.

ствует, имеет определенную форму и размеры и участвует в создании различных кристаллов с малыми изменениями своей формы. Мы должны теперь обратиться к рассмотрению „цепочковых“ молекул, которые являются основой другого обширного подотдела органической химии. Так как эта глава уже затянулась, мы займемся цепочкой в ближайшей лекции в применении к кристаллам льда, который будет служить главным предметом наших занятий.

---

## ЛЕКЦИЯ ПЯТАЯ.

### О ПРИРОДЕ КРИСТАЛЛОВ. ЛЕД И СНЕГ.

Когда перед нами возникает вопрос о том, какие кристаллы желательно исследовать рентгеновым анализом, то прежде всего возбуждают наше любопытство кристаллы снега и льда. Вода есть одно из наиболее широко распространенных веществ на земле: с ней связано наше существование самым разнообразным способом, и для нас имеют огромное значение все формы, в которых она существует. Кроме того с научной точки зрения очень интересно изучить структурную форму, построенную из таких простых молекул (один атом кислорода и два атома водорода), и мы должны попытаться сделать это. Уже самая красота снежных кристаллов, их законченная форма, изящество и прелесть тонких контуров ледяных узоров на окнах могут возбудить желание исследовать их строение. Правда куски льда, которые мы получаем из холодильников, не представляют ничего замечательного по своим контурам. Искусственный лед получается слишком быстро, для того чтобы выявилась его кристаллическая форма: он имеет, несомненно, кристаллическую структуру, но кусок его состоит из бесчисленного множества мелких незаметных кристаллов, расположенных как попало, и содержит в себе пузыри воздуха.

Если мы хотим видеть, что может создать природа, когда она предоставлена сама себе и ничто ей не мешает, то мы должны исследовать снежные хлопья, падающие холодной зимой в северных странах. В Англии не может быть хороших кристаллов снега; в ней недостаточно холодно для этого. Наблюдатели других стран, например Швеции и Америки, дают много прекрасных зарисовок и фотографий снежных кристаллов, которые можно найти в статьях, помещаемых в физических и метеорологических журналах. Некоторые из них воспроизведены на фиг. 67 и 68.

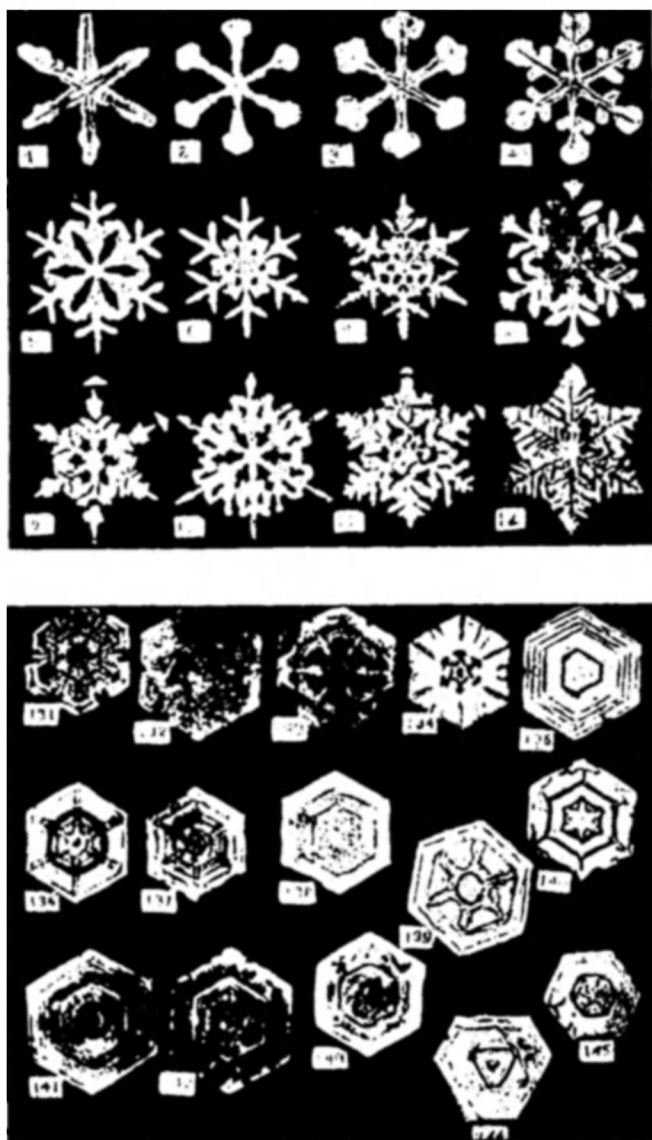
Мы можем представить себе, как происходит рост снежного кристалла. В высоких слоях атмосферы соединяются одна-две молекулы воды; одна за другой присоединяются новые молеку-

лы к растущему и постепенно падающему кристаллу, создавая все тонкости его структурной формы, пока, наконец, шестиконечная звездочка не падает на землю. Если погода холодная, звездочка может расти дальше точно таким же образом; получаются маленькие гладкие грани, блестящие на солнце, как алмаз. Когда снежный кристалл только начинает расти, он часто бывает перистым; каждый из его шести лучей растет наружу и выпускает вправо и влево маленькие отростки, на каждом из которых в свою очередь появляются новые отростки и т. д.; все отростки образуют между собой углы в  $60^\circ$ , так что весь кристалл похож на шестиконечную звездочку тонкого кружева. Такая перистая форма свойственна ранней стадии кристаллизации и, повидимому, обусловлена быстрым и внезапным охлаждением. Лучи растут из центра, так как, захватив ближайшие молекулы, готовые уже присоединиться к растущему образованию, они распространяются дальше, в новые области. Это явление часто наблюдается в других случаях быстрой кристаллизации; одним из замечательных примеров такого рода является образование длинных кристаллов железа в тигле с расплавленным и охлаждающимся металлом. Если хотят предотвратить их образование, то расплавленный металл надо вылить раньше, чем кристаллы успеют заполнить свободное пространство. Их называют „дендритами“, так как они похожи на деревья, со стволами, толстыми и тонкими ветками и сучками; углы, под которыми сходятся две ветки в кристалле железа, равны  $90^\circ$ , а не  $60^\circ$ , и все образование далеко не так изящно, как кристаллы льда.

Если снеговой кристалл растет медленно и если имеется достаточный запас молекул, то все пустоты заполняются, и кристалл принимает форму шестиугольной пластинки (фиг. 67). Можно предположить, что кристаллы снега иногда с самого начала растут в форме пластинки. Интересно, что часто такие пластинки соединяются в пары посредством шестиугольной призмы; одна из них обычно больше другой, и все вместе походит на хорошенький чайный столик (фиг. 68, А). Призма появляется также в интересном образовании, изображенном на фиг. 68, С, заимствованном у Райта и Пристля из „Гласиологии“ британской антарктической экспедиции в 1910—1913 гг.

Призмы с пластинками и „чайные столики“ являются причиной образования ложных солнц и кругов, которые наблюдаются в околополярных широтах (фиг. 69).

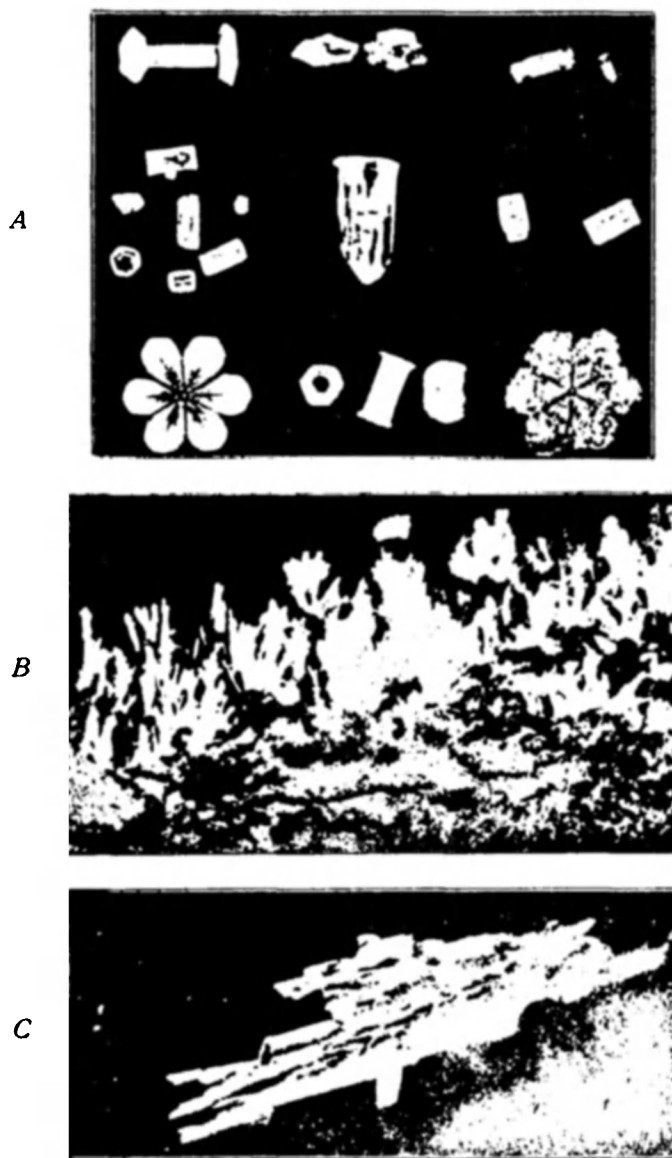
Пусть шестиугольник на фиг. 70 представляет сечение одной из таких призм или пластинок, и пусть  $ABCD$  есть путь луча



Фиг. 67. Снежные кристаллы разной формы.

света, проходящего через него. Он преломляется в точках  $B$  и  $C$ ; в общем луч загибается по меньшей мере на угол

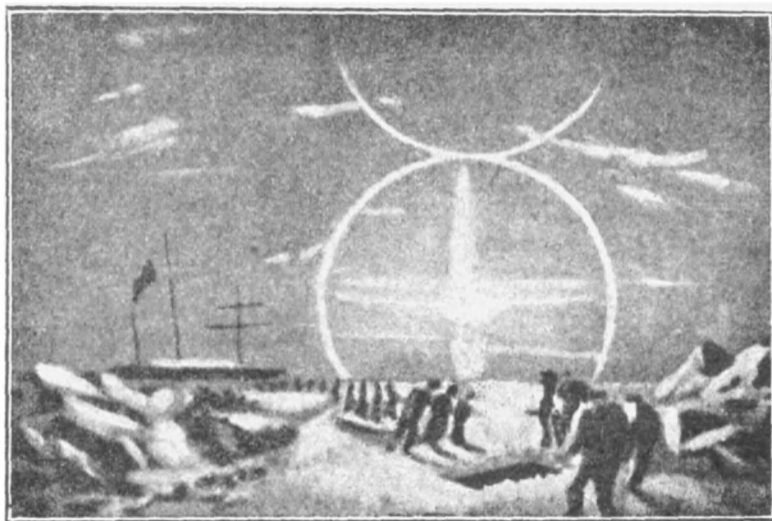
в  $21^{\circ} 50'$ , который, как говорят физики, есть в данном случае, угол наименьшего отклонения. Если точка  $S$  на фиг. 71 служит



Фиг. 68. Снежные кристаллы.

источником света и в точке  $E$  помещен глаз наблюдателя, то луч из  $S$ , проходя через кристалл, изгибается и идет через  $P$ ;

он может войти в глаз, если  $P$  расположено надлежащим образом. На нашей фигуре призма расположена симметрично, и в этом случае, как известно, отклонение  $SPE$  имеет наименьшее

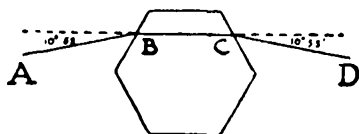


Фиг. 69. Первая картина сделана Кларком и заимствована из статьи Уипля в „Словаре прикладной физики“, т. II, стр. 529. Она изображает круги и ложное солнце. Вторая воспроизводит интересный эскиз, принадлежащий Королевскому Институту; на ней изображены круги и столб.

значение. Всякая призма, лежащая между  $SPE$  и  $SPE$ , например  $P_0$ , искривляет луч, выходящий из  $S$ , так, что он не может попасть в глаз, как бы ни была расположена самая призма. Глаз не может видеть преломленный луч, выходящий

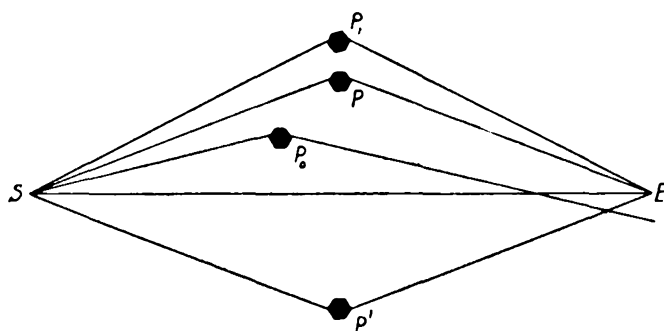


из призмы, попавшей в эту область. Призма  $P_1$  тоже может послать луч в глаз наблюдателя, если она расположена несимметрично, как показано на рисунке; угол отклонения в этом случае больше наименьшего; вот почему она и должна быть расположена косо, как это и показано на рисунке. Если, следовательно, наблюдатель стоит в  $E$  и видит солнце в  $S$ , то свет будет казаться ему идущим по направлениям  $PE$  и  $P'E$  и по всем направлениям, лежащим выше этих, но свет, идущий под углом большим  $SPE$ , гораздо слабее, так как большая часть лучей отклоняется под углом наименьшего отклонения, — чем больше отклонение, тем они слабее, в согласии с известными законами о максимальных и минимальных значениях величин. Точно так же в глаз наблюдателя совсем не попадает свет изнутри конуса  $PEP'$ , и поэтому свет от лучей, идущих под углом наименьшего отклонения, дает яркое и резко очерченное пятно.



Фиг. 70. Шестиугольник, представляющий увеличенное сечение ледяной призмы.  $ABCD$  есть луч, проходящий через нее.

Все это приложимо к лучам, выходящим из солнца по всем направлениям; таким образом наблюдатель увидит около солнца круг, резко очерченный изнутри, размытый снаружи. Для красных лучей угол  $PEP'$  меньше, чем для синих, поэтому круг окрашен: изнутри он красный, снаружи синий. Круги наблю-

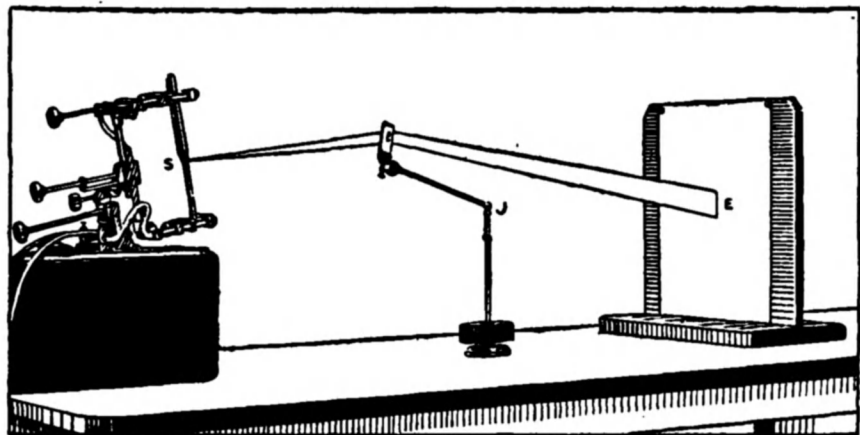


Фиг. 71. Образование круга около солнца. Описание см. в тексте.

