



БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •
выпуск 4

ОПЫТЫ В ДОМАШНЕЙ ЛАБОРАТОРИИ





БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •

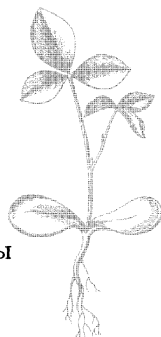
ВЫПУСК 4

ОПЫТЫ В ДОМАШНЕЙ ЛАБОРАТОРИИ

Ответственный редактор
академик И. К. КИКОИН



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1981



Scan AAW

22.3
О-60
УДК 53

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик **И. К. Кикоин** (председатель), академик **А. Н. Колмогоров** (заместитель председателя), кандидат физ.-мат. наук **И. Ш. Слободецкий** (ученый секретарь), член-корреспондент АН СССР **А. А. Абрикосов**, академик **Б. К. Вайнштейн**, заслуженный учитель РСФСР **Б. В. Воздвиженский**, академик **В. М. Глушков**, академик **П. Л. Капица**, профессор **С. П. Капица**, член-корреспондент АН СССР **Ю. А. Осипьян**, член-корреспондент АПН СССР **В. Г. Разумовский**, академик **Р. З. Сагдеев**, кандидат хим. наук **М. Л. Смолянский**, профессор **Я. А. Смородинский**, академик **С. Л. Соболев**, член-корреспондент АН СССР **Д. К. Фаддеев**, член-корреспондент АН СССР **И. С. Шкловский**.

О-60 Опыты в домашней лаборатории. — М.: Наука.
Главная редакция физико-математической литературы, 1981, 144 с. — (Библиотечка «Квант».
Вып. 4) — 25 коп.

Книга посвящена описанию сравнительно простых, но интересных и поучительных опытов, которые можно поставить дома с самым простым оборудованием. Она составлена из лучших статей, опубликованных в журнале «Квант». Читатель книги сможет попробовать вырастить кристаллы, исследовать движения маятника, провести опыты со светом, пользуясь граммофонной пластинкой или шариком от подшипника. Такие опыты помогают лучше понять физические законы, дают возможность провести первые самостоятельные физические эксперименты.

Для школьников, преподавателей, студентов.

О $\frac{20400-014}{053(02)-81}$ 138-80. 1704000000 ББК 22.3
53

О $\frac{20400-014}{053(02)-81}$ 138-80, 1704000000

© Издательство «Наука».
Главная редакция
физико-математической
литературы, 1980

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие редактора	5
ДЕМОНСТРАЦИЯ НЕВЕСОМОСТИ. А. Дозоров	7
КАРТЕЗИАНСКИЙ ВОДОЛАЗ. А. Виленин	9
АВТОМАТИЧЕСКИЙ СИФОН. В. Майер, Н. Назаров	10
ВИХРЕВЫЕ КОЛЬЦА. Р. Вуд	13
О ВИХРЕВЫХ КОЛЬЦАХ. С. Шабанов, В. Шубин	18
МОДЕЛИ СМЕРЧА. В. Майер	25
БУМЕРАНГ. Ф. Гесс	28
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ В ПАДАЮЩЕЙ ПРОБИРКЕ. Г. Покровский	37
ПОУЧИТЕЛЬНЫЙ ОПЫТ С КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУЕЙ. В. Майер	40
ДВА ФИЗИЧЕСКИХ ФОКУСА. В. Майер, Е. Мамаева	42
КАПЛЯ НА ГОРЯЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ. М. Голубев, А. Кагаленко	43
ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ЧЕРТИТ ГИПЕРБОЛУ. И. Воробьев	46
ОПЫТЫ С ЛОЖКОЙ БУЛЬОНА. В. Майер	48
КАК ВЫРАСТИТЬ КРИСТАЛЛ. М. Клиа	52
КРИСТАЛЛЫ ИЗ ШАРИКОВ. Г. Косоуров	56
ПУЗЫРЬКОВАЯ МОДЕЛЬ КРИСТАЛЛА. Я. Гегузин	63
КАК ОПРЕДЕЛИТЬ ПОЛЮСА МАГНИТА. Б. Алейников	75
СТРАННЫЙ МАЯТНИК. Н. Минц	77
ФИГУРЫ ЛИССАЖУ. Н. Минц	81
ВОЛНЫ В МЕЛКОЙ ТАРЕЛКЕ (ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ). А. Косоуров	90
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ. К. Стонг	97
	3

ИСКУССТВЕННОЕ СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ. Р. В у д	105
НЕ ВЕРЬ ГЛАЗАМ СВОИМ. Г. К о с о у р о в	108
ЦВЕТНЫЕ ТЕНИ. Б. К о г а н	113
КАКОГО ЦВЕТА ЗЕЛЕНКА? Е. П а л ь ч и к о в	114
ОРАНЖЕВОЕ НЕБО. Г. К о с о у р о в	116
ЗЕЛЕНАЯ КРАСНАЯ ЛАМПА. В. М а й е р	122
КАК С ПОМОЩЬЮ ПРОВОЛОКИ ИЗМЕРИТЬ ДЛИНУ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ. Н. Р о с т о в ц е в	125
ГРАМПЛАСТИНКА И ДИФРАКЦИЯ СВЕТА. А. Б о н - д а р ь	131
ШАРИК ВМЕСТО ЛИНЗЫ. Г. К о с о у р о в	134

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Физика — это наука экспериментальная, в том смысле, что основные законы природы, изучением которых она занимается, устанавливаются на основании данных эксперимента. Проводя ту или иную экспериментальную работу, физик-экспериментатор по существу задает вопрос природе, но природа отвечает только на *правильно* заданный вопрос. Это значит, что физический эксперимент должен быть тоже поставлен правильно, в противном случае экспериментатор не получит нужного ему ответа.

Талант экспериментатора и определяется его способностью правильно ставить эксперимент.

Экспериментальная физика — увлекательная наука. Ее методы позволяют понять и объяснить, а во многих случаях и открыть новые явления природы. И чем раньше человек приучается проводить физические эксперименты, тем раньше он может надеяться стать искусным физиком-экспериментатором.

Современная экспериментальная физика использует очень сложную и дорогостоящую технику, сосредоточенную в крупных научных институтах и лабораториях, сотрудниками которых, как я надеюсь, станут впоследствии многие из читателей этой книги.

Но простые и тем не менее увлекательные опыты можно поставить и у себя дома. В предлагаемой книге описан ряд таких именно опытов. В разное время они публиковались в журнале «Квант» в виде отдельных статей и теперь собраны вместе. Перефразируя известную поговорку, что «лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать», можно сказать, что лучше один раз самому провести эксперимент, чем многократно прочитать о нем. Поэтому мы рекомендуем читателям своими руками провести описанные в этой книге опыты. Необходимые для этого средства легкодоступны и их всегда можно найти.

Читатель убедится, что проведение опытов дело интересное и увлекательное. Совсем не обязательно ограничиваться точным воспроизведением того, что описано в книге. Опыты можно разнообразить и расширять, и тогда это уже будет настоящим научным исследованием.

Книга посвящена памяти одного из организаторов журнала «Квант» Георгия Ивановича Косоурова, который вел раздел опытов в журнале в первый год существования журнала и сам написал несколько очень интересных статей, включенных в настоящий сборник.

Среди авторов статей этой книги есть физики-экспериментаторы с мировой известностью. Но есть и статьи, написанные школьниками (точнее, недавними школьниками). Мы надеемся, что эта книга будет пользоваться успехом и доставит радость творчества не только тем, кто интересуется физикой и мечтает посвятить ей свою будущую деятельность, но и их друзьям, которым они будут демонстрировать свои опыты.

И. К. Кикоин

ДЕМОНСТРАЦИЯ НЕВЕСОМОСТИ

А. Д о з о р о в

Состояние невесомости достигается в свободном полете. И спутник на орбите, и свободно летящий камень, и подпрыгнувший человек находятся в состоянии невесомости. Груз, подвешенный на нити, в свободном полете невесом и, следовательно, не натягивает нить. Легко изготовить прибор, который дает возможность «наблюдать» состояние невесомости.

На рис. 1 дана принципиальная схема прибора.

В «нормальном» состоянии груз (G) натягивает нить, упругая пластина ($УП$) изгибается, разрывая контакт между клеммами ($K1$ и $K2$) цепи. При этом включенная в цепь лампа (L), естественно, не горит. Если все устройство подброшено вверх, груз находится в состоянии невесомости, а следовательно, не растягивает нить. Упругая пластина возвращается в неизогнутое положение, клеммы замыкаются, загорается лампочка. Лампочка горит лишь в том случае, если все устройство находится в состоянии невесомости. Обратите внимание, что состояние невесомости осуществляется и при движении вверх, и при движении вниз.

Регулировочный винт (B) позволяет установить клеммы так, чтобы они при неподвижном положении устройства были слегка раздвинуты. Все устройство крепится внутри прозрачной коробки. На рис. 2 показан общий вид прибора.

Несколько практических советов по изготовлению прибора. Чтобы можно было пользоваться как большой (плоской) батарейкой, так и маленькой «Кроной», лучше при изготовлении ориентироваться на более крупную плоскую батарейку. Чаще всего в приборе приходится менять именно батарейку, поэтому доступ к ней должен

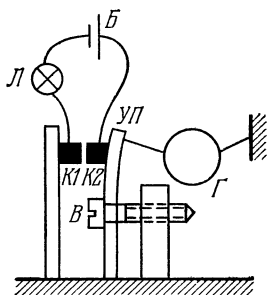


Рис. 1.

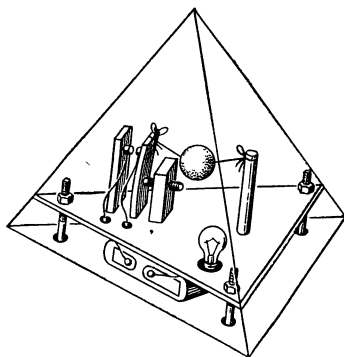


Рис. 2.

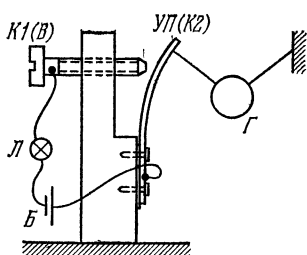


Рис. 3.

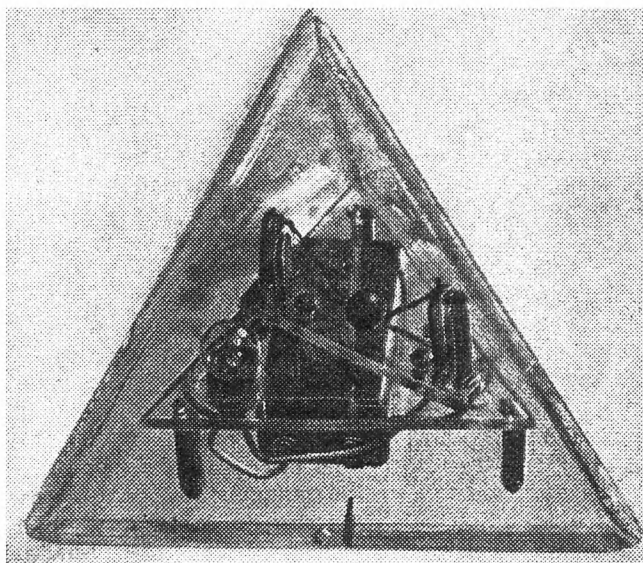


Рис. 4.

быть простым; можно прикрепить ее к наружной части устройства, а для соединительных проводов сделать в корпусе небольшие отверстия.

В качестве упругой пластины годится любая тонкая полоска упругого металла, даже половинка лезвия безопасной бритвы (вы сразу увидите, закрепив лезвие в стойке, куда удобнее привязать нить от груза).

Конструкцию устройства можно сделать более простой. Например, совместить регулировочный винт и клемму *K1* и сделать так, чтобы упругая пластина играла еще и роль клеммы *K2* (рис. 3). На рис. 4 приведена фотография такого варианта устройства, в котором вообще нет регулировочного винта. Немного подумав, вы, быть может, предложите еще более простую конструкцию.

КАРТЕЗИАНСКИЙ ВОДОЛАЗ

А. В и л е н к и н

Бумажный кораблик легко держится на воде, но когда бумага намокнет, кораблик тонет. Сухой кораблик держит на поверхности воды воздух, находящийся под куполом. Если купол намокнет и расплывется, то воздух из-под него выйдет, и кораблик утонет. А нельзя ли сделать так, чтобы воздух то выходил из-под купола, то входил; а кораблик то тонул, то всплывал — по нашему желанию?

Оказывается, можно. Впервые такую игрушку сделал великий французский ученый и философ Рене Декарт, и теперь ее называют «картезианским водолазом» (по латыни Рене Декарт звучит как Ренатус Картезиус). Только в ней воздух не входит и не выходит, а сжимается или расширяется.

Устройство «водолаза» показано на рис. 5. Возьмите молочную бутылку, пузырек от какого-нибудь лекарства и надувной резиновый шарик (им придется пожерт-

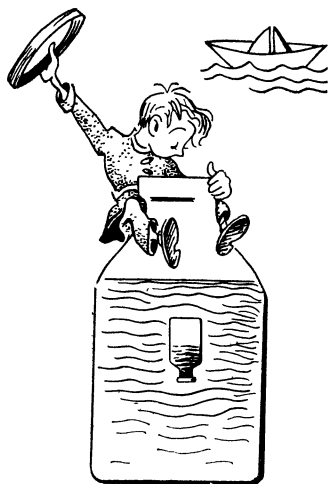


Рис. 5.

вовать). Бутылку наполните водой почти до горлышка. Пузырек опустите отверстием вниз в воду и, наклонив его, впустите в него немного воды. Количество воды в пузырьке надо отрегулировать так, чтобы пузырек держался на поверхности воды, но от малейшего толчка уходил под воду (удобно взять соломинку и через нее вдвухать под водой воздух в пузырек, пока он не всплывет). Затем накройте горлышко бутылки резиновой пленкой от шарика и привяжите ее ниткой вокруг горлышка.

Нажмите на пленку — и «водолаз» пойдет ко дну. Отпустите — и «водолаз» всплывет. Тонет он вот почему. Когда вы нажимаете на пленку, воздух под ней сжимается, давление в бутылке увеличивается и загоняет в пузырек еще немного воды. Пузырек становится тяжелее и опускается. Как только вы отпускаете пленку, давление в бутылке уменьшается, сжатый воздух в пузырьке выгоняет лишнюю воду, и «водолаз» всплывает.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ СИФОН

В. М а й е р, Н. Н а з а р о в

С работой сифона — простейшего устройства для перекачки жидкостей — вы познакомились еще в шестом классе. Рассказывают, что знаменитый американский физик Роберт Вуд еще мальчишкой начинал свои увлекательные эксперименты именно с сифона. Вот как описывает его опыты В. Сибрук в книге «Роберт Вуд» *):

«Вокруг лужи было возвышение больше чем на фут, и все хорошо знали, что вода не течет в гору. Роб положил шланг на землю, велел одному из мальчиков заткнуть конец пальцем, а сам начал наливать воду в другой, пока весь шланг не наполнился. Уже тогда, по природе своей — демонстратор, Роб взял этот конец и вместо того, чтобы просто положить его на землю, перекинул шланг через высокий забор, который отделял дорогу от канавы. Вода потекла через сифон. Это, вероятно, была первая публичная научная победа Вуда».

Обычный сифон настолько прост, что, казалось бы, не нуждается в усовершенствованиях. Однако его

*) В. С и б р у к. Роберт Вуд. — М.: Наука, 1978.

недостатком является необходимость удалять воздух из колен сифона перед тем, как он начнет работать. Просто поразительна изобретательность человеческого ума, который, уяснив для себя суть этого недостатка, сумел устранить его примитивнейшими средствами!

Мы расскажем вам об автоматическом сифоне *). Стекланную трубку длиной около 60 см и внутренним диаметром 3—4 мм изогните над пламенем так, чтобы образовались два колена, одно из которых имеет длину порядка 25 см (рис. 6). В этом колене на расстоянии 33—35 мм от его конца ребром надфиля (смоченного водой) аккуратно пропилите небольшое отверстие (1). Площадь его должна быть не более 0,5—1 мм². В стенке шарика для пинг-понга шилом проколите отверстие и круглым надфилем расширяйте его до тех пор, пока стеклянная трубка не будет с трением входить в него. Проденьте трубку в сделанное отверстие так, чтобы ее конец уперся в диаметрально противоположную точку стенки шарика. При этом отверстие в стеклянной трубке должно оказаться внутри шарика вблизи его поверхности (см. рис. 6). Соединение стеклянной трубки с шариком должно быть герметичным. Если вы немного ошиблись и сделали отверстие в шарике слишком большого диаметра, место соединения обмажьте пластилином. В шарике вблизи конца трубки, упирающегося в его стенку, проколите еще одно отверстие (2). Его первоначальный диаметр должен быть примерно равен 1 мм.

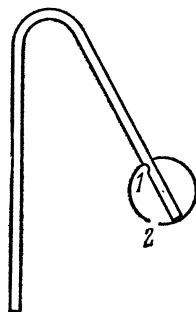


Рис. 6.

Быстро опустите колено сифона с шариком на его конце в стакан с водой. Почти сразу в этом колене появляется поднимающийся вверх столб воды, разделенный пузырьками воздуха. Он доходит до места перегиба сифона, опускается по второму колену вниз (рис. 7), и спустя небольшое время из отверстия второго колена начинает бить сплошная струя!

*) Автоматический сифон изобретен С. Д. Платоновым и описан в журнале «Заводская лаборатория», № 6 (том 4), 1935.

Если опыт не получается, нужно просто тщательно отладить прибор. Работа автоматического сифона зависит от правильного подбора площадей отверстий в стеклянной трубке и шарике. Неудачное расположение

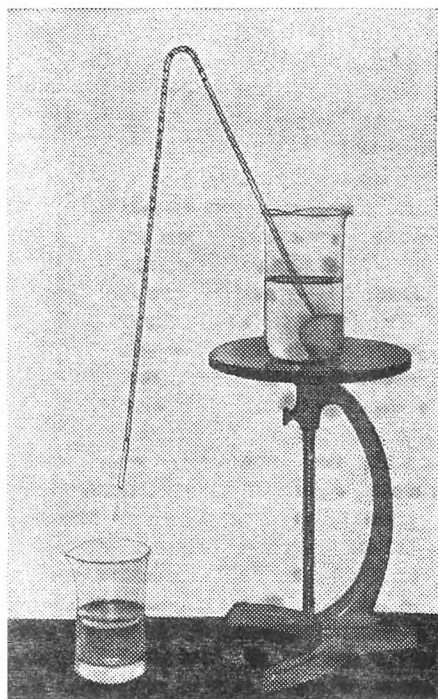


Рис. 7.

стеклянной трубки относительно шарика или недостаточная герметичность соединения шарика с трубкой также могут привести к плохой работе сифона. Диаметр отверстия в шарике можно постепенно увеличивать надфилем, добиваясь наилучших результатов. После наладки прибора шарик можно приклеить к стеклянной трубке клеем БФ-2.

Как работает автоматический сифон? Обратимся снова к рис. 6. Когда шарик опускают в стакан с водой, вода начинает заходить внутрь его через отверстие 2.

Одновременно вода поднимается и по стеклянной трубке, попадая в нее через открытый конец трубки. Скорость подъема воды в трубке больше, чем в шарике. Столб воды, поднявшийся по трубке до отверстия *I* в ее стенке, как бы перекрывает его. По мере заполнения шарика водой давление воздуха в шарике увеличивается. В какой-то момент в отверстие *I* трубки «проталкивается» маленький воздушный пузырек. Он отсекает небольшой столбик воды и поднимает его вверх. Поднимающаяся по трубке вода вновь перекрывает отверстие *I*, и снова сжатый воздух проталкивается в виде пузырька в это отверстие и отсекает новую порцию воды. Таким образом, в колене трубки с шариком образуется воздушно-водяной столб, средняя плотность которого меньше плотности воды. Под действием гидростатического давления этот столб поднимается до перегиба трубки, спускается по второму колену и, когда шарик полностью заполнится водой, «вытягивает» за собой сплошной поток воды. Сифон начинает работать.

У п р а ж н е н и я

1. Экспериментально покажите, что в шарик вода должна затекать медленнее, чем в стеклянную трубку. Объясните, почему так происходит.

2. Чтобы убедиться в правильности объяснения принципа действия автоматического сифона, замените непрозрачный шарик небольшим стеклянным пузырьком с резиновой пробкой. В целом все устройство с пузырьком должно быть точно таким же, как и при использовании шарика. Стеклянную трубку воткните в пузырек через отверстие в резиновой пробке. Прозрачные стенки пузырька позволят вам наблюдать процесс образования воздушно-водяного столба в стеклянной трубке.

3. Выясните, зависит ли высота подъема воздушно-водяного столба от глубины погружения в воду колена сифона с шариком.

4. Изготовьте автоматический сифон, заменив стеклянную трубку резиновой.

ВИХРЕВЫЕ КОЛЬЦА *)

Р. В у д

В опыты, подготовленные для лекции по вихревым кольцам, я ввел интересные изменения.

Обычный ящик для демонстрации вихрей хорошо известен и не требует подробного описания. Наше

*) Статья опубликована в журнале «Nature» в 1901 г. Переведена с английского Л. А. Савиной.

устройство значительно больше тех, что обычно используются. Это кубический деревянный ящик со стороной около метра; одна из стенок сделана из тонкой клеенки, свободно подвешенной, с двумя диагоналями из резиновых трубок, крепко привязанных по углам. Резиновые трубки нужны для того, чтобы обеспечить возвращение клеенки в первоначальное положение.

Такой ящик выбрасывает воздушные вихри большой силы, причем удар кольца о стену лекционного зала отчетливо слышен и похож на звук от легкого удара полотенцем. Аудитория может получить представление о «твердости» вращающегося воздушного вихря, если последовательно выпускать невидимые кольца в зал. Удар кольца в лицо человека ощущается как мягкий толчок пуховой подушкой.

Для того чтобы сделать кольца видимыми, нужно наполнить ящик смесью аммиака и хлористого водорода при помощи резиновых трубок, подсоединенных к двум колбам, в которых кипят NH_4OH и HCl . Этот способ дает хорошие результаты. Рис. 8 сделан с фотографии больших колец, полученных таким способом. Вид сбоку представляет особый интерес: он показывает хвост (похожий на хвост кометы), который образуется из-за трения внешних участков кольца об атмосферу при движении вперед.

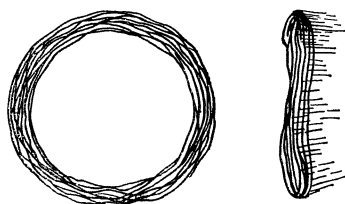


Рис. 8.

Силу воздушных колец можно показать таким образом. Направим их на плоский картонный ящик, стоящий на некотором расстоянии от установки. При этом ящик сразу же переворачивается или даже падает на пол. Ударом вихревого кольца можно погасить пламя газовой горелки. После некоторой тренировки можно научиться выпускать два кольца быстрой очередью, причем так, чтобы второе летело с несколько большей скоростью, чем первое. Тогда второе кольцо нагоняет первое, ударяется о него и отскакивает; оба кольца остаются целы и превращаются в вибрирующие эллипсы. Это показывает, что газовый вихрь обладает упругостью.

Хотя большие вихри, полученные с помощью описанной установки, лучше всего подходят для демонстрации на лекции, я считаю, что гораздо более красивые и симметричные кольца можно получить, выпуская дым из бумажной или стеклянной трубки диаметром 2,5 см *). Если смотреть сбоку на выдуваемые кольца в неподвижном воздухе около лампы или при солнечном свете, то видны очень красивые спиральные линии тока. Мне удалось сфотографировать одно из колец следующим образом. Моментальный затвор был установлен на двери темной комнаты, а дуговая лампа фокусировалась на его щель с помощью большого вогнутого зеркала. Фотопластинка устанавливалась в темной комнате так, чтобы ее освещал расходящийся пучок лучей, идущий от отражения дуги в зеркале (когда затвор открыт). Перед пластинкой помещалась красная лампа, а затем кольца выдувались из трубки. Как только кольцо, симметричное по форме идвигающееся не слишком быстро, оказывалось перед пластинкой, мы дергали за шнурок, ведущий к затвору, и пластинка освещалась ослепительной вспышкой. От кольца падала четкая тень благодаря небольшому размеру и отдаленности источника света. Рис. 9 сделан с полученной фотографии. Кольцо состоит из слоя дыма и слоя воздуха, образующих спираль из нескольких законченных витков.

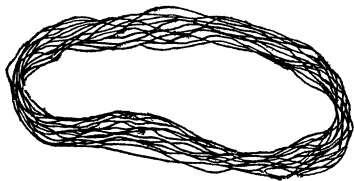


Рис. 9.

По-видимому, угловая скорость вращения увеличивается по мере приближения к центру кольца, причем внутренние участки защищены от трения (если можно применить этот термин) прилегающими вращающимися слоями. Это легко можно показать, видоизменив опыт, например, создавая воздушное кольцо с ядром из дыма. Если мы сделаем маленький вихревой ящик с отверстием диаметром, скажем, 2 см, наполним его дымом и слегка ударим по стенке, то, по-видимому, появится толстое кольцо, вращающееся очень медленно. Однако если мы очистим воздух от дыма, возьмем в ящик

*) Дым можно получить, например, положив в закрытую коробочку тлеющую бумагу.

несколько капель аммиака и смажем концентрированной HCl нижнюю часть отверстия ящика, тогда дым образует тонкий слой у нижней части отверстия. После легкого удара о стенку дым переходил в ядро кольца, а остальная часть кольца оставалась невидимой. Видимая же часть вихря вращалась с удивительно большой скоростью. Нужна большая ловкость, чтобы создать такие, похожие на полумесяц, тонкие вихри. Лучшие результаты обычно получались после нескольких попыток. Вид одного такого ядра из дыма показан на рис. 10. Действительный размер вихря отмечен пунк-



Рис. 10.

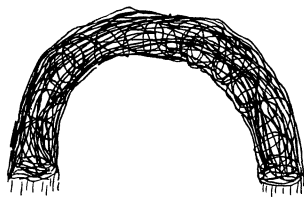


Рис. 11.

тирными линиями. Этот опыт не получается в большом масштабе, хотя я достиг некоторого успеха, распыляя нашатырь у верхнего края отверстия с помощью зигзагообразной железной проволоки, нагреваемой током.

Принимая некоторые меры предосторожности, можно получить дымовое полукольцо такое, как на рис. 11. Это блестящая иллюстрация того, что образование колец никоим образом не зависит от наличия дыма. Лучший способ получить полукольца состоит в том, чтобы очень легко выдохнуть дым в бумажную трубку, позволяя ему течь по дну трубки, пока он не достигнет конца. Тогда кольцо выталкивается легким выдохом. Возможно, лучше проводить опыт в большой аэродинамической трубе с отверстием на дне, так как в этом случае можно наблюдать явления, происходящие внутри. Достаточно легко получить кольцо, в котором большая часть дыма сосредоточена в нижней половине; но получение кольца, одна половина которого полностью невидима, и такого, чтобы граница дыма была резко очерчена (как показано на рис. 11), требует большой прак-

тики. Я перепробовал различные схемы, чтобы получить эти полукольца в большом масштабе, но ни одна из них не дала результатов, достойных упоминания. Казалось, что применение раскаленной проволоки с нашатырем является самым многообещающим методом, однако резко очерченной границы дыма я так и не получил, а именно это отличает маленькие кольца, полученные с помощью трубки.

Объясняя образование вихревых колец, вращательное движение часто приписывают трению между вытекающими воздушными струями и краем отверстия. Однако большей частью образование вихрей обуславливает трение с атмосферным воздухом. Чтобы проиллюстрировать эту точку зрения, я придумал вихревой ящик, в котором трение с краем отверстия отсутствует или, правильнее сказать, компенсируется уравниванием его по всему поперечному сечению выходящей струи.

В дне цилиндрического жестяного ящика просверливается приблизительно 200 отверстий диаметром 1,7 мм каждое (рис. 12).

Если ящик наполнить дымом и выпустить сильную струю воздуха, от поверхности, похожей на сито, отделяется красивое вихревое кольцо. Можно просто покрыть конец бумажной трубки куском туго натянутой льняной ткани и выдуть дымовое кольцо через нее.

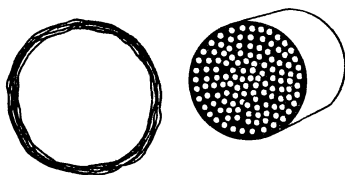


Рис. 12.

При опытах с ящиком, снабженным двумя круглыми отверстиями, я наблюдал слияние двух колец, двигающихся рядом, в одно большое кольцо. Если кольца имеют большую скорость вращения, они отскакивают друг от друга, но если кольца вращаются медленно, они соединяются. В момент соединения форма вихря очень неустойчива. Соединенные кольца скачком меняют горизонтальное положение на вертикальное так быстро, что это трудно заметить, а затем медленно приобретают форму кольца. То же самое можно показать с помощью двух бумажных трубок, держа их в разных углах рта и почти параллельно друг другу. В любом случае воздух в комнате должен быть практически неподвижен.

О ВИХРЕВЫХ КОЛЬЦАХ

С. Ш а б а н о в, В. Ш у б и н

ОБРАЗОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ

Для получения в лабораторных условиях вихрей в воздухе мы пользовались аппаратом Тэта (рис. 13). Он представляет собой цилиндр, один торец которого (мембрана) затянута каким-нибудь упругим материалом (например, кожей), а в другом имеется круглое отверстие (диафрагма).

Внутри цилиндра находятся два сосуда: один с со-

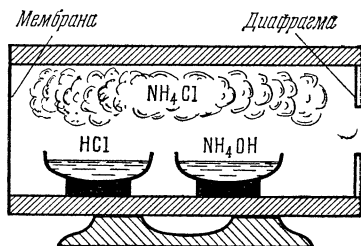


Рис. 13.

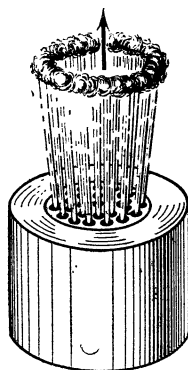


Рис. 14.

ляной кислотой (HCl), другой — с нашатырным спиртом (NH₄OH). В результате в цилиндре образуется густой туман (дым) из частичек хлористого аммония (нашатыря NH₄Cl).

Ударяя по мембране, мы сообщаем некоторую скорость прилегающему к мембране слою дыма. Придя в движение, этот слой вызовет уплотнение соседнего слоя, тот — следующего и так далее. Когда уплотнение дойдет до диафрагмы, дым вырвется из отверстия, приведет в движение ранее покоившийся воздух и благодаря силам вязкого трения сам закрутится в дымовое кольцо.

Может быть, в образовании вихревых колец главную роль играют края отверстия? Проверим это. Вместо обычной диафрагмы поставим в аппарате Тэта решето. Если наша гипотеза верна, должно получиться много маленьких колец. Однако опыт показывает, что это не так, — образуется одно большое вихревое кольцо (рис. 14).

Очень важно, чтобы дым из аппарата выходил отдельными порциями, а не непрерывной струей. Если мембрану заменить поршнем и перемещать его, из отверстия вместо колец появится непрерывная струя дыма.

Вихри в воде можно получить с помощью обыкновенной пипетки и чернил. Набрав в пипетку чернил, нужно их капать с высоты 2—3 см в аквариум с хорошо устоявшейся водой (в которой нет конвекционных потоков). В прозрачной воде хорошо заметны образующиеся чернильные кольца (рис. 15).

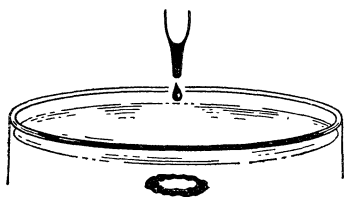


Рис. 15.

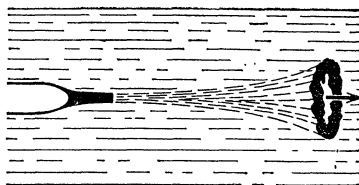


Рис. 16.

Можно сделать немного по-другому: выпустить струю чернил из пипетки прямо в воду (рис. 16). В этом случае вихревые кольца получаются несколько больших размеров.

Природа образования вихревых колец в воде — такая же, как в воздухе; поведение чернил в воде аналогично поведению дыма в воздухе. В обоих случаях главную роль играют силы вязкого трения. (Правда, опыты показывают, что полная аналогия имеет место лишь в первый момент после образования вихрей. В дальнейшем поведение вихрей в воде и воздухе оказывается различным.)

ДВИЖЕНИЕ СРЕДЫ ВОКРУГ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ

Что происходит с окружающей средой после того, как образовался вихрь? Ответить на этот вопрос нам помогли соответствующие опыты.

На расстоянии 2—3 м от аппарата Тэта поставим зажженную свечу. Дымовое кольцо пустим с таким расчетом, чтобы оно не врезалось в пламя свечи, а прошло

рядом. Пламя либо погаснет, либо будет очень сильно колыхаться. Это говорит о том, что движется не только видимая часть кольца, но и слои воздуха, прилегающие к кольцу.

Как же они движутся? Возьмем две тряпочки, одну смочим соляной кислотой, другую — нашатырным спиртом, и подвесим их на расстоянии 10—15 см друг от друга. Пространство между ними сразу же заполнится дымом (парами нашатыря). Пустим в облако этого дыма дымовое кольцо из аппарата. После прохождения кольца через облако кольцо увеличивается в размерах, а облако приходит в круговое движение. Из этого можно заключить, что вокруг вихревого кольца воздух вращается (рис. 17).

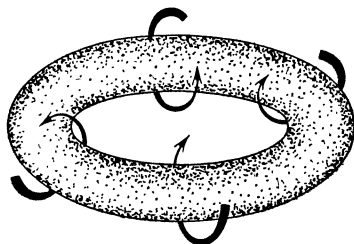


Рис. 17.

Аналогичный опыт можно провести и с водой. Медленно вращая воду в стакане, капнем в нее чернил и дадим устояться. В стакане образуются чернильные нити. Теперь пустим чернильное кольцо. При прохождении кольца вблизи нитей они закручиваются.

ВИХРЕВЫЕ КОЛЬЦА В ВОДЕ

Рассмотрим некоторые особенности поведения водяных вихрей.

