

ПОПУЛЯРНО - НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА

534

Т. 49

Д. ТИНАЛЬ

ЗВУК



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА
1922

ПОПУЛЯРНО-НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА

Д. ТИНДАЛЬ

З В У К

Перевод с англ. М. А. Антоновича

Третье издание, вновь просмотренное,
с примечаниями С. Т. Конобеевского

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО :: 1922

Гиз. № 2260.

Р. Ц. Москва. № 1251

10.000 экз.

16-я типография М. С. Н. Х.

Предисловие к третьему русскому изданию.

Настоящее издание является перепечаткой со второго русского издания, подвергнутого лишь редакционному просмотру и снабженного в примечаниях рядом дополнений. Нам казалось целесообразным заменить в книге английские меры метрическими, более знакомыми русскому читателю.

В конце книги добавлено третье приложение—о поющей и говорящей вольтовой дуге—извлечение из популярной лекции проф. А. А. Эйхенвальда, которое по своему содержанию явится не лишним дополнением к этой книге, по манере же изложения как нельзя лучше отвечает ее характеру.

6 мая 1921 г.

С. Конобеевский.

Ко второму русскому изданию.

(От переводчика).

Первое русское издание этого сочинения было переведено с первого же английского издания. Второе русское издание сверено с последним, *шестым* английским изданием 1895 г., также с немецким переводом А. Гельмгольц и Кл. Дюбуа-Реймон. В него вошли все исправления и дополнения, внесенные автором в последнее английское издание. Прибавлена, напр., обширная (VII) лекция, содержащая в себе описание опытов и наблюдений, произведенных автором над звуковыми морскими сигналами и над тем влиянием, какое оказывают на распространение звука атмосферные деятели. Кроме того, в конце сочинения помещено несколько значительных приложений, состоящих из отдельных статей и писем разных ученых о некоторых любопытных звуковых явлениях.

Предисловие к пятому английскому изданию.

Помещенные ниже извлечения из предисловий к прежним изданиям дадут читателю возможность составить понятие о том, что может быть названо историческим развитием настоящего сочинения. Каждое последующее издание я дополнял сообщениями о новых работах, сделанных мною и другими. Как известно, настоящее сочинение явилось в переводах на разные языки и хотя подвергалось справедливой критике, но в общем было принято очень хорошо. Рецензент французского перевода жаловался на отсутствие в сочинении математики. Напротив, Гельмгольц и Видеман, редактировавшие немецкий перевод, одобряли тот прием, посредством которого наиболее трудные вопросы акустики были разъяснены чисто экспериментальным методом. Немецкие ученые поняли мою цель вернее, чем французский рецензент. Ввести математику в сочинение—значило, с моей точки зрения, погубить его. Подобно моему сочинению о Теплоте, эти лекции о Звуче были рассчитаны на то, чтобы публика поняла и почувствовала интерес, важность и, если возможно, увлекательность физической науки. Моею целью везде было возбуждать, а не только учить.

Гинд Гид, апрель 1893.

Извлечение из предисловия к первому изданию.

На следующих страницах я старался сделать акустику интересною для всех интеллигентных людей, даже и для тех, которые не получили специально научного образования.

Предмет трактуется мною чисто экспериментально, и я старался представить читателям каждый опыт таким образом, чтобы ход его они могли представить себе наглядно. Моим желанием было представить точные изображения различных явлений акустики и дать возможность уму увидеть их истинные отношения.

Некоторые мои английские друзья любезно взяли на себя более или менее подробный просмотр корректур этого сочинения. Особенную же благодарность я должен выразить здесь моему немецкому другу Кляузиусу, который взял на себя труд прочитывать корректуру от начала до конца.

Во всем цивилизованном мире обнаруживается все усиливающееся стремление к научному образованию. Это стремление естественно и при данных обстоятельствах неизбежно. Потому что сила, которая так могущественно влияет на умственную и материальную деятельность нашего

века, не может не привлекать к себе внимания и пытливого исследования. В наших школах и университетах началось движение в пользу науки, которое, нет сомнения, кончится признанием ее прав, как источника знания и как средства дисциплины ума. Если эта книга окажет хоть косвенную поддержку указанному движению тем, что познакомит, хотя и не вполне, с методами и результатами физической науки тех влиятельных людей, которые почерпнули свое образование из другого источника, то она написана не напрасно.

1867.

Извлечение из предисловия к третьему изданию.

Приготовляя это новое издание „Звука“, я тщательно просмотрел предшествующее, исправил, по возможности, его недостатки в изложении и содержании, и принял во внимание замечания и указания, которые вызвали прежние издания.

Только в немногих случаях я довольствовался передачей того, что я вычитал в акустических сочинениях. Я сам старался экспериментально познакомиться с основаниями наблюдений и во всех случаях стремился давать объяснения в форме и связи, наиболее подходящей для воспитательных целей.

Хотя это сочинение и несвободно от тех несовершенств, которые находятся во всех человеческих делах, однако, оно проникло в литературу разных наций, стоящих на разном умственном уровне. В прошлом году явилось новое немецкое издание под редакцией Гельмгольца и Видемана. Что такие знаменитые ученые и так обремененные официальными обязанностями все-таки взяли на себя труд просматривать и исправлять каждый корректурный лист подобного сочинения, это показывает, что они считают его тем, чем оно стремилось быть: серьезной попыткой содействовать распространению в публике научных знаний. Для меня было особенно приятно убедиться, что не в одной только Англии книга удовлетворила потребностям публики, но также и в той ученой стране, которой я обязан своим научным образованием.

Июнь 1875.

Предисловие к четвертому изданию.

В настоящем издании „Звука“ сделаны различные дополнения и исправления.

В прошлом году я представил Королевскому Обществу обширный мемуар о „Действии свободных частиц на лучистую теплоту и ее превращение вследствие этого в звук“. В настоящем издании изложены методы и результаты этого исследования.

В прошлом году я также сообщил Королевскому Обществу краткий мемуар о „Беззвучных зонах“, которые, по наблюдениям генерала Дуана, окружают станции туманных сигналов на берегах Мена. В настоящем издании изложено и иллюстрировано содержащееся в том мемуаре объяснение этого весьма замечательного явления. Я думаю, что оно выдержит критику.

Затем прибавлены краткие описания телефонов Беля и Эдиссона, микрофона и фонографа.

Описаны также опыты, касающиеся преломления звука на граничащих поверхностях различных газов. При этом поразительно обнаруживается действие изменения скорости распространения, и читателю дается возможность составить себе ясное представление о последствиях такого же изменения относительно света.

В VII лекции подробно описаны наблюдения над туманными сигналами, и для более ясного понимания их приложены карты.

Наконец, точнее разъяснены задержка звука прозрачными, но неоднородными атмосферами и его сравнительно легкое прохождение через густой дым, через хлопья отрубей, бумажек и воду, через шерстяные и другие ткани и через войлок, словом, через все вещества, достаточно пористые для того, чтобы сохранить непрерывность воздуха внутри их.

Март 1883.

Лекция первая.

Нервы и ощущение.—Происхождение и распространение звукового движения.—Опыты над звучащими телами, помещенными в безвоздушном пространстве.—Действие водорода на голос.—Распространение звука в воздухе различной плотности.—Отражение звука.—Эхо.—Преломление звука.—Влияние температуры на скорость звука.—Влияние плотности и упругости.—Вычисленная Ньютоном скорость звука.—Тепловые изменения, производимые звуковыми волнами.—Лапласова поправка формулы Ньютона.—Отношение между удельными теплотами при постоянном давлении и при постоянном объеме, выведенное из скорости звука.—Механический эквивалент теплоты, выведенный из этого отношения.—Вывод, что атмосферный воздух не обладает заметною способностью лучеиспускать теплоту.—Скорость звука в различных газах.—Скорость в жидкостях и твердых телах.—Влияние молекулярной структуры на скорость звука.

§ 1. Характер звукового движения. Наглядные изображения его.

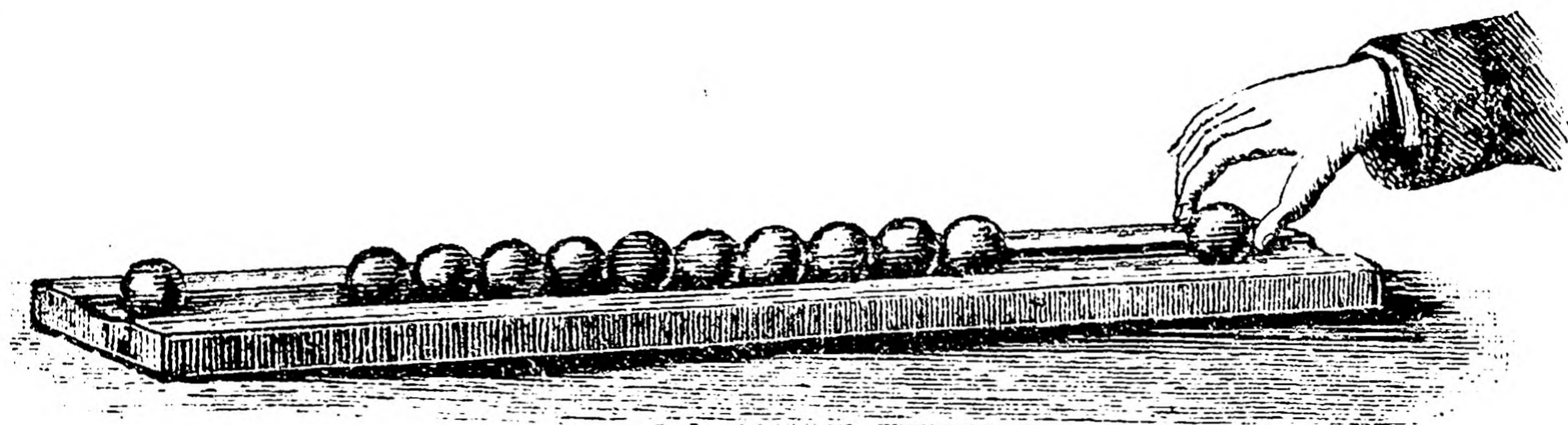
Различные нервы человеческого тела берут свое начало в головном мозгу, и этот мозг есть место ощущения. Когда вы раните палец, то нервы, идущие от пальца к головному мозгу, передают мозгу известие об этом, и если бы эти нервы были перерезаны, то, как бы ни была сильна рана, вы не ощутили бы боли. Мы имеем достаточное основание полагать, что передаваемое нервами мозгу есть, во всяком случае, движение. Однако, это движение не есть движение всего нерва, как целого; оно есть вибрация или дрожание его молекул, его малейших частичек ¹⁾.

В разных частях головного мозга молекулярные движения сообщающихся с ним нервов возбуждают различные ощущения. Так, движения, идущие от языка и неба, ощущаются в мозгу, как чувство вкуса; движения, идущие от сетчатки глаза, вызывают в мозгу впечатление или сознание света. Те же движения, которыми мы занимаемся в настоящее время и которые передаются по слуховому нерву, производят в головном мозгу ощущение звука.

Если к маленькому шару из коллодиума, содержащему в себе смесь кислорода и водорода, приблизить пламя, то газы произведут взрыв, и ухо каждого слушателя в этой зале ощутит толчок, который называется звуком. Каким образом этот толчок сообщился от шара

¹⁾ Скорость, с какою передается впечатление по нервам лягушки, определенная сначала Гельмгольцем и подтвержденная Дюбуа Реймоном, составляет $28\frac{1}{4}$ метров в секунду. Последующие определения делают вероятным, что у человека и высших животных скорость распространения впечатлений гораздо больше.

нашим органам слуха? Произошел ли здесь вследствие взрыва газов выстрел, от которого воздушные частицы полетели и ударили в слуховой нерв, подобно тому, как выстрел из ружья дает полет пуле, ударяющей в цель? Действительно, вблизи шара было некоторое передвижение воздушных частичек; но ни одна частичка воздуха, находящегося по соседству с шаром, не доходит до уха кого-нибудь из присутствующих здесь лиц. Процесс здесь был следующий. Когда пламя коснулось смеси газов, они соединились химически, и это их соединение сопровождалось развитием сильного жара. Воздух вследствие этого жара мгновенно расширился и быстро оттолкнул во все стороны окружающий его воздух. Это движение воздуха, непосредственно прилега-



Фиг. 1.

шего к шару, сообщилось воздуху, лежащему несколько дальше; между тем как воздух, который был прежде в движении, в это самое время пришел в покой. Таким образом каждый concentрический слой воздуха принимал движение от непосредственно предшествующего ему слоя и передавал его непосредственно следующему за ним, и таким образом движение распространялось по воздуху, как с о т р я с е н и е и л и в о л н а.

Движение этой волны не должно смешивать с движением самых частичек, которые в каждое мгновение образуют волну, потому что в то время, как эта волна движется вперед на значительное расстояние, каждая отдельная частичка воздуха делает только небольшое движение взад и вперед.

Этот процесс может быть представлен грубым образом под видом распространения движения через ряд стеклянных шаров вроде тех, какие употребляются в игрушке, называемой с о л и т е р о м (фиг. 1). Если положить эти шары рядом в желобок таким образом, чтобы каждый из них касался своего соседа, и потом взять один в руку и ударить им первый шар, начинающий ряд, то движение, сообщенное таким образом первому шару, передается им второму, движение второго сообщается третьему, движение третьего—четвертому и т. д.; и каждый шар, отдавши таким образом движение своему соседу, остается в покое, и только последний шар отскакивает от ряда. Подобным же образом и звук передается через воздух от частички к частичке. Частички воздуха, наполняющие наружную полость уха, толкают, наконец, барабан-

ную перепонку, которая закрывает проход, ведущий к мозгу. Эта перепонка, покрывающая барабан уха, приходит в сотрясение, ее движение сообщается концам слухового нерва и потом по нерву идет к мозгу. Здесь физическое явление становится психическим, и механические вибрации производят ощущение звука.

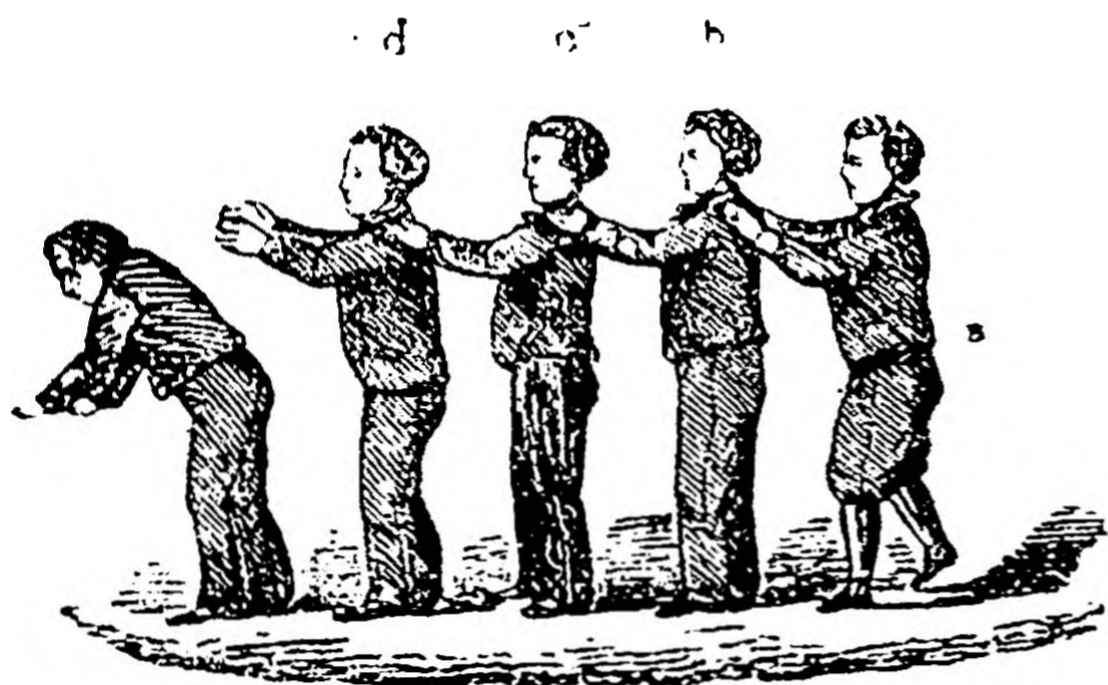
Необходимость уяснения этой основной идеи столь важна, что я хочу объяснить распространение звука еще другим, самым обыкновенным, но очень поучительным примером. Вот перед нами стоят пять мальчиков *a*, *b*, *c*, *d* и *e* (фиг. 2) рядом, один сзади другого, и руки каждого мальчика упираются в спину мальчика, стоящего перед ним; *e* начинает собою ряд, а *a* оканчивает его сзади. Я быстро толкаю *a*, *a* непроизвольно толкает *b* и снова принимает прямое положение, *b* толкает *c*, *c* толкает *d*, *d* толкает *e*, каждый мальчик, передавши движение толчка, сам принимает прямое положение; *e*, перед которым не стоит никого, падает вперед. Если бы он стоял на краю пропасти, то свалился бы в нее; если бы стоял, касаясь окна, то разбил бы стекло, а если бы он стоял подле барабана, то ударил бы в него. Мы могли бы таким образом передать толчок через ряд из ста мальчиков так, что при этом каждый отдельный мальчик только покачнулся бы вперед и назад. Таким же образом мы передаем и звук через воздух и потрясаем барабан далеко отстоящего уха, между тем как каждая отдельная частичка воздуха при передаче толчка делает только небольшое качание.

Но мы извлекли из нашего ряда мальчиков еще не все то, чему он может научить нас. Когда я толкну *a*, то он может податься медленно и таким образом медленно же передать движение своему соседу *b*; *b* делает то же самое относительно *c*, *c* относительно *d* и т. д. Таким образом движение будет передано по всей линии сравнительно медленно. Но *a*, когда я толкну его, может сильным мускульным усилием и скорым движением назад быстро передать свое движение *b* и критти в покой, *b* может сделать то же самое относительно *c* и т. д., и таким образом движение передается по всей линии быстро. Это сильное мускульное напряжение и быстрое движение назад аналогично с упругостью воздуха в явлениях звука. В звуковой волне слой воздуха, когда его толкнут к соседнему с ним слою, отдает свое движение и возвращается назад в силу своей упругости, и чем быстрее эта отдача и возвращение, или, другими словами, чем больше упругость воздуха, тем больше скорость звука.

Весьма поучительный способ наглядного изображения распространения звуковой волны дает аппарат, изображенный на фиг. 3 и придуманный моим ассистентом Котрелем. Он состоит из ряда деревянных шаров, отделенных один от другого спиральными пружинами. Когда мы толкнем кнопку *A*, то палочка, прикрепленная к ней, ударит первый шар *B* и сообщит ему движение, которое он передаст *C*, а от *C* движение перейдет к *E*, и так далее через весь ряд шаров. Когда движение дойдет до *D*, то конечный шар ударит в деревянную стойку или в колокольчик, если бы мы поместили его здесь. В этом аппарате упру-

гость воздуха представлена упругостью пружин. Волну можно получить довольно медленную, так что получается возможность следить за ней глазами.

Научное воспитание может научить нас видеть в природе и невидимое так же хорошо, как видимое, созерцать умственным взором те процессы, которые вполне недоступны телесному взору. Переходя к нашему предмету, мы должны составить себе определенное понятие о звуковой волне. Мы должны видеть умственным взором, как частички воздуха, толкнутые вперед взрывом нашего шара, сблизились между собою, сгущились; но непосредственно за этим сгущением мы должны представить себе, что частички снова расходятся на большее расстояние. Словом,



Фиг. 2.



Фиг. 3.

мы должны составить себе понятие о том, что звуковая волна состоит из двух частей, из которых в первой воздух сгущен более обыкновенного а в другой он сгущен менее обыкновенного. Таким образом, сгущение и разрежение суть две составные части звуковой волны.

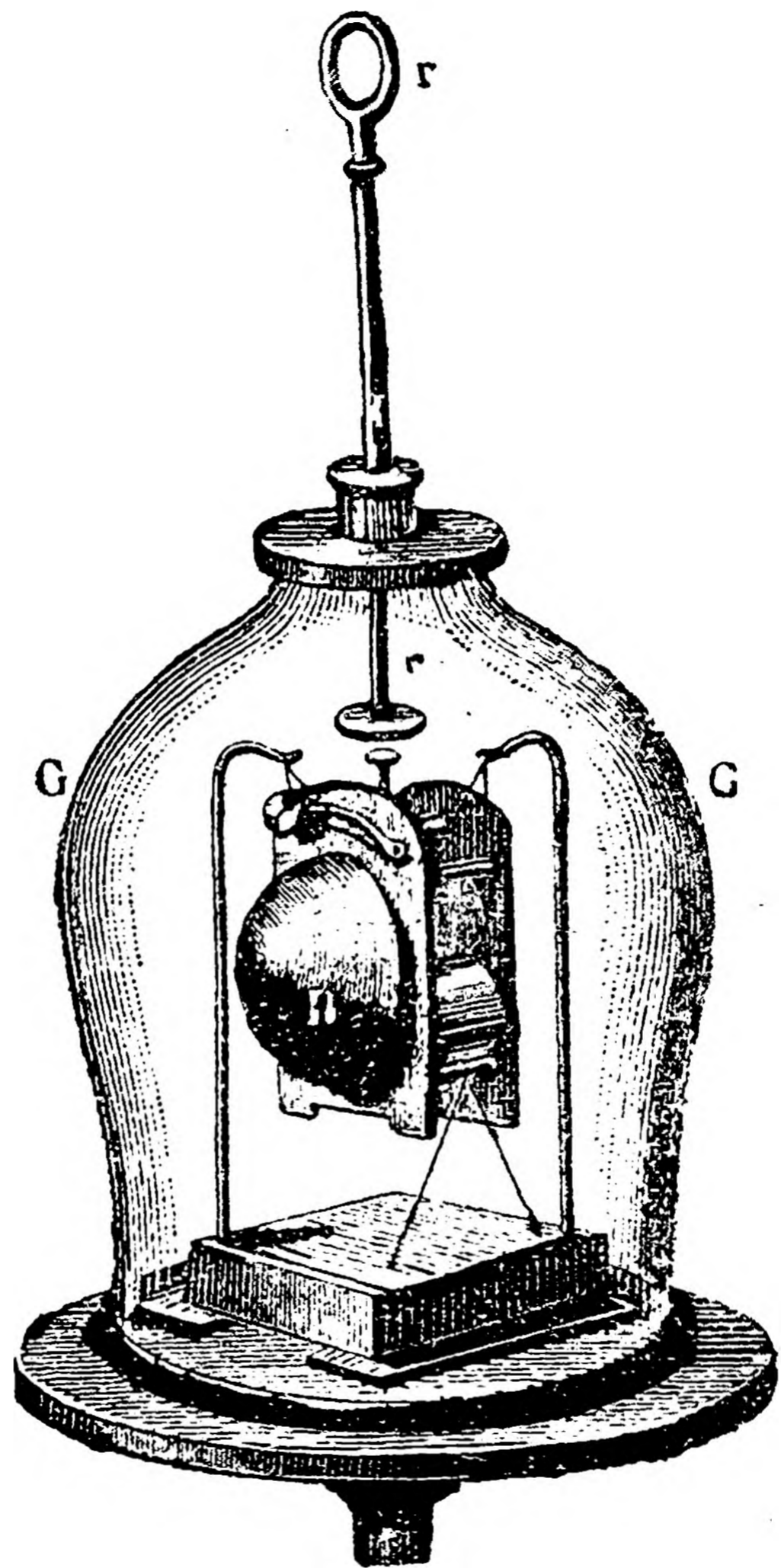
§ 2. Опыты в безвоздушном пространстве, в водороде и на горах.