даются тогда, когда в воздухе имеется много ледяных призм, точно так же, как радуга появляется тогда, когда в воздухе много дождевых капель. Если луч проходит через каплю, то он

отклоняется более, чем на два прямых угла, так что для того, чтобы видеть радугу, наблюдатель должен стоять спиной к солнцу.

Простая модель поможет нам разъяснить вышеприведенное рассуждение. Дуга  $S$  на фиг. 72 служит источником, глаз помещен в  $E$ . Между  $S$  и  $E$  на штативе укреплена стеклянная призма. Все углы и расстояния в нашей модели подобраны так, что луч света, преломленный призмой, попадает в  $E$ . Если



Фиг. 72. Модель, объясняющая образование круга.  $SJE$  должны лежать на одной линии. Описание см. в тексте.

рычаг, несущий призму, вращается вокруг  $J$ , глаз все время освещен. Если бы у нас был целый ряд призм, расположенных по кругу, глаз видел бы светлое кольцо вокруг центрального пятна.

Если по какой-нибудь причине все призмы располагаются в некотором одном определенном положении, получается неполный круг. Нечто подобное действительно случается. Если длинная призма падает в воздухе, ее ось стремится принять горизонтальное положение. Если, однако, такая призма несет на конце пластинки, как изображено на фиг. 68,  $A$ , или если падает шестиугольная пластинка, которую можно рассматривать как очень короткую призму, то ее ось стремится стать вертикально, или, другими словами, сама пластинка — горизонтально. Это несколько странное явление стоит в связи с хорошо известными законами движения тел в газах и жидкостях. Эти тела стремятся расположиться так, чтобы сопротивление движению

было как можно больше. Если мы сложим вместе две-три почтовых открытки или письма и пустим их падать, держа их горизонтально и быстро выдернув из-под них руки, они так и падают, оставаясь горизонтально расположенными. Но если дать падать вперед одному из концов бумажного листа, он, падая, все время вращается. Тяжелая пластинка, падая в воде, наклоняется то на одну, то на другую сторону, стремясь к горизонтальному положению. Таким образом в падающем облаке ледяных кристаллов имеется неодинаковое количество вертикально и горизонтально расположенных кристаллов. Части круга, лежащие на концах вертикального и горизонтального диаметров, отчетливо видны в виде ярких пятен на кольце: их часто называют ложными солнцами.

Очень легко демонстрировать это стремление образований, подобных „чайным столикам“, принимать во время падения вертикальное положение. Мы приготовили из эбонита несколько моделей таких образований и можем заставить их падать в высокой банке с водой (фиг. 73). Лучше, конечно, пользоваться очень высоким сосудом, но самое явление легко обнаружить даже в сосуде, высота которого не превышает полуметра. Очень любопытно, что некоторые из них стремятся падать пластинкой вперед, тогда как у других пластинка идет сзади. Этот вопрос был разобран теоретически Бессоном, который показал, что в тех случаях, когда диаметр пластинки мал в сравнении с длиной призмы, пластинка стремится стать вперед, и наоборот. Мы можем проверить это на опыте, при чем лучше сначала расположить в воде оси наших телец горизонтально и потом пустить их.

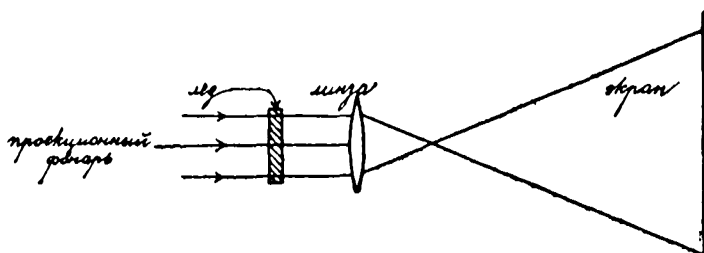
Вся вертикальная линия, проходящая через центр круга, также бывает часто освещена, но это явление вызывается совершенно другими причинами: оно обусловлено отражением света от плоских граней снежных кристаллов и пластинок. Глаз наблюдателя получает лучи, отраженные от кристаллов, лежащих на любой высоте; они все должны только лежать в вертикальной



Фиг. 73. Плоские диски и призмы, из которых некоторые оканчиваются дисками, падающие в воде.

плоскости, проходящей через солнце. Эта яркая вертикальная полоса носит название солнечного столба.

Лед, образующийся на открытой поверхности воды, кристаллизуется в формах, подобных снеговым кристаллам, при чем все шестиугольные образования располагаются горизонтально. Такие формы наблюдаются довольно редко; в описании арктических исследований можно, однако, найти изображение ледяного стола, распадающегося на вертикальные шестиугольные колонны, подобные базальтовым столбам Дороги Гигантов. Говорят также, что когда ломается лед на озерах, то он сначала разбивается на вертикальные колонны, которые некоторое время держатся вместе, но как только лед начинает двигаться, они быстро расходятся, и озеро вскоре очищается.



Фиг. 74.

В отчетах об антарктических исследованиях часто упоминается о том, что лед на пресноводных озерах разделяется на шестиугольные столбы, стоящие вертикально на поверхности. Плоскости раздела отмечены рядами пузырьков воздуха. В морях образование кристаллов льда сопровождается выделением соли, откладывающейся в пространстве между кристаллами и иногда выдавливающейся на поверхность. Самые призмы внутри почти совершенно не содержат соли; из них можно получить хорошую пресную воду, если предварительно расплавить и удалить наружные слои. Они представляют собой прозрачные кристаллы, через которые можно видеть подводные скалы, как через трубы.

Существует прекрасный способ наблюдать кристаллические формы льда, описанный Тиндалем в его книге „Теплота“.

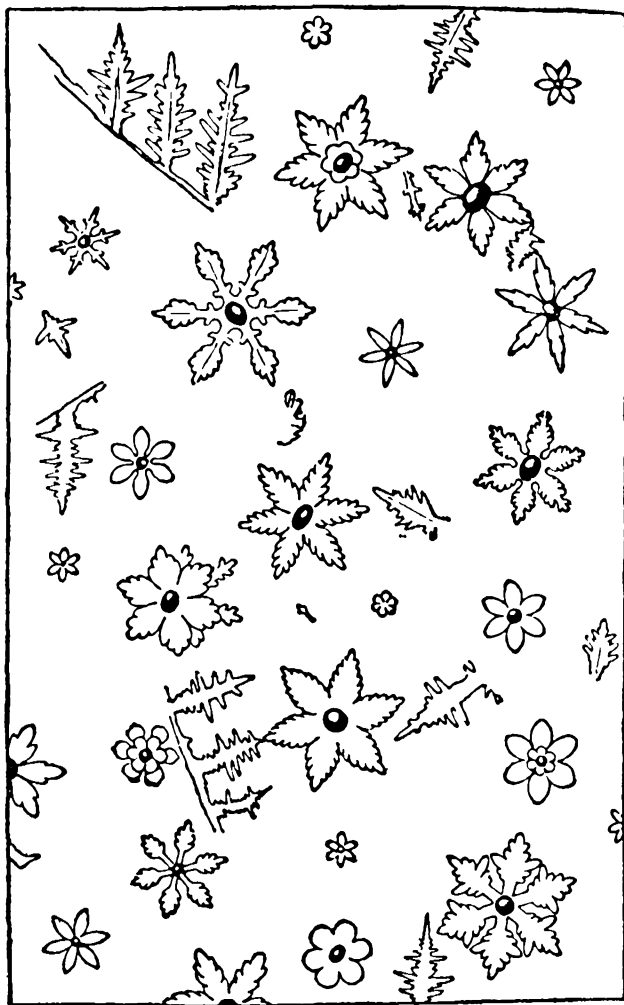
Пластика чистого льда помещается на пути лучей, выходящих из дуговой лампы, и фокусируется на экране, как показано

на фиг. 74. Тепло от фонаря начинает разрушать кристаллы; разрушение идет в порядке, обратном тому, в котором кристалл строился. Появляются и растут маленькие шестилучевые пустоты, подобные цветам с шестью лепестками, и пустоты другого вида, похожие на папоротники, листья которых образуют со стеблем углы в  $60^\circ$ . Вскоре весь экран покрывается такими ледяными цветами, как их называют; они напоминают прекрасные барельефы (фиг. 75). Обыкновенный продажный лед не дает такого эффекта; мы пользуемся здесь специально приготовленной пластинкой льда, дающей вполне удовлетворительные результаты. Однако естественный лед, образующийся на открытом месте и ночью, гораздо лучше, чем лед, полученный обычными способами производства искусственного льда. Много безуспешных попыток сделано было для того, чтобы показать этот опыт удовлетворительно на наших рождественских лекциях. Наконец, так как накануне был легкий мороз, то один молодой энтузиаст отправился на своем велосипеде собрать на пруду куски льда, благодаря чему мы имеем возможность показать этот прекрасный опыт. Повидимому, очень существенно для получения хорошего кристалла льда, чтобы он рос медленно; вероятно должно быть соблюдено еще условие, чтобы вода медленно охлаждалась с поверхности, что и осуществляется на поверхности пруда тихой и морозной ночью.

В центре ледяного цветка часто появляется маленькое черное пятно. Тиндаль очень им заинтересовался и объяснил его происхождение. Когда лед тает, внутри куска образуется пустота, — вода, образовавшаяся от таяния, занимает меньший объем, чем лед, из которого она получилась. Возможно, что сначала она очень прочно связана со льдом и наполняет, как вода, то пространство, которое она наполняла, будучи льдом. Но в этом состоянии напряжение слишком велико; вода отрывается ото льда и сжимается до своего нормального объема. Остается, таким образом, пустота, которая действует как маленькая линза и отклоняет свет, проходящий через нее. Таким образом получается черное пятно, которое вызвано отсутствием света, проходящего прямо через полость.

Ледяные цветы можно видеть на ледниковом льде, где они образуются под влиянием солнечного тепла. Когда большой ледник образуется из слияния меньших ледников или из кусков льда, упавших на его стороны, он состоит из глыб льда, смерз-

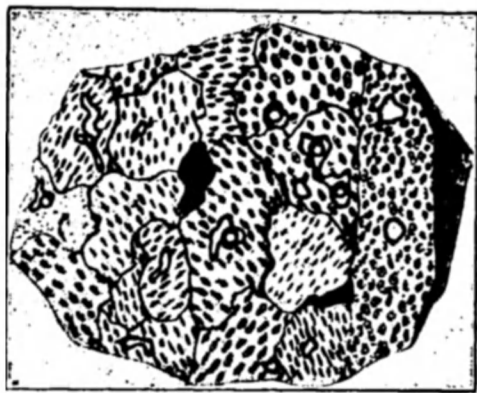
шихся друг с другом, на каждой из которых можно видеть ледяные цветы. Положение цветов указывает в каждом случае на первоначальное положение глыбы, так как они всегда образуют-



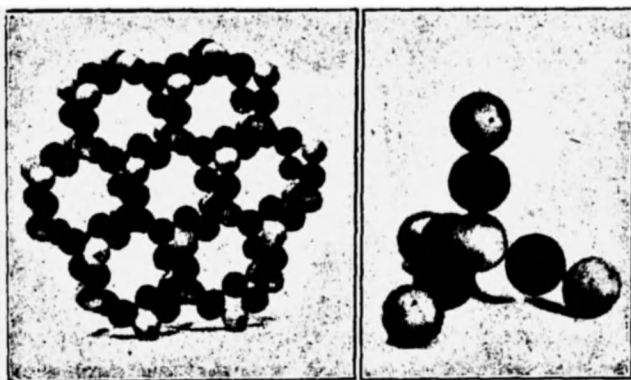
Фиг. 75. „Ледяные цветы“, заимствованные из „Теплоты“ Тиндаля. Рисунок изображает определенную стадию роста цветов; в следующей стадии весь фон покрывается переплетающимися фигурами.

ся в слоях, лежащих горизонтально. На нашей фиг. 76, заимствованной из старого сочинения Агассиза, изображено сечение ледника с углублениями, расположенными в различных местах — в середине, по краям и в промежуточных положениях.

Обратимся теперь к анализу структуры ледяных кристаллов с помощью рентгеновых лучей. Мы можем надеяться получить таким путем объяснение формы и других подмеченных нами физических свойств кристаллов льда. Этот анализ говорит нам, что структура ледяного кристалла подобна структуре алмаза: в нем мы встречаем то же самое симметричное расположение четырех одинаковых элементов вокруг каждого атома. В этом случае атом кислорода помещен в центре тетраэдра, четыре другие атома кислорода располагаются в четырех вершинах. Есть, однако, и небольшие различия в структурах. Прежде всего в алмазе атомы углерода соединены непосредственно друг с другом. В случае же льда надо еще раз-



Фиг. 76. Заимствована у Агассиза. Тут видно, что ледниковый лед представляет собой аггломерат мелких кусков, в которых ледяные цветы должны располагаться в горизонтальных плоскостях. Куски падали и смерзались в различных положениях, и мы видим теперь цветы расположенными различным образом — и боком и прямо.



А

В

Фиг. 77. А. Модель сделана из шариков двух цветов; белые изображают атомы кислорода, черные — атомы водорода. В. Часть модели кристалла льда, изображающая группировку атомов водорода и кислорода.

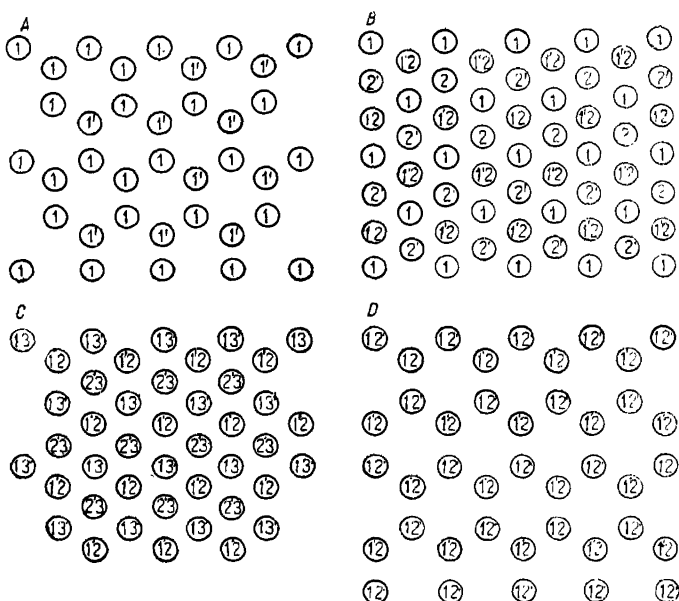
местить водородные атомы. Если поместить один водород между каждыми двумя кислородами, то получится симметричное расположение, в котором атомы каждого вещества входят в правильном числовом отношении. Каждый кислород связан с четырьмя водородами, и каждый водород с двумя кислородами, что и удовлетворяет требованию, чтобы атомов водорода было вдвое больше, чем атомов кислорода. Модель, иллюстрирующая такое расположение, изображена на фиг. 77, *A* и *B*. Большие шарики изображают кислород, маленькие — водород. Ясно, что, применяя анализ рентгеновыми лучами, мы не можем определить размеры атома кислорода или водорода. Все, что этот анализ может дать, это определение расстояний между центрами двух соседних атомов кислорода — расстояний, которые равны сумме диаметров водородного и кислородного атомов. Атом кислорода может занимать все это пространство и один, так как атомы водорода, как предполагают, отдают свои электроны кислороду и существуют в виде одного ядра. О размерах же ядра мы ничего сказать не можем. Строя модель, мы, однако, задаемся определенными размерами шариков, изображающих атомы; моделью можно пользоваться поэтому только с соответствующими оговорками.