В «Детской энциклопедии» приводятся очень интересные и красивые фотографии, на которых изображено последовательное развитие упавшей в воду капли чернил.

Мы заинтересовались этими фотографиями и решили сделать такой же опыт. Как уже говорилось выше, если

каплю чернил капнуть с высоты 2—3 см в аквариум с водой, в воде образуется чернильное вихревое кольцо. Как оно будет вести себя дальше?

Оказывается, через некоторое время кольцо разделится на несколько новых колец, те в свою очередь тоже разделятся и т. д. В аквариуме появится красивый «зámок» (рис. 18).

Мы заметили, что делению первичного кольца предшествует образование на нем утолщений, из которых потом рождаются вторичные кольца. Как это можно объяснить? Из-за неоднородности среды, в которой движется чернильное кольцо, некоторые его участки несколько опережают остальные, некоторые, наоборот, отстают. Чернила (более

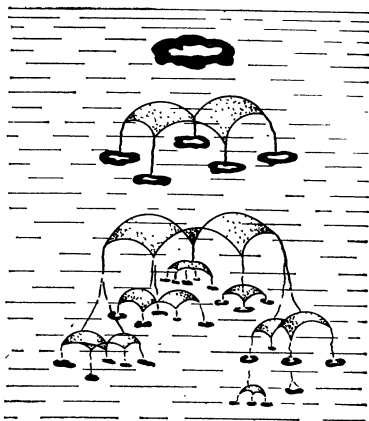


Рис. 18.

тяжелые, чем вода) стекают в те участки, которые движутся впереди, и за счет сил поверхностного натяжения формируются утолщения. Затем из этих утолщений рождаются новые капли. Каждая капля ведет себя независимо от исходного вихря, и через некоторое время из нее образуется новое вихревое кольцо. Так повторяется несколько раз. Интересно, что нам не удалось установить никакой закономерности — в десяти опытах конечное число колец четвертого «поколения» ни разу не совпало.

Оказывается, для существования вихревого кольца необходим некоторый «жизненный» объем. Мы убедились в этом на таком опыте. На пути движения водяного кольца мы ставили трубки различных диаметров. Если диаметр трубки был чуть-чуть больше диаметра кольца, влетевшее в трубку вихревое кольцо разрушалось, а взамен возникало новое кольцо меньших размеров. Если же диаметр трубки примерно в 4 раза превышал диаметр кольца, кольцо беспрепятственно проходило через трубку. В таком случае вихрь практически не подвергался никаким внешним воздействиям.

РАССЕЯНИЕ ДЫМОВЫХ КОЛЕЦ

Мы провели несколько опытов по взаимодействию дымовых колец с диафрагмами различных диаметров и с плоскостью. (Мы их называли опытами по рассеянию вихревых колец.)

Представим себе, что кольцо налетает на диафрагму, диаметр которой меньше диаметра кольца. Рассмотрим два случая: центральное соударение, когда скорость поступательного движения кольца перпендикулярна плоскости диафрагмы, а центр кольца проходит через центр диафрагмы, и нецентральный соударение, когда центр кольца не проходит через центр диафрагмы.

В первом случае происходит следующее. Налетающее на диафрагму кольцо рассеивается, а по другую сторону диафрагмы возникает новое кольцо меньшего диаметра. Причина его возникновения — та же, что и в аппарате Тэта: воздух, движущийся вокруг первоначального кольца, устремляется в отверстие и увлекает за собой дым от рассеянного вихря. Аналогично происходит центральное соударение в случае, когда диаметр диафрагмы равен диаметру кольца или несколько больше его.

Гораздо более интересен результат нецентрального соударения: вновь образовавшийся вихрь вылетает под углом к начальному направлению движения (рис. 19). (Попробуйте объяснить, почему!)

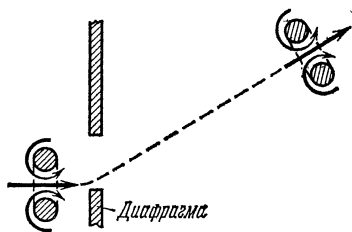


Рис. 19.

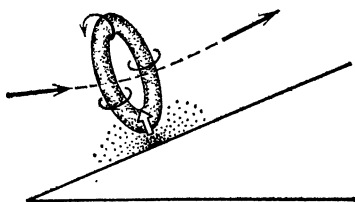


Рис. 20.

Теперь рассмотрим взаимодействие кольца с плоскостью. Опыты показывают, что если плоскость перпендикулярна скорости кольца, кольцо только как бы расплывается, не теряя при этом своей формы. Объяснить это можно так: поток воздуха, движущегося внутри кольца, образует область повышенного давления, в ре-

зультате чего и происходит равномерное расширение всего вихревого кольца.

Если же плоскость наклонить под некоторым углом к первоначальному положению, вихрь, налетая на плоскость, будет отталкиваться от нее (рис. 20). Этот факт тоже можно объяснить возникновением области повышенного давления в пространстве между кольцом и плоскостью.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОЛЕЦ

Бесспорно, самыми интересными оказались опыты по изучению взаимодействия вихревых колец. Мы проводили эксперименты с кольцами и в воде, и в воздухе.

Пустим каплю чернил с высоты 1—2 см в сосуд с водой, а через секунду пустим еще одну каплю, но уже с высоты 2—3 см. В сосуде образуются два вихря, движущиеся с разными скоростями; второй — быстрее, чем первый ($v_2 > v_1$). Когда кольца окажутся на одной высоте, они начнут взаимодействовать друг с другом.

Оказывается, возможны три случая. Первый случай — второе кольцо обгоняет первое, не задевая его (рис. 21, а).

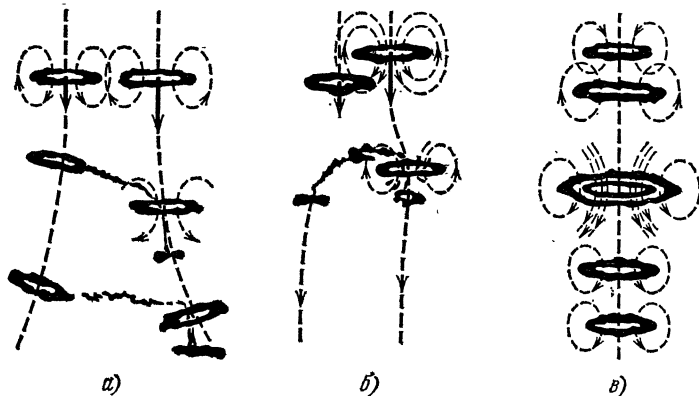


Рис. 21.

При этом происходит следующее. Во-первых, потоки воды от обоих колец как бы отталкивают кольца друг от друга. Во-вторых, обнаруживается переток чернил с первого кольца на второе: водяные потоки второго кольца более интенсивны, они и увлекают чернила за собой.

Иногда часть этих чернил проходит через второе кольцо, что влечет за собой образование нового небольшого кольца. Затем кольца начинают делиться, дальше ничего интересного нам заметить не удалось.

Второй случай — кольцо 2 при обгоне задевает кольцо 1 (рис. 21, б). В результате более интенсивные потоки второго кольца разрушают первое. Как правило, из оставшегося от первого кольца сгустка чернил образуются новые маленькие вихри.

И наконец, третий случай — кольца испытывают центральное соударение (рис. 21, в). При этом второе кольцо проходит через первое и уменьшается в размерах, а первое, наоборот, расширяется. Как и в предыдущих случаях, это происходит за счет взаимного действия водяных потоков одного кольца на другое. В дальнейшем кольца начинают делиться.

Взаимодействие дымовых колец в воздухе мы исследовали с помощью аппарата Тэта с двумя отверстиями. Оказалось, что результаты опытов сильно зависят от силы и продолжительности удара по мембране. В нашей установке удар проводился тяжелым маятником.

Было обнаружено, что если расстояние l между отверстиями меньше диаметра d каждого отверстия ($l < d$), два потока воздуха перемешиваются и образуется одно вихревое кольцо. При $d < l < 1,5 d$ кольцо, как

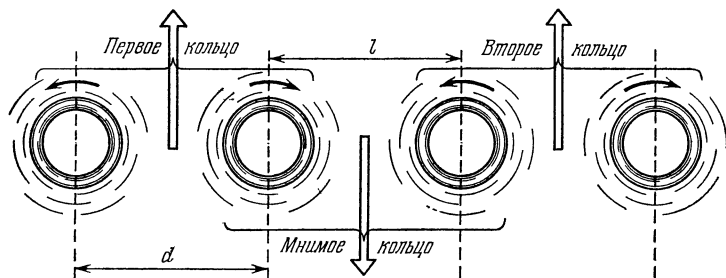


Рис. 22.

правило, вообще не образуется. Во всех остальных случаях возникают два кольца. При этом, если $l > 4d$, кольца не взаимодействуют друг с другом, а если $1,5d < l < 4d$, кольца сначала сближаются, а затем, в конце своей «жизни», иногда расходятся.

Сближение можно объяснить тем, что в пространстве между кольцами образуется нечто подобное «мнимому»

кольцу (рис. 22), которое движется в противоположную сторону. Плоскости настоящих колец поворачиваются друг к другу, и кольца начинают сближаться.

Что происходит с кольцами в конце «жизни», нам объяснить не удалось.

МОДЕЛИ СМЕРЧА

В. М а й е р

Смерч — одно из самых грандиозных и загадочных явлений природы. Энергия его настолько велика, что почти никто и ничто не может выдержать схватку со смерчем.

Каким образом смерч переносит тяжелые предметы порой на весьма значительные расстояния? Как он образуется? На эти и многие другие вопросы современная наука не в состоянии дать исчерпывающих ответов.

Можно ли воссоздать смерч в лабораторных условиях? Предлагаем вам две экспериментальные установки, с помощью которых водяные модели смерча нетрудно получить даже в домашних условиях.

1. К валу микроэлектродвигателя типа ДП-12а (он используется во многих детских игрушках) припаяйте диск из латуни или жести диаметром 40 мм и толщиной 0,5—1 мм. Диск нужно укрепить строго перпендикулярно валу, чтобы при его вращении не возникали биения. Для герметизации двигателя подшипники, в которых вращается вал, смажьте солидолом или густым вазелином, а контакты двигателя, к которым припаяны проводники, покройте слоем пластилина.

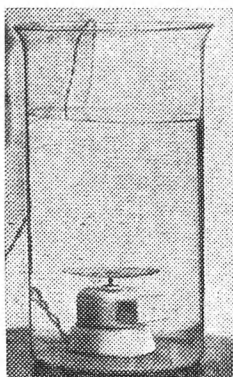


Рис. 23.

На дно стакана (или стеклянной банки) диаметром 9 см и высотой 18 см приклейте пластилиновую лепешку толщиной около 5 мм, на ней укрепите микроэлектродвигатель так, чтобы его вал снизу не касался пластилина. Проводники, идущие от двигателя, закрепите на стенке стакана липкой лентой или пластилином. На

рис. 23 показана установка, готовая к проведению экспериментов.

Налейте в стакан воду, а поверх нее — слой подсолнечного масла толщиной 1—2 см. Подсоедините выводы микроэлектродвигателя к батарейке для карманного фонаря — диск начнет вращаться, при этом жидкость в стакане тоже придет во вращательное движение. Через некоторое время граница раздела между водой и маслом начнет прогибаться вниз, появится заполненная маслом воронка, которая будет расти до тех пор, пока не коснется диска. В этот момент диск разобьет масло на капли, и жидкость в стакане помутнеет. После

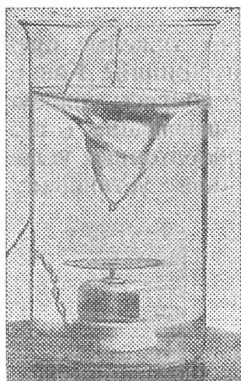


Рис. 24, а.

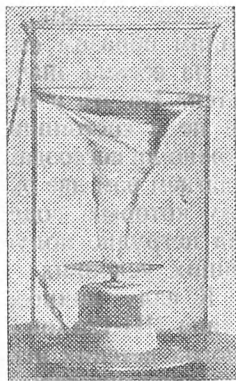


Рис. 24, б.

выключения двигателя капли масла всплывут вверх, вновь образуя сплошной слой на поверхности воды. Опыт можно повторить снова.

На рис. 24, а, б приведены фотографии, на которых показан процесс образования воздушной воронки в несколько ином эксперименте, когда в стакан была налита только одна вода.

2. Еще более похожее на настоящий смерч явление можно наблюдать во время такого опыта.

К валу микроэлектродвигателя припаяйте медную проволоку длиной около 25 см и диаметром 2 мм (можно использовать вязальную спицу). К концу проволоки, перпендикулярно к ней, припаяйте прямоугольную пластинку из латуни или жести размером $0,5 \times 10 \times 25$ мм

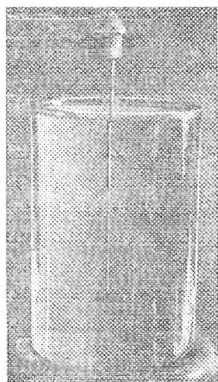


Рис. 25, а.

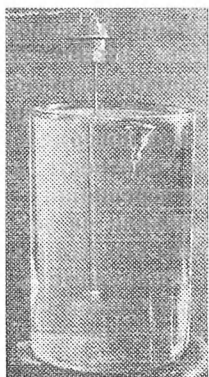


Рис. 25, б.

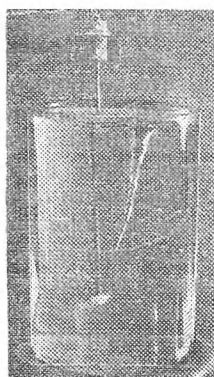


Рис. 25, в.

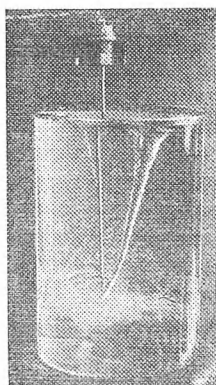


Рис. 25, г.

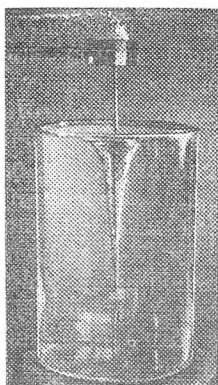


Рис. 25, д.

(рис. 25, а). Включив двигатель, проверьте как работает изготовленная вами вертушка. Если возникнет необходимость, выправьте удлинённый вал (проволоку) так, чтобы при вращении биения были минимальными.

Опустите вертушку вертикально вниз в банку с водой диаметром 15—20 см и высотой 25—30 см и включите питание. Вы увидите постепенное образование воронки на поверхности воды и рост смерча по направлению к вращающейся пластинке (рис. 25, б—г). Когда смерч своим нижним концом коснется вертушки, образуется множество воздушных пузырьков, обозначающих вихрь вокруг вертушки.

Если держать двигатель рукой, смерч будет вести себя совсем как живой. Можно часами наблюдать за «хищными» движениями его конца.

Продолжите эксперимент. Положите на поверхность воды деревянный кубик — он будет втянут смерчем. Попробуйте подобрать скорость вращения вертушки так, чтобы кубик, вращаясь в воронке, длительное время оставался на одной и той же глубине под поверхностью воды. Смерч будет втягивать и тела, плотность которых больше плотности воды (в отличие от деревянного кубика) и которые до образования смерча лежали на дне банки.

Расположите двигатель так, чтобы его вал с вертушкой находился на оси банки. Вы обнаружите воронку, сползающую вниз по валу, а под вертушкой — продолжение этой воронки, обозначенное воздушными пузырьками (рис. 25, д). Поместив на дно банки хорошо промытый речной песок, вы сможете наблюдать структуру смерча под вертушкой.

Предлагаемые опыты показывают, что причиной образования смерча всегда является вихрь в жидкости или газе.

БУМЕРАНГ *)

Ф. Г е с с

Представьте себе, что брошенный вами кусок дерева летит по круговой траектории, потом возвращается и спокойно ложится у ваших ног. Абсурд! Однако именно так ведет себя бумеранг, конечно, если вы его правильно изготовите и бросите как надо.

*) Сокращенный вариант статьи, опубликованной в ноябрьском номере журнала «Scientific American» за 1968 г.

Впервые бумеранг был сделан туземными жителями Австралии. Читатель, вероятно, немного разочаруется, узнав, что большинство австралийских бумерангов не возвращается. Бумеранги можно грубо разделить на два типа: военные и возвращающиеся. Бумеранги первого типа используются как оружие, для войны или охоты. Хороший военный бумеранг летит очень далеко, но не возвращается. Возвращающиеся же бумеранги используются почти исключительно для игры.

На самом деле разобраться во всех существующих типах бумерангов не так просто, как может показаться. В Австралии существует множество видов туземного оружия. У разных племен форма бумеранга различна (рис. 26).

По внешнему виду нелегко заключить, возвращается ли данный бумеранг. Как правило, возвращающийся бумеранг менее массивен, и угол между его плечами более острый. Обычно он бывает длиной от 25 до 75 сантиметров, шириной от трех до пяти сантиметров и толщиной от половины до полутора сантиметров. Угол между плечами бумеранга может меняться от 80 до 140 градусов. Масса достигает 300 граммов.

Характерная банановидная форма большинства бумерангов едва ли влияет на его способность возвращаться. Бумеранги в форме букв X, V, T, H, Y (видимо, возможны и другие формы) можно сделать так, что они будут возвращаться. Важно, чтобы плечи бумеранга были с одной стороны более выпуклыми, чем с другой (рис. 27). Оба плеча бумеранга должны лежать более или менее в одной плоскости. Лучше всего сделать бумеранг из куска дерева округленной формы, следуя структуре его волокон. Но можно использовать и другой материал, например, фанеру, пластмассу или картон.

Как бросать возвращающийся бумеранг? Обычно его берут правой рукой за один из концов и держат вертикально, чуть повернув влево выпуклую сторону. При этом оба конца бумеранга направлены либо вперед (так бросают австралийцы), либо назад. Вы можете выбрать любой способ. Затем, размахнувшись правой рукой, бросают бумеранг вперед в горизонтальном направлении или чуть вверх. Для успеха необходимо, во-первых, чтобы плоскость бумеранга при броске была почти вертикальной или немного наклонена вправо, но только не горизонтально. Во-вторых, бумеранг нужно заставить быстро вращаться. Этого можно добиться, если в момент броска

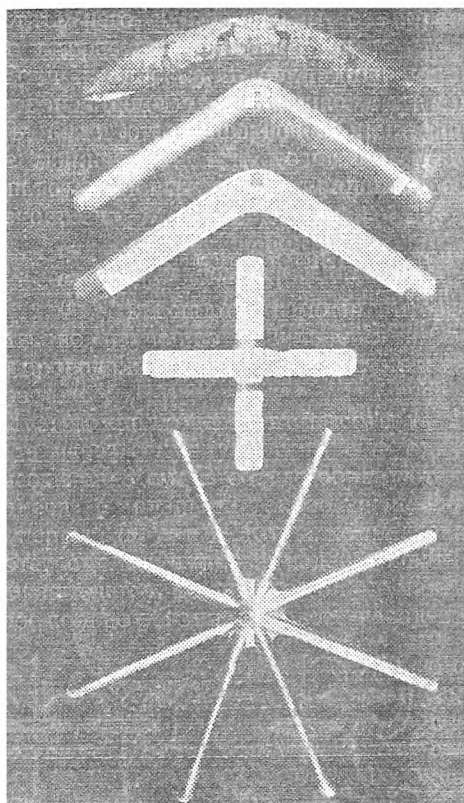


Рис. 26.

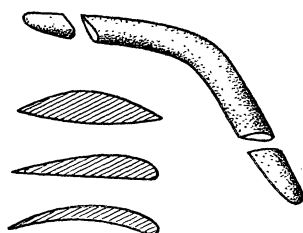


Рис. 27.

резко задержать движение правой руки вперед. По инерции бумеранг сразу же начнет вращаться вокруг точки, за которую его держал метатель, и, следовательно, приобретет одновременно поступательную и вращательную скорости.

Сначала кажется, что бумеранг улетает, но вскоре его траектория отклоняется влево, а часто и вверх. Затем он делает широкую, более или менее округлую петлю и падает где-то у ног бросавшего, иногда, впрочем, описывая перед этим еще одну небольшую петлю. Вторая петля бывает искривлена в другую сторону, так что вся траектория в этом случае имеет форму восьмерки (рис. 28).



Рис. 28.

Великолепное зрелище, когда бумеранг, описав петлю и теряя скорость, парит и потом медленно спускается.

Каждый бумеранг характеризуется легкостью метания, видом траектории и способностью к парению. Кроме того, любой бумеранг может описывать разные орбиты в зависимости от способа бросания. Точность возвращения во многом зависит от мастерства метателя. Дальность полета может быть 40 метров, а может быть и вдвое меньше, высота полета — около 15 метров, хотя может быть и 1,5 метра. Современные австралийские бумеранги пролетают расстояние более 100 метров, при этом они неплохо возвращаются. К сожалению, сам я не смог

сделать бумеранг, летающий далее, чем на 50 метров.

До сих пор мы молчаливо предполагали, что метатель не левша и бумеранг у него тоже «правый». Если посмотреть на обычный «правый» бумеранг во время полета с выпуклой стороны, он будет вращаться против часовой стрелки. Поэтому можно говорить о ведущем и ведомом краях каждого плеча бумеранга. У бумеранга туземцев оба края каждого из плеч более или менее острые. Но у современного бумеранга ведущий край плеча тупой, как ведущий край крыла самолета. Иногда плечи бумеранга немного изгибают, так что концы его ведущих краев слегка приподнимаются.

Объяснить явления, происходящие с бумерангом, можно только рассматривая его взаимодействие с воздухом. Ведь в вакууме он не может описать ничего, кроме параболы. Однако эта задача очень сложна, поэтому попробуем взглянуть на проблему проще.

Если бросить бумеранг горизонтально, заставив вращаться в вертикальной плоскости, то каждое его плечо

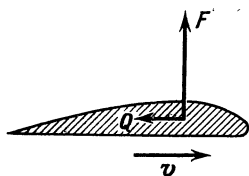


Рис. 29.

будет рассекал воздух. Из-за необычного профиля плеч возникает сила F , с которой воздух давит на плечи бумеранга в направлении от более плоской к более выпуклой части (рис. 29). Эта сила подобна подъемной силе, действующей на крыло самолета. Кроме того, со стороны воздуха на плечо бумеранга действует сила сопротивления

лечения Q . При броске правой рукой сила Q будет направлена справа налево. Но одной этой силы недостаточно для того, чтобы заставить бумеранг повернуть влево.

Скорость плеча бумеранга относительно воздуха не постоянна. Когда плечо находится в верхней половине описываемой окружности, поступательная скорость бумеранга v складывается со скоростью вращения u , а когда в нижней, то скорости направлены противоположно, так что результирующая скорость уменьшается или даже совсем исчезает в некоторой точке (рис. 30). Таким образом, бумеранг испытывает действие не только силы, направленной справа налево, но и момента сил F_1 и F_2 , поворачивающего его вокруг горизонтальной оси и стремящегося переместить верхнюю часть буме-

ранга влево. Но этого перемещения в действительности почти не происходит, так как бумеранг вращается настолько быстро, что ведет себя как гироскоп.

Но гироскоп (который представляет собой быстро вращающийся маховик) обладает следующим свойством: под действием силы, пытающейся его повернуть, гироскоп поворачивается не в направлении действия этой силы, а вокруг оси, перпендикулярной как оси вращения, так и оси, вдоль которой направлен поворачивающий его момент. В нашем случае бумеранг начнет поворачиваться влево. Это движение называется прецессией.

Итак, бумеранг поворачивается влево, так что плоскость его постепенно составляла бы все больший угол с направлением движения, если бы не быстро увеличивающиеся гироскопические силы, которые вновь направляют полет параллельно плоскости бумеранга. В результате траектория искривляется влево, и угол между плоскостью бумеранга и направлением его движения поддерживается очень небольшим.

Часто плоскость бумеранга, почти вертикальная в начале полета, в конце концов становится почти горизонтальной, бумеранг как бы «ложится». Давайте разберем этот вопрос подробнее.

Каждое плечо бумеранга будем рассматривать как крыло самолета. Такое крыло движется вперед и в то же время вращается вокруг центра тяжести бумеранга. Будем считать, что движение, перпендикулярное плоскости бумеранга, отсутствует. У крестообразного бумеранга центр тяжести лежит на пересечении лопастей, но у обычного бумеранга это не так. Там одно плечо находится перед центром масс, а другое — позади. Мы назовем эксцентриситетом плеча расстояние от него до центра масс. Каждую точку крыла омывает воздушный поток, меняющийся непрерывно по величине и направлению относительно этой части крыла. Бывает так, что воздушный поток направлен навстречу несущему краю крыла. Это легко понять, если представить медленно вращающийся бумеранг, несущийся с большой посту-

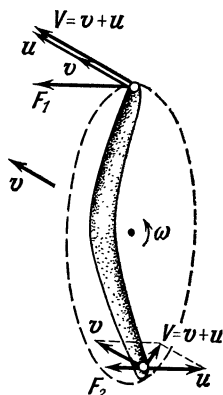


Рис. 30.

пательной скоростью, и взглянуть на его плечо, направленное вниз. Что же за силы действуют в этом случае на лопасть бумеранга?

Давайте сначала рассмотрим случай попроще: лопасть движется по прямой с постоянной скоростью V относительно воздуха (рис. 31). Разложим аэродинамическую силу на две составляющие — подъемную силу F (перпендикулярную V) и силу сопротивления Q (направ-

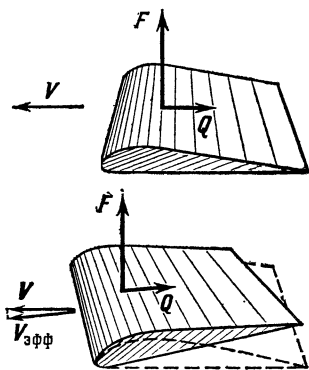


Рис. 31.

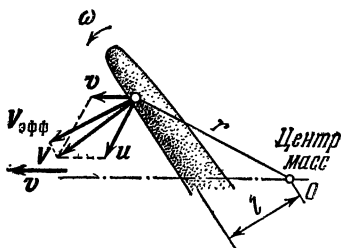


Рис. 32.

ленную против V). Обе они, как оказывается, пропорциональны V^2 . Если крыло не перпендикулярно направлению скорости, то у V появляется составляющая, параллельная крылу, которая никак не влияет на движение. Поэтому можно заменить скорость V ее составляющей, перпендикулярной крылу, или эффективной скоростью $V_{эфф}$. В этом случае силы пропорциональны $(V_{эфф})^2$.

Каждая точка плеча бумеранга принимает участие в поступательном движении. Скорость же относительно воздуха меняется от точки к точке, так как бумеранг вращается. При скорости вращения ω и расстоянии от оси вращения r (ось проходит через центр масс бумеранга) скорость точки $u = \omega r$. Для каждой точки плеча можно, сложив v и u , найти результирующую скорость V . Ее составляющая, перпендикулярная плечу бумеранга, есть $V_{эфф}$ (рис. 32). Конечно, величина $V_{эфф}$ для каждой точки плеча будет непрерывно меняться во время вращения. Очевидно, что вклад каждой точки плеча бумеранга в подъемную силу и силу сопротивления в каждый момент вращения пропорционален $(V_{эфф})^2$.

Итак, на каждое из плеч бумеранга действует средняя подъемная сила F (силы F_1 и F_2 на каждое плечо соответственно), средний момент этой силы M_1 относительно горизонтальной оси, параллельной скорости бумеранга, который заставляет бумеранг отклоняться влево, и момент M_2 — относительно оси, перпендикулярной скорости V , который заставляет бумеранг «ложиться» (рис. 33). Кроме этого, на бумеранг действует

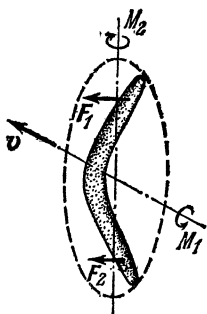


Рис. 33.

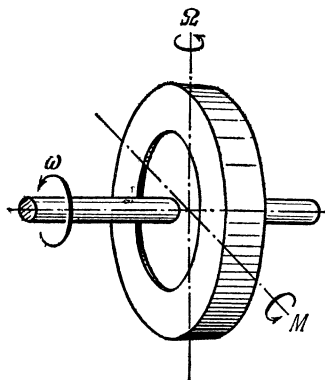


Рис. 34.

средняя сила сопротивления Q , которая уменьшает поступательную скорость бумеранга, и средний момент этой силы M_Q , замедляющий скорость вращения ω . Оказывается, ни одна из этих величин, кроме M_2 , не зависит от эксцентриситета, а M_2 строго пропорциональна величине эксцентриситета.

Силы и моменты, действующие на бумеранг в целом, получаются сложением величин для каждого плеча. Вклады в M_2 от разных плеч бумеранга могут частично или полностью уничтожить друг друга.

Теперь мы переходим к важному вопросу: как будет двигаться бумеранг под влиянием всех этих сил и моментов (и силы тяжести, конечно)?

Как уже упоминалось раньше, средний момент M_1 вызывает гироскопическую прецессию бумеранга. Давайте посмотрим на гироскоп повнимательнее. Если гироскоп вращается вокруг своей оси со скоростью ω и на него действует момент M , направленный вдоль оси, перпендикулярной оси вращения, то гироскоп начинает прецессировать, причем ось прецессии перпендикулярна

как оси вращения, так и оси момента M (рис. 34). Угловая скорость прецессии обозначается Ω . Между ω , Ω , M и моментом инерции гироскопа I существует очень простая связь, а именно

$$\Omega = \frac{M}{I\omega}.$$

Для бумеранга момент M пропорционален ωV , так что скорость прецессии Ω должна быть пропорциональна

$$\frac{\omega V}{I\omega} = \frac{V}{I}.$$

Следовательно, скорость прецессии не зависит от скорости вращения бумеранга ω .

Можно вывести еще более странное заключение. Скорость прецессии пропорциональна V/I ; коэффициент пропорциональности зависит от формы бумеранга. Следовательно, можно написать

$$\Omega = CV,$$

где C — характерный параметр бумеранга.

Теперь пусть скорость бумеранга вдвое больше. Следовательно, положение его плоскости будет тоже изменяться в два раза быстрее. Это показывает, кроме всего прочего, что бумеранг полетит по той же кривой.

Таким образом, диаметр орбиты бумеранга, грубо говоря, не зависит ни от скорости вращения бумеранга, ни от его поступательной скорости. Это означает, что длина пути бумеранга — величина более или менее постоянная. Параметры орбиты бумеранга пропорциональны его моменту инерции; они становятся меньше, если профиль плеча бумеранга вызывает большую подъемную силу. Поэтому, если вы хотите, чтобы бумеранг описал малую орбиту (например, в комнате), он должен быть сделан из легкого материала. Для очень больших орбит нужен тяжелый бумеранг с профилем, дающим малую подъемную силу (и, конечно, с наименьшим возможным сопротивлением).

В принципе у нас есть все необходимое, чтобы составить уравнение движения идеального бумеранга. Эти уравнения могут быть решены численно на вычислительной машине, и мы получим координаты, скорость и ориентацию бумеранга в каждый момент.

Как теперь сравнить вычисленные пути с действительной траекторией бумеранга? Для объективности необходимо в течение всего полета регистрировать местоположение бумеранга. Это можно сделать при помощи двух фотоаппаратов. Для фиксирования начальных данных необходима специальная метательная машина. Понятно, что у меня не было возможности делать такие эксперименты, но я ухитрился зафиксировать фотоаппаратом одну проекцию траектории полета бумеранга. На конце плеча моего экспериментального бумеранга была прикреплена крошечная электрическая лампочка, питающаяся от двух маленьких полувольтовых батареек, помещенных в отверстие, сделанное в центральной части бумеранга (см. снимок на рис. 35). Таким образом, бумеранг в течение полета нес с собой источник света, достаточно сильный, чтобы его можно было ночью сфотографировать. Одна из полученных таким образом траекторий показана на рис. 36. Для сравнения на рис. 37 приведена теоретически вычисленная орбита.

Так как фотоаппарат был расположен недалеко, та часть траектории, где бумеранг пролетал совсем близко от объектива, кажется на фотографии увеличенной. При расчете соответствующей теоретической орбиты был принят во внимание эффект перспективы. Читатель может для себя решить, находит ли он удовлетворительным соответствие между теорией и экспериментом. Во всяком случае, основной внешний вид и особенности траектории бумеранга воспроизводятся этой теорией достаточно хорошо.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ В ПАДАЮЩЕЙ ПРОБИРКЕ

Г. Покровский

Налейте воды в обыкновенную пробирку и, придерживая ее рукой, как показано на рис. 38, дайте ей упасть (с небольшой высоты), сохраняя вертикальное положение, на поверхность стола. Эта поверхность должна быть достаточно твердой, чтобы дно пробирки произвело жесткий удар. В момент такого удара мениск

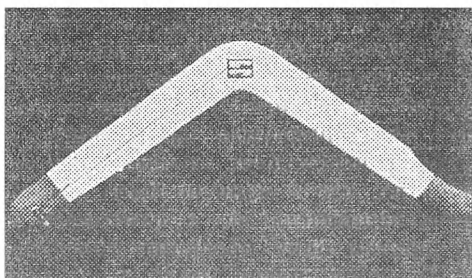


Рис. 35.

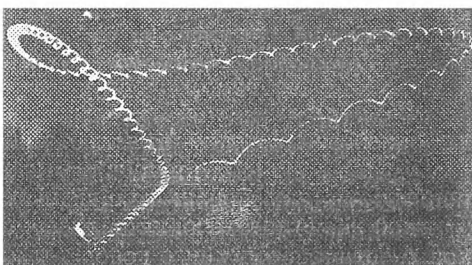


Рис. 36.

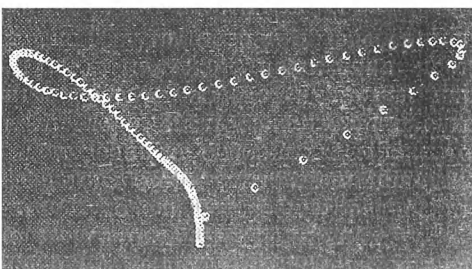


Рис. 37.