Что воздух необходим для распространения звука, это доказал экспериментально в первый раз знаменитый Роберт Бойль. Но его опыт, повидимому, был забыт и воскрешен был Гоксби в 1705 г. В приемнике воздушного насоса был укреплен колокольчик таким образом, что его извне можно было заставить звонить, после того как из приемника выкачан воздух. Когда воздух не выкачивали, то изнутри приемника звон колокольчика был слышен, но когда выкачали воздух, то звон сделался до того слабым, что едва был слышен. Я имею здесь аппарат ¹⁾, посредством которого могу самым совершенным образом повторять опыт Гоксби. В этом приемнике G' (фиг. 4), стоящем на тарелке воздушного насоса, находится колокольчик B, соединенный с часовым механизмом. Я выкачиваю воздух из-под приемника по возможности вполне и посредством стержня rr', который герметически проходит через крышку приемника, спускаю пружину, которая держит молоток. Он ударяет, и вы видите, как он ударяет, но только стоящие вблизи приемника могут слышать звук. Затем я впускаю в приемник водородный газ, который, как вы знаете, в 14 раз легче воздуха. Звук колокольчика немного уси-

¹⁾ Очень целесообразный аппарат этот устроен Варреном де-ла-Рю.

лился от присутствия этого тончайшего газа, хотя приемник весь наполнен им. При дальнейшем действии насоса атмосфера, окружающая колокольчик, стала еще более разреженной. Этим способом мы получаем пустоту, более совершенную, чем та, какую получал Гоксби, и это весьма важно, так как в этом опыте действие главным образом зависит от последних следов воздуха. Вы видите теперь, что молоток ударяет в колокольчик, но вы не слышите звука. Даже если приставлю ухо к приемнику, из которого выкачан воздух, то и тогда не услышу ни малейшего звука. Заметьте также, что колокольчик повешен на шнурках, потому что если бы он стоял на тарелке воздушного насоса, то вибрации сообщались бы тарелке и передались бы наружному воздуху. Все, что я могу услышать при напряженнейшем внимании и приставивши ухо к приемнику, это — слабый стук, происходящий от передачи ударов молотка через шнурки, поддерживающие колокольчик. Затем я впускаю под приемник воздух, по возможности, без всякого шума. Немедленно вы слышите слабый звук, который становится слышнее по мере того, как воздух становится плотнее, и теперь каждый из присутствующих в этом большом собрании ясно слышит звон колокольчика ¹⁾).

Сэр Джон Лесли нашел, что водород очень плохой проводник звука от звенящего в нем колокольчика. Более того, когда он выкачал из приемника половину содержащегося в нем воздуха, то звон колокольчика явственно был слышен; но когда он в полунаполненный приемник стал впускать водород, чтобы приемник наполнился им вполне, то звон колокольчика все ослабевал и, наконец, едва был слышен. Этот результат оставался загадкой, пока профессор Стокс не дал ему простого удовлетворительного объяснения. Когда качается обыкновенный маятник, то он стремится произвести сгущение воздуха перед собою и разрежение сзади себя. Но это есть только стремление, тенденция; на деле же движение его столь медленно, что упругий воздух перед ним подвинется вперед, прежде чем заметно сгустится, и наполнит пространство сзади его, прежде чем заметно разрежится. Поэтому качающийся маятник не производит звуковых волн. Требуется известная быстрота



Фиг. 4.

¹⁾ Направляя луч электрической лампы на стеклянные шары, наполненные смесью равных объемов хлора и водорода, я произвожу взрывы шаров сначала в пустом пространстве, а потом в воздухе. Разница в звуке, хотя и не так различительна, как я ожидал, однако, все-таки вполне заметна.

и резкость удара, чтобы произвести сгущение и разрежение, образующие в воздухе звуковую волну.

Чем более газ упруг и подвижен, тем он способнее подвигаться далее перед вибрирующим телом и наполнять пространство позади его и таким образом препятствовать образованию этим телом сгущений и разрежений. Водород же гораздо более подвижен, чем воздух, и потому звуковые волны могут образоваться в нем с большею трудностью, чем в воздухе. Быстрота вибрации, вполне достаточная для образования звуковых волн в воздухе, может быть совершенно недостаточной для образования их в водороде. И вычисления и наблюдения подтверждают правильность этого объяснения, к которому мы еще возвратимся.

На больших высотах в атмосфере звук заметно ослабевает в силе. Де-Соссюр наблюдал, что выстрел пистолета на вершине Монблана равняется звуку обыкновенной шутихи на низменности. Я много раз повторял этот опыт, сначала, за неимением ничего лучшего, с маленькой оловянной пушкой, разорванные остатки которой лежат здесь перед вами, а потом с пистолетами. Что меня больше всего поразило, это—отсутствие напряженности и резкости в звуке, которыми он характеризуется на низменности. Пистолетный выстрел был похож на хлопанье шампанской бутылки, но он был все еще громок. Разрежение воздуха до давления в пол-атмосферы не очень сильно ослабляет звук колокольчика в нашем аппарате, и при той плотности воздуха, какая имеется на вершине Монблана, звук может сильно действовать на слуховой нерв. Что воздух, даже в высшей степени разреженный, способен проводить звук большой силы, это ясно доказывается взрывами метеоров на больших высотах над землею, где атмосфера очень разрежена. Впрочем здесь, должно быть, происходит чрезвычайно сильное первоначальное возмущение.

Движение звука, подобно всякому другому движению, ослабляется при переходе его из легкого тела в тяжелое. Я снимаю приемник, который до сих пор покрывал наш колокольчик; вы слышите, что он гораздо громче звучит в открытом воздухе. Когда колокольчик был покрыт, то воздушные вибрации прежде всего сообщались тяжелому стеклянному приемнику и потом через приемник—наружному воздуху; следствием этого и было большое уменьшение силы звука. Действие водорода на голос служит также примером этого. Голос образуется вследствие того, что воздух выталкивается из легких через орган, называемый гортанью. При своем проходе он приводит в сотрясение голосовые связки, которые, таким образом, и производят звук; но когда я наполню мои легкие водородом и буду говорить, то голосовые связки сообщат движение водороду, который передаст его наружному воздуху. Вследствие этой передачи от легкого газа к тяжелому звук ослабевает в значительной степени. Результат этого весьма любопытен. Вы уже составили себе понятие о силе и качестве моего голоса. Я выталкиваю из моих легких воздух и наполняю их хорошо очищенным водородом из этого каучукового мешка. Я усиливаюсь говорить громко, но мой голос удивительно как ослабел в силе и удивительно как изменился в качестве. Вы слы-

шите, что он сделался глухим, жестким, выходящим как бы из-под земли,—иначе я не могу его описать.

Сила звука зависит от плотности воздуха, в котором производится звук, а не от плотности того воздуха, в котором он слышится ¹⁾. Отметим в долине Шамони по поверхности земли прямую линию, равную расстоянию от моста в Шамони до вершины Монблана, и пусть два наблюдателя станут один на вершине горы, а другой на конце измеренной линии: звук выстрела, сделанный из пушки на мосту, доходил до обоих наблюдателей с одинаковой силой, хотя в первом случае звук поднимался вверх через более редкий воздух горы, тогда как в другом случае он распространялся по плотному воздуху долины. Зарядите одинаковым зарядом две пушки и выстрелите из одной в Шамони, а из другой на вершине Монблана; тогда выстрел, сделанный в плотном воздухе внизу, будет слышен на вершине, между тем как выстрел, сделанный в разреженном воздухе на вершине, не будет слышен внизу, потому, что звук, получивший начало в более плотном воздухе, сильнее звука, образующегося в разреженном воздухе.

§ 3. Сила звука. Закон обратных квадратов.

Звуковая волна, произведенная взрывом нашего шара, распространяется во все стороны, и движение, вызванное взрывом, сообщается постоянно увеличивающейся массе воздуха. Очевидно, что это не может происходить без ослабления движения. Вообразите себе концентрический слой воздуха известной плотности с радиусом в 1 метр, считая от центра взрыва. Воздушный слой такой же плотности, но с вдвое большим радиусом будет содержать в себе вчетверо большее количество вещества. Если его радиус будет в 3 метра, то в нем будет содержаться в 9 раз больше вещества; если радиус будет в 4 метра, то в нем будет в 16 раз больше вещества и т. д. Таким образом, количество вещества, приводимого в движение, увеличивается пропорционально квадрату расстояния от центра взрыва. Сила или «громкость» звука ослабевает в такой же пропорции. Мы выражаем этот закон, говоря, что сила звука изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния.

Теперь взглянем на предмет с другой точки зрения. Механическое действие пули, бьющей в цель, зависит от двух условий: от веса пули и от скорости, с какою она движется. Действие ее пропорционально весу и квадрату скорости. Доказательство этого закона легко, но оно относится скорее к обыкновенной механике, чем к нашему настоящему предмету. Но что справедливо относительно пули, бьющей в цель, то справедливо и относительно воздушной частички, толкающей барабанную перепонку уха. Остановите ваше внимание на частичке воздуха, когда через нее проходит звуковая волна; она выталкивается из своего положения покоя к соседней частичке и движется сначала ускоренным

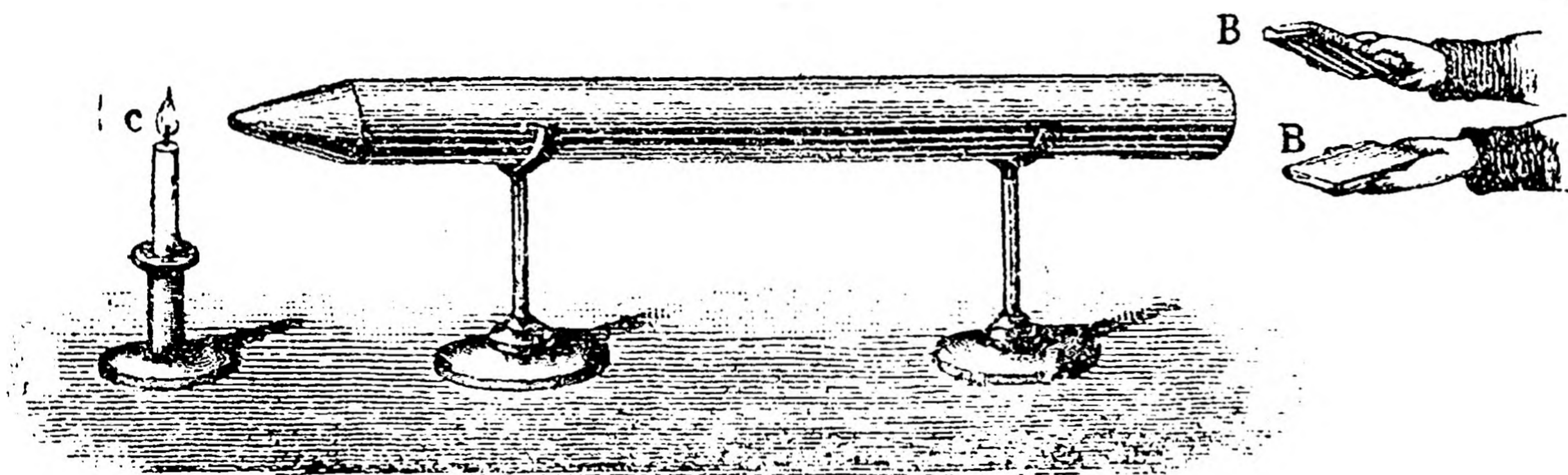
¹⁾ Poisson, Mécanique, vol. II, p. 707.

движением, а потом замедляющимся. Силе, которая толкает ее вперед, противодействует сила упругости воздуха, которая, наконец, останавливает движение частички и заставляет ее идти назад. Скорость частички в известной точке ее пути представляет максимум. Сила звука пропорциональна квадрату этой максимальной скорости.

Расстояние, по которому воздушная частичка движется взад и вперед, когда по ней проходит звуковая волна, называется амплитудой, шириной или размахом качания. Таким образом, сила звука пропорциональна квадрату амплитуды.

§ 4. Ограничение звуковых волн трубками.

Это ослабление звука по закону обратных квадратов не имело бы места, если бы звуковая волна была ограничена таким образом, чтобы не было ее бокового рассеяния. Мы можем достигнуть этого, пропуская волну через трубку с гладкою внутреннею поверхностью; и волна, таким образом ограниченная, может быть передана через большие рас-



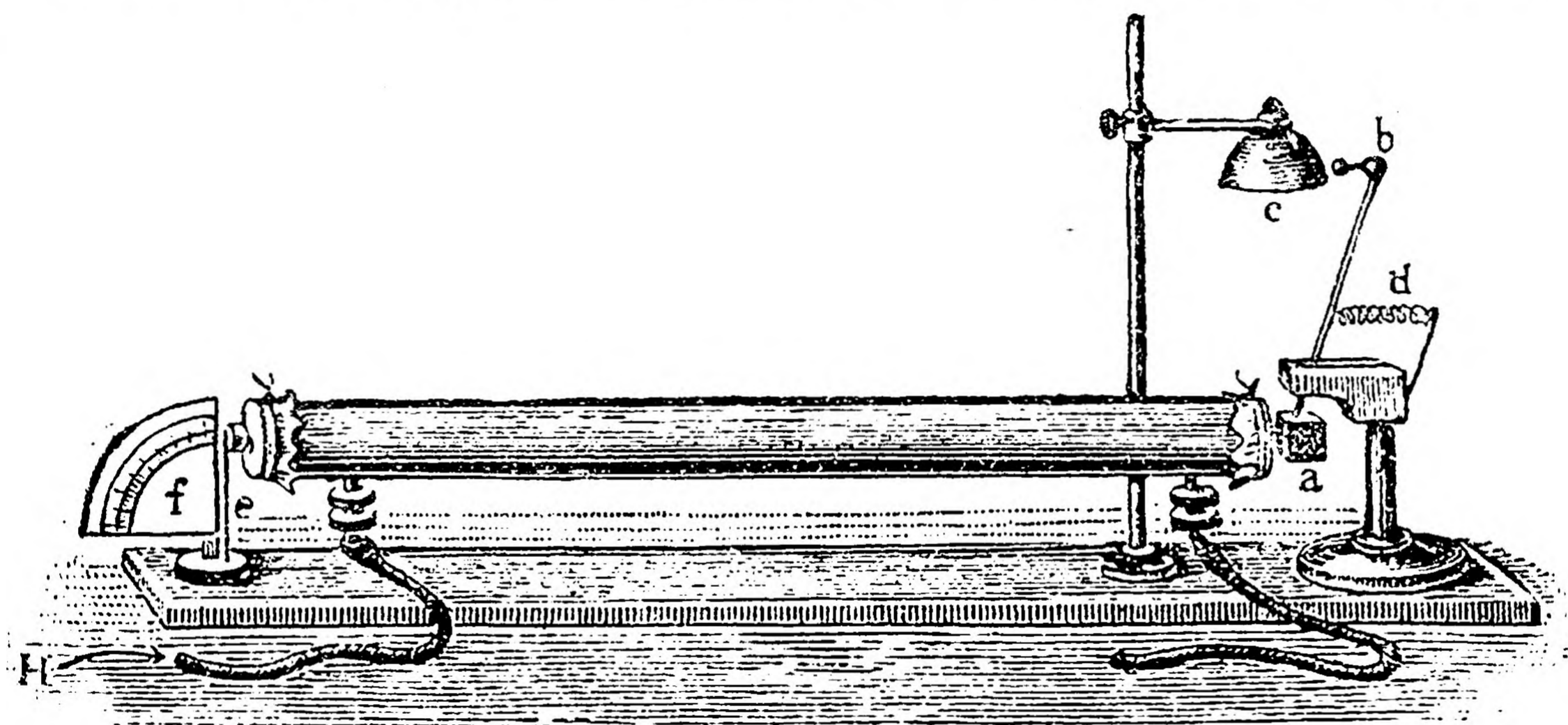
Фиг. 5.

стояния с небольшим ослаблением ее силы. В один конец этой оловянной трубы в 15 футов длиною я шепчу так тихо, что меня едва слышат лица, находящиеся подле меня, но слушающие меня на другом конце этой трубы слышат меня очень явственно. Я помещаю мои карманные часы на одном конце трубки. Лицо, стоящее на другом конце, слышит тиканье их, хотя этого не может слышать никто другой. На отдаленном конце трубы я помещаю теперь горящую свечку *c* (фиг. 5). Если я хлопну руками на этом конце, то пламя мгновенно становится меньше. Оно, конечно, не потухло, но сделалось значительно слабее. Когда я хлопну двумя книгами *BB'*, то этим задую свечу ¹⁾. Этим грубым способом вы можете наблюдать скорость, с какою распространяется звуковая волна. В тот момент, как я хлопаю, пламя тухнет, нет заметного промежутка между хлопаньем и потуханьем пламени. Я не говорю, что время, употребляемое звуком на прохождение через эту трубу, неизмеримо коротко, но говорю только то, что промежуток слишком

¹⁾ Для того, чтобы сосредоточить удар на пламени, трубка оканчивается воронкой.

короток для того, чтобы быть замеченным нашими чувствами. Чтобы доказать вам, что здесь действует колебание, а не дуновение воздуха, я наполняю один конец трубы дымом горячей бумаги. Когда я хлопну книгами, то из другого конца не выйдет ни малейшего следа этого дыма. Колебание прошло через дым и через воздух, но не увлекло с собой ни того, ни другого.

Очень действительный способ показать, как волна распространяется по воздуху, придуман моим ассистентом. Оба конца оловянной трубки в 5 метров длиною закрыты натянутыми на них резиновыми пластинками. На одном конце *e* (фиг. 6) у самой резинки находится молоток с пружинной рукояткой, а на другом конце — механизм для звона в колокольчик *c*. Если оттянуть назад молоток *e* на расстояние, измеряемое



Фиг. 6.

по разделенному на градусы кругу *f*, и затем отпустить его, то возбужденная его ударом волна пройдет по трубке, ударит в пластинку на другом конце, толкнет пробковый наконечник *a* рычажка *ab* и заставит молоточек *b* ударить в колокольчик. При этом ясно видна быстрота распространения. Если, вместо воздуха, впустить в трубку водород, входящий по каучуковой трубке *H*, то колокольчик не звонит, потому что молоточек не ударяет в него.

Знаменитый французский естествоиспытатель Био наблюдал прохождение звука через пустые водопроводные трубы в Париже и нашел, что он мог вести разговор тихим голосом через железную трубу в 936 метров длины. Самый тихий шопот мог быть слышен на таком расстоянии, а выстрел из пистолета на одном конце трубы даже задувал горящую свечку на другом конце ее.

§ 5. Отражение звука. Сходство со светом.

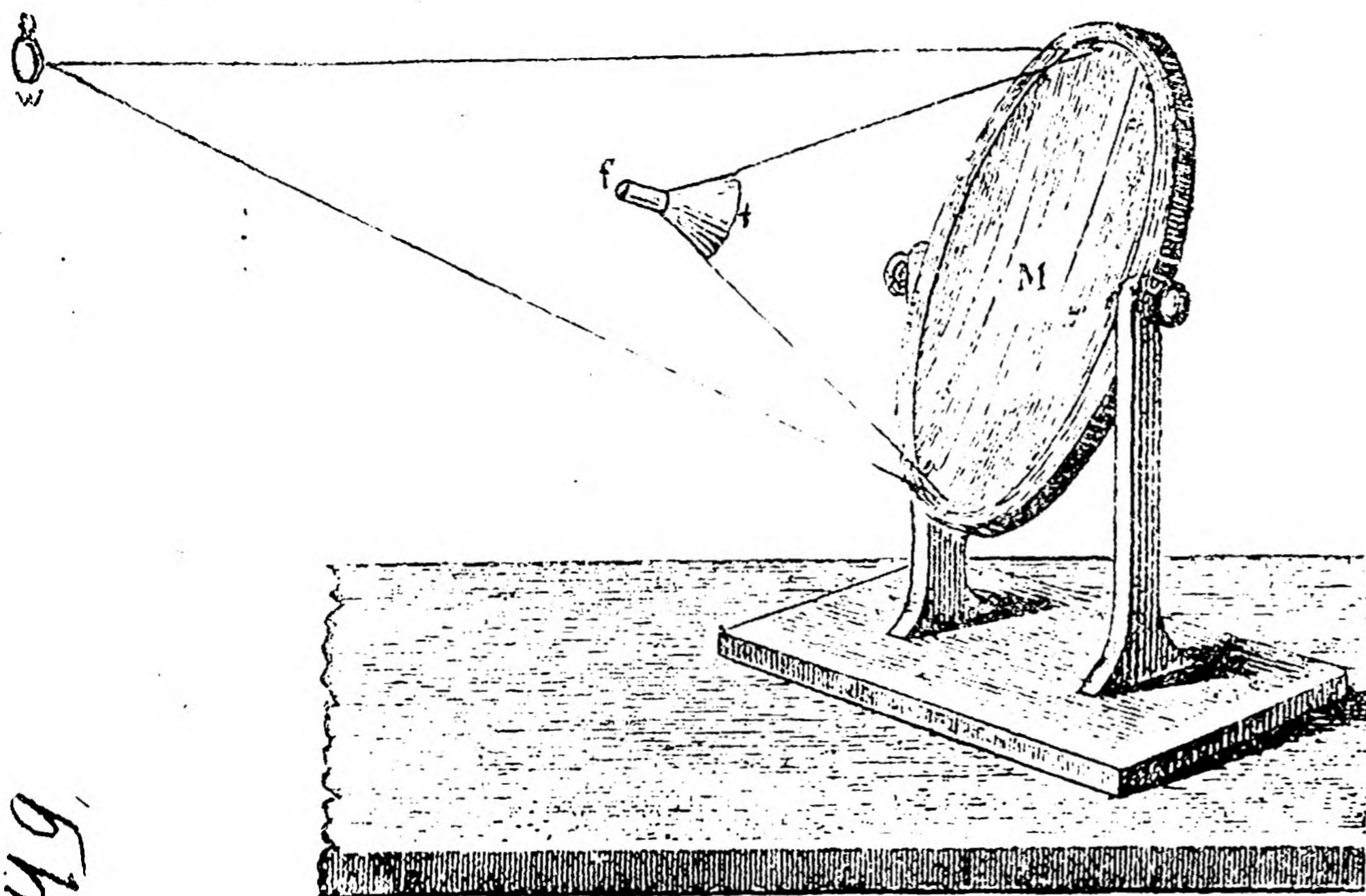
Разъясненное нами свойство звука совершенно сходно с подобным же свойством света и лучистого тепла. Эти последние, подобно звуку, суть также волнообразные движения. Подобно звуку, они рассеиваются в пространстве, уменьшаясь в силе по тому же самому закону. Подобно звуку, свет и лучистое тепло, когда они передаются через трубку

отражающей внутренней поверхностью, могут быть переданы на большие расстояния с сравнительно малой потерей. В самом деле, каждый опыт с отражением света имеет аналогию с отражением звука. Позвольте мне объяснить эту аналогию одним или двумя добавочными опытами. На той верхней галлерее вы видите электрическую лампу, помещенную подле стенных часов этой аудитории. Ассистент на галлерее зажигает лампу и направляет ее блестящий луч на зеркало M (фиг. 7), находящееся сзади стола. Вследствие отражения от зеркала, расходящийся луч превращается в этот блестящий световой конус. Я отмечаю точку схождения лучей (фиг. 7) ff и, когда лампа потухнет, помещаю в эту точку мое ухо. В ней собираются все звуковые волны, идущие от часов и отражающиеся от зеркала; и я слышу теперь тиканье их так, как будто бы оно шло не от часов, но от зеркала. Затем я останавливаю стенные часы и помещаю карманные часы на то место, на котором стояла сейчас электрическая лампа w (фиг. 7). И на этом большом расстоянии я ясно слышу тиканье карманных часов. Моему слуху много помогает то, что я ввел в него конец стеклянной воронки (фиг. 7) f , которая действует, как слуховая труба. Кроме того, мы знаем из оптики, что предмет и его изображение могут поменяться своими местами. Я помещаю свечку в этом нижнем фокусе (фиг. 7), в f ; вы видите ее изображение вверху на галлерее, в w , и мне стоит только повернуть зеркало на его подставке, чтобы заставить изображение упасть на кого-нибудь из сидящих в первом ряду на галлерее. Когда я возьму прочь свечку и помещу на ее место часы (фиг. 8), в w , то лицо, на которое падало изображение свечки, ясно услышит тиканье часов. Когда уху помогает стеклянная воронка, то отраженные тиканья часов в нашем первом опыте так сильны, что кажется, как будто бы что-нибудь колотит в барабанную перепонку, между тем как прямое тиканье едва слышно.