В этом заключается второй пункт расхождения между структурами алмаза и льда, у которого она тоньше и труднее для понимания; однако она вполне заслуживает труда быть изученной и усвоенной. Читатели, которым покажется слишком трудным разобраться в ней, могут ее оставить, не опасаясь потерять нить изложения.

Предположим, что мы смотрим сверху на модель алмаза и видим один из слоев, как показано на фиг. 78 *A*. Атомы углерода отмечены индексом 1, если они лежат непосредственно в основании кристалла, и 1', если они несколько приподняты над своими соседями по слою. Представим себе слой, в точности подобный первому, отметим его атомы цифрой 2 и поместим его над первым так, чтобы каждый атом с индексом 2 приходился над атомом с индексом 1, — другими словами, так, чтобы нижние атомы верхнего слоя стояли над верхними атомами нижнего слоя. Это как раз то, что мы видим в алмазе. Такое расположение показано на фигуре 78 *B*, где индекс 1'2 обозначает, что атом 2 лежит над атомом 1'. Возьмем теперь третий слой, который мы можем обозначить как 3, и наложим его так, чтобы 3 стояли над 2'. Мы получаем тогда расположе-



ние *C* на фиг. 78 и, повторяя его еще и еще раз в том же порядке—1 2 3; 1 2 3,—мы получим структуру алмаза. Теперь опять начнем со слоя 1, но расположим слой 2, как показано на фиг. 78 *D*,—расположение, которое при внимательном рассмотрении оказывается уже не тем, что мы имели прежде,—слой 2 повернут в своей собственной плоскости на угол в  $180^\circ$ ,—и повторим последовательно слои 1 и 2. Это дает расположение кислоро-



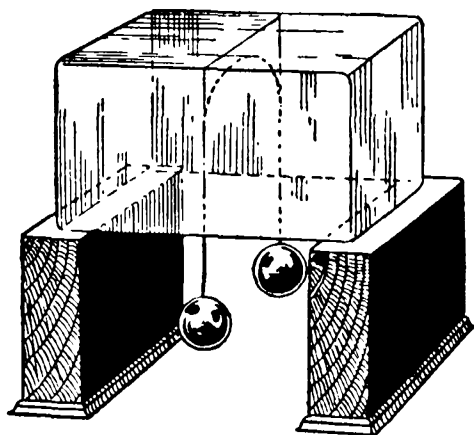
Фиг. 78. Расположение атомов в ледяных кристаллах.

дов во льде. Наша модель будет вполне законченной, если мы поместим по водороду между каждым двумя кислородами.

Вглядываясь в модель кристалла льда, изображенную на фиг. 78 *A*, мы легко можем представить себе расположение в нем атомов. Почему же в одном кристалле чередуются постоянно три слоя, в другом только два слоя атомов,—мы еще не можем объяснить.

Рассматривая модель структуры льда, мы можем найти много интересных особенностей, которые могут нам объяснить известные его свойства. Он имеет гексагональную структуру; пустоты, имеющиеся в его структуре, объясняют легкость льда и пушистость снега. Лед плавает на воде: мы видим, что молекулы воды, соединяясь в кристаллическую структуру, занимают

большее пространство. Мы можем, очевидно, сжать нашу модель; это, без сомнения, соответствует случаю таяния льда под давлением. Есть общеизвестный опыт, иллюстрирующий это явление.



Фиг. 79. Проволока, разрезающая лед.

молекул освобождается от их связей. Другими словами, часть льда плавится под давлением и обращается в воду, которая выдавливается вверх проволокой и заполняет свободное место над ней. Здесь она снова соединяется с двух сторон со льдом. Мы можем сказать, что каждая молекула усаживается на свое место, так как с двух сторон ее старается захватить кристаллический лед.

Льду, находящемуся под сильным давлением, можно придать различные формы. Можно, например, сделать из него вазу; для этого надо иметь две или три подходящие деревянные формы. В одной из них мы можем сформовать верхнюю часть вазы, в другой — ножку, в третьей — основание вазы; их можно соединить друг с другом, подержав несколько времени вме-



Фиг. 80. Формы для льда и получение чаши.

сте. Формы, которыми мы пользовались, показаны на фиг. 80; они были когда-то применены Тиндалем для той же цели.

Тиндаль показывал этот опыт, излагая свою теорию движения ледников, и пользовался им как иллюстрацией своих аргументов. Тиндаль, надо заметить, посвятил много времени измерению движения ледников: они интересовали его как с научной точки зрения, так и в силу его любви к горным прогулкам.

Ледники спускаются со снеговых гор, скользят по долинам и вливаются в равнины, как если бы они были совершенно жидкие; они в самом деле подобны очень вязкой жидкости вроде патоки, потому что их движение чрезвычайно медленно — от нескольких дюймов в день до нескольких футов в некоторых случаях. Постоянство этого движения всегда возбуждало интерес и удивление так же, как и удивительная способность такого хрупкого кристаллического вещества течь подобно реке, обтекать углы долин, скатываться с утесов и все-таки оставаться целым. Во времена Тиндаля высказывалось много соображений в пользу теории, по которой лед плавится снизу, в местах, где давление особенно велико, и вода, образовавшаяся таким образом, облегчает его скольжение. Она может замерзнуть снова, если попадет в пустые впадины и трещины, где давление слишком мало, чтобы поддерживать ее в жидком состоянии. Таким образом ледник суживается там, где он сжат, и расширяется в других местах, приспособляясь к своему ложу. Такое объяснение сталкивается с затруднениями, особенно если мы вспомним о ледниках в арктических и антарктических странах, которые также текут, хотя температура там настолько низка, что существующее давление не способно расплавить лед.

Возможно, что если мы рассмотрим внимательнее свойства кристаллической структуры, мы найдем другой способ объяснения движения ледников: он не слишком отличается от объяснения Тиндаля, но его слабые стороны не так бросаются в глаза. Есть много веществ, способных течь подобно ледникам; металлы могут просачиваться через отверстия, вытягиваться в проволоки, плющиться в листы. Даже стекло и совершенные кристаллы, вроде исландского шпата, могут течь с поверхности, как показал Дж. Бейльби. Все эти вещества имеют кристаллическую структуру; если мы этого не знали раньше, то рентгеновые лучи открыли нам это. Эти вещества остаются кристаллическими и после того, как текли. Мы приведем еще несколько таких примеров, когда будем говорить о свойствах металлов.

Вещество приспосабливается к новым условиям давления, видоизменяясь надлежащим образом. Целые слои атомов или молекул моментально срываются со своих мест, перескакивают, так сказать, через головы вышележащих атомов и водворяются на новом месте или некоторое время сохраняют свое движение. Когда они снова занимают определенные места, кристалл имеет такую же правильную форму, как и раньше; когда же слои начинают перемещаться, все связи нарушены, как если бы вещество начало плавиться. Это случается особенно часто тогда, когда вещество, как лед, сжимается при плавлении, при чем связи, разорванные большим давлением, дают возможность атомам и молекулам расположиться так, чтобы занять меньшее пространство, чем раньше. Когда кусок металла изгибается или сдавливается, принимая новую форму, кристаллы, из которых он состоит, — некоторые или все — „сдвигаются“, как два клинка ножниц, то-есть одна их часть скользит по другой; легко себе представить, что такие последовательные сдвиги могут вызвать изменения в форме. То же должно происходить и со льдом: плавление и сдвиганье, оба принимают участие в изменении формы. „Сдвиги“ льда легко наблюдать. Вырезают кусок из льда, образовавшегося на поверхности воды. Если такой кусок подпереть в его концах и расположить его как раз так, как он был расположен во время своего роста, то он изгибается под действием привязанного к нему груза, как изгибается деревянный или металлический брусок (фиг. 81 А). Если его повернуть так, чтобы слои, которые раньше шли горизонтально, располагались теперь вертикально и чтобы их плоскости были параллельны прямой, соединяющей подпорки (фиг. 81 В), то он очень мало уступает приложенному давлению. Если плоскости, бывшие горизонтальными, станут перпендикулярно к линии, соединяющей подпорки, они скользят друг по другу, и кусок льда меняет свою форму (фиг. 81 С). Если под давлением и местным размягчением молекулы становятся настолько свободными, что могут двигаться, как жидкость, меняя свое место, они должны присоединиться ко льду в другом месте, так как для них всегда найдется таковое. Но, вообще говоря, это явление обусловлено движением плоскостей друг по другу.

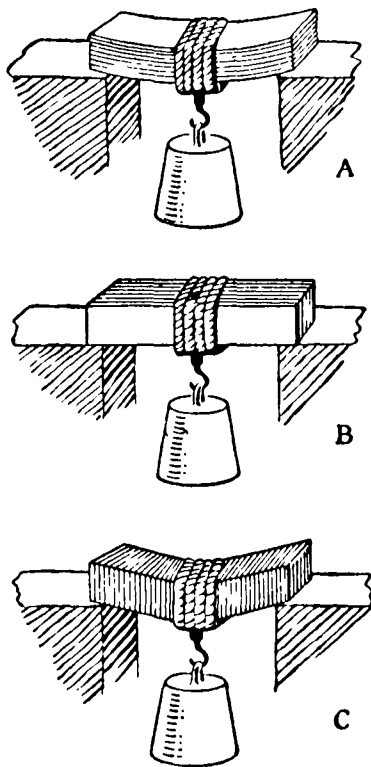
Очень любопытно посмотреть, как прочно прилипают друг к другу куски льда. Если положить хорошо вырезанный плоский кусок льда на другой и подержать их вместе некоторое время, то

можно потом, взявшись за верхний кусок, повернуть их вместе низом вверх, и куски не распадаются. Если два куска льда приложить друг к другу под водой, даже под теплой, то они все же соединяются вместе.

Мы должны теперь вернуться к изучению странных цепочковых молекул из атомов углерода, которое мы за недостатком времени не кончили на прошлой лекции. Изучая структуру алмаза, мы нашли определенное расположение атомов углерода, которое всюду в нем повторяется. Это было расположение шести атомов в кольцо. Мы знаем, что подобное же расположение атомов лежит в основе бензольного кольца, которое представляет собой соединение шестигугольного углеродного кольца с шестью водородными атомами, и что большое число молекул обнаруживает такое же устройство, при чем водородные атомы могут быть замещены другими атомами или группами их. Изучением таких молекул занят большой отдел органической химии.

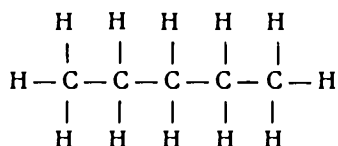
Эти молекулы образуют вещества, названные „ароматическими“, потому что многие из них издают сильный приятный запах. Другая часть органической химии изучает вещества другого рода. Они названы „алифатическими“, так как харак-

терными представителями их являются масла и жиры. Химикам удалось показать, что в этом случае молекула состоит из цепочки углеродных атомов, к которым по длине и на концах цепочки могут присоединяться различные атомы, в частности водородные. Кольцо было обнаружено в структуре алмаза. По-



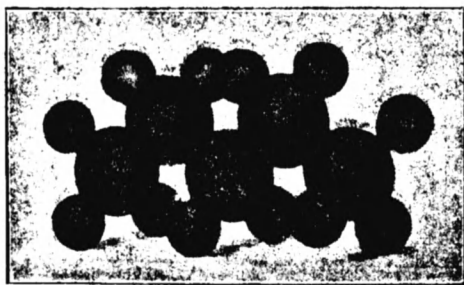
Фиг. 81. Ряд дощечек, расположенных, как показано в А, изгибается под действием тяжести груза. Расположенные на ребрах, как в В, они почти не сгибаются. Если их сложить, как показано в С, что соответствует очень вязкому веществу, то они изгибаются постепенно и непрерывно.

следние опыты, повидимому, говорят о том, что в алмазе имеются так же и цепочки; таким образом алмаз соединяет в себе основные формы двух больших отделов химии. Мы рассмотрели несколько примеров кольцевых молекул в прошлой лекции, цепочковые же отложили до сегодняшней. Цепочка состоит из нескольких звеньев, каждое из которых, вообще говоря, состоит из одного атома углерода и двух атомов водорода; на концах цепочки имеются образования различных групп атомов, многие из которых очень просты и обуславливают хорошо известные свойства цепочки. В простейшем случае концы состоят из водородных атомов; тогда получается молекула углеводов или парафинов. Формула пентана, например, изображается химиками так:



Пентан есть горючая жидкость, употребляющаяся в стандартных источниках света — в лампах, которые служат для сравнения яркости других ламп, потому что пентан дает ровное и постоянное пламя. На диаграмме изображены способы соединения атомов друг с другом в пентане. Каждый углерод связан с четырьмя другими атомами. Атом углерода прочно соединяется

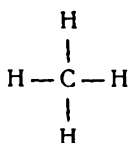
не более чем с четырьмя атомами, так что молекулы не могут соединиться, не разрушив где-нибудь предварительно цепочку. Говорят, что такая молекула насыщена. На диаграмме все атомы расположены в одной плоскости, отчасти потому, что так удобнее рисовать, отчасти потому, что об их действительном расположении мы очень мало знаем. Одной из задач



Фиг. 82. Модель водородной цепочки пентана с пятью атомами углерода. Большие шарики изображают углероды, маленькие — водороды.