воды в пробирке, имеющий (вследствие действия капиллярных сил) вогнутую форму, быстро выравнивается, и из его центральной части по оси пробирки стремительно вырывается вверх тонкая струя воды. На рис. 38 штриховой линией показана форма поверхности воды до удара, а сплошной линией — после удара. Взлетающая вверх струя воды распадается на капли, причем первая из них взлетает на высоту, существенно превосходящую высоту падения пробирки. Это значит, что энергия воды в пробирке в момент удара перераспределяется таким образом, что небольшая часть воды вблизи центральной части мениска получает большую скорость и стремительно выбрасывается вверх.

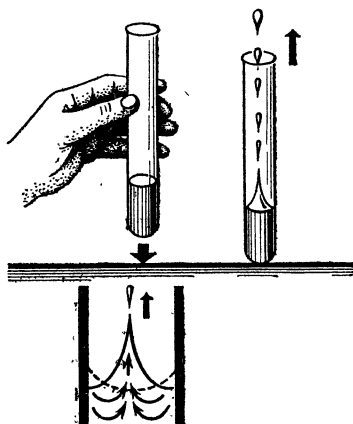


Рис. 38.

Устройство, перераспределяющее энергию, можно назвать механизмом. Обычно этим словом называют сочетание деталей, сделанных из твердого вещества (рычаги, шестерни и т. п.). Однако могут быть механизмы из жидкостей и даже из газов. Примером механизма такого рода и является вода в пробирке.

Гидродинамические механизмы имеют особое значение тогда, когда действуют очень большие силы, которых не могут выдержать обычные детали из твердого вещества. Например, при взрыве заряда взрывчатого вещества большой мощности можно сконцентрировать часть энергии этого взрыва, сделав в заряде выемку и вложив в нее металлическую вогнутую облицовку. Сила взрыва сожмет металл облицовки и создаст тонкую металлическую струю. Скорость этой струи может (при соответствующей форме облицовки) достичь даже второй космической скорости.

Таким образом, наблюдение и анализ очень простого и скромного явления, происходящего в пробирке, раскрывает одну из интереснейших проблем гидродинамики сверхвысоких скоростей.

ПОУЧИТЕЛЬНЫЙ ОПЫТ С КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУЕЙ

В. М а й е р

В простом и изящном опыте профессора Г. И. Покровского струя образуется при ударе о твердую поверхность стола вертикально падающей пробирки (с высоты нескольких сантиметров), частично заполненной водой. Поскольку вода смачивает стекло, поверхность воды в пробирке образует вогнутый мениск. При ударе о стол пробирка и находящаяся в ней вода резко тормозятся, возникают очень большие ускорения, жидкость становится как бы очень тяжелой и ее поверхность выравнивается. Края опускаются вниз, а из центральной части небольшое количество воды выбрасывается в воздух в виде узкого кратковременного фонтанчика.

Мы предлагаем вам поставить аналогичный эксперимент, быть может, еще более поразительный, чем опыт с ударяющейся пробиркой.

Аккуратно отрежьте дно пробирки, так чтобы получилась стеклянная трубка диаметром 15 мм и длиной около 100 мм. Верхний конец трубки (с отогнутыми краями) затяните тонкой резиновой пленкой от детского надувного шарика. Налейте в трубку воды и, зажав ее открытый конец пальцем, опустите трубку этим концом вниз в стакан с водой. Убрав палец, поднимите трубку до поверхности воды в стакане так, чтобы в нее вошел воздух и в трубке остался слой воды толщиной примерно 1 см. Поверхность воды в трубке должна находиться на одном уровне с поверхностью воды в стакане.

Расположите трубку вертикально и закрепите ее в штативе. Теперь слегка ударьте пальцем по резиновой пленке: немедленно внутри трубки возникнет кумулятивная струя, поднимающаяся до самой пленки!

На рис. 39 и 40 приведены рисунки с фотографий опыта, полученных в разные моменты времени для разных ударов, поэтому на них зафиксированы различные фазы образования и разрушения разных кумулятивных струй; на первых двух рисунках вы видите собственно струю, на двух остальных — распадение струи на отдельные капли.

Сопоставив этот опыт с экспериментом, описанным Г. И. Покровским, попробуйте объяснить его результат.

Предлагаемый опыт особенно интересен тем, что в нем можно наблюдать сам процесс образования кумулятивной струи. В опыте с падающей пробиркой сделать это гораздо сложнее: глаз не успевает фиксировать явления, происходящие в момент образования струи при

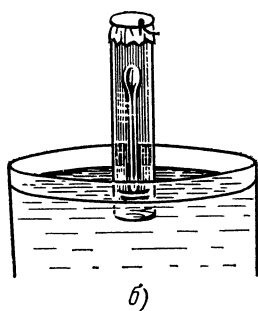
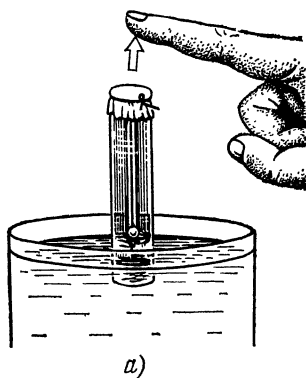


Рис. 39.

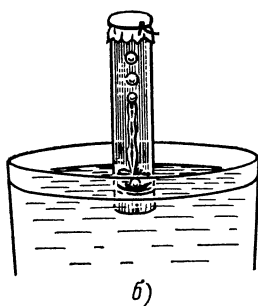
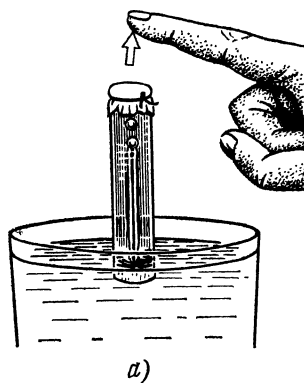


Рис. 40.

ударе пробирки о стол. Тем не менее, мы советуем вам еще раз вернуться к опыту с падающей пробиркой и подробнее исследовать причины образования струи. С этой целью предлагаем вам несколько экспериментальных задач.

У п р а ж н е н и я.

1. Выясните, влияет ли форма дна пробирки на образование струи. Может быть, струя возникает за счет фокусировки вогнутым дном появляющейся в воде ударной волны?

Припаяйте к тонкостенной медной трубке жестяное дно любой интересующей вас формы (например, плоское или вогнутое). Опыты, сделанные с получившимися пробирками, покажут, что форма

дна на образование струн не влияет. Таким образом, фокусировкой ударной волны объяснить результат опыта нельзя.

2. Обязательно ли жидкость должна смачивать стенки пробирки?

Поместите внутрь стеклянной пробирки небольшой кусочек парафина и расплавьте его на пламени сухого горючего. Вращая удаленную из пламени пробирку, постройте ее изнутри тонким слоем парафина и проведите опыт Г. И. Покровского. В этом случае кумулятивная струя не образуется. Следовательно, смачиваемость стенок пробирки жидкостью является существенным условием опыта.

3. Какие еще опыты можно провести, чтобы получить кумулятивную струю в неподвижной относительно наблюдателя пробирке?

ДВА ФИЗИЧЕСКИХ ФОКУСА

В. М а й е р, Е. М а м а е в а

Вы берете стеклянную трубку с оттянутым, как у пипетки, концом и показываете ее своим зрителям. Другой рукой берете за верхний край стакан с водой, нагретой до температуры 80—90°C, и тоже показываете его. Опускаете трубку оттянутым концом в стакан и ждете, пока в нее не войдет вода. Затем вы закрываете пальцем верхнее отверстие трубки и вынимаете ее из стакана (рис. 41).

При этом зрители обнаруживают, что у нижнего отверстия трубки образуются воздушные пузырьки. Они растут, отрываются от стенок и поднимаются внутри трубки вверх. А вода из трубки не выливается!

Затем, открыв верхнее отверстие трубки, вы выливаете воду обратно в стакан, несколько раз плавно машете перед собой пустой трубкой и вновь набираете воду из стакана в трубку. Закрыв верхнее отверстие трубки пальцем, вы быстро вынимаете ее из стакана и переворачиваете (рис. 42) — из трубки бьет мощный фонтан на высоту более метра.

Почти наверняка секрет этих фокусов не будет раскрыт. А он очень прост: в стакане находится вода, нагретая до 80—90°C, тогда как трубка имеет комнатную температуру около 20°C. С первым фокусом попробуйте разобраться сами, а второй мы поможем вам объяснить.

Когда в трубку из стакана попадает горячая вода, воздух в верхней части трубки (в силу его плохой теплопроводности) имеет практически комнатную температуру. После того как вы закроете пальцем верхнее отверстие трубки и трубку перевернете, горячая вода по стенкам начнет стекать вниз, быстро нагревая воздух. Давление воздуха в трубке возрастает, и расширяющийся воздух

«выбрасывает» через узкое отверстие трубки не успевшую опуститься вниз воду в виде фонтана.

В опыте мы рекомендуем использовать стеклянную трубку диаметром 8—12 мм и длиной 30—40 см, маленькое отверстие которой имеет диаметр около 1 мм. В промежутке между фокусами трубку надо как следует охладить (можно даже подуть в трубку), так как высота фонтана зависит от разности температур воздуха и воды, набранной в трубку. Оптимальное количество набираемой в трубку воды колеб-

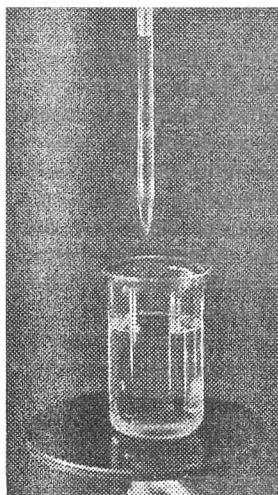


Рис. 41.

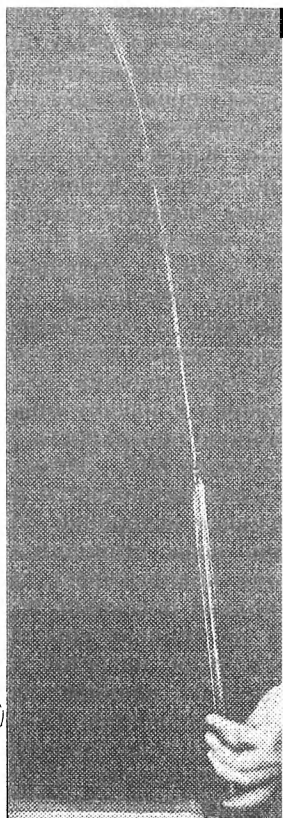


Рис. 42.

лется в пределах от $1/4$ до $1/3$ объема трубки и легко подбирается экспериментально.

КАПЛЯ НА ГОРЯЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

М. Голубев, А. Кагаленко

Расположив утюг горизонтально, капните на него немного воды. Если температура утюга около 100°C (немного больше 100°C), то ничего особенного не

произойдет. Капелька растечется по поверхности утюга и быстро, за несколько секунд, испарится. Если же температура утюга значительно больше 100°C ($300\text{—}350^{\circ}\text{C}$); картина явления будет другой. Капелька, упав на утюг, отскочит от него, как мячик от пола (невысоко, на высоту $1\text{—}5\text{ мм}$), и затем будет двигаться, не касаясь нагретой поверхности. Стабильность такого состояния зависит, прежде всего, от температуры поверхности — чем сильнее нагрет утюг, тем спокойнее ведет себя капля. Кроме того, время пребывания капли на утюге до полного ее испарения увеличивается во много раз. Причем скорость испарения капли зависит от ее размера: большие капли быстро уменьшаются в размерах до $3\text{—}5\text{ мм}$, а маленькие «живут» довольно долго без заметных изменений. В одном из наших опытов капля диаметром 3 мм продержалась до полного испарения около 5 минут (300 секунд).

В чем причина столь странного поведения капли? Вернемся к началу опыта — капля воды падает на раскаленную поверхность. В начальный момент ее температура около 20°C . Затем буквально за доли секунды нижние слои нагреваются до 100°C , и начинается столь интенсивное испарение, что сила давления образующихся паров воды становится больше силы тяжести капли. Капля подпрыгивает, затем снова падает на утюг. За несколько подскоков вся вода в капле успевает прогреться до температуры кипения. Далее при достаточной температуре нагретой поверхности капля быстро успокаивается и начинает двигаться на некоторой высоте над этой поверхностью. Очевидно, в этом случае сила давления паров воды уравнивает силу тяжести, действующую на каплю. В установившемся режиме капля довольно стабильна и «живет» значительное время.

Обратите внимание на форму капли. При малых размерах форма капли близка к сферической, а при больших — сфера оказывается сильно сжатой в вертикальном направлении. Дело в том, что капля над горячей поверхностью находится как бы на паровой подушке, опирается на нее. Возникает сила реакции, которая и вызывает деформацию капли. Чем капля больше, тем эта деформация заметнее.

В каплях (особенно больших) могут возникать колебательные процессы, например, сжатие и растяжение, а также и более сложные колебания (рис. 43 и 44). На

фотографии, приведенной на рис. 43, в центре капли видно темное пятно. Это — образовавшийся внутри капли воды пузырек пара. В больших каплях может возникнуть несколько таких пузырьков. Иногда капля

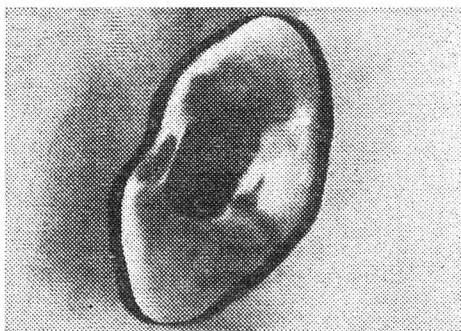


Рис. 43.

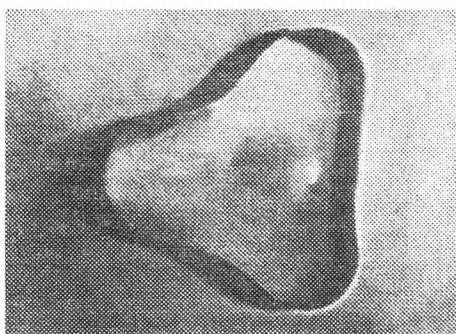


Рис. 44.

приобретает форму кольца с одним большим пузырьком пара посередине. При таком режиме испарение происходит так интенсивно, что капля на глазах уменьшается в своих размерах.

На рис. 44 показан один из наиболее интересных видов колебаний — «треугольная капля».

В заключение несколько советов тем, кто захочет сам провести описанные опыты.

1. Желательно взять утюг, рабочая поверхность которого была бы как можно ровнее, т. е. чтобы отсутствовали царапины, неровности и т. п. Встреча капли с неровностью утюга значительно сокращает время ее жизни (подумайте, почему?).

2. Утюг надо как-то закрепить (например, в штативе) и привести его поверхность в горизонтальное положение. В наших опытах использовался штатив от геодезического прибора.

3. Не следует забывать и о технике безопасности, прежде всего, о надежности изоляции провода утюга и о предохранении от попадания кипящей воды на руки.

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ЧЕРТИТ ГИПЕРВОЛУ

И. В о р о б ь е в

Один из методов измерения коэффициента поверхностного натяжения жидкости основан на поднятии столбика смачивающей жидкости в капилляре. Однако не всегда под рукой имеются капиллярные трубочки и микроскоп для определения их внутреннего диаметра.

Оказывается, капилляры вполне можно заменить двумя стеклянными пластинками. Опустите пластинки в сосуд с водой и постепенно сближайте их параллельно друг другу. Вода поднимается между пластинками — ее втягивает сила поверхностного натяжения (рис. 45).

Легко рассчитать коэффициент поверхностного натяжения σ по высоте подъема воды y и зазору между пластинками d . Сила поверхностного натяжения $F=2\sigma L$, где L — длина пластинки (двойка появилась из-за того, что вода соприкасается с обеими пластинками). Эта сила удерживает слой воды массы $m=\rho Ldy$, где ρ — плотность воды. Таким образом,

$$2\sigma L = \rho Ldyg.$$

Отсюда можно найти коэффициент поверхностного натяжения

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho g dy. \quad (1)$$

Но интереснее сделать так: с одного конца сжать пластинки вместе, а с другого оставить небольшой за-

зор (рис. 46). Вода поднимется и образует между пластинками удивительно правильную поверхность (конечно, если стекло чистое и сухое).

Нетрудно сообразить, что сечение этой поверхности вертикальной плоскостью — гипербола. В самом деле,

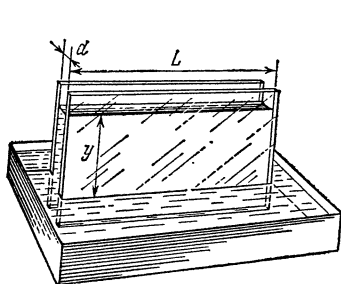


Рис. 45.

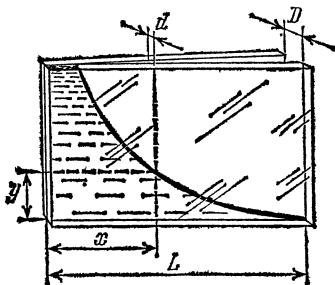


Рис. 46.

достаточно в формулу (1) вместо d подставить новое выражение для зазора в данном месте. Из подобия соответствующих треугольников (см. рис. 46) $d = D \frac{x}{L}$. Здесь D — зазор на конце, L — по-прежнему длина пластинки, а x — расстояние от места соприкосновения пластинок до места, где определяется зазор и высота уровня. Таким образом,

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho g y D \frac{x}{L},$$

или

$$y = \frac{2\sigma L}{\rho g D} \cdot \frac{1}{x}. \quad (2)$$

Уравнение (2) действительно является уравнением гиперболы.

Для проведения опыта можно взять пластинки размером 10×20 см, зазор на конце установить в толщину спички, а в качестве сосуда использовать ванночку для проявления фотобумаги. Для удобства измерений на внешнюю сторону одной из пластинок наклейте миллиметровую бумагу.

Имея график, начерченный водой, можно проверить, действительно ли получилась гипербола. Для проверки воспользуйтесь тем, что площади всех прямоугольников под гиперболой (рис. 47) одинаковы.

Если у вас есть термометр для измерения температуры воды, то можно исследовать зависимость поверхностного натяжения от температуры. Можно также изучить влияние примесей.

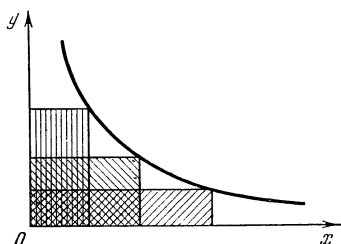


Рис. 47.

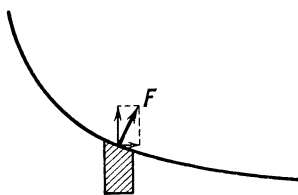


Рис. 48.

В заключение подумайте над таким вопросом: сила поверхностного натяжения F направлена перпендикулярно линии соприкосновения воды со стеклом (рис. 48). Вертикальная составляющая этой силы уравновешена силой тяжести столбика воды. Чем же уравновешена ее горизонтальная составляющая?

ОПЫТЫ С ЛОЖКОЙ БУЛЬОНА

В. М а й е р

Набрав ложку хорошего мясного бульона, не спешите отправить ее в рот. Посмотрите внимательно на бульон — на его поверхности плавают крупные капельки жира. Заметьте размер этих капелек. Отлейте немного бульона из ложки обратно в тарелку и опять посмотрите на его поверхность — капельки жира расплзлись, став больше в диаметре и меньше по толщине. Чем объясняется это интересное явление?

Прежде всего давайте выясним, при каких условиях капелька жира может находиться на поверхности бульона, не растекаясь. Посмотрите на рис. 49 — капля жидкости 2 (жира) лежит на поверхности жидкости 1 (бульона). Форма капли напоминает чечевицу. Сверху находится среда 3 — смесь воздуха с парами жидкостей 1 и 2. Три среды (1, 2 и 3) соприкасаются по окружности, ограничивающей каплю. Выделим малый элемент этой окружности (вблизи точки O на рис. 49) длиной Δl .

На него действуют три силы поверхностного натяжения. На границе раздела жидкостей 1 и 2 действует сила \mathbf{F}_{12} ,

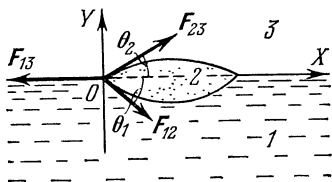


Рис. 49.

направленная по касательной к границе раздела и равная по модулю

$$|\mathbf{F}_{12}| = \sigma_{12} \Delta l,$$

где σ_{12} — поверхностное натяжение на границе сред 1 и 2. Аналогичные силы \mathbf{F}_{13} и \mathbf{F}_{23} действуют на границах раздела сред 1, 3 и 2, 3:

$$|\mathbf{F}_{13}| = \sigma_{13} \Delta l$$

и

$$|\mathbf{F}_{23}| = \sigma_{23} \Delta l.$$

Здесь σ_{13} и σ_{23} — соответствующие поверхностные натяжения.

Очевидно, что капля будет находиться в равновесии, если сумма всех трех сил равна нулю:

$$\mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \mathbf{F}_{23} = 0,$$

или — в проекциях на оси координат X и Y (после подстановки соответствующих абсолютных значений и сокращения на Δl) —

$$\begin{aligned} \sigma_{13} &= \sigma_{12} \cos \theta_1 + \sigma_{23} \cos \theta_2, \\ \sigma_{12} \sin \theta_1 &= \sigma_{23} \sin \theta_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь θ_1 и θ_2 — углы между касательными к поверхности капли жидкости 2 и поверхностью жидкости 1, их называют *краевыми углами*.

Из равенства (1) видно, что равновесие капли возможно в том случае, если поверхностные натяжения связаны определенным соотношением:

$$\sigma_{13} < \sigma_{12} + \sigma_{23}.$$

Поскольку поверхностные явления в жидкости мало зависят от присутствия над жидкостью газообразной среды, практически можно считать, что

$$\sigma_{13} = \sigma_1 \text{ и } \sigma_{23} = \sigma_2.$$

Величины σ_1 и σ_2 называют поверхностными натяжениями жидкостей 1 и 2 соответственно; в нашем случае — это поверхностные натяжения бульона и жира.

Таким образом, капля жира будет плавать на поверхности бульона, не растекаясь, если поверхностное натяжение бульона меньше суммы поверхностных натяжений жира и границы раздела бульон — жир:

$$\sigma_1 < \sigma_2 + \sigma_{12}. \quad (2)$$

В частном случае, когда капля очень тонкая (почти плоская), углы θ_1 и θ_2 малы ($\theta_1 = \theta_2 = 0$) и условие равновесия капли имеет вид:

$$\sigma_1 = \sigma_2 + \sigma_{12}.$$

При

$$\sigma_1 > \sigma_2 + \sigma_{12}$$

не существует значений углов θ_1 и θ_2 , для которых выполнялось бы равенство (1). Это означает, что в этом случае жидкость 2 не собирается в каплю на поверхности жидкости 1, а растекается по ней тонким слоем.

Теперь постараемся объяснить результаты опытов с ложкой бульона. Капли жира плавают на поверхности бульона, значит, выполняется соотношение (2). Почему же при уменьшении количества бульона в ложке капли расплываются по его поверхности, увеличиваясь в размерах? Что при этом изменяется?

Предлагаем такое объяснение. Поверхностные натяжения жира σ_2 и границы раздела бульон — жир σ_{12} остаются неизменными. Остается допустить, что при выливании части бульона из ложки изменяется поверхностное натяжение бульона σ_1 . Но бульон (в первом приближении) — это вода. Разве может измениться поверхностное натяжение воды, если уменьшить количество воды в сосуде? По-видимому, нет. Правда, бульон — это не просто вода, а вода, покрытая тонким слоем жира. Выливая из ложки бульон, мы выливаем и часть жира, так что толщина слоя жира, покрывающего бульон, уменьшается. Это, очевидно, и приводит к уве-

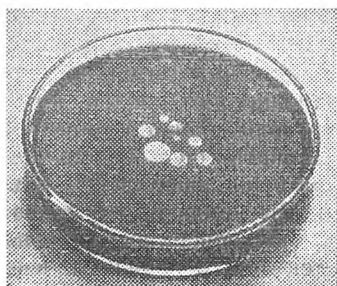


Рис. 50.

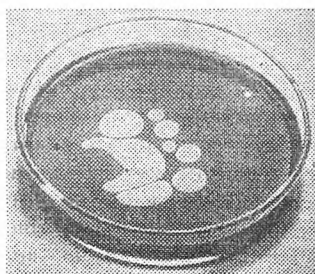


Рис. 51.

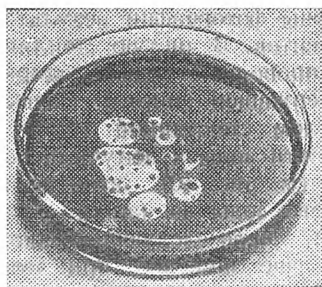


Рис. 52.

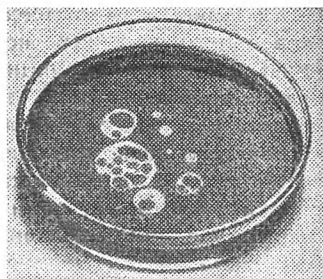


Рис. 53.

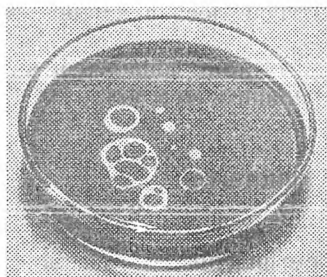


Рис. 54.

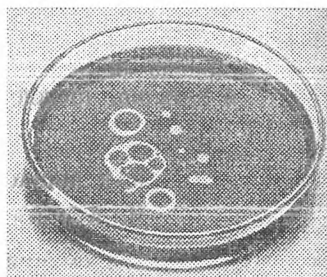


Рис. 55.

личению поверхностного натяжения бульона. В результате капли жира расплзаются по поверхности бульона.

Для проверки предлагаем вам самостоятельно провести такой опыт. В чистое блюдо (без следов жира) наберите чистой водопроводной воды. Тонкой пипеткой или трубочкой (можно использовать чистый стержень от шариковой авторучки) капните на поверхность воды чуть-чуть подсолнечного масла. Вы увидите, что первая капля полностью растечется по поверхности воды. Следующие капли уже не растекутся, а образуют чечевицы. Аккуратно вылейте часть воды — капли расплзутся по ее поверхности.

В заключение вернемся еще раз к опытам с ложкой бульона. Внимательно наблюдая за поведением капелек жира, вы сможете заметить очень любопытные явления разрывов и восстановления капель.

На рис. 50—55 представлены фотографии результатов одного из таких экспериментов. В чистую стеклянную чашку мы налили водопроводной воды, подкрашенной синей тушью (не содержащей спирта). Слегка смоченной подсолнечным маслом стеклянной трубкой осторожно коснулись поверхности воды и получили восемь очень маленьких капель (см. рис. 50). Затем резиновой грушей отобрали немного воды из чашки — все капли увеличились в размерах. После следующей такой операции капли увеличились еще заметнее, при этом они несколько исказились по форме (из-за течения воды) и на них появились зародыши разрывов (см. рис. 51).

Все дальнейшие изменения происходили самопроизвольно, без постороннего вмешательства. Вначале разрывы в каплях росли, затем сливались в один большой разрыв — капля превращалась в кольцо. Наконец, это кольцо разрывалось и вновь стягивалось в каплю (см. рис. 52—55).

Не правда ли — действительно стоит понаблюдать за ложкой бульона, прежде чем отправить ее в рот!

КАК ВЫРАСТИТЬ КРИСТАЛЛ

М. К л и я

Современная промышленность не может обойтись без самых разнообразных кристаллов. Они используются в часах, транзисторных приемниках, вычис-

лительных машинах, лазерах и многом другом. Великая лаборатория — природа — уже не может удовлетворить спрос развивающейся техники, и вот на специальных фабриках выращивают искусственные кристаллы: маленькие, почти незаметные, и большие — массой в несколько килограммов.

Существуют различные способы выращивания кристаллов. Часто этот процесс требует высоких температур и огромных давлений (например, для получения искусственных алмазов), но некоторые кристаллы можно выращивать даже в домашних условиях. Мы расскажем вам о том, как это можно делать.

Проще всего дома выращивать кристаллы алюмокалиевых квасцов — $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Вещество это можно купить в любом магазине химреактивов, и оно абсолютно безвредно (квасцы иногда даже добавляют в питьевую воду, чтобы очистить ее от мути). Но прежде, чем приступить к работе, давайте посмотрим, что представляет собой процесс выращивания кристаллов.

Если в воде при постоянной температуре растворять какое-нибудь вещество, то через некоторое время растворение прекращается. Такой раствор называется насыщенным, а максимальное количество вещества, которое можно растворить при данной температуре в 100 г воды, называется его растворимостью. Обычно с повышением температуры растворимость увеличивается. Поэтому раствор, насыщенный при одной температуре, становится недосыщенным при более высокой температуре.

Если же насыщенный раствор охладить, избыток вещества выпадает в осадок. На рис. 56 показана зависимость растворимости алюмокалиевых квасцов от температуры. Из графика видно, что, например, при охлаждении до 10°C 100 г раствора, который был насыщенным при 30°C , в осадок должно выпасть более 10 г вещества. Следовательно, один способ выращивания кристаллов заключается в том, что надо дать насыщенному раствору охладиться.

Можно выращивать кристаллы и выпариванием. Ведь если насыщенный раствор испаряется, объем его уменьшается, а количество растворенного вещества остается прежним. Иначе говоря, опять создается избыток вещества, который выпадает в осадок.

Рассмотрим теперь, как происходит выделение избытка вещества.

Возьмем насыщенный раствор и нагреем его. Сосуд с полученным недосыщенным раствором накроем стеклом и дадим раствору спокойно охладиться до температуры более низкой, чем температура насыщения. При этом

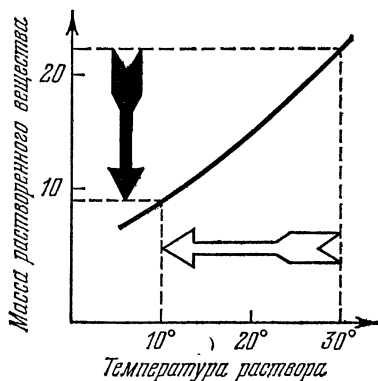


Рис. 56.

осадок может и не выпасть, и мы получим пересыщенный раствор. Дело в том, что для образования кристалла необходима «затравка». Ею может служить маленький кристаллик того же вещества или просто пылинка. Иногда достаточно качнуть сосуд с пересыщенным раствором или снять прикрывающее его стекло, как начинается мгновенная кристаллизация. При этом обычно образуется множество мелких кристалликов. Для того, чтобы вырастить крупный кристалл, необходимо ограничить число «затравок». Лучше всего внести искусственную «затравку», роль которой может исполнять один из кристалликов, полученных ранее.

«Затравка» готовится следующим образом. Возьмите две стеклянные банки и тщательно их вымойте. В одну из них налейте теплую воду и насыпьте квасцы. Помешивая раствор, следите за растворением. Когда вещество перестанет растворяться, аккуратно слейте раствор во вторую банку так, чтобы туда не попало нерастворившееся вещество. Затем накройте банку стеклом. Когда раствор охладится, снимите стекло. Через некоторое время вы увидите, как в банке образуется множество

кристалликов. Дайте им подрасти и отберите самые крупные для «затравок».

Теперь можно приступать к выращиванию кристалла. Прежде всего нужно приготовить посуду. Чтобы уничтожить нежелательные зародыши на стенках, пропарьте банки изнутри над носиком кипящего чайника. Затем сделайте снова теплый насыщенный раствор и слейте его в другую чистую банку.

Итак, у вас есть теплый насыщенный раствор квасцов. Нагрейте его еще немного, накройте банку стеклом и поставьте охлаждаться. Когда температура раствора приблизится к температуре насыщения, опустите в банку приготовленную ранее «затравку». Поскольку раствор еще недосыщен, «затравочный» кристаллик начнет растворяться. Но как только раствор охладится до температуры насыщения, растворение кристаллика прекратится, а вскоре начнется его рост. (Если кристаллик растворится целиком, можно ввести в раствор новую «затравку».)

Когда раствор перестанет охлаждаться, выращивание кристалла можно продолжить. Для этого приподнимите стекло так, чтобы вода испарялась, но пылинки в раствор не попадали. Рост кристалла продолжается два — три дня.

Выращивая кристалл, старайтесь банку не трогать и не передвигать. Когда кристалл будет готов, достаньте его из раствора и тщательно промакните бумажной салфеткой, иначе он быстро потускнеет.

Кристаллы получают разными по форме в зависимости от того, бросите ли вы «затравку» на дно сосуда или подвесите ее на нитке (рис. 57). Таким способом можно, например, вырастить «бусы». Для этого надо «затравить» нитку, т. е. провести ею несколько раз по кристаллу, а затем опустить нитку в раствор.

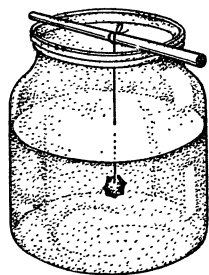


Рис. 57.

Выращивание кристаллов — это искусство. Возможно, у вас не все сразу получится. Не огорчайтесь. Немного настойчивости, упорства, аккуратности, и вы станете обладателями красивых кристаллов и игрушек из кристаллов.

КРИСТАЛЛЫ ИЗ ШАРИКОВ

Г. Косоуров

Первым шагом к предсказанию, объяснению и пониманию свойств кристалла является определение его структуры. Зная конфигурацию расположения атомов в кристаллической решетке и поняв симметрию в их расположении, можно, например, сказать, будет ли кристалл пьезоэлектриком, т. е. будет ли на его гранях появляться электрическое напряжение при механическом сжатии; будет ли кристалл обладать сегнетоэлектрическим переходом, который происходит при определенной температуре и заключается в том, что внутри кристалла возникает электрическое поле; будет ли в веществе возникать световая волна двойной частоты, если через него пропустить свет лазера и т. д. Структура кристалла — это паспорт, который может многое рассказать о своем владельце.

Познакомиться с различными «упаковками» атомов в кристалле можно при помощи несложных вспомогательных средств. Воспользовавшись металлическими шариками от подшипников, мы можем строить модели кристаллов, применяя тот же самый принцип, по которому природа строит кристаллы. Постройкой пространственных моделей, на которых ясно видны все особенности расположения атомов в сложных структурах, не пренебрегает ни один кристаллограф. Но прежде чем приступить к опытам, необходимо сделать несколько теоретических замечаний.