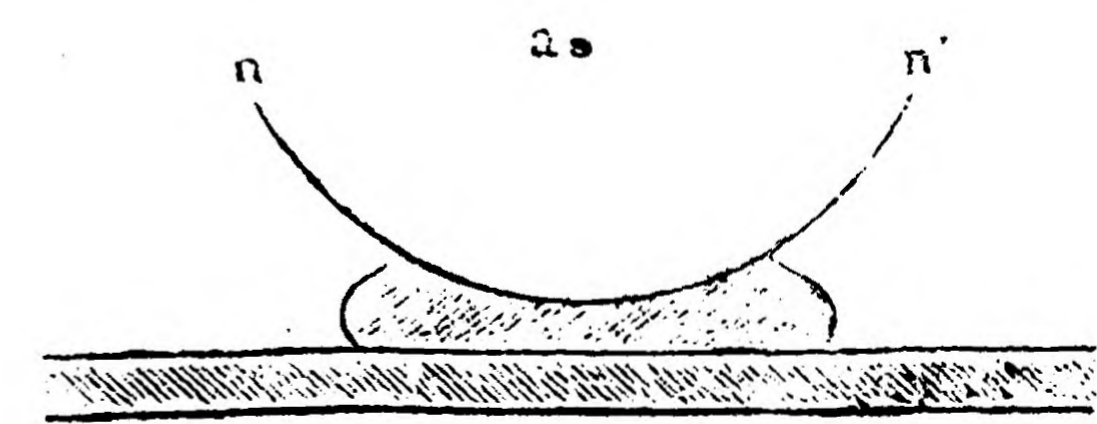
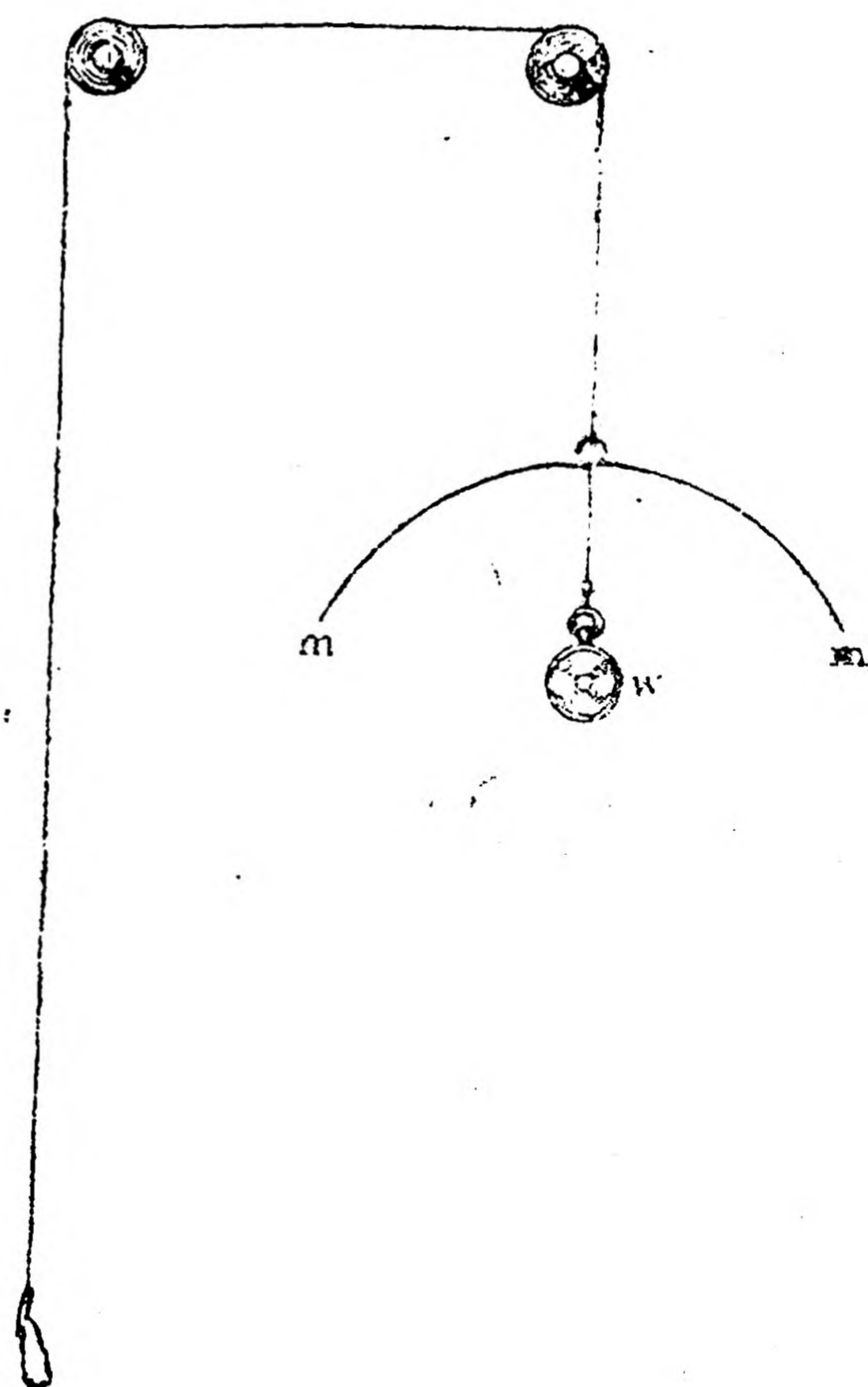
Вот, наконец, два параболические зеркала; одно из них nn' (фиг. 9) лежит на столе, а другое mm' привешено к потолку этой залы; расстояние между ними составляет 8 метров. Сначала я помещаю в фокус нижнего зеркала a концы угольков электрической лампы и произвожу между ними свет. Прекрасный блестящий цилиндр, подобно колонне, поднимается к верхнему зеркалу, которое сводит параллельные лучи в фокус. Вы видите в этом фокусе точку, блестящую, как солнечный свет, и происшедшую вследствие отражения света от поверхности часов w , повешенных там. Я беру прочь электрический свет; часы тикают, хотя в настоящем моем положении я их не слышу. Однако, в этом нижнем фокусе a сходится вся сила всех звуковых волн. Когда я помещу ухо в точке a , то тиканье часов будет слышно так, как будто бы часы были у меня в руке; в этом случае, как и в прежнем опыте, кажется, как будто звук идет не от самих часов, а от нижнего зеркала ¹⁾.

¹⁾ Рассказывают, что звон колокола, находившегося на возвышенности на Гельголанде, не был слышен в городе вследствие большого расстояния. Параболический рефлектор, помещенный сзади колокола таким образом, что он отра-

Дугообразные своды и потолки действуют на звук, как зеркала. В нашей лаборатории, например, когда кипящий чайник находится в известном положении, то кажется, что звуки идут не от огня, над которым он помещен, но от потолка. Этим путем были открыты роковые секреты, и один пример этого рассказал сэр Джон Гершель (*Encyclop. Metrop.*, стат. «Звук»). В одном из кафедральных соборов Сицилии исповедаля была помещена таким образом, что шепот исповедывав-



Фиг. 7.



Фиг. 9.

Фиг. 8.

шихся отражался от вогнутого потолка и собирался в фокус в отдаленном месте здания. Случайно этот фокус был открыт, и некоторое время лицо, открывшее его, доставляло удовольствие себе и своим друзьям подслушиванием откровенностей, которые предназначились для одного

жал звуковые волны по направлению длинной спускавшейся вниз улицы, произвел то, что звук колокола слышен был во всякое время. Это наблюдение нуждается в подтверждении.

м.в. 10049

священника. Однажды, говорят, занимала место на исповедальном стуле его жена; в это время он и его друзья узнали секреты, которые были далеко не забавны для одного из них.

Когда существует достаточный промежуток между прямым звуком и отраженным, то мы слышим последний, как эхо.

Звук, подобно свету, может отражаться последовательно несколько раз, и как отраженный свет при этих обстоятельствах становится постепенно слабее для глаза, так и последовательно повторяющееся эхо становится постепенно слабее для уха. В горных странах это повторение и замирание звука производит удивительные и приятные эффекты. Посещавшие Килларней помнят прекрасно эхо в скалистой долине Дунлоэ. Когда играют на трубе в известном месте этой долины, то звуковые волны достигают до уха последовательно после одного, двух, трех отражений от близлежащих скал, и таким образом замирают в самых приятных отголосках. В Швейцарии, близ Розендау, в глубокой пропасти, называемой Охсенталь и образуемой большими скалами Энгельгернер, эхо повторяется удивительным образом. Звук альпийского рожка, отразившись от скал Веттергорна или Юнгфрау, слышится сначала глухо; но затем, при следующих отражениях, звуки становятся более нежными и подобными звукам флейты, и постепенное уменьшение силы звука производит такое впечатление, как будто источник звука удаляется все дальше и дальше в ледяные и снеговые пустыни. Повторение это также отчасти зависит от того, что отражающие поверхности находятся на различных расстояниях от слушающего.

В больших пустых помещениях отражение звука иногда производит очень любопытные эффекты. Когда вы, напр., стоите на галлерее в парижской бирже, то слышите смешанный шум голосов волнующейся толпы, стоящей внизу. Вы видите все их движения, движения их губ, так же как движения их рук; вы знаете, что они говорят, и часто говорят с большою живостью, но вы не можете разобрать, что они говорят. Голоса их смешиваются с их эхом в такой хаос шума, из которого не может выделиться ни один понятный звук. Эхо комнаты сильно уменьшается вследствие мебелировки. Присутствие слушателей также может сделать понятною речь, которая в пустой зале была бы плохо слышна вследствие того, что ясность голоса уничтожалась бы его отголосками. Когда я 16 мая 1865 г. должен был читать лекции в сенатском доме Кембриджского университета, то предварительно сделал несколько опытов для того, чтобы определить, как громко я должен говорить, чтобы быть слышным во всей зале, и очень испугался, найдя, что мой друг, стоявший в отдаленном месте залы, не мог следить за моими словами вследствие эха. Однако, собравшиеся слушатели так ослабили звуковые волны, что эха почти не было, и мой голос был ясно слышен во всех частях сенатского дома.

Звуки отражаются также от облаков. Араго сообщает, что когда небо ясно, тогда звук выстрела из пушки на открытом месте бывает короткий и резок; между тем как присутствие облака достаточно для того, чтобы произвести эхо, подобное раскатам далекого грома. Этот пример

воздушных эхо будет рассмотрен подробнее впоследствии, и мы увидим, что заключение Араго требует поправки.

Сэр Джон Гершель в своей превосходной статье «Звук» в *Encyclopaedia Metropolitana* приводит, между прочим, следующие примеры эха. Эхо в парке Вудсток повторяет 17 слогов днем, а ночью 20. Эхо на берегах озера Дель-Луно над водопадами Терни повторяется 15 раз. В церкви аббатства св. Альбана тиканье часов на одном конце слышно в другом. В Глостерском соборе галлерея, имеющая осьмиугольную форму, передает шопот на 5 метров по ширине церкви. В одной галлерее в соборе св. Павла малейший звук переносится с одной стороны купола на другую, но не слышен ни в одном из промежуточных пунктов. На острове Вайте в *Clarisbrook Castle* находится колодезь в 70 метров глубины и 4 ширины. Внутренность его выложена гладкой облицовкой; когда иголка упадет в колодезь, то слышно, как она ударяется о воду. Я могу прибавить, что если крикнуть или кашлянуть в этот колодезь, то происходит звон, продолжающийся несколько времени ¹⁾.

§ 6. Преломление звука.

Другая важная аналогия между звуком и светом была указана Зондгаусом ²⁾. Я зажигаю нашу электрическую лампу и ставлю перед нею большую прекрасную чечевицу; чечевица заставляет лучи света, падающие на нее, уклоняться от их прямого и расходящегося направления и сводит их в этот сходящийся конус, являющийся за ней. Это преломление светового луча есть следствие замедления, происшедшего в движении света при проходе его через стекло. Подобным образом преломится и звук, когда мы заставим его пройти через чечевицу, замедляющую его движение. Мы составим такую чечевицу, наполнив тонкий шар каким-нибудь газом, который тяжелее воздуха. Вот, напр., шар из коллоидума *B* (фиг. 10), наполненным газом, угольной кислотой; стенки его так тонки, что они легко уступают каждому толчку, ударяющему их, и передают толчок заключающимся внутри газам ³⁾. Затем я вешаю мои карманные часы близ чечевицы, сзади которой на расстоянии четырех или пяти футов я помещаю мое ухо, вооруженное стеклянной воронкой *ff'*. Двигая головой в разные стороны, я скоро нахожу место, в котором тиканье часов звучит особенно громко. Действительно, это место есть фокус чечевицы. Если я отодвину мое

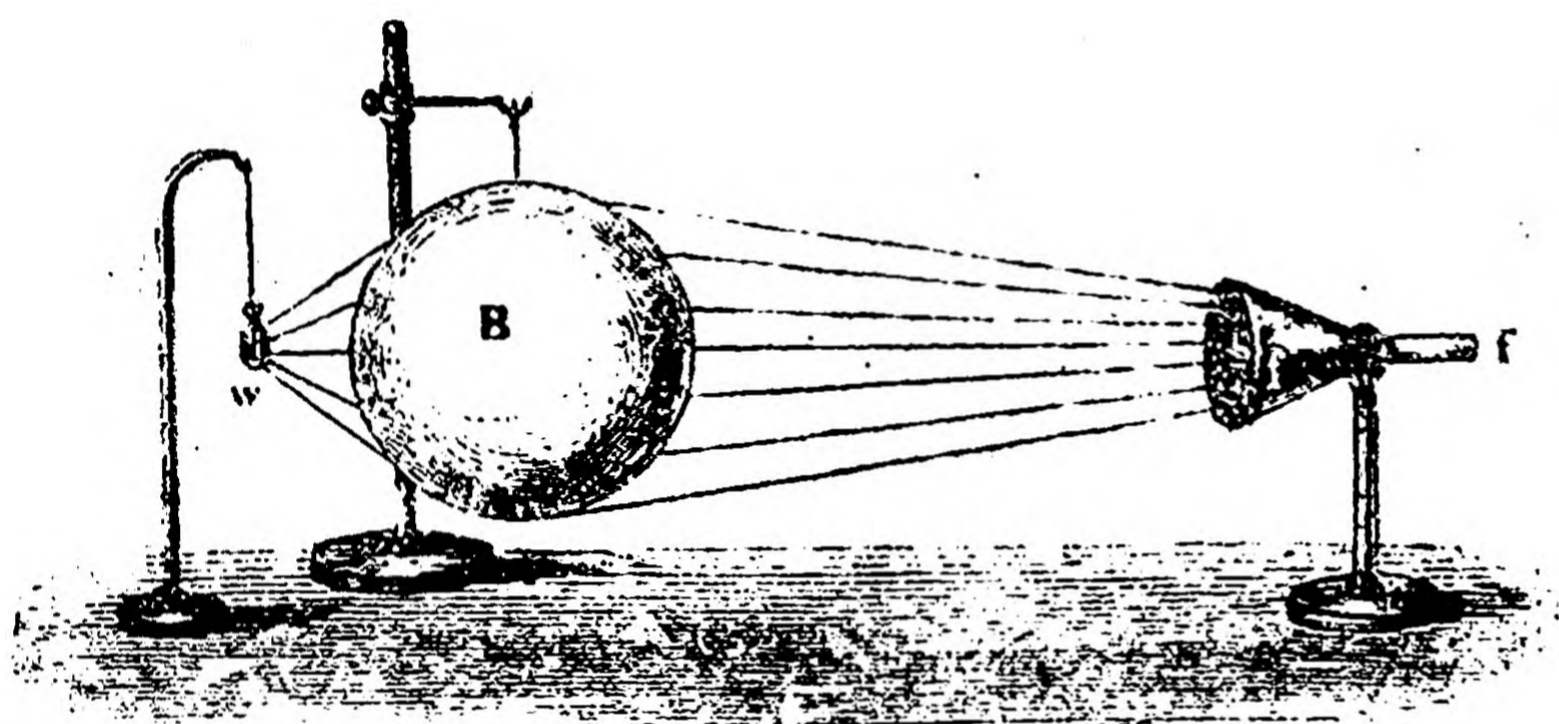
¹⁾ Уитстон, становясь как раз подле верхней части стены лондонского Колоссеума, круглого здания, имеющего 42 метра в диаметре, услышал, что слово, произносимое им, повторялось несколько раз. Простое восклицание звучало подобно громкому смеху, а разрывание бумаги отдавалось как шум падающего града.

²⁾ *Reggendorff's Annalen*, vol. LXXXV, p. 378; *Philosoph. Mag.* vol. V p. 73.

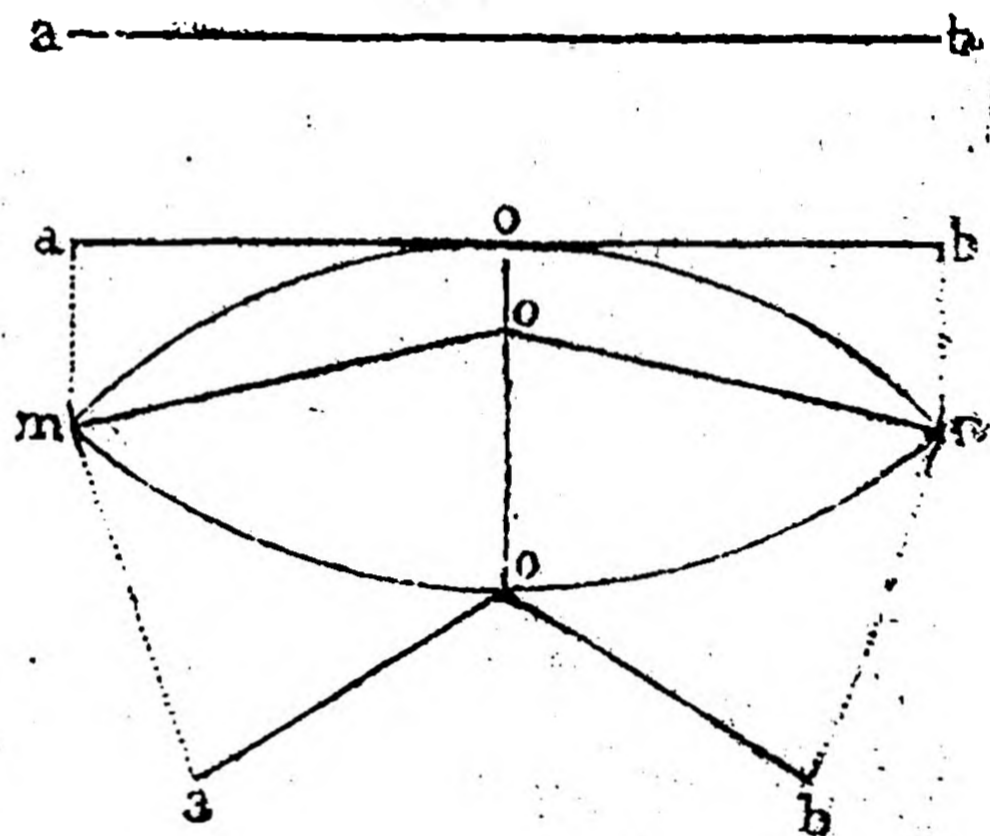
³⁾ Тонкие каучуковые шары представляют также превосходные звуковые чечевицы.

ухо от этого фокуса, то сила звука ослабевает; если мое ухо остается в фокусе, но самый шар отодвигается со своего места, то тиканье также ослабевает; когда шар снова поставят на место, то тиканье получает прежнюю силу. Действительно, чечевица дает возможность ясно слышать тиканье, между тем как оно совершенно неслышно для невооруженного уха ¹⁾).

Каким образом чечевица заставляет сходиться звуковые волны, это можно понять из фиг. 11. Пусть mn будет разрез звуковой чечевицы и ab часть звуковой волны, приближающейся к ней с некоторого расстояния. Средняя точка волны o первая коснется чечевицы и первая замедлится ею. В то время как концы волны a и b , которые все еще движутся по воздуху, достигают шара в m и n , средняя точка o , продолжая свой путь через более тяжелый газ, достигнет только точки o' .



Фиг. 10.



Фиг. 11.

Таким образом волна переломилась в o' и так как направление движения перпендикулярно к фазу волны, то обе половины волны идут одна к другой. Схождение двух половин волны еще увеличивается, когда они оставляют чечевицу, потому что когда o' достигнет o'' , два конца волны, a и b , пройдут вперед на большее расстояние, т.-е. дойдут до a' и b' . Вскоре затем две половины волны пересекут одна другую или, другими словами, придут в фокус, и воздух в фокусе получит движение, которое есть сумма движений двух волн ²⁾).

§ 7. Диффракция звука; примеры, представляемые большими взрывами.

Когда длинная морская волна встречает на своем пути уединенную скалу, то она охватывает ее кругом и поднимается на скалу. Подобного рода факты побудили Ньютона отвергнуть волнообразную теорию света. Он думал, что если бы свет был продуктом волнообразного движения, то мы не имели бы теней, потому что волны света распространялись бы

¹⁾ Более полное разъяснение преломления звука дано в лекции VI.

²⁾ Для простоты я показал волну сломанною в o' и обозначил обе волны прямыми линиями, между тем как на деле волна имеет кривую поверхность с вогнутостью, обращенною к направлению ее движения.

вокруг непрозрачных тел, как водяная волна распространяется вокруг скалы. Впоследствии было доказано, что и волны света огибаются вокруг непрозрачных тел; но нам нет надобности заниматься этим здесь. Звуковая волна также огибается вокруг препятствия, хотя, распространяясь по воздуху за препятствием, она ослабевает в силе, и препятствие производит таким образом неполную звуковую тень. Всякий, кто когда-нибудь слышал, как поезд железной дороги проходит через выемки и длинные туннели, заметил большие изменения в силе звука. Стоящий на пути распространения звука холм, что бывает, напр., в Альпах, значительно ослабляет звук водопада; он может даже совершенно уничтожить звук колокольчиков на коровах ¹⁾. Однако, как я сказал, звуковая тень бывает только неполною, и человек, следящий при стрельбе за тем, как попадают в цель, постоянно слышит выстрел, хотя сам хорошо защищен от пуль. Самый поразительный пример подобной диффракции звуковой волны, какую мне удавалось видеть, был в Эрите после страшного взрыва порохового магазина, случившегося там в 1864 г. Деревня Эрит находится в нескольких милях расстояния от магазина, но в ней почти во всех домах были разбиты окна; и что всего замечательнее, окна, обращенные в сторону, противоположную источнику взрыва, пострадали почти так же, как и те, которые были обращены прямо к нему. В церкви Эрита оконные рамы были из свинца и вследствие этого были до некоторой степени гибки и потому давали окнам возможность уступать давлению, отчего и разбилось не так много стекол. Все окна в церкви с передней и задней сторон были вогнуты в н у т р ь. Действительно, когда звуковая волна достигла церкви, то она разделилась и пошла направо и налево, и с этого мгновения здание было окружено поясом сильно сжатого воздуха, который вдавил все его окна в н у т р ь. Воздух, находившийся в церкви, после сжатия, конечно, расширялся и таким образом, стремился привести окна в их первоначальное положение. Однако, вдавление окон произвело только небольшое сгущение всей массы воздуха внутри церкви; сила обратного давления была, таким образом, слаба в сравнении с силой вдавления и недостаточна для того, чтобы уничтожить действие, произведенное последней ²⁾.

