

ШКОЛЬНИКУ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТА

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ХИМИЯ

Выращиваем
кристаллы

Сколько
в апельсине
витамина С?

Анализ в
эмалированной
кружке

«РОСМЭН»

Тайна туринской
плащаницы

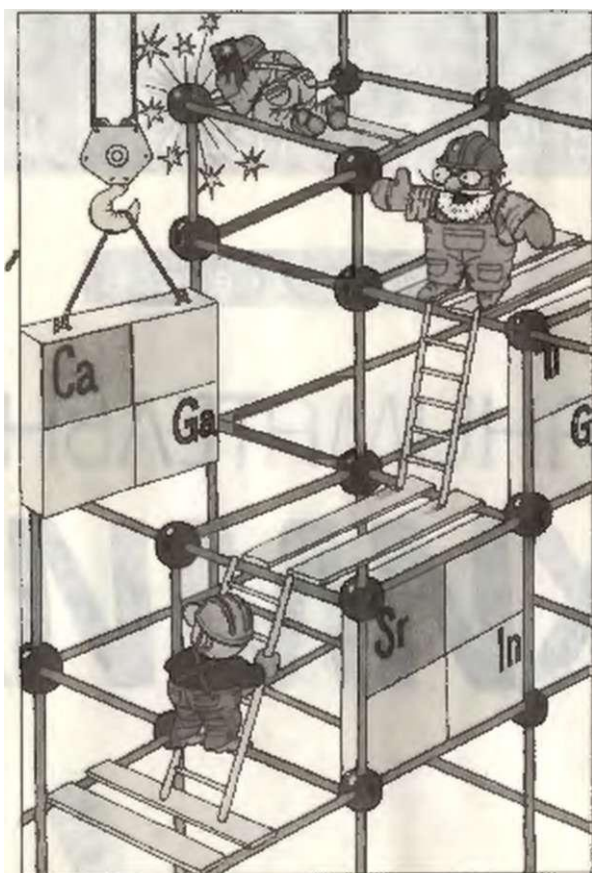
ШКОЛЬНИКУ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТА

Илья Леенсон

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ХИМИЯ



МОСКВА «РОСМЭН» 2000



Оформление серии А. Ефремова
Художник М. Хавторин

Леенсон И. А.

Л33 Занимательная химия/ Оформл. серии А. Ефремова; Художн. М. Хавторин. — Переизд. — М.: РОСМЭН, 2000. — 104 с. — (Школьнику для развития интеллекта).

Эта книга написана для всех, кто интересуется химией. Даже если вы еще не начали изучать, ее в школе, вы поймете почти все, о чем здесь написано. Если же в химии вы не новичок, вы тоже найдете много интересного и нового для себя.

ISBN 5—257—00918—8

© Издательский дом «РОСМЭН», 1999

© Оформление. Издательский дом «Росмэн», 2000

ВМЕСТО ПРЕДИСЛОВИЯ

В прошлом столетии многие ученые, особенно физики, всерьез полагали, будто все основные открытия в науке уже сделаны. Они искренне жалели своих преемников, ученых XX в., на долю которых, по их мнению, останутся лишь небольшие уточнения. Вот какой случай был с выдающимся немецким физиком, лауреатом Нобелевской премии Максом Планком — именно он «изобрел» в 1900 г. кванты, которые породили массу новых, «квантовых» наук, в том числе и квантовую химию. Еще совсем молодой, Планк пришел к семидесятилетнему профессору Мюнхенского университета Ф. Жолли и сказал, что хотел бы посвятить себя теоретической физике. В ответ он услышал неожиданную отповедь: «Молодой человек! Зачем вы хотите испортить себе жизнь? Ведь здание теоретической физики уже в основном завершено! Стоит ли браться за такое бесперспективное дело?»

Совершенно иначе смотрят на эту проблему современные ученые. В предисловии к одной из книг по химии написано:

«Далеким от науки люди часто полагают, что раз уж существует какая-либо солидная наука, то уж конечно зиждется она на прочном и основательном фундаменте; дело нынешнего поколения — постройка очередного этажа, поскольку все остальное здание уже построено. Однако ни один исследователь так не думает. Более того, именно в фундаменте науки часто обнаруживаются серьезные недоделки, возникает необходимость существенной перестройки основных, опорных представлений. Исследования, направленные на совершенствование этих представлений, и называют фундаментальными — не за объем, а именно за направленность».

Автор другой книги по химии, хотя и смотрит на ту же проблему несколько иначе, фактически говорит о том же:

«Вот человек трудится всю жизнь. Творение вырастает во всей красе. Проходят годы. Увенчанный лаврами строитель, может быть, еще жив. Но сооружение уже кажется уродливым и никчемным. Приходят другие люди с отбойными молотками. Монолит теории превращается в гранитную крошку, и пыль застилает все вокруг. На освободившемся месте возводится нечто воздушное из стекла и металла. Может быть, и это чудо техники обречено на слом. Кто знает? Но оно прекрасно и необходимо — сейчас... И фасад, и внутренняя планировка "здания науки" непрерывно меняются. И как надежда на совершенство, неизбежно стоят фундаментальные теории, творения великих мастеров».

К таким фундаментальным теориям, без сомнения, можно отнести периодический закон, открытый Д. И. Менделеевым в 1869 г. Автор писал о нем в конце своей жизни: «По-видимому, периодическому закону будущее не грозит разрушением, а только надстройкой и развитием обещается». Так оно и случилось.

Современную науку, в том числе и химию, можно представить не только как бесконечно строящееся здание, но и в виде красочной мозаики, над которой в разных местах трудится множество мастеров. Кто-то начищает свое небольшое стеклышко до блеска и занимается этим всю жизнь; а иногда над одним стеклышком трудится сразу несколько человек, они могут быть даже незнакомы друг с другом и говорить на разных языках. Кто-то заменяет старые, покрытые пылью и потускневшие детали на новенькие, только что изготовленные в своей лаборатории, или же встраивает их на «пустые места». А кто-то скептически оглядывает всю картину и пытается советовать другим, что и как нужно делать. В общем, жизнь в мастерской бьет ключом, и каждый может найти себе в химии дело по душе.

Эта книжка познакомит вас лишь с некоторыми «стеклышками» из огромной «химической мозаики». Одни из них появились сравнительно недавно, при жизни нынешнего поколения. Другим много веков. Это те самые фундаментальные химические понятия, которые не будут уничтожены со временем.

Даже еще не начав изучать химию в школе, вы поймете почти все, о чем тут написано. В книге нет химических формул, которые обычно путают новичков, а если вы в химии не новичок и любите ее, то тоже найдете здесь для себя много нового и интересного. Если же у вас есть склонность к экспериментированию и вам хочется все проверить, что называется, собственными руками — эта книжка поможет вам провести некоторые не очень сложные опыты. Недаром говорят, что лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать, к химии это относится особенно. Ведь химия — наука прежде всего экспериментальная, построенная на опытах (по крайней мере, такой она была последние двести лет). И в ней особенно важно проделать своими руками хотя бы некоторые, самые простые, опыты, увидеть их результаты и постараться понять, почему наблюдается именно данное явление, а не какое-либо другое. Понять же это вам будет гораздо легче, чем ученым прошлого: сейчас при объяснении того или иного явления мы можем опираться на факты и теории, установленные многими поколениями ученых. В память о них английский химик Дж. У. Меллор, автор 16-томной энциклопедии по неорганической химии, еще в 1922 г. с признательностью написал на титульном листе своего труда: «Посвящается рядовым огромной армии химиков. Их имена забыты, их работы остались...»

ХИМИКИ ИЗМЕРЯЮТ

Измерения массы и объема

Работа современного химика немыслима без самых разнообразных измерений. И одно из важнейших среди них — взвешивание. Поэтому уже в первых химических лабораториях всегда были весы (рис. 1).

Их изобрели очень давно. Еще в античные времена считалось, что весы даны людям богами. Археологи при раскопках Древнего Вавилона не раз находили каменные изделия правильной геометрической формы, иногда похожие на фигурки животных. Оказалось, что это древние гири, которым больше 4,5 тыс. лет! На каждой гире указан ее вес. Гиря массой (в современных единицах) почти 0,5 кг (точнее, 491 г) служила единицей измерения. Другие гири были еще тяжелее. С их помощью удобно было взвешивать зерно и другую сельскохозяйственную продукцию. Интересно, что древневавилонская единица массы почти в неизменном виде дошла до средневековой Европы. В старинном французском фунте было 489,5 г, в голландском — 492,2 г, в немецком (ганноверском) — 489,6 г. В США до сих пор широко пользуются фунтом, который, впрочем, немного полегче: 453,6 г. Еще легче был фунт в дореволюционной России — всего 409,5 г.

Сейчас все ученые, в том числе и химики, пользуются метрической системой мер, в которой массу выражают в килограммах, граммах и

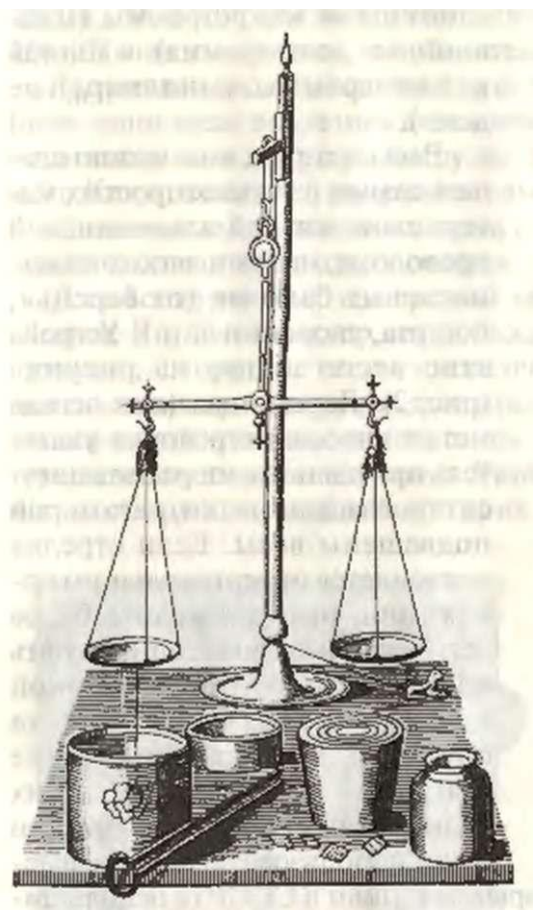


Рис. 1. Весы Роберта Бойля. Клевой чашке весов привязана нитка — для взвешивания предметов, погруженных в жидкость.

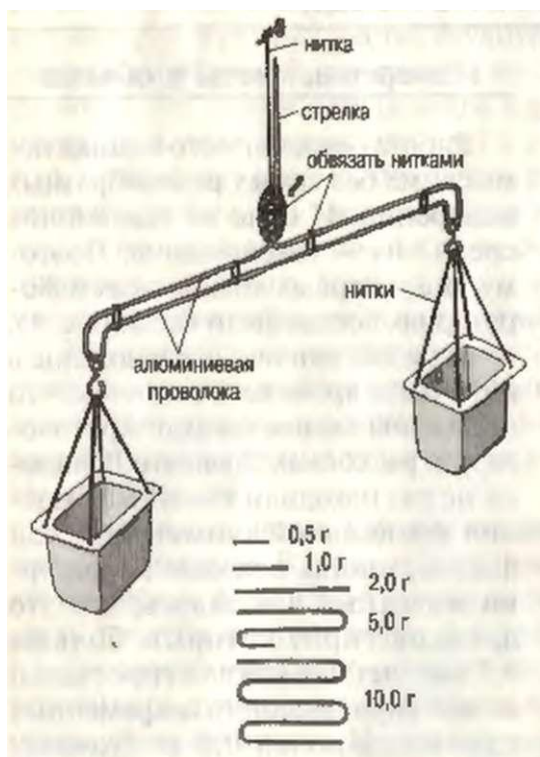


Рис. 2. Самодельные весы и разновесы к ним

миллиграммах. В особых случаях используют еще более мелкие единицы — микрограммы (миллионные доли грамма), а иногда и наногаммы (миллиардные доли).

Весы и гири к ним можно сделать самым из самых простых материалов: мягкой алюминиевой проволоки, ниток и легких пластмассовых баночек (от варенья, йогурта, творога и т. п.). Устройство весов видно из рисунка (рис. 2). Деревянная (или легкая металлическая) стрелочка-указатель при равновесии располагается строго вдоль нитки, на которой подвешены весы. Если стрелка отклоняется от вертикального положения, надо утяжелить более легкое коромысло весов: намотать на нее немного тонкой медной проволоки так, чтобы стрелка оказалась вертикальной. А где взять гири (химики называют их разновесами)? Раньше можно было использовать так называемые

«медные» монеты — медяки, которые чеканили в СССР (с небольшими перерывами) с 1926 по 1991 г. Копейка весила ровно 1 г (конечно, если она не очень стерлась), двухкопеечная монета — 2 г, трехкопеечная — 3 г, пятак — 5 г. Если в вашей семье сохранилось хотя бы несколько разных медяков, сделайте себе из них набор разновесов. Вам понадобится алюминиевая проволока подходящего диаметра и кусачки.

В одну чашку весов положите копейку, а в другую — кусочек проволоки весом больше 1 г. Осторожно откусывая от проволоки по маленькому кусочку, добейтесь, чтобы весы пришли в равновесие. Так же сделайте две гири по 2 г. Для противовеса возьмите либо старую двухкопеечную монету (с ее помощью прежде можно было позвонить по телефону-автомату), либо современную российскую 10-копеечную монету — она тоже весит ровно 2 г. К сожалению, вес большинства современных монет не «круглый». Например, 1 копейка равна 1,5 г, 5 копеек — 2,5 г, 1 рубль — 3,3 г.

Вас может заинтересовать, почему двухграммовых гирек должно быть две. Потому что стандартный набор гирь-разновесов таков; 1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50, 100 г. Он позволяет взвесить любой предмет массой от 1 до 210 г. Начав взвешивать, вы убедитесь, что такой набор — самый удобный.

Теперь для вас не составит труда сделать гири по 5, 10 и 20 г (2 штуки!). Если ваши весы оказались достаточно чувствительными и стрелка заметно отклоняется даже при нагрузке 1 г, попробуйте изготовить гирьки по 0,5 г. Как это сделать, подумайте сами.

С помощью самодельных весов и гирь мы с вами в дальнейшем проведем несколько интересных опытов.

Для более точных измерений химики пользуются аналитическими весами. Когда-то мастер делал каждый экземпляр аналитических весов вручную, и хорошие весы стоили очень дорого. Уже в начале XIX в. точность самых лучших весов достигала 0,001 г (или 1 мг). Однако похвастаться такими весами могли лишь немногие химики. Даже у знаменитого шведского химика Йенса Якоба Берцелиуса в молодые годы была плохо оборудованная лаборатория с довольно грубыми весами, и по-

этому, чтобы получить надежные результаты, ему приходилось повторять один и тот же анализ по 20—30 раз! За 10 лет Берцелиус опубликовал результаты анализа 2000 соединений, образованных 43 элементами, — труд, который он затратил на эту колоссальную работу, превосходит всякое воображение. Спустя почти столетие другой знаменитый химик, один из первых лауреатов Нобелевской премии по химии Вильгельм Оствальд, увидев в музее оборудование, с которым работал Берцелиус, сказал: «Мне стало совершенно ясно, как мало зависит от прибора и как много — от человека, который перед ним сидит». Эти слова полностью справедливы и сегодня.

Со временем весы совершенствовались, и через несколько десятилетий уже каждый химик мог взвешивать несколько граммов вещества с точностью 0,0001 г (рис. 3).

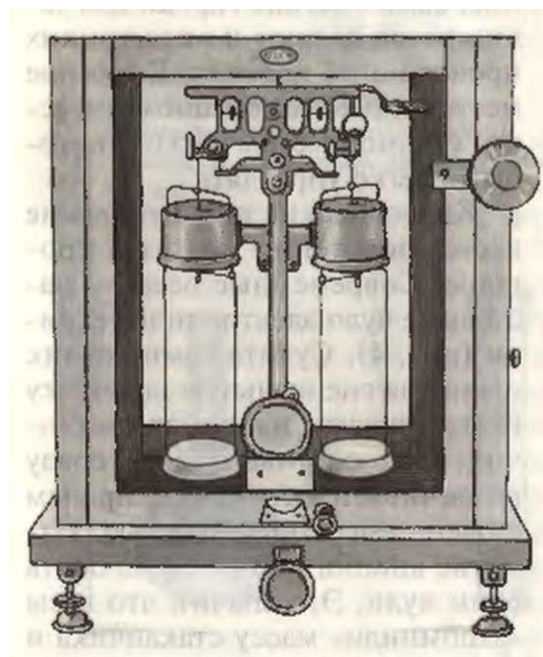


Рис. 3. Такие аналитические весы до сих пор можно встретить во многих лабораториях. Два больших цилиндра над чашками весов это демпферы, назначение которых быстро «успокоить» качание весов.

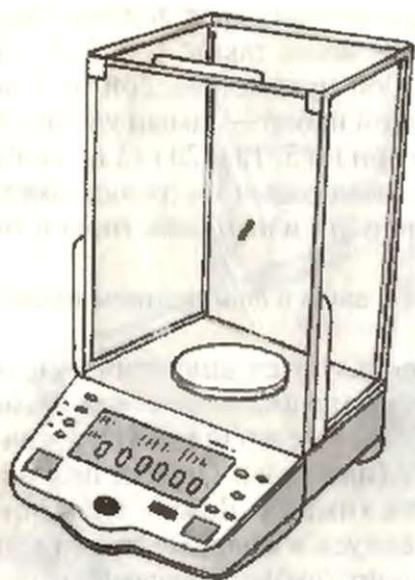


Рис. 4. Так выглядят электронные весы.

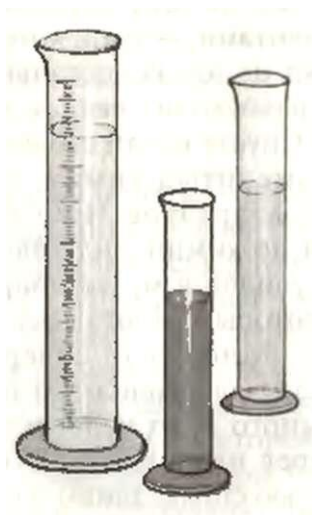


Рис. 5. Цилиндры с делениями для измерения объема жидкостей

Гири для аналитических весов должны быть очень точными. Поскольку коррозия может изменить массу гирь на несколько миллиграммов (а это совершенно недопустимо), их покрывают тонким слоем золота. А чтобы гири не пачкались, при взвешивании их разрешается брать только специальным пинцетом. Точное взвешивание на аналитических весах — дело долгое и кропотливое. Даже малейшее движение воздуха в комнате влияет на их показания, поэтому механизм помещают в шкафчик со стеклянными дверцами. Чтобы облегчить взвешивание, самые легкие гирьки для таких весов делают в виде тонких проволочных колечек. В нужное место их помещают автоматически, с помощью рычажков, которыми легко управлять.

Классические аналитические весы постепенно уходят в прошлое. Современные весы — настоящее чудо электронной техники (рис. 4). Судите сами: химик ставит на специальную подставку пустую посуду, например стаканчик, и на световом табло сразу высвечивается его масса, причем с очень высокой точностью. Нажатие кнопки — и на табло опять одни нули. Это значит, что весы «запомнили» массу стаканчика и будут автоматически ее учитывать, когда в стаканчик поместят взвешиваемое вещество. Электронные весы очень экономят время: на взвешивание вместо минут уходят секунды. А их точность может

Рис. 6. Бюретка с краном, которой пользовались в середине XIX в.; оно не очень сильно отличается от современной.

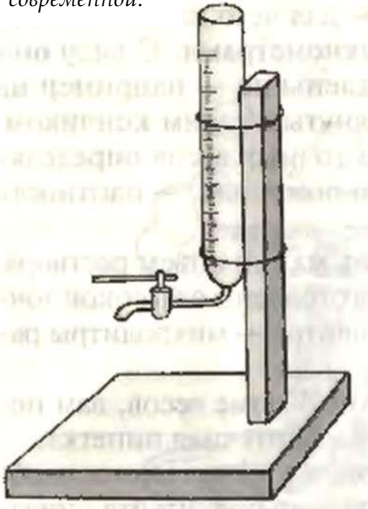


Рис. 7. Мерные пипетка и колба.

Чтобы повысить точность измерения, на них указывают температуру, при которой объем раствора точно равен начертанному на колбе.

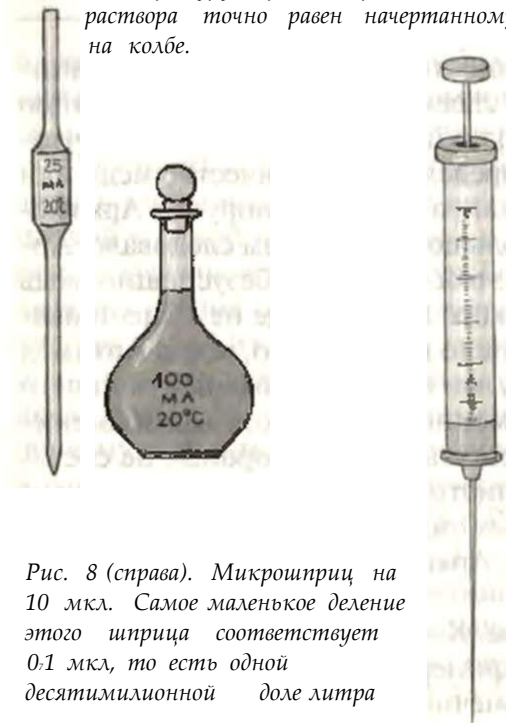


Рис. 8 (справа). Микрошприц на 10 мкл. Самое маленькое деление этого шприца соответствует 0,1 мкл, то есть одной десятимилионной доле литра

быть необыкновенной: на некоторых электронных весах можно определить массу маленькой точки, которая поставлена авторучкой на листке бумаги!

Когда химики работают с жидкостями, например с водными растворами, они обычно определяют не массу, а объем раствора. И в этом случае приборы для определения объема могут быть самыми разными и совершенно непохожими друг на друга: все зависит от объема раствора и точности измерения. Вы, возможно, видели аптечные склянки с делениями, которые показывают объем налитой жидкости. Химики для этих целей пользуются мерными стаканами или цилиндрами (рис. 5). Цилиндры бывают огромные, на несколько литров, но точность их невелика — 50 или 100 мл. Бывают и маленькие — на 5–10 мл, с делениями через 0,5 мл или даже меньше. Еще точнее можно измерить объем раствора бюреткой — длинной стеклянной трубкой с краником внизу (рис. 6). На стенках бюретки нанесены деления, позволяющие определить объем раствора с точностью 0,1 мл или даже точнее.

Довольно часто, например при выполнении химических анализов, химикам приходится подготавливать с большой точностью определенный объем раствора — например 25, 100 или 500 мл. Для этого хороши мерные колбы или пипетки. В их верхней части на стекло нанесена черточка — рис-

ка, до которой необходимо наливать раствор: тогда его объем будет известен с высокой точностью (рис. 7). Иногда химикам нужно объединить обе операции — взвешивание раствора и определение его объема. Делают это, чтобы определить плотность раствора — для чего надо его массу разделить на объем. Плотность определяют пикнометрами. С виду они такие же, как мерные колбы, только очень маленькие — например на 1 мл. Наполняют пикнометры пипеткой с оттянутым узким кончиком. Сначала с помощью дистиллированной воды и точных весов определяют объем самого пикнометра, а затем, уже с его помощью, — плотность любой жидкости.

Бывает, что необходимо точно отмерить очень малый объем раствора. Тогда используют микрошприцы (рис. 8). Они изготовлены с высокой точностью и позволяют отмерять миллионные доли литра — микролитры раствора (отсюда и название шприцев).

А теперь самое время заняться экспериментом. Кроме весов, вам понадобятся самые простые вещи, например обычная аптечная пипетка.

Но прежде чем приступить к опытам, подготовьте рабочее место, необходимую посуду и оборудование, а также внимательно прочитайте описание опыта, чтобы вы ясно понимали, что и зачем делаете.

Измеряем плотность метила

Один из самых великих ученых древности Архимед был родственником царя Гиерона. Как-то царь заказал своему ювелиру сделать золотую корону. Чистое золото слишком мягкое, поэтому в золотые изделия, чтобы придать им твердость, добавляют определенное количество меди или серебра. Гиерон, подозревая своего ювелира в обмане, поручил Архимеду доказать, что в корону подмешано больше серебра, чем следовало. Архимед долго размышлял над решением этой задачи, но безуспешно: ведь в те времена никаких методов химического анализа еще не существовало. Предание говорит, что решение пришло неожиданно, когда Архимед принимал ванну: он обратил внимание, что его тело в воде почти ничего не весит. Так это было или иначе, но именно Архимед открыл знаменитый закон, носящий его имя. Теперь решить задачу с короной не составило труда; ученый знал плотность и чистого золота (по современным данным — $19,3 \text{ г/см}^3$, это один из самых тяжелых металлов), и серебра ($10,5 \text{ г/см}^3$). Измерив плотность короны, Архимед вычислил долю серебра в сплаве.

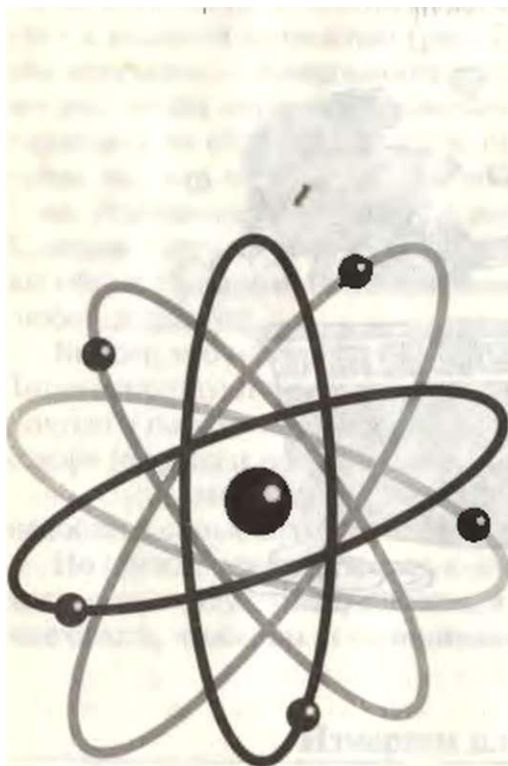
Попробуем повторить опыт Архимеда. Конечно, мы возьмем не золотую корону, а что-нибудь попроще, например старую серебряную ложку. А действительно ли она серебряная? Конечно, если сохранилось клеймо,



на котором указана проба серебра, никаких измерений не нужно. Но если оно не сохранилось или на нем ничего нельзя разобрать даже в лупу? Тут-то и пригодится способ, придуманный Архимедом.

Плотность — это отношение массы к объему. Массу ложки легко определить взвешиванием. А как найти ее объем? Привяжите ложку тонкой ниткой к одной из чашек весов и взвесьте ее. Затем повторите взвешивание, аккуратно опустив ложку в большую банку с водой так, чтобы она не касалась стенок (подобные измерения плотности проводил еще Р. Бойль, как это видно из рис. 1). По закону Архимеда, ложка стала весить меньше — ровно на столько, сколько весит вода, вытесненная ложкой. Плотность воды при комнатной температуре почти не отличается от 1 г/см^3 поэтому разность двух взвешиваний ложки — в воздухе и в воде — как раз и равна объему ложки в кубических сантиметрах. К примеру, на воздухе ложка весит 89 г, а в воде — 78 г. Разность даст вам объем ложки — 11 см^3 . Плотность ложки равна: $89 \text{ г} : 11 \text{ см}^3 = 8,1 \text{ г/см}^3$ (после округления до двух значащих цифр, ведь взвешивание не очень точное). Значит, ложка не серебряная, а, скорее всего, стальная.

Таким же способом можно определить и многие другие металлы, например свинец (плотность $11,3 \text{ г/см}^3$) или олово (плотность $7,29 \text{ г/см}^3$).



Измеряем диаметр атома

Неужели это возможно в домашних условиях? Вполне возможно, только надо кое-что знать. Например, что атомы многих металлов можно представить себе в виде маленьких, плотно упакованных шариков. В таком случае атомы-шарики занимают 74% всего пространства, а остальные 26% приходятся на пустоты между ними. Еще надо знать, как связаны объем шара (v) и его диаметр (d) — эту формулу можно найти в учебнике или в справочнике по математике: $v = \pi d^3/6$, где $\pi = 3,14$. Наконец, надо знать очень важную для химии величину, которая называется постоянной Авогадро (N_A) — в честь итальянского ученого Амедео Авогадро (1776—1856). Эта константа показывает, сколько частиц — атомов, ионов или молекул — содержится в одном моле вещества.

Моль — очень удобная для химиков единица измерения, так как в одном моле любого вещества содержится одинаковое число частиц. На-

пример, 1 моль воды (18 г), или 1 моль сахара (343 г), или 1 моль кислорода (32 г) содержат одинаковое количество молекул, равное $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$. Ровно столько же атомов содержит 1 моль алюминия (27 г), или 1 моль меди (64 г), или 1 моль серебра (108 г). А 1 моль поваренной соли (55,5 г) содержит по $6,02 \cdot 10^{23}$ положительно заряженных ионов (катионов) натрия и отрицательно заряженных ионов (анионов) хлора. Понятие «моль» (раньше его называли «грамм-молекулой», «химическим паем») удобно тем, что им можно пользоваться и не зная точного значения постоянной Авогадро, так как вещества реагируют друг с другом в соответствии с числом молей в них. Постоянная Авогадро — огромное число, с трудом поддающееся воображению; оно, к примеру, в 4 миллиарда раз больше, чем число миллиметров от Земли до Солнца! Это означает, что атомы и молекулы очень маленькие, раз их помещается так много в сравнительно небольшом количестве вещества.

О том, как ученые определили это огромное число, мы еще поговорим, а пока вернемся к нашей ложке. Итак, пусть в предыдущем опыте вам повезло и ложка оказалась из серебра высокой пробы с плотностью $10,5 \text{ г/см}^3$. Теперь у вас есть все данные, чтобы определить размер «серебряного атома». В 1 см^3 серебра содержится $10,5 \text{ г} : 108 \text{ г/моль} = 0,097$ моля или $0,097 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 5,84 \cdot 10^{22}$ атомов серебра. Если не считать пустоты между атомами, то на долю самих атомов-шариков придется не 1 см^3 , а немного меньше — $0,74 \text{ см}^3$. Значит, объем одного атома равен $0,74 : 5,84 \cdot 10^{22} = 1,27 \cdot 10^{-23} \text{ см}^3$. Осталось только рассчитать по приведенной выше формуле диаметр атома серебра. Он получился очень маленьким; $d = 3 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, или $0,3 \text{ нм}$ (нанометр — одна миллиардная часть метра — самая подходящая единица для измерения таких малых величин).