Существование кристаллической решетки обусловлено силами взаимодействия между атомами. На малых расстояниях преобладают силы отталкивания, которые быстро возрастают при попытке сблизить атомы. На больших расстояниях преобладают сравнительно медленно убывающие с расстоянием силы притяжения. При сближении атомов под действием сил притяжения потенциальная энергия взаимодействия убывает аналогично тому, как убывает потенциальная энергия камня, падающего на землю. На расстоянии, при котором силы притяжения и отталкивания становятся равными, потенциальная энергия имеет минимум, после чего резко возрастает за счет работы против сил отталкивания. Зависимость потенциальной энергии от расстояния выглядит примерно так,

как показано на рис. 58. В состоянии равновесия атомы займут места, соответствующие минимуму потенциальной энергии. Когда атомов много, это приведет в конечном счете к периодическому повторению некоторой наиболее выгодной в смысле энергии конфигурации небольшой группы атомов, образующих так называемую элементарную ячейку.

Существуют вещества с очень сложной структурой, как, например, некоторые силикаты, элементарная ячейка которых содержит более двухсот атомов. Другие вещества, например многие металлы, образуют кристаллическую решетку по очень простому закону. Мы, естественно, начнем с простейших образований. В наших опытах роль атомов будут играть металлические шарики, силами отталкивания будут упругие силы, возни-

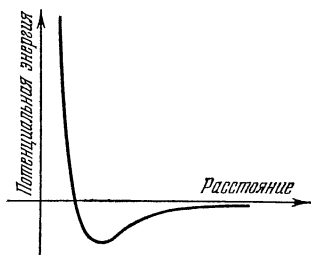


Рис. 58.

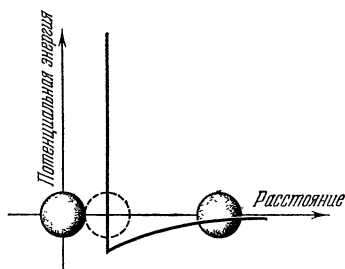


Рис. 59.

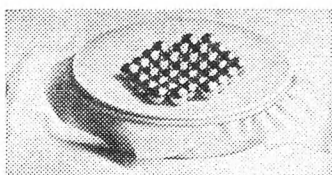


Рис. 60.

кающие при соприкосновении шаров, а силу притяжения заменит сила тяжести.

Натянем на отверстие круглой банки, коробки или отрезка трубы тонкую резиновую пленку (например, от хирургической перчатки) и закрепим ее с помощью резинового кольца. Положим на пленку два шарика. Они слегка прогнут пленку и притянутся друг к другу. Их потенциальная энергия в зависимости от расстояния изменяется примерно так, как показано на рис. 59, что очень похоже на график рис. 58. Положив на пленку

штук тридцать шариков и слегка встряхнув коробку, мы увидим, что шарики расположатся правильными рядами (рис. 60). Центры шариков будут лежать в вершинах равносторонних треугольников со стороной, равной диаметру шара, а сами шарики заполнят всю плоскость и образуют сеть, которую называют гексагональной (от греческих слов «гекса» — шесть и «гония» — угол). Каждый шар окружен шестью касающимися его и друг друга шариками. Их центры образуют правильные шестиугольники.

Если повернуть всю сеть вокруг оси, проходящей через центр любого шара, на одну шестую оборота, то одни шары станут на место других, а общее расположение системы в пространстве останется неизменным. Сеть шаров перейдет сама в себя. После шести таких поворотов каждый шар встанет на прежнее место. Кристаллограф скажет в этом случае, что через центр каждого шара проходит перпендикулярная к плоскости шаров ось симметрии шестого порядка. Из-за этих-то осей сеть и получила название гексагональной. Кроме осей симметрии шестого порядка имеются также оси симметрии третьего порядка, проходящие через центры лунок между шарами. (Ось симметрии третьего порядка — это такая прямая, при повороте вокруг которой — каждый раз на угол в 120° — мы возвращаемся к первоначальной картине. Тело неправильной формы имеет ось симметрии первого порядка, т. е. оно переходит само в себя только при полном обороте. Напротив, через центр круга перпендикулярно к его плоскости проходит ось симметрии бесконечного порядка, так как круг переходит сам в себя при любом бесконечно малом угле поворота.)

Все дальнейшее будет понятно лишь в том случае, если у вас под руками будут шарики, на которых вы будете строить модели разных кристаллов.

Рассмотрим один прямолинейный ряд лунок между двумя рядами шаров (рис. 61). В нем имеются лунки двух сортов: одни сдвинуты к одному ряду шаров, другие — ко второму. Как тех, так и других столько же, сколько и шаров в ряду. Таким образом, в бесконечной сети лунок вдвое больше, чем шаров. Они образуют две гексагональные сетки, такие же, какие образуют центры шаров. Эти три сетки сдвинуты друг относительно друга так, что оси шестого порядка каждой сети совпадают с осями третьего порядка двух других.

В одну из этих систем лунок лягут шары второго слоя, образуя гексагональную сеть соприкасающихся шаров, подобную первой. Однако сил притяжения за счет упругости пленки может не хватить, чтобы удер-

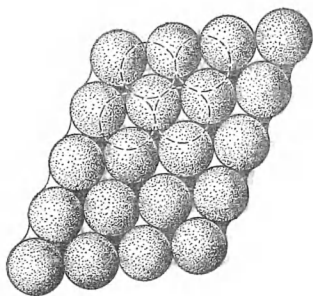


Рис. 61.

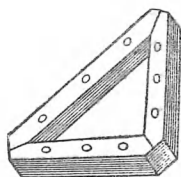


Рис. 62.

жать шары второго, а тем более третьего слоя. Поэтому, зная, как ложатся шары в нижнем слое, сделаем из фанеры лоток в форме правильного треугольника (рис. 62), такой, чтобы вдоль каждой стороны плотно укладывалось целое число шаров (в нашей модели их семь), и заполним его шарами первого слоя.

В какую систему лунок укладывать шары второго слоя, безразлично, а для третьего слоя системы лунок оказываются неэквивалентными: центры одной системы располагаются над центрами шаров первого слоя, а вторая система находится над пустыми лунками первого

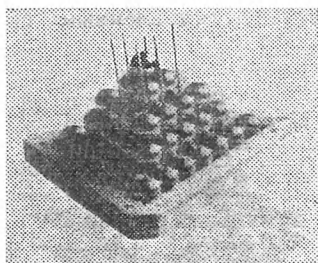


Рис. 63.

слоя. Начнем с укладки шаров в лунки, лежащие над шарами первого слоя. При этом третий слой по расположению шаров в точности повторит первый, четвертый — второй и т. д. Слои будут повторяться через один. Мы получим не очень устойчивую пирамиду (рис. 63), что, впрочем, связано только с тем, что в нашей модели сила «притяжения» действует только вниз и шары, лежащие в крайних лунках, легко выдавливаются шарами верхних слоев.

Подобная укладка шаров называется плотнейшей гексагональной упаковкой. Так кристаллизуются бериллий, магний, кадмий, гелий при низкой температуре и давлении более двадцати пяти атмосфер. Она имеет только одну систему параллельных плотно упакованных слоев. Перпендикулярно к этой системе слоев через центр любого шара проходит ось симметрии третьего порядка. Снижение симметрии связано с тем, что если ось проходит через центры шаров, например, четных слоев, являясь для них осью шестого порядка, то для нечетных слоев она пройдет через центры лунок, и порядок их симметрии относительно этой оси будет только третьим. Тем не менее упаковка называется гексагональной, потому что ее можно рассматривать как две гексагональные решетки отдельно четных и нечетных слоев, вдвинутые одна в другую со сдвигом. Обратите также внимание на то, что пустые лунки во всех слоях находятся друг над другом, и через всю гексагональную структуру проходят каналы, в которые можно вставить стержни диаметром 0,155 диаметра шара. Центры этих каналов также являются осями симметрии третьего порядка. На рис. 63 модель гексагональной структуры представлена со вставленными стержнями.

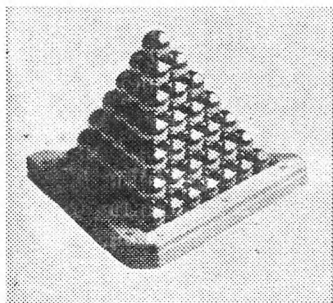


Рис. 64.

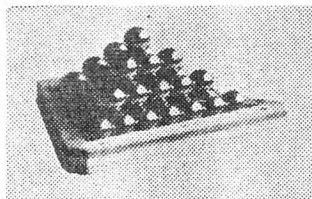


Рис. 65.

Теперь будем укладывать шары третьего слоя в лунки, лежащие над свободными лунками первого слоя. В зависимости от того, в какую систему лунок мы положим шары второго слоя, могут получиться две пирамиды (рис. 64 и 65). Первая пирамида ограничена правильными треугольниками с гексагональной укладкой шаров в

плоскостях граней, которые ничем не отличаются от первого слоя нашей укладки, лежащего в основании пирамиды. Другими словами, наша пирамида является одним из пяти возможных правильных многогранников — тетраэдром. В полученной упаковке имеется четыре семейства плотно упакованных слоев, нормали к которым совпадают с осями симметрии третьего порядка тетраэдра, проходящими через его вершины. В такой укладке ряды повторяются через два на третий.

Боковые грани второй пирамиды — равнобедренные прямоугольные треугольники, а сама пирамида является частью куба, отсеченной плоскостью, проходящей через диагонали граней, имеющих общую вершину (рис. 66). Укладка шаров на боковых гранях пирамиды происходит по квадратной сетке с рядами, параллельными диагоналям грани куба.

Легко обнаружить, что мы получили не две разные упаковки, а одну, только с разной ориентацией. Достаточно начать удалять шарики, расположенные на ребрах тетраэдра, как начнут обнажаться грани куба, так же как убирая шарики, лежащие вдоль ребер куба, мы постепенно превращаем куб в тетраэдр. Такую укладку называют плотнейшей кубической упаковкой. Так кристаллизуются неон, аргон, медь, золото, платина, свинец. Плотнейшая кубическая упаковка обладает всеми элементами симметрии куба. В частности, оси симметрии третьего порядка тетраэдра совпадают с пространственными диагоналями куба, являющимися для него также осями симметрии третьего порядка. В основе построения этой упаковки лежит элементарный куб из четырнадцати шаров. Восемь из них расположены в вершинах куба и шесть в центрах его граней. При внимательном рассмотрении второй пирамиды (рис. 66) этот куб можно найти в вершине пирамиды. Плотнейшую кубическую упаковку можно рассматривать так же как совокупность четырех простых кубических решеток, вдвинутых со сдвигом одна в другую. При таком рассмотрении становится особенно ясна равноправность всех шаров упаковки. По самому способу получения гексагональной и кубической плотнейших упаковок наложением гексагональных слоев

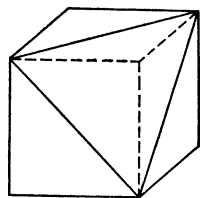


Рис. 66.

очевидно, что обе упаковки, несмотря на разную симметрию, имеют одинаковую плотность, или, как говорят, одинаковый коэффициент заполнения.

Если мы сделаем квадратный лоток и уложим шары по квадратной сетке, то тоже получится плотная упаковка. Хотя шары упакованы в каждом слое не самым

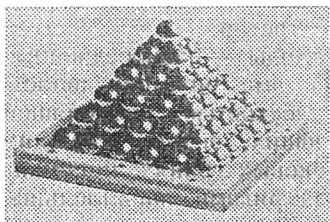


Рис. 67.

плотным образом, лунки между шарами будут более глубокими, и поэтому слои расположатся более тесно, чем при гексагональной структуре. Закончив укладку, мы получим четырехгранную пирамиду (рис. 67), боковые грани которой являются равно-сторонними треугольниками с гексагональной укладкой шаров. Если допол-

нить мысленно пирамиду такой же, но с вершиной, обращенной вниз, то получим третий после тетраэдра и куба правильный многогранник — октаэдр, имеющий восемь граней. Нетрудно догадаться, что мы получили снова плотнейшую кубическую упаковку, только теперь грани куба параллельны плоскости основания. Уберите шары, идущие вдоль ребер, и вы обнаружите на верхнем сечении пирамиды пять шаров, образующих грань элементарного куба.

С построенными моделями можно проделать ряд физических опытов.

Встряхивая резиновую пленку, можно моделировать тепловое движение атомов. (Вы видите, как с «повышением температуры» разрушается правильная укладка шаров.)

Так как один гексагональный слой входит в сравнительно мелкие лунки другого, слои оказываются слабо связанными, в них легко может возникать скольжение. Попробуйте двигать один гексагональный слой по другому и вы убедитесь, что существуют три направления легкого скольжения, в которых слои передвигаются как целое. То же самое имеет место в кристаллах. Скольжением в этих трех направлениях объясняются особенности пластической деформации кристаллов.

Модели можно строить из любых шариков. Если нет возможности достать шарики от подшипников, то можно

воспользоваться крупными бусами или в крайнем случае рябиной или мелкими яблоками. На рис. 68 и 69 показаны элементарные ячейки кубической и гексагональной упаковок, склеенные из мячей для настольного тенниса. Этот сравнительно доступный и удобный материал мы

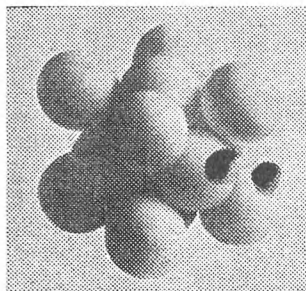


Рис. 68.

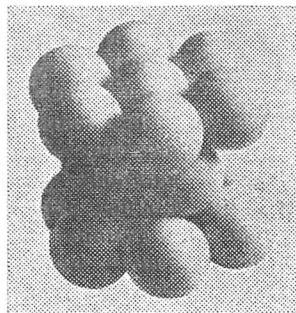


Рис. 69.

рекомендуем для изготовления моделей, особенно для школьного физического кабинета.

Укладки соприкасающихся шаров как плотнейшие, так и другие, играют в кристаллографии очень большую роль, и у нас еще будет повод о них поговорить. А пока запасайтесь шарами и стройте модели!

ПУЗЫРЬКОВАЯ МОДЕЛЬ КРИСТАЛЛА

Я. Гегузин

СЛОВО О МОДЕЛИРОВАНИИ

На трудном пути познания экспериментального факта или теоретического положения почти все испытывают потребность в образе, в зримой картинке, в упрощенной модели. Быть может, это преувеличение, но кажется, что один из основных компонентов таланта ученого и педагога состоит в умении придумывать образы, аналогии и модели, способные разъяснить физическое явление и углубить его понимание.

Какой обязана быть модель? Что модель должна уметь? Что у нее можно просить и что от нее должно требовать? Просить можно о помощи и требовать должно

отсутствия фальши, наличия хотя бы доли правды, относящейся к излагаемому явлению. В жизни к полуправде мы относимся презрительно, а по отношению к модели «полуправда» — высокая похвала. И конечно, модель должна быть наглядной, понятной без утомительных комментариев. Лучше всего, если вообще комментарии излишни, если наглядность настолько очевидна, что почти обретает доказательную силу.

Физике известно много выразительных и красивых моделей, физике твердого тела — особенно. В этой статье будет рассказано об одной «живой» модели, великолепно иллюстрирующей (передающей, отражающей) структуру реального кристалла, имеющиеся в нем дефекты, их сложные взаимодействия. Модель эта не нова. Она была придумана выдающимся английским физиком Л. Бреггом еще в начале 40-х годов, а затем осуществлена им и его сотрудниками В. Ломером и Д. Наем. Так мы ее и будем называть: модель БЛН (Брегга — Ломера — Ная).

ЧТО МЫ ХОТИМ МОДЕЛИРОВАТЬ?

Ответ четкий: реальный кристалл. Что значит «реальный кристалл»? Это значит — совокупность огромного числа одинаковых атомов или молекул, которые расположены в строгом порядке, образуя кристаллическую решетку. В некоторых местах строгий порядок может нарушаться, и эти нарушения означают наличие дефектов в кристалле. И еще одна очень важная характеристика: образующие кристалл атомы между собой взаимодействуют. О том, как взаимодействуют, — немного позже, а здесь лишь бесспорное утверждение: взаимодействуют! Потому что, если бы не взаимодействовали, был бы не кристалл, а груда беспорядочно нагроможденных атомов. Поддержание в кристалле порядка — прямое следствие взаимодействия между образующими его атомами.

Очень распространена так называемая мертвая модель кристалла. Она устроена так: деревянные или глиняные шарики, соединенные друг с другом ровными проволочками. Шарики — атомы, проволочки — символы связей между атомами, их «замороженного» взаимодействия. Замороженность взаимодействия и делает модель мертвой.

В этой модели атомы разного сорта — шарики различных размеров и цвета, разные расстояния между атомами — проволоочки различной длины. Это разумная и очень полезная модель кристалла. Рассказывая о кристалле далеко не всю правду, она говорит о нем только правду, не фальшивит. В ней нет никаких видов движения атомов в кристалле, зато очень четко отражен порядок в их расположении. Мертвая модель кристалла — великолепный помощник, когда надо зримо представить себе пространственное расположение атомов или, например, те направления в кристалле, в которых он деформируется или проводит электрический ток легче, чем в других. Она незаменима, если нужно, пользуясь данными опытов и так называемыми общими соображениями, представить себе возможное расположение атомов в еще не изученном кристалле. Именно такое моделирование — шарики и проволоочки — помогло сделать одно из самых крупных открытий XX века — установить структуру молекулы ДНК. Немалая заслуга мертвой модели!

Мы, однако, хотим моделировать не «мертвый», а «живой» кристалл. Для этого, очевидно, надо научиться моделировать взаимодействие между атомами в кристалле, оживлять замороженное в проволочках взаимодействие.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ АТОМАМИ В КРИСТАЛЛЕ

Одна, пожалуй, самая важная характеристика этого взаимодействия непосредственно следует из простейшего факта: расстояние между двумя соседними атомами в реальном кристалле при постоянной температуре имеет вполне определенное значение. (Речь идет, разумеется, о расстоянии между положениями, около которых атомы совершают тепловые колебания. Амплитуда этих колебаний значительно меньше расстояния между атомами.)

Определенное расстояние — это означает, что если мы попытаемся его увеличить, атомы, противясь этому, будут притягиваться друг к другу, а если мы попытаемся его уменьшить — отталкиваться. Итак, только из факта наличия определенного расстояния между атомами следует, что взаимодействие между ними носит черты и притяжения, и отталкивания одновременно.

При некотором расстоянии между атомами (его мы и назвали определенным) силы притяжения и отталкивания оказываются равными по абсолютной величине. На этом расстоянии и расположены атомы в решетке.

Хорошо бы придумать такой прием моделирования, который передавал бы конкуренцию сил притяжения и отталкивания. Иначе говоря, «оживлял» бы взаимодействие между атомами в кристалле. Именно это и сделали авторы модели БЛН! В качестве строительных элементов в этой модели использованы не глиняные и не деревянные шарики, а . . . маленькие мыльные пузырьки.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЫЛЬНЫХ ПУЗЫРЬКОВ НА ВОДЕ

Они не безучастны друг к другу: два разобщенных мыльных пузырька на поверхности воды друг к другу притягиваются, а соприкоснувшись, отталкиваются друг от друга. Это можно наблюдать в очень простом опыте. Вот этот опыт.

Вначале раздобудем необходимое «оборудование»: тарелку, медицинскую иглу от шприца, волейбольную камеру и зажим с регулируемым поджатием, с помощью которого можно было бы с различной силой сжимать резиновую трубку — отросток волейбольной камеры. Теперь подготовим опыт. Тарелку почти доверху заполним мыльной водой и добавим в нее несколько капель глицерина. Это для того, чтобы пузырьки, которые мы

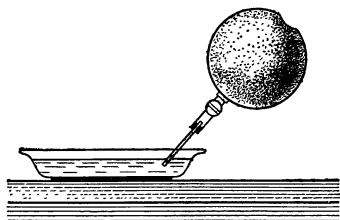


Рис. 70.

будем выдувать на поверхности мыльной воды, получались устойчивыми. Надеем волейбольную камеру, зажмем ее отросток и вставим в него иглу от шприца (разумеется, тупым концом). Опустим свободный конец иглы под воду (неглубоко) и немного ослабим зажим (рис. 70) —

из иглы одна за другой начнут выходить строго одинаковые порции воздуха, которые будут превращаться в одинаковые мыльные пузырьки. Много пузырьков нам понадобится позже, а для первого опыта надо

ухитриться создать всего два пузырька на некотором расстоянии друг от друга. Если сразу не получится — получится после пятой попытки! Удобно этот опыт проводить с пузырьками, диаметр которых 1—2 мм.

Пузырьки созданы, теперь можно за ними наблюдать. Сначала очень медленно, а затем ускоряясь (без нашего вмешательства), пузырьки будут двигаться навстречу друг другу. Столкнувшись, они соприкоснутся не в точке, а как бы вдавятся один в другой. При этом несколько по-разному будут себя вести два одинаковых и два различных по размеру пузырька. Понаблюдайте!

Попытаемся понять происхождение силы, которая заставляет пузырьки самопроизвольно сближаться. Несколько удобнее сделать это, рассматривая не два мыльных пузырька, а две спички, параллельно лежащие на поверхности воды. И пузырьки, и спички смачиваются водой, на которой они плавают, поэтому общий характер взаимодействия для тех и других один и тот же. Удобство такой замены в том, что два плавающих пузырька, находясь близко

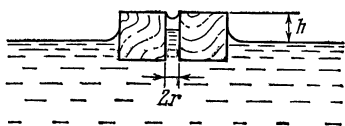


Рис. 71.

один от другого, образуют вместе с жидкостью очень сложную поверхность, а спички — гораздо более простую (рис. 71). Сила, сближающая две плавающие спички, возникает вот как. Вода смачивает спички, поэтому ее поверхность возле спички искривляется. Кривизна поверхности приводит к появлению сил, действующих на жидкость. Это — силы, обусловленные поверхностным натяжением, направленные в нашем случае вертикально вверх (будем считать, что смачивание полное). Под действием этих сил жидкость поднимается по стенкам спичек, причем поднятие гораздо заметнее в области между спичками (см. рис. 71). Здесь жидкость оказывается как бы растянутой, давление в ней понижается по сравнению с атмосферным давлением на величину добавочного давления $\Delta p = \frac{2\sigma}{d} = \frac{\sigma}{r}$, где σ — коэффициент поверхностного натяжения, d — расстояние между спичками, $r = d/2$ — радиус кривизны поверхности жидкости. Следовательно, и сила давления жидкости на спички в области между спичками меньше по абсолютной вели-

чине силы атмосферного давления, действующей на спички снаружи. Таким образом, абсолютная величина силы, сближающей спички, равна

$$|F| = \Delta p S = \frac{2\sigma}{d} hl = \frac{4\sigma^2 l}{\rho |g| d^2} \sim \frac{1}{d^2};$$

Предскажем любопытное явление: так как сила $F \sim 1/d^2$, то спички, находящиеся в вязкой среде, будут

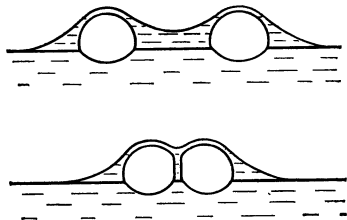


Рис. 72.

сближаться со скоростью, увеличивающейся с уменьшением расстояния между ними. И не только спички. Пузырьки тоже сближаются, ускоряясь (рис. 72). В нашей лаборатории сближение пузырьков мы наблюдали так. Над кюветой с мыльным раствором и пузырьками расположили кинокамеру и, когда пузырьки начали сближаться, включили ее (рис. 73).

Сближение пузырьков можно проследить вплоть до их столкновения. После того как пузырьки столкнулись, между ними начинает действовать сила отталкивания. Она обусловлена тем, что во взаимно вдавливающихся пузырьках (рис. 74) увеличивается давление газа, которое как бы расталкивает пузырьки.

Видимо, мыльные пузырьки вполне подходят для создания модели кристалла, если на поверхности мыльного раствора поселить не один, не два, а множество одинаковых пузырьков. Если радиус пузырька $R = 5 \cdot 10^{-2}$ см, то на поверхности мыльного раствора в обыкновенной тарелке, радиус которой $R_T \approx 10$ см, можно поселить $N \sim (R_T/R)^2 \sim 4 \cdot 10^4$ пузырьков! Такой плот, составленный из пузырьков, между которыми действуют силы притяжения и отталкивания, представляет собой двумерную модель кристалла. Например,

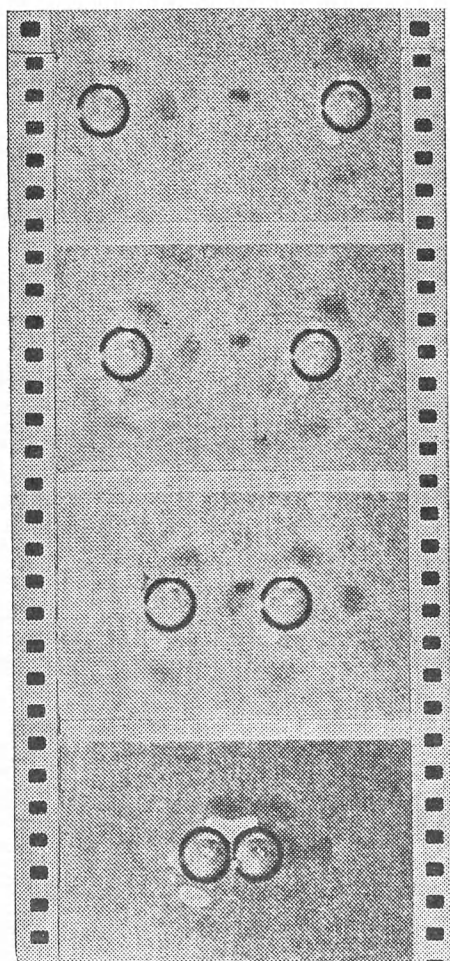


Рис. 73.

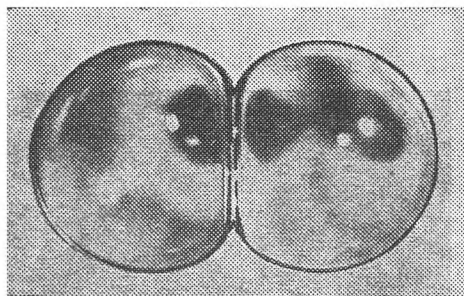


Рис. 74.

авторы этой **очень красивой модели показали**, что взаимодействие **пузырьков**, радиус которых $R \sim 10^{-1}$ см, очень похоже на **взаимодействие атомов в кристалле меди**.

МОДЕЛЬ В ДЕЙСТВИИ

Хорошо бы всем читателям **показать кинофильм**, в котором **снята модель БЛН в действии**. Они увидели бы и **идеальный кристалл**, и **кристалл с движущимися и взаимодействующими дефектами**, и множество **простых и сложных процессов**, которые происходят в **реальном кристалле**. В статье можно лишь кое о чем рассказать и кое-что проиллюстрировать **фотографиями и кинограммами**.

С помощью модели БЛН **оказалось возможным проверить некоторые следствия теории**, построенной применительно к **кристаллу, абсолютно свободному от каких-либо дефектов, так называемому идеальному кристаллу**. Получить **такой кристалл в натуре** экспериментатор практически не может, а вот **построить его из пузырьков** оказалось просто и доступно (рис. 75).

Один из самых распространенных дефектов в кристаллах — это **пустая позиция в узле решетки, незанятая атомом**. Физики называют ее **вакансией**. В модели БЛН **вакансия — это один лопнувший пузырек** (рис. 76). В полном согласии со здравым смыслом и результатами опытов с реальными кристаллами модель БЛН свидетельствует о том, что **объем одной вакансии** немного меньше объема, **приходящегося на занятую позицию**. Действительно, после того как **пузырек лоп-**

нул, его бывшие соседи немного переместятся в образовавшуюся пустоту и уменьшат ее. Невооруженным глазом это увидеть почти невозможно, но если спроекти-

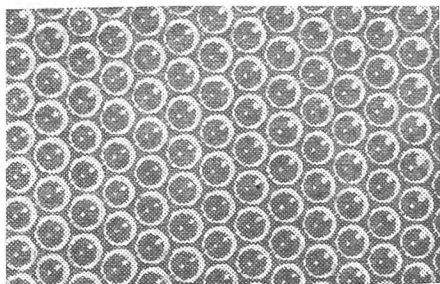


Рис. 75.

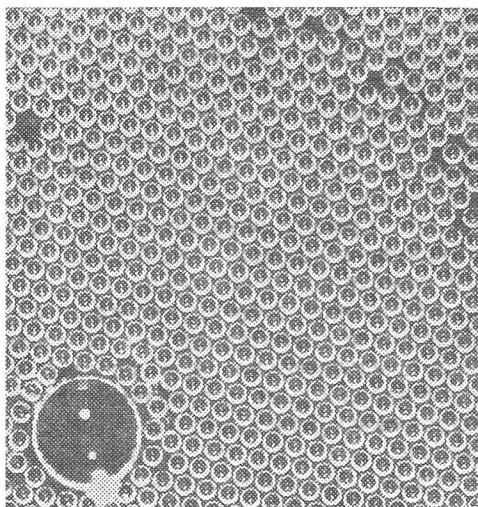


Рис. 76.

ровать кино- или фотопленку на экран и тщательно промерить расстояния между пузырьками, можно убедиться, что по сравнению с занятой позицией вакансии немного сжата. Для физиков это свидетельство модели

БЛН не просто качественная иллюстрация, оно имеет и количественную ценность.

Очень часто в кристалле вследствие его предыстории оказывается постороннее включение, деформирующее кристалл. При решении многих задач физики кристаллов очень важно знать, как при этом смещаются атомы, окружающие включение. Оказывается, присутствие инородного включения чувствуют не только непосредственные соседи, но и атомы, расположенные от включения на значительном расстоянии. Модель БЛН это отчетливо иллюстрирует (см. рис. 76).

Большинство кристаллических тел являются поликристаллами. Это значит, что они состоят из множества произвольно ориентированных кристалликов, разделенных границами. Почти очевидно, что многие свойства поликристаллов (такие как механическая прочность или сопротивление электрическому току) должны зависеть от структуры границ. Модель БЛН и в этом вопросе оказалась очень полезной: подсказала кристаллофизикам, как изменяется структура границы в зависимости от взаимной ориентации граничащих кристалликов, от наличия примесей, расположенных на границе, и многое другое. Вот несколько примеров.

В поликристаллах может происходить процесс укрупнения одних участков (зерен) за счет других, в результате чего средний размер зерна увеличивается. Называется этот процесс рекристаллизацией и происходит он по причине очевидной: чем больше размер зерен, тем меньше суммарная поверхность границ, а значит, меньше и избыточная энергия, которая с границами связана. Энергия поликристалла при рекристаллизации уменьшается, следовательно, этот процесс может происходить самопроизвольно (поскольку приближает состояние устойчивого равновесия, в котором запас энергии минимален). На рис. 77 приведена кинограмма, иллюстрирующая последовательные этапы «поедания» крупным зерном расположенного в нем мелкого зерна.

Оказывается (это предсказали теоретики и тщательно изучили экспериментаторы в опытах с реальными кристаллами), движущаяся граница между зернами «заглатывает» те вакансии, которые ей встречаются по пути. При этом граница не изменяет своего строения. Модель БЛН это явление отлично иллюстрирует (рис. 78).

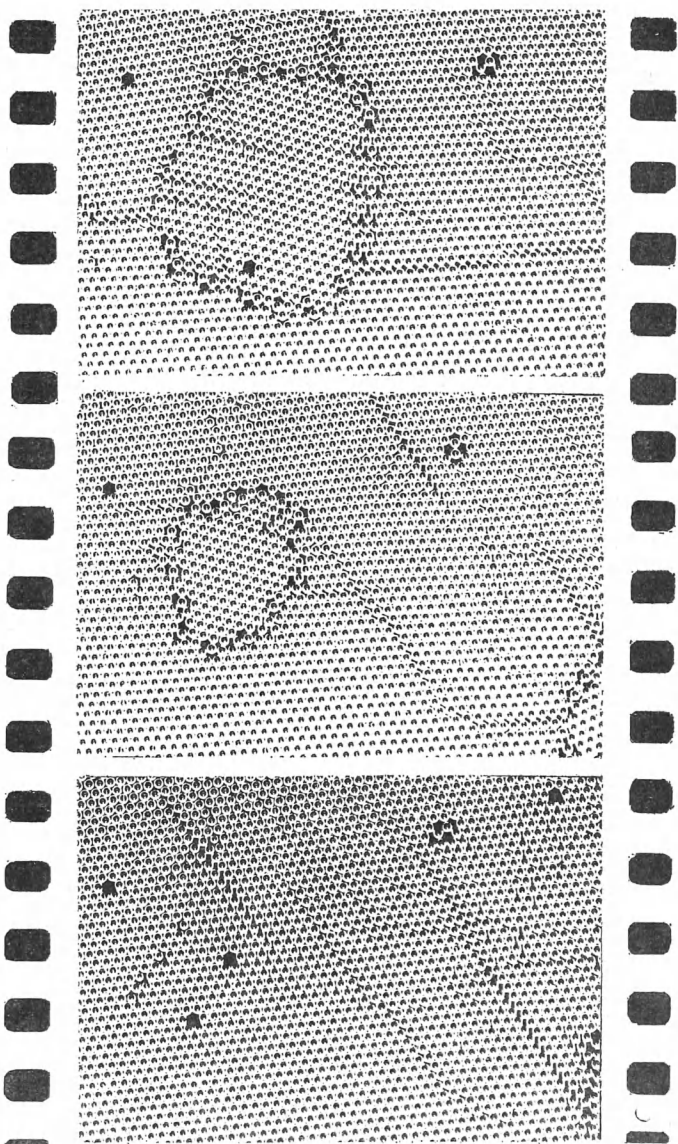


Рис. 77.