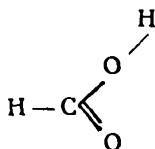
рентгенового анализа и является определение относительного положения атомов в молекуле более точно, чем это делалось до сих

пор, и измерение их (линейных) расстояний. В случае длинных молекул мы достигли теперь неожиданных успехов, применяя рентгеновы лучи. Чтобы использовать эти новые сведения, мы должны дать модель или перспективное изображение; модель вероятной формы молекулы пентана изображена на фиг. 82. Многие члены парафинового ряда найдены в качестве примесей в нефтяных фонтанах. Они легко воспламеняются, так как быстро распадаются в присутствии кислорода и атомы их входят в новые соединения, выделяя при этом много тепла. Наиболее „короткий“ член этого ряда имеет цепочку, состоящую только из одного звена. Это — газ, известный под именем метана, или болотного газа; молекула его может быть изображена таким образом:

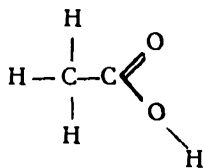


Он подымается в виде пузырей из стоячих вод, дно которых покрыто растениями. Чем длиннее цепочка, тем прочнее связываются друг с другом молекулы вещества. Пентан с пятью звеньями представляет собой при комнатной температуре жидкость; кипит он при  $36^{\circ}\text{C}$ ; пентадекан с пятнадцатью звеньями кипит при  $257^{\circ}\text{C}$ , тогда как пентакозан с двадцатью пятью звеньями является уже твердым телом с точкой плавления при  $54^{\circ}\text{C}$ . Предполагают, что длинные молекулы стремятся располагаться рядами, подобно спичкам в коробке; мы увидим далее, что это предположение было подтверждено результатами исследований рентгеновыми лучами. Следовательно надо ожидать, что, чем длиннее молекулы, тем большие силы нужны для их отрывания друг от друга; по этой же причине точки плавления и кипения вещества должны быть тем выше, чем длиннее его молекулы. Впрочем, сравнительно с другими, вещества с цепочковыми молекулами имеют не очень прочно связанные молекулы: их температуры плавления и кипения низки. Оболочка из водородов, которая их окружает, мешает им, повидимому, соединяться с молекулами других веществ, например кислот. И, в самом деле, слово парафин произведено от двух латинских слов, обозначающих „малый“ и „средство“. Однако, как я уже сказал, они очень охотно соединяются с кислородом при

подходящих обстоятельствах. Свойства цепочки сильно меняются, если конечную группу ее заменить какой-нибудь другой. При замене одного из крайних водородов группой, содержащей углерод, два кислорода и водород, мы получаем ряд других веществ, имеющих для нас весьма важное значение и названных „жирными кислотами“. Самая группа называется карбоксильной группой. И в этом случае цепочка может иметь разную длину. Если она содержит только один углерод, то она изображается химиками так:



При этом считается, что из четырех связей, которыми углерод располагает для присоединения новых атомов, одна приходится на долю водорода, другая на долю кислорода, связанного с водородом, и две на то, чтобы удержать, как можно прочнее, один свободный кислород. Это вещество есть муравьиная кислота, выделяемая муравьями; она сильно раздражает кожу, как мы все хорошо знаем. Если к этой цепочке присоединяется новое звено, то получается уксусная кислота, придающая кислый вкус уксусу; ее название происходит от латинского названия уксуса. Формула ее такова:



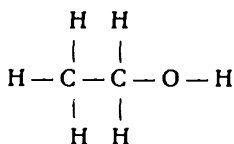
Масляная кислота имеет четыре углерода; это вещество придает прогорклому маслу его специфический вкус и запах. Лауриновая кислота имеет двенадцать углеродов и входит в состав лауринового и кокосового масла. Миристиновая кислота содержит их четырнадцать и входит в состав орехового масла. Все эти вещества жидки. Пальмитиновая кислота, находящаяся в пальмовом масле, имеет шестнадцать и стеариновая восемнадцать углеродов. Оба последние вещества находятся при обыкновенных температурах в твердом состоянии. Они входят в со-



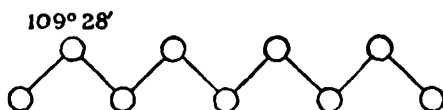
став стеариновых свечей и в несколько измененном виде являются одними из важнейших составляющих животных жиров.

Спирты образуют другой ряд цепочковых молекул. Они образуются из парафинов при замене крайнего водорода комбинацией водорода и кислорода.

Таким образом молекула обыкновенного алкоголя имеет вид:



Можно описать огромное количество веществ, молекулы которых состоят из звеньев  $\text{CH}_2$  и имеют на концах разные группы. Иногда один или более водородов отрываются сбоку цепочки и замещаются другим атомом или целой группой; иногда встречаются дальнейшие усложнения. Есть особая прелесть



Фиг. 83. Цепочка алмаза.

в простоте основного плана строения этих веществ и в замечательном разнообразии деталей, имеющих такое огромное значение. Почему различные растения и животные, различные части одного и того же растения или животного состоят из этих углеродных цепочек различной длины, от которых зависит самый их рост, развитие и свойства? Конечно все свойства этих молекул обусловлены прежде всего свойствами углеродного атома, и вот чем объясняется тот живой интерес, который вызывают кристаллические формы углерода — алмаз и графит.

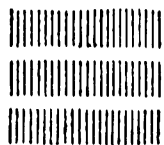
Мы снова вернемся к рассмотрению модели алмаза и постараемся представить себе схему цепочки, подобно тому как мы имели схему кольца. Модель алмаза (фиг. 55) может быть разделена на цепочки определенной длины, имеющие такой вид (фиг. 83).

Угол между двумя соседними звеньями равняется 109° 28', как показывают вычисления. Можно думать, что это простейшая форма цепочки. Конечно все это относится к области предположений, делаемых нами в попытках отыскать решение задачи; эти

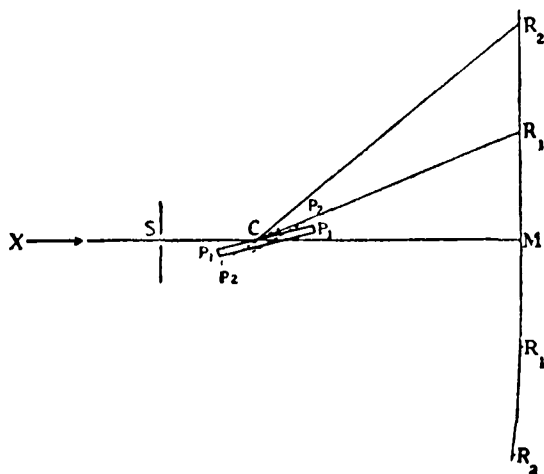
предположения необходимо подвергнуть экспериментальной проверке, и даже в том случае, когда мы, повидимому, получаем положительные результаты, мы не должны особенно полагаться на них. Если бы тут на самом деле имелась цепочка, к каждому углероду были бы присоединены два водорода в точках, которые вместе с точками присоединения двух соседних углеродов представляли бы четыре симметрично расположенные точки, подобные тем четырем точкам, в которых атом углерода связан со своими четырьмя соседями в алмазе, как показано на модели (фиг. 82). Такая модель дает больше деталей, чем схематические изображения, которыми пользуется химия; там все изображается на плоскости, мы же пользуемся тремя измерениями. И нет, конечно, сомнений, что и в действительности мы имеем дело с тремя измерениями. Химик не мог раньше дать таких изображений, потому что он не представлял себе отчетливо, как их надо строить. Мы попробовали пойти несколько дальше, с некоторыми колебаниями, правда, так как мы еще не в совершенстве овладели интерпретацией результатов, даваемых новыми методами исследования, хотя и несколько не сомневались в том значении, которое они в конце концов должны для нас иметь.

За последние один-два года мы научились точно измерять длины цепочковых молекул при помощи рентгеновых лучей. Метод, с помощью которого сделаны эти измерения, был открыт совершенно случайно. Исследовался некий кристалл при помощи рентгеновых лучей; так как вещество кристалла быстро разрушалось под действием влаги воздуха, то его покрыли тонким слоем парафина, который обычно употребляется в лабораториях в качестве изолятора. При исследовании были обнаружены такие отражения рентгеновых лучей, которые не соответствовали тому, что должно было получиться. Было найдено, что своим происхождением они обязаны парафину. Продажный парафин представляет собой смесь нескольких жирных кислот с цепочковыми молекулами и поэтому он не годится для точных опытов. Случилось, однако, что Ле Сёр (Le Suer), ревностно занимающийся органической химией, приготовил в это время большое число этих цепочковых веществ в чистом виде; они оказались вполне пригодными для исследования. Теперь исследовано уже много таких веществ и получены очень интересные и простые результаты.

В качестве хорошего примера применения рентгеновых лучей мы опишем один из современных методов. Немного твердого вещества наносится на стекло и расплющивается на нем плоским слоем; мы увидим далее, зачем нужно такое расплющивание. Вещество располагается теперь в слое, параллельном стеклу. Молекулы в каждом слое более или менее перпендикулярны к нему и связаны друг с другом. Их можно изобразить штрихами, как на фиг. 84, где представлены три слоя. Толщина каждого слоя составляет приблизительно одну стомиллионную долю сантиметра и пропорциональна длине молекулы. Когда пучек рентгеновых лучей проходит через ряд таких слоев, он отражается понемногу от каждого из них, подобно лучу света, проходящему через стопу стеклянных пластинок. Основная идея опыта была уже описана на стр. 92. Пусть  $S$  — источник рентгеновых лучей (фиг. 85) и  $P_1P_1$  — стеклянная пластинка с нанесенными на ней слоями. Если пучек рентгеновых лучей  $SC$



Фиг. 84. Схема расположения молекул в слоях веществ, подобных стеариновой кислоте или углеводам, вроде пентана.



Фиг. 85. Метод получения рентгеновского спектра углеводов. Рентгеновские лучи из  $X$  проходят щель  $S$ , и, если слой, нанесенный на пластинку  $P_1P_2$ , расположен под углом, необходимым для отражения, получается отраженный пучек  $CR_1$ , который действует на фотографическую пластинку в точке  $R_1$ . Если пластинка повернута достаточно, происходит второе отражение,  $R_2$ , когда пластинка занимает положение  $P_2P_2$  и т. д.

падает на слой, нанесенный на стекло под соответствующим углом, отражения от различных слоев совпадают и в общем дают интен-

сивный отраженный пучек. Пусть отраженные лучи идут по прямой  $CR_1$  и образуют в  $R_1$  пятно на фотографической пластинке  $DD$ . Если слой повернуть вокруг вертикальной оси, проходящей через  $C$  (наша фигура дает расположение опыта в плане),— отраженный свет исчезает, потому что отдельные отражения от различных слоев теперь не согласованы и уничтожают друг друга. Но если слой повернуть еще больше, отраженный свет вновь появляется, так как отражения от отдельных слоев снова становятся согласованными. Первое отражение получается тогда, когда частичное отражение от одного слоя отстаёт или опережает на одну волну отражение от слоев, лежащих по обе его стороны; следующее отражение получается при разности ходов в две волны и т. д. Согласно этому фотографическая пластинка после проявления обнаруживает целый ряд таких отра-



Фиг. 86. Рентгеновский спектр углевода с 18 углеродами, полученный по методу, описанному на фиг. 85 (Мюллер).

жений. Обычно кристалл вращают так, чтобы получить отражения сверху и снизу средней линии на фиг. 85. Центральное пятно  $M$  обусловлено действием неотклоненных рентгеновых лучей (эта часть пластинки обыкновенно чем-нибудь защищается от них, так что это прямое действие лучей невелико); пятна, соответствующие отражениям разных порядков, располагаются вокруг него. На фиг. 86 воспроизведен снимок в лучах, отраженных от парафина, имеющего 18 углеродов. Он был получен А. Мюллером. На нем очень хорошо заметны все отражения. На этой пластинке можно измерить расстояния полос друг от друга с большой точностью и по ним вычислить толщину слоя отражающего вещества. Мы не можем быть вполне уверены, что молекулы стоят перпендикулярно к слоям, но у нас есть веские основания предполагать это,—основания, о которых мы здесь говорить не будем. Мы видели, что длина цепочки возрастает с совершенной правильностью каждый раз, когда к ней прибавляется новое углеродное звено. Мы действи-

тельно нашли, что многие цепочки имеют длину, которую и должно ожидать для них, если представлять их в виде цепочки, подобной цепочке, изображенной на фиг. 83.

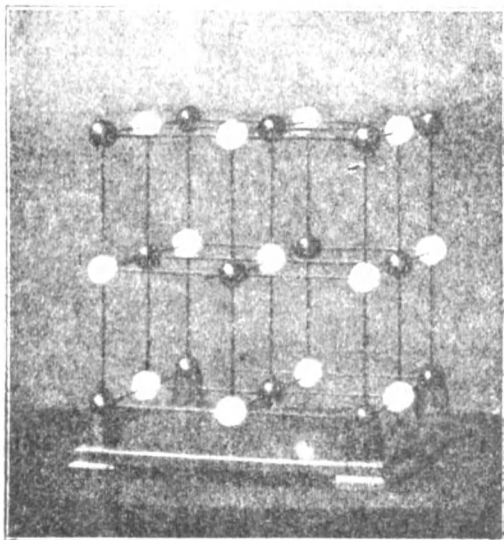
Целый ряд подобных опытов приводит нас к тому же представлению о форме этих молекул, какое выработалось у химиков; оно оказывается вполне правильным. Рентгеновы лучи сделали его более точным, перенеся его в три измерения и определив длины молекул. Я должен прибавить, что и взаимные их расстояния также могут быть измерены.

Мы вернемся теперь к тому любопытному обстоятельству, что отражения рентгеновых лучей интенсивнее, когда вещество спрессовано на стеклянной пластинке. Повидимому в каждом таком веществе имеются группы или слои молекул, в каждом из которых молекулы перпендикулярны к слою. Они связаны друг с другом перпендикулярно к их длине, как я уже говорил, и гораздо прочнее, чем слой со слоем. Слой со слоем связывается при помощи концов молекул, а здесь все связи много слабее. Это то же самое явление, с которым мы встретились в случае графита, где каждый слой сам по себе очень прочен, но легко скользит по соседним слоям. Этим объясняется то ощущение скользкости и маслянистости, которое вызывают в нас жиры и графит. Если же вещество прессуется, то слои ложатся плоско, так же как графит, нанесенный на какую-нибудь поверхность, и отражение рентгеновых лучей происходит теперь правильно, потому что отдельные слои располагаются правильно. Если теперь расплавить и снова охладить вещество, то слои распадаются, и хотя, без сомнения, они образуются снова, но располагаются уже неправильно, и отраженный рентгенов свет становится слабым. То же самое явление мы находим и в золотых листочках; с ним мы встретимся в следующей лекции.

Есть еще другое замечательное свойство длинных цепочковых молекул, достойное нашего внимания. В молекуле парафинов цепочка с двух сторон оканчивается водородами. Каждый слой обычно бывает в толщину одной молекулы. Но в случаях жирных кислот (стр. 128) исследование рентгеновыми лучами обнаружило по две молекулы в каждом слое, соприкасающиеся концами. Этого, собственно говоря, следовало ожидать, так как относительно карбоксильной группы известно, что она стремится соединиться с такой же группой. Таким образом цепочки

попарно связываются, образуя цепочку двойной длины, концами которой служат водороды; обе карбоксильные группы сидят в середине. Эти результаты получены из измерений с помощью рентгеновых лучей. Здесь, таким образом, рентгеновы лучи снова подтверждают выводы химиков и проливают на них новый свет.

Есть еще один вид кристаллической структуры, совершенно отличный от тех, которые мы уже рассмотрели, но имеющий



Фиг. 87. Модель расположения атомов натрия и хлора в кристалле каменной соли; темные шары изображают натрий, белые — хлор, или наоборот. Показано только расположение атомов, без всяких намерений дать форму и размеры атомов.

настолько важное значение, что мы не можем обойти его молчанием. Примером такого типа является кристалл обыкновенной поваренной соли.