Размеры всех атомов чрезвычайно малы. Цепочка из миллиона атомов серебра, плотно уложенных друг к другу, протянется всего на 3 см . Для сравнения: если уложить в цепочку миллион маковых зернышек диаметром 1 мм , то она протянется на 1 км ! Из-за малости атомов их невозможно увидеть даже в самый сильный оптический микроскоп. Зато ученые придумали другие приборы, позволяющие получать изображения отдельных атомов.

Примерно таких же размеров, как атом серебра, и некрупные молекулы — кислорода, азота, метана, воды. Во всех них входит по несколько небольших атомов. Бывают молекулы, которые значительно крупнее: они содержат много атомов или атомы больших размеров (например, атомы йода). Сейчас мы познакомимся с одним из методов измерения размера молекул.

Измеряем длину молекулы

Конечно, непосредственно измерить такую малую частичку вещества мы не сможем. Как и в предыдущем случае, мы проведем опыт, из которого простыми расчетами можно определить размер молекул. Вы, конечно, видели на поверхности воды тонкие цветные пленки от нефтепродуктов (смазочных масел, дизельного топлива и т. п.). Цвет этих пленок возникает из-за отражения света от верхней и нижней поверхности пленки — такое явление называется интерференцией света. По той же причине переливаются всеми цветами радуги мыльные пузыри. Явление интерференции вы будете изучать на уроках физики. А сейчас нас с вами интересует толщина пленки — вы никогда не задумывались, насколько она тонкая?

Определить толщину пленки очень просто: надо ее объем разделить на площадь поверхности. Если капнуть на воду одну каплю машинного масла, получится круглая пленка диаметром около 20 см — значит, ее пло-

щадь равна примерно 300 см^2 . Объем одной капли — около $0,03 \text{ см}^3$. Следовательно, толщина пленки $0,03 : 300 = 0,0001 \text{ см} = 0,001 \text{ мм} = 1 \text{ мкм}$. Тысячная доля миллиметра — это очень малая величина. Не во всякий микроскоп разглядишь частичку такого размера!

Но есть ли у нас гарантия, что молекулы машинного масла растеклись по воде в один слой? Ведь только в этом случае толщина пленки будет соответствовать размеру молекул.

Такой гарантии у нас нет, и вот почему. Молекулы, входящие в состав машинного масла, называют гидрофобными (в переводе с греческого — «боящиеся воды»), Они довольно хорошо «сцепляются» между собой, но избегают попадать в окружение молекул воды. Если вещество, подобное машинному маслу, налить на поверхность воды, оно образует на ней довольно толстую (по молекулярным меркам) пленку, состоящую из сотен и даже тысяч слоев молекул. Подобные расчеты, любопытные и сами по себе, имеют большое практическое значение. К примеру, пока еще не удастся избежать аварий огромных танкеров, перевозящих нефть. В результате в море может вылиться огромное количество нефти, что губительно скажется на живых организмах. Нефть более вязкая по сравнению с машинным маслом, поэтому ее пленка на водной поверхности может оказаться несколько толще. Толщина пленки зависит как от сорта нефти, так и от температуры воды: в холодных морях, где нефть гуще, пленка будет толще, а в теплых, где нефть менее вязкая, пленка тоньше. Но в любом случае авария большого танкера, когда в море попадают десятки тысяч тонн нефти, — это катастрофа. Ведь если вся пролитая нефть растечется тонким слоем, то образуется пятно огромной площади, и ликвидировать такую пленку чрезвычайно трудно.

А можно ли заставить вещество растекаться по воде так, чтобы образовался всего один слой молекул (такая пленка называется мономолекулярной)? Оказывается — да, только вместо машинного масла или нефти надо взять другое вещество. Молекулы такого вещества должны иметь на одном конце так называемую гидрофильную (то есть «водолюбивую») группу атомов, а на другом — гидрофобную. Что будет, если вещество, состоящее из таких молекул, поместить на поверхность воды? Гидрофильная часть молекул, стремясь раствориться в воде, станет тянуть их в воду, а гидрофобная, которая воды «боится», — упорно не желать контактов с водой. В результате такого взаимного «непонимания» молекулы (если их слегка «поджать» сбоку с помощью планочки) выстроятся на поверхности воды так, как показано на рис. 9; их гидрофильные концы утоплены в воду, а гидрофобные торчат наружу.

Вещества, которые ведут себя таким образом, называют поверхностно-активными. К ним, например, относятся; мыло и другие моющие средства; олеиновая кислота, входящая в состав подсолнечного масла; паль-

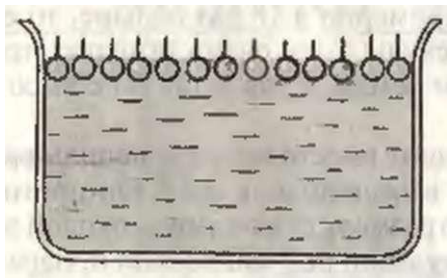


Рис. 9. Так ориентируются на границе вода — воздух, молекулы поверхностно-активных веществ, образуя «часток Лэнгмюра» — но имени американского физика и химика, который в 1916 г. создал теорию строения тонких слоев на поверхности жидкостей.

митиновый (другое название — дециловый) спирт, который входит в состав пальмового масла и китового жира. Такие вещества растекаются по поверхности воды гораздо более тонкими пленками, чем машинное масло. ЭТО явление было известно давно, подобные опыты проводили еще в XVIII в. Однако лишь в начале XX столетия английский физик У. Рэлей показал, что толщина слоя пленки достигает величины, соответствующей размерам отдельных молекул.

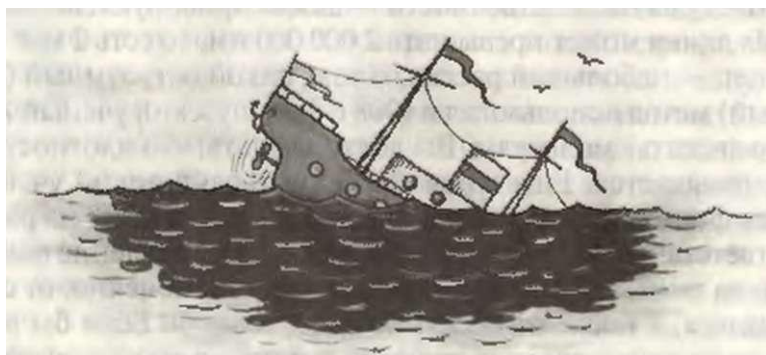
В одном из таких опытов английский химик Адам в 1922 г. наблюдал образование на поверхности воды пленок пальмитинового спирта. Оказалось, что очень маленькое его количество — всего 0,052 г — дает пленку площадью 193 см². Так как плотность пальмитинового спирта равна 0,818 г/см³, то объем пленки составляет $6,36 \cdot 10^{-5}$ см³ при толщине всего лишь $6,36 \cdot 10^{-5} : 193 = 3,3 \cdot 10^{-7}$ см, или 3,3 нм. Значит, молекула децилового спирта по длине примерно в 10 раз больше молекулы кислорода.

Размеры большинства молекул и ионов знакомых нам веществ — порядка 1 нм. Так, диаметр молекулы водорода равен примерно 0,2 нм, йода — 0,5 нм, этилового спирта — 0,4 нм; радиус ионов алюминия — 0,06 нм, натрия — 0,10 нм, калия — 0,13 нм, хлора — 0,18 нм, йода — 0,22 нм. Но есть среди молекул и гиганты, размеры которых по молекулярным меркам поистине астрономические. Так, в ядрах клеток высших животных и растений находятся молекулы наследственности — дезоксирибонуклеиновые кислоты (ДНК). Их длина может превышать 2 000 000 нм, то есть 2 мм!

А под конец — небольшой рассказ о том, какой остроумный (хотя и не самый точный) метод использовал в 1908 г. французский ученый Жан Перрен, чтобы «взвесить» молекулы. Вы должны знать, что плотность воздуха с высотой уменьшается. Еще в начале XIX в. французский ученый Пьер Лаплас вывел формулу, позволяющую рассчитать давление на разных высотах. В соответствии с этой формулой атмосферное давление падает вдвое при подъеме на каждые 6 км. Это значение зависит, конечно, от силы земного притяжения, а также от массы молекул воздуха. Если бы воздух состоял не из азота и кислорода, а из очень легких молекул водорода (они в

16 раз легче молекул кислорода), то падение атмосферного давления вдвое наблюдалось бы на высоте не 6 км, а примерно в 16 раз больше, то есть около 100 км. И наоборот, если бы молекулы были очень тяжелые, атмосфера была бы «прижата» к поверхности Земли, и давление бы с высотой быстро падало.

Рассуждая таким образом, Перрен решил вместо молекул использовать крошечные шарики краски гуммигута, взвешенные в воде. Он приготовил взвесь (эмульсию) с одинаковыми по размеру шариками — около 1 мкм в диаметре. Затем поместил капельку эмульсии под микроскоп и, перемещая винтом микроскоп по вертикали, стал считать количество шариков гуммигута на разных высотах. Оказалось, что формула Лапласа вполне применима и к эмульсиям; при подъеме на каждые 6 мкм число шариков в поле зрения уменьшалось в два раза. Поскольку 6 км ровно в миллиард раз больше 6 мкм, Перрен сделал вывод, что молекулы кислорода и азота во столько же раз легче шариков гуммигута (а их массу уже можно определить экспериментально).



ХИМИКИ АНАЛИЗИРУЮТ



Что такое химический анализ и аналитическая химия

Далеко не всегда для анализа сплава можно применить метод Архимеда, основанный на измерении плотности. Тем более это относится к различным смесям или сложным химическим соединениям. В этих случаях пользуются химическими методами анализа.

Знания о разнообразных химических превращениях люди накопили уже в древности, хотя, конечно, и не понимали сути происходящих явлений. Такие знания называются эмпирическими (от греческого «эмпейриа» — опыт). Так, люди по опыту издавна знали, что полено в костре загорится и станет поддерживать огонь, а камень гореть не будет. Однако они не имели ни малейшего представления о том, из чего состоят дерево и камень, что такое огонь и какие превращения происходят при горении. Это пример эмпирических знаний. Таких знаний постепенно накапливалось все больше, их передавали от поколения к поколению как общеизвестные (а порой и секретные) сведения. В Ветхом Завете, в Книге пророка Захарии, сказано: «И пронесу я третью часть сквозь огонь и облагорожу ее, как серебро облагораживается, и очищу ее, как золото очищается». Значит, простейшие приемы выплавки и очистки благородных металлов были известны людям тысячи лет назад. Много полезных практических знаний в области анализа веществ накопили алхимики, работавшие в средневековье (рис. 10). С появлением «настоящей» химии ме-

тоды анализа стали развиваться особенно быстро. Вначале основное внимание уделялось, как и в древности, обнаружению и анализу драгоценных металлов. Эту отрасль тогда называли «пробирной химией» (отсюда — клеймо, проба, которую ставят на золотые и серебряные изделия). Затем стали анализировать природные минеральные воды, различные руды, промышленную продукцию. Так возникла и стала быстро развиваться новая область химии — аналитическая химия. Поначалу для анализа использовали в основном «мокрые» методы; вещество растворяли в кислотах или щелочах, а затем анализировали полученные растворы. Это были трудоемкие операции, на них уходило много времени.

Сейчас возможности аналитической химии стали поистине фантастическими. Использование различных химических, физических, биологических методов позволило не только значительно увеличить точность анализа и сократить время на его проведение, но и определять одновременно десятки различных компонентов в очень маленьком по размеру образце. Разработаны и неразрушающие методы анализа, когда образец остается в неизменном виде. Все это важно при анализе и лунного грунта, и краски со старинной картины, и микропримесей в питьевой воде. Например, в лаборатории лазерной диагностики Московского университета разработан сверхчувствительный метод анализа, позволяющий обнаружить в 1 мл водного раствора несколько пикограмм (то есть триллионных долей грамма) некоторых химических элементов.

Теория многих химических анализов проста и заключается в том, что химические вещества реагируют между собой в строго определенных соотношениях. Впервые это отчетливо понял и сформулировал в конце XVIII в. немецкий химик И. В. Рихтер. В книге, изданной в 1792 г., он сфор-

Рис. 10. На картине фламандского живописца XVIIв. Давида Тенирса Младшего изображен алхимик в своей лаборатории, перемешивающий вещества в тигле согласно старинному рецепту. Огонь в печи поддерживает его помощник.





мулировал такой закон: «Если мы получаем соединение из двух элементов, то, поскольку свойства элементов постоянны, один из элементов будет требовать всегда одного и того же количества другого элемента; так, если для растворения 2 частей извести требуется 5 частей соляной кислоты, то для растворения 6 частей извести потребуется 15 частей соляной кислоты... Если два нейтральных раствора смешиваются один с другим и между ними происходит двойной обмен, то элементы должны находиться между собой в определенных объемных соотношениях».

Если учесть, что «двойной обмен» — это химическая реакция между двумя соединениями, а «элементом» Рихтер называл химическое соединение, то следует признать, что он сформулировал основной закон количественного анализа. Химикам оставалось только совершенствовать методы анализа и уточнять, в каких точно соотношениях и при каких условиях реагируют различные соединения.

Проведем с вами несколько опытов, иллюстрирующих сказанное. В этих опытах вы будете добавлять к одному соединению другое, которое с ним реагирует, до тех пор, пока первое соединение не израсходуется полностью. Как только это произойдет, добавление второго вещества надо прекратить. Тогда, зная количество израсходованного реагента — второго вещества, — можно рассчитать, сколько же было первого. Бывает и наоборот: зная количество первого вещества, рассчитывают количество добавляемого реагента.

«А зачем это делать? — спросят некоторые. — Разве не проще взвесить анализируемое вещество или измерить его объем, если это жидкость?» Конечно, проще, если это чистое вещество или раствор известной концентрации. Но тогда и анализ проводить не надо. А если нам надо определить, сколько данного соединения входит в сложную смесь, которую трудно или даже невозможно разделить на отдельные компоненты? Или сколько различных солей содержится в минеральной воде? Здесь-то и пригодятся различные аналитические методы.

Есть и другая проблема. Как было сказано, второй реагент надо добавлять к анализируемой смеси до тех пор, пока реакция не закончится. А как это узнать? С помощью индикаторов (от латинского «индикатор» — указатель) — веществ, позволяющих следить за протеканием химической реакции. Индикаторы бывают разные. С некоторыми из них вы познакомитесь, проведя описанные здесь несложные эксперименты. Для них потребуются весы, пипетка и кое-какие доступные химические вещества.

Начнем с анализа самой доступной в быту кислоты — уксусной.

Об уксусе, пекарских порошках и «пузырьковом индикаторе»

Уксус — это слабый водный раствор уксусной кислоты. Его получали уже в глубокой древности при брожении слабых спиртовых растворов (пива, слабого вина), содержащих не больше 14% спирта. Если такую жидкость оставить на воздухе, она скисает и превращается в уксус. Ведь в воздухе всегда есть зародыши особых бактерий — «уксусного грибка». Попадая в спиртовую жидкость, они начинают там размножаться и при этом перерабатывают спирт в уксусную кислоту. По преданию, египетская царица Клеопатра приказывала растворять в уксусе жемчужины, чтобы получить якобы целебный напиток. Само название «уксус» происходит от греческого слова «оксос», что означает «кислый». Так что для древнего грека наше название «уксусная кислота» показалось бы весьма странным: ведь буквально оно значит «кислая кислота» (как «масло масляное»). На латыни «уксус» — «ацетум». Отсюда и название солей уксусной кислоты — аце-

таты (а также названия ацетона, ацетилена и многих других соединений).

Чистая уксусная кислота уже при 16°C замерзает, образуя кристаллы, похожие на лед (поэтому ее называют «ледяной»). В кулинарии используют уксусную эссенцию — 80%-ный раствор уксусной кислоты в воде. Это слишком крепкая и опасная в обращении жидкость, поэтому мы не будем ее использовать в опытах. Сравнительно безопасен столовый уксус — слабый (примерно от 5 до 10%) водный раствор уксусной кислоты. С ним-то и проведем опыты, чтобы узнать поточнее, какова же его крепость.



Анализ будет основан на реакции уксусной кислоты с пищевой содой (это натриевая соль угольной кислоты; химическое название — гидрокарбонат натрия). В результате реакции гидрокарбоната натрия с уксусной кислотой происходит как бы обмен атома ми натрия — образуется натриевая соль уксусной кислоты (ацетат натрия) и свободная угольная кислота. Молекула угольной кислоты, в отличие от уксусной, очень непрочная и легко распадается на две молекулы — воды и углекислого газа. Вот почему если на соду капать кислотой (любой, не только уксусной), раздается шипение и смесь вспенивается: это выделяется углекислый газ. Он-то в данном случае и будет служить индикатором протекания реакции: как только пузырьки газа перестанут выделяться — значит, реакция закончилась и прибавление раствора уксусной кислоты надо прекратить.

На этой химической реакции основано применение пекарских порошков. Когда хозяйка кладет в тесто дрожжи, они вызывают спиртовое брожение. В тесте образуются спирт и углекислый газ. Выделяющийся газ «поднимает» тесто, а спирт при выпечке улетучивается и делает мучное изделие пористым и мягким. В тесто для вафель, печенья, коржиков и пряников кладут не дрожжи, а химические разрыхлители — пекарские порошки. Обычно такой порошок состоит из неорганического щелочного агента — карбоната — и кислотного агента. Реакция между ними и приводит к образованию углекислого газа, который поднимает тесто. Уксус здесь не годится: он жидкий и прореагирует с содой раньше времени» Вместо него обычно берут твердые органические кислоты. Состав порошка может быть разным. В старину использовали единственный известный тогда карбо-

нат — калия (его называли поташом) и молочную сыворотку в которой много органических кислот (вы можете сами в этом убедиться, попробовав обрат — прозрачную жидкость, оставшуюся после того, как от скисшего молока отделился творог). Скисшее молоко добавляют в тесто и сейчас, а поташ уже не применяют: с ним выпечка получается темной, тяжелой, со специфическим привкусом. В качестве щелочного агента теперь используют питьевую соду в сочетании с разными кислотными агентами. Одно время очень популярной была винная (другое название — виннокислотная) кислота, которую в больших количествах получали из так называемого винного камня — отхода виноделия. Использовали и сам винный камень — кислую калиевую соль винной кислоты. Этот кислотный агент реагирует с содой только при высокой температуре, поэтому тесто можно приготовить впрок и хранить в холодильнике.

Пекарский порошок (его изобрел в середине XIX в. профессор химии в Гарварде Э. Н. Хорсфорд) готовят так: смешивают две части винного камня и одну часть соды, а чтобы реагенты не начали взаимодействовать раньше времени, смесь разбавляют крахмалом или мукой, отделяя таким образом щелочной агент от кислотного. В качестве кислотных агентов используют также лимонную, яблочную, молочную и другие органические кислоты, некоторые соли фосфорной кислоты. Все эти разрыхлители оставляют в тесте после реакции твердые нелетучие соли. Но есть и вещества, которые, разлагаясь при нагреве, образуют только газообразные продукты. Это соли аммония, в том числе карбонат и гидрокарбонат. Уже при небольшом нагревании они полностью разлагаются, выделяя углекислый газ, аммиак и пары воды.

Пекарский порошок продают в готовом виде в пакетиках, но, если есть необходимые компоненты, можно приготовить его самостоятельно. Обыч-

но на 1 кг муки берут 2—4 чайные ложки пекарского порошка. Подробнее об этом рассказано в книгах по кулинарии и домоводству.

Теперь, когда вы кое-что узнали об уксусе и соде, можно приступить к анализу. Чтобы лучше понять его основную идею, проведите такой интересный опыт. Возьмите 7—8 одинаковых (не надутых) резиновых шариков и столько же небольших баночек, на горлышко которых их можно натянуть. На каждой баночке напишите ее номер. Чтобы резина шариков стала податливее, лучше их предва-



рительно надуть, а потом выпустить воздух. В каждую баночку залейте уксус. В первую (с номером 1) — две чайные ложки, во вторую — четыре, в третью — шесть и т. д. Все ложки постарайтесь наполнить одинаково, а чтобы уксус не пролить, воспользуйтесь небольшой воронкой.

Налили? Теперь промойте воронку водой, высушите и насыпьте через нее в каждый шарик ровно по одной чайной ложке пищевой соды (без верха). Постарайтесь, чтобы соды в каждом шарике оказалось одинаковое количество.

Осторожно натяните шарики на баночки: сода не должна попасть в уксус раньше времени. Чтобы шарик плотнее прилегал к баночке, несколько раз тугο обяжите его горлышко, натянутое на ней, крепкой ниткой. Встряхивая шарики, добейтесь, чтобы сода из каждого попала в банку (не обязательно, чтобы это было одновременно). Начнется вспенивание и выделение углекислого газа, который будет раздувать шарики (рис. 11).

Пока идет реакция, подумайте: какой шарик раздуется меньше, а какой больше всех?

Ну, что вы решили? Что сильнее всех раздуется последний шарик, где уксуса в баночке было больше всего? Ошибаетесь! Ведь если бы это было так, то, добавив к чайной ложке соды, скажем, целую банку уксуса, вы получили бы еще больше газа. А если добавить ведро уксуса? А бочку?

Очевидно, что если к чайной ложке соды постепенно добавлять уксус, то с какого-то момента углекислый газ перестанет выделяться: это произойдет, когда вся сода израсходуется. А дальше лей уксус, не лей — ничего уже не изменится!

Первый шарик раздулся слабее всех, так как в баночке осталось много неиспользованной соды: уксуса не хватило, чтобы она вся с ним прореагировала. Почему так? Ведь уксуса было две чайные ложки, а соды — только одна? Но, во-первых, сода тяжелее уксуса, и в чайную ложку ее помещается (по массе) больше. Во-вторых, вещества вступают в химические реакции в соответствии с количеством в них молей. В-третьих (и здесь это главное), уксус — это не чистая уксусная кислота, а сильно разбавленная.

Один моль пищевой соды (84 г) реагирует ровно с одним молем уксус-

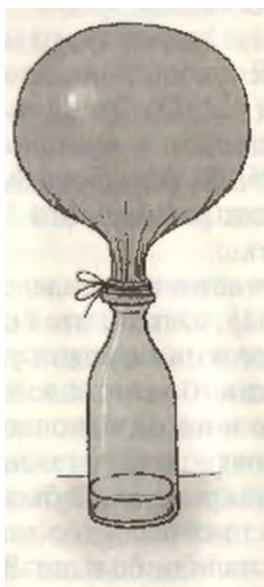


Рис. 11.
Химическая реакция между пищевой содой и уксусом сопровождается выделением углекислого газа, который надувает шарик.

ной кислоты (60 г), В чайной ложке помещается примерно 7 г питьевой соды, то есть $7/84 = 1/12$ моля. Воды же или уксуса там всего 5 г. Если бы это была чистая уксусная кислота, ее в ложке было бы столько же молей, сколько и соды ($5/60 = 1/12$). Тогда первая же ложка кислоты полностью прореагировала бы с содой и все шарики раздулись бы одинаково; ведь кислоты во всех баночках оказалось бы по сравнению с содой в большом избытке. В химических расчетах это очень важное понятие — вещество, находящееся в избытке.

Но у нас была не чистая уксусная кислота, а ее слабый раствор — столовый уксус. Например, если бы это был 10%-ный уксус, то его понадобилось бы для полной реакции с содой уже в 10 раз больше, чем чистой уксусной кислоты, то есть 10 чайных ложек. В таком случае реакция прошла бы полностью только в пятой баночке, в которой было как раз 10 ложек уксуса. В первой баночке, куда вы налили только 2 чайные ложки уксуса, его не хватило для реакции; здесь был избыток соды. Во второй баночке (4 ложки уксуса) сода тоже была в избытке, но ее в реакцию вступило больше, так как и уксуса налили больше. Значит, газа тоже выделилось вдвое больше, и шарик раздулся сильнее. (Однако его диаметр увеличился не вдвое — ведь увеличению диаметра в 2 раза соответствует увеличение объема в $2^3 = 8$ раз.) В третьей баночке газа выделилось по объему уже в 3 раза больше, чем в первой, в четвертой — в четыре раза, в пятой — в пять. А дальше объем шариков будет оставаться постоянным, потому что начиная с шестой баночки сода там целиком израсходуется (как говорят химики — прореагирует).

Все эти рассуждения относились к 10%-ному уксусу. Если он был слабее, то шарики перестанут увеличиваться в объеме начиная с шестого или даже с седьмого. Точнее определить концентрацию уксуса вам поможет второй опыт.

В предыдущем опыте, добавляя к определенному количеству соды уксус, мы слишком резко увеличивали число чайных ложек — сразу на две. Чтобы анализ был точным, химики добавляют один реагент к другому малыми порциями, например по одной капле. Поступим так и мы. Но так как мерных бюреток у нас нет, будем определять объем раствора по числу добавленных капель жидкости. Сначала определим объем одной капли. Сделать это можно по-разному. Проще всего использовать продающийся в аптеках пластмассовый одноразовый шприц на 1 или 2 мл с делениями на боковой поверхности. Отлейте с помощью шприца в маленькую баночку ровно 1 мл воды и, переливая эту воду обычной пипеткой, посчитайте, сколько в ней капель. Учтите, что у разных пипеток объем капли может заметно изменяться, поэтому во всех опытах пользуйтесь одной и той же пипеткой.

Если шприца нет, можно поступить иначе. Уравновесьте на весах с по-

мощью скрепок, кнопок и других легких предметов маленький сосудик (подойдет наперсток). Положите на другую чашу весов гирьку массой 1 г и капайте из пипетки в сосуд воду по одной капле. Внимательно считайте их, пока весы снова не придут в равновесие. Так вы узнаете число капель в 1 г воды (обычно их бывает 20–30). Теперь легко определить объем (и массу) одной капли. К примеру, если в 1 г воды было 30 капель, то масса одной капли — 0,033 г (а объем 0,033 мл). Кстати, проверьте, одинаковы ли по объему капли воды и уксуса!

Отвесьте теперь 1 г пищевой соды и поместите ее в небольшую склянку. Осторожно капайте на соду уксус из пипетки. Не спешите, внимательно считайте капли и наблюдайте за пузырьками газа. Время от времени прекращайте добавлять уксус, чтобы дать ему прореагировать. Когда добавка уксуса перестанет приводить к появлению новых пузырьков газа (лучше всего это узнается на слух, если придвинуть ухо поближе к смеси: характерное шипение должно прекратиться), закончите опыт и запишите число капель уксуса, израсходованного в реакции. (Вообще, записывать все без исключения результаты опытов надо обязательно. Не перегружайте голову лишней информацией, которую легко забыть.)

Предположим, для полной реакции с содой потребовалось 350 капель уксуса. Остается решить задачу наподобие тех, какие дают на уроках алгебры (а не только химии). Пусть крепость уксуса составляет $x\%$, то есть в 100 г уксуса содержится x граммов чистой уксусной кислоты (остальное — вода), а объем капли 0,03 мл (плотность уксуса считаем равной плотности воды, то есть 1 г/см³). В 350 каплях содержится $350 \cdot 0,03 = 10,5$ г уксуса, или $10,5 \cdot 0,01x = 0,105x$ г чистой уксусной кислоты. Составляем пропорцию:

84 г пищевой соды полностью реагирует с 60 г уксусной кислоты
 1 г пищевой соды полностью реагирует с 0,105х г уксусной кислоты

Правила обращения с пропорциями, вы, конечно, помните:
 $84 \cdot 0,105x = 1 \cdot 60$, откуда $x = 60 : (84 \cdot 0,105) = 6,8\%$.

Следовательно, крепость уксуса — примерно 7%. Точность этого анализа определяется ошибками при взвешивании соды и определении объема капли.

В данном случае индикатором служили пузырьки газа. Но далеко не во всех химических реакциях выделяется газ. Как узнать, что реакция кончилась, если реагируют бесцветные растворы кислоты и щелочи без выделения газа? В таких случаях в ход идут кислотно-щелочные индикаторы, которые химики во всем мире используют уже почти двести лет.

Типирование с индикатором

Как уже говорилось, индикатор указывает, что в смеси присутствует то или иное вещество, и если оно полностью израсходовалось в ходе реакции, индикатор тут же это покажет. Одни из самых распространенных индикаторов — кислотно-щелочные (или кислотно-основные); они изменяют цвет в зависимости от кислотности среды. У таких индикаторов разный цвет в кислой, нейтральной или щелочной среде. Одна из форм индикатора может быть и бесцветной.

Обычный чай — тоже индикатор. Налейте немного чая в белую чашку и капните туда лимонный сок или растворите несколько кристалликов лимонной кислоты — в кислой среде чай сразу станет светлее. Если же растворить в чае питьевую соду, раствор в щелочной среде потемнеет (пить такой чай, конечно, не нужно).

Рис. 12. Некоторые типы индикаторной бумаги. Слева: на центральную часть полоски наносят каплю исследуемой жидкости и сравнивают получившийся цвет с эталонными цветами сверху и внизу. Справа:

бумага, пропитанная универсальным индикатором, на которую нанесены капли водопроводной воды (в центре), кислоты (вверху) и щелочи (внизу).



Кислотно-щелочные индикаторы очень разнообразны. Многие из них легкодоступны и потому известны не одно столетие — например, отвары или экстракты цветов либо плодов многих распространенных растений. Так, ярко-синий отвар ириса становится красным в кислой среде и зелено-голубым в щелочной. Схожие свойства у анютиных глазок, тюльпанов, черники, ежевики, малины, красной капусты, свеклы и других растений.

Попробуйте взять в качестве индикатора отвар какого-либо ярко окрашенного цветка или же темный ягодный сок — скажем, черной смородины. Налейте в небольшую баночку испытуемый раствор и добавьте к нему несколько капель раствора индикатора. В кислых растворах многие растительные индикаторы становятся красными, а в щелочных — зеленоватыми или синими. Можно также попробовать с помощью кислого раствора (уксус) и щелочного (питьевая, а лучше — стиральная сода) сделать надписи на лепестках различных цветов красного или синего цвета.