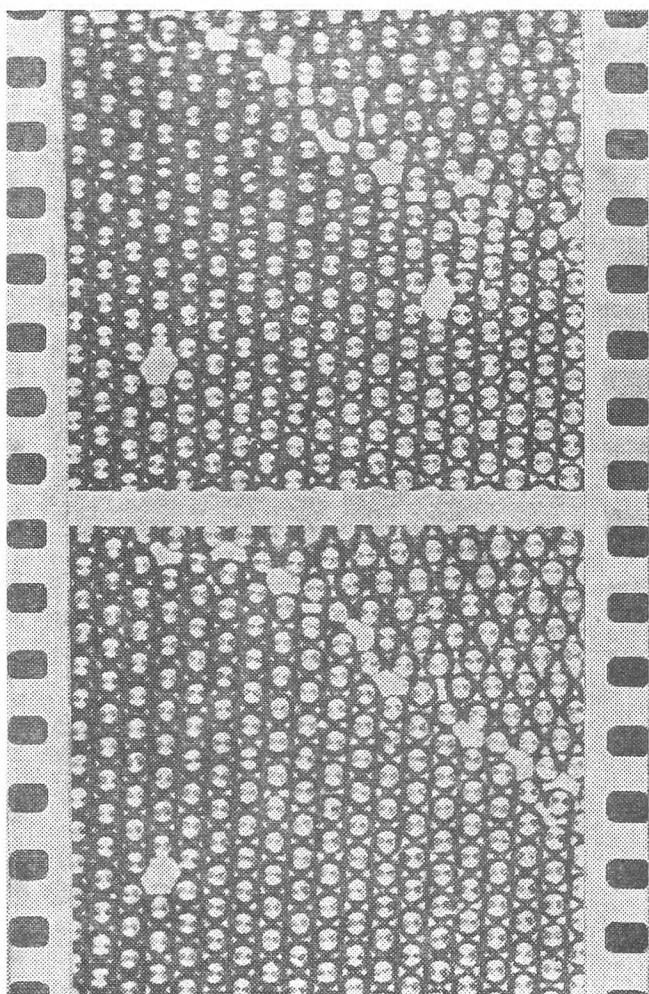


Рис. 78.

ОГРАНИЧЕННОСТЬ И «ПОЛУПРАВДА» МОДЕЛИ БЛН

Допуская, что читатель проникся и уважением, и доверием к модели БЛН, придется его немного охладить, обратив внимание и на ограниченность модели, и на заключенную в ней «полуправду».

Модель БЛН способна моделировать лишь одну структуру: двумерную, гексагональную и плотноупакованную. А истинные кристаллы имеют множество структур. Возможности «мертвой» модели непомерно богаче: в ней можно располагать несметным числом способов и, следовательно, можно моделировать любую мыслимую структуру. Кроме того, модель БЛН в своем современном варианте — двумерна. Ее авторы пытались осуществить и пространственную (многослойную) пузырьковую модель, но экспериментировать с ней оказалось совсем не просто, и модель не привилась. В нашей лаборатории мы осуществили и двумерную, и трехмерную модели БЛН и убедились, что трехмерная практически нежизнеспособна.

Не будем упрекать модель в ее слабостях, о которых упомянули и о которых умолчали. Будем ей благодарны за ее сильные стороны.

КАК ОПРЕДЕЛИТЬ ПОЛЮСА МАГНИТА

Б. А л е й н и к о в

Вопрос этот совсем не такой простой, каким кажется с первого взгляда. Ведь у нас нет никакой уверенности в том, что полюса магнита не раскрасили в различные цвета просто, чтобы их различать, т. е. без связи с их истинным магнетизмом. Кроме того, магнит может быть вообще не маркирован.

Для опыта нужны две вещи — постоянный подковообразный магнит, не обязательно раскрашенный в два цвета (даже интереснее, если полюса магнита заранее не размечены), и . . . телевизор. Опыт лучше производить утром или днем, когда по телевидению передают сетку для настройки телевизоров.

Поднесем магнит к экрану включенного телевизора так, как показано на рис. 79. Изображение немедленно исказится. В центре сетки имеется маленький кружок.

Он заметно сместится вверх или вниз, в зависимости от того, как расположены полюса магнита.

Изображение на экране телевизора создает электронный луч, идущий из глубины трубки на зрителя. Наш магнит отклоняет движущиеся электроны, поэтому

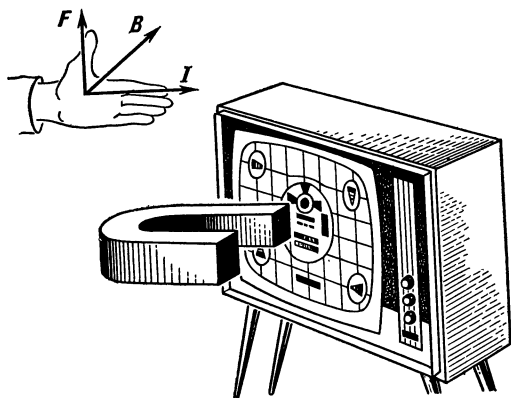


Рис. 79.

изображение смещается. Направление действия магнитного поля на движущийся заряд определяется по правилу левой руки. Нужно расположить ладонь так, чтобы силовые линии входили в нее, а вытянутые пальцы указывали направление тока; тогда отогнутый под углом 90° большой палец укажет направление смещения движущегося заряда. Силовые линии идут от северного к южному полюсу магнита. А направлением тока в правиле левой руки считается «техническое» направление — от плюса к минусу. Так двигались бы положительные заряды. Но в кинескопе движутся электроны, причем летят они на нас. Это эквивалентно тому, что положительные заряды летят от нас. Поэтому вытянутые пальцы левой руки должны быть направлены в экран. Остальное понятно. По смещению центрального кружочка телевизионной сетки определяем, какой полюс магнита поднесен к экрану, северный или южный. Итак, с помощью телевизора можно легко и быстро определять расположение полюсов немаркированного магнита.

Телевизор может помочь и при определении знака полюсов немаркированной батареи. Для этого опыта

необходимо иметь батарею, электромагнит с дугообразным сердечником, телевизор, сопротивление, проводник.

Подключим к батарее последовательно электромагнит и сопротивление, выбранное с таким расчетом, чтобы ток не превышал допустимого. Поднося электромагнит к экрану телевизора, определим по правилу левой руки его полюса. Далее по правилу буравчика найдем направление тока и, следовательно, знаки полюсов батареи.

СТРАННЫЙ МАЯТНИК

Н. М и н ц

Обычный, хорошо знакомый вам математический маятник не меняет плоскости своих колебаний.

На этом свойстве маятника основана известная демонстрация вращения Земли — опыт Фуко. Маятник на длинном подвесе совершает колебания. Под ним размечен круг, напоминающий циферблат. Благодаря тому, что плоскость колебаний маятника относительно неподвижных звезд не меняется, а Земля вращается вокруг своей оси, с течением времени маятник проходит последовательно над всеми отметками круга. На полюсе за сутки круг под маятником совершит полный оборот. Впервые такой опыт был проведен французским физиком Л. Фуко в 1851 году под куполом Пантеона в Париже с маятником длиной 67 м.

Но всякий ли маятник обязательно сохраняет плоскость колебаний? Ведь нить подвеса позволяет ему колебаться в любой вертикальной плоскости.

Попробуйте сделать такой маятник; как показано на рис. 80, а. Для этого возьмите нитку, сложите ее пополам, а к середине привяжите еще одну нитку. К другому концу этой второй нитки прикрепите ложку, ножницы или какой-нибудь другой предмет — и маятник готов. (Вертикальная нить подвеса должна быть достаточно длинной. По крайней мере не меньше, чем нить наклонного подвеса.)

Подвесьте маятник за оба конца сложенной пополам нитки на кнопках или гвоздиках (например, в дверной проем). Если теперь отклонить маятник от положения равновесия и затем отпустить, то вы увидите любопыт-

ную картину. Маятник будет двигаться по эллипсу, причем этот эллипс будет постоянно меняться, вытягиваясь то в одну, то в другую сторону. Почему это происходит?

У маятника с одной точкой подвеса (рис. 80, б) плоскость колебаний ничем не выделена. Каким бы ни

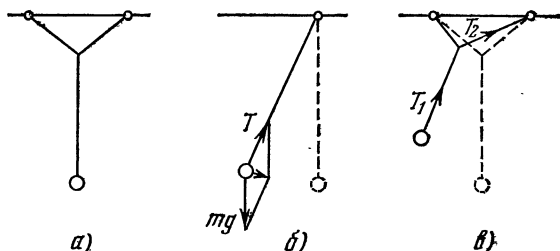


Рис. 80.

было первоначальное отклонение маятника, все силы, действующие на него, лежат в одной плоскости. Нужно только, отпуская маятник, не толкнуть его вбок.

Действительно, проведем плоскость через первоначальное и отклоненное положение маятника. Очевидно, в этой плоскости будут лежать как сила тяжести mg , так и сила натяжения нити T . Следовательно, равнодействующая этих сил, которая, собственно, и заставляет маятник колебаться, при любом отклоненном положении маятника также лежит в той же плоскости. Это означает, что нет сил, которые могли бы вывести маятник из этой плоскости. Потому-то маятник и сохраняет плоскость своих колебаний.

Другое дело наш маятник. Здесь точками закрепления и линией отвеса строго фиксирована первоначальная плоскость. Поэтому с самого начала маятник отклонен так, что он не лежит в этой плоскости *). Сила натяжения (рис. 80, в) имеет составляющую, перпендикулярную первоначальной плоскости. Благодаря этой составляющей движение маятника выходит из перво-

*) Конечно, если отклонить маятник строго перпендикулярно плоскости подвеса, он будет совершать колебания в одной плоскости, перпендикулярной плоскости подвеса. Но практически всегда существуют отклонение от перпендикуляра и скорость, не лежащая в плоскости первоначального отклонения.

начальной плоскости. При этом, поскольку сила натяжения не постоянна, меняется и ее перпендикулярная составляющая. Далее, отклоняясь в противоположную сторону, маятник натягивает другую из закрепленных нитей. Это приводит к появлению силы, действующей в другом направлении. При этом, как показывает опыт, и возникает движение по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

Кривые, которые описывает наш маятник, называются фигурами Лиссажу, по имени французского физика Лиссажу, который в 1863 году впервые описал их. Фигуры Лиссажу получаются при сложении двух взаимно-перпендикулярных колебаний. Они могут быть довольно сложными, особенно при близких частотах продольных и поперечных колебаний. Если частоты одинаковы, траекторией движения будет эллипс. Фигура, показанная на рис. 81, описывается маятником, уравнения движения которого выглядят следующим образом: $x = \sin 3t$, $y = \sin 5t$. Рис. 82 соответствует колебаниям $x = \sin 3t$, $y = \sin 4t$.

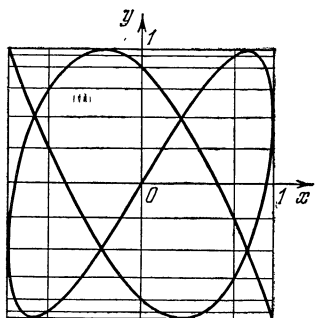


Рис. 81.

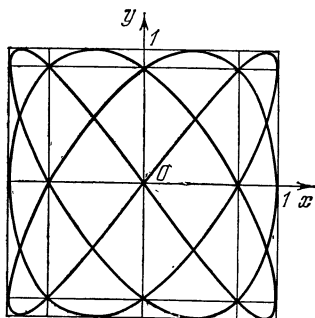


Рис. 82.

Соотношение частот можно варьировать, меняя отношение длин вертикальной и наклонной нитей подвеса. При этом вычислить частоты колебаний маятника довольно сложно, а вот увидеть фигуры, вычерчиваемые им, значительно проще.

Для того чтобы увидеть фигуры Лиссажу, можно к подвесу нашего маятника прикрепить ведерко с дырявым дном, наполненное песком, а на пол положить кусок картона, окрашенный в темный цвет. Тогда маятник «нарисует» отчетливую траекторию своего движения.

Можно получить фотографии траекторий движения маятника. Возьмите грузило или тяжелый маленький шарик и покрасьте его белой краской. Сделайте из темных ниток такой же подвес, как у маятника, изображенного на рис. 80, *а*. Под маятник подложите лист черной матовой бумаги. Гладкая бумага может отсвечивать, а это будет мешать наблюдениям. Фотографировать надо сверху. Установите фотоаппарат так, чтобы плоскость объектива была горизонтальна. При достаточно большой выдержке на фотоснимках можно увидеть четкие траектории.

На рис. 83 и 84 приведены рисунки с фотографий траекторий, полученных таким способом. Видно, как маятник изменял направление колебаний. На фигуре рис. 83 это изменение произошло более резко.

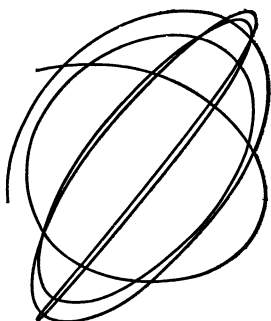


Рис. 83.

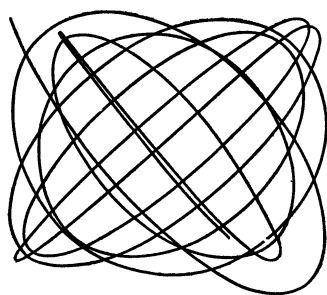


Рис. 84.

Время экспозиции этих двух фотографий различно. Это видно хотя бы из того, что длина траекторий неодинакова.

Получившиеся кривые как бы вписаны в параллелограмм. На самом деле они должны быть вписаны в прямоугольник. То, что у нас не получился прямоугольник, объясняется просто: плоскость объектива была не строго горизонтальна.

В опытах с маятником следует учитывать, что более или менее правильная траектория получается только в том случае, когда нет сильных затуханий. Колебания маятника с малой массой груза и достаточно большим объемом будут быстро затухать. Такой маятник кач-

нётся несколько раз, быстро уменьшая амплитуду. Естественно, при движении с сильным затуханием увидеть и сфотографировать изменение направления колебаний маятника не удастся.

С фигурами Лиссажу приходится встречаться довольно часто в тех случаях, когда колебания взаимно перпендикулярны. Так, они неизбежно появляются при настройке осциллографа.

ФИГУРЫ ЛИССАЖУ

Н. Минц

Самые простые колебания тела — это колебания, при которых отклонение x тела от положения равновесия изменяется по закону

$$x = a \sin(\omega t + \varphi),$$

где a — амплитуда, ω — частота, φ — начальная фаза колебаний.

Такие колебания называются гармоническими. Гармонические колебания совершают математический маятник, грузик на пружине, напряжение в электрическом контуре.

В этой статье мы рассмотрим случай, когда тело участвует одновременно в двух гармонических колебаниях. Если оба колебания происходят вдоль одной прямой, то уравнение движения тела будет представлено суммой уравнений двух движений:

$$x = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2).$$

Нетрудно построить график смещения тела от положения равновесия в зависимости от времени. Для этого нужно сложить ординаты кривых, соответствующих первому и второму движениям. На рис. 85 показан пример сложения двух гармонических колебаний (сплошные синусоиды). Пунктирная линия соответствует результирующему колебанию. Оно уже не является гармоническим.

Более сложные траектории получаются при сложении колебаний в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Примером такого колебания может служить

движение тела, изображенного на рис. 86. В этом случае вид траекторий зависит от соотношения частот, амплитуд и фаз взаимно перпендикулярных колебаний.

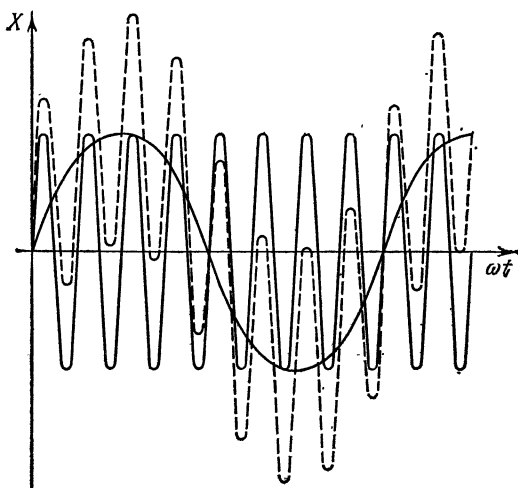


Рис. 85.

Эти траектории, как мы уже знаем, называют фигурами Лиссажу. Установка, использованная Лиссажу, по-

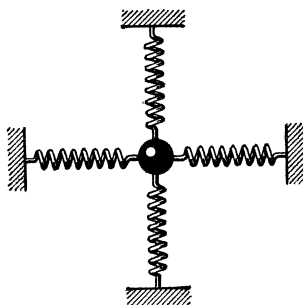


Рис. 86.

казана на рис. 87. Камертон T' колеблется в горизонтальной плоскости, камертон T — в вертикальной. Луч света проходит через линзу и попадает на зеркальце, прикрепленное к камертону T' , отражается им, попадает на зеркальце, прикрепленное к камертону T , и после вторичного отражения попадает на экран. При

колебании только одного камертона светлое пятно на экране колеблется вдоль прямой линии. Если колеблются оба камертона, пятно может описывать замысловатые траектории.

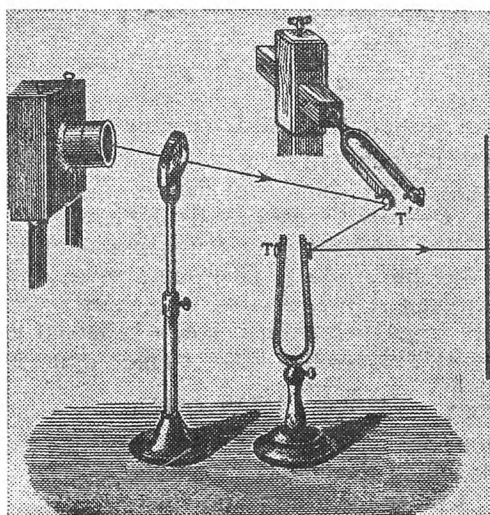


Рис. 87.

Траектория движения тела в том случае, когда оно одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, описывается системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} x &= A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1), \\ y &= A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где x и y — проекции смещения тела на осях X и Y .

Допустим для простоты, что $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ и $\omega_1 = \omega_2 = \omega$. Тогда

$$\left. \begin{aligned} x &= A_1 \sin \omega t, \\ y &= A_2 \sin \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Это означает, что $y = \frac{A_2}{A_1} x$; следовательно, соотношения (2) описывают отрезок прямой. Угол наклона α к оси X определяется уравнением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{A_2}{A_1}.$$

Пусть теперь $\varphi_1 = \varphi'_1 + \frac{3\pi}{2}$. Тогда

$$\left. \begin{aligned} x &= A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi'_1), \\ y &= A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Разберем сначала самый простой случай, когда $A_1 = A_2$, $\varphi'_1 = \varphi_2 = 0$ и $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, т. е.

$$\left. \begin{aligned} x &= A \cos \omega t, \\ y &= A \sin \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Точка с координатами x и y , определяемыми этими уравнениями, описывает окружность радиуса A . Действительно, $x^2 + y^2 = A^2 \cos^2 \omega t + A^2 \sin^2 \omega t = A^2$. А это и означает, что траектория движения — окружность.

Пусть теперь $A_1 \neq A_2$. Построим траекторию движения для случая $A_1 = 1$, $A_2 = 2$. В момент максимального отклонения $x = A_1 = 1$, т. е. $\cos \omega t = 1$, $\omega t = 0$ и, следовательно, $y = 2 \sin \omega t = 0$. Аналогично при $x = 0$ $y = 2$, при $x = \frac{\sqrt{2}}{2}$ $y = \sqrt{2}$ и так далее.

Построив по этим координатам график, мы получим эллипс, большая полуось которого равна A_2 , а малая — A_1 , т. е. эллипс вытянут по оси Y (рис. 88, а *).

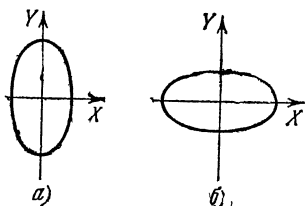


Рис. 88.

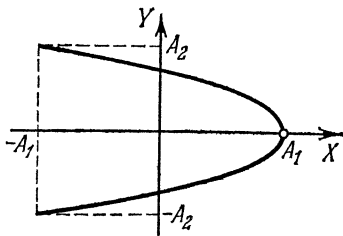


Рис. 89.

Нетрудно показать, что при $A_1 = 2$ и $A_2 = 1$ мы получили эллипс, вытянутый по оси X (рис. 88, б).

*) То, что система уравнений

$$\left. \begin{aligned} x &= A_1 \cos \omega t, \\ y &= A_2 \sin \omega t \end{aligned} \right\}$$

описывает эллипс, можно показать и аналитически:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = \cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t = 1,$$

т. е. точка с координатами x и y лежит на эллипсе.

Таким образом, ясно, что, меняя соотношение амплитуд, можно получать различные эллипсы.

Пусть теперь $\omega_1=2\omega$, $\omega_2=\omega$, $\varphi_1=0$ и $\varphi_2=0$. Тогда система уравнений (3) приобретает вид

$$x = A_1 \cos 2\omega t,$$

$$y = A_2 \sin \omega t.$$

Преобразуем уравнение для x следующим образом:

$$x = A_1 (\cos^2 \omega t - \sin^2 \omega t) =$$

$$= A_1 (1 - 2 \sin^2 \omega t) = A_1 \left(1 - 2 \frac{y^2}{A_2^2}\right).$$

Эта кривая — часть параболы с осью вдоль оси X и вершиной в точке $x=A_1$ (рис. 89). Таким образом, мы получили незамкнутую кривую.

Рассмотрим теперь влияние частот на форму траектории, а амплитуды поперечного и продольного колебаний, описываемых системой уравнений (3), возьмем одинаковыми.

Построим, например, кривые, соответствующие уравнениям

$$x = A \cos \omega t, \quad y = A \sin 2\omega t,$$

$$x = A \cos \omega t, \quad y = A \sin 4\omega t.$$

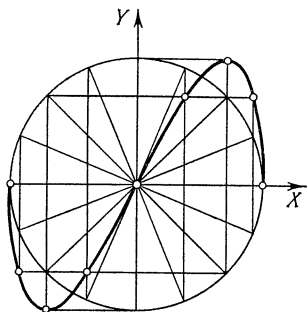


Рис. 90.

Сделать это проще всего так. Возьмем окружность радиуса A (рис. 90), отметим на ней точки, соответствующие углам ωt , равным $0, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{8}, \frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{8}, \frac{3\pi}{4}, \frac{7\pi}{8}, \pi, \dots, 2\pi$.

Чтобы найти точки с координатами $x=A \cos \omega t$ и $y=A \sin 2\omega t$, вспомним, что в случае окружности единичного радиуса ($r=1$) $\cos \omega t$ численно равен проекции радиуса-вектора $r(\omega t)$ на ось X , а $\sin \omega t$ — проекции на ось Y . Так как мы взяли окружность радиуса A , то координаты x и y каждой точки окружности — это проекции радиусов-векторов этих точек на оси X и Y .

Найдя все точки по их координатам, проведем через эти точки сплошную линию (рис. 90).

Для обоих случаев получаются замкнутые кривые, число петель которых соответствует отношению $n = \frac{\omega_2}{\omega_1}$ (рис. 91, а, б).

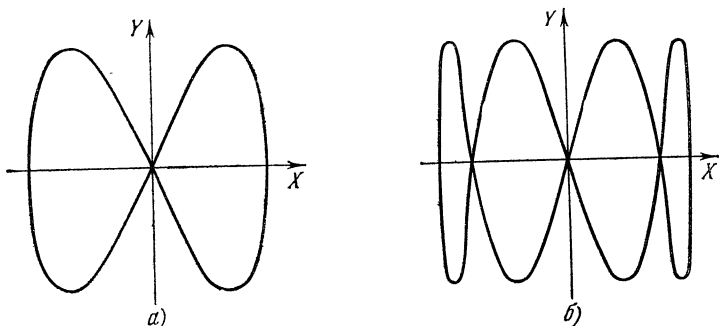


Рис. 91.

Фигура, приведенная на рис. 92, незамкнута. Она соответствует системе уравнений

$$x = \cos 2\omega t,$$

$$y = \sin 3\omega t.$$

В каком же случае получаются незамкнутые фигуры? Можно ли найти общие закономерности? Рассмотрим уравнения в виде

$$x = A_1 \cos p\omega t,$$

$$y = A_2 \sin q\omega t.$$

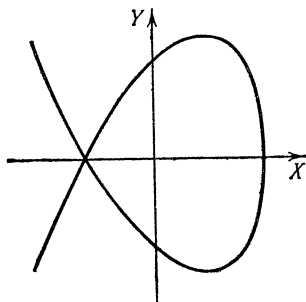


Рис. 92.

Прежде всего заметим, что в той точке, где кривая поворачивает обратно по той же траектории, скорости тела вдоль осей X и Y одновременно обращаются в нуль. Ведь именно в этом случае тело, двигаясь вдоль кривой, останавливается, а затем на-

чинает двигаться обратно. Если $x = A_1 \cos p\omega t$, то

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{A_1 \cos p\omega t_2 - A_1 \cos p\omega t_1}{t_2 - t_1} = \\ &= \frac{-2A_1 \sin \frac{p\omega t_2 + p\omega t_1}{2} \sin \frac{p\omega t_2 - p\omega t_1}{2}}{t_2 - t_1}. \end{aligned}$$

Когда $t_2 \approx t_1 = t$ (разность $t_2 - t_1$ мала),

$$\sin \frac{p\omega t_2 - p\omega t_1}{2} \approx \frac{p\omega t_2 - p\omega t_1}{2}.$$

В результате

$$v_x = -A_1 p\omega \sin p\omega t.$$

Аналогично для v_y получаем

$$v_y = A_2 q\omega \cos q\omega t.$$

Посмотрим, когда скорости v_x и v_y обращаются в нуль:

$$v_x = 0, \quad \text{если} \quad p\omega t = k\pi,$$

$$v_y = 0, \quad \text{если} \quad q\omega t = \frac{\pi}{2} + m\pi.$$

Из этих условий ясно, что фигура Лиссажу получается незамкнутой в тех случаях, когда

$$\frac{p}{q} = \frac{2k}{2m+1}.$$

В частности, кривая на рис. 92 удовлетворяет этому условию.

Фигуры Лиссажу можно наблюдать на экране осциллографа. На вертикальную развертку подается одно гармоническое колебание, на горизонтальную — другое. Их сумма может принимать разнообразные формы. Для этого достаточно менять частоту переменного напряжения на обкладках осциллографа.

Каждый из вас может сам сделать очень простое устройство для наблюдения и фотографирования фигур Лиссажу. Возьмите обыкновенную металлическую линейку и изогните ее так, чтобы плоскость одной половины линейки была перпендикулярна плоскости второй ее половины (см. рис. 93).

Один из концов линейки зажмите в тиски. Если теперь качнуть свободный конец линейки, он будет описывать в воздухе замысловатые фигуры. Это и будут фигуры Лиссажу.

Движение свободного конца линейки складывается из независимых колебаний двух частей линейки. Одна — от тисков до перегиба и вторая — от перегиба до конца. Колебания каждой части перпендикулярны плоскости линейки на этом отрезке. Поскольку угол перегиба линейки равен $\pi/2$, колебания взаимно перпендикулярны.

Вид траектории конца линейки зависит от длины и ширины линейки и от того, в каком месте ее перегнуть.

Для получения разных фигур можно использовать одну и ту же линейку. Чтобы изменять соотношение частот вертикального и горизонтального колебаний, достаточно зажимать линейку в тиски в разных местах.

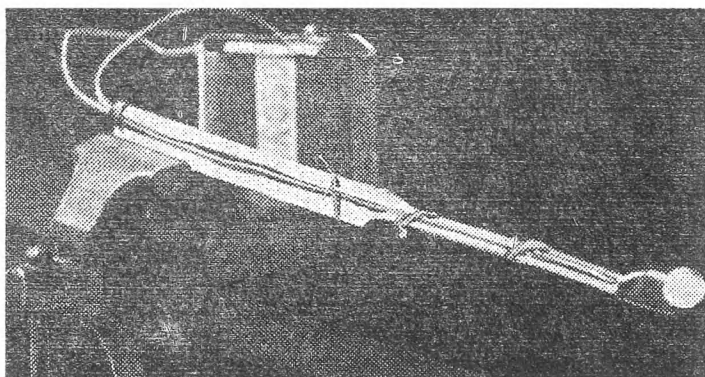


Рис. 93.

Так как частота колебаний зависит от длины линейки, то, меняя соотношения между длинами ее частей, вы будете менять соотношения между частотами взаимно перпендикулярных колебаний конца линейки. При этом получатся различные траектории конца линейки.

Чтобы сфотографировать получающиеся фигуры, к свободному концу надо прикрепить маленькую лампочку от карманного фонарика. Лампочка проводами, протянутыми вдоль линейки, соединяется с батареей (см. рис. 93). Поместив наш сложный маятник в темной комнате, можно сфотографировать колебания линейки. Время экспозиции должно быть достаточно велико. Его вы можете определить, проведя несколько опытов с разной экспозицией. На рис. 94 приведены фотографии, полученные именно таким способом.

Попробуйте провести подобные опыты самостоятельно.

У п р а ж н е н и я.

1. Докажите, что все кривые, описываемые системой уравнений
$$x = A_1 \cos p\omega t, \quad y = A_2 \cos q\omega t,$$
незамкнуты.

2. Получите уравнение кривой $x = A_1 \cos \omega t$, $y = A_2 \cos 2\omega t$.

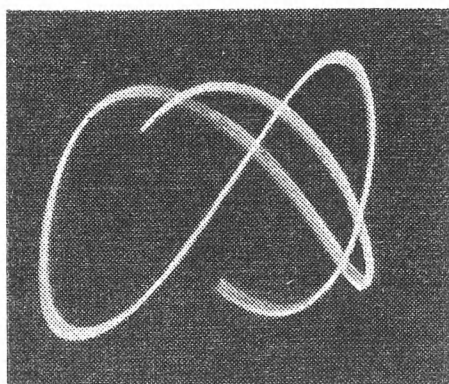
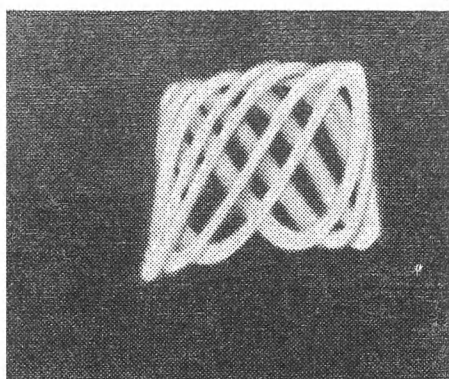
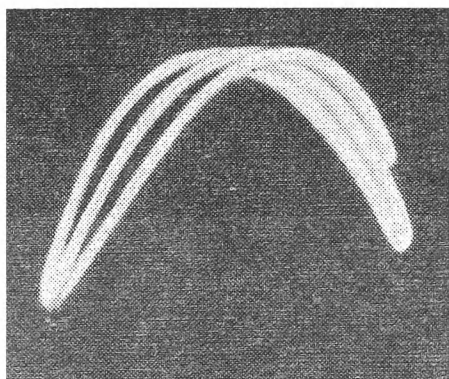


Рис. 94.

ВОЛНЫ В МЕЛКОЙ ТАРЕЛКЕ (ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ)

А. Косоуров

Нет в природе явления более универсального, чем распространение волн. Волны на поверхности воды, звук, свет, радио, передача деформации от одних частей твердого тела к другим — все это волновые процессы. Квантовая механика показывает, что и движением микрочастиц управляют волновые законы. Все эти волны имеют разную физическую природу, разные скорости распространения, разные частоты и длины волн. Но независимо от этого в движении любых волн много общего. Изучив законы распространения волн одной природы, можно большинство из них практически без изменения перенести на волны другого типа. Изучать же волны удобнее всего на поверхности воды.

Что такое волна? Бросьте в пруд камень. На спокойной горизонтальной поверхности пруда возникнут разбегающиеся круги. Точки поверхности воды, до которых дошла волна, начинают колебаться относительно своего равновесного положения. Это положение соответствует горизонтальной поверхности. Чем дальше находится точка от места падения камня, тем с большим запозданием «узнает» она о падении камня. Возмущение распространяется с определенной скоростью. Точки, до которых возмущение дошло одновременно, находятся в одинаковой стадии колебательного движения (в одинаковой фазе).

Для волн любой природы всегда можно указать физические объекты, которые под действием волны испытывают возмущение, т. е. отклонение от своих равновесных значений. Для звука — это периодические повышения и понижения давления. Для радиоволн и света — быстрые изменения напряженности электрического и магнитного полей.

Свойства всех без исключения сред таковы, что возмущение, возникшее в некоторой области, распространяется, передаваясь от точки к точке с конечной скоростью, которая зависит от природы возмущения и свойств среды.

Для возникновения волны необходим источник возмущения, т. е. внешняя причина, вызывающая в некоторой области среды нарушение равновесия. Источник

малого размера, как, например, камень брошенный в воду, излучает в однородной среде (т. е. в такой среде, в которой скорость волны не зависит от направления ее распространения) сферические волны (на поверхности воды — круговые), распространяющиеся по радиусам. Такие источники волн называют точечными.

Один из основных принципов элементарной волновой теории — принцип независимости волн, или принцип суперпозиции. Он утверждает, что возмущение, которое вызывает волна в точке наблюдения, не зависит от того, что через эту точку одновременно проходят другие волны. Принцип суперпозиции дает простое правило для нахождения суммарного действия волн от нескольких источников: суммарное колебание просто равно сумме колебаний, вызываемых каждым источником в отдельности.

Характерная особенность волновых процессов — интерференция волн. Интерференцией называют совокупность явлений, возникающих в среде при распространении волн от двух или нескольких источников, колеблющихся согласованно (синхронно). При этом оказывается, что в некоторых точках среды колебания, вызванные одновременным действием двух источников, будут сильнее или слабее, чем колебания, вызванные каждым источником в отдельности. Может случиться, что согласованные волны вообще погасят одна другую.

Постараемся посмотреть на интерференцию собственными глазами. Искушенный глаз без труда увидит интерференцию при пересечении волн от двух брошенных в пруд камней. Однако для изучения интерференции этот способ не годится. Мы получим устойчивую интерференционную картину водяных волн на лабораторном столе.