¹⁾ Прямолинейное распространение звука можно было легко наблюдать во время большого взрыва склада снарядов в селе Хорошове близ Москвы летом 1920 года. Окна домов, расположенных хотя и близко к месту взрыва, но в низменных местах, пострадали сравнительно мало, тогда как в более удаленных, но возвышенных частях Москвы значительное количество стекол в домах оказались выбитыми. П р и м. р е д.

²⁾ Взрыв нагруженной порохом барки в канале Regents Park тоже произвел действия, подобные описанным в тексте. Звуковая волна обогнулась вокруг домов и разбила стекла на задних сторонах, а схождение различных частей волны в некоторых местах обозначилось усиленным местным действием. Вблизи того места, где произошел взрыв, несгоревший порох попал в звуковую волну, и, как следствие этого, раскрытый дом сторожа был окружен черной полосой угля.

§ 8. Скорость звука: значение плотности и упругости воздуха.

Два условия определяют скорость распространения звуковых волн, именно, упругость и плотность среды, через которую проходит волна. Упругость воздуха определяется давлением, которое он может выдержать или держать в равновесии. На уровне моря это давление равно давлению столба ртути около 760 миллиметров высоты. На вершине Монблана барометрический столб ртути несколько более половины этой высоты и, следовательно, упругость воздуха на вершине этой горы в полтора с лишним раза меньше, чем на уровне моря.

Если бы мы могли увеличить упругость воздуха, не увеличивая в то же время его плотности, то мы увеличили бы скорость звука. Но и оставив упругость неизменною, а уменьшив плотность, мы тоже увеличили бы скорость звука. Если мы будем нагревать воздух в закрытом сосуде, где он не может расширяться, то упругость его увеличится, между тем как его плотность останется неизменною. Через воздух, нагретый таким образом, звук будет распространяться быстрее, чем через холодный воздух. Напротив, когда воздух может свободно расширяться, от нагревания плотность его уменьшается, а упругость его остается неизменною, и через такой воздух звук распространяется быстрее, чем через холодный воздух. Теперь вы понимаете смысл выражения, что скорость звука в воздухе «при температуре точки замерзания» есть 331 метр в секунду. При всякой низшей температуре скорость звука меньше этой, а при всякой высшей — больше. Вертгейм определили скорость звука в воздухе при различных температурах, и вот некоторые из его результатов:

Температура воздуха.	Скорость звука.
0,5° Ц.	331 метр.
2,10 »	332 »
8,5 »	334 »
12,0 »	338 »
25,0 »	346,5 »

При температуре точки замерзания воды скорость звука составляет 331 метр в секунду; при температуре 25,0° она составляет 346,5 в секунду, или разница на 25° производит разницу на 15,5 метров, т.-е. скорость звука на каждые 5 градусов стоградусного термометра увеличивается в секунду почти на 3 метра.

При одинаковой упругости плотность водорода гораздо меньше, чем плотность воздуха, и вследствие этого скорость звука в водороде далеко превосходит скорость его в воздухе. Обратное этому происходит в тяжелом углекислом газе. В нем упругость равна упругости воздуха, а плотность больше, и, следовательно, скорость звука меньше. Если плотность и упругость изменяются в том отношении, какое показывает закон Бойля для воздуха, то действия их должны взаимно уравнове-

живаться, если температура остается постоянною; поэтому скорость звука на вершинах высочайших гор, напр., на Альпах, была бы такая же, как при устье Темзы, если бы эти места имели одинаковую температуру. Но так как воздух вверху холоднее, чем внизу, то действительная скорость звука на вершинах гор меньше, чем на уровне моря. Точным образом этот результат выражается так: скорость прямо пропорциональна квадратному корню упругости воздуха и обратно пропорциональна квадратному корню ~~плотности воздуха~~. Следовательно, так как в воздухе при постоянной температуре упругость и плотность изменяются в одинаковой пропорции и действуют противоположно одна другой, то скорость звука не изменяется от изменения плотности, если оно не сопровождается изменением температуры.

Нет кажется ошибки более, чем та, вследствие которой предполагают, что скорость звука увеличивается вследствие увеличения плотности. Эта ошибка происходит от неверного понимания того факта, что в твердых и жидких телах скорость звука больше, чем в газах. Но в этих телах скорость распространения звука зависит от их большей упругости сравнительно с их плотностью. Когда все прочие условия остаются неизменными, то увеличение плотности во всяком случае производит уменьшение скорости звука. Если бы упругость воды, которая измеряется ее сжимаемостью, была равна упругости воздуха, то скорость звука в воде вместо того, чтобы превышать более чем в четыре раза скорость звука в воздухе, составляла бы только небольшую дробь этой скорости. Поэтому всегда нужно иметь в виду плотность и упругость, так как скорость звука зависит не от одной какой-нибудь из них, а от отношения между ними. Действие небольшой плотности и высокой упругости обнаруживается поразительным образом в светоносном эфире, который передает вибрации света со скоростью уже не футов, а со скоростью почти 300.000 километров в секунду¹⁾.

Что касается определения скорости звука в воздухе, то нам нужны были бы целые часы, чтобы только просто перечислить усилия, сделанные для получения точных чисел. Вопрос этот занимал внимание естествоиспытателей Англии, Франции, Германии, Италии и Голландии. Но французским и голландским ученым мы обязаны применением всех тонкостей экспериментального искусства к решению этой проблемы. Они вполне устранили влияние ветра, они приняли в расчет барометрическое давление, температуру и гигрометрическое состояние. Звук исходил одновременно из двух отдаленных станций и таким образом должен был проходить от станции к станции через тот же самый воздух. Расстояние между станциями было определено точными тригонометрическими наблюдениями, и были придуманы средства для измерения с крайней точностью времени, требуемого звуком на прохождение от

¹⁾ В настоящее время принимают, что свет представляет собою не просто механическое колебание упругого эфира, но есть явление электромагнитное: поэтому вопросы о плотности эфира и упругих свойствах его пока не могут считаться решенными.

одной станции к другой. Это время, выраженное в секундах и разделенное на расстояние, выраженное в метрах, дало 331 метр в секунду для скорости звука в воздухе при температуре 0° Ц.

Время, употребляемое светом на прохождение всех земных расстояний, на практике можно считать ничтожным. В опытах, о которых мы говорим, момент выстрела обозначался появлением огня и время, употребленное звуком на прохождение от станции до станции, составляло промежуток между появлением огня и прибытием звука. Когда скорость звука в воздухе определена, тогда легко можно было применить ее к определению расстояний. Напр., замечая промежуток между появлением блеска молнии и прибытием сопровождающего ее громового удара, мы можем сразу определить расстояние места громового разряда. Только когда промежуток между молнией и громом короток, можно бояться опасности от молнии.

§ 9. Теоретическая скорость, вычисленная Ньютоном. Поправка Лапласа.

Мы переходим теперь к одному из самых трудных пунктов во всей теории звука. Скорость звука в воздухе была определена прямыми опытами; но зная упругость и плотность воздуха, можно, вовсе не прибегая к опытам, вычислить скорость, с какою распространяется в нем звуковая волна. Сэр Исаак Ньютон сделал это вычисление и нашел, что скорость эта при температуре точки замерзания составляет 278,5 метров в секунду. Это число почти на две десятых меньше скорости, определенной прямыми наблюдениями; и потому были сделаны самые любопытные предположения, чтобы объяснить это разногласие. Сам Ньютон высказал догадку, что звук при своем распространении требует известного времени только для перехода от одной частички воздуха к другой, но что он движется мгновенно через самые частички. Он предполагал затем, что только $\frac{1}{6}$ линии, по которой проходит звук, занята воздушными частичками, и таким образом думал объяснить недостающую часть в вычисленной им скорости. Но уже самая искусственность и хитроумие этого предположения были достаточны для его опровержения; были высказаны и другие теории, но великий французский математик Лаплас первый вполне разрешил загадку. Я постараюсь поближе познакомить вас с его решением.

Вот у меня в руке крепкий стеклянный цилиндр (фиг. 12), верно сделанный и очень гладкий внутри. В этот цилиндр, запертый на одном конце, входит герметически поршень. Толкая поршень вниз, я сгущаю под ним воздух, и в это время развивается теплота. Укрепивши на конце поршня кусок трута, я могу зажечь его теплотой, происшедшей при сжатии. Наплавивши кусок ваты сероуглеродом и прикрепивши ее к поршню, я нажимаю последний вниз, и в это время появляется внутри цилиндра свет, происходящий от воспламенения паров сероуглерода. Это доказывает, что когда сжимается воздух, то образуется при этом теплота. Другим опытом я могу доказать вам, что, напротив, при раз-

режения воздуха образуется холод. Этот медный ящик содержит в себе некоторое количество сжатого воздуха. Я открываю кран и выпускаю воздух на чувствительный термометр; понижение ртути в термометре показывает охлаждение воздуха.

Все, что вы слышали относительно распространения звуковой волны по воздуху, вероятно, еще свежо в вашей памяти. Когда волна подвигается вперед, то она сближает частички воздуха, и от этого сгущения воздуха происходят два результата. Во-первых, его упругость увеличивается уже от одного увеличения его плотности. Во-вторых: его упругость увеличивается еще вследствие теплоты, происшедшей от сжатия. То первое изменение упругости, происшедшее от изменения в плотности, только и было принято Ньютоном в соображение; но он совершенно упустил из вида второе увеличение упругости, происходящее от второй из указанных причин, теплоты. Таким образом, кроме упругости, входившей в вычисление Ньютона, мы имеем еще добавочную упругость, происходящую от изменения в температуре, произведенного самим звуком; когда мы примем в соображение обе упругости, тогда вычисленная и наблюденная скорости звука будут вполне согласны между собой.

Но здесь без должной осторожности мы может впасть в важную ошибку. В самом деле, занимаясь исследованием явлений природы, ум должен быть наготове обнять все ее условия; иначе скоро окажется, что наши мысли несогласны с ее фактами. Увеличение скорости звука, происходящее от изменений в температуре, произведенных самой звуковой волной, совершенно отлично от увеличения, которое происходит от нагревания всей массы воздуха. Средняя температура воздуха не изменяется от звуковых волн. Мы не можем иметь сжатой части волны, не производя в то же время связанной с нею разреженной части ее. Но при разрежении температура воздуха понизилась настолько же, насколько она повысилась при сжатии. Когда мы предположим, что атмосфера разделена на такие сгущения и разрежения с соответствующими им изменениями температуры, то приходящий извне звук, проходя через атмосферу, будет настолько же замедляться в разрежениях, насколько ускоряться в сгущениях, и таким образом от подобного распределения температуры не могло бы произойти никакого изменения в средней скорости звука.

Откуда же, в таком случае, берется увеличение скорости, показанное Лапласом? Я просил бы вас следить за мной с напряженнейшим вниманием в то время, как я буду объяснять вам этот запутанный пункт. Когда воздух сжимается—он становится меньше по объему; когда же давление уменьшается,—объем увеличивается. Сила, которая противодействует сжиманию и которая производит расширение, есть сила упругости воздуха. Таким образом, внешнее давление сближает между собой частички воздуха; но их собственная сила упругости отталкивает их одну от другой, а в равновесии частички воздуха находят ся тогда, когда уравниваются между собой эти две силы. Поэтому внешнее давление служит мерою силы упругости. Пусть средний ряд

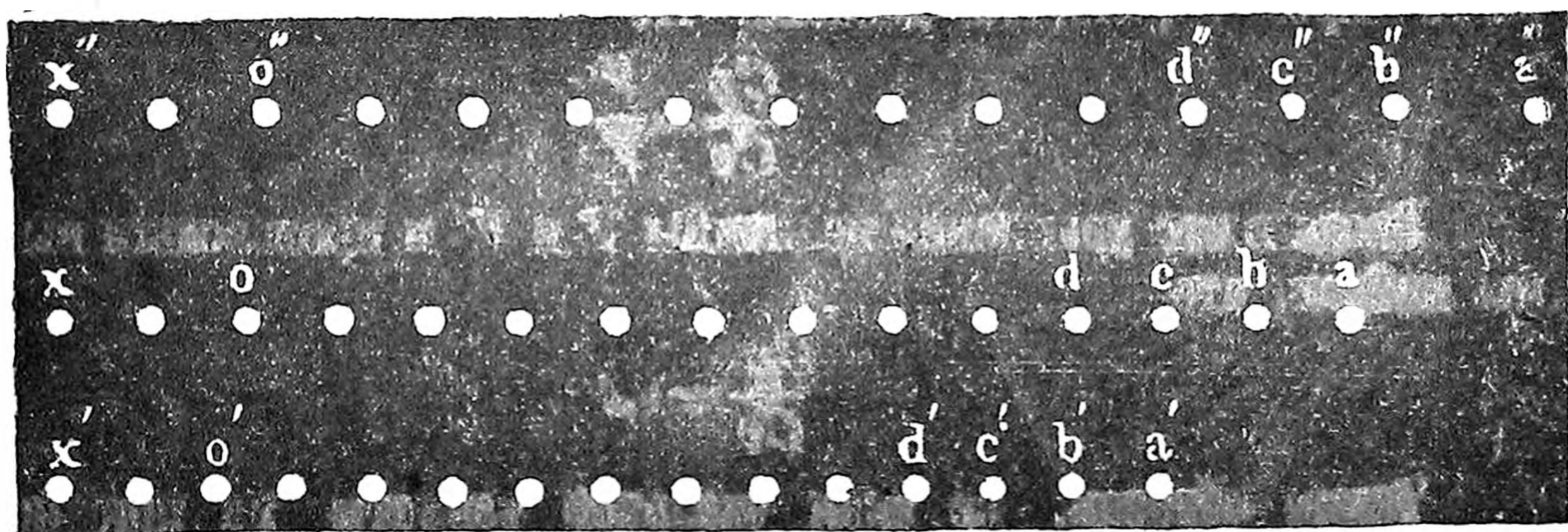
точек (фиг. 13), представляет ряд воздушных частичек между a и d , в состоянии покоя. Так как между частичками действует сила упругости, то если одна из них будет сдвинута с своего положения покоя, то движение это передастся через весь ряд. Предположим теперь, что частичка a вибрациями камертона или какого-нибудь другого звучащего тела толкнута по направлению к x , так что она займет, наконец, положение a' в нижнем ряду частичек. В тот момент, когда начинается движение a , это движение передается b ; в следующий затем момент b передает движение c , $c—d$ и т. д. Таким образом, в то время, как a достигнет a' , движение распространится до какой-нибудь точки o' на линии частичек, точки, более или менее отстоящей от a' . Весь ряд частичек между o' и a' находится в состоянии сгущения. Расстояние между a' и o' , на которое распространилось движение во время прохода частички от a до a' , зависит от упругой силы этих частичек. Обратите ваше внимание на какие-нибудь две из этих частичек, напр., на a и b . Упругая сила их может быть представлена в виде спиральной пружины, и ясно, чем слабее и мягче пружина, тем медленнее будет передаваться движение от a к b ; между тем как чем туже и тверже пружина, тем скорее будет сообщаться движение. Что сказано об a и b , то применяется и ко всякой другой паре частичек между a и o . Но пружина между каждой парой этих частичек становится туже и тверже вследствие теплоты, развивающейся по линии сгущения, и потому скорость звука увеличивается вследствие этой теплоты. Возвращаясь к нашему прежнему опыту с рядом мальчиков, мы можем сказать, что это то же самое, как если бы вследствие одного уже акта толкания своего соседа увеличивалась мускульная сила рук каждого мальчика и тем давала бы ему возможность передавать свой толчок гораздо скорее, чем мог бы он это сделать без этого увеличения мускульной силы. Сгущенная часть звуковой волны распространяется описанным способом, и ясно, что скорость распространения увеличивается от теплоты, развивающейся при сгущении.

Остановим теперь на минуту наше внимание на распространении разрежения. Предположим, как и прежде, что средний ряд ax представляет частички воздуха, находящиеся в равновесии под давлением атмосферы, и предположим, что частичка a внезапно увлечена вправо, так что займет положение a'' в верхнем ряду точек: за a'' немедленно последует b'' , за b'' последует c'' , за $c''—d''$ и т. д.; и таким образом разрежение подвигается назад к x'' и достигает точки o'' по линии частичек в то время, когда a совершила свое движение вправо. Но почему же b'' следует за a'' , когда a'' удаляется от нее? Очевидно потому, что упругая сила, действующая между b'' и a'' , меньше, чем между b'' и c'' . В самом деле b'' увлекается за a'' с силою, равную разности двух упругостей, одной—действующей между a'' и b'' , и другой—действующей между b'' и c'' . То же самое замечание применяется к движению c'' за b'' , к движению d'' за c'' , словом, к движению каждой последующей частицы, когда она следует за своей предшественницей. Чем больше разница между упругостью, действующею с двух сторон каждой ча-

стички, тем скорее она будет следовать за своей предшественницей. И теперь вспомните, какое действие производит холод, происходящий от разрежения. Вдобавок к уменьшению упругой силы между a'' и b'' , происходящему от удаления частицы a'' на большее расстояние, прибавляется еще дальнейшее уменьшение упругости, происходящее от понижения температуры. Развивающийся холод увеличивает разницу в упругой силе, производящую распространение разрежения. Таким образом, мы видим, что так как теплота, развивающаяся при сгущении, увеличивает быстроту сгущения и так как холод, развивающийся при разрежении, увеличивает быстроту разрежения, то скорость звуковых волн, которые состоят из сгущения и разрежения, должна увеличиваться от теплоты, а также и от холода, которые развиваются вследствие их собственного движения.



Фиг. 12.



Фиг. 13.

Здесь нужно обратить ваше внимание на то, что расстояние от a' до o' , на которое распространяется движение в то время, как a' движется до a' , может быть гораздо больше, чем пространство, проходимое в то же время самою частичкою. Движение a' может быть не больше маленькой части сантиметра, между тем как расстояние, на которое может распространиться движение в то время, когда a' совершит свой небольшой путь, может составлять уже несколько метров. Быть может вам этот пункт кажется не совсем ясным, но вы его мало-по-малу поймете из дальнейшего.

§ 10. Отношение между удельными теплотами воздуха, выведенное из скорости звука.

Изложивши этот предмет, хотя и не полно, я просил бы вас последовать за мною в отдаленную область физики, при чем окажется, что отдаление не есть недостаток связи. Предположим, что известное количество воздуха при температуре 0° , заключенное в сосуде с равными стенками, повысилось в температуре на 1° . Потом пусть то же самое количество воздуха, заключенное в сосуд, позволяющий воздуху расши-

растется при нагревании, но так, однако, что давление на этот воздух остается неизменным во время его расширения, также будет повышено на 1°. Количества теплоты, употребленные в этих двух случаях, различны ¹⁾. Одно количество выражает то, что называется удельной теплотой (теплоемкостью) воздуха при постоянном объеме, а другое количество есть удельная теплота воздуха при постоянном давлении. Примером того, каким образом явления, по видимому не имеющие никакого отношения между собой, оказываются тесно связанными между собою, может служить тот факт, что из скоростей звука в воздухе, вычисленной и определенной наблюдениями, мы можем вывести отношение между этими двумя теплотами. В самом деле, если мы возвысим в квадрат вычисленную и наблюдаемую скорости и затем разделим больший квадрат на меньший, то получим отношение, о котором идет речь. Обозначивши удельную теплоту при постоянном объеме через C_v и удельную теплоту при постоянном давлении через C_p , и обозначивши затем вычисленную Ньютоном скорость через V , а наблюдаемую скорость через V' , Лаплас доказал, что

$$\frac{C_p}{C_v} = \frac{V'^2}{V^2}$$

Вводя в это уравнение величины V и V' и производя вычисление, мы найдем, что

$$\frac{C_p}{C_v} = 1,42.$$

Таким образом, не зная удельной теплоты ни при постоянном объеме, ни при постоянном давлении, Лаплас нашел, что отношение большей из них к меньшей есть 1,42. Из предшествующей формулы очевидно, что вычисленная скорость звука, помноженная на квадратный корень этого отношения, даст наблюдаемую скорость.

Но с определением этого отношения связывается однако предположение, которое мы должны разъяснить себе. Предполагается, что теплота, развивающаяся при сжатии, остается в сгущенной части волны и производит в ней увеличение упругости; что ни малейшая часть теплоты не теряется лучеиспусканием. Если бы воздух обладал сильной способностью лучеиспускания, то это предположение не могло бы иметь места. Теплота, развивающаяся при сгущении, не могла бы оставаться в сгущенной части волны. Она лучеиспускалась бы во все стороны и большей частью оставалась бы в охлажденной и разреженной части волны, которая имела бы соответствующую способность поглощения. Поэтому лучеиспускание прямо содействовало бы уравнению температур различных частей волны и таким образом уничтожило бы увеличение скорости, вызвавшее поправку Лапласа ²⁾.

¹⁾ См. Тидаль. Теплота, рассматриваемая как род движения. Лекция V.

²⁾ В самом деле, скорое удаление теплоты из сгущенной части воздуха и скорое ее сообщение разреженной через окружающий их эфир вообще препятствовали бы тому, чтобы температура сгущенной части поднялась так высоко, а температура разреженной так низко, как это было бы в том случае, если бы вовсе не было лучеиспускающей и поглощающей способности.

§ 11. Механический эквивалент теплоты, выведенный из скорости звука.

Далее вопрос о верности этого отношения заключает в себе другой, повидимому, неотносящийся к нему, вопрос о том, имеет ли атмосферный воздух какую-нибудь заметную способность лучеиспускания. Если это отношение верно, то это уже будет доказывать отсутствие лучеиспускающей способности в некоторой части воздуха. Но каким образом мы можем увериться в том, что это отношение действительно верно? Посредством умозаключения, которое еще яснее доказывает, как переплетены между собою явления в природе. Рассматривая это отношение, один гениальный человек, по имени Майер, дошел до ясного и величественного представления о соотношении и взаимодействии сил органической и неорганической природы, представления, до которого не возвышался ни один естествоиспытатель до него. Он первый увидел, что излишек 0,42 удельной теплоты при постоянном давлении против удельной теплоты при постоянном объеме представляет собою количество теплоты, израсходованное в первом случае на работу, состоящую в расширении газа. Предполагая, что воздух ограничен по сторонам и может расширяться только в вертикальном направлении, в котором на него действует только давление атмосферы, Майер пытался точно вычислить количество теплоты, потребное для поднятия этого или какого-нибудь другого веса воздуха. Он хотел, таким образом, определить «механический эквивалент теплоты». При сопоставлении этих чисел его ум представлял дело яснее дня, но при определении точных числовых величин он должен был положиться на экспериментаторов его времени. Их результаты, хотя приблизительно верные, не были однако так верны, как те, которые были получены впоследствии таким искусным экспериментатором, как Реньо, который пользовался всеми последними улучшениями в искусстве приготовления аппаратов. Нисколько не изменяя метода его мыслей или построения его вычислений, одно введение точных числовых данных в формулу Майера дало верный механический эквивалент теплоты.

Но каким образом мы можем говорить с такой уверенностью о верности этого эквивалента? Мы можем это делать только благодаря работам англичанина, который трудился над этим предметом одновременно с Майером и который, одушевившись творческим гением своего немецкого собрата, с удовольствием решился поверить опытом его гениальное предположение. Бессмертные опыты Джоуля впервые решительно доказали взаимное превращение механической работы и теплоты. И «эквивалент Джоуля», как он справедливо называется за тот труд и то искусство, какие употреблены были Джоулем для определения его, почти тождествен с эквивалентом, выведенным из формулы Майера.

§ 12. Отсутствие лучеиспускающей способности у воздуха, выведенное из скорости звука.