Существенный недостаток таких простейших индикаторов — их сезонность и невозможность заготовить впрок: растворы довольно быстро скисают или плесневеют, теряя свои свойства (гораздо устойчивее спиртовые растворы). Другой, но не такой существенный, недостаток природных индикаторов — слишком медленное, постепенное изменение цвета при добавлении кислоты к щелочному раствору или наоборот. К тому же трудно или невозможно отличить, например, нейтральную среду от слабокислой или слабощелочную от сильнощелочной. Поэтому в химических лабораториях используют синтетические индикаторы, резко меняющие свой цвет уже при небольшом изменении кислотности. Таких индикаторов множество, и у каждого из них своя область применения.

В лабораториях нередко используют так называемые универсальные индикаторы. Это смесь 5—6 индивидуальных индикаторов, подобранных так, что их раствор при изменении кислотности анализируемого раствора поочередно меняет окраску, проходя все цвета радуги. Раствором универсального индикатора часто пропитывают полоски бумаги: с их помощью можно быстро (хотя и не особенно точно) определить кислотность (или щелочность) раствора, который анализируют. Для этого сравнивают окраску полоски, смоченной универсальным индикатором, с эталонной цветовой шкалой (рис. 12).

Один из самых известных индикаторов — лакмус. Это твердое вещество, частично растворимое в воде и спирте. Его растворы позволяют отличать кислотную среду от щелочной.

История открытия и использования лакмуса с точки зрения развития химического эксперимента чрезвычайно поучительна. Еще в 1640 г. ботаники описали растение *Heliotropium turnesole*, из которого выделили красящее вещество. Знаменитый физик и химик Роберт Бойль писал о нем в 1664 г.: «Плоды этого растения дают сок, который при нанесении на бумагу или материю имеет сначала свежий ярко-зеленый цвет, но потом неожиданно изменяет его на пурпурный. Если материал замочить в воде и отжать, вода окрашивается в винный цвет; такие виды красителя (их обычно называют "турнесоль") есть у аптекарей, в бакалейных лавках и в других местах, где они служат для окраски желе или других вещей, кто как хочет».

Скоро краситель, получаемый из гелиотропа (садового душистого растения с темно-лиловыми цветками), как и сок фиалок, химики стали широко применять в качестве индикатора. В кислой среде он красный, в щелочной — синий. Вначале этим красителем исследовали в основном минеральные воды, а примерно с 1670 г. им стали пользоваться при химических опытах. «Как только вношу незначительно малое количество кислоты, — писал в 1694 г. французский химик Пьер Поме о «турнесоле», — он становится красным, поэтому, если кто хочет узнать, содержится ли в чем-нибудь кислота, его можно использовать». В 1704 г. немецкий ученый М.Л. Валентин назвал этот краситель лакмусом. Слово это и осталось во всех европейских языках, кроме французского, на котором лакмус — *tourmesol*, что дословно означает «поворачивающийся за солнцем». Так же французы называют и подсолнечник. Кстати, «гелиотроп» означает то же самое, только по-гречески. Вскоре оказалось, что лакмус можно добывать и из более дешевого сырья, например из некоторых видов лишайников.

Сейчас лакмус лишь изредка используют в химических лабораториях. Однако в современном русском языке слово «лакмус» закрепилось: выражение «стать лакмусовой бумажкой» используют, когда говорят о чем-либо, выявляющем суть человеческого характера или поступка.

Химики в качестве индикатора используют также фенолфталеин. Это сложное органическое соединение, которое продается в аптеках как слабительное средство (раньше его называли пургеном). Растворы фенолфталеина широко применяются в химии для распознавания щелочей: в щелочной среде у него ярко-малиновая окраска, а в нейтральной и кислой средах — бесцветная. Фенолфталеин довольно плохо растворяется в воде. Поэтому сначала растворяют его небольшое количество в 20—30 каплях спирта или водки, а затем уже добавляют в раствор немного воды. Вы можете проверить раствором фенолфталеина растворы питьевой и стиральной соды, мыла, нашатырного спирта, различных порошков для стирки и чистки и других хозяйственных средств — какие будут под рукой. Если появится малиновая окраска, значит, характер раствора данного вещества щелочной.

Пользуясь всеми этими индикаторами, вы можете провести опыты по количественному определению разных кислотных и щелочных растворов. К примеру, если в вашей домашней аптечке есть слабый раствор нашатырного спирта, попробуйте определить его концентрацию. Для этого используйте уже определенную вами концентрацию уксуса. Кроме того, надо знать, в каких соотношениях реагируют эти вещества. Нашатырный спирт — это водный раствор аммиака, бесцветного газа с очень резким запахом. Если аммиака в воде растворено много (например, 25%), то такой раствор «ударяет в нос» и «ест глаза», с ним работать не нужно. В ап-

течном нашатырном спирте аммиака намного меньше — примерно 10%. Обычно его применяют, когда необходимо вывести больного из обморочного состояния. Добавляют нашатырный спирт и к некоторым средствам для мытья стекол. Если склянка с нашатырем закрыта неплотно, то газообразный аммиак медленно улетучивается из раствора, и в конце концов в ней остается чистая вода. Вам наверняка будет интересно узнать, насколько крепок нашатырный спирт из вашей аптечки.

Один моль аммиака (17 г) реагирует с одним молем уксусной кислоты (60 г). В 100 г 10%-ного нашатырного спирта содержится 10 г аммиака, или $10 : 17 = 0,59$ моля, а в 100 г 7%-ного уксуса содержится 7 г уксусной кислоты, или $7 : 60 = 0,12$ моля. Таким образом, при равных объемах 10%-ный нашатырный спирт по числу молей содержит примерно в 5 раз больше аммиака, чем 7%-ный уксус — уксусной кислоты. Значит, при указанной крепости растворов 1 объем нашатырного спирта будет полностью реагировать примерно с 5 объемами уксуса. Проверим это экспериментально.

Накапайте в небольшую прозрачную склянку 30 капель нашатырного спирта и добавьте несколько капель раствора индикатора. Если вы взяли раствор фенолфталеина, жидкость станет малиновой. Добавляйте к ней из той же пипетки уксус, внимательно считая капли и слегка встряхивая раствор, чтобы он хорошо перемешивался. Как только индикатор обесцветится (или изменит цвет, если он растительный), прекратите добавлять уксус: весь нашатырный спирт к этому моменту израсходуется. Такую операцию химики называют титрованием. Запишите, сколько капель уксуса у вас ушло на полную нейтрализацию нашатырного спирта (термин «нейтрализация» химики используют, когда говорят, что щелочь полностью прореагировала с кислотой или, наоборот, кислота со щелочью; в результате реакции раствор теряет едкие свойства кислоты или щелочи, становится нейтральным — отсюда название реакции). Если уксуса ушло в 5 раз больше, то есть 150 капель, значит, нашатырный спирт действительно 10%-ный. Если же уксуса ушло еще больше, то нашатырный спирт более крепкий, а если меньше, то более слабый. Например, если на титрование 30 капель нашатырного спирта пошло 120 капель уксуса, то концентрация раствора аммиака $(120 : 150) \cdot 10\% = 8\%$, Если же, положим, на титрование ушло 180 капель, то крепость нашатырного спирта равна $(180 : 150) \cdot 10\% = 12\%$.

Анализ йодной настойки

Все видели йодную настойку — водно-спиртовой раствор, содержащий, согласно фармацевтическим справочникам, 5% йода. Но это теоретически. А как на самом деле? Обратите внимание на срок годности настойки, указанный на этикетке. Дело в том, что йод медленно реагирует со спиртом, причем реакция ускоряется на свету (вот почему его, как и многие другие лекарственные средства, надо хранить в темноте). Кроме того, если настойка долго находилась в неплотно закрытой посуде, концентрация йода могла измениться как из-за испарения спирта, так и из-за летучести йода.

Все это можно проверить экспериментально. Для анализа понадобится аптечная пипетка и маленькая мензурка с делениями — ее можно купить в аптеке. Из реактивов потребуются тиосульфат натрия (подробнее о нем вы узнаете из рассказа о кристаллах) и крахмал. Тиосульфат реагирует с йодом, образуя бесцветное соединение; на 2 моля тиосульфата (496 г) расходуется 1 моль йода (254 г). За титрованием можно следить просто по окраске йода, но когда йода в растворе остается мало, бледно-желтый цвет раствора почти не виден, и заметить момент, когда раствор полностью обесцвечивается, трудно. Поэтому лучше воспользоваться еще и индикатором — крахмалом, его добавляют к раствору в конце титрования.

Для опыта сначала приготовьте очень жидкий крахмальный клейстер. Чтобы он был без комков и совершенно прозрачный, надо сделать следующее. Вскипятите в небольшой кастрюльке примерно полстакана воды. Пока вода нагревается, размешайте немного крахмала (примерно четверть чайной ложки) со столовой ложкой холодной воды так, чтобы не было комков. Медленно, постоянно перемешивая, вылейте мутную взвесь крахмала в кипящую воду, хорошо все размешайте и охладите.

Что бывает, когда йод реагирует с крахмалом, знают, наверное, все. Если не знаете или забыли, капните в чашку сначала крахмальный клейстер, а потом йодную настойку — все тотчас окрасится в синий цвет. С помощью йодной настойки крахмал легко обнаружить на свежем срезе картофеля — или в муке. Кстати, еще в прошлом веке эту реакцию использовали, чтобы уличить недобросовестных торговцев, которые добавляли в сметану «для густоты» пшеничную муку. Если на образец такой сметаны капнуть йодной настойки, синее окрашивание сразу выявит подвох.

Чтобы анализ на содержание йода в настойке получился достаточно точным, приготовьте довольно разбавленный раствор тиосульфата натрия, например 0,05 моль/л. Для этого в 1 л раствора должно содержаться примерно 12,5 г кристаллического тиосульфата натрия (или 0,5 г в 40 мл раствора; 40 мл можно отмерить с помощью аптечной мензурки — или шпри-

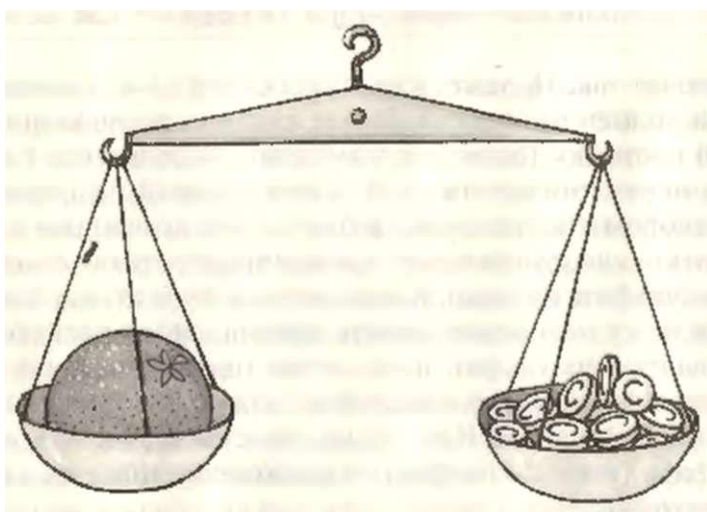
ца, хотя это утомительно и неточно, — а 0,5 г отвесьте как можно точнее на весах).

Анализ проводят так. Налейте в чистую склянку 2–3 столовые ложки прокипяченной холодной воды. Добавьте туда с помощью шприца ровно 2 мл йодной настойки (если йод в ампулах, используйте их две). Начинайте, легко перемешивая, титровать полученный разбавленный раствор йода раствором тиосульфата, добавляя его по каплям из пипетки (вы уже знаете из предыдущих опытов, как определить объем одной капли раствора тиосульфата натрия). Когда раствор йода станет бледно-желтым, добавьте к нему несколько капель крахмального клейстера и продолжайте добавлять тиосульфат, пока синяя окраска полностью не исчезнет. Концентрацию йода (c) в настойке можно рассчитать по формуле: $c = 0,0125V$ (моль/л) = $0,32V$ (г/100 мл, то есть %), где V — объем раствора тиосульфата (в миллилитрах), израсходованного на титрование 2 мл йодной настойки.

Оставьте на несколько дней баночку с небольшим количеством йодной настойки без крышки (лучше не в помещении), пока часть раствора не испарится, и снова проанализируйте настойку. Если концентрация йода стала больше, значит, спирт испарялся быстрее йода, а если меньше, то наоборот.

Если анализ настойки у вас получился, можете перейти к более сложным анализам, например к определению аскорбиновой кислоты.





Сколько в апельсине витамина С?

Анализ витаминов в продуктах питания — дело сложное. Но как раз витамин С — аскорбиновую кислоту — вы сможете проанализировать и дома. Возможно, вы решили, что раз витамин С — кислота, то анализировать его надо с помощью щелочи. Но так не получится: в разных плодовых соках, кроме аскорбиновой, есть еще множество разных кислот — лимонная, яблочная, винная и другие. И отличить одну кислоту от другой с помощью щелочи не удастся. Однако у аскорбиновой кислоты есть свойство, которого нет у всех остальных кислот: быстрая реакция с йодом. Один моль аскорбиновой кислоты (176 г) реагирует с одним молем йода (254 г).

Для анализа можно взять аптечную йодную настойку. Будем считать, что она 5%-ная, это соответствует концентрации йода примерно 0,2 моль/л. Однако аскорбиновой кислоты в соке может оказаться так мало, что на титрование определенного объема сока (например, 20 мл) уйдет всего 1–2 капли йодной настойки, и при этом ошибка анализа окажется очень большой. Чтобы результат был точнее, нужно либо взять много сока, либо разбавить йодную настойку. В обоих случаях число капель йода, израсходованных на титрование, увеличится, и анализ будет точнее. Химики предпочитают второй путь. Поступим так и мы (заодно сэкономив сок для его прямого назначения). Для анализа фруктовых соков удобно к 1 мл йодной настойки добавить прокипяченной воды до общего объема 40 мл, то есть разбавить настойку в 40 раз. Концентрация такого раствора будет около 0,005 моль/л; 1 мл его соответствует 0,88 мг аскорбиновой кислоты.

Если вы раньше не определяли объем одной капли, сделайте это сейчас: с помощью аптечной мензурки или шприца отмерьте 1 мл разбавленного раствора йода и посчитайте, сколько капель из обычной пипетки содержится в этом объеме. Для опыта понадобится также крахмальный клейстер. Как его готовить, вы уже знаете.

Прежде чем приступить к анализу сока, потренируйтесь на растворе, в котором содержание витамина С уже известно. Лучше всего подойдет аскорбиновая кислота в таблетках — ее продают в аптеках.

Одна таблетка содержит 0,1 или 0,5 г чистого витамина. Растворите ее в 0,5 л кипяченой воды (воду отмерьте поллитровой бутылкой или банкой), тщательно перемешайте раствор и отберите из него с помощью шприца или аптечной мензурки 25 мл. В этом количестве раствора аскорбиновой кислоты будет в 20 раз меньше, чем в таблетке. Долейте к нему половину чайной ложки раствора крахмала и осторожно, по каплям, добавляйте из пипетки разбавленный раствор йода, постоянно взбалтывая содержимое. Внимательно считайте капли и следите за цветом раствора. Как только вся аскорбиновая кислота прореагирует с йодом, следующая же его капля окрасит раствор в синий цвет. Титрование надо вести до появления устойчивого синего окрашивания. Определив число капель и, следовательно, объем израсходованного раствора йода, вы легко рассчитаете, сколько аскорбиновой кислоты было с самого начала. Например, если на титрование ушло 6 мл раствора йода, то аскорбиновой кислоты в растворе было $0,88 \cdot 6 = 5,28$ мг, а в исходной таблетке — в 20 раз больше, то есть 105,6 мг. Если таблетка содержала 0,1 г (100 мг) аскорбиновой кислоты, то это означает, что точность вашего анализа (около 5%) вполне достаточна и вы можете переходить к дальнейшим опытам.

Отожмите из лимона или апельсина 25 мл сока или возьмите столько же готового сока из пакета (он должен быть светлым: в темном вы не увидите появления окраски йода с крахмалом). Титруйте сок, как в опыте с таблеткой. Если на указанное количество сока израсходуется, допустим, 10 мл раствора йода, значит, в 25 мл сока было 8,8 мг аскорбиновой кислоты, а в 100 мл сока — 35,2 мг (содержание аскорбиновой кислоты обычно так и выражают — в миллиграммах на 100 мл или на 100 г продукта). Сравните полученный вами результат с написанным на упаковке сока. Если есть небольшие расхождения — не страшно: ведь ваш анализ приблизительный, ошибки возникают из-за неточного определения объемов сока и капли, концентрации йода и т. д. Если же с таблеткой все получилось верно, а с соком нет, значит, либо на упаковке неверные сведения, либо из-за неправильного или слишком долгого хранения сока витамин в нем частично разрушился — возможно, еще до того, как сок разлили в пакеты. Ведь витамин С очень неустойчивый и легко разрушается кислородом воздуха, особенно на свету, а также от следов железа. При тепловой обработке

продуктов (например, при варке картофеля или капусты) витамина С в них может остаться меньше половины.

В организме человека (в отличие от многих других животных) аскорбиновая кислота не синтезируется, поэтому мы должны получать ее с пищей (в среднем около 70 мг в сутки). Витамин С необходим для нормальной жизнедеятельности; он положительно действует на центральную нервную систему, повышает сопротивляемость организма к неблагоприятным факторам, в том числе к инфекциям, предотвращает тяжелое заболевание цингу (по-латыни «цинга» — «скорбутус»; «аскорбиновая» дословно значит «против цинги»). Полезно знать, в каких продуктах много этого витамина. В основном им богаты овощи, фрукты, ягоды. Вот сколько миллиграммов аскорбиновой кислоты содержится в 100 г свежих продуктов: морковь, виноград — 5, свекла, репчатый лук, чеснок, сливы, летние яблоки — 10, салат, зимние яблоки — 15, картофель — 20, редис, помидоры, малина — 25, зеленый лук, крыжовник — 30, лимон — 40, клубника, ранняя капуста — 60, укроп — 100, петрушка (зелень) — 150, черная смородина, облепиха — 200, красный перец (сладкий) — 250, шиповник свежий — 650.

Конечно, эти данные приблизительны — хотя бы потому, что содержание витамина зависит от сорта растения, условий его роста и т. д. Тем не менее с их помощью вы можете ориентировочно определить, сколько аскорбиновой кислоты получаете в сутки из разных продуктов.

Анализ в эмалированной кружке

Если вещество окрашено, химики часто используют для его анализа оптические свойства раствора; чем сильнее свет поглощается раствором, тем выше концентрация растворенного вещества. Эту простую зависимость можно выразить формулой: $D = kcl$, где D — оптическое поглощение (оно измеряется специальным прибором — фотометром), k — коэффициент поглощения (для каждого вещества он свой), c — концентрация вещества (в молях на 1 л раствора), l — длина пути (в сантиметрах), которую прошел свет в растворе.

Фотометр прибор сложный, он есть только в лабораториях. Однако, чтобы оценить концентрацию вещества приблизительно, иногда можно обойтись и без фотометра, проводя измерения, как говорится, «на глазок».

Вот такая история произошла в одном из походов.

Мы остановились на привал в лесу, у самой реки. Пора было готовить еду, но речная вода не внушала доверия — она явно пахла чем-то «керосиновым». К счастью, неподалеку оказался родник. Но и тут оказалось не все в порядке: камни вокруг были какие-то ржавые, да и сама вода пахла



так, будто она долго текла по старой железной водопроводной трубе. Впрочем, многие вспомнили, что железо полезно для организма. Есть даже особо богатые железом минеральные воды — недаром курорт, расположенный недалеко от Пятигорска, называется Железноводском. Однако один из туристов, врач по профессии, заявил, что в минеральных водах железа обычно немного, редко больше 10 мг в литре. Если его в воде намного больше, то она, безусловно, вредна и лучше не рисковать.

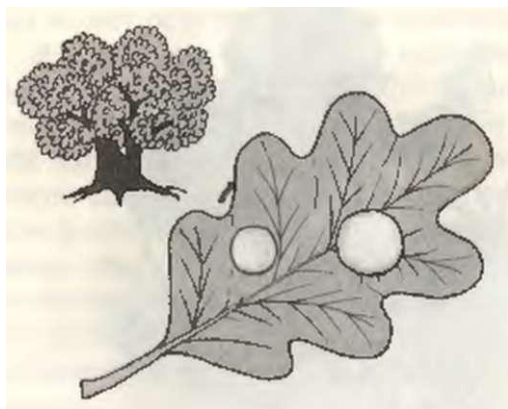
Поскольку простого способа избавиться воду от железа не существует, врач предложил вскипятить речную воду, заодно обработав ее марганцовкой — на случай, если там есть еще и микробы.

Энтузиазма это предложение не вызвало. Вот если бы поточнее узнать, сколько железа в родниковой воде... Но как это сделать?

И тогда другой турист, профессиональный химик, вспомнил об анализе соединений железа, который ему часто приходилось делать в лаборатории. Он добавлял к анализируемому раствору специальные реагенты, которые в соединении с железом давали яркую окраску, а потом фотометром измерял поглощение света этим раствором в стеклянной кювете.

Но ведь здесь, у реки, не было ни химических реагентов, ни прозрачных кювет, ни фотометра. «Зато есть дубы!» — сказал химик и рассказал всем, как дубы помогут узнать, есть ли в родниковой воде железо и сколько его.

На нижних сторонах дубовых листьев обычно к концу лета часто попадают красивые круглые орешки — галлы. Иногда их бывает так много,



что листья под их тяжестью повисают книзу. Сначала галлы зеленые, потом краснеют и напоминают маленькие яблочки, прилипшие к листу. Дубу галлы ни к чему: они образуются на его листьях от укуса крохотной мушки — орехотворки. Самка мушки, прежде чем отложить яйца, ранит дубовый лист, и на месте ранки начинает развиваться патологический нарост. Галлы и есть такие наросты. Они надежно защищают растущих внутри них личинок. Когда ореш-

ки-галлы созревают, оттуда вылетают маленькие крылатые насекомые с четырьмя прозрачными клетчатыми крылышками.

В галлах содержится много танина — смеси дубящих веществ (танин есть и в дубовой коре, но там его в 2—3 раза меньше). Еще в древности галлы использовали в медицинской практике, да и сейчас раствор танина — прекрасное средство от ожогов: на обожженной коже, «задубленной» танином, волдыри не образуются. Применяли галлы и для выделки кож: их называли «дубильными орешками». Но чаще всего галлы шли на изготовление чернил — отсюда их другое название: «чернильные орешки». Для получения чернил к соку из галлов добавляли железный купорос или другие соли железа. На воздухе полученный раствор приобретал глубокий фиолетово-черный цвет. Реакция эта очень чувствительная: окраска появляется даже при чрезвычайно малом количестве железа. Еще в XVII в. Р. Бойль установил, что «одна крупинка купороса, растворенная в таком количестве воды, которое в шесть тысяч раз превышает ее вес, способна дать с дубильным орешком пурпурную настойку». Добавление к чернилам камеди (густого сока некоторых деревьев, например вишневого) придавало чернилам красивый блеск. Вот один из старинных рецептов приготовления черных чернил: камеди — 3 части, железного купороса — 2 части, чернильных орешков — 3 части, воды — 30 частей. Чернила эти очень устойчивы: сохранились, например, написанные ими средневековые рукописи.

Химик снял с листьев дуба несколько орешков и выжал из них сок в кружку, наполненную родниковой водой. Каково же было удивление окружающих, когда вода сразу стала фиолетово-черной! Значит, в воде и вправду много железа...

Опыт произвел впечатление. Впрочем, о том, что в воде есть железо, туристы догадывались и раньше — но как теперь без приборов определить

его концентрацию? Химик знал, что для окрашенных соединений, которые танин образует с солями железа, коэффициент k в приведенной выше формуле равен примерно 4000. Знал он также, что глаз человека способен увидеть окраску раствора в том случае, если его оптическое поглощение D не меньше примерно 0,1. Поскольку анализ был приблизительным, большей точности не требовалось.

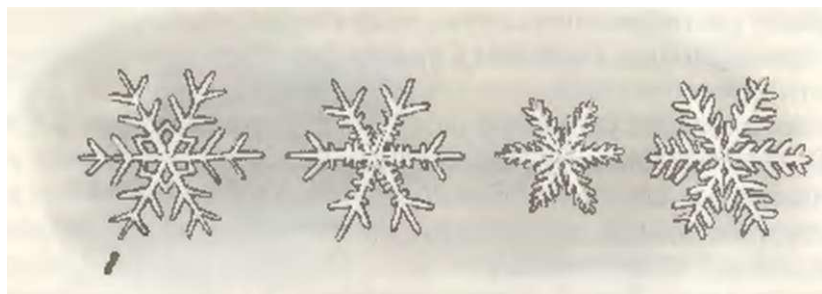
Прежде всего химик удостоверился с помощью галлов, что в речной воде, как и следовало ожидать, железа нет. После этого он начал разбавлять «чернильный» раствор речной водой: сначала вдвое, потом еще вдвое... Однако раствор оставался почти таким же темным — его оптическое поглощение было все еще слишком велико. Но затем содержимое кружки стало быстро светлеть. Вот уже отчетливо видны на ее белом эмалированном дне царапинки... И наконец, после шестого разбавления, раствор приобрел едва заметный лиловый оттенок.

Опыт был закончен. Осталось провести некоторые простые расчеты. Когда окраска в кружке едва заметна, оптическое поглощение раствора примерно равно 0,1. Высота жидкости в кружке около 10 см. Свет проходит слой жидкости дважды: сначала вниз, а потом, отразившись от дна, вверх — значит, всего он прошел 20 см. Теперь подставляем числа в формулу: $c = D : kl = 0,1 : (4000 \cdot 20) = 1,25 \cdot 10^{-6}$ моль/л. Поскольку раствор разбавлялся вдвое последовательно шесть раз, исходная концентрация железа была в 64 раза больше ($2^6 = 64$), то есть $8 \cdot 10^{-5}$ моль/л. Один моль железа — это 56 г, значит, в литре родниковой воды было $56 \cdot 8 \cdot 10^{-5} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ г = 4,5 мг железа. Это, конечно, немало, однако, как заметил врач, в минеральной воде железа бывает и больше, поэтому парочка кружек такой воды вреда человеку не принесет.

Химик выполнил свою задачу, обеспечив туристов водой. Врач же рассказал им еще много интересного о железе и его роли в жизни человека. Но это уже не относится к нашей теме...



ХИМИКИ ИЗУЧАЮТ И ВЫРАЩИВАЮТ КРИСТАЛЛЫ



Кристаллы в природе и в лаборатории

Если вы когда-либо были в музее минералогии или на выставке минералов (если нет — не упустите при случае такой возможности), то наверняка восхищались изяществом и красотой форм, которые принимают неживые вещества. А кто не любовался снежинками — кристаллами льда, разнообразие которых поистине бесконечно! Еще в XVII в. знаменитый астроном Иоганн Кеплер написал трактат «О шестиугольных снежинках». Спустя три столетия американский натуралист У. Бентли более пятидесяти лет занимался фотографированием снежинок под микроскопом. Он издал альбом с тысячами фотографий, причем ни одна из них не повторяет другую.

Наука о кристаллах началась с изучения горного хрусталя. Его блестящие бесцветные кристаллы впервые нашли еще в древности, среди вечных снегов, в швейцарских Альпах. Некоторые кристаллы настолько большие, что их с трудом могут поднять несколько силачей. Древние думали,

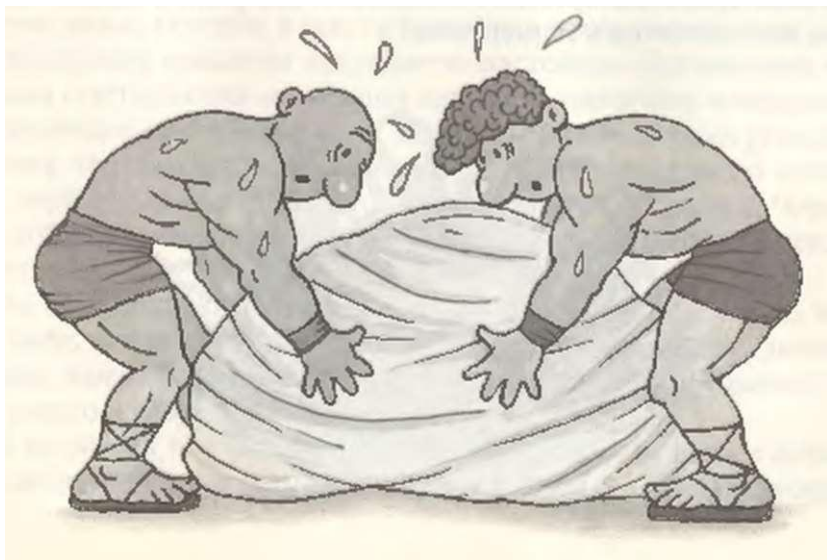


Рис. 13. Царский
Большой наряд:
шапка, держава,
скипетр, украшенные
кристаллами
самоцветов



что это особая форма замерзшей воды, и назвали вещество хрусталем (так по-гречески звучит слово «лед»):

Ярой алыпийской зимой лед превращается в камень.
Солнце не в силах затем камень такой растопить.

Клавдиан, 390 г.

Со временем, конечно, стало ясно, что горный хрусталь и лед — различные вещества. Однако оба термина сохранились: «кристалл» — в физике, химии, минералогии, «хрусталь» — в стекольном деле: так называют особое стекло, с добавками соединений свинца.

Горный хрусталь — это чистый кристаллический кварц, соединение кремния и кислорода. Но не менее красивы кристаллы кварца, окрашенные примесями в различные цвета: фиолетовые аметисты, желтые цитрины, коричневатый дымчатый кварц, переливающиеся всеми цветами радуги опал и яшма. В Оружейной палате Московского Кремля есть одежда и короны русских царей, сплошь усыпанные кристаллами-самоцветами. Среди них особенно много аметистов (рис. 13), Огромными густо-фиолетовыми аметистами украшена корона русской царицы Ирины Годуновой. В церквях аметистами украшали иконы, алтари, кресты, панагии.

Рис. 14. Большая императорская корона российских царей, украшенная жемчугом и множеством бриллиантов



Самые знаменитые кристаллы — алмазы, которые после огранки превращаются в бриллианты (рис. 14). Разгадать тайну этих драгоценных камней люди пытались многие века. Когда же наконец установили, что алмаз — это одна из разновидностей углерода, никто не поверил! Действительно, ведь алмаз — символ не только богатства, но и необыкновенной твердости. А другая, самая распространенная в природе кристаллическая разновидность углерода — графит. Что сразу всплывает в памяти при этом слове? Ну конечно, грифели карандашей — черные, жирные на ощупь и очень мягкие!

Оказалось, что сверкающие кристаллы, с которыми связано столько романтических (и кровавых) историй, и невзрачный черный графит состоят из одних и тех же атомов углерода. Решающий опыт провел в 1772 г. знаменитый французский химик Антуан Лавуазье. Он обнаружил, что при

сжигании алмаза и обычного угля получается одно и то же вещество — углекислый газ.