Прежде всего необходим сосуд с водой. Чтобы волны, отраженные от его стенок, не маскировали волн, идущих от источников, нужен сосуд с пологими стенками. В этом отношении хороша обыкновенная мелкая тарелка, в которую вода наливается почти до самого верха. Набегая на стенки, волны быстро затухают и почти не отражаются. Генератором волн может служить электрический звонок с отвинченным колпачком. К молоточку звонка прикрепите кусок проволоки, на ее конец наденьте пробковый шарик, который и будет то-

чечным источником волн. Проводя опыты, следите за тем, чтобы провода были хорошо изолированы.

Звонок нужно укрепить над тарелкой так, чтобы поворотом звонка можно было погружать пробковый шарик в воду у края тарелки. Питая звонок лучше всего через автотрансформатор. Это позволит регули-

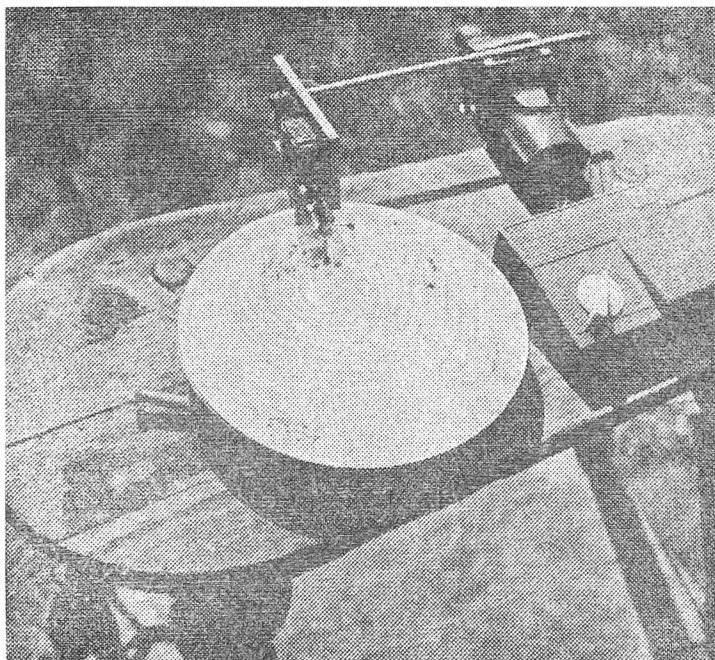


Рис. 95.

ровать амплитуду колебаний. Очень удобен автотрансформатор от детской железной дороги. Подойдет и трансформатор от прибора для выжигания. Включив устройство, мы увидим на поверхности воды круговые волны с расстоянием между соседними горбами — длиной волны — около 1 см (рис. 95).

Наблюдать волны лучше всего по тени на дне тарелки при прямом солнечном свете или свете яркой лампы. Каждая волна, действуя как цилиндрическая

линза, дает на дне тарелки светлую полосу, повторяющую форму фронта волны. Однако волны, бегущие со скоростью около 10 см/с, сливаются для взгляда, фиксированного на неподвижной тарелке. Они видны только вблизи источника, где их амплитуда велика. Чтобы увидеть их на всей поверхности воды, нужно быстро поворачивать голову. Точно так же при быстрых движениях головы можно рассмотреть спицы катящегося колеса. Очень эффектными кажутся волны на матовом стекле фотоаппарата, особенно крупноформатного. Держа камеру в руках и плавно покачивая ее, легко добиться, чтобы волны были видны на всей поверхности. При этом кажется, что они бегут очень медленно. Можно смотреть на отражение поверхности воды и в зеркале. Легкие движения зеркала также делают волны видимыми по всей поверхности. Но удобнее всего наблюдать волны при стробоскопическом освещении. Если освещать установку короткими вспышками света с частотой, равной частоте источника волн, то от одной вспышки до другой волны переместятся на одну длину волны, и волновая картина волн будет казаться неподвижной. Такое освещение чрезвычайно легко осуществить. Достаточно параллельно обмоткам магнита звонка включить небольшую лампочку. С расстояния 0,5—1 м она хорошо и равномерно осветит установку, и неподвижная теневая картина волн будет хорошо видна. Для фотографирования лучше воспользоваться прямым солнечным светом.

Укрепите теперь на молоточке звонка согнутую из проволоки вилку с кусочками пробки на концах. Расстояние между концами вилки 2—3 см. Если концы будут опускаться в воду одновременно, получится два источника волн, колеблющихся не только синхронно, т. е. в такт, но и синфазно, т. е. волны от обоих источников будут возникать в один и тот же момент времени. Картина будет примерно такой, как на рис. 96 (здесь $2d/\lambda=4$). От источников волн веером расходятся области больших амплитуд, разделенные областями «молчания». Центральная область больших амплитуд расположена перпендикулярно линии, соединяющей источники. Как области молчания, так и области больших амплитуд проходят между источниками.

Исследование интерференционной картины с линейкой покажет, что расстояние между двумя максимумами

на линии, соединяющей источники, равно половине расстояния между двумя горбами, т. е. половине длины волны. Если изменить расстояние между источниками, то изменится и число полос большой амплитуды. На рис. 97 отношение $2d/\lambda=2$. Чем больше расстояние между источниками, тем больше «перьев» в нашем веере. Но расстояние между максимумами на линии, соединяющей источники, всегда равно половине длины волны. Поэтому общее число полос с максимальной амплитудой будет вдвое больше, чем число длин волн, укладывающееся на расстоянии между источниками. Отсюда следует, что если расстояние между источниками меньше половины длины волны, то интерференции вообще не будет. Такие источники действуют как один, давая одну систему круговых волн. Это можно увидеть, постепенно уменьшая расстояние между источниками. Обратите внимание еще и на то, что, продолжая в какой-нибудь области больших амплитуд фронт волн, проходящий через горб, мы в соседней области встретим впадину. Другими словами: при переходе через нулевую область фаза волны меняется на половину полного колебания.

Теперь представьте себе, что у нас не два молоточка, а два источника света, излучающих световые волны, и перпендикулярно поверхности воды мы помещаем экран. Мы увидим освещенные места, соответствующие пересечению экрана и областей с большой амплитудой, и темные, не освещенные места. Мы увидим темные и светлые интерференционные полосы. Попробуем объяснить то, что мы сейчас видели.

Нарисуем на листе бумаги обе системы волн так, словно они замерли в какой-то момент (рис. 98). Горбы волн покажем тонкими сплошными линиями, а впадины — пунктирными. Перенумеруем волны, отметив одинаковыми числами те, которые вышли из источников одновременно. Из чертежа видно, что на линию, равноудаленную от источников, одновременно приходят волны, имеющие одинаковые номера. Это и понятно, так как до точек этой прямой волны прошли одинаковые пути. По принципу суперпозиции мы можем заключить, что на этой линии удвоятся как высоты горбов, так и глубины впадин. Результирующие волны отметим толстыми линиями: горбы — сплошными, а впадины — пунктирными. Правее и левее линии 00 лежат точки, в которых

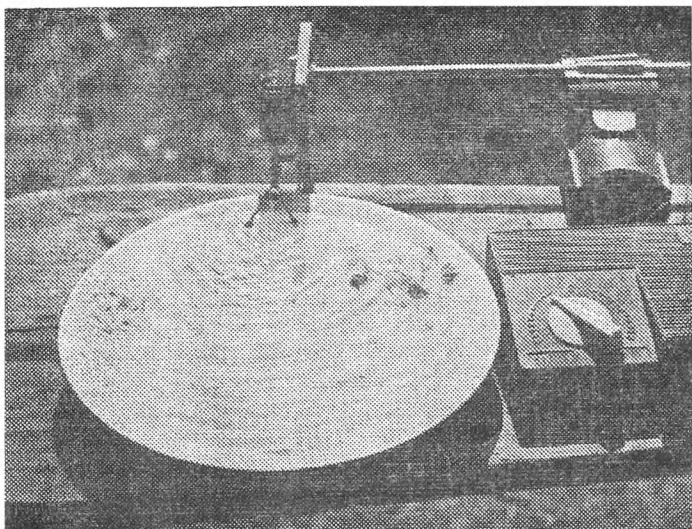


Рис. 96.

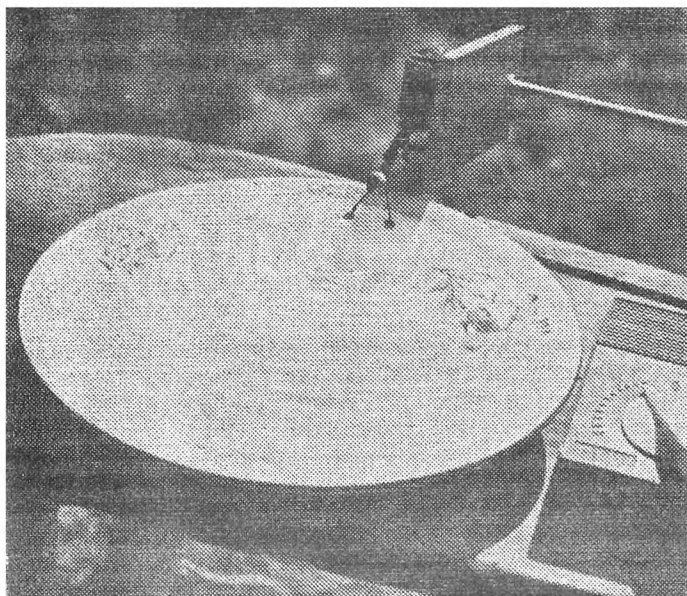


Рис. 97.

горбы одной системы волн совпадут со впадинами другой. В то время как волны от одного источника вызовут в этих точках отклонение вверх, волны от другого в тот же момент вызовут в этих точках отклонение вниз. Суммарное отклонение в этих точках будет близко к нулю. Соединим все такие точки непрерывной линией. Если проследить за нумерацией горбов и впадин, легко

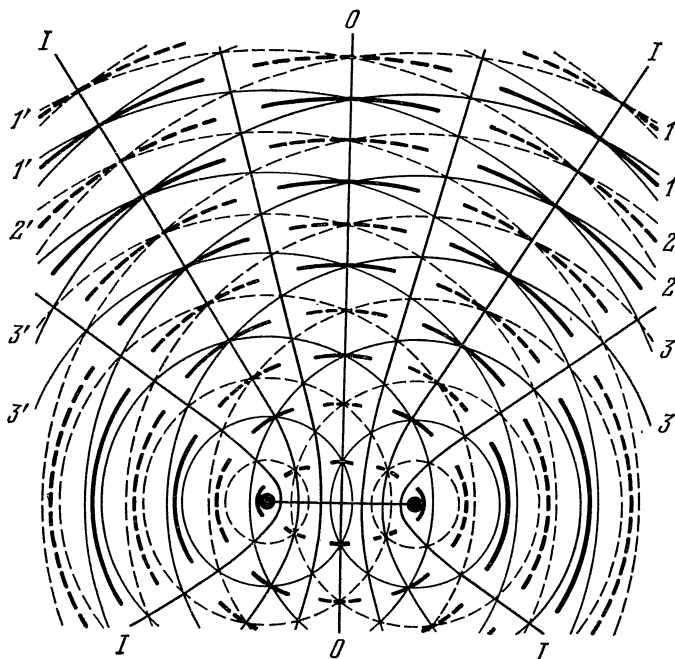


Рис. 98.

заключить, что до всех точек правой линии левые волны проходят путь на половину длины волны бóльший, чем правые. Для левой линии на половину длины волны отстают правые волны.

Справа и слева от нулевых линий лежат точки пересечения первого горба со вторым, второго с третьим и т. д. Легко понять, что это тоже области максимумов. Соединив эти точки, мы получим линию, до точек которой одна система волн отстает от другой на одну длину волны.

Продолжая анализ чертежа, можно найти все нулевые линии и все линии максимумов. Линии, которые мы получили, оказываются гиперболами.

Теперь совершенно ясно, почему расстояние между максимумами на линии, соединяющей источники, равно половине длины волны. Действительно, в среднюю точку этой линии волны приходят в одинаковой фазе и усиливают друг друга. Если сместиться из этой точки на полдлины волны, то путь одной волны увеличится на половину длины волны, а другой — уменьшится на такую же величину. Разность хода между волнами в этой точке (разность путей, пройденных волнами от источников до точки) будет равна одной длине волны, и волны снова будут взаимно усиливаться и т. д. через каждую половину длины волны.

Максимум, соответствующий нулевой разности хода, называют нулевым максимумом или нулевым порядком интерференции. Максимумы с разностью хода в одну длину волны — максимумами первого порядка интерференции и т. д. Максимальный порядок интерференции определяется целым числом, ближайшим к $2d/\lambda$, где d — расстояние между источниками, а λ — длина волны. Теперь попробуйте проанализировать сами с помощью чертежа, а может быть и проверить экспериментально, как изменится картина, если один из источников будет излучать волны с запозданием на половину периода или на какую-нибудь другую его часть. А если сдвиг между колебаниями будет меняться случайным образом? Для экспериментального осуществления волн со сдвигом фаз достаточно сделать концы вилки разной длины.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ *)

К. С т о н г

С различными волнами мы встречаемся повсюду, начиная от гамма-лучей с очень маленькой длиной волны — до огромных волновых перемещений в облаках рассеянной между звездами мелкой пыли. Но так как все волны переносят энергию, то не удивительно, что их поведение во многом одинаково.

*) Переработанный вариант статьи, помещенной в октябрьском номере журнала «Scientific American» за 1962 год.

В однородной среде волны распространяются по прямым линиям с постоянной скоростью, изменяя направление и скорость в тех местах, где изменяются физические свойства среды. Если звуковая волна в атмосфере попадает на твердый объект, например, кирпичную стену, то часть ее отражается (эхо).

Изучение волн одного типа позволяет исследователю узнать, что можно ожидать от волн других типов.

Волновую ванну можно сделать в домашних условиях (рис. 99). Основная ее часть состоит из деревянной

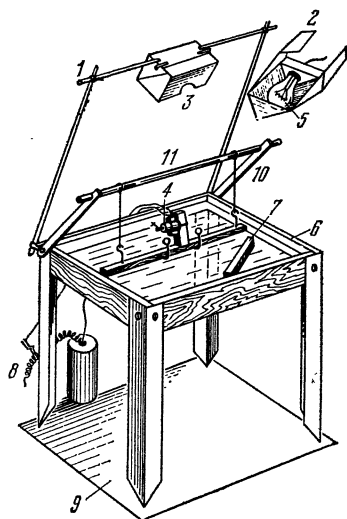


Рис. 99.

рамки 6 со стеклянным дном. Толщина рамки около 5 см, площадь стеклянного дна $\approx 0,2 \text{ м}^2$. Чтобы вода не протекала, дно следует прикрепить к раме мастикой или пластиком. Ванна устанавливается на четырех ножках на высоте около 0,5 м от пола. В качестве источника света для отбрасывания теней от ряби на экран 9, расположенный под стеклом, используется матовая лампа 5 мощностью 100 Вт. Лампу помещают в коробку из огнеупорного картона 2 и устанавливают в держателе 1 на высоте около полуметра над ванной на деревянной раме. В коробке нужно проделать отверстие 3, чтобы получить точечный источник света.

На двух кронштейнах 10 закрепляется деревянная перекладина 11. К этой перекладине на резинках подвешивается брусок, который и служит для возбуждения волн. На бруске укреплен микроэлектромотор — вибратор 4, скорость вращения которого можно изменять, передвигая зажим вдоль стальной спирали 8. Расстояние между бруском и водой можно регулировать изменением положения металлических кронштейнов и укорачиванием или удлинением резиновых подвесов. Для опытов нам понадобится еще парафиновый отражатель 7, который можно поместить в разные точки ванны.

В середине бруска (рис. 100) бельевой прищепкой 3 закрепляется полуторавольтовая батарея для игрушечного мотора. Жестким проводом, согнутым под прямым

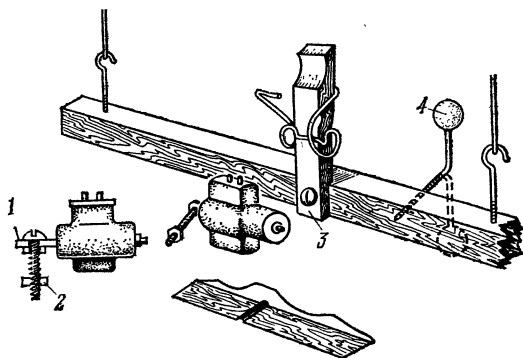


Рис. 100.

углом, к бруску прикреплены несколько бусинок 4 из стекла или пластика; расстояние между ними можно менять, если сделать в бруске отверстия через каждые 5 см. К валу мотора прикреплен винт длиной 2—3 см, выполняющий роль эксцентрического груза. Вал 1 проходит через отверстие, просверленное около головки винта, который жестко крепится гайкой; вторая гайка 2 находится в начале винта. Скорость мотора можно регулировать обычным реостатом, состоящим из тонкой стальной пружины и зажима типа «крокодил». Один конец пружины соединен с батареей, а зажим соединен с одним из выводов мотора. Необходимая скорость подбирается подключением вывода мотора к различным точкам пружины.

По внутреннему краю ванны (рис. 101) проложена мягкая алюминиевая сетка 1, загнутая под прямым углом по всей длине и покрытая одним слоем бинта 2. Такое сочетание бинта и сетки поглощает энергию набегающих волн. Таким образом предотвращается отражение от краев ванны, что могло бы служить помехой.

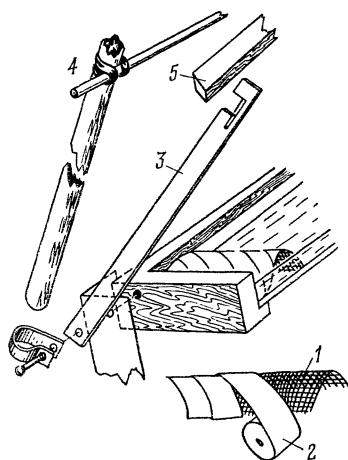


Рис. 101.

На этом рисунке показано также, как к кронштейну 3 крепятся держатель источника света 4 и держатель бруска с моторчиком 5.

Прибор выравнивают, заполняют ванну водой на глубину 2 см, включают лампу, подключают вывод мотора к стальной пружине и устанавливают высоту деревянного бруска так, чтобы один из стеклянных шариков касался воды. Вращение эксцентрического груза заставляет вибрировать прямоугольный кронштейн, а шарик — подниматься и опускаться в воде. Амплитуда волн регулируется изменением положения свободной гайки на крепежном винте. Длина волны, определяемая расстоянием между гребнями соседних волн, изменяется в зависимости от скорости мотора. Контрастность между светом и тенью волновой картинки, проектируемой на экран, регулируется поворотом лампы. Прибор должен иметь по крайней мере два шарика, т. е. два точечных источника волн. Для получения волн с прямыми фронтами (аналога плоских волн, распространяющихся в трехмерных средах) держатель шарика поворачивают вверх, а сам брусок опускают в воду.

Установите прибор так, чтобы он возбуждал плоские волны с расстоянием между гребнями около 5 см. Волны будут расходиться от источника к переднему краю ванны и там поглощаться. Установите лампу так, чтобы контрастность была максимальной. В ванне под углом 45° поставьте парафиновый барьер и посмотрите, как отражаются волны (рис. 102 вверх). В частности, можно

убедиться, что угол θ между направлением распространения волн от источника 1 и линией, перпендикулярной к барьеру 2, равен углу между направлением распространения отраженных волн и тем же перпендикуляром.

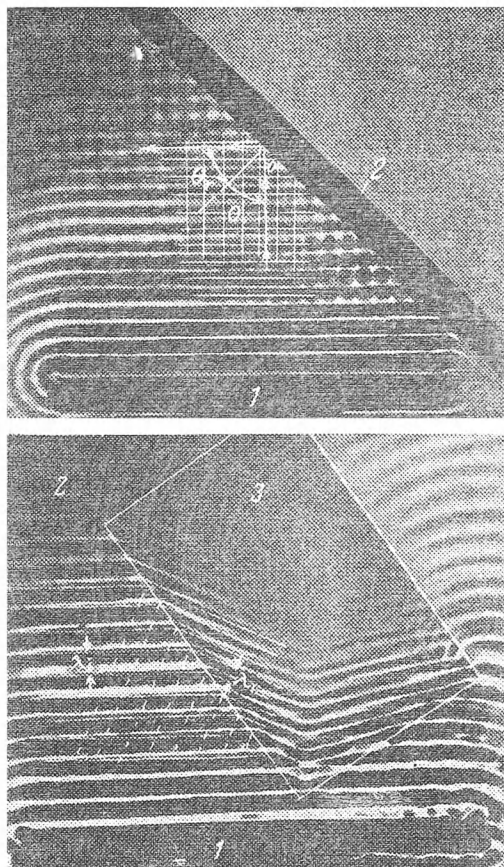


Рис. 102.

Установите барьер под другим углом, меньшим чем 45° , и измените длину волн и амплитуду. Легко убедиться, что при любом расположении барьера угол падения равен углу отражения. Это — закон отражения для волн любого типа.

Замените парафиновый барьер стеклянной пластинкой шириной 15 см и длиной 30 см. Установите ее так, чтобы верхняя поверхность была на расстоянии 1 см от дна ванны. Наполните ванну водой так, чтобы расстояние от стекла до поверхности воды составляло 2—3 мм, и создайте источником 1 ряд плоских волн (рис. 102 внизу). Посмотрите, как замедляются волны при пересечении края стекла и переходе из области глубокой воды 2 в область мелкой воды 1. Из-за изменения скорости волны распространяются в новом направлении над стеклом так же, как шеренга солдат, которая сходит с сухопутного моста на грязную дорогу. В этом опыте волны отклоняются от первоначального направления за счет преломления — явления, наблюдаемого у волн всех типов, когда они попадают под углом из одной среды в другую, в которой распространяются с иной скоростью. Волны на воде отличаются тем, что меняют скорость распространения при изменении глубины среды. Приблизительно можно считать, что отношение скоростей распространения волн в мелкой и глубокой воде пропорционально отношению глубин воды. Это отношение в действительности не что иное, как показатель преломления на границе двух сред. Скорость распространения световых и звуковых волн изменяется в зависимости от плотности среды.

Отражение в месте перехода с глубокой воды на мелкую можно уменьшить, заточив край стекла (рис. 103).



Рис. 103.

Энергию волн можно сфокусировать, рассеять или как-то распределить барьерами различной формы. Это делается параболическими рефлекторами в телескопах, прожекторах, радиолокаторах и даже раковинах оркестра. Фокусировку волн можно воспроизвести в волновой ванне. Сделайте барьер из парафина или резиновой трубки в форме параболы и направьте на него плоские волны. От любой точки барьера отраженные

волны пойдут к одной и той же точке — фокусу параболы. Наоборот, круговая волна, возникающая в фокусе, отражаясь от параболического барьера, становится плоской (рис. 104 сверху). (В этом опыте волна

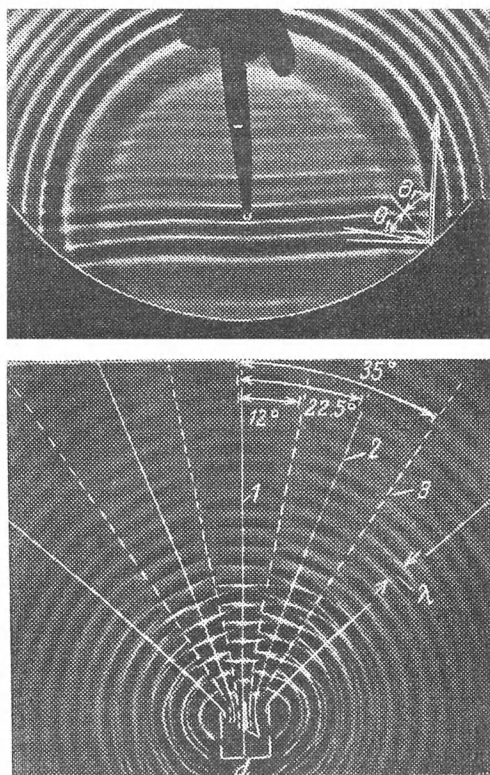


Рис. 104.

создается каплей воды из пипетки, контуры которой видны на фотографии.)

Интерференцию можно воспроизвести в волновой ванне, установив два шарика так, чтобы они касались воды на расстоянии 5 см друг от друга. На рис. 104 внизу приведена типичная картина интерференции волн, создаваемых двумя шариками. Максимум амплитуды

возникает там, где совпадают гребни волн, а узлы — там, где гребни совпадают с впадинами. Легко вычислить углы, при которых возникают максимумы и узлы. Синус угла для максимума равен $n\lambda/d$, где n — номер максимума, центральный максимум, перпендикулярный линии, соединяющей источники, имеет «нулевой» номер, а радиальные максимумы, расположенные по обе стороны от центрального максимума, имеют последовательно номера «первый», «второй», «третий» и т. д., λ — длина волны и d — расстояние между источниками. Аналогично узлы лежат на луче, определяемом уравнением $\sin \theta = \left(m - \frac{1}{2}\right) \lambda/d$. Здесь m — номер узла.

Барьеры не обязательно должны быть сплошными. Решетка из равномерно расположенных штифтов также

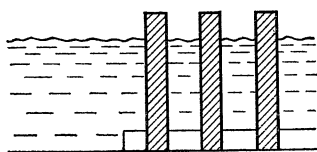


Рис. 105.

отражает волны (рис. 105). Когда плоские волны последовательно наталкиваются на решетку, от каждого штифта расходятся круговые волны, которые интерферируют и снова образуют плоские волны. Направление, соответствующее наибольшей амплитуде

этих волн, составляет с рядами, образующими решетку, угол θ , для которого $\sin \theta = n\lambda/2d$. $\sin \theta_{\max}$ дает направление наибольшей амплитуды волн, n — целое число, λ — длина волны, d — расстояние между соседними рядами решетки (период решетки) (рис. 106). Это соотношение называют формулой Брэгга — Вульфа.

С помощью волновой ванны можно исследовать эффект Доплера. Доплер обнаружил, что повышение тона свистка у быстро приближающегося поезда и смещение цвета движущейся к Земле звезды в сторону синей части спектра — явления одной природы. Оба явления обусловлены тем, что движущиеся источники волн могут догонять, а иногда и перегонять испускаемые ими волны. Чтобы продемонстрировать эффект Доплера в ванне, возьмите небольшую трубочку, которая с помощью мембраны, приводимой в действие соленой-дом, направляет в ванну через равные промежутки времени порции воздуха, одновременно двигаясь по ванне с заданной скоростью. (Можно смонтировать у края ванны несколько участков игрушечной железной

дороги и установить трубочку в игрушечном вагончике.) Когда трубочка перемещается со скоростью, меньшей скорости волн, гребни перед ней располагаются более часто, а позади — более редко.

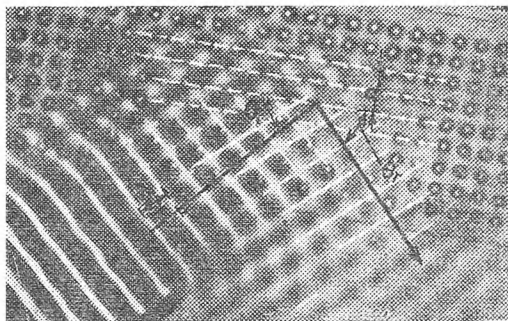


Рис. 106.

Эффект Доплера наблюдается в различного рода волнах, в том числе радиоволнах. Пользуясь сравнительно несложной аппаратурой, можно по радиосигналам искусственного спутника, учитывая эффект Доплера, определить величину и направление скорости спутника.

Все эти эксперименты — лишь немного из того, что можно проделать с помощью несложных приспособлений в волновой ванне. Каждый, кто построит и оборудует такую ванну, убедится, что интересных опытов хватит не на один непогожий день.

ИСКУССТВЕННОЕ СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ *)

Р. В у д

При исследовании солнечной короны желательно иметь искусственную корону со свойствами, как можно более близкими к свойствам настоящей. Приспособление, описанное ниже, предназначено именно для этой цели. Искусственная корона так похожа на настоящую, что это поражает всякого, кто был свидетелем полного солнечного затмения. Сходство настолько

*) Статья была опубликована в журнале «Nature» в 1901 г. Перевод с английского Г. А. Сорокина.

полное, что стоит добавить несколько деталей для того, чтобы чисто эстетически усилить эффект и получить изображение солнечного затмения, которое трудно отличить от подлинного. Отличие состоит лишь в том, что столбы свечения получаются прямыми, а не искривленными, как на фотографиях. Хорошо воспроизводятся зеленовато-голубой цвет неба и характерный жемчужный блеск короны. Искусственное затмение на лекционных демонстрациях дает аудитории яркое представление о красоте явления. Рисунки и фотографии не производят такого впечатления. Каждый, кто смонтирует описанную ниже установку, будет вознагражден красивой картиной солнечного затмения.

Все, что требуется,— это шестисвечевая лампа накаливания и стеклянный резервуар. Размер резервуара не имеет большого значения, для этой цели хорошо подойдет, например, стеклянный аквариум. Резервуар наполняется чистой водой, к которой добавляется ложка или две спиртового раствора зубной пасты. Паста моментально выпадает в осадок, и вода становится похожей на молоко.

Провода, ведущие к лампе, пропускаются через короткую стеклянную трубку. К концу трубки при помощи сургуча прикрепляется лампа (рис. 107). Следует обратить внимание на то, чтобы соединение было

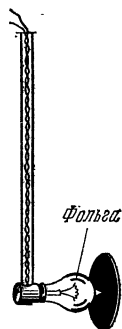


Рис. 107.

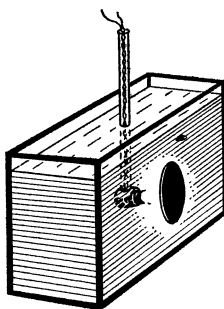


Рис. 108.

плотным, иначе в трубку попадает вода. На лампу наклеиваются пять или шесть полос фольги с промежутками 0,5—1 мм. Толщина полос примерно такая же. Полосы наклеиваются на противоположные стороны

лампы. Проходящие между ними лучи и образуют столбы свечения. Число полос, их ширину и расположение, дающие наилучший эффект, легко определить опытным путем.

К колбе лампы сургучом или любым не растворяющимся в воде клеем прикрепляется металлический диск. Диаметр диска несколько больше диаметра лампы, он закрывает прямой свет от лампы и соответствует темному диску Луны. Вся система опускается в аквариум, причем лампа находится в горизонтальном положении, а металлический диск помещается вблизи лицевого стекла (рис. 108). Неплохо в цепь лампы включить реостат, тогда можно регулировать интенсивность освещения. При включении тока можно увидеть прекрасную корону, вызванную рассеянием света лампы на взвешенных в воде мелких частичках пасты. Несимметричная нить лампы дает неоднородное освещение, и это усиливает эффект. Если столбы свечения слишком резко очерчены или слишком широки, это легко исправить, заменив полоски фольги.

Однако картина затмения еще не совершенна, цвет «неба» слишком светлый и сравнительно яркий. Если добавить в раствор какой-нибудь голубовато-зеленый краситель, «небо» приобретает таинственный цвет и корона выступает более отчетливо. Добавлением краски можно добиться того, что «небо» будет сильно окрашено, и при этом ни в малейшей степени не изменится цвет короны. Это обстоятельство весьма удивительно, так как и цвет «неба» и цвет короны усиливаются одними средствами.

Итак, получено прекрасное воспроизведение около-солнечной атмосферы, корона бледно-золотого цвета с жемчужным блеском, обладающая различной структурой. Видны выступающие туманные столбы свечения, теряющиеся на голубовато-зеленом фоне «неба». Благодаря неоднородному освещению видны не только столбы, но и затемненные области. Эффект усиливается, если глаза полужакрыты.

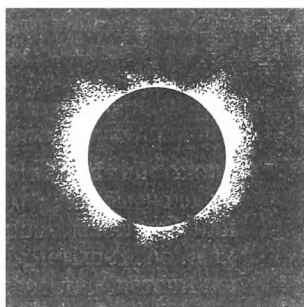


Рис. 109.

Рис. 109 сделан с фотографии одного из таких искусственных затмений. К сожалению, значительная часть тонких деталей, полученных на негативе, при печати утеряна.

НЕ ВЕРЬ ГЛАЗАМ СВОИМ...

Г. К о с о у р о в

Для человека зрение — основной источник информации об окружающем его мире. Мы привыкли абсолютно доверять глазам. Слова «не поверил глазам своим» означают крайнюю степень удивления. В привычных условиях такое доверие вполне оправдано. Глаза вместе с соответствующими отделами мозга составляют тончайший аналитический аппарат, безотказно служащий нам в самых разнообразных условиях: при ярком солнечном свете и когда света совсем мало, в покое и при быстром движении. Изображение, которое получается на сетчатке глаза, представляется нам лишенным каких-либо недостатков. Оно вполне резкое, перспектива правильная, прямые линии представляются прямыми, вокруг предметов нет радужной окраски — хроматической аберрации.

Но не следует думать, что наш глаз действительно является идеальным инструментом. Объективные исследования показывают, что глазу свойственны все недостатки линз. Но наше сознание из несовершенного изображения на сетчатке глаза воссоздает правильное представление об окружающем нас пространстве.

Приведем такой пример. Человек, у которого появилась близорукость, впервые надел очки. Первое время он видит перспективу сильно искаженной. Прямые линии представляются ему искривленными, плоскости — кривыми и покатыми. Иногда это вызывает даже легкое головокружение. Но проходит некоторое время, и человек сквозь очки начинает правильно воспринимать и перспективу и прямолинейность. Мир снова предстает перед его взором в правильном, неискаженном виде, хотя изображение на сетчатке по-прежнему искажено.

В необычных условиях, когда глаза получают противоречивую информацию, когда велики контрасты, когда правильная оценка расстояний, размеров, соотношений затруднена или когда отдельные участки сет-

чатки утомлены продолжительным воздействием какого-либо раздражителя, наше сознание начинает ошибаться. Возникают различные обманы зрения. Вы безусловно сами не раз встречались с различными примерами таких любопытных иллюзий. Мы приведем описание нескольких опытов, показывающих, как ошибаются наши глаза. Делаем мы это не с целью подорвать ваше доверие к зрению, а для того, чтобы показать, какую большую роль в формировании образов играет синтетическая работа мозга.