Оглянемся теперь назад на дорожку, по которой мы шли, на этот любопытный лабиринт соображений и опытов, через который мы прошли. Мы начали с наблюдаемой и вычисленной скоростей звука в атмосферном воздухе. Мы нашли, что Лаплас посредством особенного умозаключения вывел из этих скоростей отношение удельной теплоты воздуха при постоянном давлении к его удельной теплоте при постоянном объеме. Мы видели, как Майер из этого отношения вывел механический эквивалент теплоты; наконец, мы видели, что Джоуль определил тот же эквивалент прямыми опытами над трением твердых тел и жидкостей. Какой же результат всего этого? Опыты Джоуля доказали, что результат Майера был верен, и таким образом доказали, что отношение, определенное Лапласом, было верно; а доказавши это, они, значит, доказали в то же время, что атмосферный воздух не имеет практически заметной способности лучеиспускания. Повидимому, между помещиванием воды и трением железных пластин (в опытах Джоуля), с одной стороны, и между лучеиспусканием частичек нашей атмосферы, с другой, большое расстояние; однако, на деле оба вопроса связаны рядом умозаключений, через который мы прошли.

Но истинный естественный испытатель по части физики никогда не довольствуется одним умозаключением, когда его возможно подтвердить или опровергнуть опытом. Предшествующий аргумент подтвержден тем, что была произведена опытная поверка над лучеиспускающей способностью атмосферного воздуха. И при этом оказалось, что опыт и умозаключение согласны между собой; и таким образом было доказано, что воздух есть тело, лишенное лучеиспускающей и поглощающей способности¹⁾.

Здесь я могу сказать слово для предостережения экспериментаторам, которые производят опыты над распространением звука в газах. Во время Лапласа и долго после того думали, что газы всякого рода обладают только бесконечно малою способностью лучеиспускания; но теперь оказалось, что это предположение неверно. Я думаю, было бы слишком поспешно предположить, что такие тела, как аммиак, водяной пар, серная кислота и маслородный газ²⁾ при их огромной лучеиспускающей способности могут быть подведены под формулы Лапласа. Поэтому мы должны исследовать, действительно ли верно отношение между двумя удельными теплотами, выведенное из скорости звука в этих телах, и действительно ли, если отношение это определится какими-нибудь другими способами, окажется, что его квадратный корень, помноженный на вычисленную скорость, дает наблюдаемую скорость? Как только в сгущенной части звуковой волны появится теплота, а в разреженной—холод, тотчас начинает действовать лучеиспускающая

¹⁾ Тиндаль. Теплота, рассматриваемая как род движения. Лекция XII.

²⁾ Более употребительное название этого газа—этилен. Прим. ред.

способность, уничтожая различие между ними в температуре. На этом основании сгущенная часть волны становится более слабою, а разреженная менее слабою, чем было бы без этого, и потому при достаточно сильной лучеиспускающей способности скорость звука, вместо того чтобы согласоваться с формулой Лапласа, будет приближаться к скорости, какую дает простая формула Ньютона.

§ 13. Скорость звука в газах, жидкостях и твердых телах.

Для того, чтобы пополнить наши знания о распространении звука в газах, я помещаю здесь таблицу, находящуюся в прекрасных исследованиях Дюмона, употреблявшего в своих опытах метод, который будет разъяснен впоследствии.

Скорость звука в газах при температуре 0° Ц.

	Скорость.
Воздух	331 метр.
Кислород	316 »
Водород	1265 »
Угльная кислота	261 »
Окись углерода	336,5 »
Закись азота	261 »
Маслородный газ	313 »

По теории, скорости звука в кислороде и водороде обратно пропорциональны квадратным корням из плотностей этих двух газов. Мы видим из приведенной таблицы, что этот теоретический вывод подтверждается опытом. Так как кислород в 16 раз плотнее водорода, то скорость звука в последнем газе должна быть согласно указанному закону в 4 раза больше скорости в кислороде; и поэтому если скорость звука в кислороде составляет 316 метров, то по вычислению можно узнать, что в водороде она составляет 1264. Опыт, как мы видим, дает 1265.

Скорость звука в жидкостях может быть определена теоретически, подобно тому как Ньютон теоретически определил его скорость в воздухе, так как плотность жидкости легко определить и легко измерить ее упругость, подвергая ее сжатию. Для воды вычисленная и наблюдаемая скорости до такой степени согласуются между собой, что это доказывает, что изменения в температуре, производимые звуковою волною в воде, не имеют заметного влияния на скорость. Целым рядом замечательных опытов, произведенных в Женевском озере, Колладон и Штурм определили скорость звука в воде и нашли ее равною 1431 метру в секунду. Посредством опыта, который вы будете в состоянии понять только впоследствии, Вертгейм определил скорость звука в различных жидкостях, и я представляю вам его результаты в следующей таблице:

Скорость звука в жидкостях.

Название жидкости.	Температура.	Скорость.
Речная вода (из Сены)	15° Ц.	1433
»	30 »	1523
»	60 »	1720
Морская вода (искусственная)	20 »	1449
Раствор поваренной соли	18 »	1560
» сернокислого натра	20 »	1579
» углекислого натра	22 »	1590
» азотнокислого натра	21 »	1665
» хлористого кальция	23 »	1974
Обыкновенный алкоголь	20 »	1282
Абсолютный алкоголь	23 »	1156
Терпентинное масло	24 »	1209
Серный эфир	0 »	1155

Из этой таблицы мы узнаем, что звук распространяется с различной скоростью в различных жидкостях; что соль, растворенная в воде, увеличивает скорость, и что соль, производящая наибольшее увеличение, есть хлористый кальций. Опыты также показывают нам, что и в воде, как и в воздухе, скорость увеличивается с повышением температуры. При температуре 15° Ц. в Сенской воде, напр., скорость звука есть 1433 метра в секунду, при 30° она уже составляет 1523 метра в секунду, а при 60°—1720.

Я сказал, что из сжимаемости жидкостей, определяемой особыми измерениями, можно вывести скорость звука в этих жидкостях. И наоборот, из скорости звука в жидкости может быть выведена сжимаемость этой жидкости. Вертгейм сравнивал несколько цифр сжимаемости, выведенных из его опытов над звуком, с подобными же цифрами, полученными прямо экспериментально Грасси. Согласие между этими цифрами, что видно из следующей таблицы, служит сильным подтверждением точности метода, употребленного Вертгеймом.

	Кубическая сжимаемость:	
	выведенная из скорости звука по Вертгейму.	по прямым опытам Грасси.
Морская вода	0,0000467	0,0000436
Раствор поваренной соли	0,0000349	0,0000321
» углекислого натра	0,0000337	0,0000297
» азотнокислого »	0,0000301	0,0000295
Абсолютный алкоголь	0,0000947	0,0000991
Серный эфир	0,0001002	0,0001110

Чем больше сопротивление, какое оказывает жидкость сжатию, тем скорее и сильнее она возвращается к своему первоначальному объему после сжатия. Таким образом, чем меньше сжимаемость, тем больше упругость, и, следовательно (при прочих равных условиях), тем больше скорость звука в жидкости.

Теперь мы рассмотрим распространение звука в твердых телах. Относительно твердых тел общее правило то, что в них упругость

сравнительно с плотностью больше, чем в жидкостях, и, следовательно, распространение звука быстрее. В следующей таблице представлена скорость звука в различных металлах по определению Вертгейма.

Скорость звука в металлах.

Название металла	при 20° Ц.	при 100° Ц.	при 200° Ц.
Свинец	1225	1201	—
Золото	1738	1715	1730
Серебро	2600	2632	2471
Медь	3546	3284	2946
Платина	2680	2565	2456
Железо	5114	5285	4707
Железная проволока (обычн.)	4904	5085	—
Литая сталь	4973	4911	4776
Стальная проволока (английская)	4703	5229	4984
Стальная проволока	4871	4999	—

Эта таблица показывает влияние температуры на скорость звука в металлах. Общее правило здесь то, что скорость звука уменьшается при повышении температуры; однако, железо представляет поразительное исключение из этого правила, но только внутри известных границ. Между тем как в меди, напр., повышение температуры от 20° Ц. до 100° понижает скорость с 3546 до 3284, то же самое повышение температуры производит в железе увеличение скорости с 5114 до 5285. Однако же между 100° и 200° мы видим, что скорость в железе с последней цифры падает до 4707. Таким образом, в железе повышение температуры до известного пункта увеличивает упругость его, а за этим пунктом уменьшает ее. Серебро представляет пример того же рода.

Разность в скорости звука в железе и в воздухе может быть показана следующим поучительным опытом. Выберите один из самых длинных горизонтальных прутьев, которые служат для изгородей в Гайд-парке, и пусть ваш помощник ударяет по одному концу прута в то время, как вы приложите ухо на значительном расстоянии от этого конца. Ваше ухо услышит последовательно два звука, один, который доходит через железо, а другой через воздух. Подобный же эффект был получен Био при его опытах над железными трубами парижских водопроводов.

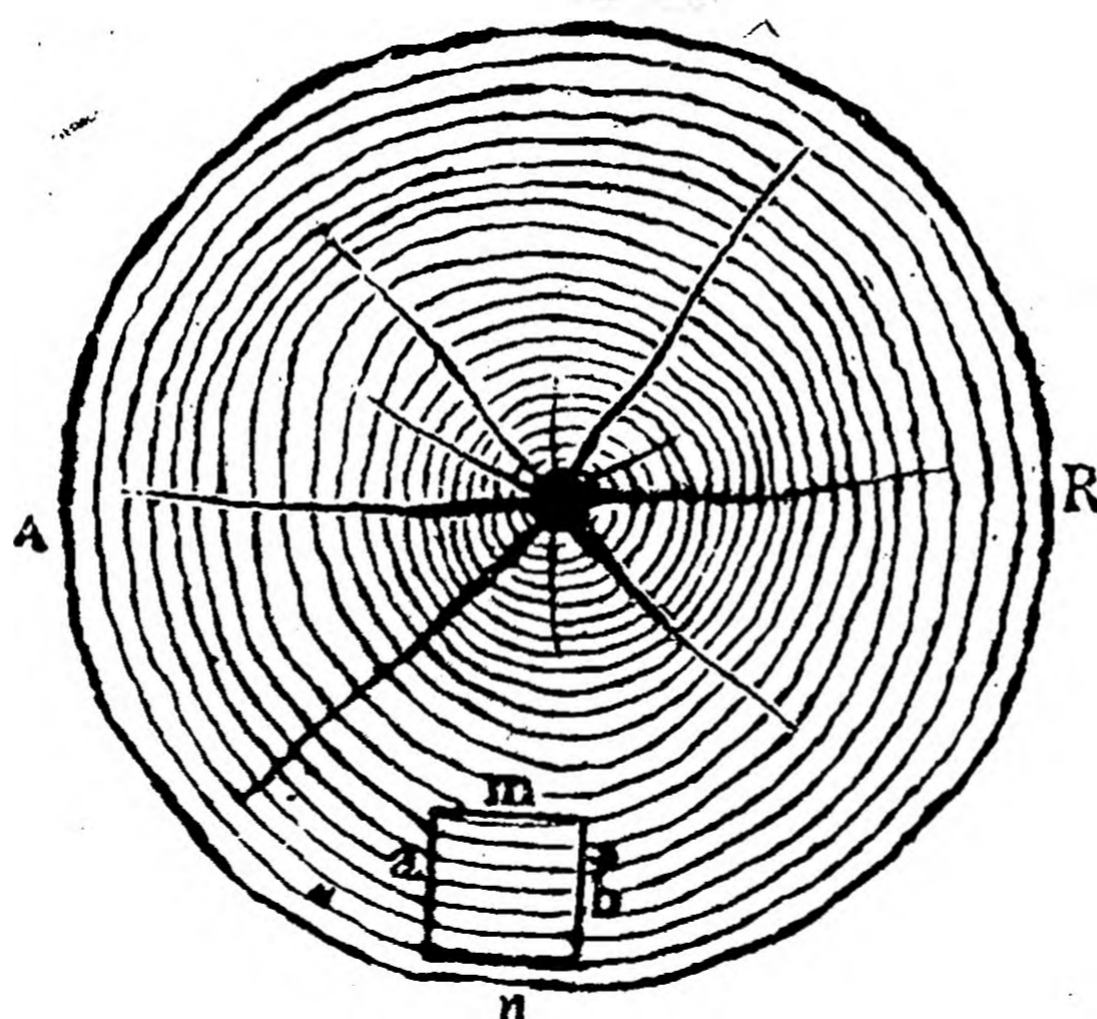
Распространение звука в каком-нибудь теле зависит в некоторой степени от того, как расположены в нем его частички. Если тело однородно и не имеет никакой структуры, то звук распространяется в нем одинаково хорошо во всех направлениях. Но этого не бывает, когда тело (неорганическое, напр., кристалл, или органическое, напр., дерево) имеет определенную структуру. Это же верно и относительно других явлений, помимо звука. Напр., когда мы подвергнем действию магнитной силы деревянный шар, то она действует на него неодинаково во всех направлениях. Он всегда отталкивается полюсом магнита, но самое сильное отталкивание бывает тогда, когда сила действует по направлению волокон. Теплота также проходит по дереву с неодинаковой

легкостью в разных направлениях. Она свободно проходит вдоль волокон; но перпендикулярно к ним дерево способно проводить теплоту неодинаково во всех направлениях. Теплота легче проводится в перпендикулярном направлении к древесинным слоям дерева, чем по длине их. Таким образом, дерево имеет три неравные оси теплопроводности. Эти оси, найденные мною, совпадают с осями упругости, открытыми Саваром. Вертгейм и Шевандье определили скорость звука по направлению этих трех осей и получили следующие результаты.

Скорость звука в дереве.

Название дерева.	Перпендикулярно к древесинным слоям.		
	Вдоль волокон.	Вдоль слоев.	Вдоль слоев.
Акация	4702	1471	1349
Сосна	4626	1332	782
Береза	3333	1833	1411
Дуб	3837	1531	1286
Ель	3314	1402	792
Вяз	4109	1418	1010
Дикая смоковн	4450	1494	1133
Ясень	4655	1388	1259
Ольха	4653	1365	1041
Осина	5070	1610	907
Клен	4095	1534	1034
Тополь	4271	1398	1047

Таким образом, вырезавши куб из древесины подле коры большого дерева так, чтобы небольшие части слоев, находящиеся на этом кубе,



Фиг. 14.

казались прямыми линиями, мы найдем, что если *AK* (фиг. 14) есть поперечный разрез дерева, то скорость звука в таком кубе в направлении *mn* будет больше, чем в направлении *ab*.

Вышеприведенная таблица поразительно представляет влияние молекулярной структуры. Большинство кристаллов представляет разницы подобного же рода. В таких телах частицы их расположены с разной степенью близости одна к другой в разных направлениях; и где

это бывает, там наверное окажутся различия в передаче и в действии теплоты, света, электричества, магнетизма и звука.

§ 14. Предупреждения Гука о стетоскопе.

Я заключу эту лекцию о распространении звука в газах, жидкостях и твердых телах прекрасным отрывком из сочинений великого

мыслителя Роберта Гюка и сделаю это тем охотнее, что, как мне кажется, слава и имя этого великого человека потеряли много своего блеска вследствие того, что он был близок к Ньютону. Вы видите, что в приводимом отрывке высказана теория стетоскопа. И я не знаю, где бы в другом месте так же хорошо выражалась та деятельность научной изобретательности, которая у всех великих исследователей предшествует опыту и сопровождает его.

«Может быть, есть возможность,—пишет Гук,—открывать внутренние движения и действия тел посредством звука, который они производят. В часах мы слышим стук маятника, ход колес, удары молотка. цеплянье зубцов и многие другие звуки; кто знает, не можем ли мы подобно этому открыть движение внутренних частей тел животных, растительных или минеральных посредством звука, который они производят, открыть процессы, совершающиеся в разных органах или полостях тела, и таким образом узнать, какие инструменты или машины не в порядке, какие действуют только в известное время, а в другое стоят и т. п.: кто знает, нельзя ли в растениях открыть, при помощи шума, насосов для поднятия соков, клапанов для остановки их и перехода их из одного хода в другой и т. п.? Я мог бы пойти дальше, но мне становится стыдно, когда я подумаю о том, как на это смотрит большинство людей; но, с другой стороны, я имею смелость не считать этих вещей невозможными, хотя они большинству людей кажутся вздорными, пустыми и несбыточными, и в этой смелости меня поддерживает то, что если бы я считал их невозможными, то это не очень помогло бы моему знанию, тогда как, считая их возможными, я может быть буду иметь случай получить понятие о таких вещах, мимо которых другой прошел бы без внимания, считая их бесполезными. Кроме того, меня несколько больше поддерживает опыт, так как я весьма ясно слышал биение человеческого сердца и так как обыкновенно слышат движение воздуха в кишках, как и других небольших сосудах; остановку в движении легких легко узнать по сопению, изгибание суставов—по щелканью и многое другое, подобное этому в деятельности и движении органов. Мне кажется, я могу найти некоторую поддержку в том, что я слышу шипящий звук, производимый раз'едающими средствами при их действии, шум огня при плавлении, воды—при кипении, частей колокола после того как их движения совершенно сделались незаметными для глаза; так как для меня все эти и другие движения различаются между собою *secundum magis minus* (по тому, больше ли они или меньше), и для того, чтобы они стали заметными, нужно или усилить их движение, или сделать чувствительнее и сильнее орган, назначенный для их ощущения и различения».

ОБЗОР ПЕРВОЙ ЛЕКЦИИ.

Звук взрыва распространяется по воздуху, как волна или толчок.

Эта волна, ударяя в барабанную перепонку, заставляет ее сотрясаться; сотрясения ее передаются слуховому нерву, и по этому нерву доходят до головного мозга, где они являются как звук.

Звуковая волна состоит из двух частей, из которых в одной воздух сгущен, а в другой разрежен.

Движение звуковой волны не должно быть смешиваемо с движением частичек, которые в каждое мгновение образуют волну. Во время прохода волны каждая частичка, участвующая в ее передаче, совершает только небольшое движение вперед и назад.

Длина этого последнего движения называется амплитудой качания.

Звук не может распространяться в пустоте.

Звук отражается подобно свету во всех отношениях; он также преломляется подобно свету и подобно же свету может быть собран надлежащими чечевицами.

Звук также подвергается диффракции, когда звуковые волны загибаются вокруг препятствия; однако такие препятствия производят только неполную звуковую тень.

Эхо производится отраженными звуковыми волнами.

Относительно звука и среды, в которой он распространяется, нужно иметь в виду четыре различные условия: силу, скорость, упругость и плотность.

Сила звука пропорциональна квадрату амплитуды, как она разнесена выше.

Она также пропорциональна квадрату максимума скорости вибрирующих воздушных частичек.

Когда звук исходит из источника в свободном воздухе, то сила его ослабевает пропорционально квадрату расстояния, на которое он уходит от источника.

Если звук заключен в трубку, с гладкою внутреннею поверхностью, то он может передаваться на значительные расстояния без заметного ослабления его силы.

Скорость звука в воздухе зависит от отношения упругости воздуха к его плотности. Чем больше упругость, тем больше скорость; чем больше плотность, тем медленнее скорость.

Скорость звука прямо пропорциональна квадратному корню упругости, и обратно пропорциональна квадратному корню плотности.

Поэтому, если упругость и плотность изменяются в одинаковой пропорции, то действия их на скорость звука взаимно уничтожаются.

Что они изменяются в одинаковой пропорции, это доказывает закон Бойля и Мариотта; и поэтому скорость звука в воздухе не зависит от плотности воздуха.

Но чтобы этот закон мог иметь применение, необходимо, чтобы воздух различной плотности имел одинаковую температуру.

Сила звука зависит от плотности того воздуха, в котором он образуется, а не того, в котором он слышится.

Скорость звука в воздухе при температуре 0° Ц. составляет 331 метр в секунду; на каждый градус повышения в температуре она увеличивается почти на $\frac{3}{5}$ метра.

Поэтому, когда дана скорость звука в воздухе, то из нее может быть вычислена температура воздуха.

Расстояние выстрелившей пушки или громового удара может быть определено промежутком, который проходит между появлением огня и достижением звука.

Даже начинающий легко объяснит многие обыкновенные явления тем фактом, что звук требует известного времени на прохождение какого-нибудь значительного расстояния по воздуху; так, напр., удар топора о дерево, которое рубят на значительном расстоянии, бывает неодновременно с звуком удара. Рота солдат, идущих под музыку по улице, не может идти в такт одновременно, потому что звуки музыки неодновременно доходят до передних и задних рядов.

В сгущенной части звуковой волны воздух бывает теплее его средней температуры, а в разреженной—холоднее.

Это изменение температуры, производимое распространением самой звуковой волны, увеличивает упругость воздуха и увеличивает скорость звука на $\frac{1}{6}$ больше той величины, какую она имела бы без этого изменения.

Скорость звука, найденная Ньютоном, который не принимал в соображение этого изменения температуры, была 278,5 метров в секунду.

Лаплас доказал, что, помноживши скорость, данную Ньютоном, на квадратный корень отношения удельной теплоты воздуха при постоянном давлении к его удельной теплоте при постоянном объеме, мы получим действительную или наблюдаемую скорость.

И наоборот, из сравнения вычисленной и наблюдаемой скоростей можно вывести отношение между двумя удельными теплотами.

Из этого отношения можно вывести механический эквивалент теплоты: найденный таким образом эквивалент оказался одинаковым с полученным посредством прямого опыта.

Это согласие приводит к заключению, что атмосферный воздух не обладает заметной способностью лучеиспускать теплоту. Прямые опыты над лучеиспускающей способностью воздуха дали такой же результат.

Скорость звука в воде в 4 раза больше его скорости в воздухе.

Скорость звука в железе в 17 раз больше его скорости в воздухе.

Скорость звука в сосновом дереве вдоль его волокон в 10 раз больше его скорости в воздухе.

Причина этого увеличения скорости состоит в том, что упругость жидкостей, металлов и дерева сравнительно с их плотностями гораздо больше, чем упругость воздуха сравнительно с его плотностью.

Скорость звука зависит до некоторой степени от молекулярной структуры. В дереве, например, он проходит с различной скоростью в разных направлениях.

Лекция вторая.

Физическое различие между шумом и музыкальным тоном.—Музыкальный тон производится периодическими, а шум непериодическими вибрациями (колебаниями).—Произведение музыкальных тонов ударами.—Произведение музыкальных тонов воздушными толчками.—Определение высоты тонов.—Вибрации камертона.—Описание сирены.—Границы слуха; самые высокие и самые низкие тоны.—Определение скорости вибраций посредством сирены.—Определение длины звуковых волн.—Длина волн человеческого голоса у мужчин и женщин.—Распространение музыкальных звуков в жидких и твердых телах.

§ 1. Музыкальные звуки.

В нашей первой лекции мы рассмотрели распространение по воздуху одной звуковой волны, началом которой был взрыв маленького шара, наполненного гремучею смесью кислорода с водородом. Это производило звук, продолжавшийся только одно мгновение. В настоящей же лекции нам предстоит рассмотреть звуки не мгновенные, а продолжающиеся несколько времени, и познакомиться прежде всего с тем состоянием внешнего воздуха, которое в одном случае производит музыкальный звук или тон, а в другом—шум.

Мы уже узнали, что то, что мы ощущаем как силу звука, есть вне нас не что иное, как ширина качания или амплитуда вибрирующих воздушных частичек. Всякому другому звуковому впечатлению, сознаваемому нами, соответствует вне нас известная форма или состояние атмосферы. Если бы мы, напр., могли видеть воздух, по которому проходит звук приятного голоса, то мы увидели бы в этом воздухе, как и в какой форме совершаются движения, и увидели бы все условия движения, от которых зависит приятность голоса. Таким же образом и в обыкновенном разговоре физическое предшествует психическому и производит его; сказанные слова, возбуждающие в нас удовольствие или оторчение, приводящие нас в гнев или успокаивающие, некоторое время, пока они идут от говорящего до нас, суть не что иное, как чисто механическое состояние промежуточного воздуха.