Иногда, как мы уже говорили, молекула образуется из двух атомов, из которых один, стремящийся получить добавочный электрон, удовлетворяется за счет другого атома. Этот последний до соединения имеет один

очень слабо связанный электрон. Так, например, хлор имеет семнадцать электронов: два в самом внутреннем кольце или слое и восемь — в соседнем; в наружном же слое у него семь электронов, и он развивает большие силы, стремясь заполнить этот слой, который, целиком заполненный, должен содержать восемь электронов. Тогда он станет подобным аргону. Натрий же обычно имеет одиннадцать электронов: два во внутреннем слое, восемь в следующем и только один в наружном, вместо семи электронов хлора. Атом натрия непрочно удерживает этот лишний электрон, и хлор его отбирает. Атом натрия тогда также становится подобным атому аргона (см. стр. 51). Оба атома теперь несут электриче-

ские заряды: хлор заряжен отрицательно, так как он имеет один лишний отрицательный заряд, и натрий — положительно, так как ему нехватает одного отрицательного заряда. Направляющим началом во время роста кристалла является стремление атомов удовлетворить, насколько возможно, взаимное притяжение положительно заряженного натрия и отрицательного хлора. Система, которую принимает природа для их расположения, такова, что каждый хлор окружен шестью натриями, и наоборот. Такое расположение представлено на фиг. 87. Оно очень просто: это — кубическое расположение, в котором каждая прямая, заполненная атомами и параллельная ребрам, состоит из чередующихся атомов натрия и хлора. Белые шарики могут изображать хлор, черные — натрий, или наоборот. Потому-то поваренная соль кристаллизуется из растворов в кубической форме. Кристаллы не должны быть непременно кубиками; они представляют собой прямоугольные бруски, все грани которых имеют один и тот же вид. Часто наблюдающаяся разница в их размерах и внешнем виде объясняется случайными условиями роста.

Многие кристаллы построены по тому же принципу: почти все соли металлов, где металл теряет один или более электронов, и другая часть молекулы присоединяет их к себе. Структура, получающаяся при этом, не всегда так проста, как в случае поваренной соли, потому, например, что группа, присоединяющая электроны, может быть не так правильна в своем контуре, как один хлор. В кальците металлический атом кальция отдает два электрона группе  $\text{CO}_3$ ; в результате получается ромбоэдр исландского шпата. Тут, правда, опять каждый металлический атом окружен шестью отрицательно заряженными тельцами, и каждое из них — шестью металлическими атомами; кристалл, однако, не прямоуголен, потому что группа  $\text{CO}_3$  не кругла.

---

## ЛЕКЦИЯ ШЕСТАЯ.

### О ПРИРОДЕ КРИСТАЛЛОВ. МЕТАЛЛЫ.

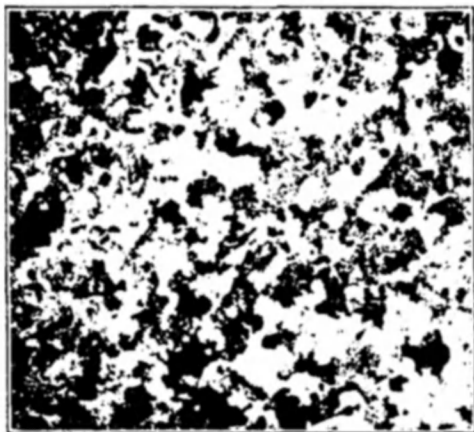
Употребление металлов явилось одним из важнейших факторов развития жизни и деятельности человечества. Начало истории теряется в веках, и мы можем только догадываться о том, как впервые человек сделал металлические орудия. Возможно, что медь была найдена в естественном состоянии, и ее тяжесть вызвала предположение об ее пригодности в боях. Медь слишком мягка для того, чтобы образовать острый режущий край, и прошло не очень много времени до того, как был найден ее сплав с оловом, который гораздо тверже и пригоднее для обработки, чем чистая медь. Может быть олово попало в камень, из которого был сделан горн для плавления меди, может быть медь и олово случайно оказались в одной и той же руде. Таким образом начался век бронзы. Железо появилось, конечно, позже. С тех давних времен до нашей эпохи целый ряд людей занимаются обработкой металлов; эти люди являются важнейшими членами человеческого общества. Достаточно вспомнить о том огромном значении металлообрабатывающей промышленности, которое она имеет только в одной Англии, чтобы представить себе, какую большую роль играют металлы в мировой жизни.

За тысячелетия своей жизни человечество приобрело много опытности и навыков в обработке металлов. Многие из них записаны, многие из них в качестве традиций передаются опытными мастерами своим ученикам. Часто бывает нужным иметь чутье к природе, поведению и свойствам металла — чутье, которое вырабатывается на примерах и опытах у того, кто способен к нему.

С другой стороны, свойства металлов должны зависеть, прежде всего, от свойств отдельных атомов и затем от расположения их, которое всегда является кристаллическим..

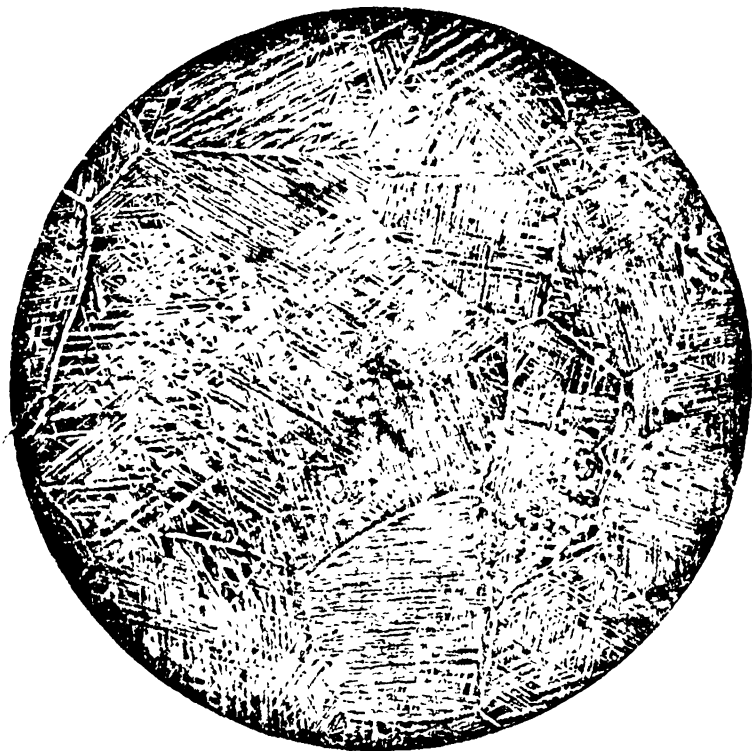


В больших центрах металлургической промышленности в последние годы устроены лаборатории, где ученые с их микроскопами начинают приводить в систему множество беспорядочно накопленных знаний и могут, таким образом, усовершенствовать качество продукта и установить точно условия его выработки. Однако, как я уже ранее сказал, микроскопом можно пользоваться только до определенных пределов: он отказывается нам помочь, когда мы хотим понять, каким образом взаимодействие атомов дает различным металлам их специфические свойства. Микроскоп может обнаружить существование отдельных кристаллов в металле, но не может дать расположение атомов в кристаллах (фиг. 88 и 89). На рентгеновые лучи мы возлагаем новые надежды; и на самом деле они дают нам больше, чем только надежду. Мы уверены, что те глубокие знания, которые они нам дают, прольют в конце концов яркий свет на внутренний смысл и значение сложных свойств металлов. Должно пройти, конечно, много времени, прежде чем успехи на нашем новом пути станут очевидными и значительными. Опыт тысячелетий



Фиг. 88. Две фотографии алюминия; поверхность была приготовлена так, чтобы можно было показать различные кристаллы. Кристаллы рассеивают падающий свет различно, потому что они расположены различным образом, и поверхности, подвергавшиеся обработке, имеют поэтому различную природу. Одна фигура дана почти в натуральную величину, другая сильно увеличена.

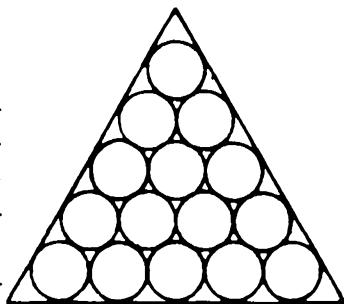
должен быть пересмотрен и объяснен новыми методами. Мы видим здесь полную противоположность развитию электротехники или беспроволочной телефонии, являющейся ветвью ее. Здесь весь процесс развития протекал в физической лаборатории и направлялся предварительно полученными знаниями. Металлурги же руководствовались эмпирическими пробами и



Фиг. 89. Фотография показывает неправильные кристаллические зерна в образчике стали, и, кроме того, пересекающиеся линии внутри каждого зерна, известные под именем „видманштеттеновских линий“. Они вызваны тем, что полирующий инструмент срезал слои атомов точно так же, как при полировке жемчуга срезывают с них наружную оболочку.

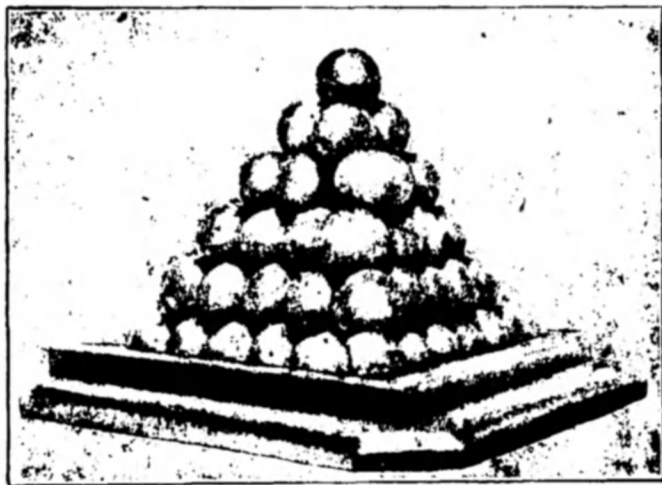
опытами, часто ошибочными, не имея достаточных знаний, которые могли бы служить им путеводной нитью. При таких условиях прогресс идет весьма медленно; но он шел уже много лет, и его результаты внушают нам уважение. Эти результаты должны быть тщательно изучены теми новыми методами, которые дают нам рентгеновы лучи.

Мы уже начали находить объяснения некоторым свойствам металлов. Эти свойства связаны с кристаллической структурой металлов, что и следовало ожидать. Иногда отдельные кристаллы можно видеть простым глазом, иногда они становятся видимыми под микроскопом после надлежащей обработки поверхности кристалла. Но самый простой и наиболее совершенный способ обнаружения кристаллической структуры — исследование материала рентгеновыми лучами.



Фиг. 90. Тесное расположение шаров в слое.

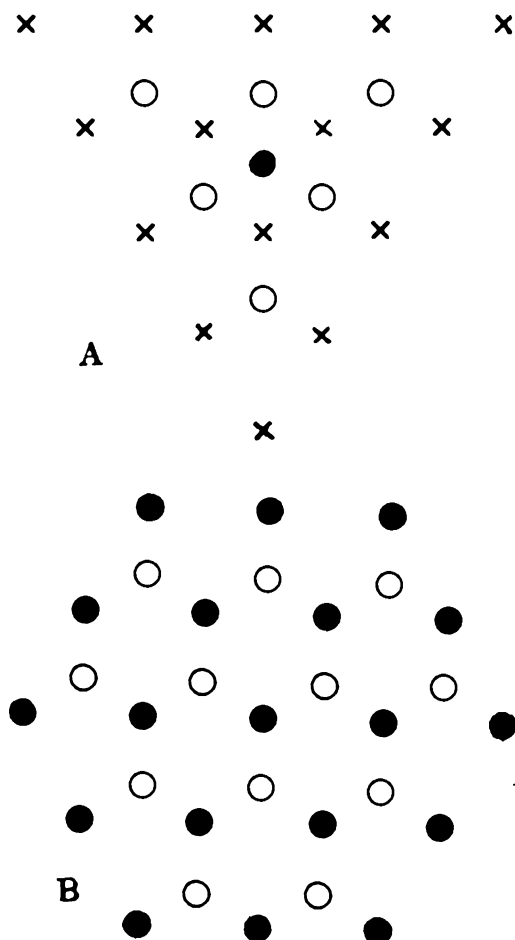
Структура почти всех металлических кристаллов была определена с помощью рентгеновых лучей; повидимому она в большинстве случаев чрезвычайно проста. Так, например, атомы золота, серебра, меди и алюминия располагаются подобно круглым ядрам, обыкновенно накладывавшимся в кучу около пушек лет сто тому назад. Очень полезно взглянуть внимательнее в это



Фиг. 91. Пирамида, построенная наложением слоев, подобных слою, изображенному на фиг. 90.

расположение, хотя мы уже тщательно сравнили между собой структуры льда и алмаза (стр. 120). Расположим шары в виде треугольника (фиг. 90), окруженного треугольной за-

городкой, подобно тому, как их укладывают на бильярдном столе перед началом игры в „пирамидку“. На этот слой



Фиг. 92. В *A* представлено расположение слоев, видимое наблюдателем, смотрящим вдоль диагонали куба на фиг. 93. Черный кружок изображает шарик в вершине. Светлые кружки изображают шесть шариков ближайшего слоя, и крестики—пятнадцать—следующего. В *B* представлено то расположение, которое видит наблюдатель, смотрящий на модель фиг. 94 сверху. Девятнадцать черных пятен изображают шарики верхнего слоя, и двадцать маленьких кругов—шарики ближайшего слоя. Третий слой подобен первому, четвертый—второму и т. д. В этом случае повторяется каждый второй слой, в *A*—каждый третий.

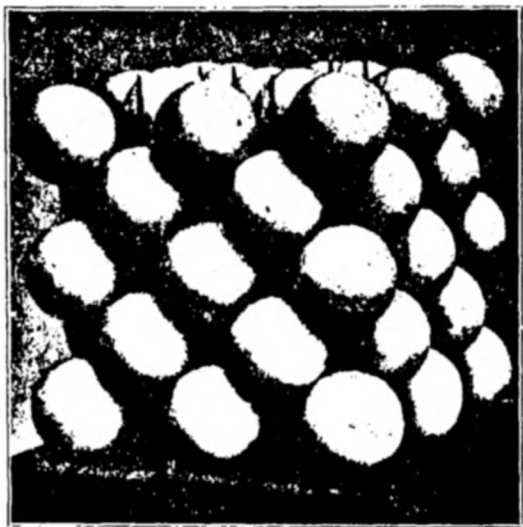
мы накладываем новый, образующий несколько меньший треугольник, затем следующий, пока, наконец, не получится треугольная пирамида (фиг. 91). Очевидно—это наиболее тесный

способ расположения шаров. Если мы теперь рассмотрим такое расположение слоев друг над другом, то увидим, что шары в каждом слое лежат как раз над шарами следующего слоя, через два. Если под руками нет такой модели, то это расположение может быть изображено, как показано на фиг. 92. Крестики соответствуют центрам шаров какого-нибудь слоя, кружки — центрам соседнего, черные пятна — следующего за ним. Центры четвертого должны стоять над крестиками, пятого — над кружками, шестого — над пятнами и т. д.

Если шары расположены таким образом, то можно из всей совокупности их выделить кубы, как показано на фиг. 93. Сталкиваясь впервые с этим фактом, мы всегда испытываем удивление; было бы очень желательно знать, почему это так, ввиду того, что многие кристаллы строятся из атомов, укладываемых таким образом, и что они так часто растут в виде кубов или форм, имеющих тесную связь с кубической формой.