Для первого опыта, который обычно выдают за доказательство того, что на сетчатке, как и в фотоаппарате, получается перевернутое изображение, необходимы два кусочка картона, например, две открытки. В одной из них проколите толстой иглой отверстие около 0,5 мм и держите его перед глазом на расстоянии 2—3 см, глядя на освещенный пейзаж, светлое небо или лампу. Краем второй открытки перекрывайте постепенно зрачок перед самым глазом, вдвигая открытку снизу. В поле зрения глаза вы увидите тень края открытки, опускающуюся сверху.

Разберем оптическую схему этого опыта подробнее. Пока перед глазом нет открытки с отверстием, все точки поля зрения посылают в глаз лучи через весь зрачок (рис. 110, *а*), и от каждой точки зрачка свет распределяется по всей сетчатке. Если поставить перед глазом

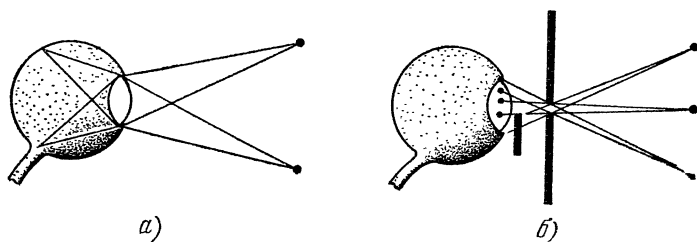


Рис. 110.

открытку с отверстием, каждая точка поля зрения будет изображаться лучами, проходящими через небольшую часть зрачка (рис. 110, *б*). Верхние точки поля зрения изобразятся лучами, проходящими через нижнюю часть зрачка, нижние точки — через верхнюю. Закрывая краем открытки нижнюю часть зрачка, мы затемняем верхнюю часть поля зрения и видим край открытки,

опускающийся сверху. Легко понять, что этот эффектный опыт никак не зависит от хода лучей в глазу и не может служить доказательством перевернутости изображения на сетчатке. Поле зрения уже сформировано до зрачка. В этом легко убедиться, поместив на место глаза матовое стекло.

Второй опыт показывает, как справляется зрение с противоречивой информацией. Сверните из листа бумаги трубку диаметром около 2 см и смотрите через нее одним глазом на расположенные впереди предметы. Перед вторым глазом поместите ладонь руки, держа ее на расстоянии 10—15 см перед лицом, вплотную к трубке. Вы отчетливо увидите дыру в вашей ладони, сквозь которую видны окружающие предметы. Изображение средней части ладони полностью подавлено изображением, которое видит глаз через трубку.

Более тонкий опыт с разной информацией для правого и левого глаза можно провести так. Подвесьте на белой нитке какой-нибудь небольшой светлый предмет. Раскачав получившийся маятник в одной плоскости, смотрите на него с расстояния 2—3 м. Поместите перед одним глазом светофильтр средней плотности любого цвета. Вы увидите, что маятник колеблется не в одной плоскости, а как бы описывает эллипс. Переместите светофильтр к другому глазу, и направление движения маятника по эллипсу изменится на обратное.

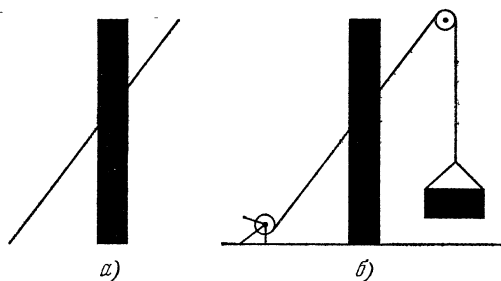


Рис. 111.

Следующий опыт изображен на рис. 111. На рис. 111, *a* показана известная иллюзия излома прямой, пересекающей черную полосу. Но мало кто знает, что достаточно дополнить рисунок лебедкой и поднимаемым грузом (рис. 111, *б*), подсказав тем самым сознанию,

что прямая — это натянутый трос, и иллюзия излома исчезнет.

Последний опыт связан с ситуацией, когда для интерпретации образа сознанию предоставляется возможность выбора. На рис. 112 даны две фотографии части лунного пейзажа в районе Моря Дождей и горного хребта Апеннин. На одной из них вы видите лунные кольцевые горы, а на другой видны кольцевые овраги — рельеф вывернулся. Переверните изображение и обращение рельефа произойдет на другой фотографии. Обратите внимание, что эти фотографии совершенно одинаковы, но одна из них перевернута.

Эффект обращения рельефа часто возникает при наблюдении Луны в телескоп. Космонавты, побывавшие на Луне, столкнулись с реальной трудностью правильного восприятия местности, лишенной воздушной перспективы в условиях большой контрастности пейзажа. Эффекты обращения направления движения можно наблюдать, глядя на силуэт вращающейся антенны радиолокатора. Вам будет казаться, что антенна в некоторые моменты внезапно меняет направление вращения. Раньше это явление рекомендовалось наблюдать на силуэте ветряной мельницы.

Много различных интересных иллюзий связано с восприятием цвета. Обманы зрения — это не просто занятные фокусы. Изучение работы зрительного аппарата в необычных условиях позволяет глубже познать сложные процессы, происходящие в глазу и в нашем сознании при синтезе образов окружающей нас действительности.

Тем, кто захочет более подробно познакомиться с опытами по физиологической оптике, можно рекомендовать книгу Дж. Грегга «Опыты со зрением» (издательство «Мир», Москва, 1970 г.). В этой книге дано описание большого количества элементарных опытов по исследованию работы глаза. Все они вполне доступны школьникам, и большая часть их весьма поучительна. Следует только предупредить читателя, что в тех местах, где автор касается физической оптики, язык книги становится весьма далеким от научного.

В библиотеке вы, вероятно, найдете также книгу М. Миннарта «Свет и цвет в природе» (М.: Наука, 1969 г.) и книгу И. Д. Артамонова «Иллюзии зрения» (М.: Наука, 1969 г.).

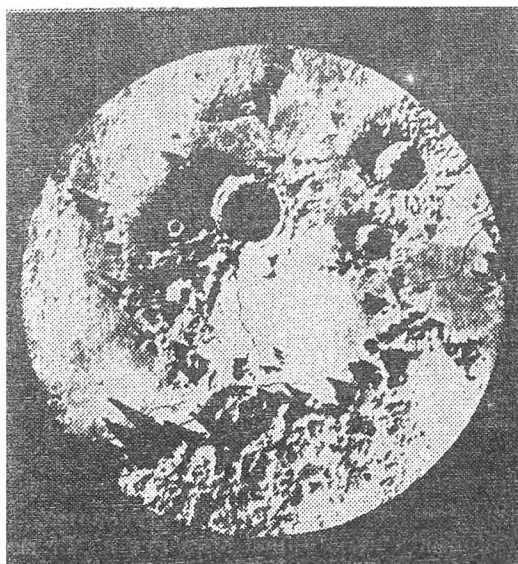
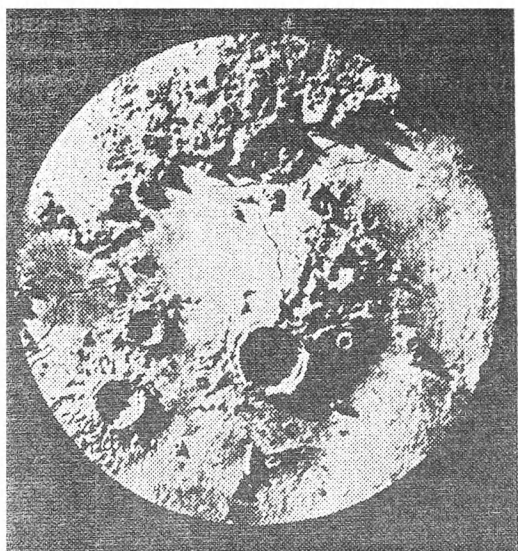


Рис. 112.

ЦВЕТНЫЕ ТЕНИ

Б. К о г а н

ЗЕЛЕНАЯ ТЕНЬ

В комнате, освещенной обычным белым светом, зажгите настольную лампу, предварительно ввернув в ее патрон красную лампочку. Положите на стол лист белой бумаги и поместите между ним и лампой какой-нибудь небольшой предмет, например, карандаш. На листе бумаги появится его тень, но она будет совершенно неожиданной по цвету — не черной и не серой, а ... *зеленой*.

Этот эффект, видимо, связан не только и не столько с физикой, сколько с физиологией и психологией. Тень от предмета кажется нам зеленой вследствие контраста с окружающим фоном, который, будучи на самом деле красноватым, ощущается нами как белый, ибо мы знаем, что бумага белая. Видимо, отсутствие красного цвета на участке, занятом тенью, наше сознание воспринимает как наличие зеленого цвета на этом участке. Но почему именно зеленого?

Дело в том, что красный и зеленый цвета являются *дополнительными*. Так называют цвета, дополняющие друг друга до белого. А что это означает? Еще в XVII веке Ньютон обнаружил, что белый солнечный свет является сложным, представляет собой совокупность простых цветов — фиолетового, синего, голубого, зеленого, желтого, оранжевого и красного. В этом можно убедиться, например, с помощью стеклянной призмы. Если солнечный свет пропустить через узкую щель и направить на призму, то получится *разноцветное изображение* этой щели. Ньютон проводил и другие опыты: «собирал» вместе все цвета (например, с помощью линзы) и в результате вновь получал белый цвет. При этом оказывается, что, если «задержать» какой-нибудь цвет, скажем, зеленый, то изображение щели становится цветным, и притом красным. Или, если «задержать» желтый цвет, изображение щели получится синим и т. д. Именно в этом смысле зеленый и красный, желтый и синий и т. п. цвета называются *дополнительными*.

Этот интересный опыт можно проводить и с лампочками других цветов. Так, если лампочка будет зеленой,

то тень станет красной. Если лампочка будет синей, то тень получится желтой, а если лампочка будет желтой, тень окажется синей. Вообще цвет тени всегда получается дополнительным к цвету лампочки.

Описанное явление можно часто наблюдать зимой вблизи газосветных городских вывесок. Когда на земле лежит снег, на нем ясно видны тени, цвет которых дополнителен к цвету светящейся вывески.

КРАСНЫЕ ЛИСТЬЯ

Погасите в комнате свет и зажгите лампу, предварительно поменяв в ней обычную лампочку на синюю. Посмотрите при свете этой лампочки на листья растений: зеленые листья, освещенные синим светом, кажутся не зелеными и не синими, а ... *красными*. В чем же дело? Оказывается, стекло синей лампочки пропускает не только синий, но частично и красный свет. Вместе с тем, листья растений отражают не только зеленый свет, но отчасти и красный, поглощая другие цвета. Поэтому когда на листья падает свет от синей лампочки, они отражают *только красный свет* и, следовательно, кажутся нам красными.

Описанный эффект можно получить и иначе: посмотрите на листья растений через синие очки или через синий светофильтр. Рассказывая об опыте с такими очками, известный советский ученый К. А. Тимирязев писал: «Стоит их только надеть, и весь мир представляется в «розовом свете». Под ясным синим небом разворачивается фантастический ландшафт с кораллово-красными лугами и лесами ...».

КАКОГО ЦВЕТА ЗЕЛЕНКА?

Е. П а л ь ч и к о в

Та самая зеленка, которой смазывают мелкие раны и царапины? Многие, наверное, скажут, что зеленого (и будут правы!).

Но посмотрите сквозь пузырек с зеленкой на какой-нибудь яркий источник света — например, на Солнце, нить лампочки накаливания или на дуговой разряд. Вы увидите, что зеленка пропускает только красный свет. Получается, что зеленка красного цвета?

Возьмите несколько кювет разной толщины или тонкостенные стеклянные стаканчики, налейте в них раствор зеленки *) и посмотрите на просвет. Тонкие слои раствора имеют, действительно, зеленый цвет, более толстые приобретают неопределенную серую окраску (с пурпурным оттенком), а еще более толстые кажутся красными. Иными словами, цвет зависит от толщины слоя раствора. Как это можно объяснить?

Оказывается, спектр пропускания тонкого слоя зеленки имеет в видимой области две полосы прозрачности: широкую сине-зеленую и узкую красную (рис. 113).

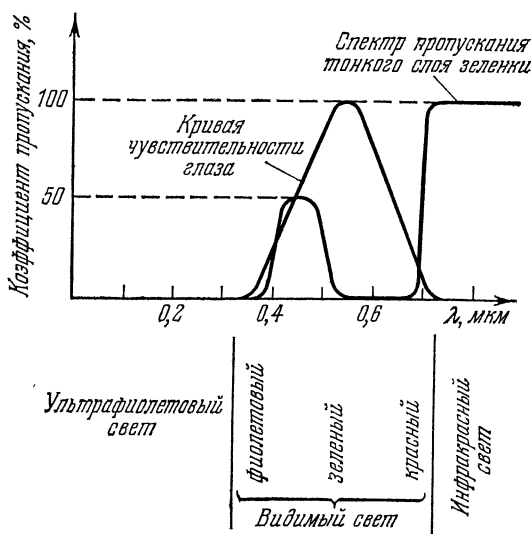


Рис. 113.

На самом деле красная полоса не узкая, а простирается дальше в инфракрасную область, но глаз человека из этой широкой полосы видит только маленький кусочек, попадающий в область видимого света. В красном участке поглощение мало по сравнению с сине-зеленым (коэффициент пропускания для красного света существенно больше, чем для сине-зеленого). Но сине-зеленая полоса шире красной и расположена в том участке спектра,

*) Зеленку желательно разбавить, иначе придется брать очень тонкие кюветы.

где глаз имеет высокую чувствительность. Поэтому раствор зеленки в тонком слое будет казаться зеленым.

Увеличим толщину слоя зеленки в два раза или, что то же самое, расположим последовательно друг за другом два одинаковых слоя. Как изменится коэффициент пропускания света? Очевидно, уменьшится. Чтобы получить его новое значение, надо перемножить коэффициенты пропускания первого слоя и второго такого же слоя. Другими словами, коэффициент пропускания для одного слоя надо возвести в квадрат. При этом для сине-зеленой полосы коэффициент пропускания уменьшится очень сильно, а для красной полосы останется почти неизменным.

На рис. 114 показано, как изменяются коэффициенты пропускания красной и сине-зеленой полос при после-

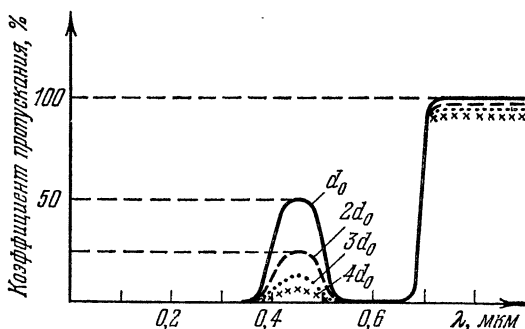


Рис. 114.

довательном увеличении толщины слоя зеленки. Ясно, что доля сине-зеленого света становится все меньшей и меньшей по сравнению с долей красного света. Начиная с некоторой определенной толщины, раствор зеленки на просвет будет не зеленым, а красным.

Так какого же цвета зеленка на самом деле?

ОРАНЖЕВОЕ НЕБО

Г. Косоуров

Мы предлагаем читателю несколько опытов по цветовому зрению. Все они связаны с различными цветовыми иллюзиями, вызванными необычными условиями работы глаза или его цветовым утомлением.

Механизм восприятия цветов глазом очень сложен и до конца еще не изучен. Известно, что сетчатка глаза содержит два рода светочувствительных клеток, которые носят названия палочек и колбочек. В палочках содержится фотохимически чувствительный пигмент — зрительный пурпур, или родопсин. Под действием света родопсин обесцвечивается и действует на нервные волокна, передающие возбуждение в мозг. При ярком свете он обесцвечивается полностью и палочки слепнут. В темноте идет обратный процесс — восстановление зрительного пурпура. Палочковое, сумеречное зрение обладает очень большой чувствительностью, но оно ахроматично. Палочки не чувствуют цвета. При достаточно большой яркости вступает в силу колбочковый механизм зрения. Колбочковое зрение цветочувствительно. Есть много убедительных опытов, приводящих к выводу, что колбочки содержат фотохимически чувствительные пигменты трех сортов с максимумом чувствительности в красной, зеленой и синей областях спектра. Различная степень выцветания всех трех пигментов дает в нашем сознании ощущение цвета и позволяет видеть мир во всем разнообразии красок, оттенков, полутонов и переходов.

На трехцветной природе цветового зрения основано воспроизведение цветов в кино, в телевидении, в цветной фотографии и в полиграфии. Методы количественного измерения цветов также основаны на трехцветном принципе.

Однако ощущение цвета можно вызвать не только красками, но и, например, прерывистым освещением. Перечертите тушью на чертежную бумагу черно-белые круги, показанные на рис. 115, *a* — *г*. Достаточно, чтобы круги имели диаметр 8—12 см. Вырежьте диски и приведите их в не очень быстрое вращение, примерно 1—3 оборота в секунду. Для этого можно надеть их на ось наматывателя кинопроектора, проигрывателя, магнитофона или просто сделать из дисков волчки. Вместо черных дуг вы увидите цветные окружности. Окраска зависит от скорости вращения, освещенности и характера рисунка. Например, у диска на рис. 115, *a* дуги, следующие за черным сектором (по направлению вращения), при слабом освещении кажутся красными, а при ярком — желтыми. При некоторой скорости вращения и ярком освещении черные секторы кажутся

синими. Полного объяснения этому явлению пока еще нет.

Краски различаются не только цветом, но и насыщенностью. Если постепенно добавлять к красной краске

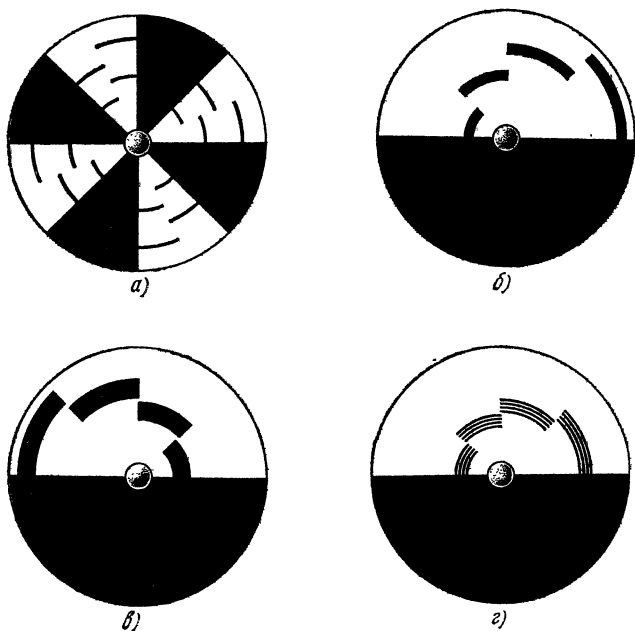


Рис. 115.

белила, цвет будет становиться все более розовым. На картинах и тем более на типографских копиях с картин трудно получить насыщенные тона и большие градации яркости. Отношение яркости самой белой краски к яркости самой черной едва достигает ста, а в природе мы имеем дело с различием в яркости во много тысяч раз. Поэтому копии с картин кажутся слишком бледными либо, наоборот, слишком темными. Это нарушает один из элементов восприятия объемности — воздушную перспективу. Изображение пейзажа или жанровой сцены выглядит плоским. Значительно шире диапазон передаваемых яркостей при проекции на экран диа-

позитивов. Именно поэтому так выразительны и объемны фотографии на цветной обратной пленке — слайды.

Восприятие картины можно значительно улучшить, освещая ее специальным образом. Возьмите цветную вклейку из «Огонька», сфотографируйте ее и отпечатайте контактным способом с пленки на пленку контрастный черно-белый диапозитив. Вставьте диапозитив в проектор с большим световым потоком (подойдет проектор типа «Свет») и спроектируйте диапозитив на оригинал так, чтобы контуры проекции и оригинала точно совпадали. Результат не заставит вас пожалеть о затраченном труде. Картина оживет, приобретет объемность и особую выразительность. Выключите проектор, и вы убедитесь, насколько тускла и невыразительна картина при равномерном освещении.

Следующие опыты относятся к так называемым последовательным цветовым образам. Это явление связано с тем, что полное восстановление цветочувствительного пигмента — процесс сравнительно медленный. Если продолжительное время смотреть на одноцветный рисунок, а потом перевести взгляд на белую бумагу, стену или потолок, то белый цвет будет восприниматься так, как будто в нем недостает цвета, утомившего глаз. На белой поверхности будет виден тот же рисунок, но окрашенный в цвет, который называют дополнительным. Вырежьте из цветной бумаги красный, оранжевый, желтый, зеленый, синий и фиолетовый квадратики размером 2×2 см. Положите один из цветных квадратиков перед собой на лист белой бумаги и смотрите на него, не напрягая глаз, секунд тридцать. Смотреть надо, как говорят, в одну точку, чтобы изображение квадрата не перемещалось по сетчатке. Переведите взгляд на белое поле, и через секунду — две вы увидите на бумаге четкое изображение квадрата в дополнительном цвете. Так вы узнаете, что дополнительным к красному цвету является зеленый, к синему — оранжевый, а к желтому — фиолетовый. Каждая пара дополнительных цветов в смеси должна давать белый или серый ахроматический цвет.

Для смешения дополнительных цветов положите рядом два «дополнительных» квадратика (например, красный и зеленый) и поставьте между ними стеклянную пластинку (рис. 116). Расположите глаз так, чтобы один квадратик видеть сквозь стекло, а другой — отраженным в стекле. Меняя наклон стекла и тем самым

соотношение между световыми потоками, идущими от квадратов, можно добиться того, что окраска в месте перекрытия изображений почти исчезнет. Для полной ахроматизации изображения нужен точный подбор цветов. Чаще всего получается бурая окраска. Но если

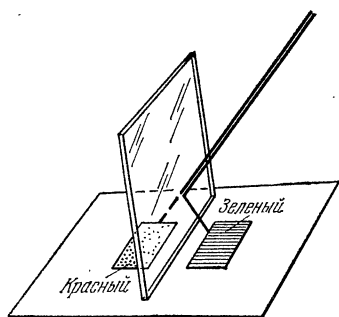


Рис. 116.

взять два явно не дополнительных цвета, например, зеленый и желтый или красный и фиолетовый, яркая окраска получится при любой их смеси. Еще более яркие цветовые образы возникают, если квадратики класть не на белую бумагу, а на дополнительный фон.

Самую поразительную и самую непонятную цветовую иллюзию дает наш последний опыт. Мы уже говорили, что в основе

воспроизведения цветов лежит трехцветная система. Если три раза сфотографировать одну и ту же сцену через три светофильтра: красный, зеленый и синий — и, отпечатав позитивные копии, спроектировать их тремя проекторами на одно и то же место экрана через те же светофильтры, то на экране появится цветное изображение с правильной передачей цветов. При этом светофильтры должны быть подобраны так, чтобы в сумме они давали белый цвет. Можно ограничиться двумя фотографиями через два дополнительных светофильтра, например, красный и зеленый. При этом тоже получается хорошая цветопередача, хотя и не столь совершенная, как в трехцветном способе. Но, оказывается, при проекции можно ограничиться и одним цветным светофильтром.

Снимите одну и ту же цветную сцену, не перемещая аппарат, два раза на панхроматическую пленку через красный и зеленый светофильтры. В точном подборе светофильтров нет необходимости. Вполне подойдут светофильтры из школьного набора. Контактным способом отпечатайте на пленку позитивные копии. Полученные диапозитивы вставьте в два проектора и спроектируйте диапозитивы на экран так, чтобы контуры изображений точно совпали. Перед объективом проектора, в который

вставлен диапозитив, снятый через красный фильтр, поставьте красный светофильтр, а второе изображение оставьте черно-белым (рис. 117). Вы увидите *цветное* изображение во всем богатстве красок, несмотря на то, что проектируете вы только красное и черно-белое изображения с разным распределением света и тени.

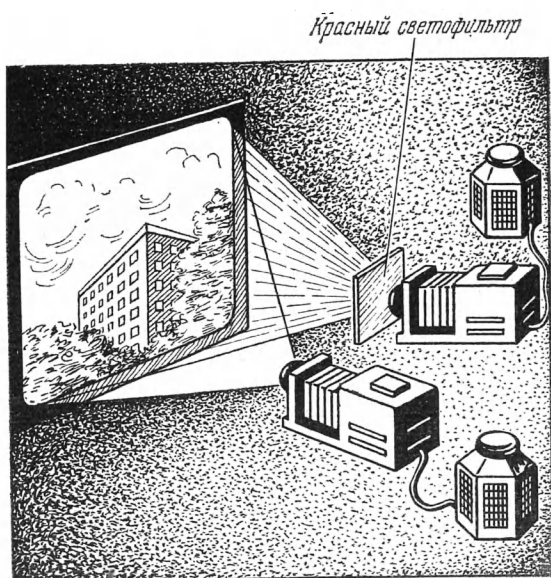


Рис. 117.

Любые объективные исследования света, отраженного разными местами экрана, дадут только красный цвет различной степени чистоты или насыщенности. Ощущение цветов в данном случае чисто субъективное. Проекторы лучше включать через автотрансформаторы, чтобы можно было независимо регулировать освещенность, даваемую на экран каждым из них. Как правило, ощущение наиболее правильной цветопередачи возникает при небольшой освещенности экрана.

Таким образом, простое и очевидное полно тайн и загадок.

ЗЕЛЕНАЯ КРАСНАЯ ЛАМПА

В. М а й е р

В замечательной книге У. Брэгга «Мир света. Мир звука» *) описан красивый опыт, демонстрирующий одно любопытное свойство глаза. Опыт этот настолько прост, что каждый из вас без особых затруднений может повторить его у себя дома.

Прибор для постановки опыта (рис. 118) можно собрать из деталей механического конструктора. На

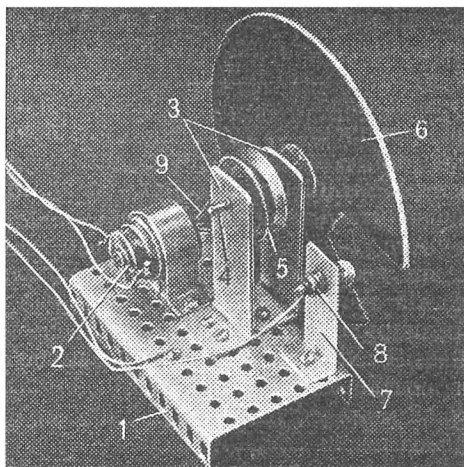


Рис. 118.

алюминиевом основании 1 размером $15 \times 60 \times 110$ мм скобой из жести или алюминия закрепите микроэлектродвигатель 2. В отверстия двух стоек 3 высотой примерно 60 мм вставьте вал 4 со шкивом 5 внутренним диаметром 15—25 мм. К торцу вала предварительно должен быть прикреплен картонный диск 6 диаметром 100—140 мм (если вал с резьбой, диск можно закрепить двумя гайками с шайбами). На основании прибора расположите алюминиевую стойку 7 с отверстием для лампочки 8. Наденьте на вал микроэлектродвигателя и шкив рези-

*) У. Б р э г г. Мир света. Мир звука.— М.: Наука, 1967.

новое кольцо 9. Двигатель подключите к одной или двум последовательно соединенным батарейкам карманного фонаря. По рекомендации Брэгга диск должен вращаться со скоростью 2—3 оборота в секунду. Скорость вращения диска в некоторых пределах можно регулировать, при- тормаживая шкив пальцем.

После предварительного испытания подготовьте прибор для опыта. В картонном диске вырежьте сектор с дугой примерно 45° и оклейте одну половину оставшегося сектора белой бумагой, а другую — черной (рис. 119). Стекло́нный баллон лампочки карманного фонаря,

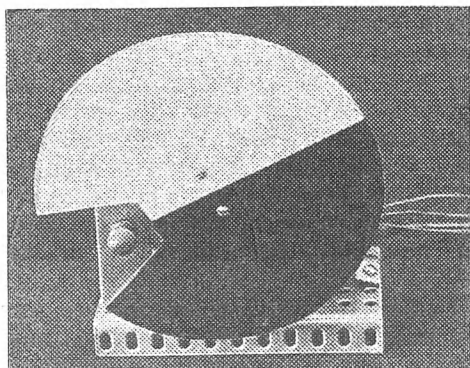


Рис. 119.

рассчитанной на напряжение 3,5 В, покройте красной нитроэмалью (можно попробовать использовать лак для ногтей). Когда краска высохнет, вверните лампочку в отверстие стойки прибора и подключите к ее электродам проводники. Перед диском на расстоянии 20—50 см от него расположите настольную лампу так, чтобы свет от нее падал на диск. Подсоедините лампочку к батарее и включите микроэлектродвигатель.

Если направление вращения диска такое, что при каждом обороте лампочку сначала перекрывает черная часть диска, то при любых освещенностях и скоростях вращения лампочка выглядит красной. Если, поменяв полярность источника питания, изменить направление вращения, т. е. заставить крутиться диск так, чтобы

лампочку перекрывала сначала его белая часть, то лампочка будет ... зеленой или сине-зеленой! Если условия эксперимента (скорость вращения диска, краска, которой покрыта лампочка) подобраны недостаточно хорошо, лампочка выглядит не сине-зеленой, а светло-голубой с белесоватым оттенком.

Попробуем объяснить результат опыта. Диск вращается быстро, и когда прорезь в нем оказывается перед красной лампочкой, на сетчатке глаза на мгновение получается красное изображение лампочки. Если при дальнейшем вращении диска лампочку перекрывает его белая половина, то на сетчатку глаза попадает рассеянный белый свет настольной лампы. Белый цвет действует на сетчатку в течение более длительного промежутка времени, чем красный цвет. После того как перед глазом прокрутится черная половина диска, процесс повторяется и лампочка воспринимается сине-зеленой.

Если «смешать» сине-зеленый цвет и красный цвет, то получится белый цвет. Эти цвета называют дополнительными (сине-зеленый цвет дополнителен красному и наоборот). Таким образом, в опыте глаз вместо истинного цвета лампочки воспринимает дополнительный ему цвет.

Можно высказать предположение, что при кратковременном освещении сетчатки красным светом сетчатка в дальнейшем лучше реагирует на все другие спектральные составляющие белого света. Она как бы «утомляется» красным светом и когда освещается белым светом, то воспринимает его без «красной компоненты», т. е. только дополнительный красному — сине-зеленый свет. Поскольку время освещения сетчатки белым светом значительно больше времени освещения красным светом, лампочка выглядит сине-зеленой, а не красной.

Это предположение подтверждает результат опыта, в котором диск вращается в обратную сторону — так, что лампочку перекрывает сначала его черная половина. Действительно, область сетчатки, где получается красное изображение лампочки, за время, в течение которого перед глазом находится черная часть диска, успевает «отдохнуть». Поэтому, когда перед глазом оказывается белая половина диска, все цвета, входящие в состав белого света, воспринимаются глазом одинаково хорошо. Так как красный свет воздействует на сетчатку более длительное время, чем остальные компоненты белого

света (сначала воздействует красная компонента белого света, а затем — красный свет лампочки), то лампочка выглядит красной.

КАК С ПОМОЩЬЮ ПРОВОЛОКИ ИЗМЕРИТЬ ДЛИНУ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

Н. Ростовцев

На пути света, идущего от точечного источника, непосредственно перед глазом Γ (на расстоянии 2—3 мм от него) поместим тонкую проволоку Π диаметром 0,05—0,12 мм, расположенную вертикально (рис. 120). Тогда слева и справа от источника света мы

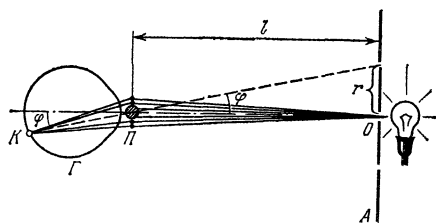


Рис. 120.

увидим узкую светлую полоску. Она возникает вследствие дифракции света, поэтому будем называть ее дифракционной полоской. Роль точечного источника света при этих наблюдениях может играть малое отверстие O в ширме A , установленной перед лампочкой, или лампочка от карманного фонаря, отстоящая от места наблюдения на расстоянии 1—1,5 м. Проволоку Π можно заменить тонкой нитью или волосом.

При внимательном рассмотрении дифракционной полоски в ее середине виден белый участок с красноватыми краями — нулевой максимум; с обеих сторон он ограничен узкими темными промежутками — первыми минимумами. Затем идут цветные участки, в которых при удалении от центра полоски зеленовато-голубая окраска постепенно переходит в красную. За красным краем этих участков опять следуют темные промежутки — вторые минимумы. Далее картина повторяется с той лишь разницей, что минимумы просматриваются все хуже, и в конце концов светлые участки сливаются

в сплошную полосу. Наблюдения, проведенные с проволокой разного диаметра, показывают, что расстояние между двумя соседними минимумами тем больше, чем меньше диаметр проволоки.

Представляет интерес и другое наблюдение. Проволоку, с помощью которой мы только что наблюдали дифракцию, осторожно зажмем между губками штангенциркуля и сейчас же вытянем ее из губок. Тогда ширина щели между губками будет равна толщине проволоки. Через эту щель с того же расстояния, как и при наблюдении дифракции от проволоки, посмотрим на освещенное отверстие *O*. По обе стороны от него мы увидим дифракционную полосу с точно такими же расстояниями между минимумами и максимумами, как и при дифракции от проволоки. Это наблюдение является прекрасной иллюстрацией к теореме Бабиня, согласно которой дифракционные картины от экрана и равного ему по ширине отверстия совершенно одинаковы вне области прямого пучка.

Теперь кусок проволоки, с которой проводились наблюдения дифракционной полосы, скомкаем в моток, имеющий форму диска диаметром с копеечную монету. Для этого достаточно взять проволоку длиной 2—3 м. Поместим получившийся моток перед глазом и посмотрим на точечный источник света. Тогда мы увидим венцы — центральный белый круг с красноватыми краями, окруженный цветными кольцами. Венцы отделяются друг от друга узкими темными кольцами — минимумами. Каждое темное кольцо следует за красным краем предыдущего венца. Причем, если расстояние до источника то же, что и при наблюдении дифракции от проволоки, диаметры темных колец оказываются равными расстояниям между соответствующими минимумами дифракционной полосы. Венцы видны тем лучше, чем меньше диаметр проволоки.