Шум действует на нас, как ряд неправильно следующих одно за другим сотрясений. Слыша его, мы сознаем толчки и беспорядочные движения слухового нерва, между тем как музыкальный тон течет плавно, мягко и без неправильностей. Отчего же происходит эта плавность? От того, что толчки, получаемые барабанной перепонкой, следуют один за другим совершенно

п е р и о д и ч е с к и. Периодическое движение есть такое движение, которое повторяется. Напр., движение обыкновенного маятника есть периодическое; качаясь по воздуху, он производит волны или толчки, которые следуют друг за другом с совершенною правильностью. Однако, эти волны слишком медленны для того, чтобы возбудить слуховой нерв. Для того, чтобы произвести музыкальный тон, мы должны взять тело, которое качается с неуклоною правильностью маятника, но которое может сообщить воздуху более резкие и частые толчки.

Вообразите себе прежде всего ряд толчков, которые следуют один за другим через правильные промежутки и ударяют в барабанную перепонку. Толчок приводит в движение барабанную перепонку; а тело, раз приведенное в движение, не может мгновенно притти в покой. Однако, человеческое ухо устроено таким образом, что звуковые волны прекращаются в нем чрезвычайно быстро, хотя это прекращение все-таки не бывает мгновенно. и если движение, сообщенное слуховому нерву каждым отдельным толчком нашего ряда, продолжается до тех пор, пока до нерва дойдет следующий за ним толчок, то звук не будет прекращаться. Действие каждого толчка будет возобновляться, прежде чем оно успеет прекратиться, и повторяющиеся сотрясения будут сливаться вместе и произведут музыкальный звук. Напротив, толчки, производящие шум, повторяются неправильно и с неправильной силой. Они беспорядочно врываются в наше ухо и воспроизводят в наших ощущениях свою неприятную спутанность. Действие шума на ухо может быть весьма удачно сравнено с действием на глаз мигающего света; и то и другое неприятно для нас по внезапным и резко обрывающимся переменам, которые они производят в соответствующих нервах.

Единственное условие, необходимое для произведения музыкального тона, состоит в том, чтобы звуковые волны следовали одна за другою через равные промежутки времени. Какова бы ни была причина, производящая волны, это все равно; если только это условие соблюдено, то звук получится музыкальный. Если бы, напр., можно-было заставить карманные часы тикать с достаточной быстротою—положим 100 раз в секунду,—то отдельные тиканья не были бы слышны отдельно и слились бы в музыкальный тон. Если бы удары крыльев голубя совершались с такою же быстротою, то полет его в воздухе сопровождался бы музыкальным тоном. У колибри эта скорость достигается; и если мы от птиц перейдем к насекомым, у которых сотрясения гораздо быстрее, то увидим, что музыкальный тон обыкновенно сопровождает полет насекомых ¹⁾). Пыхтения локомотива при начале его хода следуют друг за другом медленно, но потом постепенно скорость их до того увеличивается, что их едва можно считать. Если бы это увеличение могло возрасти до тех пор, пока число пыхтений дошло до 50 или 60 в секунду, то приближение локомотива возвещалось бы органным тоном ужасной силы.

¹⁾ По Бурмейстеру, сотрясения производятся вхождением воздуха в грудную полость и выхождением из нее.

§ 2. Музыкальные звуки, производимые ударами.

Галилей производил музыкальный звук, быстро проводя перочинным ножом по краю пиастра. Маленькие зазубрины на монете сообщали периодический характер движению, которое состояло из ряда ударов достаточно быстрых для того, чтобы произвести непрерывность, нужную для образования звука. Каждый школьник знает, как произвести тон посредством грифеля. Держа грифель вертикально и несколько свободно между пальцами, он движет его по доске, при чем слышен ряд ударов. Надавливая грифель сильнее, можно заставить эти удары следовать до того быстро, что они произведут слышимый тон. Я не назову его музыкальным, потому что с этим словом соединяется понятие о приятности, а звук грифеля неприятен.

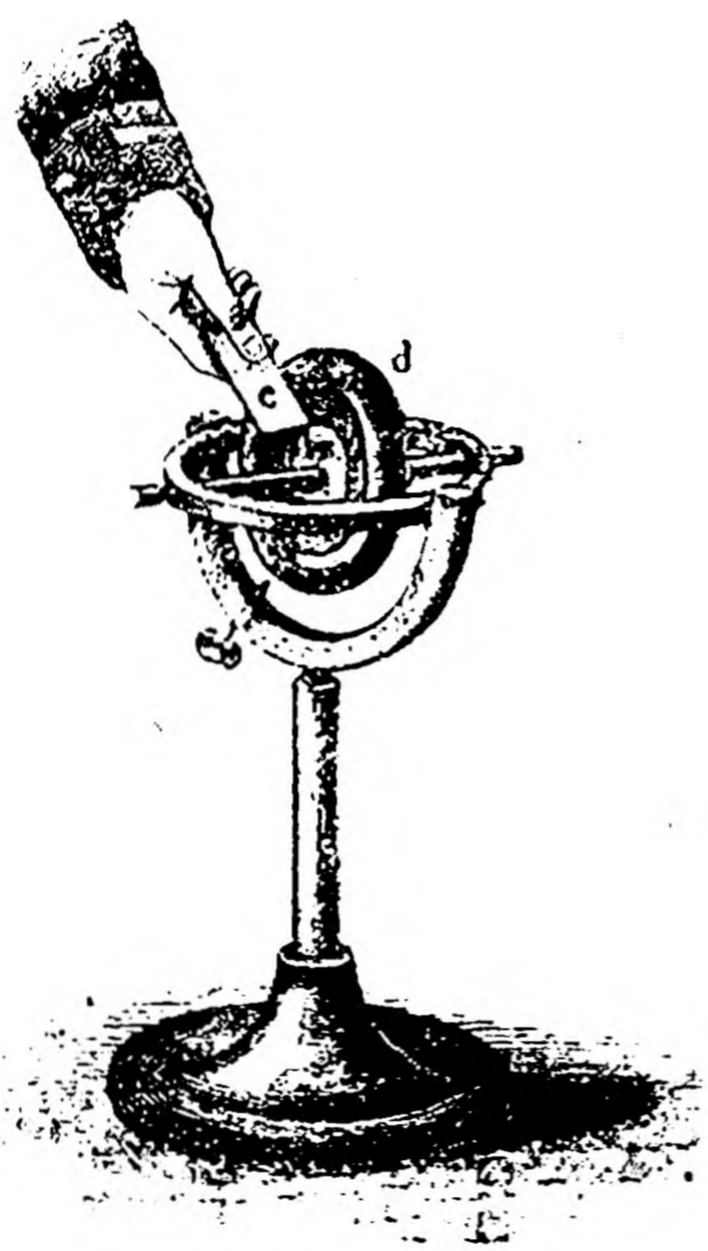
Произведение музыкального звука посредством ударов обыкновенно достигается тем, что заставляют зубцы вращающегося колеса довольно быстро ударяться о карту. В первый раз этот опыт был сделан знаменитым Робертом Гуком, о котором я уже упоминал ¹⁾, а в новейшее время—знаменитым французским экспериментатором Саваром. Мы ограничимся простейшею формою этого опыта. Здесь я имею гироскоп, инструмент, состоящий, главным образом, из тяжелого медного кольца *d* (фиг. 15), посаженного на окружность диска, через который перпендикулярно к его поверхности проходит стальная ось, оба конца которой лежат свободно в местах своего укрепления. Намотавши на ось шнурок и сильно рванувши его, мы заставим кольцо быстро вращаться, а вместе с ним будет вращаться и маленькое зубчатое колесо *w*. Я касаюсь этого колеса концом карты *c*, и это производит музыкальный звук чрезвычайно пронзительный. Если я на мгновение положу мой большой палец на кольцо, то быстрота его вращения от этого уменьшится, и это уменьшение тотчас же обнаруживается понижением высоты звука. Замедляя вращение еще больше, я еще больше понижаю высоту звука. Таким образом мы здесь узнали тот важный факт, что высота звука зависит от быстроты производящих его колебаний ²⁾. К концу опыта вы слышите отдельные удары зубцов о карту и они

¹⁾ 27 июля 1681 г. «Гук показал опыт произведения музыкальных и других звуков с помощью зубцов медных колес. Эти зубцы были одинаковой ширины для музыкальных звуков и неодинаковой для голосовых звуков». *Birch's, History of the Royal Society* p. 96. 1757.

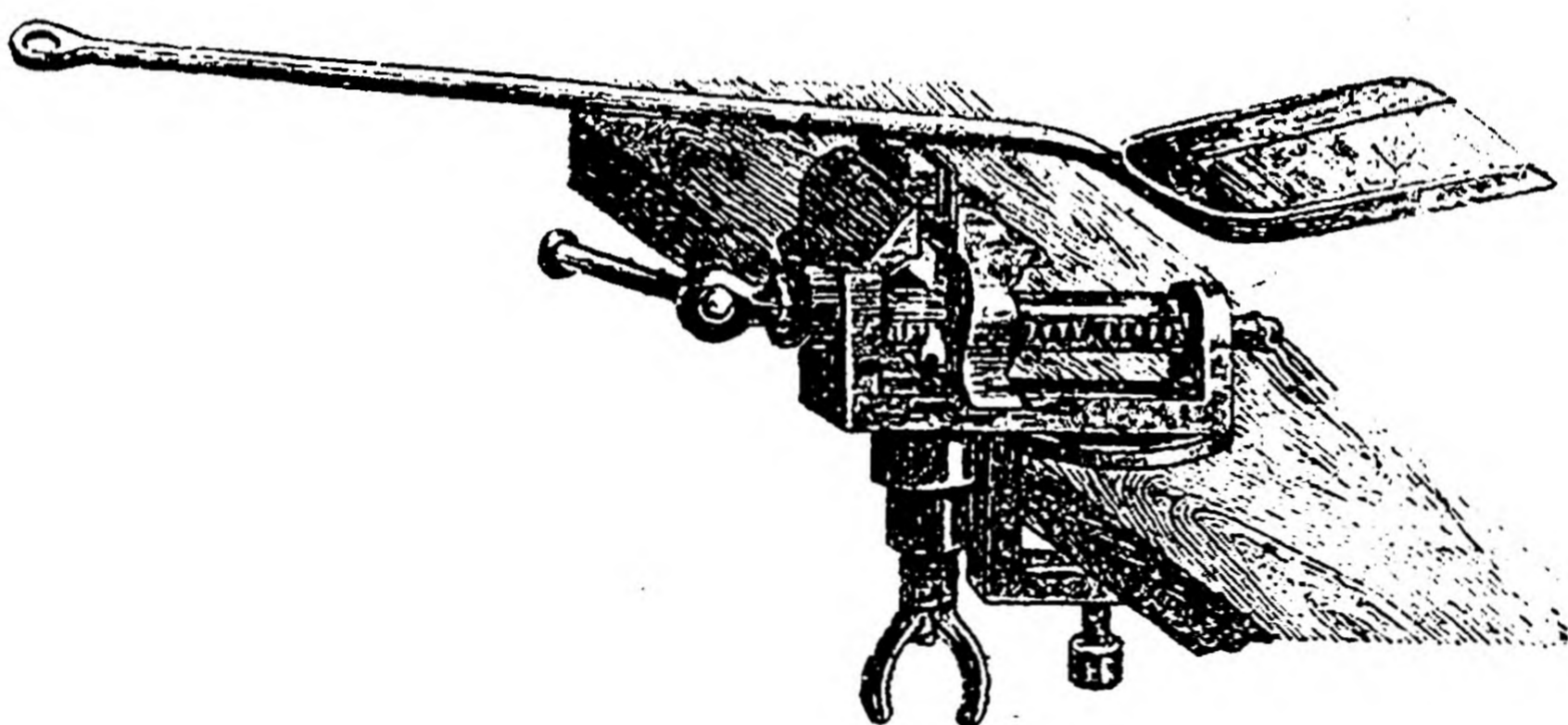
В биографии Гука, помещенной перед его посмертными сочинениями, изданными в 1705 г. Ричардом Валлером, находится следующее место: «В июле того же года он (Гук) показал способ производить музыкальные и другие звуки посредством ударов о зубцы нескольких медных колес; числа зубцов в колесах были пропорциональны между собой, и колеса вращались весьма быстро, при чем было замечено, что равные или пропорциональные числа ударов, т.-е. как 2 к 1, 4 к 3 и пр., производили музыкальные тоны, а неравные удары зубцов соответствовали звуку голоса при разговоре».

²⁾ Галилей нашел, что число зазубрин на его монете было велико, когда он получал высокий тон, и из этого заключил, что высота тона зависит от быстроты толчков.

следуют один за другим недостаточно быстро для того, чтобы произвести непрерывающееся течение звука, которое составляет существенное условие музыкальных тонов. Винт с нарезной головкой, укрепленный на токарном станке и приведенный в быстрое вращательное движение, производит своими ударами о карту музыкальный звук почти такой же ясный и чистый, как тот, какой производило зубчатое колесо гирьскопа.



Фиг. 15.



Фиг. 16.

Что музыкальный звук может быть произведен посредством ударов, это можно видеть также из следующего забавного опыта. В этих железных тисках (фиг. 16) укреплены стоймя две свинцовых пластинки так, что концы их выступают вверх на четверть дюйма. Я кладу на них поперек медную полоску, так, чтобы она лежала на концах, и затем, покачивая ее легонько рукою, я привожу ее в качательное движение, подобно тому, как качается бревно в простой качели. Спусти несколько времени, если ее не трогать, она придет в покой. Но предположим, что полоска, касаясь свинца, все будет отталкиваться вверх силой, исходящей из самого свинца; ясно, что в таком случае качания будут продолжаться непрерывно. Нагревши полоску, мы этим сообщим ей и приведем в действие такую силу. Когда полоска коснется свинца, то она сообщит ему свой жар, и вследствие этого быстро произойдет выступ на свинце в точке прикосновения. Поэтому полоска будет подталкиваться вверх и постоянно качаться из стороны в сторону, пока она будет достаточно горяча. Заменяя медную полоску лопаткой для углей (фиг. 16), мы произведем то же явление.

Опускаясь на свинец, полоска ударяет его очень слабо, и удары в этом случае так медленны, что вы можете легко считать их. Но я имею здесь кусок металла другой формы (фиг. 17), который будет качаться сильнее и произведет удары, следующие друг за другом с большей быстротою. Я кладу этот качатель на кусок свинца; удары его следуют быстро и производят громкий стук, слышимый всем находящимся в этой зале. Затем концом напилка я прижимаю качатель к

свинцу. Сотрясения его становятся вследствие этого более быстрыми, и удары, сливаясь вместе, производят низкий музыкальный тон. У меня есть еще другой качатель, который качается гораздо быстрее, чем предыдущий и который производит музыкальный тон без всякого другого прижимания, кроме давления его собственной тяжести. Но если я его прижму напилком, то сотрясения еще ускорятся, тон производимый ими повышается, и теперь по всей зале слышен музыкальный тон удивительной силы и чистоты. Когда я ослабляю прижимание, то высота тона понижается; усиливая прижимание, я снова повышаю его; и таким образом, видоизменяя прижимание, мы получаем большие изменения тона. Но можно обойтись и без подобных качателей. Если мы положим одну сторону четырехугольного конца этой нагретой ко-черги на кусок свинца, то услышим стук; если же повернем ее на свинец другою стороною, то получим ясный музыкальный тон. Это происходит от того, что обе эти стороны различно обпилены напилком, так что могут давать колебания различной быстроты ¹⁾. Это любопытное явление было открыто Шварцем и Тревелианом ²⁾.

§ 3. Музыкальные звуки, производимые дуновениями.

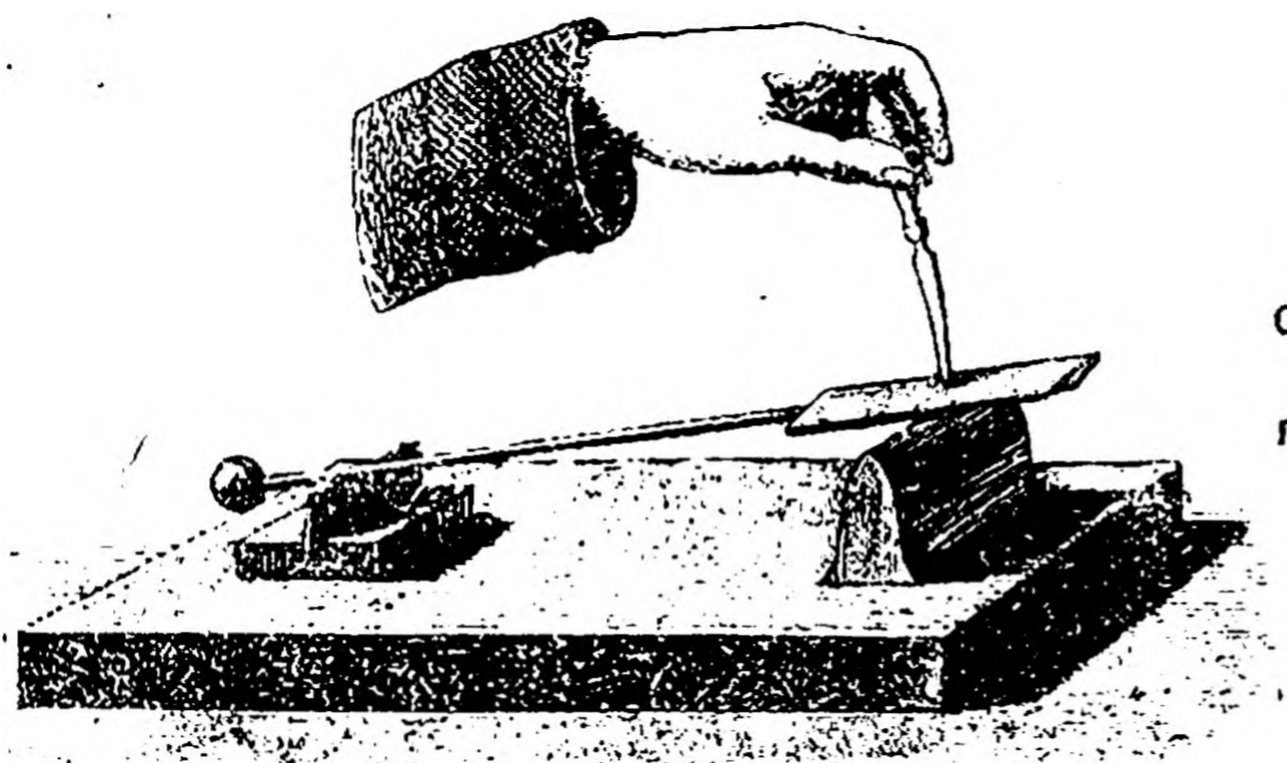
Профессор Робинзон первый произвел музыкальные звуки посредством быстро следовавших один за другим дуновений или толчков воздуха. Он воспользовался для этого первою формою инструмента, который мы будем скоро изучать под именем сирены. Робинзон описывает свой опыт следующим образом: Кран был устроен таким образом, что он открывал и закрывал трубку 720 раз в секунду. Этот аппарат был приделан к трубке, проходившей от мехов к духовому ящику органа. Когда открывался кран, то воздух мог тихо проходить через эту трубку. Когда это повторялось 720 раз в секунду, то был слышен очень слабый тон *g* два раза перечеркнутое, похожий по приятности на чистый женский голос. Когда скорость уменьшалась до 360 раз, то получался тон чистого, но грубого мужского голоса. После этого кран был изменен таким образом, что никогда вполне не запирает трубки, но оставлял ее почти на треть открытою. Когда это повторялось 720 раз в секунду, то звук был необыкновенно мягок и приятен. Когда же поворот крана совершался только 360 раз в секунду, то звук был гораздо мягче, чем

¹⁾ Когда сильная волна прилива катится по усеянному валунами берегу, как, напр., в Blackong Chin или Fr shwat r Gat на острове Вайте, то округленные валуны напором воды выносятся на берег, и когда волна отступает назад во время отлива, они снова катятся вниз. Вследствие этого происходят бесчисленные толчки, неправильные по силе и по последовательности. Сливаясь вместе, они производят впечатление точно визга. Высота тона в этом случае зависит до некоторой степени от величины камней и изменяется от рева, когда камни бывают велики, до визга, от визга до звука, какой издает поджариваемое сало; а когда камни так малы, что приближаются к величине крупных песчинок, то получается простое шипение. Рев самих разбивающихся волн зависит, главным образом, от того, что лопаются воздушные пузыри.

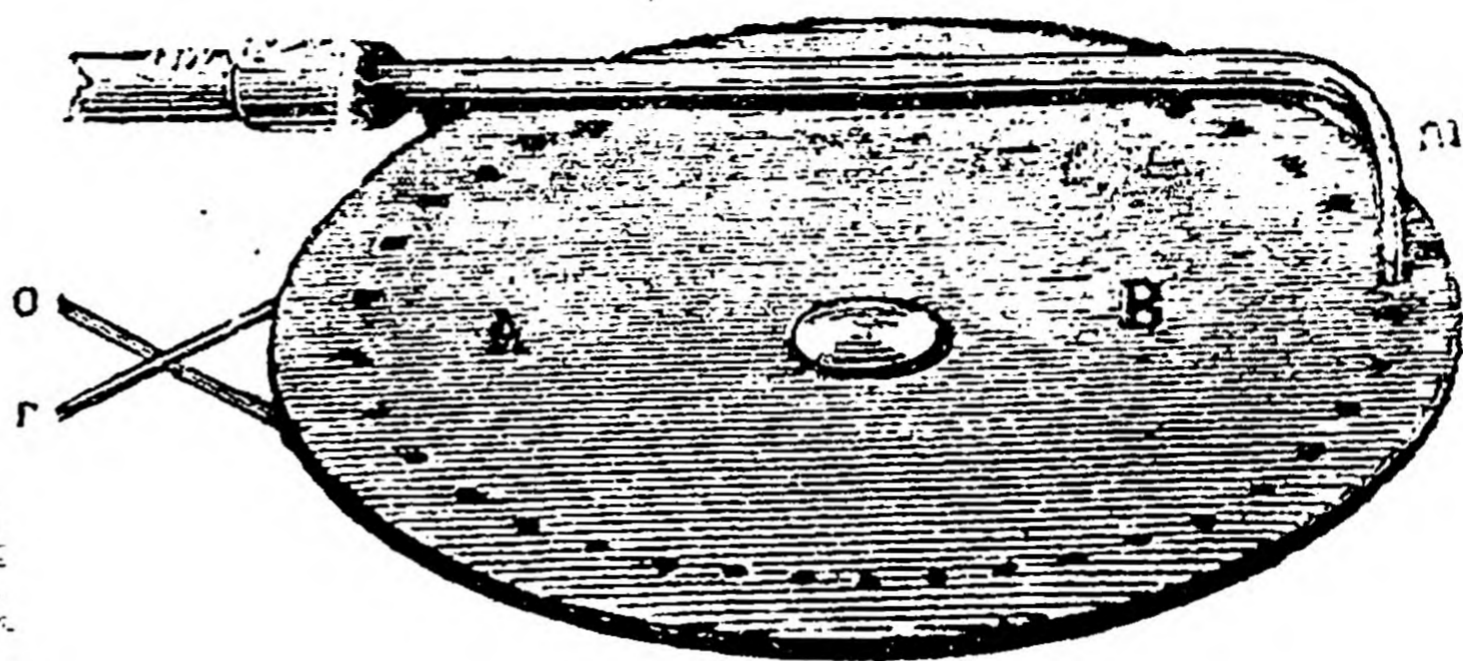
²⁾ См. «Теплота, рассматр. как род движения», 6 англ. изд., стр. 96.

всякий мужской голос такой же высоты. Я имею здесь драп. сделанный по образцу Робинзоповского, и посредством его я поверил описанные результаты.

Но трудность получить при этом необходимую скорость делает более пригодною для нашей цели другую форму опыта. Вот кружок из бристольского картона АВ (фиг. 18), 12 дюймов в диаметре, в котором сделаны отверстия на равном расстоянии одно от другого кругом близ его краев. Кружок, для крепости подложенный оловянным листом, мо-



Фиг. 17.