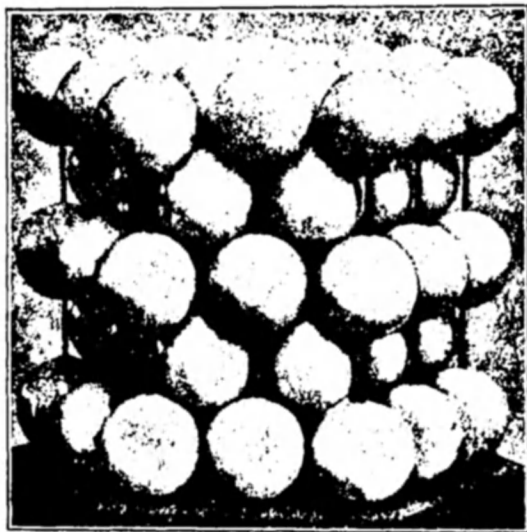
Если теперь, уложив два слоя шаров, мы начинаем укладывать третий и притом так, чтобы каждый его шар приходился как раз над шаром в первом слое (распределение с чередующимися слоями), то мы получим другой способ расположения, не менее компактного, чем первое. В этом случае шары в каждом слое расположены в точности над шарами ближайшего к нему через один слоя, и фиг. 92 *A* должна быть заменена фигурой 92 *B*, а расположение на фиг. 93 — расположением на фиг. 94. Такое расположение шаров не может держаться без удерживающих его стенок, особенно если в нашем распоряжении много шаров; мы можем скрепить их тем или иным способом. Глядя сверху вниз на модель, мы видим шестиугольные колодцы, проходящие через нее; в другом каком-нибудь направлении таких колодцев мы не наблюдаем. Наша модель имеет одну ось в вертикальном направлении, и вокруг нее расположение атомов таково, что кристалл, построенный по этому плану, должен естественно образовать шестиугольные колонны.

В случае куба можно представить себе четыре способа расположения слоев; всегда имеется слой, расположенный перпендикулярно к диагонали куба, и так как куб имеет четыре диагонали, то в нем имеется четыре серии слоев. Не надо думать, что атомы каждого слоя как-то особенно связаны друг



Фиг. 93. Кубическое расположение.

Модель показывает, как надо расположить шары, чтобы получить куб. Это то же самое расположение, что на фиг. 91. Плотные заполненные слои фиг. 90 расположены горизонтально на фиг. 91, здесь же они идут перпендикулярно к диагонали куба.



Фиг. 94. Гексагональное расположение.

Модель изображает другую форму тесного расположения. Каждый горизонтальный слой есть слой из фиг. 90.

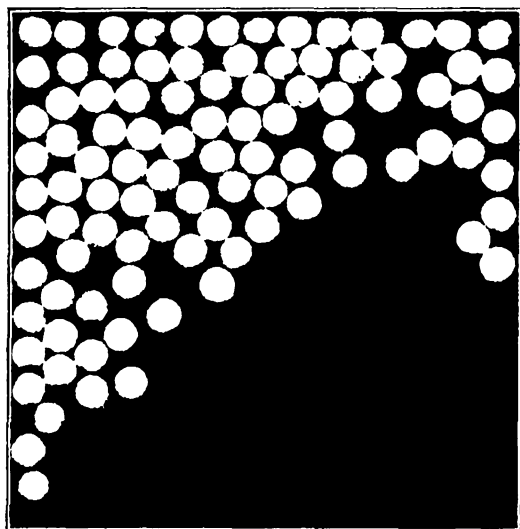
с другом именно в этом слое; просто, мы можем распределить атомы кристалла в слои четырьмя различными способами.

Оказывается, что эти слои имеют огромное влияние на свойства металлических кристаллов, построенных по такому плотному кубическому сложению. Золото, серебро, медь, алюминий и другие сходные с ними металлы могут быть вытянуты в проволоки, сплющены в листы и выкованы в различных формах. Они, как мы говорим, ковкие, и эта ковкость есть то свойство, которое обусловило такое широкое их применение. Они могут быть согнуты и вытянуты как угодно и принимают любую форму. Повидимому можно заставить металл течь подобно патоке. Золото может быть расплющено в такие тонкие листы, что монетой в десять рублей можно покрыть большое поле; другие металлы расплющиваются почти так же хорошо. Посуду всех сортов, цепи и украшения, бесчисленное множество полезных вещей оказалось возможным выделывать благодаря этому особому свойству — ковкости. Первая задача, которую мы хотели бы разрешить с помощью рентгеновых лучей, если это возможно, и заключается в том, чтобы установить те особенности их структуры, которые обуславливают такие драгоценные их свойства. Интересно также выяснить, как связано со структурой металла затвердевание и прочие изменения, вызываемые „холодной обработкой“, как ее называют — ковкой и вытягиванием металла в холодном состоянии. И что такое прокатывание, размягчение и отпуск, которые производятся нагреванием? Почему все эти особенности так резко и отчетливо проявляются у металлов, и почему мы их не видим, например, у алмаза, каменной соли или кварца?

Мы уже нащупываем путь к решению этих трудных вопросов; в частности мы открыли кое-что относительно того, каким образом металл поддается волочению и всяческому растягиванию, и узнали, что это происходит благодаря его слоистости, о которой я уже говорил. Металл редко представляет собой один цельный кристалл; он является собранием кристаллов, расположенных, как попало, во всевозможных направлениях. Иногда эти кристаллы легко видимы; иногда, для того, чтобы их различить, требуется микроскоп. Очень часто они слишком малы даже для микроскопа, и только рентгеновы лучи могут обнаружить их существование.

Если положить шары на лоток в один слой и заставить их

катиться, наклоняя слегка лоток (фиг. 95), то оказывается, что шары имеют тенденцию расположиться сами собой, подобно шарам на фиг. 90. Редко может случиться, что все шары будут образовывать одно и то же расположение; могут быть разные группы шаров, устроенные внутри себя определенным образом, но имеющие неправильные бесформенные границы. Точно также могут быть местные образования атомов в металле, другими словами, могут быть кристаллические группы,



Фиг. 95. Мелкие группы дробинки, тесно расположенных, и неправильные промежутки между группами.

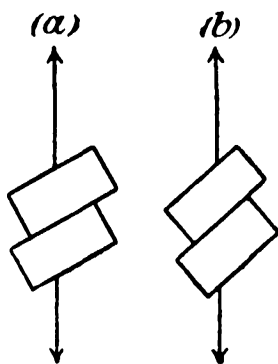
большие или маленькие, соединения же между группами могут не иметь правильной структуры.

Мы можем заметить кстати, что соединения между группами, вообще говоря, не должны быть непременно слабее, чем связи между атомами в одной и той же группе. Почему это происходит так — сказать трудно. Мы не должны удивляться этому, потому что вопрос о связях между атомами очень сложен, мало нами изучен, и мы не можем предсказать точно, что, должно случиться в каждом отдельном случае. Говорят, что когда золото нагрето, оно ломается при ударе так, что трещина проходит через кристаллы, когда же золото холодно, трещина обходит вокруг них; этот факт может иллюстрировать всю сложность этого явления.

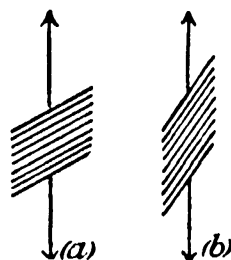


Таким образом надо ожидать, что кусок того или другого металла состоит из множества кристаллов, больших и малых, и это действительно было обнаружено с помощью рентгеновых лучей даже в тех случаях, когда микроскоп ничего не давал ввиду слишком малых размеров этих кристалликов.

Изготовим один кристалл и попробуем согнуть или разрушить его; мы увидим, что в конце концов он поддается нашим усилиям, при чем части его скользят относительно некоторой плоскости: все, что лежит по одну сторону этой плоскости, сдвигается относительно того, что остается по другую ее сторону.



Фиг. 96. Два куска сжаты вместе, но могут скользить один по другому. При растягивании они изменяют относительное положение, от (а) к (b).



Фиг. 97. Эти фигуры изображают схематически скольжение слоев в кристалле алюминия.

Это те самые плоскости, о которых мы говорили раньше,—те, которые содержат атомы, расположенные как на фиг. 90. Отдельный металлический кристалл никогда не ломается в том самом направлении, в котором его растягивают. Если взять два куска стекла, склеить их салом (фиг. 96) и потянуть, то они начинают двигаться вдоль плоскости, их разделяющей. Они скользят один по другому в этой плоскости, раньше чем оторвутся друг от друга. В случае металла мы имеем дело не с одной плоскостью, а со многими, и многие из них могут быть плоскостями скольжения либо по нескольку вместе, либо порознь каждая. Мы можем изобразить кристалл в виде ряда штрихов, как на фиг. 97, а; растянутый в направлении стрелки, он принимает вид, изображенный на фиг. 97, b. Часто при растягивании отдельного кристалла мы видим на его поверхности следы тех линий, по которым происходило скольжение.

Профессор Карпентер и мисс Элам получили недавно прекрасные образцы такого рода деформаций с большими кристаллами алюминия. Как мы уже знаем, обыкновенный кусок алюминия состоит из множества кристаллов, расположенных по всевозможным направлениям. При помощи сложного процесса нагревания и растягивания можно заставить множество мелких кристаллов соединиться и образовать несколько больших, подобно тому как, встряхивая и наклоняя лоток с шарами, изображенный на фиг. 95, определенным способом, который мы находим путем проб, можно заставить маленькие правильные группы шаров соединиться в одну большую.

Образцы, выбранные для этих опытов, имели форму, которую часто придают материалам при испытании их прочности на растягивание: они изображены на фиг. 98. Начальная длина каждого образца была равна 8 дюймам. Широкий конец делается для того, чтобы можно было захватить его тисками прибора для растягивания; узкая часть разрывается, и по тому, как она разрывается, и по силе, приложенной к ней, можно судить о способности металла сопротивляться силам, стремящимся растянуть его.

Если один из исследуемых образцов помещается для испытания в прибор и подвергается растягиванию, он деформируется и принимает курьезные формы, разные для различных образцов (фиг. 98, 1—4). Иногда ширина образца остается неизменной, и он постепенно утончается спереди на зад, по мере удлинения образца: он может вытянуться на несколько дюймов, прежде чем разорвется. Иногда толщина не меняется, и кусок суживается по бокам, образуя перемычку, по которой он в конце концов разрывается. В других случаях можно наблюдать еще более любопытные изменения. Все эти образцы были исследованы рентгеновыми лучами; оказалось, что характер деформации зависит всецело от расположения кристаллов относительно направления растягивания. Металл разрывается по плоскости скольжения. Если, например, кристалл расположен так, — мы ничего не можем сказать о том, каким образом расположится во время обработки образующийся кристалл, — что его слои идут, как показано на фиг. 97, то растягивание должно сузить его.

Иногда направление, в котором кристалл разрывается, зависит от более сложного действия двух серий плоскостей скольжения поочередно. Если кристалл может скользить по

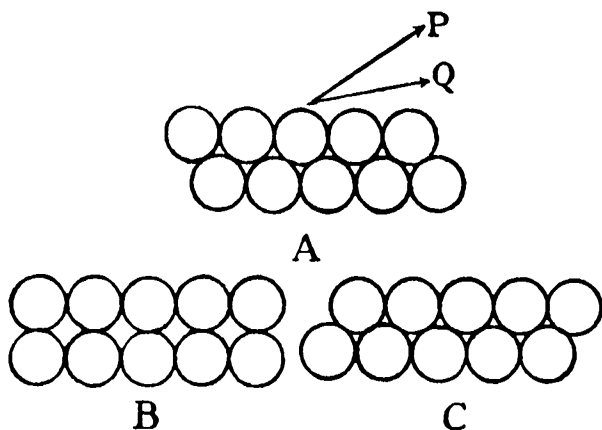
нескольким сериям плоскостей, то он выбирает такие, которые по возможности нормальны к линии растягивания. Легко



Фиг. 98. Эти фотографии получены проф. Карпентером и мисс Элам (Proceeding of the Royal Society. A 100, p. 346). Они изображают разрывание алюминия при растяжении; часть его, которая разрывается, представляет собой отдельный большой кристалл, помещенный в узкой части испытуемого образца. В (1) и (2) плоскости скольжения смещены к наблюдателю, подобно слоям на фиг. 97. Испытуемый кусок утончался с боков, образуя перемычку, как показано на фигуре. Здесь нет утончения спереди назад. В (3) и (4) до разрыва происходило обратное изменение: ширина осталась та же самая, но образец сплюснулся (этого нельзя видеть на фотографии).

можно представить себе, что так и должно быть, потому что при скольжении один слой атомов сдвигается относи-

тельно другого, и это движение должно производиться силой, стремящейся оторвать один слой от другого. Если имеется твердое тело, состоящее из ряда шаров, подобно верхнему слою на фиг. 99, покоящихся на таком же ряде, соответствующем нижнему слою фиг. 99, то легче сдвинуть верхний слой, направляя растягивающую силу по  $P$ , чем по  $Q$ . Так как (см. фиг. 96) растяжение всегда стремится повернуть плоскость скольжения по возможности ближе к своему собственному направлению, то тут получается нечто вроде самораспилки: кристалл скользит вдоль одного ряда плоскостей до тех пор, пока их направление не совпадет почти с направлением растяги-



Фиг. 99. Верхний слой как целое может быть более легко сдвинут из положения  $A$  через положение  $B$  в положение  $C$ , если сдвигающая сила направлена по  $P$ , чем тогда, когда она направлена по  $Q$ .

вающей силы; тогда скольжение начинается по другому ряду плоскостей. В конце концов направление растягивающей силы делит пополам угол между плоскостями обоих рядов. Это можно часто видеть на разорванных концах металла; на фиг. 98 (3), например, место разрыва имеет вид лезвия ножа. Обе стороны лезвия параллельны двум разным сериям плоскостей скольжения; они одинаково наклонены к направлению растяжения, которое, наконец, разорвало металл пополам.

Алюминий так легко поддается деформациям, что пластинка его некоторой толщины, представляющая собой один кристалл, легко может быть согнута пальцами. Обыкновенный же алюминиевый лист очень жесток; объяснение такого различия заключается в том, что если имеется множество кристаллов, распо-

ложенных во всевозможных положениях, они способны сопротивляться и выдерживать растяжение, как бы оно ни было направлено. Крепость цепи обуславливается сопротивлением ее наиболее слабых звеньев; слабая часть кристалла есть его плоскость спайности. Это обстоятельство имеет огромное значение при обработке металлов; но оно часто так тесно связано со многими другими условиями, что очень трудно выделить только одно его влияние. При выделке стали определенного сорта приходится учитывать влияние многих факторов; но самым важным является, конечно, степень малости кристаллических зерен, из которых она состоит. Мелкозернистость и однородность зерен сообщают твердость стали и определяют ее качества.

Когда в отдельном кристалле алюминия один слой скользит вдоль другого, то можно предположить, что есть моменты, когда один слой атомов, скользя по другому, скатываясь, занимает прежнее положение: *A* проходит через *B* в *C* (фиг. 99). Как только это произошло, устанавливается опять тесное расположение атомов. Металл остается кристаллом. Как мы знаем, правильная кристаллическая структура свойственна природе вещества; таким образом вещество легко переходит от одного естественного строения к другому, приспособляясь к растягиванию, вызывающему этот переход. Без сомнения это одна из причин, и весьма важная причина, ковкости металлов.