Почему же возникают венцы при помещении мотка проволоки на пути лучей, идущих от точечного источника света? Каждый малый участок проволоки, находящийся перед глазом, дает свою дифракционную полосу, расположенную симметрично относительно источника света. Вследствие различной ориентации участков проволоки в мотке различные направления имеют и возникающие от них дифракционные полосы, причем все они пересекаются в одной точке, совпадающей с

источником света. Толщина всех участков проволоки одинакова, поэтому минимумы одного и того же порядка располагаются во всех дифракционных полосках на одинаковом расстоянии от источника света и сливаются в темные кольца. Цветные участки, заключенные между минимумами, сливаются при этом в цветные кольца.

Найдем теперь условия возникновения минимумов при дифракции от проволоки толщиной d и щели такой же ширины. Учитывая тот факт, что расстояния между минимумами в том и другом случаях одинаковы, достаточно провести расчет или для проволоки или для щели. С целью упрощения проведем расчет для щели.

Рассмотрим волны, которые не меняют своего направления после прохождения через щель (на рис. 121

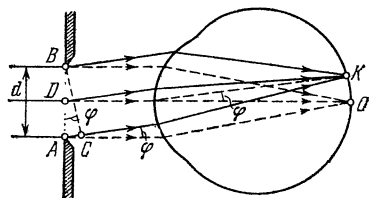


Рис. 121.

они изображены штриховыми линиями). Глаз сводит их на сетчатку в точку O . Волны от всех точек щели в этом месте усиливают друг друга, так как они попадают в глаз без разности хода и в точке O имеют одинаковые фазы. Поэтому в окрестности точки O образуется нулевой максимум.

Волны, которые дифрагируют под углом φ к первоначальному направлению, глаз сводит в точку K , где при наложении они интерферируют. Результат интерференции зависит от разности хода между лучами, исходящими из крайних точек щели A и B . Проведем отрезок BC перпендикулярно лучу, выходящему из точки A . Образовавшийся отрезок AC равен разности хода между крайними лучами. Из рисунка следует, что $AC = d \sin \varphi$, где d — ширина щели.

Расчеты показывают, что при дифракции от прямоугольной щели минимумы наблюдаются, когда разность хода волн от крайних точек щели

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (1)$$

где λ — длина световой волны, k — номер (порядок) минимума ($k=1, 2, 3, \dots$).

Покажем справедливость формулы (1) для первого минимума, т. е. для $k=1$. Пусть вторичные волны от всех точек щели распространяются под таким углом φ , что выполняется условие

$$d \sin \varphi = \lambda. \quad (2)$$

Мысленно разобьем щель на две параллельные прямоугольные полоски (зоны) AD и DB одинаковой ширины $d/2$. В силу условия (2) разность хода между лучами, выходящими из точек A и D , равна $\lambda/2$. Такая же разность хода $\lambda/2$ в этом случае будет и между лучами, выходящими из любых двух точек щели, которые отстоят друг от друга на расстоянии $d/2$. Волны с разностью хода $\lambda/2$ при наложении гасят друг друга, поэтому при выполнении условия (2) все волны от зоны AD погасят волны от зоны DB и в точке K будет наблюдаться первый минимум.

Таким же способом можно показать, что следующий (второй) минимум будет наблюдаться при выполнении условия $d \sin \varphi = 2\lambda$. В этом случае щель следует разбить на четыре равных зоны. Разность хода между волнами от первой и второй, и от третьей и четвертой зон будет равна $\lambda/2$. Поэтому волна от первой зоны погасит волну от второй зоны, а волна от третьей — волну от четвертой зоны, и в месте наложения этих волн на сетчатке будет наблюдаться второй минимум.

Из формулы (1) следует, что длину световой волны можно определить по формуле

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k}. \quad (3)$$

Измерения λ значительно упрощаются, если использовать простейшее измерительное устройство, называемое эриометром. Для изготовления эриометра берут квадратный кусок картона со стороной 10—15 см и в его середине проводят окружность радиусом $r=20$ —30 мм. В центре окружности прокалывают отверстие диаметром 2—3 мм, а вдоль окружности прокалывают 6—8 отверстий меньшего диаметра.

При измерениях эриометр A устанавливают непосредственно перед лампочкой накаливания. Отойдя от эриометра на расстояние 1—2 м, находят такое поло-

жение, при котором через отверстие O в глаз наблюдателя попадают лучи, идущие непосредственно от одного из участков раскаленной нити. Затем перед глазом помещают моток проволоки и добиваются хорошего видения венцов, перемещая моток в направлении, перпендикулярном лучам. Изменяя расстояние между эриометром и глазом, находят положение, при котором окружность эриометра с отверстиями совпадает с серединой темного кольца с номером k (на рис. 120 изображен случай, когда $k=2$).

Как видно из рис. 120, тангенс угла дифракции φ для темного кольца подсчитывается по формуле $\operatorname{tg} \varphi = r/l$, где r — радиус окружности эриометра, l — расстояние от эриометра до мотка проволоки. При малых углах дифракции, с которыми приходится иметь дело при таких измерениях, справедливо соотношение

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{r}{l}.$$

Подставляя значение $\sin \varphi$ в выражение (1), получаем формулу для определения длины волны:

$$\lambda = \frac{rd}{kl}. \quad (4)$$

Радиус окружности эриометра r нам заранее известен. Расстояние l легко измерить. Номер темного кольца k определяется при наблюдении венцов. Диаметр проволоки d , если он не известен, измеряют микрометром.

Если измерения производят в белом свете, то по формуле (4) находят эффективную длину световой волны, к которой наиболее чувствителен наш глаз. Она приблизительно равна 0,56 мкм. Световые волны такой длины соответствуют зеленой части спектра.

Венцы могут возникать при дифракции света и на круглых преградах. Наблюдать их можно следующим образом. Насыпем на стеклянную пластинку небольшое количество ликоподия (ликоподий — порошок из спор плауна, его можно купить в аптеке). Легким постукиванием торца пластины о стол удалим излишек порошка. Если через такую пластинку посмотреть на точечный источник света, то мы увидим венцы. Роль круглых преград в этом опыте играют споры приблизительно сферической формы. Особенно яркие венцы возникают

при рассматривании капли крови, сжатой между двумя стеклянными пластинами. В этом случае венцы возникают при дифракции на эритроцитах — красных кровяных тельцах.

Венцы, возникающие от круглых и прямоугольных преград, несколько отличаются друг от друга. Условие минимумов для венцов от прямоугольных преград выражается соотношением (1). Для венцов от круглых препятствий оно имеет вид:

$$d \sin \varphi = 1,22 \lambda; \quad 2,23 \lambda; \quad \dots \quad (5)$$

Здесь d — диаметр круглого экрана. Применяя эриометр, по формуле (5) можно определить средний диаметр спор плауна и эритроцитов без микроскопа!

В природе венцы наблюдаются вокруг Солнца, Луны и даже планет. Они возникают при прохождении света от светила через скопления взвешенных в воздухе водяных капелек или ледяных кристалликов (через неплотное облако, например). Хорошо видимые венцы получаются лишь в том случае, когда в облаке преобладают капельки одинакового диаметра или кристаллики одинаковой толщины. Если капельки или кристаллики льда имеют неодинаковые размеры, то кольца разных цветов налагаются друг на друга и вокруг светила мы видим беловатый круг. Этим обуславливается то обстоятельство, что венцы около Луны особенно часто появляются вечерами ясных дней. В такие вечера происходит слабая конденсация находящегося в воздухе водяного пара в виде маленьких капелек или кристалликов одинакового размера. Иногда венцы наблюдаются при прохождении света от удаленного фонаря через слой тумана или оконное стекло, покрытое тонким слоем ледяных кристалликов или капелек сконденсировавшейся влаги.

У п р а ж н е н и я.

1. По известной эффективной длине волны ($\sim 0,56$ мкм) найдите с помощью эриометра диаметр нитей, из которых изготавливают капроновые чулки и ленты.
2. Как по виду венцов определить, состоит ли облако из водяных капелек или кристалликов льда?
3. Угловой диаметр Луны равен $32'$. Оцените диаметр капелек в облаке, если угловой радиус центрального круга в венцах в четыре раза больше углового диаметра Луны.

ГРАМПЛАСТИНКА И ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

А. Бондарь

Как известно, один из самых точных методов определения спектрального состава исследуемого излучения основан на явлении дифракции. Хорошим спектральным аппаратом является дифракционная решетка. Оказывается, обычную грампластинку тоже можно использовать для наблюдения дифракции и, в частности, для измерения длины волны видимого света.

Во время звукозаписи на поверхность пластинки на равных расстояниях друг от друга наносятся бороздки. Эти бороздки рассеивают свет, а промежутки между ними отражают его. Таким образом, грампластинка подобна отражательной дифракционной решетке. Если ширина отражающих полос равна a , а ширина рассеивающих бороздок — b , то величина $d=a+b$ является периодом решетки.

Пусть на отражательную решетку с периодом d падает плоская монохроматическая волна длины λ под углом θ к решетке. Согласно принципу Гюйгенса — Френеля, каждая точка отражающей поверхности решетки становится самостоятельным точечным источником, посылающим свет по всевозможным направлениям. Рассмотрим волны, распространяющиеся под углом φ к решетке (см. рис. 122). С помощью собирающей

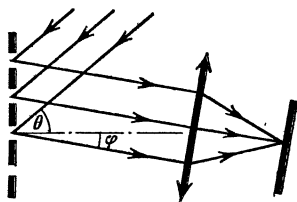


Рис. 122.

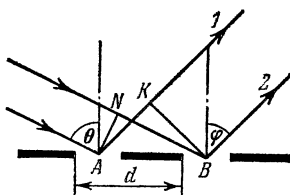


Рис. 123.

линзы (например, хрусталика глаза) эти волны можно собрать в одну точку. Найдем условие, когда при сложении волны будут усиливать друг друга.

Разность хода лучей 1 и 2, идущих от соответствующих точек A и B двух соседних отражающих участков

решетки (рис. 123), равна

$$|AK|=|NB|=d \sin \varphi - d \sin \theta = d (\sin \varphi - \sin \theta)$$

(KB — фронт отраженной волны в направлении под углом φ , AN — фронт падающей волны). Если разность хода кратна длине волны, фазы колебаний, прошедших из точек A и B , будут одинаковыми, и поэтому колебания будут усиливать друг друга. Аналогично ведут себя и все остальные отражающие участки решетки. Следовательно, условие образования главных максимумов можно записать так:

$$d (\sin \varphi - \sin \theta) = k\lambda, \quad (1)$$

где $k=0, 1, 2, \dots$. Отсюда можно определить длину волны λ . Для этого надо знать период решетки d , угол θ падения волны на решетку и направление на соответствующий максимум — угол φ . Обычно период решетки много больше длины волны ($d \gg \lambda$), поэтому углы φ малы. Это означает, что главные максимумы располагаются очень близко друг к другу и дифракционная картина получается очень нечеткой. Однако чем больше угол падения лучей на решетку (угол θ), тем больше углы и, следовательно, тем удобнее производить необходимые измерения. Вот почему лучше использовать не нормальное, а наклонное падение лучей на решетку.

До сих пор мы говорили о монохроматическом свете. А если на решетку падает белый свет, сложный по своему спектральному составу? Из уравнения (1) непосредственно следует, что положение каждого главного максимума зависит от длины волны. Чем меньше длина волны, тем меньшему значению угла φ соответствует максимум. Таким образом, все максимумы (кроме нулевого) растягиваются в спектр, фиолетовый конец которого обращен к центру дифракционной картины, а красный — наружу. По обе стороны от центрального (нулевого) максимума расположены два спектра первого порядка, затем два спектра второго порядка и т. д. По мере увеличения порядка спектра расстояние между соответствующими линиями спектров увеличивается, так что спектры могут накладываться друг на друга. Например, для солнечного света спектры второго и третьего порядков уже частично перекрываются.

Теперь перейдем непосредственно к опыту. Чтобы измерить длину волны, соответствующую определенному

цвету, надо определить период решетки (d), синус угла падения света на решетку ($\sin \theta$) и синус угла, определяющего направление на какой-нибудь максимум, например, на максимум первого порядка ($\sin \varphi_1$). Период решетки легко найти, проигрывая пластинку:

$$d = \frac{\Delta R}{n \Delta t}.$$

Здесь ΔR — абсолютная величина перемещения иглы вдоль радиуса пластинки за время Δt , n — число оборотов в единицу времени. Обычно $d \approx 0,01$ см.

В качестве источника света можно использовать обычную настольную лампу. Чтобы свет от нее не мешал наблюдению дифракционной картины, сделайте из картона экран со щелью и прикройте им лампу. При этом нить накала лампы должна быть видна через щель. Установите лампу около одной стены комнаты, пластинку положите горизонтально около противоположной стены и найдите изображение щели (рис. 124). Одновременно

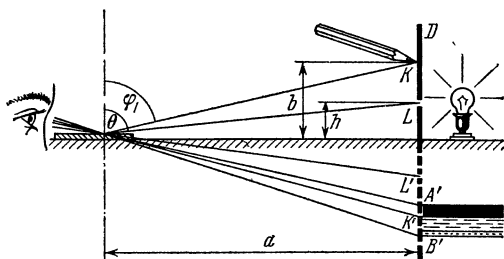


Рис. 124.

вы увидите размытые цветные полосы. Это и есть спектр первого порядка ($k=1$). Легко проверить, что действительно, чем больше угол θ , тем шире получается цветное изображение щели и тем точнее можно измерить угол, под которым дифрагирует свет интересующей нас длины волны.

Для определения $\sin \varphi_1$ надо попросить товарища поддержать карандаш (или какой-нибудь другой предмет) над щелью так, чтобы его изображение в отраженном от решетки (как от плоского зеркала) свете совпало с выбранным участком спектра (см. рис. 124). Измерив

линейкой a , b и h , найдем $\sin \varphi_1$ и $\sin \theta$:

$$\sin \varphi_1 = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}},$$

$$\sin \theta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}}.$$

Эти выражения можно несколько упростить. Поскольку $b \ll a$ и $h \ll a$,

$$\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + b^2/a^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{b^2}{a^2}$$

и

$$\frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + h^2/a^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{h^2}{a^2}.$$

Тогда окончательно

$$\lambda = d (\sin \varphi_1 - \sin \theta) \approx d \frac{h^2 - b^2}{2a^2}.$$

Измерив длины волн света различных цветов, интересно сравнить их с табличными значениями. В наших опытах при тщательных измерениях ошибка была порядка 10^{-8} м. Для длин волн видимого света ($\lambda \sim 10^{-7}$ м) такая точность вполне допустима.

ШАРИК ВМЕСТО ЛИНЗЫ

Г. К о с о у р о в

В основе геометрической оптики лежит представление о прямолинейности световых лучей. Этому учит нас практика. Вы сами можете легко провести опыт, подтверждающий прямолинейность распространения света. Замените объектив фотоаппарата листком черной бумаги, в котором проколото маленькое отверстие. Такой «дырочной камерой» (ее называют камерой-обскурой) можно получать фотографии ярко освещенных предметов, подобно фотографии, приведенной на рис. 125. Эта фотография получена камерой «Зенит», у которой объектив был заменен листком черной бумаги с отверстием диаметром 0,22 мм. Чувствительность пленки 65 ед. ГОСТ, выдержка 5 с. Изображение на пленке точно соответствует центральной проекции точек предмета прямыми, проходящими через отверстие, что яв-

ляется веским аргументом в пользу представления о лучах света как о прямых линиях.

Образование тени на белом экране от непрозрачного предмета мы объясняем как проекцию контура предмета

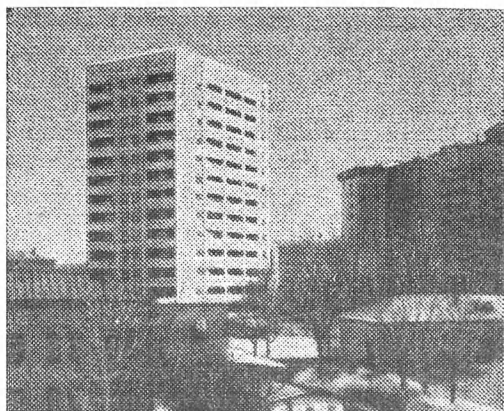


Рис. 125.

на плоскость экрана лучами, выходящими из каждой точки источника света. Так как источник света обычно имеет довольно большие размеры, граница тени окружена полутенью и размыта. Можно было бы думать, что, уменьшая размеры источника, мы будем сужать область полутени и в пределе получим резкую тень. Однако опыт показывает совсем другое. Когда источник света становится достаточно мал, обнаруживаются явления, которые раньше маскировались полутенью. Прямой край непрозрачной пластинки вместо резкой тени дает картину, приведенную на рис. 126. Тень снята на расстоянии 0,5 м, от экрана в белом свете через красный светофильтр. Снимок увеличен. Расстояние между двумя первыми темными полосами равно 0,6 мм. Край тени размыт, а параллельно ему идут темные и светлые полосы уменьшающейся контрастности. Если источник света белый, то полосы окрашены в радужные цвета.

Тень от тонкой проволоки (рис. 127) также имеет сложную структуру. Снаружи она окаймлена полосами, как у края непрозрачной пластинки, а внутри тени видны темные и светлые полосы, тем более узкие, чем

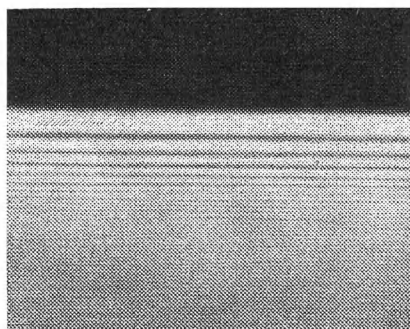


Рис. 126.

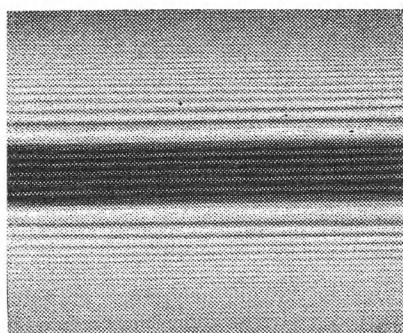


Рис. 127.

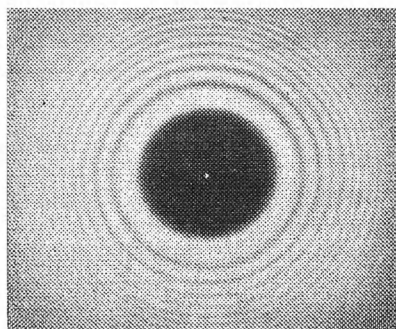


Рис. 128.

толще проволока. (Этот снимок сделан в белом цвете через красный светофильтр. Диаметр проволоки 1,2 мм, расстояние от проволоки до пленки 0,5 м.)

Совсем неожиданно выглядит тень от шарика или от маленького непрозрачного диска (рис. 128). Кроме темных и светлых колец, окружающих тень и аналогичных уже знакомым нам полосам, в центре тени можно видеть яркое светлое пятно, как будто бы в центре диска проколото маленькое отверстие. (Для этого снимка был взят шарик диаметром 2,5 мм, использовался красный светофильтр; $R_1=R_2=0,5$ м.)

Явления, в которых обнаруживается, что свет распространяется не строго по законам геометрической оптики, называются дифракционными. Причина их возникновения лежит в волновой природе света. Точное описание распространения света дает не построение лучей, а картина распространения волн.

Представим себе круговые волны, расходящиеся от брошенного камня по спокойной поверхности пруда. Если волны достигают плавающего на поверхности бревна, то за бревном образуется вполне четкая тень, границы которой определяются лучами, проведенными из точки падения камня через концы бревна. Однако в области тени тоже можно заметить волнение поверхности воды, хотя и более слабое. Это и есть дифракция, которая в данном случае не очень искажает картину геометрической тени. Если же волны встретят на своем пути сваю, то уже на небольшом расстоянии за ней картина распространения волн будет мало походить на геометрическую тень. Наконец, если волны встретят торчащий из воды тонкий шест, то тень вообще не образуется. Волны свободно огибают малые препятствия. На поверхности воды можно будет заметить лишь слабую круговую волну, рассеянную шестом.

Таким образом, при распространении волн могут встретиться как случаи, когда прямолинейные лучи хорошо описывают наблюдаемые явления, так и случаи, когда преобладает дифракционная картина. Все зависит от соотношения между длиной волны, размерами препятствия (или отверстия), ограничивающего волну, и расстоянием до плоскости наблюдения. Коротко это можно сформулировать так: если из точек экрана, на котором мы наблюдаем тень, препятствие или отверстие видно под углом большим, чем угол, под которым видна

длина волны с расстояния, равного поперечнику препятствия, то дифракция не сильно искажает лучевую картину. В виде формулы это можно записать так: $\frac{a}{R} \gg \frac{\lambda}{a}$,

где a — размер отверстия, R — расстояние до экрана, на котором наблюдается тень, и λ — длина волны. Если же углы сравнимы или первый угол меньше второго, т. е. $\frac{a}{R} \leq \frac{\lambda}{a}$, то дифракция играет определяющую роль и лучевые представления неприменимы.

В оптике чаще всего имеют дело с первым случаем, так как длины волн видимого света очень малы (от 0,7 мкм для красного света до 0,4 мкм для фиолетового), но на больших расстояниях от маленького отверстия или от тонкой проволоки может быть и второй случай.

Наблюдать явления дифракции света можно с помощью весьма скромных средств. Проколите в тонкой фольге кончиком острой иголки отверстие 0,1—0,2 мм и наклейте фольгу на лист картона с отверстием, который нужен для того, чтобы свет от источника — обычной настольной лампы — не мешал наблюдениям. Установив лист картона на подставке, спроектируйте на него линзой с фокусным расстоянием 4—6 см увеличенное изображение волоска лампы так, чтобы часть изображения волоска пришлась на отверстие в фольге. За отверстием образуется световой конус, который легко найти по светлomu кружку на матовом стекле или глазом (когда глаз попадает в световой конус, отверстие кажется ярко светящимся). На расстоянии около 0,5 м от отверстия в пучок света будем помещать объекты, а дифракционную картину будем наблюдать на расстоянии тоже около 0,5 м за объектом. Вести наблюдение следует через слабую лупу или линзу с фокусным расстоянием 2—5 см, укрепив ее на подставке, а глаз располагать на таком расстоянии от линзы, чтобы она вся казалась ярко освещенной. На светлом фоне хорошо будет видна дифракционная картина.

На рис. 129 приведена фотография установки, на которой получены все помещенные в этой статье дифракционные картины. Была использована оптическая скамья, что, конечно, не обязательно, однако если вам удастся воспользоваться для укрепления объектов какими-либо штативами с винтовыми перемещениями, то приводить дифракционную картину в центр поля зрения

будет значительно легче. Цифрами на рисунке обозначены: 1 — лампа; 2 — проектирующая линза; 3 — точечная диафрагма со светозащитным экраном; 4 — держатель с объектами дифракции; 5 — светозащитная труба; 6 — фотоаппарат без объектива.

Тень от прямолинейного края непрозрачного экрана вам даст лезвие безопасной бритвы. Из двух лезвий

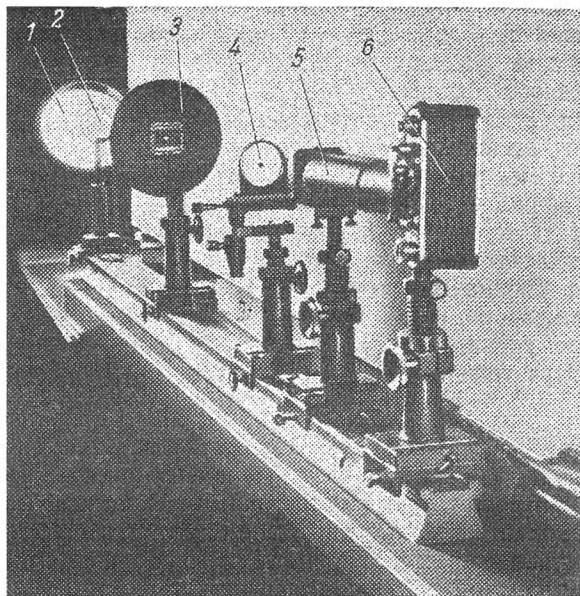


Рис. 129.

можно сделать щель шириной 0,3—1 мм. Кусочек проволоки диаметром до 1 мм продемонстрирует дифракцию от узкого экрана. Интересно выглядит дифракция от кончика иголки.

Для наблюдения светлого пятна в центре тени от круглого предмета возьмите стальной шарик от подшипника диаметром 2—4 мм. Капелькой клея приклейте шарик к стеклянной пластинке. (Необходимо следить за тем, чтобы клей не выступал за контур шарика, а поверхности стекла и шарика были чистыми.) Когда клей подсохнет, укрепите пластинку с шариком на установке. Перемещая пластинку, приведите тень от

шарика в центр поля зрения. При этом будут хорошо видны и внешние дифракционные кольца, и пятно в центре, окруженное темными и светлыми кольцами.

Вы, вероятно, захотите получить фотографии дифракционных картин. Это легко сделать, если воспользоваться фотоаппаратом с вывинченным объективом. Тень от объекта проектируется прямо на плоскость пленки. Чтобы дифракционные полосы на фотографии были более четкими и число их было больше, отверстие, служащее источником света, надо закрыть светофильтром, лучше красным, так как в спектре лампы накаливания много красных лучей. Для обычных пленок экспозиция в 5—10 с оказывается достаточной. Чтобы избежать засветки пленки, между аппаратом и объектом нужно поместить зачерненную внутри трубу.

Смещение источника света вызывает смещение тени, а значит, и пятна. Поэтому, если вместо точечного источника вы возьмете диапозитив малого размера, то каждая прозрачная точка на нем даст свою, слегка смещенную тень шарика со своим светлым пятном. В результате внешние дифракционные кольца размажутся, а в центре тени можно будет увидеть изображение диа-

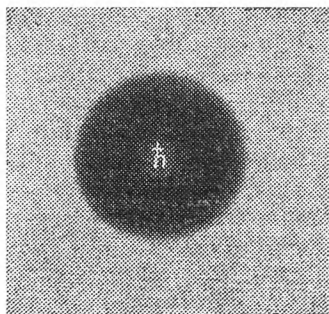


Рис. 130.

позитива. Шарик будет действовать как линза. Именно так была получена фотография символа постоянной Планка (рис. 130). Фотография получена с помощью шарика диаметром 4 мм. Высота символа \hbar равна 1 мм. Диапозитив был получен фотографированием на контрастной пленке буквы, вычерченной тушью на бумаге.

Просверлив в тонкой жести круглое отверстие диаметром около 2 мм, вы сможете проследить, как меняется дифракционная картина от круглого отверстия на разных расстояниях от него. Закрыв источник света светофильтром и приближая глаз с лупой к отверстию, начиная с расстояний 1—2 м, вы увидите, как в центре картины появляются черные кружки, которые при

приближении глаза превращаются в темные кольца, расходящиеся к краям тени. Число темных колец, считая и темное пятно в центре, определяется разностью путей света для центрального луча и луча, идущего от края отверстия. Этим можно воспользоваться для определения длины волны света. Чтобы произвести вычисления, необходимо знать диаметр отверстия, измерить расстояние от источника света до отверстия и расстояние от отверстия до плоскости наблюдения. Определить положение плоскости наблюдения можно, поместив в поле зрения лупы иголку и двигая ее до тех пор, пока она не будет представляться глазу резкой на фоне изучаемой дифракционной картины. Как вывести расчетную формулу, мы поясним ниже.

В белом свете можно наблюдать красивую смену окраски дифракционных колец. Цвета, которые вы увидите, не похожи на спектральные. Они называются дополнительными и наблюдаются тогда, когда из полного спектра белого света удаляется какая-нибудь одна спектральная область. В нашем случае, когда, например, в центре получается темное пятно для зеленого света, остальные части спектра, то есть красно-оранжевый и фиолетовый, окрашивают центр картины в пурпурный цвет. Отсутствие красного приводит к зелено-голубому дополнительному цвету и т. д. На рис. 131 приведены примеры дифракционных картин

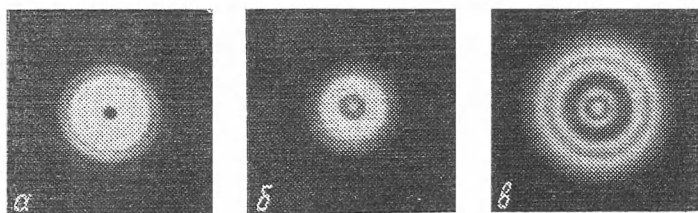


Рис. 131.

от круглого отверстия: а) диаметр отверстия 1 мм, $R_1=R_2=0,5$ м. Красный светофильтр. Отверстие открывает две зоны. В центре черное пятно. б) То же с синим светофильтром. Отверстие открывает почти три зоны. в) Диаметр отверстия 1,5 мм, $R_1=R_2=0,5$ м. Красный светофильтр. Отверстие открывает немногим более четырех зон.

Почему же в центре, куда волны приходят, казалось бы, беспрепятственно, появляется темное пятно?

Вернемся к нашим наблюдениям волн на поверхности пруда. Представим себе, что одновременно в пруд бросили два камня и по его поверхности распространяются две системы волн. Тогда на поверхности пруда найдутся точки, в которые одновременно приходят горбы от обеих систем волн. Через некоторое время в эти же точки одновременно придут впадины волн. Волны будут усиливать друг друга, как это показано на рис. 132. Усиление будет происходить в точках, лежащих на разных расстояниях от источников волн. Кроме того, волны будут усиливаться в тех точках, расстояния от которых до источников волн отличаются на целую длину волны, на две длины волны и т. д. В тех точках, до которых одновременно доходят горбы от одной волны

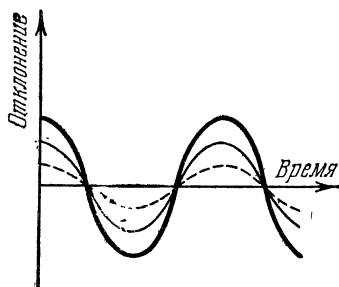


Рис. 132.

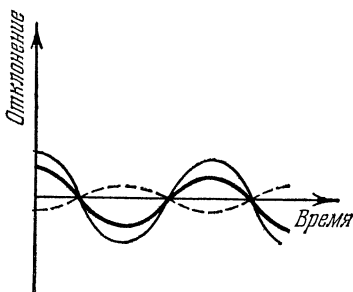


Рис. 133.

и впадины от другой, волны будут ослабляться, гасить друг друга, как это показано на рис. 133. Описанное явление называется интерференцией. Оно играет решающую роль в образовании дифракционных картин.

Каждая точка пространства, через которую проходит световая волна, сама может рассматриваться как источник вторичной сферической волны (рис. 134). Если свет проходит через круглое отверстие, то мы можем заменить источник света вторичными источниками, распределенными по площади отверстия. Все эти источники будут колебаться в такт с первичной волной, дошедшей до отверстия. Амплитуда колебаний в точке наблюдения за экраном найдется как сумма колебаний, которые вызывает в этой точке каждый вторичный источник. Нужно

учесть, что волны от разных источников проходят разные пути и, складываясь, могут не только взаимно усиливаться, но и ослабляться.

Проследим, как будет меняться амплитуда колебаний на оси круглого отверстия, освещенного точечным источником света. Когда расстояние до точки наблюдения очень велико по сравнению с диаметром отверстия, волны от всех вторичных источников проходят почти одинаковые пути и, приходя в точку наблюдения, взаимно усиливаются. При приближении точки наблюдения к отверстию вторичные волны от источников, расположенных на краю отверстия, будут заметно отста-

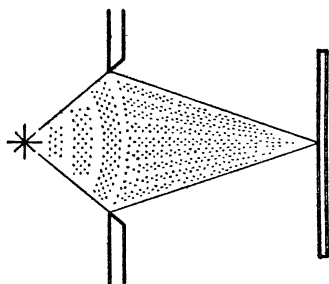


Рис. 134.

вать от волн, пришедших от источников центральной зоны, и результирующая амплитуда будет уменьшаться. Когда луч, проведенный в точку наблюдения от края отверстия, станет длиннее луча, проведенного из центра, на целую длину волны, наступит полная компенсация колебаний, и в центре дифракционной картины мы увидим темное пятно. Еще приблизив экран, мы нарушим компенсацию колебаний на оси, и центр дифракционной картины снова станет светлым. Теперь возникнет компенсация на некотором расстоянии от оси, и центр дифракционной картины будет окружен темным кольцом. Когда крайний луч отстанет от центрального на две длины волны, снова наступит компенсация колебаний на оси. Дифракционная картина будет иметь вид светлого пятна с темным центром и с одним темным кольцом.

Появление темного пятна в центре дифракционной картины будет периодически повторяться по мере приближения экрана, на котором наблюдается дифракционная картина, к экрану с отверстием. Сосчитав число темных колец, можно сказать, сколько раз произошла компенсация на оси. То же самое можно увидеть, если менять не расстояние до точки наблюдения, а радиус отверстия. Этих указаний достаточно для того, чтобы вы сами вывели формулу для определения длины волны.

Итак, желаем успеха!

ОПЫТЫ В ДОМАШНЕЙ ЛАБОРАТОРИИ

М., 1981 г., 144 стр. с илл.

(Серия: Библиотечка «Квант»)

Редактор *И. Г. Вирко*

Технический редактор *Е. В. Морозова*

Корректор *М. Л. Медведская*

ИБ № 11627

Печать с матриц. Подписано к печати 23.12.80. Т-13056. Бумага 84×108¹/₃₂, тип. № 3. Гарнитура литературная. Высокая печать. Условн. печ. л. 7,56. Уч.-изд. л. 7,57. Доп. тираж 150 000 экз. Заказ № 2418. Цена книги 25 коп.

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли. Москва, М-54, Валовая, 28

Цена 25к.

БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ:

Вып. 1. **М. П. Бронштейн. Атомы и электроны.**

Вып. 2. **М. Фарадей. История свечи.**

Вып. 3. **О. Оре. Приглашение в теорию чисел.**

Вып. 4. **Опыты в домашней лаборатории.**

ГОТОВЯТСЯ К ВЫПУСКУ:

Вып. 5. **И. Ш. Слободецкий, Л. Г. Асламазов. Задачи по физике.**

Вып. 6. **Л. П. Мочалов. Головоломки.**

Вып. 7. **П. С. Александров. Введение в теорию групп.**

Вып. 8. **Г. Штейнгауз. Математический калейдоскоп.**

Вып. 9. **Замечательные ученые.**

Вып.10. **В. М. Глушков, В. Я. Валах.. Что такое ОГАС?**