И алмаз, и графит — кристаллы. Почему же их свойства так разительно отличаются? Объясняется это разными способами взаимного соединения атомов углерода. В алмазе все связи между атомами углерода одинаковые и прочные, твердым получается и сам кристалл. Строение же кристалла графита слоистое, в нем атомы углерода прочно связаны друг с другом только в одном слое. Такой кристалл похож на пачку бумаги, которую очень трудно разрезать пополам, но легко рассыпать на отдельные листочки.

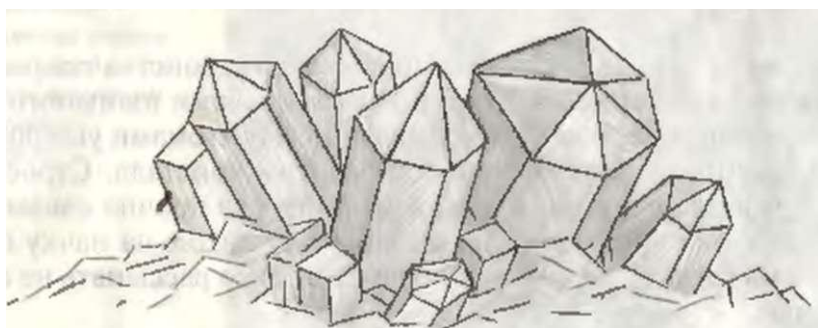
В природе алмазы образуются в недрах Земли при очень высоких температурах и давлениях. Создать в лаборатории условия, при которых из графита можно получить алмаз, ученые смогли лишь спустя почти два столетия после опыта Лавуазье. Сейчас производятся десятки тонн искусственных алмазов. Среди них есть алмазы и для ювелирных целей, однако основная их масса идет на изготовление разнообразных инструментов.

Люди научились получать искусственно очень многие драгоценные камни. Например, подшипники для часов и других точных приборов уже давно делают из искусственных рубинов. Получают искусственно и прекрасные кристаллы, которые в природе вообще не существуют. Вы слышали о фианитах? Это название происходит от сокращения ФИАН — Физический институт Академии наук, где их впервые получили. Фианиты на глаз трудно отличить от алмаза — так красиво они «играют» на свету.

Как растет кристалл

Ученых давно интересовало, как образуются кристаллы; почему разные вещества дают кристаллы разной формы, а некоторые вовсе не образуют кристаллов; что надо сделать, чтобы кристаллы получились большими и красивыми. Исследования показали, что кристаллы — это вещества, в которых мельчайшие частички (атомы, ионы или молекулы) упакованы в определенном порядке. Именно этот порядок и определяет форму кристалла. А зависит он как от геометрической формы частиц, из которых построен кристалл, — ионов или молекул, — так и от того, как они друг к другу притягиваются, какими частями могут соприкасаться, а какими нет. Одни вещества кристаллизуются легко, другие с большим трудом или вовсе не образуют кристаллов. Почему так?

Представьте себе, что вы укладываете паркет, а ваш помощник подает вам плитки. Легче всего работать с квадратными плитками — как такую плитку ни поверни, она все равно подойдет к своему месту, и работа пой-



дет быстро. Труднее выложить паркет из прямоугольных дощечек, особенно если у них с боков есть пазы и выступы — тогда каждую дощечку можно уложить на место лишь одним-единственным способом. А теперь вообразите, что ваш помощник очень торопится и подает плитки быстрее, чем вы успеваете их аккуратно укладывать. Понятно, что правильного узора у вас не получится: где-то плитку перекосит и дальше все пойдет криво, где-то появятся пустоты (как в известной компьютерной игре «Тетрис», когда «стакан» заполняется деталями слишком быстро и вы не успеваете уложить их аккуратно, без промежутков). Также ничего хорошего не получится, если в большом зале паркет начнет укладывать сразу десяток мастеров — каждый со своего места. Даже если они будут работать не спеша, очень сомнительно, что соседние участки окажутся хорошо состыкованы, и наверняка вид пола в целом получится довольно-таки неприглядным: на одних участках плитки окажутся расположенными в разном направлении, а между другими участками посреди ровного паркета будут зиять дыры.

Примерно то же происходит и при росте кристаллов, только сложность здесь еще и в том, что частички должны укладываться не в плоскости, а в объеме. Но ведь паркетчика здесь нет — кто же укладывает частички вещества на свое место? Оказывается, они укладываются сами, потому что непрерывно движутся и ищут самое подходящее для себя место — такое, где им будет удобнее всего. А удобно им будет там, где они в кристалле особенно прочно связаны с другими частицами.

Кристаллизацию обычно ведут при охлаждении раствора. При каждой температуре в данном количестве растворителя (в нашем с вами случае это вода) может раствориться не больше определенного количества вещества (рис. 15). Так, в 100 г воды при 90°C может раствориться 54 г хлорида калия — и ни грамма больше.

Начнем охлаждать раствор. С понижением температуры растворимость большинства веществ уменьшается. К примеру, при 80°C в 100 г воды можно растворить уже не больше 51 г этой соли. Куда же денутся остальные 3 г?

Рис. 15. Зависимость растворимости некоторых веществ от температуры:

1 — хлорид натрия (поваренная соль),
2 — хлорид калия,
3 — медный купорос (безводный),
4 — алюмокалиевые квасцы (безводные),
5 — тиосульфат натрия (безводный),
6 — нитрат аммония (аммиачная селитра).
Обратите внимание, что растворимость поваренной соли практически не меняется с температурой.

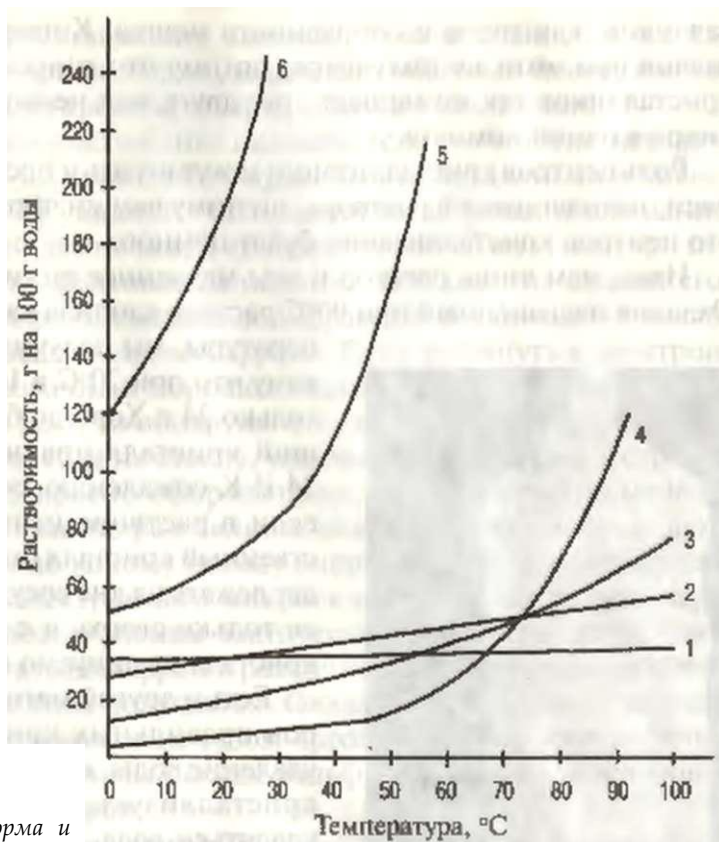


Рис. 16. Большой кристалл хлорида калия (такая же форма и у кристаллов хлорида натрия — поваренной соли)



Они выпадут в осадок. Если вы сольете с осадка воду и рассмотрите его в сильную лупу, то увидите множество мелких кристалликов. Как они образовались?

При охлаждении раствора частички вещества (в данном случае это ионы калия и хлора), которым уже не хватает воды, чтобы находиться в растворенном состоянии, слипаются друг с другом, образуя крошечные кристаллы-

зародыши. Если охлаждение медленное, зародышей образуется немного, и, постепенно обрастая частичками вещества со всех сторон, они превращаются в красивые кристаллики правильной кубической формы (рис. 16). При быстром же охлаждении образуется много центров кристаллизации, а частички из раствора будут «сыпаться» на поверхность растущих кри-

талликов, как горох из порванного мешка. Конечно, правильных кристаллов при этом не получится, потому что множество быстро растущих кристалликов так же мешает друг другу, как несколько мастеров-паркетчиков в одной комнате.

Роль центров кристаллизации могут играть и посторонние твердые примеси, находящиеся в растворе, поэтому чем он чище, тем больше шансов, что центров кристаллизации будет немного.

Итак, чем чище раствор и чем медленнее он охлаждается, тем лучше. Охладив насыщенный при 90°C раствор хлорида калия до комнатной тем-

пературы, мы получим в осадке уже 20 г, потому что при 20°C в 100 г воды растворяется только 34 г. Хорошо бы получить один большой кристалл правильной формы массой 34 г! К сожалению, это не так просто; даже если в растворе начнет расти один-единственный кристалл (что сомнительно), он будет лежать на дне сосуда и сможет разрастаться только сверху и с боков. Поэтому такой кристалл неминуемо получится однобоким.

Есть и другой метод получения из растворов правильных кристаллов; постепенное удаление воды. «Лишнее» вещество при этом кристаллизуется, и чем медленнее будет удаляться вода, тем лучше получатся кристаллы. Можно, к примеру, попросту надолго оставить открытый сосуд с раствором при комнатной температуре — вода при этом будет испаряться очень медленно (особенно если сосуд с раствором неплотно прикрыть листом бумаги: заодно он будет защищать раствор от пыли). В промышленных масштабах большие кристаллы часто получают охлаждением расплавленного вещества (рис. 17).

Конечно, хочется получить большой и красивый кристалл побыстрее. Но тут уж ничего не поделаешь: придется запастись терпением. Для утешения можем сообщить, что кристаллы искусственных драгоценных камней тоже растут очень медленно, иногда годами. Если же вы поспешите, то вместо одного красивого кристалла получите множе-



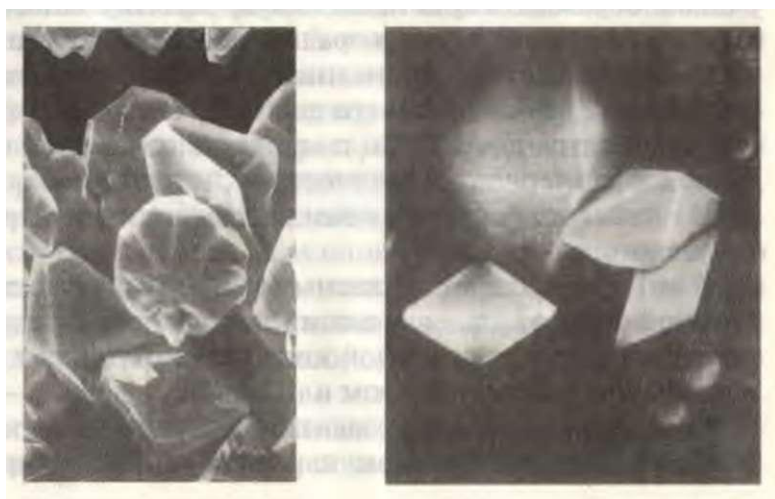
Рис. 17. Кристалл хлорида калия, выращенный из расплава. Форма этого кристалла — «буля» — определялась условиями его роста. Если «булю» расколоть, получатся прозрачные кубические кристаллы — такие, как затравочный кристалл сверху, на котором и началась кристаллизация.

ство мелких. Под микроскопом они выглядят замечательно, так же как замечательно выглядит при сильном увеличении обычный песок, в котором можно даже найти микроскопические драгоценные камни.

Кстати, при сильном увеличении оказывается, что многие невзрачные порошки состоят из крошечных красивых кристалликов — невооруженным глазом их не увидишь. Возможно, вы обращали внимание, что колба перегоревшей лампочки, в которую попал воздух, изнутри покрыта белым или слегка желтоватым налетом. Это осел на стенки сгоревший в воздухе тугоплавкий металл вольфрам: он соединился с кислородом воздуха и образовал оксид вольфрама. Если взглянуть в электронный микроскоп на невзрачный порошок оксида вольфрама (при увеличении в десятки тысяч раз), то обнаружится удивительная картина (рис. 18): молекулы оксида, оседая на стекле, успевают выстроиться в строгом порядке и образуют прекрасно оформленные, но чрезвычайно маленькие кристаллики, которые не разглядишь даже в самую сильную лупу. Трудно сказать, кому и по какому поводу впервые пришло в голову разглядывать с помощью электронного микроскопа налет на стенках перегоревшей лампы. Но потом ученые заинтересовались этим явлением и стали специально сжигать вольфрам в различных по составу смесях, чтобы разглядеть, что при этом получается. Оказалось, например, что если кислород смешать с благородным газом аргоном (а не с азотом, как в обычном воздухе), то кристаллы оксида вольфрама получаются в форме восьмигранников — октаэдров.

Изучая различные условия формирования кристаллов разных соединений, можно понять, каким законам подчиняются эти процессы, и в результате научиться выращивать нужные кристаллы определенной формы.

Рис. 18. Кристаллы оксида вольфрама (при очень сильном увеличении), образовавшиеся в процессе сгорания вольфрамовой спирали в воздухе (слева) и в смеси кислорода и аргона (справа).





Вещества для опытов с кристаллами

Проще всего выращивать кристаллы из водных растворов. Но для этого годятся далеко не все растворимые в воде кристаллические соединения. Трудно, например, вырастить большие кристаллы поваренной соли; ее растворимость в воде почти не зависит от температуры, и большой затравочный кристалл (что это такое, прочитаете чуть позже) получить не удастся. Так же трудно получить и большие кристаллы сахара. Здесь причина другая: насыщенный раствор сахара (сахарный сироп) очень вязкий, а вязкие жидкости кристаллизуются с большим трудом. Например, температура плавления глицерина 20°C , но попробуйте получить его в кристаллическом виде — вряд ли у вас что-нибудь выйдет. Дело в том, что глицерин уже при комнатной температуре сильно вязкий, а при охлаждении становится совсем густым. При этом молекулам глицерина, которые к тому же не очень симметричны, чрезвычайно трудно выстроиться в строгом порядке и образовать кристаллическую решетку. Вместо этого они застывают как попало, образуя прозрачную массу, похожую на стекло. Подобное состояние вещества так и называют — стеклообразным. Пример — обычное оконное стекло. Если его долго держать сильно нагретым, частицы в нем становятся достаточно подвижными, и начинают расти кристаллы. Такое стекло теряет прозрачность.

Из каких же доступных вам веществ можно выращивать кристаллы? Вот некоторые из них.

В аптеках продаются квасцы (точнее — алюмокалиевые квасцы, или двойной сульфат калия — алюминия). Квасцами с древних времен называют различные соли серной кислоты, содержащие два металла: один из них обычно алюминий, хром или железо, а другой — калий, натрий и др. Почему же соли называли квасцами? Еще в «Повести временных лет», датируемой XI в., описан квас как «особый кислый напиток». В польском

языке слово «квас» до сих пор означает «кислота». Так что если вам случится побывать в Польше и зайти в химическую лабораторию, ни в коем случае не пейте из склянки, на которой написано «Kwas»! В ней вовсе не приятный напиток, а кислота.

У квасцов действительно есть некоторые свойства кислот: например, на вкус они кислые. Только не вздумайте проверять это сами! Вкус многих химических соединений (в том числе и исключительно ядовитых, например синильной кислоты) известен потому, что в прошлом химику, открывшему новое соединение, полагалось описать различные его свойства, в том числе и вкус. Сейчас пробовать на вкус различные вещества в лабораториях считается верхом химической безграмотности.

Алюмокалиевые квасцы применяют в текстильной промышленности при крашении тканей, в кожевенной — при выделке кож, в бумажной — при проклеивании бумаги (на непроклеенной бумаге — газетной, фильтровальной — чернила будут расплываться). Используют квасцы и в медицине: как кровоостанавливающее средство (в виде карандаша) и против пота прокаленные, или жженные (они хорошо впитывают воду).

Красивые прозрачные кристаллы квасцов содержат также воду. Одна-ко вода из них не «выливается», даже если их очень сильно потрясти. Дело в том, что молекулы воды в кристаллах квасцов химически связаны. Эту воду так и называют — кристаллизационная. Если квасцы оставить открытыми на сухом воздухе, они начнут выветриваться и постепенно ее терять. При этом прозрачность кристаллов пропадает, и они превращаются в белый порошок. (Как видите, для выветривания ветер вовсе не обязателен. Геологи выветриванием называют процесс постепенного разрушения горных пород под воздействием различных природных факторов: перепада температур, дождя и т. д.)

Хорошие кристаллы получают и из медного купороса — красивого синего порошка. Это вещество прекрасно знают садоводы: его используют для борьбы с вредителями растений. В старину купоросом называли некоторые соли серной кислоты. Современное название медной соли серной кислоты — сульфат меди. В медном купоросе тоже содержится кристаллизационная вода. Если его сильно нагреть, он полностью потеряет воду и превратится в невзрачный серый порошок безводного сульфата меди. Но стоит только смочить этот порошок водой или просто оставить на влажном воздухе, как синяя окраска появится снова. Так химики узнали, что своим красивым цветом медный купорос и многие другие соединения меди обязаны совместному присутствию положительно заряженных атомов — ионов меди и молекул воды. Кроме медного, есть еще железный и цинковый купоросы.

Растворимые соли меди, к которым относится и медный купорос, ядовиты не только для вредителей растений, но и для человека. Поэтому ра-

ботать с этим веществом надо очень аккуратно и организовать дело так, чтобы крупинки синего порошка ни в коем случае не попали на пищевые продукты. Пользуйтесь только специальной посудой, пометьте ее — например, наклейте на стенку кусочек пластыря и напишите на нем: «Для опытов». После работы с медным купоросом вымойте руки с мылом — это соединение хорошо растворяется в воде и легко смывается с кожи.

Очень интересные опыты можно поставить с тиосульфатом натрия. У этого вещества, если оно не содержит воды, вид белого порошка. А если кристаллизационная вода в нем есть, он образует прозрачные кристаллики, похожие на сахарный песок. Тиосульфат натрия хорошо знаком всем фотолюбителям. Его часто называют гипосульфитом и используют в качестве фиксажа (закрепителя) при проявлении фотопленок и печатании черно-белых фотографий. Раствор тиосульфата натрия «закрепляет» полученное фотографическое изображение. Раньше существовало еще одно его название — антихлор: растворы тиосульфата натрия очень быстро обезвреживают ядовитый газ хлор; это их свойство использовалось во время первой мировой войны — при газовой атаке хлором солдаты дышали через марлю, смоченную раствором тиосульфата.

Тиосульфат натрия не ядовит. Его применяют в медицине: наружно — для лечения различных кожных заболеваний, в том числе чесотки; внутрь — при отравлении мышьяком, ртутью, свинцом, синильной кислотой и ее солями; вводят внутривенно — при аллергических и некоторых других заболеваниях. Но это не значит, что можно разбрасывать тиосульфат где придется. Даже работая с относительно безвредными веществами, будьте внимательны и аккуратны! И не забывайте, что кристаллики тиосульфата очень похожи на крупный сахарный песок, следите, чтобы никто случайно не перепутал химикат с пищевым продуктом.

На воздухе тиосульфат натрия, как и медный купорос, тоже выветривается. При этом на прозрачных кристалликах появляется белый налет.

И медный купорос, и тиосульфат натрия можно приобрести в магазинах: первый — в торгующих удобрениями, второй — фототоварами.

Выращиваем кристаллы

Многие видные ученые, внесшие большой вклад в развитие химии, минералогии, других наук, начинали свои первые школьные опыты именно с выращивания кристаллов. Опыты эти относительно просты, но их результаты могут вызвать удивление и восхищение даже у тех, кто никогда не интересовался химией.

Мы уже говорили, что кристаллы могут расти как при охлаждении горячего раствора, так и при испарении воды из холодного раствора.

Используем оба метода. Первый — для получения затравки, кристаллика, из которого потом вырастим один большой кристалл, но уже по второму методу. Чтобы в растворе с растущими кристаллами было меньше центров кристаллизации, посуда должна быть хорошо вымыта, вода чистая и кипяченая, реактивы и растворы не загрязнены посторонними веществами.

Начнем с выращивания кристаллов квасцов. Как получить хороший кристалл для затравки? Если просто растворить в горячей воде как можно больше вещества (до насыщения) и оставить раствор остывать, температура в нем будет понижаться слишком быстро, и образуется слишком много мелких кристаллов. А нам нужно получить кристаллы чем крупнее, тем лучше. Чтобы замедлить охлаждение раствора, неплохо воспользоваться маленьким (емкостью 1—2 стакана) термосом. Насыпьте в него несколько столовых ложек вещества, предназначенного для выращивания кристаллов, залейте кипяченой водой, нагретой почти до кипения, неплотно закройте крышкой и осторожно взболтайте, чтобы вещество быстрее растворилось. Поставьте термос с раствором в безопасное место на ночь.

Несмотря на все предосторожности, в термосе вряд ли вырастет один кристалл. Скорее всего, там на следующий день окажется много небольших кристаллов, однако среди них попадутся и довольно крупные. Очень важно не прилагать никаких механических усилий, чтобы вынуть кристаллы из баллончика, — обязательно разобьете стекло! Если на стенках и дне образовалась сплошная корка приставших к ним кристаллов, слейте раствор в другую посуду, а в термос налейте немного горячей воды и взбалтывайте его до тех пор, пока кристаллы не удастся выплеснуть вместе с водой. Не огорчайтесь, если они при этом частично растворятся, — потом это легко будет исправить.

Если дома нет маленького термоса или вам не разрешат взять его для опытов, не расстраивайтесь. Возьмите пробирку (или аптечную склянку из-под лекарства) и сделайте вокруг нее теплоизоляцию из ваты, пенопласта, поролона или других веществ. Крепко обвяжите ниткой или проволокой теплоизолирующий материал и вставьте получившееся неустойчивое сооружение в кружку или банку так, чтобы пробирка стояла вертикально. Теперь аккуратно насыпьте в нее (примерно на $\frac{1}{5}$ ее высоты) квасцы, налейте (до половины) кипятку, закупорьте пробкой или бумагой, а сверху прикройте ватой либо другим теплоизолирующим материалом. Пусть пробирка несколько часов постоит.

Когда раствор остынет, аккуратно вытряхните кристаллы на лист чистой бумаги (если они не выпадают, опустите пробирку ненадолго в горячую воду). Образовавшиеся кристаллики, пожалуй, разочаруют вас: они получились какие-то кособокие, некрасивые и довольно маленькие. Ничего не поделаешь: кристаллов выросло много, и при росте они друг другу



Рис. 19. Так растет подвешенный на нитке кристалл из насыщенного раствора при медленном испарении воды.

мешали. Но зато среди них всегда можно выбрать один покрупнее, и желательно не очень уродливый, а уж настоящая красота придет к нему позже.

Итак, выберите самый хороший с вашей точки зрения кристалл. Остальные больше не нужны: считайте, что они принесены «в жертву» вашему избраннику.

Теперь вам понадобится кристаллизатор, в котором выбранный вами кристалл будет расти дальше по второму способу — при медленном испарении воды. Кристаллизатором может стать стакан, чашка, кружка или стеклянная консервная банка. Будет нужна еще одна банка — с пробкой или плотной крышкой: в нее вы пересыпете все остальные кристаллы, остаток

неиспользованных квасцов или купороса и зальете все оставшееся у вас раствором. Здесь станет храниться насыщенный раствор квасцов: назовем его запасным раствором. В эту банку вам придется периодически подливать чистую холодную кипяченую воду, следя, чтобы на дне всегда оставалось столько же нерастворившихся кристалликов. Тогда запасной раствор над ними всегда окажется насыщенным: в нем при данной температуре вещество больше не будет растворяться.

Но займемся кристаллизатором — ведь кристалл выращивается именно в нем. Сделайте к кристаллизатору крышку — картонный кружок с небольшим отверстием в центре. Обвяжите выбранный вами кристалл тонкой белой ниткой (лучше синтетической) и проденьте ее свободный конец в отверстие в крышке. Закрепите нитку пластилином или спичкой так, чтобы кристалл повис на ней в центре кристаллизатора, не касаясь дна и стенок (рис. 19). Аккуратно залейте кристаллизатор насыщенным запасным раствором квасцов из второй банки: он должен полностью покрыть висящий кристалл. Внимание! Если раствор будет ненасыщенным, висящий кристалл растворится, и опыт придется начинать сначала. Поэтому выдержите запасной раствор над кристаллами не менее суток. И еще одно предупреждение: если вы по какой-либо причине перенесете банку с запасным раствором в более теплое место, раствор в ней сразу станет ненасыщенным, и его снова придется выдержать сутки перед тем, как подливать в кристаллизатор. Лучше, когда и банка с запасным раствором, и кристаллизатор стоят рядом, при одной температуре,

Может случиться, что после охлаждения горячего раствора среди выпавших кристаллов не окажется ни одного достаточно большого и хоро-

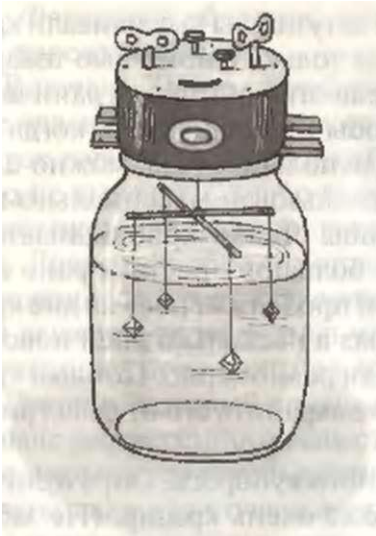


Рис. 20. Кристаллы, насаженные на ось минутной стрелки будильника, медленно вращаются, равномерно омываясь раствором.

шего, подвешивать на нитке будет нечего. Тогда просто положите кристаллик по-крупнее на дно кристаллизатора и залейте его насыщенным запасным раствором. Раз в день поворачивайте кристаллик с боку на бок. Спустя время он подрастет, и вы сможете его подвесить.

Кристалл, подвешенный на нитке, свободно растет во все стороны, поэтому немного погодя он принимает правильную форму, свойственную данному веществу. Для алюмокалиевых квасцов это октаэдр (представьте себе две египетские пирамиды, сложенные вместе основаниями, — получится октаэдр). Даже если форма кристалла сначала была неправильной, он все равно рано или поздно превратится в октаэдр. Больше того, если кристалл правильной формы специально испортить (отбить у него вершины, повредить ребра

и грани), то при дальнейшем росте в насыщенном растворе он начнет самостоятельно «залечивать раны»? Ученые проводили такие опыты: правильный красивый кристалл, например октаэдр, обтачивали так, что получался шар. И все равно в растворе из него снова вырастал кристалл той формы, которая характерна именно для данного вещества. Только учтите: если покалеченный кристалл слишком большой, у вас для восстановления его первоначальной формы может просто не хватить запасного раствора — ведь во время «лечения» кристалл продолжает непрерывно расти. Поэтому понаблюдайте, как это происходит с маленьким затравочным кристаллом, подвешенном на ниточке: вы увидите, как постепенно «нужные» грани будут увеличиваться, вытесняя «неправильные».

Итак, кристалл начал расти. Постарайтесь, чтобы температура кристаллизатора со временем не менялась, чтобы растущий кристалл был всегда покрыт слоем насыщенного раствора (его надо периодически подливать) и чтобы стенки и дно кристаллизатора, нить и сам кристалл не обрастали новыми маленькими кристалликами. Для этого нужно время от времени чистить кристаллизатор: сливать из него и переносить на время выросшие кристаллики в запасной раствор. Кристалл лучше всего растет, когда омывается раствором равномерно. В лабораториях раствор для этого перемешивают, а вот юные химики из химического кружка криворожской станции юных техников приспособили... старый будильник (рис. 20).

Размер кристалла, который можно вырастить таким способом, теоре-

тически безграничен. Известны случаи, когда энтузиасты выращивали кристаллы такой величины, что поднять их могли только с помощью товарищей. У вас же, к сожалению, количество вещества обычно ограничено. Важен и размер кристаллизатора: лучше, чтобы в конце опыта, когда запасного раствора останется мало, кристалл располагался как можно ближе к стенкам, тогда запас вещества будет использован максимально эффективно. С этой же целью желательно, чтобы стенки кристаллизатора были прямые, но суживались вверх. И еще: большой кристалл рано или поздно оборвет нитку. Ничего страшного — он продолжит рост на дне кристаллизатора. Только не забывайте хотя бы раз в несколько дней поворачивать его на другой бок, чтобы все грани росли равномерно. Готовый кристалл покройте бесцветным лаком, чтобы предохранить его от выветривания.

Точно так же выращивают и кристалл медного купороса. Он, в отличие от кристалла квасцов, несимметричен, но тоже очень красив. (Не забывайте после работы с медным купоросом тщательно мыть руки!)



Переохлажденные растворы

Вы, наверное, слышали, что в США температуру измеряют в градусах Фаренгейта. Эту температурную шкалу ввел в начале XVIII в. искусный голландский стеклодув Габриэль Фаренгейт, который первым начал изготавливать точные термометры. В поисках постоянных точек для своей температурной шкалы Фаренгейт наблюдал замерзание и плавление различных веществ. Однажды, проводя опыты с чистой водой, он обнаружил удивительное явление: вода в закрытой посуде на сильном морозе за ночь не замерзла. Но стоило Фаренгейту открыть банку, как она моментально начала замерзать, в ней появилось множество игольчатых быстро растущих кристаллов льда. Кристаллизацию вызывало также резкое встряхивание банки. Повторив опыты с водой и различными раствора-

ми, Фаренгейт убедился, что это не такое уж редкое явление. Назвали его переохлаждением.

В начале XIX в. петербургский академик Т. Е. Ловиц наблюдал похожее явление — пересыщение раствора. Оказалось, что в чистом закрытом сосуде горячий насыщенный раствор можно охладить, но кристаллы из него не выпадут. Однако даже маленький кристаллик, внесенный в такой пересыщенный раствор, вызовет в нем массовый рост больших кристаллов. Ловиц так образно описал это явление: «Мне представилось, будто находящиеся в растворе соляные частицы борются за преимущество первой выделиться из воды и что та частица, которой это удалось, подобно полководцу, подает сигнал другим следовать за собой».

Раствор, который содержит в определенном количестве растворителя больше растворенного вещества, чем это «положено» при данной температуре, называется пересыщенным. Пересыщенный раствор невозможно получить, даже если очень долго перемешивать кристаллы с растворителем. Он может образоваться только при охлаждении горячего насыщенного раствора. Поэтому такие растворы называют также переохлажденными.