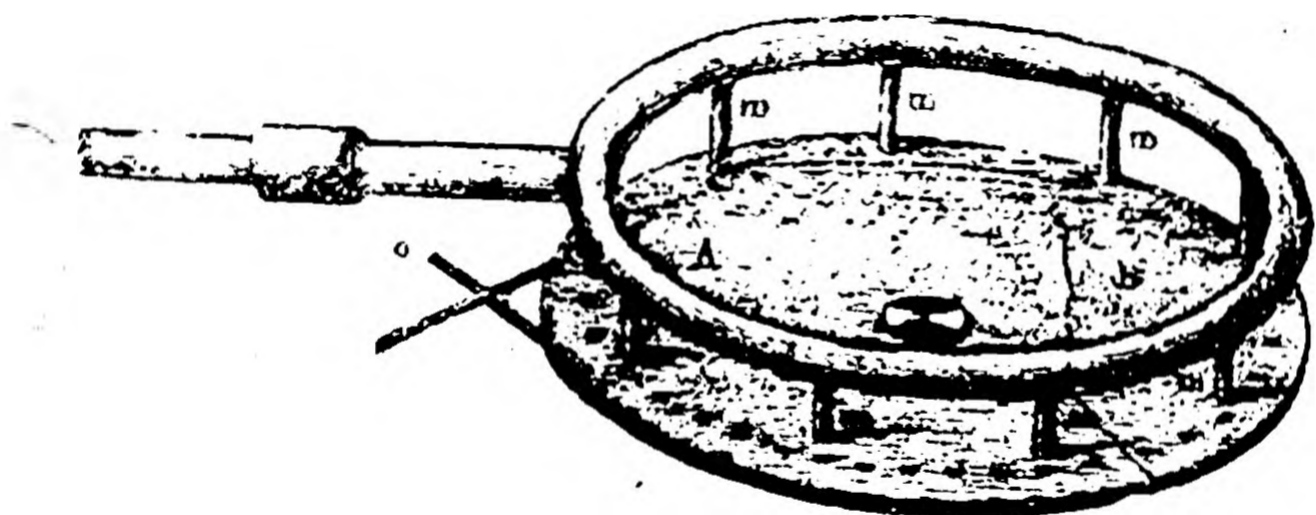
Фиг. 18.

жет быть прикреплен к центробежной машине и приведен в быстрое вращение. Во время его вращения отдельные отверстия исчезают, сливаясь в один непрерывный темный круг. Непосредственно над этим кружком помещена стеклянная трубка *т*, сообщающаяся с двумя акустическими мехами. В настоящую минуту кружок не движется, и нижний конец стеклянной трубки стоит как раз над одним из отверстий на кружке. Если поэтому меха станут действовать, то дуновение воздуха из *т* пройдет через отверстие вниз. Но если немного повернуть кружок, тогда цельная, не продырявленная часть его подойдет под трубку и таким образом прервет ток воздуха. Когда я медленно вращаю кружок, то этим последовательно подвожу отверстие под трубку и всякий раз при этом через отверстие проходит воздушный толчок. Но вот вращение становится быстрым и толчки следуют друг за другом весьма быстро, производя в воздухе сотрясения, сливающиеся в непрерывный музыкальный тон, слышимый всем вам. Замечайте, как изменяется тон. Когда центробежная машина вращается быстро, то является высокий звук; когда же ее вращение замедляется, высота звука сейчас же понижается. Если бы вместо одной трубки мы взяли две, стоящие одна от другой на таком расстоянии, какое находится между отверстиями, так что, когда одна трубка стоит над одним отверстием, другая в это же время будет стоять над следующим отверстием, то ясно, что, заставляя действовать меха и вращая кружок, мы получим толчок через оба отверстия в одно время. Сила или напряженность звука от этого увеличится, но высота его останется неизменною. Два толчка, выходящие в одно мгновение, будут действовать вместе и произведут на слух большее действие, чем произвел бы один. Если бы мы одновременно действовали не через два отверстия, а через десять, или

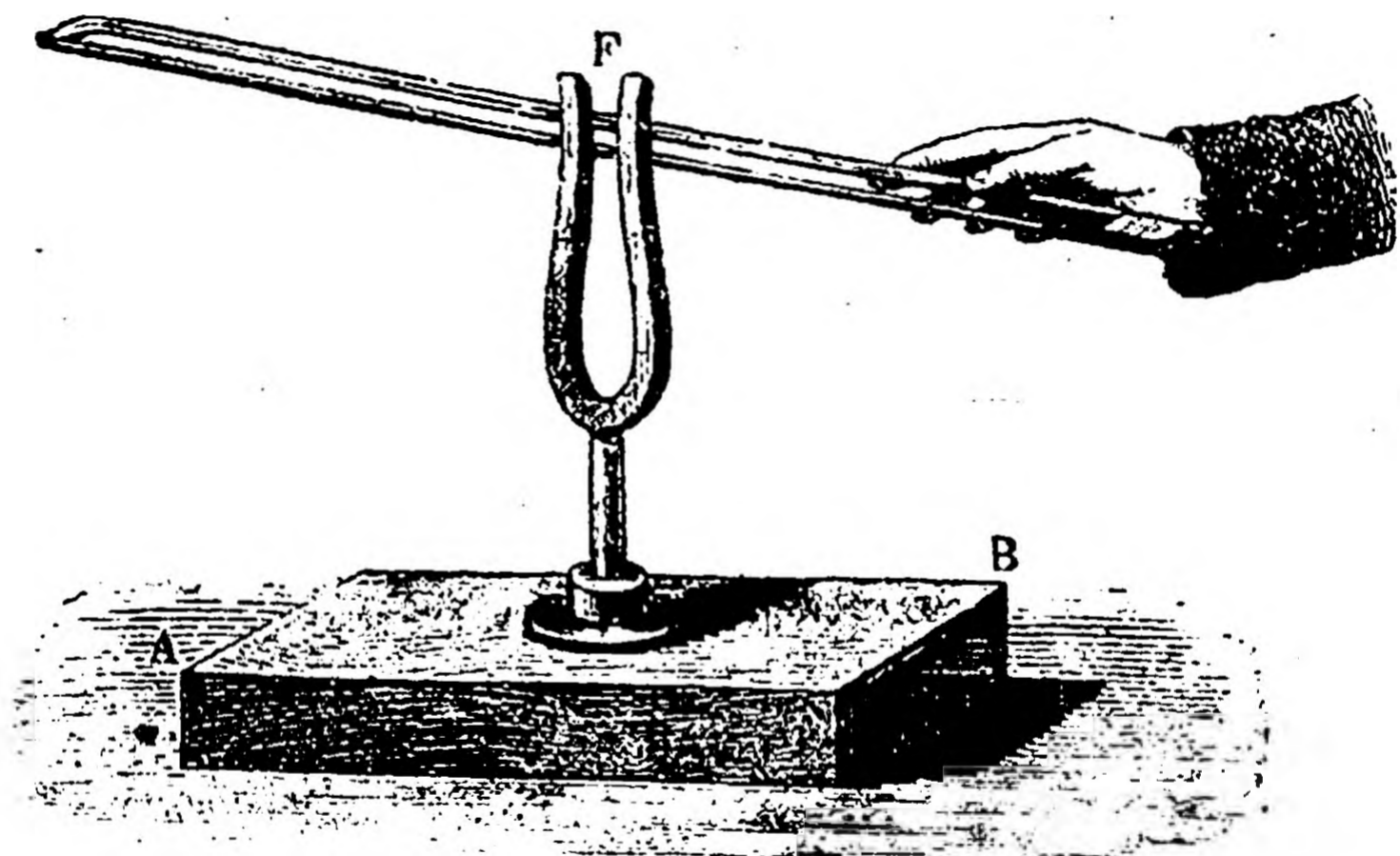
еще лучше, если бы мы поместили по трубке над каждым отверстием в кружке, тогда все толчки выходили бы из всех отверстий и прерывались бы в одно и то же время. Эти толчки произвели бы тон гораздо большей силы, чем тот, который получался попеременным выходом и прерыванием воздуха из одной трубки. В приборе, который вы видите здесь (фиг. 19), находится девять трубок, через которые выталкивается воздух, и таким образом толчки выходят одновременно из девяти отверстий. Вращая центробежную машину то быстрее, то медленнее, мы замечаем, что звук то повышается, то понижается, подобно изменяющемуся завыванию ветра.

§ 4. Музыкальные звуки, производимые камертоном.

Можно употреблять еще другие различные способы для приведения воздуха в состояние периодического движения. Натянутая струна, если ее потянуть в сторону и потом сейчас же пустить, сообщает воздуху вибрации, следующие друг за другом через совершенно правильные промежутки. Камертон делает то же самое. Я провожу смычком по



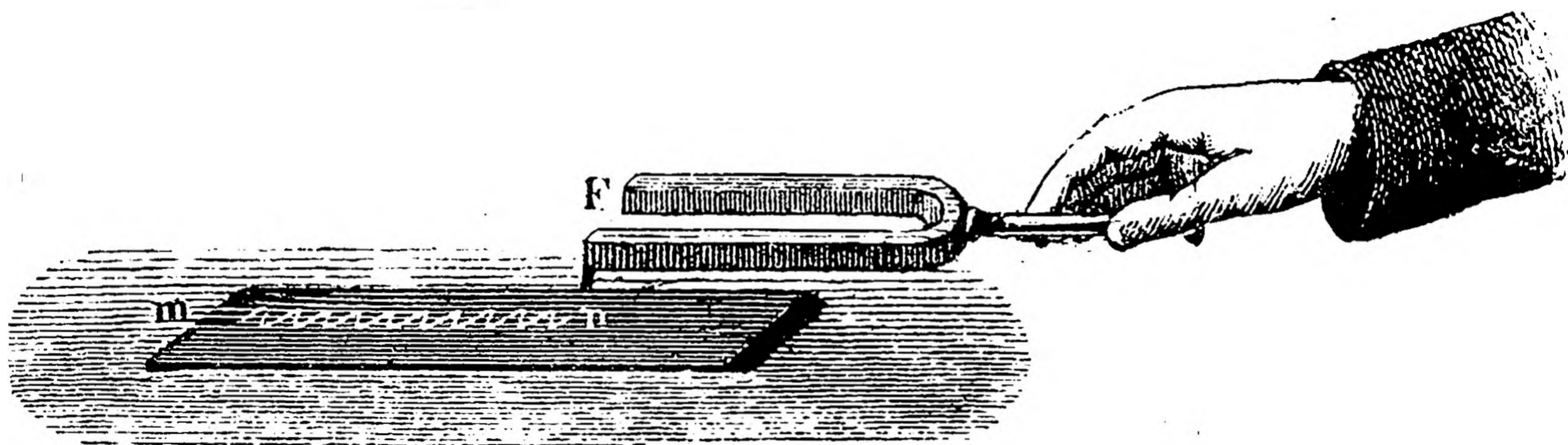
Фиг. 19.



Фиг. 20.

этому камертону (фиг. 20). Смычок предварительно натирается канифолью для того, чтобы волосы его задевали за камертон и оттягивали его в сторону. Сопротивление камертона скоро становится очень слабым и он быстро отскакивает; но смычок мгновенно снова задевает его; он снова отскакивает, как скоро его сопротивление делается достаточно сильным. Провходящий вследствие этого ритмический процесс, непрерывно повторяющийся во время проведения смычка, приводит камертон в продолжительные сотрясения, и этим производится ясный, полный музыкальный тон. Если посмотреть на камертон вблизи, то можно увидеть его вибрации; глухой, если бы поднес руку достаточно близко, мог бы почувствовать дрожание воздуха. Если я коснусь колеблющегося камертона картой, то удары его об нее сольются в музыкальный звук, как было в опыте с гироскопом, и камертон скоро придет в покой. Он теперь молчит, и то, что мы называем молчанием, выражает только отсутствие движения.

Когда я заставил камертон звучать, то звук его сначала имел наибольшую силу и потом постепенно становился слабее. Я, находясь вблизи камертона, мог заметить, что амплитуда или пространство, на которое раскачивался камертон, становилось постепенно все меньше и меньше. Однако, в пределах сделанного опыта самое опытное ухо не может заметить ни малейшей разницы в высоте тона. Таким образом, ослабление силы тона не влечет за собою понижения его высоты. И действительно, хотя ширина или амплитуда вибраций здесь изменяется, но скорость их остается неизменною. Высота и сила звука должны быть строго различаемы; сила зависит только от амплитуды, а высота только от скорости вибраций.



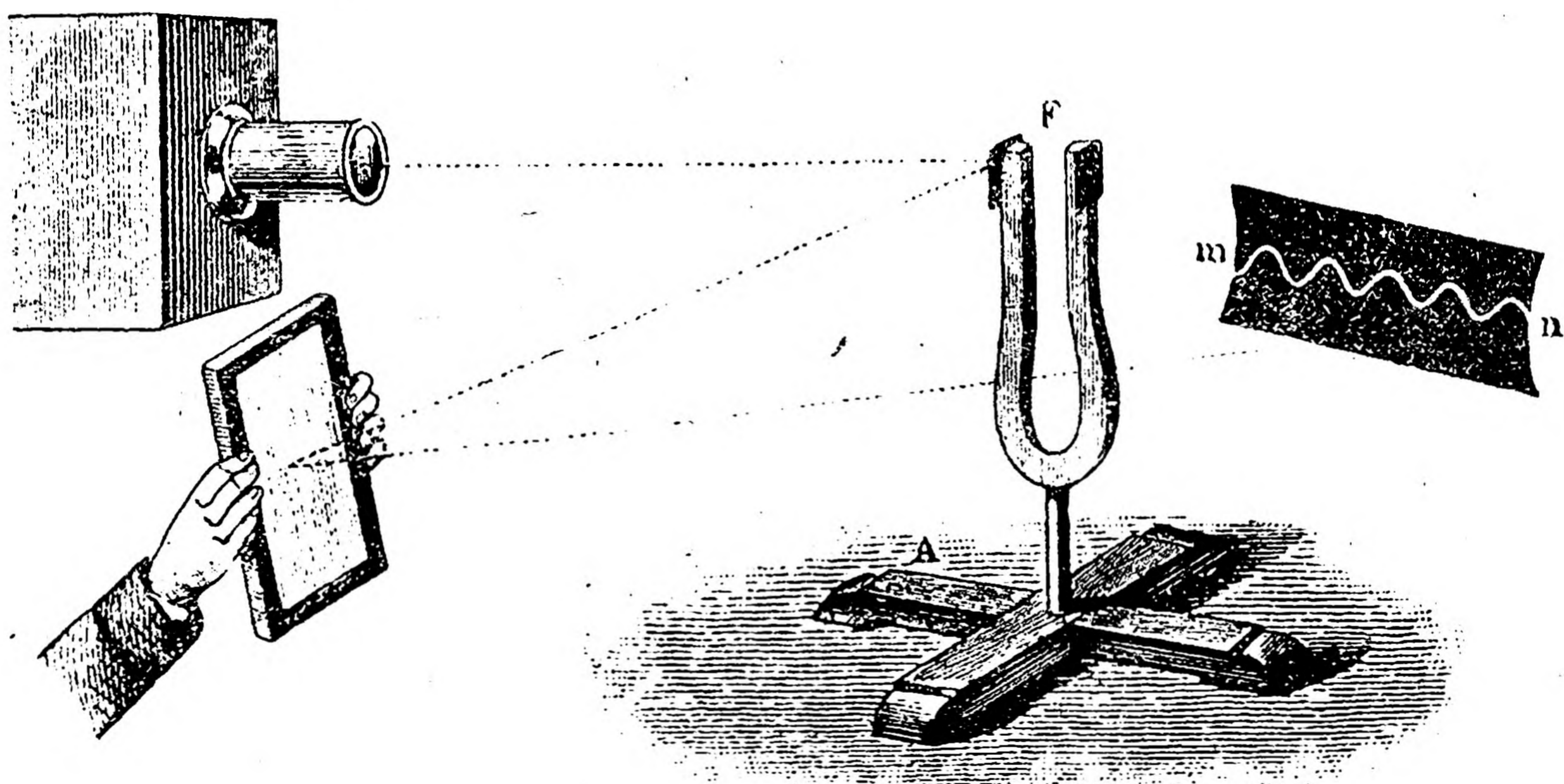
Фиг. 21.

Камертон можно заставить, чтобы он сам чертил ход своего собственного движения; способ этого легко понять. Взявши в руку кусок мела и двигая рукой по этой черной доске вверх и вниз, я черчу на ней короткую вертикальную линию. Пока моя рука в своем движении не уклоняется ни направо, ни налево, я вожду мелом все по одной и той же линии. Но если, двигая руку вверх и вниз, я буду также двигать ее направо или налево, тогда я начерчу на доске волнообразную линию. Изгибы полученной таким образом линии показывают вибрации моей руки, а глубина изгибов соответствует амплитуде этих вибраций. Возвратимся теперь к камертону. К одной из его ножек (фиг. 21) прикреплена тонкая медная полоска, на конце заостренная. Я привожу камертон в звуковое движение; вместе с ним вибрирует также и металлическая полоска. Затем я осторожно опускаю конец полоски на кусок закопченного стекла. Он движется над закопченной поверхностью и оставляет после себя ясную линию. Во все время, пока рука держит камертон неподвижно, острие ходит сюда и туда по одной и той же линии, точно так, как в предшествующем опыте кусок мела в моей руке все ходил по одной и той же линии на черной доске. Но ясно, что мне стоит только двигать камертон вдоль стекла, чтобы произвести извилистую линию *m, n* (фиг. 21). Я делаю это, и линия является.

Повторяя этот же опыт, пока камертон еще не перестал звучать, мы увидим, как уменьшается глубина извилин или загибов. По мере того, как колебания камертона ослабевают, извилистая линия более и более приближается к прямой. Это есть наглядное выражение умень-

меньши амплитуды колебаний. Когда извилины совершенно исчезнут, то амплитуда равняется нулю и звук, зависевший от нее, прекращается.

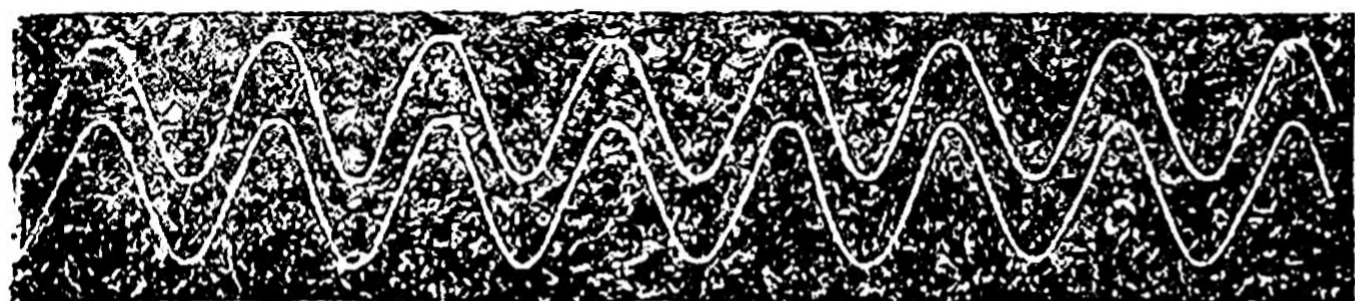
Лисажу мы обязаны прекрасным способом делать видимыми вибрации камертона. К одной ножке этого большого камертона *F* (фиг. 22) прикреплено маленькое металлическое зеркало, а к другой приделана металлическая пластинка для восстановления равновесия. Помещая ножку с зеркалом перед электрической лампой, я пропускаю луч сильного света сначала через собирающую чечевицу и потом заставляю его падать на зеркальце. Луч отражается от него назад. Я держу в руках другое небольшое обыкновенное зеркало, которое принимает отраженный луч и от которого он снова отражается на экран *m*. Вы видите на экране изображение отверстия, из которого выходит луч в виде небольшого светлого кружка на белой поверхности. Оно теперь совершенно неподвижно; но в тот момент, как камертон заставят вибрировать, отраженный луч начнет двигаться вверх и вниз, образуя световую полосу в 3 фута длиной.



Фиг. 22.

Длина полосы зависит от амплитуды вибраций, и вы видите, как она постепенно укорачивается по мере ослабления вибраций камертона. Но она все-таки остается прямой линией все время, пока зеркало остается неподвижным. Но я вдруг поворачиваю зеркало так, чтобы заставить луч пройти через экран слева направо; вы видите, что прямая линия мгновенно превратилась в прекрасную светлую волнистую линию *m*. Вы можете видеть сразу всю эту длинную волнистую линию потому, что однажды произведенное световое впечатление на сетчатке глаза сохраняется на ней $\frac{1}{10}$ секунды. Поэтому, если время, нужное для перемещения удлиненного изображения с одного конца экрана на другой, меньше $\frac{1}{10}$ секунды, то волнистая светлая линия займет на мгновение всю ширину экрана. Вместо того, чтобы выцускать луч, выходящий из лампы, через одно отверстие, я заставляю его теперь выходить через два отверстия, удаленные одно от другого

на волдойма, и тогда получаются на экране два световых кружка один над другим. Заставивши камертон вибрировать и поворачивая зеркало, мы получим эту светлую двойную извилистую линию на темной поверхности (фиг. 23). Поворачивая теперь диафрагму так, чтобы два кружка находились один под другим, и затем, приводя в действие камертон и поворачивая зеркало с надлежащею скоростью, мы получим эту красивую фигуру, произведенную двумя переплетающимися между собою волнистыми линиями (фиг. 24).



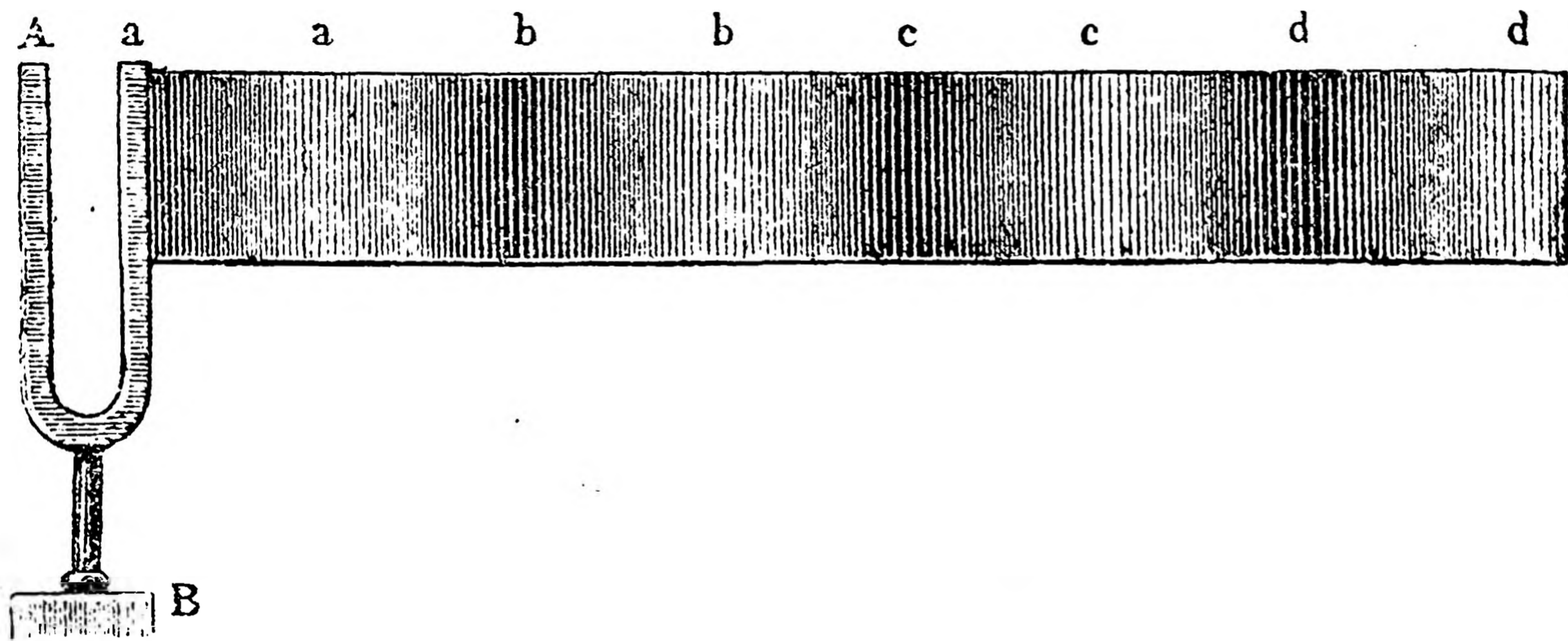
Фиг. 23.