Почему же, однако, металл часто твердеет, если его ударяют? Что делается с ним при прокатывании? Может быть мы подойдем к решению этих вопросов, если разберем, что происходит с золотом, когда его расплющивают в листы и затем нагревают. Золотые листы, как мы знаем, могут быть изготовлены очень тонкими. Они могут быть даже прозрачны, но не для всего видимого спектра; они пропускают зеленый свет. В отраженном свете они, как известно, кажутся нам желтыми. Очень любопытно, что, будучи нагреты до темнокрасного каления, они становятся совершенно прозрачными и в отраженном свете—белыми. Фарадея очень занимало это явление; он предполагал, в качестве возможного объяснения, что тонкие слои золота разрываются при накале, металл стягивается в маленькие капли, и свет проходит через образовавшиеся отверстия. Сэр Дж. Бейльби и проделал много опытов в этом направлении и значительно увеличил наши знания относительно свойств золота и других веществ,

нагреваемых таким образом. Если бы в накалинном листке действительно были отверстия, они должны были быть чрезвычайно малыми, говорит он, меньшими, чем то, что можно рассмотреть в микроскоп. Рентгеновые лучи могут, конечно, сказать нам что-нибудь по этому поводу. Исследуя с помощью их листочки золота, нашли, что они состоят из множества кубических кристаллов золота, грани которых расположены параллельно поверхности листка. Конечно нет необходимости, чтобы все они были непременно кубами. Они могут быть, как и обыкновенная поваренная соль, прямоугольными брусками разных размеров. Брусочки эти должны быть чрезвычайно тонки; их толщина, без сомнения, гораздо меньше их ширины и длины. Если листок накалишь, бруски перегруппировываются каким-нибудь образом: возможно, что они образуют скопления в некоторых местах, такие малые, что их нельзя рассмотреть в микроскоп. Возможно, что это является причиной прозрачности накалинных золотых и серебряных листочков. Мы не знаем, почему золото кажется зеленым на просвет. Зато мы узнали, что, расплющивая золото, мы заставляем все его кристаллы расположиться так, чтобы одна их грань совпала с поверхностью листка, и что нагревание разрушает правильность этой структуры. Если на прокаленный золотой листок надавливать телом, имеющим гладкую твердую поверхность, кусочком агата например, то мы возвращаем его к первоначальному состоянию; как и следовало ожидать, такое разглаживание заставляет большую часть кристаллов снова расположиться в плоскости листка. Металл в холодном и нагретом состоянии сохраняет кристаллическую структуру, но она более правильна в листке, не подвергавшемся прокаливанию. То же явление было наблюдаено и с серебром. Для того чтобы обнаружить его у меди, необходимо вести опыт в таких условиях, чтобы воздух не действовал на металл. Если медь нагревается при доступе воздуха, на ней быстро образуется слой окиси меди; это явление тоже можно проследить с помощью рентгеновых лучей. Мы часто наблюдаем на меди медленно образующееся почернение даже тогда, когда она не подвергается прокаливанью. С помощью рентгеновых лучей легко показать, что в медном листке имеется такое же расположение кристалликов, как в золотом. Напротив кусок обыкновенной меди не обнаруживает такого строения: кристаллы в нем расположены, как попало.

Увеличение твердости металлов после холодной обработки обусловлено, следовательно, отчасти тем, что они приводятся в состояние напряжения благодаря перераспределению кристаллов, обнаруженных рентгеновыми лучами; прокаливание освобождает их от состояния напряженности и разрушает образовавшееся расположение кристаллов. Почему все происходит так, а не иначе, мы не знаем: мы должны быть довольны и тем, что подвинулись все-таки немного вперед. Полезно заметить, что, вообще говоря, металл, находящийся в состоянии напряжения, гораздо охотнее вступает в химические взаимодействия, чем мы могли бы ожидать. В таком состоянии ему не так-то легко осуществить условия, необходимые для хода химической реакции.

Мы должны теперь обратиться к рассмотрению других свойств металлов, так как мы должны ожидать, что все они в большей или меньшей степени обусловлены одними и теми же причинами и должны быть изучены вместе. Два особенно замечательных свойства металлов заключаются в их способности проводить тепло и электричество. Мы все хорошо знаем, как быстро распространяется в металле теплота; мы склонны даже думать, что понятие „металл“ может быть определено этим именно свойством. Мы все знаем также, что металлы, особенно медь, употребляются в качестве проводников электрического тока.

Возвращаясь снова к нашим основным представлениям о природе атомов и об их отличиях друг от друга, мы находим в них такие свойства, которые, повидимому, способны дать нам объяснения их проводимости; несомненно также, что эта особенность металлов тесно связана с их кристаллической структурой и ковкостью.

Атомы металлов всегда имеют один или более электронов, слабо связанных с ядром. Так, например, натрий имеет одиннадцать электронов; два из них сидят очень близко к ядру, восемь других образуют весьма устойчивую систему вокруг первых двух, а последний, одиннадцатый, электрон принадлежит к наружной системе, которая заполняется постепенно, — когда мы от натрия переходим к магнию, то находим в его наружном кольце уже два электрона, у алюминия — три и т. д. Лишний электрон удерживается слабо. Если каким-нибудь образом он отрывается, то атом получает снаружи такое же устройство, как „необщительный“ атом „неона“, отличаясь от него только положительным

зарядом, который он теперь несет и который обусловлен нарушением равновесия вследствие потери одного электрона. Кристалл алюминия представляет собой совокупность шаров, подобных неону, очень тесно уложенных, как было уже сказано, и все лишние электроны более или менее свободно движутся между шарами. Можно сказать, впрочем, что такая картина, конечно, слишком груба, чтобы быть верной; структура металла должна быть гораздо сложнее и заключать в себе многое такое, чего мы еще не знаем. Все-таки мы, может быть, правы до известной степени. Мы видим, по крайней мере, почему все металлы проводят электричество: потому, что электроны — носители отрицательного электричества — двигаются в них так свободно. Когда по металлической проволоке идет ток, электроны образуют настоящий поток в металле. Любопытно, что, так как они заряжены отрицательно, они должны двигаться в направлении, противоположном тому, в котором по нашим представлениям всегда течет так называемый электрический ток. Представление о текущем потоке электричества всегда было предметом споров. Это совершенно новое открытие, что при прохождении тока в металле что-то действительно движется; и мы не должны удивляться, что действительное направление движения потока противоположно ранее предполагавшемуся.

Таким образом мы должны представлять себе, что батарея или динамо не производят электричества, но посылают в цепь потоки электронов, которые везде имеются и обладают большей или меньшей свободой движения. Точно так же двигатель на фабрике заставляет ремень непрерывно двигаться по замкнутому пути, но он не может изготовить ремень.

При нагревании металла электроны, содержащиеся в нем, начинают двигаться быстрее взад и вперед и могут даже вырваться наружу. Электроны текут непрерывным потоком с накалированной проволоки в катодных лампочках беспроволочного телефона, и это истечение необходимо для работы лампочек.

Электроны движутся в нагретом металле менее свободно, чем в холодном металле. Здесь опять легко представить себе, как это может быть. Легко видеть, что электроны встречают больше препятствий, пробираясь между атомами металла в том случае, когда вследствие нагревания самые атомы начинают колебаться, двигаться и преграждать им путь. Гораздо труднее объяснить



странное явление, открытое Камерлингом Оннесом в Лейдене и заключающееся в том, что некоторые вещества при очень сильном понижении их температуры — понижение это разное для разных металлов — совсем не оказывают сопротивления движению электронов, так что ток, раз начавшись, длится целыми днями, прежде чем ослабеет. Металл все время должен иметь чрезвычайно низкую температуру.

Присутствию электронов в металле должна быть до известной степени приписана способность металла проводить тепло так же хорошо, как электричество, потому что электроны горячего конца металлического стержня должны передать часть своей чрезмерно большой энергии электронам холодного конца.

Таким образом присутствие в металле электронов, способных двигаться с некоторой свободой между атомами, образующими металл, дает хорошее объяснение электрической и тепловой их проводимости. Конечно мы здесь нарисовали очень грубую картину; она должна быть пополнена многими деталями, и, без сомнения, многие существенно важные факты ускользнули от нас, благодаря нашему невежеству.

Вернемся теперь к вопросу о ковкости металлов и посмотрим, не поможет ли нам и здесь присутствие электронов. Мы будем представлять теперь атомы в виде сфер, заряженных положительно и очень тесно уложенных рядами; возможно, что мы не ошибаемся, думая, что электроны держат их вместе подобно цементу. Особенно важно то, что атомы связываются вместе не общим электроном, как в алмазе; они все должны отталкиваться друг от друга, будучи заряжены положительным электричеством. Они могут свободно катиться или скользить один по другому, так как они не связаны друг с другом в определенных точках, что часто наблюдается в других кристаллах. Все эти рассуждения оказываются очень полезными, когда мы говорим о скольжении одной плоскости по другой.

До сих пор мы рассматривали кристаллическую структуру и свойства нескольких металлов в чистом виде. Однако на практике мы гораздо чаще имеем дело со сплавами, чем с чистым металлом, и это потому, что сплавы имеют свои собственные весьма важные для нас свойства. Сплавы чрезвычайно интересны своим бесконечным разнообразием и широкими практическими применениями. Постоянно открывают новые их разновидности. Какое бы необычайное свойство ни требовалось

для какой-нибудь особой цели, всегда найдется сплав, более или менее удовлетворяющий предъявленным требованиям. Мы должны, конечно, попробовать найти объяснения всему этому на основании наших последних открытий. Однако мы знаем еще так мало, а фактов, требующих объяснения, так много, что за короткий срок, который прошел со времени открытия новых методов, мы могли сделать только очень немного, но зато все-таки положили начало новому объяснению фактов.

Очень часто случается, что прибавка к какому-нибудь металлу ничтожного количества другого металла или даже неметалла, вызывает заметное увеличение твердости. Чистые металлы вообще очень мягки, потому что их плоскости скольжения легко уступают внешнему воздействию. Первым из сплавов, имевшим огромное значение для развития культуры, была бронза, — сплав меди и олова, — гораздо более твердая, чем каждый из металлов в отдельности. Сплав меди и цинка дает широко применяющуюся латунь, которая имеет разные качества в зависимости от пропорции смеси. Сталь получается прибавлением к чистому железу нескольких процентов углерода. Существуют сплавы меди с алюминием, в высшей степени твердые и не разъедающиеся, но с трудом поддающиеся обработке в станке. Есть также сплав меди и никеля, не окисляющийся и легко обрабатываемый; им покрывают снаружи пули. Нейзильбер есть белый ковкий сплав, не окисляющийся; он употребляется для выделки ложек и вилок, которые потом покрываются чистым серебром при помощи гальваностегии. Сплав никеля и хрома способен выдерживать высокие температуры и потому употребляется для обмоток электрических печей. Хром, кобальт и вольфрам, сплавленные в определенной пропорции, образуют стеллит, чрезвычайно твердый не окисляющийся материал; некоторые эталоны веса Национальной Физической Лаборатории изготовлены из него. Существуют особые сплавы для выделки колоколов, очень мягкие сплавы для печатных шрифтов; есть также алюминиевая бронза, употребляющаяся в дешевых ювелирных изделиях и состоящая из алюминия с несколькими процентами меди. Этот список можно было бы продолжить, как угодно далеко, если бы в этом была необходимость.

Возьмем для примера простой случай, когда от прибавления малого количества алюминия к меди получается увеличе-

ние твердости. Исследование рентгеновыми лучами показывает, что структура кристалла меди остается той же самой, за исключением того, что то там то здесь атом алюминия занимает место атома меди. Мягкость же кристалла как мы видели, зависит от того, что одна его часть способна скользить по другой вдоль некоторой плоскости. Теперь этой плоскости уже не будет, потому что в нее вкраплены атомы алюминия, и мы легко можем предположить, что скольжение теперь будет затруднено и что в этом именно заключается причина твердости сплава.

Есть один замечательный факт, который заставляет нас считать это предположение правильным. Атомы алюминия нарушают строение медного кристалла, потому что медный кристалл может содержать только определенное число атомов. Если сплав содержит более 10 процентов алюминия, рентгеновы лучи говорят нам, что в таком сплаве медные кристаллы деформированы и образовалась новая структура. Атомы алюминия искажают кристаллы меди, и это хорошо согласуется с увеличением ее твердости. Наоборот, если прибавляется никель к меди, то атомы его замещают атомы меди в любой степени; по видимому они занимают места медных атомов, не разрушая совершенно кристалла меди. По этой причине здесь нет увеличения жесткости, как и следует ожидать. Оно наблюдается только тогда, когда мы примешиваем атомы, деформирующие кристаллы меди и делающие их плоскости скольжения неровными, следствием чего и является увеличение твердости.

В случае стали мы имеем явление такого же рода, но тут причиной затвердевания являются атомы углерода, которые здесь не замещают атомы железа, а втискиваются в пространство между ними. Легко видеть, что при этом они могут разрушить кристаллы железа и препятствовать движению их вдоль плоскостей скольжения. Здесь также существует предел для количества примеси: только несколько процентов углерода можно прибавить к железу, не нарушая его естественной структуры.

Вопрос о составе железа и стали на самом деле гораздо сложнее, чем то, что здесь о нем сказано. Стоит только подумать о том, что же произойдет, если углерода прибавлено слишком много, больше, чем в состоянии вынести структура железа не разрушаясь; мы сталкиваемся уже с новой задачей. Между прочим при этом появляются новые кристаллы, образованные молекулами, состоящими из трех атомов железа и одного

атома углерода; они называются цементитом. Новые кристаллы весьма тверды и неподатливы, по форме они напоминают иглы (фиг. 100). Их присутствие делает сталь особенно твердой и трудно поддающейся обработке. Прекрасные примеры их

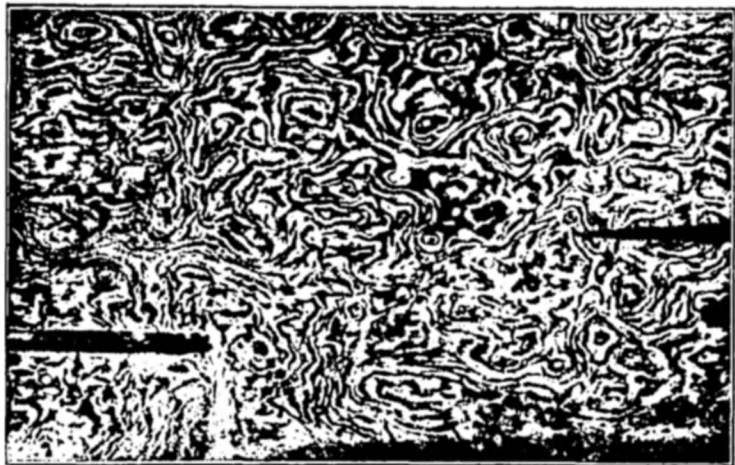


Фиг. 100. Длинные игловидные образования представляют собой кристаллы цементита, составляющие часть всей массы стали.