Началу кристаллизации в пересыщенном растворе что-то мешает: например, он слишком вязкий или для роста в нем кристаллов необходимы большие зародыши, которых там нет. Но если в переохлажденный раствор внести готовый зародыш, например маленький кристаллик этого же вещества, то начнется бурная кристаллизация. Интересно, что быструю кристаллизацию вызывает кристалл только того же вещества, а к постороннему раствор оказывается совершенно безразличен.

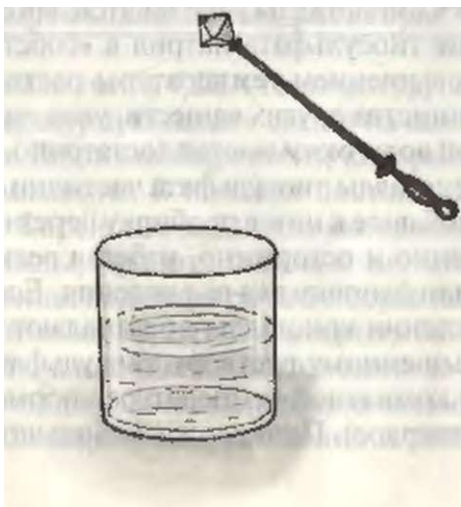
Давайте проведем красивый опыт с тиосульфатом натрия. Насыпьте немного этого вещества в пробирку (примерно до середины). Ее отверстие прикройте кусочком ваты. Осторожно опустите нижнюю часть пробирки в горячую, но не кипящую воду: уровень горячей воды должен быть выше уровня кристаллов в пробирке. Когда содержимое пробирки нагреется примерно до 56°C , кристаллы расплавятся. На самом деле это не плавление, а растворение тиосульфата натрия в «собственной» кристаллизационной воде. С повышением температуры растворимость тиосульфата натрия, как и большинства других веществ, увеличивается, и при 56°C его кристаллизационной воды оказывается достаточно, чтобы растворить весь тиосульфат. Если кристаллы тиосульфата частично выветрились и покрыты белым налетом, добавьте к ним в пробирку перед нагреванием несколько капель воды. Медленно и осторожно, избегая резких толчков, поставьте пробирку в стакан или баночку для охлаждения. Если пробирка была чистой, то при ее охлаждении кристаллы не выпадают.

Поможем пересыщенному раствору тиосульфата перейти в нормальное состояние (при комнатной температуре — «нормальное» состояние для вашего вещества — твердое). Прикрепите небольшой кристаллик тиосуль-

фата к концу стеклянной палочки пластилином. Осторожно откройте пробирку и введите в нее палочку так, чтобы кристаллик коснулся поверхности раствора. Произойдет настоящее чудо: от кристаллика побежит фронт кристаллизации, который быстро дойдет до дна пробирки, и через несколько секунд жидкость в ней полностью затвердеет. Переверните пробирку — из нее не выльется ни одной капли!

Твердый тиосульфат можно снова расплавить в горячей воде и повторить все сначала. Понаблюдайте внимательно, как растут кристаллы в пересыщенном растворе, это очень красивое зрелище. Попробуйте поставить пробирку с переохлажденным раствором в ледяную воду — кристаллы будут расти медленнее, но станут крупнее.

Этот опыт вполне можно показывать как фокус с волшебной палочкой, которая превращает воду в лед. Можно вообще обойтись без палочки, а незаметно бросить кристаллик в пробирку и произнести «заклинание», А можно сделать и так; покрыть прикрепленный к концу палочки кристаллик очень тонким слоем воска или парафина (предварительно расплавленного). Теперь если палочка чистая, внесите ее в раствор — и ничего не произойдет. Но стоит надавить концом палочки на дно, как слой воска нарушится, раствор получит доступ к заправочному кристаллу — и начнется быстрая кристаллизация, но только со дна пробирки. Конечно, палочку теперь из застывшей массы не вытащить, пока вещество снова не будет расплавлено. Момент надавливания палочкой на дно можно также обставить как фокус, который практически невозможно разгадать. Например, зрители хором считают до десяти, и на счет «десять» жидкость начинает твердеть. Одним словом, все зависит от вашей фантазии. Единственное замечание: при повторных опытах вода понемногу испаряется, поэтому время от времени нужно добавлять в пробирку несколько капель чистой воды. Полезно добавить и 1–2 капли глицерина (если он у вас есть): глицерин помогает пересыщенному раствору надолго оставаться в жидком состоянии.





«Золотой дождь» из кристаллов

Для подготовки этого опыта нужны специальные реактивы, поэтому дома его не поставишь. Но в школьном кружке его провести можно. Называется этот опыт красиво: «Золотой дождь». Заключается он в следующем.

В пробирку с водой вносят немного (несколько миллиграммов) желтого порошка и помещают ее (пробирку) в кипящую воду. Порошок полностью растворяется. После охлаждения в растворе образуются замечательные тончайшие листочки, как будто сделанные из чистого золота. При осторожном взбалтывании раствора они начинают плавать, поблескивая на свету.

Что же это за порошок? Конечно, к золоту он не имеет никакого отношения. (Помните поговорку: «Не все то золото, что блестит»?) Желтое вещество — это соединение свинца с йодом — йодид свинца.

Опасны ли опыты с йодидом свинца? Вы, конечно, знаете, что свинец и его соединения очень ядовиты. Даже малая доза свинца, попав в организм человека, почти не выводится оттуда, а накапливается там (в основном в костях), и при этом его ядовитое действие год от года усиливается. В то же время свинец используют очень широко — из него самого и его сплавов делают оболочки кабелей, пластины аккумуляторов, типографский сплав. Многие слышали о ядовитом этилированном бензине: в обычный бензин для повышения мощности двигателя добавляют очень ядовитую жидкость — тетраэтилсвинец. После сгорания бензина свинец (в основном в виде соединения с бромом) попадает в выхлопные газы и загрязняет окружающую среду, особенно обочины дорог. Поэтому-то и не рекомендуется собирать грибы и ягоды вблизи автомобильных трасс.

Однако ядовиты только растворимые соединения свинца, например раствор свинца в уксусной кислоте (так называемый «свинцовый сахар»,

из которого делают свинцовую примочку). Растворимые соединения ядовитого свинца при попадании внутрь организма могут пройти сквозь стенку кишечника и всосаться в кровь. Но йодид свинца растворяется очень плохо: при комнатной температуре в 1 г воды его может раствориться всего 0,0007 г — а опасная для человека доза свинца измеряется граммами. Поэтому в малых количествах йодид свинца неопасен (по сравнению с растворимыми соединениями свинца), и вы смело можете показывать «золотой дождь» из кристаллов.

Похожее происходит и с металлом барием. Все его растворимые соединения очень ядовиты. Но когда человеку делают рентген желудка, ему предварительно дают выпить «бариевую кашу» — водную взвесь сульфата бария, который в воде не растворяется и поэтому полностью выводится из организма. Пьют же эту «кашу» потому, что барий не пропускает рентгеновские лучи, и на экране удастся разглядеть очертания желудка и кишечника в виде тени на светлом фоне. Еще один аналогичный пример — каломель, нерастворимое соединение ртути. Раньше каломель применяли в медицине как слабительное, желчегонное и мочегонное средство. Сейчас ее используют только как наружное — в виде мазей.

Выращиваем кристаллы меди

Ну а сейчас, в нашем последнем опыте, давайте вырастим из медного купороса кристаллы... меди. Да-да, это не опечатка: именно металлической меди! «Но разве можно вырастить кристаллы металла?» — спросите вы. А почему бы и нет? Кристаллы меди получают даже на уроках химии, проводя реакцию железа с раствором медного купороса. Когда в раствор соли меди погружают железный гвоздь, железо, как более активный металл, вытесняет медь из ее соединения, и гвоздь покрывается красным медным налетом. Так вот, это самые настоящие кристаллы меди! Они такие маленькие, что различить отдельные кристаллики можно лишь с помощью очень сильного (электронного) микроскопа.

Бывают кристаллы металлов и покрупнее. Например, на поверхности только что застывшего расплавленного цинка или на его изломе, а также на новом оцинкованном ведре отчетливо видны кристаллы этого металла. Русский металлург Д. К. Чернов описал в 70-х гг. XIX в. кристалл стали, который он нашел внутри 100-тонного металлического слитка. В полости застывшей стальной отливки вырос ветвистый кристалл длиной более 40 см — это самый большой из известных металлических кристаллов.

В предыдущих главах рассказывалось, в каких случаях кристаллы получаются мелкими и что надо сделать, чтобы они выросли крупнее. На

поверхности железного гвоздя медь выделяется чрезвычайно быстро, поэтому и кристаллы ее слишком мелкие. Огромная стальная болванка, о которой писал Чернов, застывала очень медленно, потому-то и кристалл в ней вырос большой. Значит, чтобы вырастить кристалл меди покрупнее, процесс выделения металлической меди из раствора на поверхности железа надо замедлить.

Сделать это можно так. Возьмите небольшую стеклянную банку. Положите на ее дно несколько кристаллов медного купороса (лучше покрупнее). Как выращивать такие кристаллы, вы уже знаете. После выращивания одного большого кристалла у вас еще останется достаточно медного купороса в виде насыщенного раствора. Из него-то и можно получить медленным испарением несколько кристаллов для нашего опыта.

Засыпьте кристаллы на дне банки слоем тонкой поваренной соли толщиной несколько сантиметров. На соль положите кружок фильтровальной бумаги — он должен доходить до самых стенок банки. На этот кружок положите еще один — железный, диаметром чуть поменьше предыдущего. Его можно вырезать из крышки старой консервной банки (только не порежьтесь об острые края!). С крышки надо счистить наждачной бумагой тонкий слой олова.

Приготовьте в отдельной посуде насыщенный раствор поваренной соли и аккуратно налейте его в банку так, чтобы он покрывал железный кружок. Закройте банку плотнее крышкой, поставьте ее на полку и ждите. Что произойдет, можно предсказать заранее. Медный купорос начнет медленно растворяться в рассоле. Рассол не чистая вода, растворимость купороса в нем меньше. Ионы меди будут очень медленно подниматься вверх. Этот процесс называется диффузией. За ним можно наблюдать сквозь прозрачные стенки банки по движению окрашенной границы. Обратите внимание, как будет изменяться цвет ионов меди в присутствии хлорид-ионов из поваренной соли. Достигнув железной пластинки, ионы меди начнут превращаться на ней в атомы металла. Но так как процесс этот очень медленный (ионы меди подходят к пластинке с малой скоростью), образующиеся понемногу атомы меди будут успевать выстраиваться в красивые блестящие кристаллы металлической меди. Иногда они сростаются и образуют гроздь — дендриты.

Меняя условия опыта (температуру, размер кристаллов купороса, толщину слоя соли и т. п.), можно менять и условия кристаллизации меди. Когда вы закончите опыт (а он может продолжаться одну-две недели и больше), извлеките полученные медные кристаллы. Чтобы они оставались такими же блестящими и не потускнели со временем, надо покрыть их бесцветным лаком или же хранить в плотно закупоренной баночке, наполненной доверху водой с несколькими каплями уксуса, — это предохранит поверхность меди от окисления кислородом воздуха.

ХИМИКИ РАЗГАДЫВАЮТ ТАЙНЫ СВЕЧЕНИЯ



Свет «горячий» и «холодный»

Из многих загадок природы явления, связанные со светом и цветом, одни из самых удивительных. Многообразие цвета в природе поразительно. Чтобы убедиться в этом, не обязательно ехать в тропические страны или в зоопарк, где глаза разбегаются от богатства красок на оперении экзотических птиц и бабочек. Походите по осеннему лесу или парку: «пышное природы увяданье», которое так любил А. С. Пушкин, радует глаз тысячами оттенков зеленого, желтого, красного» Все это — результат химических реакций, протекающих в зеленой траве и зеленых листьях, когда уменьшается световой день и наступают холода.

Изменение цвета веществ при химических реакциях привлекало внимание людей с давних пор, когда химии как науки не было еще и в помине. Методом проб и ошибок древние научились, например, окрашивать белую ткань в прекрасный пурпурный цвет, не зная ничего о сущности происходящих при этом химических превращений. Не знали они и о том, что человек видит предмет окрашенным лишь в результате избирательного поглощения краской отдельных цветов из смеси всех «цветов радуги», то есть из белого света. Если предмет, освещаемый естественным «белым» светом, полностью его отражает и не поглощает лучи какого-либо одного цвета, то он кажется нам белым как снег (недаром существует красивое слово «белоснежный»). Если же предмет поглощает все «радужные цвета» и ничего не отражает, то он будет черным даже при самом сильном освещении. Все это люди узнали сравнительно недавно, а в древности некоторые философы были уверены, что мы видим предметы потому, что человеческий глаз, испуская свет, как бы ощупывает им различные тела.

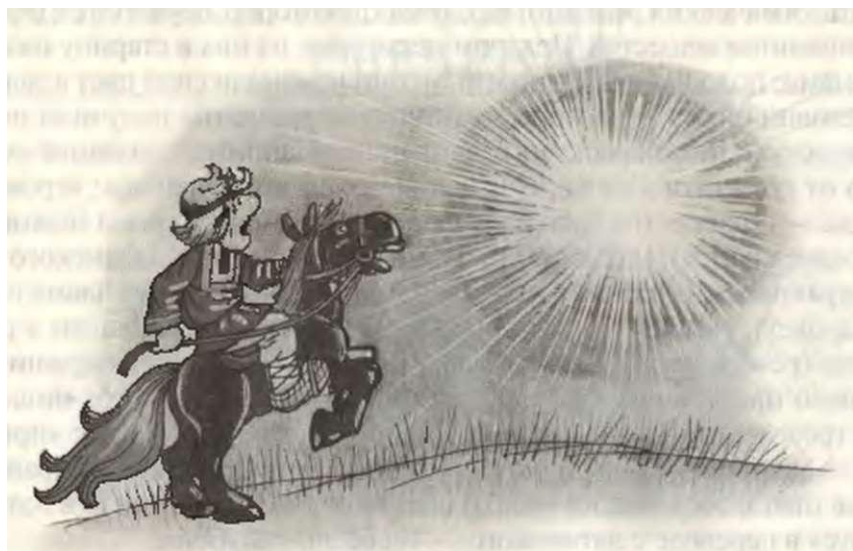
Не счесть химических реакций, в результате которых образуются или исчезают окрашенные вещества. Недаром некоторые из них в старину называли хамелеонами: подобно этим животным, они изменяли свой цвет в зависимости от условий опыта. Некоторые химические элементы получили название за их окраску (или за окраску их соединений). Например, название «хлор» произошло от греческого слова, означающего «желто-зеленый»; «хром» на том же языке — «краска» (из ярко окрашенных соединений хрома можно получать хорошие краски); название «рубидий» произошло от латинского слова и означает «красный» (соединения этого металла окрашивают пламя в темно-красный цвет); раствор металла родия в царской водке окрашен в розовый цвет (по-гречески «родон» — розовый); соединения индия окрашивают пламя в синий цвет, напоминающий цвет синей краски индиго; «йодос» в переводе с греческого — «фиолетовый» (такой цвет у паров йода); «ирис» в переводе с этого же языка — «радуга»: соединения металла иридия окрашены в различные цвета; соединения металла цезия окрашивают пламя в голубой цвет: «цезиус» в переводе с латинского — «небесно-голубой».

Вы, конечно, знаете, что без света нет и цвета; недаром говорят, что в темноте все кошки серы. Химия цвета, точнее, химия красителей — большая отдельная область науки. Ей посвящено много книг, в том числе и популярных. Здесь же мы поговорим о том, без чего нет цвета, то есть о свете, вернее, о его источниках.

Испокон веков свет и тепло были неразрывно связаны между собой. Сколько люди себя помнили, они знали лишь два источника света и тепла — огонь на Земле и Солнце на небе. Люди догадывались, что без солнечного света и тепла жизнь невозможна, поэтому не удивительно, что у многих древних народов Солнце было одним из главных богов. В древнеегипетской мифологии Солнце — царь Вселенной, творец всех существ, в том числе и людей, а земной царь — сын Солнца.

Но избыток огня так же губителен, как и его отсутствие. Люди видели, что бывает в жаркие засушливые годы, слишком хорошо знали они и разрушительную силу земных пожаров. Вы, возможно, слышали поэтичный древнегреческий миф о Гелиосе — боге Солнца. Греки рассказывали, как ежедневно на четверке коней в золотой колеснице выезжает на небо бог Солнца Гелиос. Он старается не подниматься слишком высоко, чтобы не сжечь небо, и не опускаться слишком низко, чтобы не спалить землю. Но однажды заведенный в мире порядок был нарушен, и вместо бога Солнца в колесницу сел его смертный сын Фаэтон. Напрасно Гелиос отговаривал сына от этой затеи. Слишком хотелось юному и горячему Фаэтону доказать всем вокруг, что он сын бога Солнца. Юноша не справился с конями, и они понесли, не разбирая дороги, чуть не погубив Землю. Погиб и дерзкий Фаэтон.

Меньше у нас известен древнекитайский миф об искусном стрелке,



которого звали И: когда на небе появилось сразу десять солнц, И избавил людей от засухи, поразив из лука девять из них. Об уничтожении героем-лучником «лишних» солнц можно прочесть и в мифах народов нижнего Амура и Сахалина.

В противоположность солнечному теплу и свету, ночью Землю освещал «холодный» свет Луны и звезд. Происхождение всех этих природных источников света было неведомо людям вплоть до новейших времен. Еще в 1620 г. английский философ Фрэнсис Бэкон, систематизировав известные к тому времени данные о тепле и холоде, отнес к теплым, или положительным, инстанциям «солнечные лучи, преимущественно летом и в полдень», а к холодным, или отрицательным, инстанциям — «лучи Луны, звезд и комет»,

Свет, не связанный с источником тепла, «холодный», поражал воображение людей не меньше, чем «горячий». Упоминание о «холодном свете» встречается в легендах, сказках и песнях разных народов. Его связывали с чудесами и волшебством. В сказке «Конек-горбунок» есть строки, посвященные «чудесному огню»:

Огонек горит светлее,
Горбунок бежит скорее.
Вот уж он перед огнем.
Светит в поле словно днем.
Чудный свет крутом струится,
Но не греет, не дымит.
Диву дался тут Иван.
«Что, — сказал он, — за шайтан!

Шапок пять найдется свету,
А тепла и дыма нету.
Эко чудо-огонек!»

Сейчас «холодным светом» никого не удивишь: вечером на улицах горят рекламные огни, которые «светят, но не греют». Светятся экраны телевизоров и компьютеров, надписи «ВЫХОД» в залах театров и кинотеатров, цифры и стрелки на некоторых часах, светятся ночью волны в океане и светлячки в лесу — всего не перечислишь. Что же вызывает свечение тел? Происходят ли при этом химические реакции?

Мы расскажем о нескольких естественных и искусственных источниках света. Их излучение — следствие физических, химических и биологических процессов. В исследованиях, изобретениях и технических разработках этих источников участвовали ученые разных специальностей.

Какие бывают лампы

Самый универсальный способ заставить тело испускать свет — сильно нагреть его. Так излучают свет сильно нагретый металлический прут, спираль электроплитки, электрическая лампочка, Солнце и звезды, свечка, факел и другие горящие вещества. Чем выше температура, тем энергичнее движутся атомы в веществе. При достаточно сильном нагреве атомы любого вещества, сталкиваясь друг с другом, способны возбуждать находящиеся в них электроны, которые приобретают дополнительную энергию. Чем выше температура, тем с большей силой сталкиваются атомы, тем больше энергии способны запасти электроны. Однако долго удержать «излишек» энергии они не могут: через очень короткое время электроны теряют запасенную энергию, возвращая ее в виде фотона — частицы света (в переводе с греческого «фотон» значит «свет»). Разные электроны разных атомов при нагреве запасают (а затем испускают) разную энергию. Поэтому нагретое тело излучает фотоны разного цвета. Чем меньше энергия фотона, тем краснее свет, а чем она выше, тем свет голубее. При очень слабом нагреве вещества энергия фотонов такая низкая, что глаз их не воспринимает; они греют, но не светят. Свет, состоящий из таких фотонов, называется инфракрасным, потому что он находится за пределами красной области спектра и невидим. Много инфракрасных лучей испускает, например, хорошо протопленная печка.

Если постепенно повышать температуру тела, оно начнет светиться. По цвету свечения металла опытный металлург может определить его температуру. Будем пропускать через спираль от электроплитки (она сделана из тугоплавкого сплава) все более сильный электрический ток. Сначала спираль остается темной, хотя и горячее, а потом начинает светиться.



Рис. 21. Зарево в ночном небе от горящего немецкого дирижабля «Гинденбург». Катастрофа произошла 6 мая 1937г. в американском штате Нью-Джерси. При этом 190 000 м³ водорода, которым был наполнен дирижабль, сгорели менее чем за пять минут, унеся жизни 35 человек. Современные дирижабли наполняют негорючим (хотя и дорогим) газом гелием.

Сперва свет разогреваемого металла будет чуть заметен в темноте («красное каление»). Затем, с повышением температуры, металл станет ярко-красным, потом желтым, а когда нагреется «до белого каления» (как угли электрической дуги), в его излучении появятся все цвета радуги. Правда, спираль электроплитки до белого каления нагреть не удастся: сплав нике-

ля и хрома (нихром), из которого она сделана, еще раньше расплавится или сгорит на воздухе. А вот тугоплавкую и химически стойкую платиновую спираль можно разогреть почти до белого каления. Еще сильнее — до многих тысяч градусов — можно нагреть вещества в газообразном состоянии. Сильно раскаленное тело испускает, кроме инфракрасных и видимых лучей, еще и ультрафиолетовые лучи (они находятся за пределами фиолетовой части спектра). Чем выше температура тела, тем оно ярче светит и тем больше испускает ультрафиолетовых лучей. Так светятся все нагретые тела, в том числе наше Солнце и звезды. По цвету звезды астрономы могут определить ее температуру (вероятно, вам не надо говорить, что Луна и планеты сами не светятся, а лишь отражают солнечный свет).

Когда горит свеча или факел, светятся мельчайшие раскаленные частички угля в пламени. Их температура не так высока, поэтому пламя красноватое. В пламени природного газа, если воздуха для горения достаточно, раскаленных частичек угля практически нет, поэтому такое пламя почти бесцветное. Когда в XIX в. появились первые газовые фонари, их пламенем сильно нагревали специальные «калильные сетки», сделанные из тория и других редких металлов. Раскалившись, сетки испускали яркий свет, которым освещали по ночам улицы. Вечером специальные рабочие-фонарщики должны были зажечь каждый фонарь, а утром его погасить. Конечно, это было неудобно.

С появлением достаточно дешевой электроэнергии инженеры, разрабатывая конструкцию электрической лампочки, перебрали множество различных материалов для светящегося волоска: ведь чем сильнее его нагреть током, тем ярче он будет светиться, тем ближе к дневному окажется его свет. После долгих неудач остановились на тугоплавком металле вольфраме, который плавится при очень высокой температуре (3420°C). Но это все равно намного меньше, чем температура поверхности Солнца (6000°). Кроме того, спираль нельзя очень сильно нагревать, так как за долго до того, как вольфрам начнет плавиться, он станет испаряться, и лампочка быстро перегорит.

Первые лампочки светили тусклым красноватым светом, а срок их службы измерялся всего лишь десятками часов. Чтобы поднять температуру спирали, лампочки стали заполнять газами, которые с вольфрамом не реагируют. Молекулы газов чисто механически мешают атомам вольфрама покидать спираль. Чем тяжелее молекулы газа, тем лучше они справляются со своими обязанностями (рис. 22). Современные криптоновые лампочки светят намного ярче, а гореть могут тысячи часов (такие лампочки легко отличить по их грибовидной форме).

Однако и это не удовлетворило ученых. Они научились «залечивать» вольфрамовую спираль в том месте, где она стала тоньше и вот-вот перегорит (как известно, «где тонко, там и рвется»). Конечно, никто лампочку

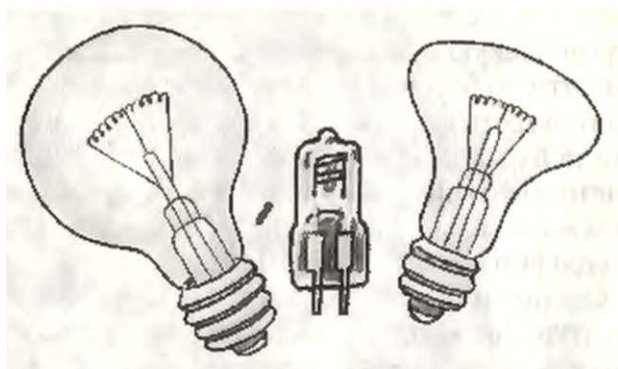


Рис. 22. Слева — 100-ваттная лампа, наполненная смесью азота и аргона, справа — такая же по мощности лампа, заполненная криптоном, который в 3 раза тяжелее азота и вдвое тяжелее аргона. Между ними — галогенная лампочка мощностью 150 ватт.

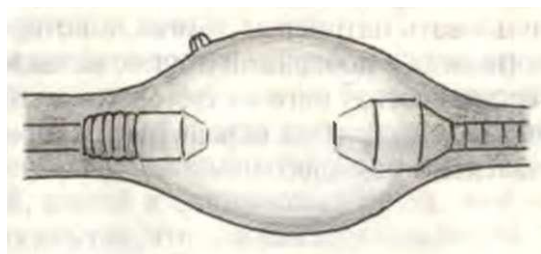
для этого не разбирает: «лекарство» закладывают в нее еще на заводе. Это «лекарство» — крошечный кристаллик обыкновенного йода, водно-спиртовой раствор которого есть в каждой домашней аптечке. Как же йод «лечит» раскаленную спираль?

Химики обнаружили, что если в лампу ввести немного йодных паров, они образуют с атомами вольфрама, которые уже покинули спираль, летучие химические соединения. Когда эти соединения случайно оказываются вблизи раскаленной спирали, они от сильного жара распадаются, атомы вольфрама возвращаются куда им положено — на спираль, а молекулы йода, оставаясь в газовой фазе, начинают искать других «беглецов», чтобы водворить их на место. Благодаря такой хитрости температуру вольфрамовой спирали в «йодных» лампах (их еще называют галогенными) можно значительно повысить. Вы, возможно, видели, насколько ярче свет галогенных ламп (например, в фарах новых моделей автомобилей, в кинопроекторах).

Возбуждать электроны в атомах, чтобы они начали испускать свет, можно и по-другому. Например, в лампах дневного света его испускают ртутные пары, а энергию атомы ртути получают за счет электрического разряда. Если трубку для такой лампы сделать из специального стекла, пропускающего ультрафиолетовые лучи, то она будет гореть бледно-синим светом, но зато излучать много невидимых ультрафиолетовых лучей, убивающих микробов. Такие лампы называют бактерицидными, их устанавливают в больницах и поликлиниках и периодически включают для стерилизации помещений.

Если трубку для лампы сделать из обычного стекла, но покрыть ее изнутри специальным белым порошком — люминофором (о люминофорах мы еще поговорим), то этот порошок, поглощая вредные для глаз ультрафиолетовые лучи, сам начинает светиться белым светом. Иногда у этого света приятный желтоватый оттенок, приближающий его к солнечному. Бывают люминесцентные лампы дневного, белого, тепло-белого и холодно-белого света. Они гораздо экономичнее ламп накали-

Рис. 23. В этой ослепительно горячей лампе электрический разряд создается между двумя массивными вольфрамовыми электродами в тяжелом газе ксеноне, а корпус изготовлен из кварцевого стекла.



вания; современная 11-ваттная люминесцентная лампа дает света столько же, сколько 75-ваттная лампа накаливания! Срок службы люминесцентных ламп также в 2–2,5 раза больше. Еще одно преимущество — трубка люминесцентной лампы чуть теплая, о нее невозможно обжечься — значит, уменьшается опасность возгорания или оплавления пластмассового светильника. Но у люминесцентных ламп есть и неприятная особенность; в них содержится немного ртути, и когда такие лампы выбрасывают на свалку, где они бьются, то воздух и почва загрязняются ядовитым металлом.

Если к парам ртути в лампе добавить под давлением инертный газ, а трубку сделать из тугоплавкого кварцевого стекла, можно значительно повысить температуру и получить лампу типа «горное солнце». Именно такими лампами нас облучают в поликлиниках, когда врач назначает «кварц». Сейчас кварцевые ультрафиолетовые лампы можно купить в магазинах электротоваров и использовать их зимой для загара (особенно в северных районах страны, где мало естественного солнечного ультрафиолета) — Однако необходимо очень строго придерживаться инструкции, чтобы не получить ожога (особенно надо беречь глаза), а еще лучше — проконсультироваться с врачом: не всем искусственный ультрафиолет полезен.

Ртутные лампы высокого давления, наподобие тех, что применяют в кабинетах физиотерапии, исправно работают и для освещения улиц. Эти лампы двойные; внутри у них кварцевая лампа, а снаружи — большой стеклянный баллон, также покрытый изнутри люминофором, излучающим свет, который несколько напоминает дневной. Мощность таких ламп может быть до десятков киловатт; их используют для освещения площадей, стадионов, железнодорожных узлов — везде, где необходимо создать хорошее освещение на большой площади. Для этой же цели применяют и ксеноновые лампы сверхвысокого давления (рис. 23).

Многие жители больших городов заметили, что в последние годы небо над ними приобрело красновато-оранжевый цвет, особенно в облачную

погоду. ЭТО происходит потому, что для освещения улиц и площадей стали использовать натриевые лампы, в которых светятся пары не ртути, а натрия (иногда с добавками других металлов). Свет этих ламп довольно далек от дневного: у него желто-оранжевый оттенок. Но зато эти лампы экономичнее, так как их освещенность при тех же затратах электроэнергии значительно больше.

Люминофоры — источники «холодного» света

Химики синтезировали множество соединений, которые могут светиться, оставаясь холодными. Такие вещества называют люминофорами (от латинского «люмен» — свет и «форос» — несущий). Чтобы люминофор светился, его атомы надо возбуждать, то есть подводить энергию. Делать это можно разными способами. Самый распространенный — возбуждение светом, видимым или ультрафиолетовым. Это явление называется фотолюминесценцией. Возбужденное светом вещество может излучить свет практически сразу — за время порядка стомиллионной доли секунды после поглощения возбуждающего фотона. В таком случае излучение называется флюоресценцией — от названия минерала флюорита, у которого впервые обнаружено это явление.

Кристаллы флюорита есть не у каждого, но многие, возможно, видели синеватое свечение кристаллов нафталина на солнечном свете, зеленоватое свечение растворов флюоресцеина или эозина (эти красители иногда добавляют к шампуням и экстрактам для ванн), яркое свечение бакенов, цветных афиш, деталей одежды, специальных красок для фломастеров (маркеров) и т. д. Все они содержат так называемые дневные флюоресцирующие красители — сложные органические соединения, поглощающие ультрафиолетовые и синие солнечные лучи и излучающие зеленые, оранжевые или красные. Школьник младших классов, ранец которого окрашен яркой флюоресцентной краской, может спокойнее переходить дорогу: шофер увидит его издалека. Яркую флюоресценцию можно наблюдать, посмотрев в метро в щель автомата, куда только что опустили пластмассовый жетон. Он содержит флюоресцирующий краситель, а в автомате спрятана ртутная лампочка — источник ультрафиолета. Под его действием пролетающий мимо жетон на мгновение вспыхивает яркой флюоресценцией — в Москве сине-голубой, в других городах — иного цвета.

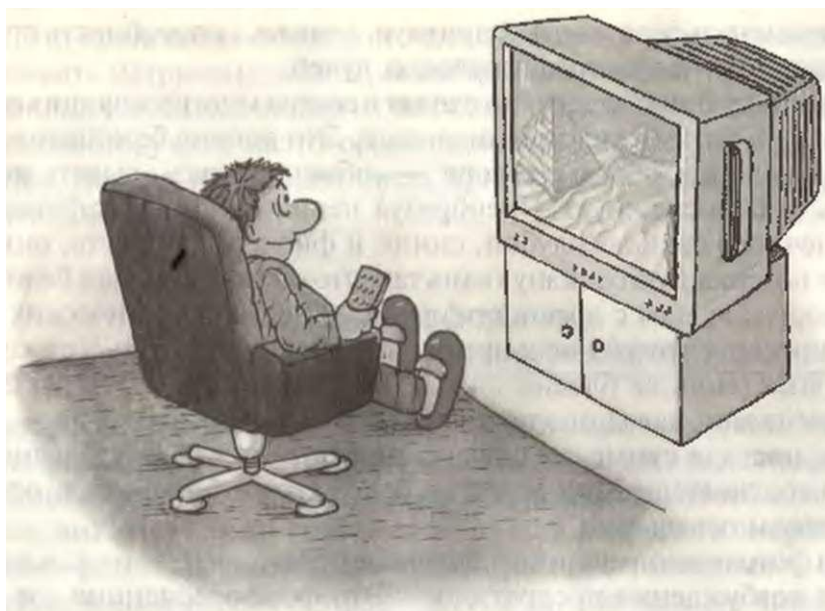
Сильной флюоресценцией обладает хинин — сложное органическое соединение с исключительно горьким вкусом, которое содержится в коре хинного дерева. Хинин используют как лекарство от малярии, добавляют к различным тонизирующим напиткам. Небольшие добавки хинина при-

дают напиткам чуть горьковатый привкус, а также... способность ярко светиться под действием ультрафиолетовых лучей.

Флюоресцирующие красители входят в состав многих моющих средств, выполняя роль оптических отбеливателей. Это вполне безопасные вещества. Их назначение, образно говоря, — «обмануть глаз», выдать желтоватую ткань за белоснежную. Преобразуя невидимую ультрафиолетовую часть солнечного света в голубой, синий и фиолетовый цвета, они «подправляют» потерявшую белизну ткань так, что она кажется нам белой. Этот прием известен людям с древности, только вместо синтетических флюоресцирующих красителей наши предки подкрашивали ткань синькой. При сильном разведении ее бледно-синий цвет, смешиваясь с чуть желтоватым цветом ткани, давал ощущение белого (желтый и голубой — дополнительные цвета, в сумме составляющие белый цвет). Современные оптические отбеливатели дают намного более яркий белый цвет, особенно при солнечном освещении.

Иногда фотолюминесценция не исчезает сразу после того, как действие источника возбуждения прекратилось. Это фосфоресценция (от латинского «фос» — свет и «форос» — несущий), которая может длиться от долей секунды до нескольких часов и даже суток. Фосфоресценцию органических молекул можно наблюдать только в специальных условиях в лабораториях. А вот с неорганическими фосфорами (ударение на втором «о») знаком каждый: ими покрыты (конечно, изнутри) лампы дневного света, а также баллоны ртутных светильников на улицах. По своему составу это чаще всего соединения металлов с кислородом, серой, фосфором и кремнием (химики такие соединения называют оксидами, сульфидами, фосфатами и силикатами). Кроме этих веществ, в состав люминофора вводят так называемые активирующие добавки сурьмы, марганца, олова, серебра, меди и других тяжелых металлов. Порошок люминофора светится, когда на него попадает ультрафиолетовое излучение, которое возникает в парах ртути под действием электрического разряда. Лампы дневного света не должны обладать послесвечением, то есть светиться после отключения от сети. Главное для них — высокая световая отдача, приятный для глаза цвет и стабильность. Люминофоры для этих ламп выпускаются в огромном количестве. В мировом выпуске всех классов люминофоров их доля составляет примерно 90%.

Некоторые из промышленных люминофоров могут светиться после отключения довольно долго. Ими покрывают циферблаты и стрелки часов, других измерительных приборов. Если предметы, покрытые люминофором длительного действия, «насветить» несколько минут на солнце, то потом в темноте они будут светиться несколько часов — сначала ярко, но постепенно все тусклее. В конце 80-х гг. несколько энтузиастов-школьников перед поездкой в летнюю химическую школу в подмосковном го-



роде Пущино «сбросились» и купили в магазине химреактивов люминофор типа ФКП-ОЗК (активированный медью сульфид цинка) по цене 36 рублей за килограммовую банку — немалые деньги по тем временам. Но потрачены они были не зря; порошок люминофора дети смешали с эпоксидной смолой и намазали этой смесью невесть откуда добытый череп собаки. Когда смола застыла, череп можно было использовать в самых разнообразных ситуациях — например, «насветив» его как следует под яркой лампой, внести неожиданно в соседнюю комнату, где в темноте показывали слайды. Эффект был потрясающий... После положенных визгов (несколько наигранных) от «исполнителей» потребовали «разоблачения» — марку люминофора, его формулу, цену и т. д. К чести юных химиков, они все честно рассказали, а руководителям осталось только прочитать всем небольшую лекцию о «холодном» свете.

Люминофоры для экранов телевизоров, мониторов, осциллографов относятся к катодолюминофорам: они возбуждаются пучком электронов. О них, как и о фотолюминофорах, знали еще в XIX веке. В 1893 г. ученые предложили исследовать катодолюминесценцию при помощи электронно-лучевой трубки с маленьким окошком из тонкой алюминиевой фольги, которая выпускает электроны (катодные лучи) наружу. Это позволило изучать действие электронов на различные вещества прямо на воздухе, а не в вакууме. Исследователи просмотрели множество образцов и выбрали те, которые под действием электронов светятся лучше. Сейчас катодолюминофоры по масштабам мирового производства (сотни тонн в год) занимают второе место после ламповых люминофоров. Некоторые из них после прекращения возбуждения перестают светиться очень быстро. Если бы,

к примеру, люминофор на экране телевизора светился хотя бы секунду после того, как с него ушел «рисующий» изображение электронный луч, оно (изображение) было бы полностью смазано.

Кстати, катодолуминофоры могут слабо светиться и под действием обычного света. Поднесите в темноте к экрану выключенного черно-белого телевизора яркую лампу, а затем погасите ее: экран некоторое время будет слабо светиться.

Другие люминофоры, наоборот, должны обладать послесвечением. Это позволяет, например, фотографировать быстро протекающие на экране осциллографа процессы. Их называют экранами с «памятью» (в некоторых осциллографах, радиолокационных трубках). Чтобы получить цветное изображение, используют люминофоры с другими активаторами. Например, в цветных телевизорах синее свечение экрана может давать сульфид цинка, активированный серебром, зеленое — то же соединение, активированное медью, красное — сульфид редкого металла иттрия, активированный еще более редким металлом — европием. Разработаны и другие композиции, в которых сочетание трех основных цветов в различных соотношениях дает миллионы разнообразных оттенков. Используют их и при производстве компьютеров — для экранов цветных мониторов. К катодолуминофорам близки ретгенолюминофоры, которыми покрыты экраны в рентгеновских кабинетах: они светятся под действием рентгеновских лучей (рис. 24).

Рис. 24. На фотографии 1897 г. французский таможенник просматривает содержимое чемодана, помещенного между источником рентгеновских лучей и светящимся экраном внутри прибора, который таможенник держит в руках.



В отдельный класс выделяют электролюминофоры — вещества, светящиеся под действием электрического поля. Они непосредственно преобразуют электрическую энергию в световую, потребляют совсем малую мощность и служат очень долго. Однако светимость электролюминофоров невелика, поэтому их обычно используют для световой сигнализации. Пример электролюминофора — надпись «ВЫХОД», горящая зеленым цветом в концертных залах, театрах и кинотеатрах.

Наконец, последний класс люминофоров — радиолюминофоры, свечение которых возбуждается излучением естественных или искусственных радиоактивных препаратов. Такие люминофоры могут светиться годами. В свое время радиолюминофоры сыграли огромную роль в изучении явлений радиоактивности: до изобретения электроизмерительных приборов (ионизационной камеры, счетчика Гейгера — Мюллера) ими покрывали небольшие пластинки-экраны и затем в полной темноте, иногда ночи напролет, подсчитывали число вспышек (сцинтилляций), чтобы определить интенсивность излучения от разных источников (подробнее об этом читайте в следующей главе). Экраны покрывали ярко светящимся, но дорогим препаратом платины. Под действием радиации в нем возбуждается яркая желто-зеленая люминесценция. Сейчас используют гораздо более дешевые люминофоры, например активированный медью сульфид цинка. У кого-то, возможно, еще остались часы, в которых стрелки и цифры покрыты таким светящимся составом постоянного действия — в нем содержится в малых количествах радиоактивное вещество. Из-за вредности (в основном для рабочих, занятых на производстве) такие часы сейчас не делают

Холодное «химическое» свечение

Совершенно особую группу светящихся веществ составляют соединения, испускающие свет за счет энергии химических реакций. Это явление называется хемилюминесценцией.

Еще в древние времена моряки наблюдали свечение моря. Карфагенский флотоводец Ганно описал море, «горевшее ярким пламенем». А вот воспоминания Чарлза Дарвина: «Как-то в очень темную ночь вся поверхность моря светилась слабым светом. Корабль гнал перед собой две волны точно из жидкого фосфора, а в кильватере тянулся молочный свет. Насколько хватало глаз, светился гребень каждой волны, а небосклон у горизонта, отражавший сверкание этих синеватых огней, был не так темен, как небо над головой». Это светились простейшие одноклеточные организмы. Светиться способны и многие морские животные, обитающие как на поверхности моря, так и в его глубине.



Рис. 25. Так на картине английского художника Дж. Райта (1771) изображено открытие фосфора, поразившее старого алхимика и его помощников.

Светятся не только морские организмы. Светятся также гнилушки и пни в лесу, яркий мерцающий свет испускают самцы светляков. Это примеры биолюминесценции — свечения в живых организмах. Причина подобных явлений — химические реакции, происходящие с выделением энергии.

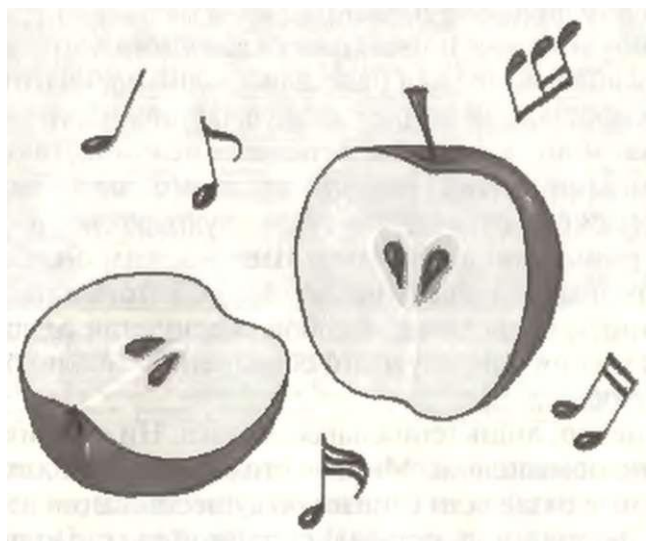
Обычно в ходе химических реакций энергия выделяется в виде тепла,

но в редких случаях часть химической энергии переходит в световую. В живых организмах реакции, в том числе и с выделением света, регулируют особые молекулы — ферменты. Исследователям давно известны и неферментативные химические реакции, в ходе которых возникает холодное свечение (его-то и называют хемилюминесценцией). Еще в 1669 г. немецкий алхимик из Гамбурга Х. Бранд случайно открыл белый фосфор по его свечению в темноте (рис. 25). Впоследствии химики выяснили, что белый фосфор легко испаряется и его пары, вступая в реакцию с кислородом воздуха, светятся. Свечение паров белого фосфора подробно исследовали в 20-х гг. в ленинградском физико-техническом институте, в лаборатории Н. Н. Семенова, и в результате открыли совершенно новый класс химических реакций. За это открытие Н. Н. Семенов совместно с английским химиком С. Хиншелвудом был удостоен Нобелевской премии по химии.

Свечение паров фосфора, хотя и привело к важному научному открытию, не имеет практического значения. Однако химики обнаружили, что при окислении некоторых органических веществ, например, перекисью водорода возникает настолько яркая хемилюминесценция, что ее видно даже днем. Явление это стали использовать при производстве игрушек и украшений.

В прозрачные пластмассовые трубочки запаивают ампулу с перекисью водорода и раствор органического вещества, светящийся при окислении. Когда нужно, продавец (или покупатель) надламывает находящуюся в смеси реагентов хрупкую ампулу — реакция запускается. Свечение может быть оранжевого, голубого, зеленого цвета и т. д. — в зависимости от того, какой краситель добавлен к смеси. Чем быстрее идет реакция окисления, тем ярче свечение, но тем быстрее оно прекращается, когда реакция заканчивается. При медленном протекании реакция, конечно, длится дольше, но свечение получается слабее (так, если смесь держать в морозильнике, то свечение заметно даже через полгода после «запуска» реакции). Обычно выбирают «золотую середину»: получается довольно яркое (можно читать в темноте) свечение, которое затухает часов примерно за двенадцать — для карнавала или дискотеки этого вполне достаточно. Туристы, побывавшие в итальянском парке «Гардаленд» (аналог американского «Диснейленда»), рассказывают, что с наступлением темноты видели, как у посетителей (в основном у детей) одновременно вспыхивали сотни светящихся украшений в виде цветков, бабочек, жуков и других насекомых. Эффект усиливался множеством усиков-световодов, передающих свет на 10—20 см от его источника — ампулы с реагентами. Зрелище впечатляющее! К сожалению, после прекращения химической реакции прекращается и свечение, и возобновить его уже невозможно.

ХИМИКИ ИЗУЧАЮТ РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ



История с целыми числами

Одно из фундаментальных понятий в науке — теория атомарного строения материи. Некоторые ученые считают, что если бы пришлось в одной короткой фразе выразить самое важное знание, которого достигло человечество, то она звучала бы так: «Мир состоит из атомов». Вот какое огромное значение придается этой теории. Однако ее развитие было непростым, а порой даже драматичным.

Еще в древности философы задумывались над таким «детским» вопросом: что получится, если, например, яблоко разрезать пополам? Ответ очевиден даже малому ребенку: две половины яблока. А если каждую половину снова разрезать пополам? Получатся четвертинки. Потом — восьмушки, потом — шестнадцатые доли... Через некоторое время придется взять увеличительное стекло и лезвие бритвы, потом — микроскоп и специальные инструменты. А потом?

Те из вас, кто учился музыке, сразу вспомнят основу музыкальной грамоты; целая по длительности нота делится на половинки, те — на четверти, потом идут восьмые доли, шестнадцатые, тридцать вторые, очень редко — шестьдесят четвертые... Меньших долей композиторы обычно не придумывают, так как их уже трудно «втиснуть» в нужный отрезок времени. О связи музыки и химии мы еще поговорим, а сейчас подумаем над такими вопросами: можно ли (хотя бы теоретически) создавать все более и бо-

лее короткие звуки? И есть ли у этого процесса предел? Вопросы эти на самом деле очень непросты. И ответы на них так же не очевидны, как и в случае с яблоком: возможно ли до бесконечности делить его на все более и более мелкие части, или когда-то наступит предел?

Древнегреческий философ Левкипп был, возможно, первым, кто две с половиной тысячи лет назад понял (рассуждая чисто логически), что процесс «разрезания яблока» должен рано или поздно прекратиться. Это произойдет, когда разрезающий дойдет до мельчайших частичек, из которых состоят не только яблоки, но и все остальные тела. Частички эти ученик Левкиппа — Демокрит назвал атомами, что на его родном языке означает «неделимые». Демокрит считал, что существуют различные «сорты» атомов, с разными размерами и формами. Именно этим он объяснял различия в свойствах разных тел. Реальные вещества, которые мы видим и ощущаем, по Демокриту, представляют собой соединения различных атомов друг с другом. Изменив природу этого соединения, можно одно вещество превратить в другое.

Это была, конечно, лишь гениальная догадка. Ни о каких экспериментах в ту пору и не помышляли. Многие столетия спустя лишь некоторые философы и ученые разделяли гипотезу о существовании атомов. Ну а их размеры, масса, форма и т. п. оставались тайной за семью печатями, и не было даже надежды, что ее удастся раскрыть. Но существовала фантазия. Вот как описывает древнеримский поэт и философ Лукреций возможность получения различных веществ путем разных комбинаций «наименьших частей», то есть атомов:

Предположи, например, что тела изначальные будут
Три или несколько больше частей заключать наименьших;
Если затем ты начнешь эти части у данного тела
Переставлять или снизу наверх, или слева направо,
То обнаружишь тогда, сочетания все их исчерпав,
Все изменения форм, что для этого тела возможны;
Если ж иные еще получить ты желаешь фигуры,
Части другие тебе прибавить придется.

К концу XVIII — началу XIX в. благодаря работам Ломоносова, Лавуазье, Прута, Авогадро, других ученых гипотеза об атомах и их комбинациях — молекулах начала приобретать черты теории, из которой можно было делать различные важные для практики выводы и проверять их экспериментально. Однако лишь немногие ученые, в том числе и выдающиеся, поняли это. Вот несколько примеров.

Крупнейший французский химик-органик XIX в. Марселей Бертло писал; «Понятие молекулы с точки зрения наших знаний неопределенно, в то время как другое понятие — атом — чисто гипотетическое». Еще определеннее высказался известный французский химик А. Девиаль:

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА											VII (H)		VIII 4,00 ² He гелий		иттовый кошени алюминий элементов углерод 12,01 ⁶ C		
I H ¹ 1,01 водород		II		III		IV		V		VI							
1																	
2	Li ³ 6,94 литий	Be ⁴ 9,01 бериллий	10,81 ⁵ B бор	12,01 ⁶ C углерод	14,01 ⁷ N азот	16,00 ⁸ O кислород	19,00 ⁹ F фтор	20,18 ¹⁰ Ne неон									
3	Na ¹¹ 22,99 натрий	Mg ¹² 24,31 магний	25,98 ¹³ Al алюминий	28,09 ¹⁴ Si кремний	30,97 ¹⁵ P фосфор	32,06 ¹⁶ S сера	35,45 ¹⁷ Cl хлор	39,95 ¹⁸ Ar аргон									
4	K ¹⁹ 39,10 калий	Ca ²⁰ 40,08 кальций	Sc ²¹ 44,96 скандий	Ti ²² 47,88 титан	V ²³ 50,94 ванадий	Cr ²⁴ 52,00 хром	Mn ²⁵ 54,94 марганец	Fe ²⁶ 55,85 железо	Co ²⁷ 58,93 кобальт	Ni ²⁸ 58,70 никель							
5	63,55 ²⁹ Cu медь	65,38 ³⁰ Zn цинк	69,72 ³¹ Ga галлий	72,60 ³² Ge германий	74,92 ³³ As мышьяк	78,96 ³⁴ Se селен	79,90 ³⁵ Br бром	83,80 ³⁶ Kr криптон									
6	Rb ³⁷ 85,47 рубидий	Sr ³⁸ 87,62 стронций	Y ³⁹ 88,91 иттрий	Zr ⁴⁰ 91,22 цирконий	Nb ⁴¹ 92,91 ниобий	Mo ⁴² 95,94 молибден	Tc ⁴³ 98,91 технеций	Ru ⁴⁴ 101,07 рутений	Rh ⁴⁵ 102,91 родий	Pd ⁴⁶ 106,42 палладий							
7	107,87 ⁴⁷ Ag серебро	112,41 ⁴⁸ Cd кадмий	114,82 ⁴⁹ In индий	118,69 ⁵⁰ Sn олово	121,75 ⁵¹ Sb сурьма	127,60 ⁵² Te теллур	128,90 ⁵³ I йод	131,30 ⁵⁴ Xe ксенон									
8	Cs ⁵⁵ 132,91 цезий	Ba ⁵⁶ 137,33 барий	La ⁵⁷ 138,91 лантан	Hf ⁷² 178,49 гафний	Ta ⁷³ 180,95 тантал	W ⁷⁴ 183,85 вольфрам	Re ⁷⁵ 186,21 рений	Os ⁷⁶ 190,20 осмий	Ir ⁷⁷ 192,22 иридий	Pt ⁷⁸ 195,09 платина							
9	196,97 ⁷⁹ Au золото	200,59 ⁸⁰ Hg ртуть	204,37 ⁸¹ Tl таллий	207,20 ⁸² Pb свинец	208,98 ⁸³ Bi висмут	[209] ⁸⁴ Po полоний	[210] ⁸⁵ At астат	[222] ⁸⁶ Rn радон									
7	Fr ⁸⁷ [223] франций	Ra ⁸⁸ 226,03 радий	Ac ⁸⁹ [227] актиний	Th ⁹⁰ [232] торий	Pa ⁹¹ [231] протактиний	U ⁹² [238] уран	Np ⁹³ [237] нептуний	Pu ⁹⁴ [244] плутоний	Am ⁹⁵ [243] амерций	Cm ⁹⁶ [247] куриум	Bk ⁹⁷ [247] берклий	Cf ⁹⁸ [251] калифорний	Es ⁹⁹ [252] эйнштейний	Fm ¹⁰⁰ [257] фермий	Md ¹⁰¹ [288] мариновский	(No) ¹⁰² [289] нобелий	(Lr) ¹⁰³ [260] лоренций

«Я не допускаю ни закона Авогадро, ни атома, ни молекулы, ибо я отказываюсь верить в то, что не могу ни видеть, ни наблюдать». А немецкий химик Вильгельм Оствальд, лауреат Нобелевской премии, один из основателей физической химии, еще в начале XX столетия решительно отрицал существование атомов! В своем трехтомном учебнике химии он ни разу даже не упомянул их.

Теперь о том, что мир построен из атомов, знают даже школьники младших классов. О строении различных атомов и молекул, об их форме и размерах ученым известно довольно много. Еще более важными оказались знания о явлениях, которые происходят при «изменении форм» различных веществ, или, выражаясь современным языком, при изменении взаимного расположения атомов, когда они объединяются в более крупные частицы — молекулы, состоящие из одинаковых или разных атомов. С точки зрения современной науки взаимное расположение атомов в молекулах, а также взаимное расположение молекул определяют свойства веществ — как об этом догадывались еще древние, — а процесс перестройки взаимного расположения атомов составляет сущность химической реакции.

Нелегкий путь, который прошла теория атомарного строения вещества, можно проследить на примере изменений, происшедших в периодической таблице элементов Д. И. Менделеева.

Начинается периодическая таблица с самого легкого из всех элементов — водорода. Некоторые ученые давно предполагали, что атомы всех химических элементов построены из более простых частиц. В 1815 г. английский химик У. Праут выдвинул гипотезу, согласно которой атомы всех химических элементов «построены» из атомов водорода. Если массу ато-

ма водорода принять за единицу, то массы всех остальных элементов должны, в соответствии с гипотезой Праута, выражаться целыми числами. Эти числа (их называют относительной атомной массой) действительно были целыми для некоторых известных в то время элементов.

В первой таблице химических элементов, составленной Д. И. Менделеевым в 1869 г., было немногим больше 60 известных в то время элементов. Из них у 50, то есть у подавляющего большинства, атомные массы были целыми числами. Но массы-то остальных 13 элементов оказывались дробными! В чем тут дело? Может быть, гипотеза Праута неверна? Или просто атомные массы этих элементов определили недостаточно точно? Ведь в XIX в. определить экспериментально относительную атомную массу элемента с высокой точностью было очень трудно; некоторые химики работали над этим годами. Кстати, сам Менделеев не был уверен в точности всех атомных масс, которыми он располагал. В своей первой таблице он в этих случаях ставил рядом с символом элемента знак вопроса. Так, на месте золота в его таблице стоит: «Au = 197?»

Однако атомные массы некоторых элементов (например, меди или хлора) так сильно отличались от целых чисел, что ошибками эксперимента объяснить это было невозможно. И как бы в насмешку над гипотезой Праута, чем точнее становились измерения, тем у большего числа элементов обнаруживались «отклонения». Так, в последний год жизни Д. И. Менделеева шведский ученый И. Ридберг, именем которого названа одна из физических констант, опубликовал таблицу элементов, в которой он впервые присвоил каждому элементу свой порядковый номер. В этой таблице было уже 69 известных элементов, из которых лишь у 21 атомная масса была целой. Любопытно, что в современной таблице Менделеева нет ни одного (!) элемента с целочисленной атомной массой. Объясняется это разными причинами. Одну из них, очень важную, обнаружил английский ученый Ф. Астон в 1919 г.

Астон впервые доказал, что атомы данного химического элемента не обязательно все одинаковые, как думали до этого. Они могут отличаться по массе, хотя с химической точки зрения ведут себя одинаково. Таким образом, Астон открыл, что у элементов могут быть «близнецы-братья», все на одно лицо (с точки зрения химика), но одни чуть полегче, другие потяжелее. Этих близнецов называли изотопами, так как в таблице Менделеева они занимали одну и ту же клетку (по-гречески «изос» — равный, одинаковый, «топос» — место). Из встречающихся в природе элементов (а их почти 90) только у 20 нет «родственников» — это элементы-одиночки. Другим же повезло больше: например, у олова их целых десять! Есть изотопы и у самого легкого в природе элемента — водорода, и у самого тяжелого — урана.

После открытия изотопов стало понятно, что целочисленная атомная

масса должна быть скорее исключением, чем правилом. Например, у меди было обнаружено два изотопа с атомными массами, очень близкими к 63 и 65. Легких атомов меди в природе больше — их 69%, а тяжелых меньше — 31%. Поскольку оба изотопа и в металлической меди, и во всех без исключения ее соединениях равномерно перемешаны, не удивительно, что измерения всегда давали усредненное значение атомной массы меди — примерно 63,5.

Химия и нумизматика

Как узнали процентный состав двух изотопов меди? Наглядно это можно показать на примере монет одного достоинства, отличающихся массой. В 1993 г. в России выпустили 50-рублевые монеты из желтого медного сплава массой 6,1 г. Вскоре из-за инфляции вместо них начали чеканить такие же с виду монеты, но подешевле — стальные и лишь сверху покрытые тонким слоем медного сплава. Стальные монеты были немного легче (5,3 г). С виду оба типа монет почти не отличались друг от друга (даже годом чеканки), как не отличаются по химическим свойствам два сорта атомов меди. Поэтому можно считать, что у нас были два «изотопа» 50-рублевых монет.

Примерно к 1996 г. и те и другие монеты, находящиеся в обращении, равномерно перемешались, так что доля легких и тяжелых стала постоянной. Один нумизмат решил выяснить, какова же доля монет каждого типа. Он собрал у знакомых целый мешочек 50-рублевых монет, взвесил их и разделил общую массу на число монет. Получилась средняя масса одной монеты — 5,54 г. МОЖНО ЛИ теперь узнать долю легких и тяжелых монет?



Будем рассуждать так: пусть у нас есть 100 монет, среди которых и легкие, и тяжелые (по условию, их соотношение не зависит от числа монет). Общая масса всех 100 монет равна 554 г. Если бы все эти монеты были тяжелыми, их общая масса равнялась бы 610 г. что на $610 - 554 = 56$ г больше действительной. Почему так? Потому что не все монеты тяжелые: есть среди них и легкие. Замена одной тяжелой монеты на легкую приводит к уменьшению общей массы на $6,1 - 5,3 = 0,8$ г. Нам же надо уменьшить массу на 56 г. Следовательно, легких монет $56 : 0,8 = 70$. Это и есть ответ: 70% легких монет, 30% тяжелых.

Точно так же мы можем рассуждать, желая узнать процентный состав изотопов меди; известна средняя атомная масса меди (ее определили химики, анализируя различные соединения меди), а также массы легкого и тяжелого изотопов меди (эти массы определили физики, используя свои, физические методы). Интересно, что очень похожая задача (только не с изотопами и монетами, а с двумя сортами сукна) приведена в рассказе А. П. Чехова «Репетитор». Вот эта задача: «Купец купил 138 арш. черного и синего сукна за 540 руб. Спрашивается, сколько аршин купил он того и другого, если синее стоило 5 руб. за аршин, а черное 3 руб.?» Фактически это та же самая задача, что и в случае с монетами и изотопами меди. Теперь вы сами можете ее легко решить.

«Страшное» слово «радионуклид»

Масса не единственное свойство, по которому можно отличить «близнецов». Исследования показали, что изотопы всех элементов по своему поведению можно разделить на две группы. Одни ведут себя смирно: какими они появились на свет (это могло произойти и много миллиардов лет назад, когда возникла Вселенная, и совсем недавно), такими и остались. Поведение же других прямо противоположное: они непрерывно «меняют лицо», превращаясь в изотопы других элементов. Такие превращения принято называть радиоактивным распадом. Почему распад — понятно: «смена лица» фактически приводит к уничтожению атомов данного элемента, к их распаду. А радиоактивными эти превращения названы потому, что они сопровождаются испусканием особых лучей. Что же это за лучи?

Конец XIX в. был богат на открытия различного рода излучений. В 1895 г. немецкий физик В. Рентген открыл лучи, названные его именем. Они возникали, когда быстро летящие в вакууме отрицательно заряженные частицы — электроны — ударялись о препятствие. Мы уже говорили о том, что еще в XIX в. рентгеновскую аппаратуру применяли для проверки багажа на таможне. Сейчас рентгеновские лучи широко используют во

всем мире. Редко можно найти человека, который бы ни разу в своей жизни не побывал в рентгеновском кабинете — хотя бы для того, чтобы сделать снимок зуба. Рентгеновские лучи легко проходят через мягкие ткани, но задерживаются костями и другими твердыми предметами (рис. 26).