действия на сталь найдены в клинках старого оружия, попавшего из Индии в Европу через Дамаск. Дамасская сталь высоко ценилась за свои превосходные качества. Прекрасные образцы ее можно видеть в Уэлльской коллекции; на них виден характерный волнообразный рисунок (фиг. 101), ко-

торый всегда считался признаком подлинности оружия из Дамаска.

Исследования под микроскопом обнаружили, что волнистые линии состоят из множества точек, образующих нечто вроде млеч-



Фиг. 10г. Дамасские клинки.

ного пути на поверхности стали. Эти точки представляют собой мелкие кристаллики цементита. Как сообщил нам проф. Б е л я е в, только что изготовленная сталь чрезвычайно трудно поддается обработке. Мастер в своем горне накаливает ее докрасна, но стоит ему несколько раз постучать по ней, усилить приток воздуха в горне и слегка подавить на сталь, как это временное размягчение

прекращается. Твердость, обусловленная кристаллами цементита, была уничтожена только на время. Более сильное нагревание, больший приток воздуха — и сталь становится понемногу менее жесткой. Оказывается, что кристаллы цементита изменили свою форму. Они стали менее игольчатыми, стянулись в более закругленные крупинки, и вместе с тем сталь сделалась более гибкой. Наконец получается мелкозернистая дамаскская сталь, очень твердая и эластичная. Возможно, что острые ребра кинжалов образованы чрезвычайно твердыми частицами, вкрапленными в мягкое железо. Такое лезвие похоже на пилу с очень мелкими зубьями. Во время состязания в ловкости между Саладином и королем Ричардом, описанного Вальтер Скоттом в „Талисмане“, первый подбросил в воздухе тонкое покрывало и рассек его своим ятаганом, в доказательство своей необыкновенной силы и ловкости. Ричард, наоборот, пользуясь своим мечом как секирой, расколол пополам железный стержень — палицу одного из своих рыцарей. В этом случае также требуется сталь высоких качеств.

Шлифовка, точка и полировка представляют собой очень интересные операции. Держа нож на точильном камне, мы заставляем твердые кристаллики камня прорезывать в стали маленькие каналы, удаляя ее из них. Это одна из стадий процесса обточки. Полировка на смоченном маслом камне или на ремне есть процесс другого рода: здесь мы снимаем слои стали, заставляем течь ее частицы, сглаживая царапины и заполняя металлическими частицами наиболее глубокие из них. Металл остается все время кристаллическим; рентгеновы лучи действительно обнаруживают кристаллы в лезвиях бритв. Вероятно, тут происходит то же самое, что с накаливаемыми золотыми листочками. Масло, которое тут употребляется, облегчает процесс сглаживания. Металл приобретает напряжение благодаря процессу течения; со временем его твердость уменьшается и пропадает; нагревание особенно вредно действует на остроту лезвия (фиг. 103, 104, 105).

Сплавы вообще гораздо хуже проводят электричество, чем чистые металлы. Возможно, что если посторонние атомы втиснулись в структуру чистого металла и нарушили целостность его плоскостей, то электроны более стеснены в их движении в металле. Требуется больше энергии для того, чтобы заставить их двигаться, и сплав сильнее разогревается при прохождении тока, чем чистый металл. Для чистых металлов, как я уже

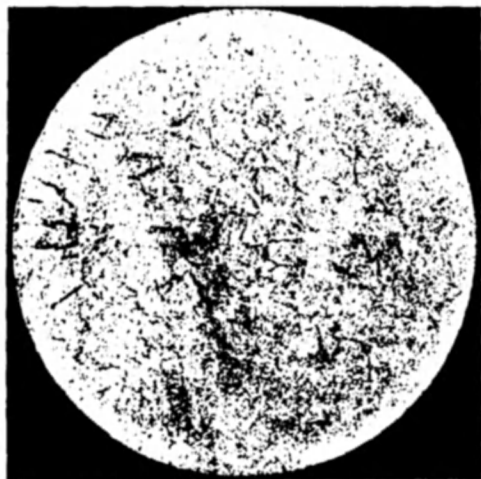


Фиг. 102. Кусок стали, увеличенный в тысячу раз; видны иглы цементита в процессе 'разрушения и окружения.



Фиг. 103. Темная полоса есть царапина, сделанная очень тонкой иголкой на полированном куске металлического зеркала, сильно увеличенная. Тонкие вертикальные царапины образованы наждачным порошком при полировке. Множество мелких частиц было оторвано и перенесено в желобок, образованный иголкой.

сказал, сопротивление движению электронов возрастает с повышением температуры. Легко можно себе представить, что электроны встречают со стороны атомов большее сопротивление, когда последние более подвижны; теплота заставляет их быстро



Фиг. 104. А—изображает часть металлического зеркала, которая после полировки тонким наждаком была отполирована кожей. Частицы металла были оторваны от царапин, образованных наждаком; это напоминает размазывание масла по хлебу. В—полировка суриком была более продолжительна; царапины от наждака исчезли, но появились очертания зерен металла.

колебаться около их положения равновесия. Но в случае сплавов теплота не может вызвать такой резкой разницы в сопротивлении движению электронов, так как движение их и без того настолько затруднено, что влияние теплоты мало заметно. Мы покажем это на следующем опыте: ток от батареи идет в цепь, образующую две ветви, как показано на рисунке (фиг. 106). В одну из них включена катушка медной проволоки  $M$  и лампа  $L_1$ , в другую — катушка, из нейзильбера например, вообще из сплава металлов, и лампа  $L_2$ . Сопротивления катушек электрическому току подобраны так, что обе лампы горят неполным накалом. Если подвести сосуд с жидким воздухом под катушку  $M$  так, чтобы она в него погрузилась, то лампа  $L_1$  ярко вспыхивает. Охлаждение медной проволоки понижает ее сопротивление движению электронов,



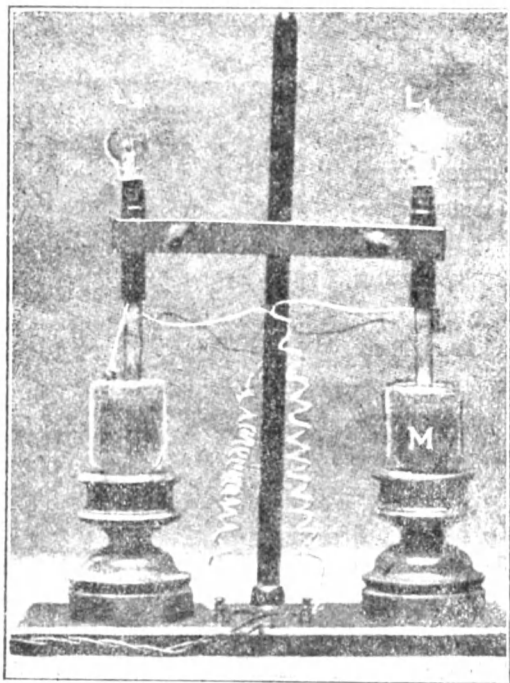
через лампу начинает течь большой ток. Но если в жидкий воздух погрузить проволоку из сплава, то никакого изменения не произойдет.

Очень часто металлы кристаллизуются в разных системах. Простейшим и наиболее наглядным примером этого может служить железо. При обыкновенной температуре атомы железа располагаются так, что каждый окружен восемью соседями. Все они лежат в вершинах маленького куба, в центре которого сидит первый атом. Это не самое плотное расположение атомов, которые мы можем найти в природе. Совокупность шаров, о которой я говорил выше, представляет собою наиболее плотное расположение атомов; в такой куче каждое ядро имеет двенадцать соседей; шесть из них касаются его по экватору, и по три остальных по меридиану в каждом полушарии, — другими словами, шесть из них принадлежат к его собственному слою, и каждая тройка из остальных — к двум ближайшим слоям. Так уложены атомы в золоте, серебре, меди и алюминии. Очень интересно, что в железе, нагретом до вишнево-красного каления, атомы меняют свое расположение и укладываются

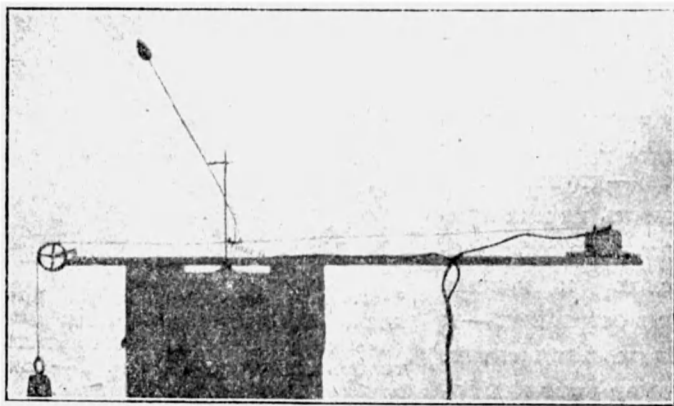


Фиг. 105. А — металл был протравлен кислотой; „текущие“ частицы были захвачены ею и унесены; зерна металла видны теперь очень отчетливо. В — опять была начата полировка.

наиболее плотно — как ядра в куче. Это очень легко заметить на кусочке железной проволоки, нагретой выше этой температуры



Фиг. 106. Сопротивление чистого металла в цепи слишком уменьшилось при погружении катушки в охлаждающую смесь.



Фиг. 107. Железная проволока натянута висящим грузом; ее удлинение и сокращение наблюдается с помощью рычажной установки. Проволока разогревается при прохождении через нее электрического тока.

и затем охлаждающейся. Когда температура ее достигает этого критического значения, атомы внезапно переходят к более свободному расположению, и проволока слегка вытягивается; изменение длины ее можно легко определить с помощью какого-нибудь чувствительного приспособления. Особенно замечательно то, что при переходе от прежней формы к новой освобождается энергия и железо внезапно раскаливается до свечения. Удлинение и свечение были замечены уже давно, но только совсем недавно удалось заметить, что группировка атомов в двух различных кристаллических формах является причиной наблюдаемого нами явления (фиг. 107).

Из всего огромного множества фактов мы привели тут только несколько примеров той тесной связи, которая существует между свойствами металла и его кристаллической структурой. Большая часть их ждет еще исследования и истолкования с помощью нашего нового помощника — рентгеновых лучей.

Мы не можем заранее сказать, к чему приведут нас наши новые пути. Мы можем быть вместе с тем твердо уверены в том, что чем лучше мы будем знать материалы, имеющиеся в нашем распоряжении, тем лучше мы сможем их использовать.

---

## ПРИЛОЖЕНИЕ.

Испробовав множество способов изготовления моделей атомной структуры и множество веществ, я нашел два, которые дают удовлетворительные результаты: шарики, изображающие атомы, надо делать из твердой зубной мастики, употребляющейся зубными врачами; она размягчается в кипятке и может принять любую форму, будучи спрессована в особо заготовленных для этого металлических формах, подобно тому как в прежние времена чинились мячи для гольфа. Шаровая форма делается из двух половинок; очень удобно при изготовлении шариков воспользоваться токарным станком.

Маленькие шарики быстро твердеют и потому могут быть приготовлены очень скоро. Большие же должны быть некоторое время оставлены в формах. Мاستику в твердом виде легко просверлить, при чем она не размягчается и не деформируется от тепла, развивающегося при просверливании. Модель, приготовленная из мастики, очень красива по виду и хорошо выдерживает обыкновенные температурные условия. Мاستика несколько дорога. Деревянные шарики можно достать гораздо дешевле.

Правда они представляют собой не такие правильные шары, как мастиковые; однако они достаточно хороши для изготовления моделей, от которых не требуется особой точности. Граммофонные иголки служат хорошим соединением для деревянных или мастиковых шаров с просверленными для них отверстиями. Отверстия должны быть просверлены правильно и в надлежащих местах. Соответствующий план расположения отверстий должен быть сделан для руководства во время работы на станке.

---

# Государственное Издательство РСФСР

МОСКВА—ЛЕНИНГРАД

## Природа и культура

Выпускаемая в свет Государственным Издательством серия книг под общим названием „Природа и культура“ имеет целью дать читателю, владеющему уже некоторой подготовкой, в доступной, но строго научной форме ясное представление о достижениях науки во всех отраслях естествознания, медицины, техники и сельского хозяйства.

Сочинения наиболее выдающихся русских и иностранных писателей должны дать яркое представление о том, как человек проникает в строение и механизм мертвой и живой природы, овладевает ее законами и налагает на нее яркий отпечаток культуры.

Аккерет.—Роторный корабль. Перевод под ред. А. А. Фридман. Ц. 80 к.

Арениус, Св.—Химия и современная жизнь. Ц. 2 р. 25 к.

Аскания-Нова.—Сборник статей, под ред. М. М. Завадовского и Б. К. Фортунатова. Стр. 376 + VIII. Ц. 3 р. 50 к.

Брагг, В. Г.—О природе вещей. Перев. под ред. Г. В. Вульфа. Ц. 1 р. 75 к.

Его же.—Мир звуков. Перев. под ред. Э. В. Шпольского. (Печ.)

Гольдшмидт, Р.—Аскарида. Перев. С. Л. Соболя. Ц. 3 р. 50 к.

Грец, Л.—Эфир и теория относительности. Перев. под редакцией Н. Н. Андреева. Ц. 1 р. 35 к.

Джедд, Дж.—Возникновение и развитие идеи эволюции. Перев. с англ., под ред. Н. Бобринского. Ц. 80 к.

Каммерер, П.—Смерть и бессмертие. Перев. под ред. С. Л. Соболя. Ц. 1 р. 10 к.

Кис, А.—Человеческое тело. Перев. под ред. В. Н. Терновского. Ц. 1 р. 20 к.

Крамере, Г. А. и Гольст, Г.—Строение атома и теория Бора. Перев. под ред. С. И. Вавилова. Ц. 1 р. 50 к.

Кресси, Э.—Современная машина. Перевод М. С. Горфинкеля. Ц. 2 р. 50 к.

Лазарев, П. П.—Курская магнитная аномалия. Ц. 60 к.

Максвелл, К.—Материя и движение. С прим. и дополнениями Дж. Лармора. Ц. 1 р. 20 к.

Де Морган, Ж.—Доисторическое человечество. Перевод В. Н. Худачова с предисловием проф. В. А. Городцова. Ц. 2 р. 75 к.

Павлов, А. П.—Природа землетрясений и землетрясения в Японии. Стр. 102. Ц. 90 к.

Планк, М.—Физические очерки. Перев. Л. Я. Штрума. Ц. 1 р. 40 к.

Сведберг, Т.—Материя, ее исследования в прошлом и настоящем.

Перев. с нем. под ред. А. Н. Фрумкина. Ц. 1 р.

Сведберг, Т.—Вырождение энергии. Перев. под ред. Н. П. Кастерина. (Печ.)

Содди, Ф.—Радий и строение атома. Перев. с поел. англ. изд., под ред. Н. А. Шиловой. Стр. 256 + VIII. Ц. 2 р. 60 к.

Флемминг.—Волны в воде, воздухе и эфире. (Печ.)

Хаустен.—Свет и цвета. (Печ.)

Юнг, Я.—Солнце. Перев. под ред. и с доп. акад. А. А. Белопольского. Стр. 232 + VIII. Ц. 1 р. 50 к.