Совершенно другой тип лучей обнаружил в 1896 г. французский физик А. Беккерель. Эти лучи испускались «сами по себе» некоторыми редкими минералами. Явление назвали радиоактивностью (по-латыни «радиус» — луч). Долгое время не понимали, откуда эти лучи берутся. Со временем оказалось, что их испускают неустойчивые разновидности атомов обычных химических элементов.

Рис. 26. Эта фотография руки охотника, пострадавшего от случайного выстрела мелкой дробью, была сделана профессором М. Пьюпино из Колумбийского университета в Нью-Йорке в феврале 1896 г. — вскоре после первого сообщения В. Рентгена о своем открытии 28 декабря 1895 г.



Такие неустойчивые разновидности атомов называются радионуклидами. Иногда их называют также радиоактивными изотопами. При распаде каждого неустойчивого атома из него с большой скоростью вылетает одна или несколько частиц высокой энергии. Поток этих частиц и называют радиоактивным излучением или попросту радиацией. В теле человека такие частицы могут вызывать различные повреждения. И если повреждений за короткое время окажется много, а организм не сумеет их «залечить» — человек заболит лучевой болезнью. Наличием радиоактивных превращений объясняется непрерывное облучение, которому подвергаются на Земле и люди, и животные всю свою жизнь, — хотят они того или нет. Это так называемый радиационный фон, причем заметная его доля приходится на «внутреннее» облучение человека.

Судите сами. В человеке, весящем 70 кг, содержится много различных химических элементов. Больше всего в нем кислорода (45,5 кг), углерода (12,6 кг), водорода (7 кг), азота (2,1 кг), кальция (1,4 кг), фосфора (700 г), калия (200 г), и еще 500 г остается на серу, натрий, хлор, магний, железо и цинк, вместе взятых (остальные несколько десятков элементов содержатся в микроскопически малых количествах).

Все эти элементы мы привыкли считать вполне стабильными и потому безопасными с точки зрения радиации. Однако у них есть и радиоактивные разновидности — радионуклиды. У одних элементов их больше, у других — меньше.

Из 340 изотопов различных элементов, найденных в природе, 70 радиоактивны. В списке самых распространенных в человеке элементов у кислорода, водорода, азота, кальция, фосфора природных радионуклидов практически нет или так мало, что их излучение можно вовсе не учитывать. Другое дело — углерод и калий. Природный углерод содержит небольшую примесь (примерно 10^{-10} %) «радиоуглерода» (о нем еще будет подробный рассказ). В теле взрослого человека в минуту распадается почти 200 тыс. атомов радиоуглерода!

Обычный калий тоже содержит примесь радионуклида (его называют калий-40), в результате чего каждую минуту в теле человека распадается около 300 тыс. атомов калия-40.

В природе существует много радионуклидов, но еще больше их получено искусственно. Некоторые радионуклиды распадаются очень медленно. Это космические долгожители, время распада которых сравнимо со временем существования Вселенной. Например, время жизни радиоактивного калия (^{40}K) измеряется миллиардами лет. Когда Вселенная была намного моложе, когда еще не было ни Земли, ни Солнца, радиоактивного ^{40}K было довольно много. Сейчас в обычном калии его осталось чуть больше 0,01%.

Конечно, за время своего существования все живое приспособилось к радиоактивному облучению. Больше того, не исключено, что такое облучение и стало одной из причин мутаций в ходе эволюции живой природы. Если это так, то не будь в природе радиации, не было бы на Земле такого богатейшего разнообразия животной и растительной жизни, не было бы и нас с вами. Так что не стоит считать радиацию всегда и безусловно вредной — все хорошо в меру. Возьмем, к примеру, солнечную ультрафиолетовую радиацию: когда ее мало, люди плохо себя чувствуют, у детей развивается рахит; когда ее слишком много — кожа обгорает и слезает, могут даже образоваться волдыри.

Многие природные радионуклиды, хотя и живут сравнительно недолго — какие год, а какие всего неделю или и того меньше, — непрерывно образуются в результате распада других радионуклидов. Так они и превращаются друг в дружку, и такие превращения (их называют радиоактивными рядами) могут следовать один за другим по десятку и больше. Цепочка превращений прекращается, когда образуется стабильный, то есть нерадиоактивный, изотоп какого-либо элемента.

Радиоактивный распад подчиняется определенным законам, о которых мы сейчас и поговорим.

Как быстро распадаются атомы

Формулы, количественно характеризующие радиоактивный распад, в школе не изучают. Тем не менее они достаточно просты и позволяют провести поучительные расчеты.

Если бы мы могли проследить за конкретным атомом радионуклида, то не смогли бы предсказать, когда он распадется. Этот процесс случайный. Однако даже в мельчайшей пылинке содержится огромное число атомов, и если они радиоактивны, то их распад подчиняется строгим математическим закономерностям: в силу вступают статистические законы, характерные для очень большого числа объектов. И оказывается, что каждый радионуклид можно охарактеризовать вполне определенной величиной — периодом полураспада ($T_{1/2}$) — одной из его важнейших характеристик. Период полураспада определяют как время, за которое распадается половина имеющегося числа атомов. Есть радионуклиды-долгожители, для которых периоды полураспада исчисляются миллионами и даже миллиардами лет. Есть и короткоживущие радионуклиды, распадающиеся полностью за ничтожные доли секунды. Очевидно, что если имеется, например, 1 г радиоактивного вещества, то чем меньше период его полураспада, тем большей радиоактивностью будет обладать вещество.

Сейчас мы выведем формулу, которая показывает, как уменьшается

число атомов радионуклида (а вместе с ним и его радиоактивность) со временем. Пусть в начальный момент времени $t = 0$ имеется N_0 атомов радионуклида с периодом полураспада $T_{1/2}$. Как следует из определения периода полураспада, по прошествии промежутка времени $t = T_{1/2}$ останется $N_0/2$ атомов. Когда пройдет еще столько же времени ($t = 2T_{1/2}$), останется половина от $N_0/2$ числа атомов, то есть $N_0/4$, и т. д. Рассуждая далее аналогично, получим следующий ряд уменьшения числа атомов;

Прошедшее время	Число оставшихся атомов
$t = 0$	$N = N_0$
$t = T_{1/2}$	$N = N_0/2$
$t = 2T_{1/2}$	$N = N_0/4 = N_0/2^2$
$t = 3T_{1/2}$	$N = N_0/8 = N_0/2^3$
$t = 4T_{1/2}$	$N = N_0/16 = N_0/2^4$
...	...
$t = nT_{1/2}$	$N = N_0/2^n$

Последняя строчка легко выводится из предыдущих по аналогии. Таким образом, если прошло n периодов полураспада ($n = t : T_{1/2}$), то останется $N = N_0/2^n$ атомов. Это и есть основная формула, по которой можно рассчитать, сколько атомов радионуклида останется через определенный промежуток времени t , если известно его начальное количество N_0 и период полураспада $T_{1/2}$. Точно такая же формула позволяет рассчитывать изменение со временем радиоактивности a : $a = a_0 : 2^n$, где a_0 — начальная радиоактивность.

Здесь надо пояснить, что радиоактивность a — это число атомов, распадающихся в образце в единицу времени; радиоактивность пропорциональна имеющемуся числу атомов, поэтому она изменяется со временем также, как N .

На практике радиоактивность образца обычно характеризуют не общим числом происходящих в нем распадов, а пропорциональным ему числом импульсов I , которые регистрирует прибор, измеряющий радиоактивность, то есть через регистрируемую радиоактивность ($I = ka$, где k — коэффициент пропорциональности). Очевидно, что и в этом случае формула имеет вид; $I = I_0 : 2^n$.

По приведенным формулам можно определить, сколько останется радиоактивного вещества через определенное время или какова будет его активность, если известны период полураспада и начальное количество (или начальная активность). С другой стороны, зная начальную и конечную активность, а также время t , можно определить период полураспада.

Следует отметить, что приведенные формулы верны для любых значений n , а не только для целых. Правда, при нецелых n для расчетов потребуются знание логарифмов и использование калькулятора, производящего действия со степенями и логарифмами. Если же n — целое (то есть прошло целое число периодов полураспада), то расчеты значительно упрощаются.

Для примера решим такую задачу. В лабораторию, проводящую биохимические исследования, доставили препарат, меченный фосфором-32 (для этого радионуклида $T_{1/2} = 2$ недели). Начальная активность образца составляла 512 импульсов в минуту в расчете на 1 мкг препарата. Можно ли будет использовать этот препарат для исследований через 12 недель, если его активность, для ее надежного измерения, не должна быть ниже 10 импульсов в минуту на 1 мкг?

Для решения этой задачи рассчитаем активность препарата к указанному сроку. По условию, $I_0 = 512$ имп./мин/мкг, $T_{12} = 2$ недели, $t = 12$ недель, $n = 12 : 2 = 6$. Подставляем эти значения в формулу и получаем, что через 12 недель (примерно 3 месяца) активность снизится до $I = 512 : 2^6 = 512 : 64 = 8$ имп./мин/мкг. Следовательно, сотрудникам лаборатории отпущен сравнительно небольшой срок для решения своих научных проблем — через 3 месяца придется заказывать новую партию дорогостоящего препарата. Отметим, что активность препарата, конечно, зависит от его общего количества, поэтому она отнесена к 1 микрограмму вещества; эта активность могла быть задана и в любых других единицах. Конечно, числовые данные в этой задаче специально подобраны так, чтобы предельно облегчить расчеты. Например, если бы t было равно не 12, а, допустим, 128 недели, пришлось бы возводить 2 в степень $128 : 2 = 64$, что невозможно без калькулятора.

Конечно, для ученых такие расчеты не проблема. А вот точное и надежное измерение очень малых активностей — проблема серьезная, и над ней работают уже целое столетие, с момента открытия самого явления радиоактивности. Увеличение точности измерения слабой радиоактивности привело к замечательным успехам в определении возраста различных археологических находок. Один из самых ярких примеров — радиоуглеродный метод анализа.

Что такое радиоуглерод и откуда он берется

Наша планета подвергается непрерывному облучению космическими частицами. Если бы не атмосфера, пропускающая к земной поверхности лишь небольшую часть космического излучения, жизнь на Земле была бы невозможна, а ее поверхность мало отличалась бы от поверхности Луны.

В верхних слоях атмосферы под действием космических лучей идут самые разнообразные превращения одних элементов в другие. Одно из них — превращение атомов азота в атомы радиоактивного углерода-14. Подсчитано, что каждую минуту над 1 см² земной поверхности образуется в среднем всего 145 атомов ¹⁴C. Если учесть площадь поверхности Земли, то получится, что ежегодно в атмосфере образуется примерно 8 кг радиоуглерода. Земля, как известно, существует миллиарды лет, и если бы ¹⁴C был стабильным, то его масса на Земле исчислялась бы десятками миллионов тонн. Однако он радиоактивен и в результате распада снова превращается в азот. Период полураспада ¹⁴C довольно велик и составляет 5730 лет. Всего на Земле 60 т радиоуглерода, из которых ежегодно распадается 8 кг — столько же, сколько его образуется (в этом случае говорят о радиоактивном равновесии, при котором скорость образования нуклида равна скорости его распада при неизменном общем его количестве). Конечно, для земного шара 60 т — очень малая величина. Так, в атмосферном углекислом газе количество радиоуглерода составляет лишь около 1 т, или $3 \cdot 10^{-11}$ % от «обычного» углерода ¹²C (остальной радиоуглерод в основном растворен в воде).

Большинству из вновь образовавшихся атомов ¹⁴C предстоит долгая жизнь — на многие тысячи лет. Какова их дальнейшая судьба?

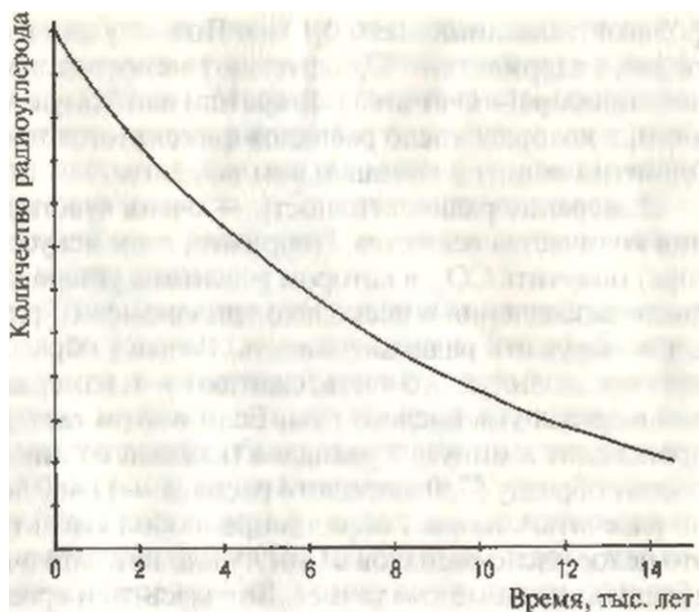
Прежде всего они довольно быстро окисляются кислородом и превращаются в молекулы углекислого газа. Этот радиоактивный углекислый газ равномерно перемешивается с огромным количеством обычного углекислого газа. Углекислый газ атмосферы — основной источник углерода, который усваивается растениями в процессах фотосинтеза. Растениями питаются животные, поэтому вся живая органическая материя содержит радиоуглерод, хотя и в ничтожных количествах. Очень важно, что в результате обменных процессов, протекающих в живой природе, содержание ¹⁴C в растениях и животных в течение их жизни остается постоянным. Но как только обмен с окружающей средой прекращается, содержание радиоуглерода начинает очень медленно снижаться — в 2 раза каждые 5730 лет, как это показано на рис. 27.

Радиоуглерод входит также в состав неорганических соединений, которые растворены в воде морей, океанов и в подземных водах и могут обмениваться углеродом с углекислым газом атмосферы. В основном это растворимые гидрокарбонаты, которыми так богаты минеральные воды.

Как только в животном или растении прекращается обмен с углекислым газом атмосферы, количество радиоуглерода в нем со временем начинает убывать — по строгой математической закономерности,

Подробно изучая закономерности образования и распада радиоуглерода, американский физик и химик У. Ф. Либби сделал в конце 40-х гг. XX в. выдающееся открытие и через несколько лет получил Нобелевскую

Рис 27. Так уменьшается со временем количество радиоуглерода в образце, если в него не попадает «свежий» ^{14}C из атмосферы.



премию по химии «За введение метода использования углерода-14 для определения возраста в археологии, геологии, геофизике и других областях науки».

Радиоуглеродный метод датировки

В 1955 г. в Женеве состоялась Международная конференция по мирному использованию атомной энергии. Выступил на ней с докладом и Либби. Его выступление началось необычно. Он вышел на трибуну с большим чемоданом, вынул из него старую обувь и объявил, что ее носил вождь инков 800 лет назад. Затем Либби извлек из чемодана обломок весла и сказал, что это весло сделано в Древнем Египте 3000 лет назад.

Как это удалось определить? Теоретические основы радиоуглеродного метода датировки довольно просты. Однако чтобы использовать их практически, пришлось провести очень большую работу, которую и сейчас нельзя считать законченной.

Прежде всего надо было установить, действительно ли содержание ^{14}C в обычном углероде одинаково во всех живых организмах. Ученые исследовали образцы древесины из свежесрубленных деревьев в разных местах земного шара. Оказалось, что содержание ^{14}C в них одинаково: в каждом грамме углерода, выделенного из живого организма, за одну минуту распадается приблизительно 16 атомов ^{14}C , что сопровождается слабой радиоактивностью. Она настолько слаба, что задерживается алюминиевой

фольгой толщиной всего 0,1 мм. Поэтому для измерения радиоактивности газ, содержащий ^{14}C , запускают непосредственно внутрь измерительного прибора — счетчика Гейгера или используют сцинтилляционные счетчики, в которых число распадов фиксируется по числу световых вспышек (сцинтилляций) в специальном веществе.

Измерение радиоактивности — очень чувствительный метод определения количества вещества. Например, если искусственно (на ядерном реакторе) получить CO_2 , в котором все атомы углерода — это атомы ^{14}C , то даже после разбавления в несколько триллионов (!) раз азотом в газе можно будет обнаружить радиоактивность. Возраст образца устанавливают так. Берут определенную его часть, сжигают — и измеряют радиоактивность образовавшегося углекислого газа. Если в этом газе, в расчете на 1 г углерода, происходит в минуту 8 распадов (каждый из них регистрирует счетчик), то такому образцу 5730 лет, если 4 распада — 11 460 лет и т. д. По формуле можно рассчитать возраст образца при любой его активности. Не важно, будет это целое число распадов в минуту или нет, зато очень важно определить эту активность как можно точнее. Вот здесь-то и кроется одна из главных трудностей радиоуглеродного метода датировки. Поскольку активность образцов очень мала и значительно меньше излучения «фона», необходима специальная защита от внешней радиации и очень долгое измерение (иногда многие сутки). Еще сравнительно недавно, чтобы надежно определить возраст в пределах нескольких тысяч лет, нужно было взять из образца не менее 20 г углерода. Если это были угли из костра древнего человека или старые деревянные предметы — проблем обычно не возникало: углерода для исследований было в избытке. Например, в Северной Америке при раскопках нашли остатки поваленных деревьев, которые лежали вершинами все в одну сторону. Это явление казалось необъяснимым: кому и зачем понадобилось валить столько деревьев, да еще в одну сторону? Радиоуглеродный метод анализа древесины этих деревьев показал, что они росли примерно 11 тыс. лет назад — как раз в то время, когда на Земле был последний ледниковый период. Стало ясно, что деревья повалил медленнодвигающийся ледник. Кстати, уточнение времени последнего ледникового периода на Земле считается главным достижением метода Либби.

Но если образец — уникальное изделие, например старая картина, то, конечно, никому не приходило в голову сжечь значительную ее часть, чтобы установить возраст, хотя теоретически это было возможно (картины писали на холсте, а холст сделан из растительных волокон).

Трудности возникали и когда возраст образца превышал несколько десятков тысяч лет. В этих случаях атомов ^{14}C остается так мало, что их трудно с достаточной точностью определить даже при помощи лучших счетчиков. Проблемы возникают и со слишком «молодыми» образцами, содержание радиоуглерода в которых мало отличается от современного.

В 70-е гг. XX в. ученые разработали новый метод определения радиоуглерода — с использованием ускорителя ионов. Чувствительность измерений увеличилась более чем в 1000 раз. Метод этот основан на превращении атомов углерода-14 в пучок ионов, который с помощью электрических и магнитных полей отделяется от всех других атомов — и затем число атомов ^{14}C измеряется с высокой точностью. Теперь вместо десятков граммов образца для анализа достаточно было взять всего несколько миллиграммов, а иногда и долей миллиграмма.

При разработке радиоуглеродного метода ученым пришлось сталкиваться и с другими трудностями, часто довольно неожиданными. Так, чтобы проверить и откорректировать метод, они провели анализ годовых колец секвойи, остистой сосны и других деревьев, возраст которых исчисляется тысячами лет. Между годовыми кольцами обмен углеродом практически отсутствует, поэтому можно было ожидать, что содержание ^{14}C при движении от края ствола к его центру будет закономерно снижаться — в точном соответствии с формулой радиоактивного распада. Однако выяснилось, что количество радиоуглерода в атмосфере не всегда было точно таким, как сейчас, и пришлось вводить специальные поправки. Массовые испытания ядерного оружия в 50—60-е гг. XX в. также изменили содержание ^{14}C в воздухе.

Очень серьезная проблема — загрязнение анализируемого образца. При этом случайное попадание «старого» углерода (например, мела) в «современный» не так опасно: ошибка будет невелика. Но если в «старый» образец, в котором содержание радиоуглерода за время его существования уменьшилось, скажем, в 100 раз, попадет хотя бы 1% примеси «современного» углерода, то общее количество ^{14}C в этом образце удвоится, и ошибка в определении возраста окажется очень большой (она будет равна $T_{1/2}$ то есть около 6 тыс. лет!). С подобными «загрязнениями» исследуемых объектов ученые сталкиваются довольно часто. Например, когда в штате Орегон (США) при прокладке горной дорога нашли в пещере 300 пар древней обуви, археологи решили для лучшей сохранности покрыть их слоем шеллачного лака. К счастью, лака хватило только для 294 пары, и по оставшимся шести парам удалось определить радиоуглеродным методом возраст всей обуви; ведь «свежий» нуклид ^{14}C , который есть в лаке, смазал бы всю картину.

Еще с одной загадкой ученые столкнулись, когда попытались радиоуглеродным методом определить возраст травы, росшей возле шоссе с оживленным движением. Оказалось, что траве... много тысяч лет! Разгадка оказалась довольно простой, но поучительной; придорожная трава усваивала углекислый газ из выхлопных газов автомобилей. Образуются эти газы при сгорании бензина, бензин получают из нефти. А так как нефти — миллионы лет, нуклид ^{14}C в ней не сохранился. Поэтому и содержание ^{14}C в придорожной траве оказалось сильно заниженным.

Радиоуглеродный метод проверили на образцах, возраст которых знали заранее — по археологическим данным: например, на кусочках дерева из гробниц фараонов (от 3900 до 5600 лет назад) или из развалин Помпеи (2000 лет назад). Измерения подтвердили его правильность.

Тайна туринской плащаницы

Радиоуглеродный метод использовали и при определении возраста знаменитой туринской плащаницы. Верующие считают, что в эту плащаницу было завернуто после казни тело Христа, и на ней якобы остался отпечаток его лица и тела. Плащаница была выставлена для всеобщего обозрения в итальянском городе Турине в 1978 г. Это льняное полотнище длиной 4,3 м и шириной 1,1 м, на котором проглядывается фигура человека. Первое документальное свидетельство об этой плащанице относится к середине XIV в., тогда она находилась во Франции. Затем ее много раз перевозили из одной церкви в другую. Побывала она даже в пожаре, но была (в основном) спасена.

Последние 400 лет плащаница хранится в Турине. Споры о ее подлинности не утихают. Еще в 1390 г. Папа Климент VII объявил плащаницу подделкой, но в 1978 г. Папа Павел VI назвал ее самой важной реликвией в истории христианства.



Рис. 28. Две фотографии головы, изображенной на плащанице: слева — так, как она выглядит на проявленной фотопластинке; справа — на холсте.



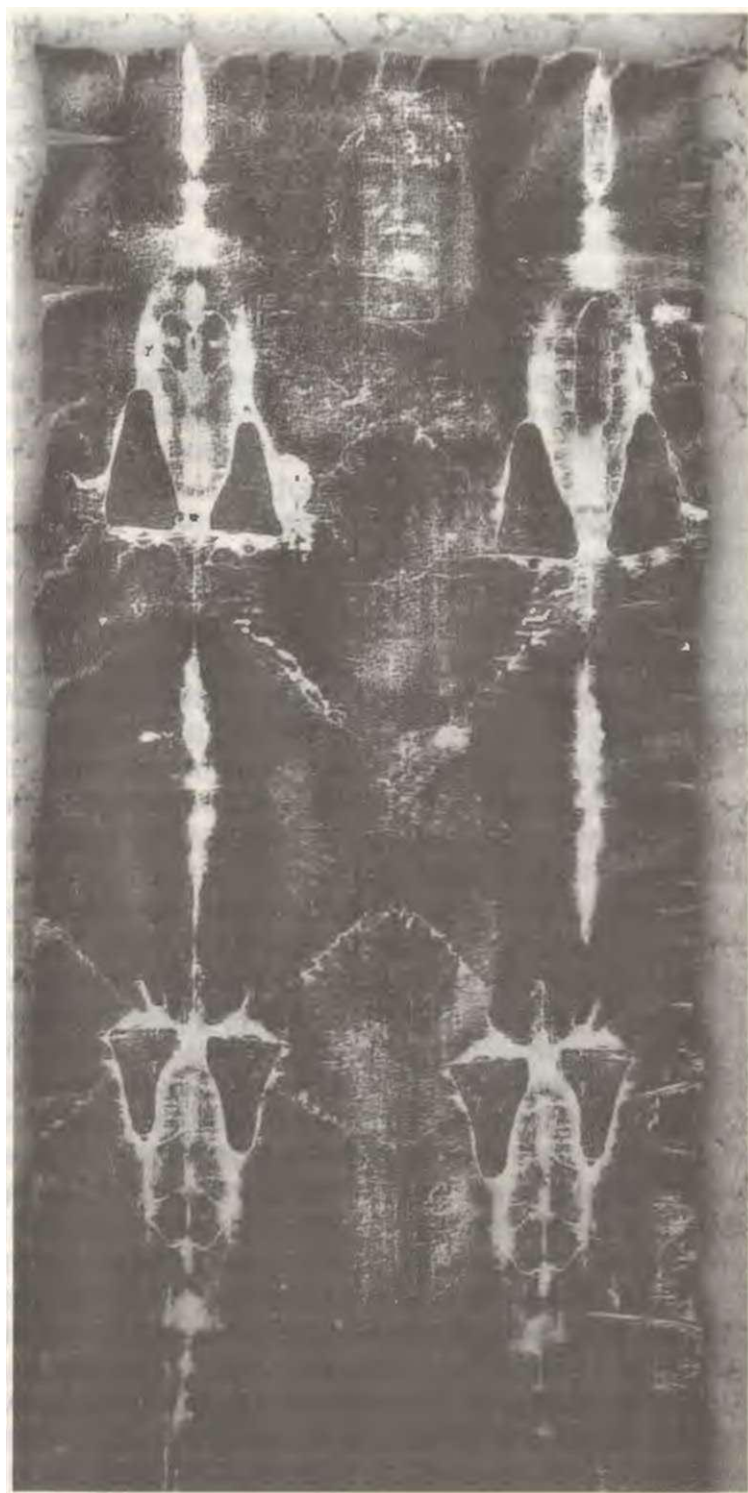


Рис. 29. Туринская
плащаница:
аргументов за ее
подлинность не
меньше, чем против.

Первую фотографию плащаницы разрешили сделать в 1898 г., и с тех пор в спор вступили ученые (рис. 29). Однако все более совершенные средства научного анализа (изучение структуры и состава волокон, способа их плетения, присутствия на них пыльцы определенных растений, анализ пятен краски и крови и т. д. и т. п.) не только не прояснили вопрос, но запутали его еще больше. Аргументов за подлинность плащаницы оказалось не меньше, чем против. Главное, что важно было выяснить, — время изготовления полотна.

Архиепископ Турина долго не давал разрешения на радиоуглеродный анализ, и его можно понять: ученым нужен был довольно большой кусок ткани. Но когда чувствительность радиоуглеродного метода значительно повысилась, а требования ученых, соответственно, снизились, архиепископ разрешил отрезать от края плащаницы, где не было следов изображения, небольшой лоскут. И вот утром 21 апреля 1988 г. в присутствии архиепископа Турина, кардинала Баллестреро и большой группы ученых от плащаницы отрезали полоску шириной 1 см и длиной 7 см. Ее разделили на три части, каждая — массой по 50 мг, завернули по отдельности в алюминиевую фольгу и упаковали в пронумерованные капсулы из нержавеющей стали. Эти капсулы и три контрольных образца передали представителям трех ведущих лабораторий из Аризоны (США), Оксфорда (Англия) и Цюриха (Швейцария). Они не знали, что находится в каждой капсуле, это держалось в секрете. В контрольных образцах были: ткань из нубийского захоронения XI—XII вв., ткань, снятая с мумии Клеопатры (начало II в.), и нити со старинной ризы времен правления французского короля Филиппа IV (1290–1310).

Во всех лабораториях образцы прежде всего подвергли микроскопическому исследованию и тщательной очистке, чтобы удалить возможные примеси (в разных лабораториях использовали: микропылесос, промывку растворителями с применением ультразвука, обработку моющими средствами, горячими кислотами и щелочами). Затем образцы сожгли, а образовавшийся улекислый газ превратили в чистый углерод — графит. В нем с помощью масс-спектрометра и определяли содержание ^{14}C .

Отчеты всех лабораторий собрали в Британском музее и проанализировали. Результаты анализа опубликовали в одном из самых уважаемых научных журналов мира — «Nature» («Природа»). В работе участвовало множество исследователей, и не удивительно, что у статьи оказался 21 автор. Выяснилось, что хотя результаты анализов разных лабораторий несколько отличались друг от друга, они все же были достаточно согласованными и в среднем указывали возраст плащаницы примерно в 690 лет, с ошибкой около 30 лет (возраст по радиоуглеродному методу принято отсчитывать назад от 1950 г.). Хорошо согласовывались данные и контрольных образцов — их возраст оценивался в 937 лет, 1964 года и 724 года. После

введения поправок на изменение содержания ^{14}C в атмосфере в прошлые столетия ученые вынесли решение; с вероятностью не менее 95% ткань плащаницы изготовлена между 1260 и 1390 годами. Выходило, что Папа Климент VII прав: плащаницу соткали именно тогда, когда о ней появилось первое документированное упоминание. Так радиоуглеродный метод датировки, казалось бы, положил конец спорам, которые длились шесть веков.

Однако в науке редкое серьезное достижение не опровергается. Не стал исключением и анализ возраста плащаницы. Вы помните, как сильно можно было ошибиться, определяя возраст травы радиоуглеродным методом, если не учитывать особенности ее роста и «питания» выхлопными газами? Там реальный возраст объекта исследования оказался значительно меньше, чем по данным анализа. Не исключены ошибки и в другую сторону.

Когда результаты исследований ткани плащаницы опубликовали, некоторые российские ученые выдвинули против них такой довод. Как известно, плащаница в средние века побывала в пожаре. При этом естественно предположить, что ее ткань могла сильно пропитаться дымом. Дым содержит очень мелкие частицы, от которых ткань не всегда можно отмыть, тем более если эти частицы были в ней сотни лет. Возраст же углерода, содержащегося в частицах дыма, одинаков с горевшим деревом. Такое загрязнение «старого» (времен Христа) углерода ткани плащаницы более «молодым» (средневековым) вполне могло «омолодить» и саму плащаницу, если судить о ее возрасте по количеству нераспавшегося радиоуглерода. Так что споры вокруг плащаницы продолжаются.

Как радиация помогла измерить число Авогадро

Вы уже знаете, что 1 моль вещества содержит огромное число частиц — $6 \cdot 10^{23}$ атомов, ионов или молекул. Как же удалось их подсчитать? Методов определения числа Авогадро было придумано много, но один из первых и самых простых по своей сути был метод, основанный на прямом подсчете атомов. Конечно, все атомы в моле вещества не сосчитало бы все человечество за все годы своего существования. Но, во-первых, можно считать атомы не в моле, а в небольшой его части, и, во-вторых, считать не все атомы, а только небольшую, но заранее известную их часть. Однако начнем по порядку.

В 1903 г. один из самых талантливых физиков-экспериментаторов XX в. Эрнест Резерфорд показал, что недавно открытый новый химический элемент радий испускает положительно заряженные частицы, летящие с боль-

шой скоростью. Необходимо было выяснить, много ли таких частиц (их называли альфа-частицами) испускает радий за 1 с. Как это сделать?

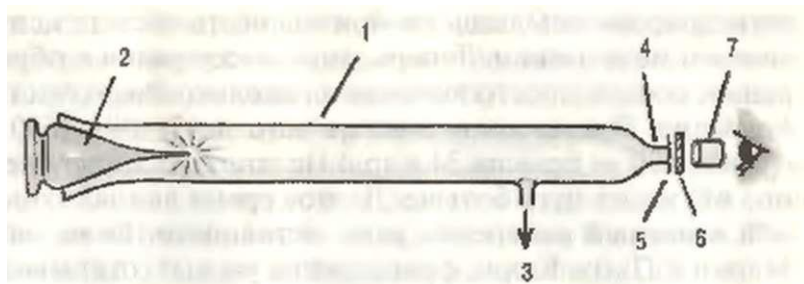
В 1908 с Резерфорд выяснил это очень остроумным способом. В работе ему помогал известный немецкий физик Ганс Гейгер (его именем назван счетчик радиоактивного излучения). Оба физика использовали простой прибор — спинтарископ. В нем есть маленькая стеклянная пластинка, покрытая люминофором. Если в темноте к пластинке с люминофором близко поднести радий или какое-либо его химическое соединение, покрытие начнет ярко светиться. Чем меньше радия в образце и чем он дальше от пластинки, тем слабее свечение. Но самое удивительное откроется взгляду, если посмотреть на пластинку через сильное увеличительное стекло, а лучше — в микроскоп: вместо равномерного свечения то там, то здесь видны отдельные яркие, быстро гаснущие вспышки. Впечатление такое, будто на фоне черного неба вспыхивает и гаснет множество звезд. Незабываемое зрелище!

Объясняется оно тем, что каждая альфа-частица, достигшая люминофора, вызывает в нем кратковременную вспышку света. Если частиц много, то и вспышек будет много. Если же частиц мало, то вспышки будут редкими, и их вполне можно сосчитать. Каждая вспышка сигнализировала о том, что распался один атом радия, и это позволило Резерфорду сказать: «Впервые в истории стало возможным регистрировать отдельные атомы вещества».

В том-то и состояла идея: сосчитать число альфа-частиц, падающих на пластинку за определенное время, а затем с помощью простых геометрических формул определить общее число частиц, вылетающих из образца. Для этого в лаборатории Резерфорда изготовили прибор, который он называл «стреляющей трубкой» (рис. 30). Крошечное количество радиоактивного вещества (содержащего всего 0,055 мг радия) поместили на кончик иголки, укрепленной на одном конце трубки. На другом конце трубки, на расстоянии 1,5 м, было маленькое отверстие диаметром 1,25 мм. Через него альфа-частицы вылетали из трубки и тут же ударялись о пластинку с люминофором, вызывая вспышку. Чтобы хорошо видеть эти вспышки, нужна была полная темнота. Кроме того, экспериментатор сам должен был предварительно побыть какое-то время в темноте, чтобы его зрение стало чувствительнее и могло четко различать слабые вспышки. Физиологи знают, что привыкание (адаптация) глаза к темноте в тысячи раз повышает его чувствительность.

Но это была не единственная и не главная трудность в эксперименте. Оказалось, что альфа-частицы, испускаемые радием, пролетают в воздухе всего несколько сантиметров: по прямой им мешают лететь молекулы азота и кислорода, содержащиеся в воздухе. Значит, надо было с помощью насосов удалить воздух из трубки, то есть создать в ней вакуум. А как это

Рис. 30. Прибор для определения скорости распада радия: 1 — вакуумированная стеклянная трубка; 2 — пробка с укрепленным на острие



радиоактивным образцом; 3 — откачка воздуха насосом; 4 — калиброванное отверстие в короткой стеклянной трубочке; 5 — листочек слюды; 6 — стеклянная пластинка, покрытая (со стороны слюды) люминофором; 7 — микроскоп.

сделать, если на другом ее конце есть отверстие? Воздух через него будет быстро проникать в трубку и никакого вакуума создать в ней не удастся.

Однако для таких прекрасных экспериментаторов, какими были Резерфорд и Гейгер, это не стало проблемой. С помощью воска они приклеили снаружи к отверстию листочек слюды. Этот листочек был такой тонкий, что альфа-частицы свободно проходили через него, не задерживаясь. А вот воздух уже не мог попасть в трубку и нарушить вакуум.

Наконец все было готово к эксперименту: вакуум достиг нужной глубины, глаза хорошо привыкли к темноте. Осталось поудобнее пристроиться у микроскопа и включить секундомер...

Вот одна альфа-частица пролетела сквозь заклеенную слюдой дырочку — вспышка! Проходит несколько секунд — еще одна вспышка, потом третья, четвертая... Опыт длился 10 минут, после чего экспериментатора сменил его помощник; чтобы не было ошибки, опыт надо повторить не один раз, а потом взять среднее значение. Оказалось, что за 10 минут в среднем наблюдалось 49 вспышек — значит, столько же альфа-частиц пропало за это время через отверстие. А сколько всего их вылетело из «кончика иголки» за 10 минут?

Расчет очень прост. Альфа-частицы летят из образца равномерно во все стороны. Значит, во сколько раз площадь отверстия меньше площади всей сферы (диаметром 1,5 м), во столько раз испущено больше частиц, чем сосчитано вспышек. Площадь отверстия (она равна $\pi d^2/4$; вы, наверное, уже знаете эту формулу) легко сосчитать по его диаметру d : она равна 1,23 мм². Площадь сферы радиуса r (она равна $4\pi r^2$ выраженная в квадратных миллиметрах, получается огромной: $2,83 \cdot 10^7$ мм² — в 23 млн раз больше площади отверстия. Значит, во столько же раз больше альфа-частиц вылетело из образца за время измерений, то есть $49 \cdot 23 \cdot 10^6 = 1,13 \cdot 10^9$ — больше миллиарда! В этом и заключалась хитрость опыта:

регистрировалась лишь ничтожная часть частиц, испускаемых радиоактивным источником. Теперь, зная массу радия в образце и время измерения, совсем просто вычислить, сколько альфа-частиц за 1 с испускает 1 г радия. Оказалось — очень много: $1,13 \cdot 10^{10}$: $(600 \text{ с} \cdot 0,055 \cdot 10^{-3} \text{ г}) = 3,42 \cdot 10^{10}$ — больше 34 млрд! Позднее эту цифру несколько уточнили: она оказалась чуть больше. Долгое время данная константа была основной единицей изменения радиоактивности. Ее называли кюри — в честь Марии и Пьера Кюри, французских ученых, открывших в 1898 г. радий и выделивших его в чистом виде.

А как с помощью радия определили число Авогадро? Это уже другая история. Еще в 1895 г английский химик У. Рамзай, который прославился открытием в воздухе аргона, обнаружил в минерале клевеите благородный газ гелий. Позже значительные количества гелия обнаружили и в других минералах — но только в тех, которые содержали уран и торий. Это казалось удивительным и странным: откуда в минералах мог взяться редкий газ? Когда Резерфорд начал исследовать природу альфа-частиц, испускаемых радиоактивными минералами, стало ясно, что гелий — продукт радиоактивного распада. Оказалось, что альфа-частицы — это фактически те же атомы гелия, только без электронов и летящие с огромной скоростью. Когда они тормозятся, сталкиваясь с другими атомами и со стенками сосуда, они захватывают электроны и превращаются в атомы гелия. Значит, каждую секунду 1 г радия выделяет десятки миллиардов атомов гелия. Выделяется гелий и другими радионуклидами, в том числе продуктами распада радия. Поэтому минералы, содержащие радиоактивные элементы, за миллионы лет своего существования могут выделить значительные количества гелия. Гелий частично попадает в атмосферу, а частично «застревает» в минералах, и его можно там обнаружить чувствительными методами.

Идея эксперимента стала Резерфорду ясна: надо измерить, какой объем гелия выделяется известным количеством радия за определенный срок, и, исходя из этого объема, рассчитать число молей гелия. К тому времени было уже хорошо известно, что 1 моль газа при нормальном атмосферном давлении и температуре 0°C занимает объем 22,4 л.

В 1911 г. Резерфорд, на этот раз с молодым американским физиком Б. Болтвудом, приступил к решающему эксперименту. Для опыта взяли соль радия, которую одолжила Резерфорду Венская академия наук. Соль содержала 193 мг чистого радия — огромное, особенно по тем временам, количество, стоившее громадных денег. Из-за начавшейся в 1914 г. войны Резерфорд не смог вернуть радий в Австрию. Лишь в конце 20-х гг. Кембриджский университет, где работая Резерфорд, согласился выплатить за предоставленный займы радий 3000 фунтов стерлингов — с рассрочкой платежа на 6 лет.

Но вернемся к опыту Резерфорда и Болтвуда. Они насыпали радиоактивную соль в платиновую капсулу с дырочками в крышке и поместили в стеклянную трубку из специального тугоплавкого стекла, в которой создали вакуум. Затем прибор оставили в покое на 83 дня. Решив, что времени прошло достаточно, ученые нагрели стеклянную трубку вместе с платиновой капсулой до красного каления. Из соли выделился газообразный гелий. Его количество точно измерили. Расчеты показали, что каждый день соль радия выделяла $0,0206 \text{ мм}^3$ гелия (или $0,107 \text{ мм}^3$ в расчете на 1 г радия). Зная скорость испускания альфа-частиц радием и сделав поправку на то, что альфа-частицы (и следовательно, атомы гелия) образуются не только из радия, но и из продуктов его распада, ученые рассчитали число атомов гелия в одном его моле: $6,1 \cdot 10^{23}$. Это было самое точное значение числа Авогадро, известное в те годы (современное значение $6,02 \cdot 10^{23}$). Так опыты с радием помогли в буквальном смысле подсчитать число атомов в известном количестве вещества. Замечательное достижение человеческого разума!

В последующие годы и десятилетия были и другие, не менее выдающиеся достижения в этой области. Они привели к значительным успехам во многих отраслях науки и техники, но одновременно и к взрывам ядерных бомб, и к авариям на атомных электростанциях. Однако так было всегда; любые достижения науки можно использовать и на пользу, и во вред человечеству. Как писал Д. И. Менделеев, изобретение Нобелем динамита, конечно, привело к значительному увеличению взрывчатой силы мин и снарядов, но ведь ученый надеялся, что мирное использование новых взрывчатых веществ окажется для человечества важнее, чем их военное применение. Эти слова великого химика не потеряли своей актуальности и в наши дни.

Химики музицируют

Музыка — удивительное творение человеческого интеллекта. Комбинация звуковых колебаний, произведенная в нужном сочетании и в определенной последовательности, может оказать сильнейшее воздействие на человека, повлиять на его эмоциональное состояние и даже на поведение. Музыка вдохновляла великих писателей, художников и, конечно, самих композиторов. Существует и обратная связь: многие деятели науки и культуры внесли заметный вклад в развитие музыки. «Высокая одаренность в одной области вовсе не исключает высокой одаренности в других областях, — пишет в статье «Способности и одаренность» академик Б. М. Теплов (1896—1965), один из самых ярких представителей отечественной пси-

хологии, и продолжает: — Действительно, из того факта, что человек всю жизнь работал на одном только направлении и достиг в нем больших, иногда даже великих результатов, мы обычно делаем совершенно незаконный вывод, что во всякой другой деятельности он никаких талантов и способностей не имел. Достаточно просмотреть со вниманием биографии крупных деятелей в различных областях творчества, чтобы убедиться в том, что положение "талант как таковой односторонен" не соответствует действительности. Такие примеры, как актерский талант Н. В. Гоголя, музыкальный талант А. С. Грибоедова, живописный и музыкальный талант Т. Г. Шевченко, легко приходят в голову всякому. Но эти примеры говорят вовсе не о каких-то исключительных случаях; вероятно, случаи полной односторонности таланта представляют собой исключение».

Дальше Б. М. Теплов в подтверждение своей мысли приводит интересные факты из биографии известных музыкантов — Ф. Шопена, К. М. Вебера, А. Н. Серова, Дж. Россини, А. К. Лядова, С. И. Танеева и др.

Ну а как обстоит дело с химиками с точки зрения их музыкальных дарований? Русский композитор Александр Порфирьевич Бородин (1833 — 1887), автор оперы «Князь Игорь», многих симфоний, струнных квартетов, был доктором медицины, а позднее — профессором химии. Он с детства страстно увлекался в равной степени и музыкой, и химией и пронес эту страсть через всю жизнь. Великий русский химик Н. Н. Зинин, у которого делал свои первые шаги в химии Бородин, не одобрял его увлечения музыкой. «Поменьше занимайтесь романами, — говорил он будущему замечательному композитору, определившему целое направление в русской симфонической музыке. — На вас я возлагаю все свои надежды... А вы все думаете о музыке и двух зайцах». Однако жить без музыки Бородин не мог. Сочинять он начал с 9 лет, играл на рояле, брал уроки музыки на флейте. Товарищ Бородина с детских лет М. Р. Щиглев вспоминает: «Мы оба бойко играли и свободно читали ноты и на первый год уже переиграли в четыре руки чуть не все написанное. Таким образом, мы знали чуть не наизусть все симфонии Бетховена и других, и в особенности заигрывались и вдохновлялись Мендельсоном... Чтобы познакомиться с камерной музыкой, я самоучкой стал играть на скрипке, а А. П., также самоучкой, на виолончели... Мы не упускали никакого случая поиграть трио или квартет — где бы то ни было и с кем бы то ни было. Ни непогода, ни дождь, ни слякоть — ничто нас не удерживало, и со скрипкой под мышкой, а А. П. с виолончелью на спине часто делали концы пешком, так как денег у нас не было ни гроша...»

Достойно упоминания, что и жена Бородина, Екатерина Сергеевна, была блестящей пианисткой, а также композитором; ей он посвятил свой второй квартет, романсы.

И все же сам Бородин считал главным делом своей жизни не сочине-



Рис. 31. На памятной монете Госбанка России (1993 г.) слева от портрета А. П. Бородина выгравированы химические приборы, которые он использовал в своих опытах, а справа — первый такт одного из его музыкальных произведений.

ние музыки, а занятия наукой. Он опубликовал множество статей по органической химии, разработал новые способы синтеза различных органических соединений. Его имя занимает почетное место в сборнике «Выдающиеся химики мира», опубликованном в 1991 г. В анналах химии навсегда останется «реакция Бородина» — она известна химикам всего мира (рис. 31).

Только за время трехлетней заграничной командировки, работая в химических лабораториях Гейдельберга, Парижа и Пизы, молодой Бородин (ему тогда не было и 30 лет) опубликовал более 10 работ по химии на немецком, французском и итальянском языках. Его работоспособность была удивительной. Так, в Гейдельберге он по 12 часов — с 5 утра до 5 вечера — проводил в лаборатории, а затем, после отдыха, с 8 вечера до полуночи отдавал себя музыке. В таком темпе Бородин работал всю жизнь, и это не прошло для него бесследно: он скоропостижно скончался в возрасте 53 лет.

Примером А. П. Бородина далеко не исчерпывается взаимосвязь музыки и химии. Его ученику, другу и преемнику химику А. П. Дианину посвятил свой романс «Сомнение» Римский-Корсаков. Беззаветно любил музыку ближайший друг Бородина с молодых лет Дмитрий Иванович Менделеев. По его словам, музыка всегда глубоко и сильно возбуждала

его чувства. Недаром великий знаток музыки В. В. Стасов называл Менделеева «музыкальной натурой». Находясь в заграничной командировке в Германии (в те же годы, что и Бородин), Менделеев постоянно напевал мелодию из бетховенекой «Леоноры», что дало повод Бородину называть его в шутку этим именем. И. Д. Менделеев, младший сын Дмитрия Ивановича, писал: «Музыкантом отец не был и, когда напевал, иногда фальшивил. Но музыку чувствовал и любил страстно. Музыка на него сильно действовала. Прослушав при мне какую-то мелодию, он сказал: "Вот это я хотел бы слышать, когда буду умирать"». А физик Б. П. Вейнберг оставил такое необычное воспоминание о лекциях Менделеева, которые он посещал в юности: «Будь я музыкантом, я, думается, мог бы положить лекции Менделеева на музыку...»

Все студенты-химики изучают перегруппировку Арбузова — эта реакция стала универсальным методом синтеза фосфорорганических соединений. Менее известны музыкальные дарования выдающегося ученого, одного из основателей химии фосфорорганических соединений академика А. Е. Арбузова (1877—1968). По воспоминаниям современников, Александр Ерминингельдович был натурой кипучей и многогранной, знатоком и тонким ценителем искусства. А первое место среди искусств в его жизни занимала музыка. Арбузов увлекся ею еще в детстве и эту любовь пронес через всю свою долгую жизнь. Он был прекрасным скрипачом и неоднократно давал сольные концерты, работал концертмейстером Дома ученых в Казани. Арбузов не только исполнял произведения любимых композиторов — Рахманинова, Глазунова, Бородина, Гайдна, — но и пропагандировал их в своем родном городе — Казани. Случайно заговорив с собеседником о музыке, он мог прочесть целую лекцию по ее истории. Известны музыковедческие работы Арбузова, посвященные Бородину и «Могучей кучке».

В 1911 г. Арбузов организовал квартет при Казанском университете, в котором играли профессор-медик Бургсдорф (виолончель) и два ученика Арбузова — Парфентьев и Евлампиев (впоследствии профессор, декан химического факультета Казанского университета). Концерты квартета всегда привлекали большую аудиторию слушателей. По инициативе Арбузова был также организован симфонический оркестр из профессорско-преподавательского состава вузов Казани. По его же инициативе почти все заседания Татарского отделения химического общества им. Д. И. Менделеева начинались с исполнения симфонических произведений. Играл Арбузов не только на скрипке. Как-то в молодости он забрел в Федоровский монастырь и увидел в руках одного из монахов гармонию. Поддавшись искушению, он попросил разрешения взять ее и заиграл русские плясовые мелодии. Монахи послушали-послушали да вдруг, подобрав рясы, пустились в пляс. Свой последний «сольный концерт» на гармонии Арбузов дал, будучи уже в преклонном возрасте, на волжской пристани Ше-

ланга, где он проводил летний отпуск. «Музыка помогала мне всегда и во всем, — вспоминал академик. — Второй моей страстью были живопись и ваяние». Действительно, как утверждают специалисты, Александра Ермингельдовича отличало исключительное, почти профессиональное мастерство в живописи. Лирические пейзажи, которые он выполнял акварелью и маслом, до сих пор украшают его музей-квартиру в Казани.

Химики-музыканты были, конечно, не только в России. Большими музыкальными способностями обладал знаменитый немецкий химик Вильгельм Оствальд (1853—1932). По вечерам он любил играть на скрипке или на рояле — в четыре руки вместе со своей женой. Кроме того, Оствальд был отличным виолончелистом и играл в оркестре г. Дерпта (ныне Тарту), которым дирижировал... профессор физики Артур Эттинген.

Игрой на фортепиано в четыре руки очаровал свою будущую жену Анри Сент-Клер Девиаль (1818—1881) — известный французский химик, изготовивший в 1872 г. из сплава платины с иридием международные эталоны метра и килограмма, разработавший технический способ получения алюминия и магния, открывший явление термической диссоциации веществ, сделавший ряд других важных открытий. В молодости он долго колебался, выбирая между естественными науками и музыкой, первые уроки которой получил от матери. И лишь пример любимого старшего брата Шарля, будущего геолога, академика, решил дело в пользу химии.

Чехословацкий химик Эмиль Воточек (1872—1950), основные работы которого посвящены исследованиям сахаров, был одновременно автором многих музыкальных пьес. Шведский биохимик Аксель Хуго Теорелль, получивший в 1955 г. Нобелевскую премию по физиологии и медицине за работы по химии ферментов и механизму их действия, был не только хорошим виолончелистом, но и руководителем Стокгольмского филармонического общества. Еще один лауреат Нобелевской премии по химии — американец У. Н. Липскомб (он получил ее в 1976 г. за исследование структуры бороводородов и природы химических связей в них) играл на кларнете в симфоническом оркестре г. Миннеаполиса. Такие примеры при желании можно продолжить.

Но разве есть какая-либо связь между музыкальными увлечениями химиков и их основной профессией (поставим все же химию на первое место, если так делал даже Бородин)?

Многие открытия, в том числе и в области химии, часто совершаются как бы случайно: вдруг происходит нечто вроде «озарения», и долго мучившая ученого проблема неожиданно получает свое разрешение. Как правило, этому предшествует длительная и кропотливая работа. Факты постепенно накапливаются в подсознании и ждут лишь толчка, чтобы сформироваться в стройную логическую систему. Иногда это происходит даже во сне (достаточно вспомнить знаменитые «вещие» сны Кекуле и Менде-

леева). Но такой толчок может дать и музыка — сильнейший эмоциональный фактор для ее ценителя и почитателя:

За музыкою только дело.
Итак, не размеряй пути.
Почти бесплотность предпочти
Всему, что слишком плоть и тело.

Эти слова Поля Верлена (в переводе Б. Пастернака) воспринимаются в таком контексте почти буквально.

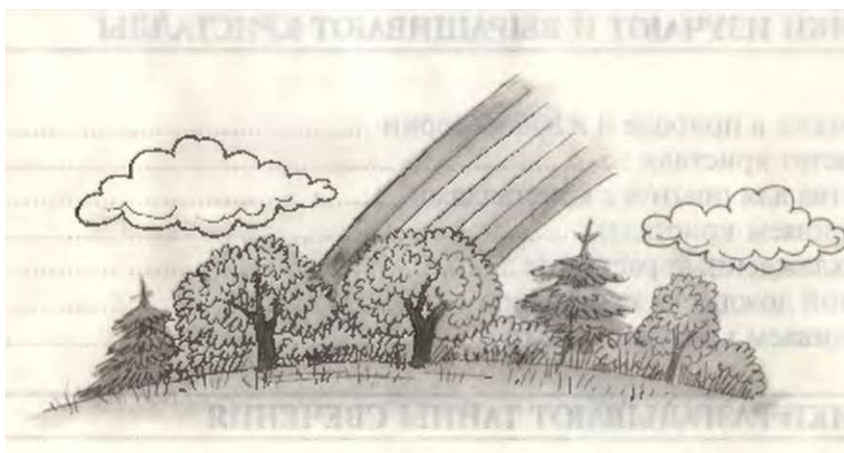
Вот такая история произошла с американским химиком Казимиром Фаянсом (1887—1975), внесшим значительный вклад в развитие учения о взаимодействии ионов с растворителем в растворах. К. Фаянс известен также как автор так называемого правила сдвига, или закона радиоактивного смещения. Он сделал это открытие, будучи молодым доцентом Высшей технической школы в г. Карлсруэ. Фаянс вспоминает, что основная идея этого закона пришла к нему 23 ноября 1912 г., в тот момент, когда он слушал оперу Р. Вагнера «Тристан и Изольда». Пять месяцев спустя Фаянсу удалось решить еще одну научную проблему: он нашел взаимосвязь между стабильностью и атомной массой изотопов радиоактивного элемента. Поразительно, но решение этой проблемы также пришло к нему в концертном зале, на этот раз — во время исполнения комической оперы «Царь и плотник, или Два Петра». Когда спустя много лет Фаянс, ставший к тому времени профессором физической химии в Мюнхене, рассказал об этих случаях своему коллеге, известному физико-теоретику Арнольду Зоммерфельду, тоже страстному почитателю музыки, тот сказал, что первая из обнаруженных Фаянсом закономерностей, о которых шла речь, для науки значит гораздо больше, чем вторая. И это не удивительно, на полном серьезе продолжал Зоммерфельд, поскольку достоинства оперы «Царь и плотник» (она написана почти забытым сейчас немецким композитором первой половины XIX в. Густавом Лорцигом) не идут ни в какое сравнение с выдающимся произведением Рихарда Вагнера.

И уж совсем забавный случай произошел в доме того же К. Фаянса (он тогда еще жил в Германии), когда к нему зашел полицейский чиновник, чтобы выяснить какое-то дело. Среди прочих был задан вопрос о профессии, на что Фаянс ответил: «Профессор физической химии». Полисмен записал все сведения, а потом прочитал вслух: «Профессор музыкальной химии». (По-немецки «Professor der physikalische Chemie» и «Professor der musikalische Chemie» действительно звучат похоже; кстати, сам Фаянс считал, что полисмен сделал не такую уж большую ошибку.)

Музыкальные мотивы можно проследить и в деятельности других химиков. В 1864 г. английский химик Джон Ньюлендс (1837—1898), расположив все известные тогда элементы вертикальными столбцами по 7 в каждом, обнаружил закономерность, которую назвал «законом октав»: близ-

кие по свойствам элементы, как и близкие по звучанию ноты в музыкальной октаве, можно было обнаружить через каждые 7 элементов. «Восьмой элемент, начиная с данного, — писал Ньюлендс, — был повторение первого, подобно восьмой ноте октавы в музыке», Вряд ли музыкальная аналогия была у Ньюлендса случайной, если учесть его итальянское происхождение по материнской линии. Совсем еще молодой ученый (ему было тогда только 25 лет) уже успел прославиться тем, что сражался за свободу Италии в войсках Гарибальди. Но с «законом октав» Ньюлендсу не повезло: таблица имела множество недостатков, и современники совершенно ее проигнорировали. Чего стоит одно лишь ехидное замечание профессора физики Д. Фостера: не пробовал ли Ньюлендс поискать какую-нибудь другую закономерность среди элементов, расположив их, например, в алфавитном порядке по названиям?...

В заключение вспомним еще раз высказывание Козьмы Пруткова о том, что «специалист подобен флюсу: полнота его односторонняя». Мы видели на примере многих выдающихся личностей, что жизнь опровергает это утверждение. Поэтому даже при самом неистовом увлечении химией не забывайте, что существуют музыка, живопись, театр, художественная литература — одним словом, искусство, которое не только не мешает, но даже помогает ученому в его работе.



СОДЕРЖАНИЕ

ВМЕСТО	ПРЕДИСЛОВИЯ.....	3
--------	------------------	---

ХИМИКИ ИЗМЕРЯЮТ

Измерения массы и объема.....	5
Измеряем плотность металла.....	10
Измеряем диаметр атома.....	12
Измеряем длину молекулы.....	13

ХИМИКИ АНАЛИЗИРУЮТ

Что такое химический анализ и аналитическая химия.....	17
Об уксусе, пекарских порошках и «пузырьковом индикаторе».....	20
Титрование с индикатором.....	26
Анализ йодной настойки.....	30
Сколько в апельсине витамина С?.....	32
Анализ в эмалированной кружке.....	34

ХИМИКИ ИЗУЧАЮТ И ВЫРАЩИВАЮТ КРИСТАЛЛЫ

Кристаллы в природе и в лаборатории.....	38
Как растет кристалл.....	41
Вещества для опытов с кристаллами.....	46
Выращиваем кристаллы.....	48
Переохлажденные растворы.....	52
«Золотой дождь» из кристаллов.....	55
Выращиваем кристаллы меди.....	56

ХИМИКИ РАЗГАДЫВАЮТ ТАЙНЫ СВЕЧЕНИЯ

Свет «горячий» и «холодный».....	58
Какие бывают лампы.....	61
Люминофоры — источники «холодного» света.....	66
Холодное «химическое» свечение.....	70

ХИМИКИ ИЗУЧАЮТ РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

История с целыми числами	73
Химия и нумизматика	77
«Страшное» слово «радионуклид»	78
Как быстро распадаются атомы	81
Что такое радиоуглерод и откуда он берется	83
Радиоуглеродный метод датировки	85
Тайна туринской плащаницы	88
Как радиация помогла измерить число Авогадро	91
Химики музицируют	95

ДЛЯ СРЕДНЕГО И СТАРШЕГО ШКОЛЬНОГО ВОЗРАСТА

«Школьнику для развития интеллекта

Леенсон Илья Абрамович

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ХИМИЯ

Ответственный за выпуск А. Ю. БИРЮКОВА

Редактор И. Б. ШУСТОВА

Технический редактор

М. В. ГАГАРИНА

Корректор

О. И. ИВАНОВА

*Издание подготовлено в компьютерном центре
издательства «Росмэн».*

Лист, изд. № 071328 от 09.08.96.

Налоговая льгота — общероссийский
классификатор продукции ОК-005-93, том 2;
953000 — книги, брошюры.

Подписано к печати с готовых диапозитивов 13.01.2000.

Формат 70х100 1/16. Печ. л. 6,5. Тираж 12 000 экз.

Заказ № 3332. С - 887.

Издательский дом «Росмэн».

125124, Москва, а/я 62,

1-я ул. Ямского поля, 28.

МЕЛКООПТОВЫЙ СКЛАД:

Москва, 1-я ул. Ямского поля, 28 (левое крыло).

Тел.: (095) 257-34-75,

ОТДЕЛ ОПТОВЫХ ПРОДАЖ:

все города РОССИИ, СНГ: (095) 257-46-61;

Москва и Московская область: (095) 257-41 - 31

Тверской ордена Трудового Красного Знамени
полиграфкомбинат детской литературы
им. 50-летия СССР Министерства Российской
Федерации по делам печати, телерадиовещания
и средств массовых коммуникаций.
170040, г. Тверь, проспект 50-летия Октября, 46.





26

Как развить интеллект?

Известный ученый, дважды лауреат Нобелевской премии Лайнус Полинг писал:

«Наука играет столь важную роль в современной жизни, что ни один человек без научных знаний не может правильно понять мир, в котором живет». Современная наука, в том числе и химия, - это красочная мозаика, над которой трудятся множество мастеров. С помощью этой книжки вы познакомитесь с некоторыми «стеклышками» из огромной «химической мозаики», узнаете много нового и удивительного.

Можно ли в домашних условиях измерить длину молекулы?

Проверить знаменитый опыт Архимеда?

Как распознать кислоту с помощью «анютиных глазок»?

Как обычные монеты помогают американским школьникам изучать химию?

Прочитав эту книжку, вы не только узнаете ответы на эти и многие другие вопросы, но и научитесь размышлять, а это - необходимое условие развития интеллекта.

«РОСМЭН»

ISBN 5-257-00918-8



9 785257 009181