Фиг. 24.

§ 5. Волны звука.

Как мы должны представлять себе состояние воздуха, по которому проходит музыкальный звук? Вообразите себе, что ножка вибрирующего камертона быстро качается вперед; она сгустит воздух, непосредственно к ней прилегающий, и потом, откачнувшись назад, оставит за собою некоторую пустоту; и этот процесс повторяется при каждом следующем качании вперед и назад. Все действие камертона состоит в том, чтобы произвести в воздухе такие сгущения и разрежения, которые последовательно, по мере своего образования, распространяются по воздуху. Сгущение с сопровождающим его разрежением составляет, как мы уже знаем, звуковую волну. В воде длина волны считается от вершины



Фиг. 25.

одной волны до вершины другой; между тем как в звуковой волне длина волны определяется расстоянием между двумя следующими одно за другим сгущениями. В самом деле, сгущение звуковой волны соответствует вершине, между тем как разрежение ее соответствует углублению или долине водяной волны. Пусть темные места a, b, c, d (фиг. 25) представляют сгущения, а светлые места a', b', c', d' — разрежения волн, производимых камертоном AB : в этом случае длина волны есть расстояние от a до b , или от b до c , или от c до d .

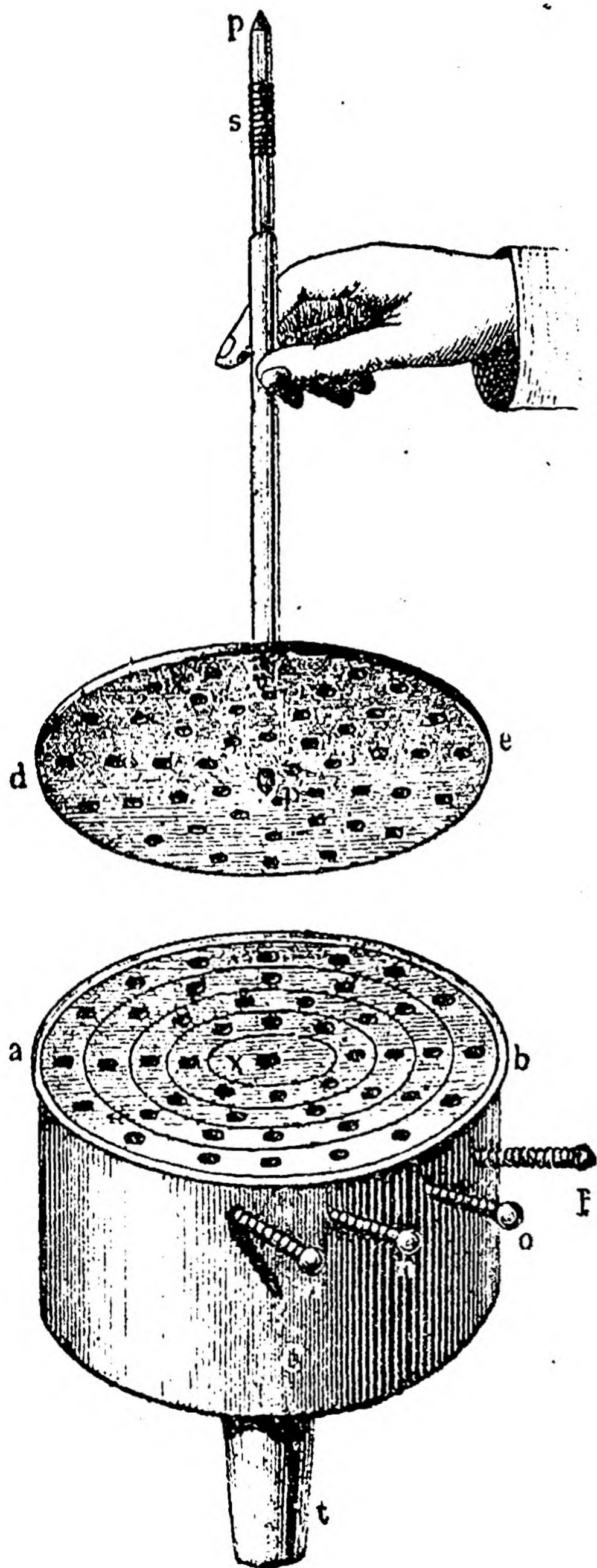
§ 6. Определение высоты тона и быстроты вибраций.

Высота тона, как уже было показано, зависит от скорости вибраций. Когда два тона, исходящие из двух различных источников, имеют одинаковую высоту, то значит скорость их вибраций одинакова. Если, напр., струна издает такой же тон по высоте, как камертон, то это потому, что они вибрируют с одинаковой скоростью; и если камертон издает такой же тон, как органная трубка или фисгармоника, то это потому, что вибрации или колебания стали камертона совершаются точно в такое же время, как вибрации воздушного столба в трубке и язычка в гармонике. То же самое справедливо и относительно человеческого голоса. Если струна и голос издают одинаковый тон, то это потому, что голосовые связки певца колеблются с такою же быстротою, как и струна. Есть ли какое-нибудь средство определить настоящее число вибраций, соответствующих известному музыкальному тону? Можем ли мы из высоты тона струны, органной трубки, камертона или человеческого голоса вывести число волн, которые они производят в секунду? Эта прекрасная проблема может быть разрешена вполне.

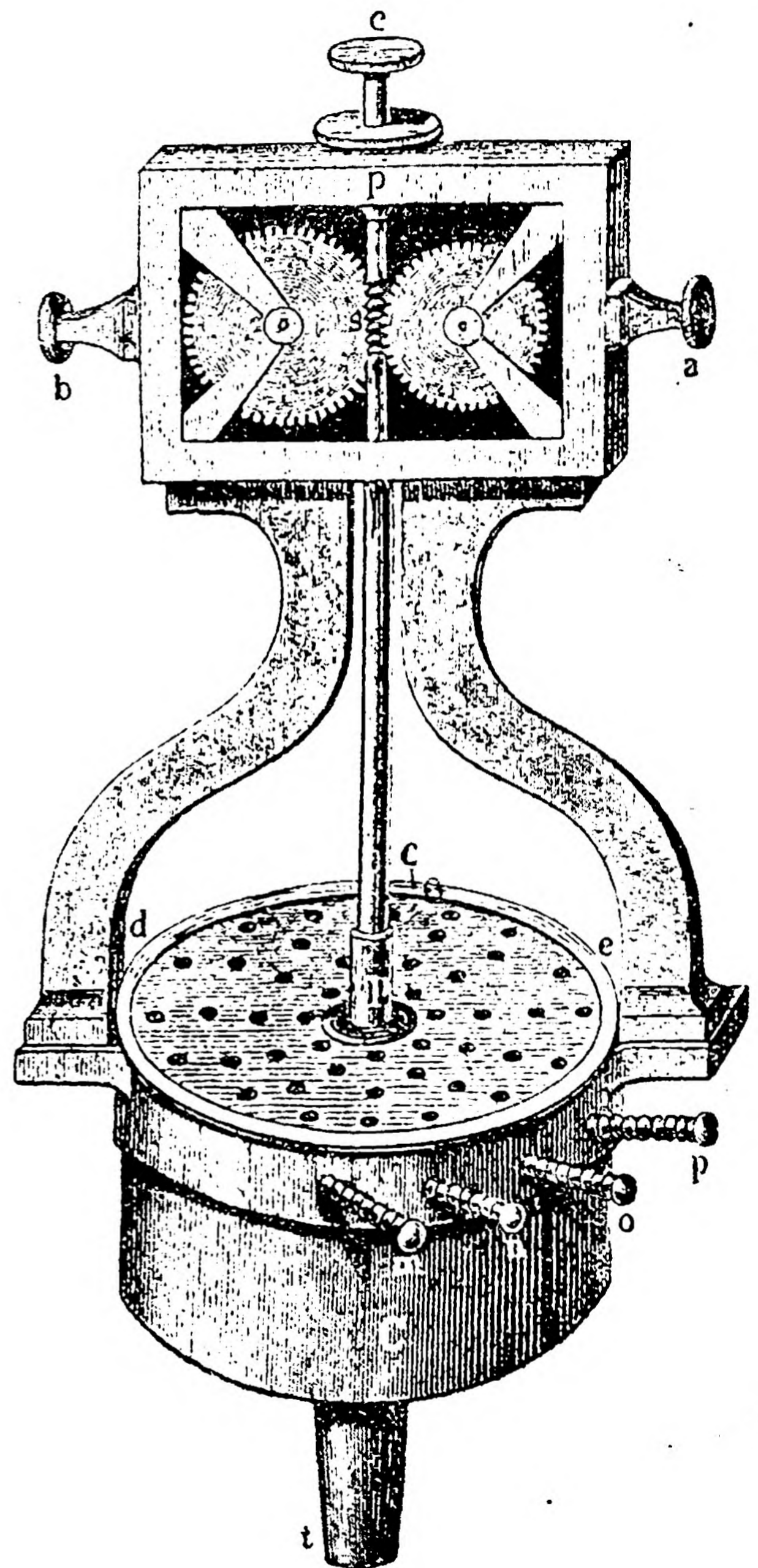
§ 7. Сирена, описание ее.

Я уже показал, посредством вращения картонного кружка с отверстиями, что музыкальный звук производится быстро следующими один за другим воздушными толчками. Если бы мы имели возможность сосчитать число оборотов, сделанных этим кружком в минуту, то этим самым могли бы определить число воздушных толчков в минуту, соответствующее известному звуку определенной высоты. Однако, картонный кружок есть только дешевый суррогат более совершенного аппарата, который вы видите здесь, который не требует центробежной машины и который сам отмечает свои обороты с совершеннейшею точностью. Я разберу на части этот инструмент так, чтобы вы могли видеть каждую часть отдельно. Медная труба t (фиг. 26) входит в этот медный цилиндр C , закрытый сверху медною крышкой ab . В этой крышке сделаны четыре ряда отверстий, расположенных четырьмя concentрическими кругами. Самый внутренний ряд имеет 8 отверстий, следующий—10, другой за ним—12 и, наконец, самый внешний—16. Когда я дую в трубу t , то воздух выходит через отверстия, и задача наша теперь состоит в том, чтобы эти дующиеся воздушные токи превратить в прерывистые толчки. Это достигается при помощи медного круга de , также имеющего в себе 8, 10, 12 и 16 отверстий на таких же расстояниях от центра и с такими же промежутками между ними, как отверстия в крышке цилиндра C . Через центр круга проходит стальная ось, оба конца которой p и p' тонко заострены. Теперь мне нужно, чтобы этот просверленный круг вращался над просверленной крышкой ab цилиндра C . Вы поймете, как это делается, замечая, как я складываю вместе части инструмента. В центре крышки ab (фиг. 26)

находится углубление s , хорошо отполированное и предназначенное для того, чтобы в него входил конец оси p' . Я и вставляю конец p' в это углубление и, держа ось перпендикулярно, насаживаю на ее верхний конец p стальную обхватку, которая держит ось сверху и прижимает ее к низу; однако, нажимание так слабо и полировка соприкасающихся поверхностей так хороша, что круг может вращаться с чрезвычайно малым трением. На фиг. 27 c есть обхватка, лежащая на верхнем



Фиг. 26.



Фиг. 27.

конце оси pp' . На этой же фигуре круг de представлен покрывающей крышечку цилиндра C . Я просил бы вас не обращать в настоящее время внимания на систему колес, находящихся в аппарате. Вращая медленно круг de , я заставляю отверстия его совпадать или не совпадать с отверстиями цилиндра, находящегося под ним. Когда круг вращается, то отверстия его проходят попеременно над отверстиями цилиндра и потом над сплошными пространствами, лежащими между ними. Поэтому ясно, что когда воздух будет вдуваться в C и в то же время мы заставим круг вращаться, то достигнем своей цели и превратим ток воздуха в отдельные толчки. В этом прекрасном инструменте круг приводится во вращение самим воздухом, ток которого он должен преры-

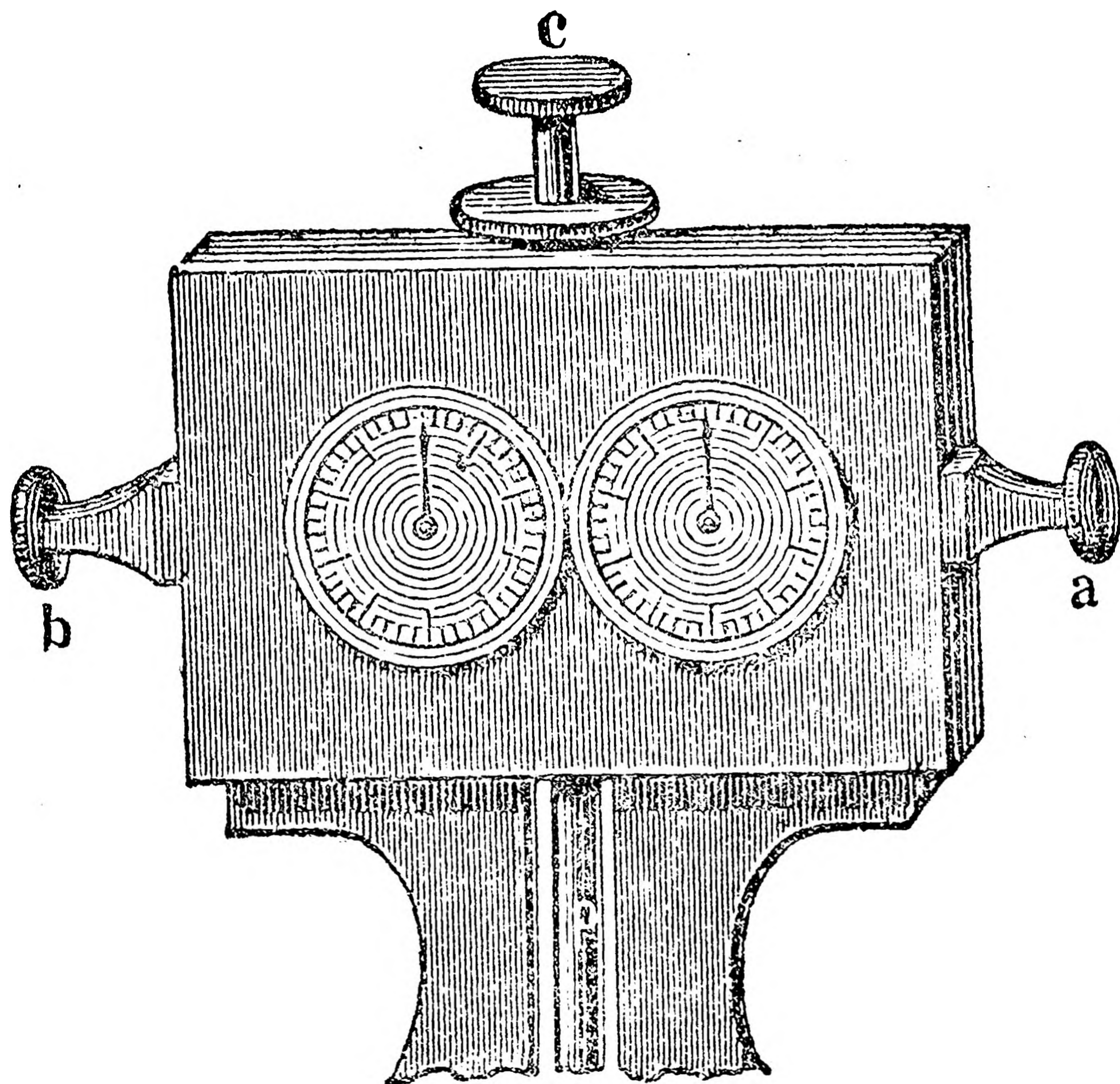
вать. Это достигается просто тем, что отверстия, находящиеся в крышке цилиндра, просверлены наклонно; также наклонно, только в противоположном направлении просверлены и отверстия во вращающемся круге *de*. Вследствие этого воздух выходит из цилиндра *C* не вертикально, но наклонными в сторону тока, которые ударяют в круг *de* и заставляют его вращаться. Таким образом действием самого прохода воздуха через сирену образуются воздушные звуковые волны.

В одну минуту вы также познакомитесь с тою частью аппарата, которая показывает число сделанных оборотов. На верхней части стальной оси *pp'* вы видите винт *S*, входящий в зубцы двух колес, видных с задней стороны инструмента на фиг. 27. Вы замечаете, что когда вращается круг и его ось, тогда вертятся и зубчатые колеса. На передней части аппарата (фиг. 28) вы просто видите два разделенные на градусы круга, со стрелками на них, как в часах. Эти стрелки и показывают число оборотов, сделанных кругом в данное время. Если я нажму пуговку *a* или *b*, то могу по произволу привести в действие или остановить движение колес и таким образом прекращать на время действие аппарата. считающего обороты. Вот наконец ряд штифтов *m, n, o, p*. (фиг. 27), посредством которых можно открывать или закрывать какой-нибудь ряд отверстий в крышке цилиндра *C*. Нажимая *m*, я открываю один ряд; нажимая *n*, открываю другой. Нажимая два или три штифта, я открываю два или три ряда отверстий; наконец, когда я нажму все штифты, то толчки воздуха выхоят одновременно из всех четырех рядов. Теперь перед вами полный инструмент, и я думаю вы знаете его теперь вполне.

Инструмент этот назвал сиреной изобретатель его Каньяр-де-ла-Тур. Инструмент, который вы видите, есть сирена, значительно усовершенствованная Ловэ. Сирена с картонным кружком, действие которой вы уже знаете, устроена Зебеком, который давал ей различные интересные формы и произвел при помощи ее различные важные опыты. Заставим теперь петь нашу сирену. Прижимая штифт *m*, я открываю самый крайний ряд отверстий в цилиндре *C* и, действуя мехами, заставляю воздух ударяться в круг, который вследствие этого и начинает вращаться. Вы слышите ряд толчков, которые следуют друг за другом так медленно, что их можно считать. Но по мере того, как движение ускоряется, толчки следуют с возрастающею быстротою, и вот вы слышите сначала низкий музыкальный топ. По мере того, как возрастает скорость вращения, топ становится выше: он теперь ясный и полный, и если я буду вдвигать воздух сильнее, то он становится таким пронзительным, что даже больно ушам. В этом мы имеем новое доказательство того, что высота звука зависит от быстроты колебаний. Как только я коснусь края круга, быстрота его вращения уменьшается, и тотчас же высота звука понижается. Я продолжаю надавливать круг, и звук продолжает понижаться, оканчиваясь такими же прерывистыми толчками, какими он начался.

Если бы меха были достаточно сильны и сирена имела мало препятствий со стороны трения, я бы мог заставить ее производить все

высшие и высшие тоны до тех пор, пока звук сделался бы, наконец, неслышным для человеческого уха. Но отсутствие звука еще не доказывало бы отсутствия вибрирующего движения в воздухе; а, напротив, показывало бы, что наш слуховой аппарат неспособен воспринимать или наш мозг неспособен превращать в звук вибрации, быстрота которых переходит за определенную границу. Ухо, как мы скоро это узнаем, походит в этом отношении на глаз.



Фиг. 28.

Посредством этой сирены я могу определить с крайней точностью быстроту вибраций какого угодно звучащего тела, будет ли это вибрирующая струна, органная трубка, флейта или человеческий голос. Действуя с большею тщательностью, мы могли бы даже по жужжанию насекомого определить число ударов, производимых его крыльями в секунду. Я покажу вам, как это делается, определивши в вашем присутствии быстроту колебаний этого камертона. Заставляя действовать меха, я вдуваю воздух в сирену и в то же время провожу смычком по камертону. И сирена и камертон звучат вместе, но камертон издает теперь более высокий тон. Однако, и тон сирены постепенно повышается, и вот вы слышите уже «биения», очень хорошо известные музыкантам и показывающие, что два тона не очень разнятся между собою по высоте. Вы замечаете, что эти биения становятся все реже и вот, наконец, совершенно исчезают; оба тона сливаются вместе, как будто бы они составляли единичный звук. Унисон между ними теперь

совершенный, и, регулируя давление мехов, я постараюсь продолжить его. Все это время колеса сирены оставались в бездействии; я их привожу в действие, толкая пуговку *a* как раз в тот момент, когда секундная стрелка моих часов станет на 60. Я даю кругу продолжать свое движение в течение минуты, возбуждая от времени до времени камертоном, чтобы убедить вас и себя в том, что унисон продолжается. Вот секундная стрелка снова пришла к 60: быстро толкаю *b* и останавливаю колеса: и вот на циферблатах сирены точно показывается стрелками число оборотов круга, сделанных в минуту. Это число есть 1440. Ряд отверстий, бывших открытыми во время опыта, состоят из 16; таким образом в каждый оборот круга мы получали 16 толчков воздуха и 16 звуковых волн. Помножая 1440 на 16, получим 23040, число вибраций, делаемых камертоном в минуту. Разделив это число на 60, мы получим число колебаний в секунду—384.

§ 8. Определение длины волн: время вибрации.

Определивши быстроту вибраций, весьма легко можно уже найти длину соответствующих звуковых волн. Вообразите, что этот камертон вибрирует в свободном воздухе. По прошествии секунды от начала его колебаний самая первая образовавшаяся волна пройдет расстояние 337 метров по воздуху при 0°. По воздуху этой залы, который имеет температуру 15° Ц., она пройдет в секунду расстояние 340 метров. Таким образом, на этом пространстве помещается 384 звуковых волны. Поэтому, разделяя 340 на 384, мы находим, что длина каждой волны составляет почти 1 метр. Определяя подобным образом быстроту вибраций четырех находящихся у нас здесь камертонов, мы находим, что числа вибраций их в секунду составляют 256, 320, 384 и 512. Эти числа соответствуют длинам волн в 133, 106, 89 и 69 сантиметров. Волны, производимые голосовыми органами мужчины при обыкновенном разговоре, имеют длину от 2,5 до 3,5 метров, а голосовыми органами женщины от 60 до 120 сантим. Поэтому обыкновенный женский голос при низких тонах разговора больше чем октавою выше мужского, а при высоких—выше двумя октавами.

Здесь важно заметить, что когда я говорю о вибрациях, то разумею *п о л н ы е в и б р а ц и и*; и когда говорю о звуковой волне, то разумею сгущение и следующее за ним разрежение. Таким образом, я включаю в вибрацию колебания вибрирующего тела *в п е р е д и н а з а д*. Каждая волна, произведенная такими вибрациями, толкает барабанную перепонку сначала внутрь, а затем наружу. Такие определения вибраций и звуковых волн принимают в Англии и Германии. Напротив, во Франции принимается, что вибрация состоит в колебании вибрирующего тела *т о л ь к о в о д н о м н а п р а в л е н и и*—или вперед или назад. Поэтому вибрации в французском определении составляют только половину вибраций в английском определении, и мы на этом основании называем их полувибрациями. Везде в этих лекциях, где употребляется

слово вибрация (качание, колебание) без дальнейшего обозначения его, оно означает полную вибрацию.

В течение времени, нужного каждой из этих звуковых волн на прохождение через частичку воздуха, эта частичка совершает одно целое колебание или вибрацию. В один момент она отталкивается вперед к сгущению, между тем как в следующий момент она идет назад к разрежению. Время, употребляемое частичкою на совершение полной вибрации, есть, таким образом, то время, которое нужно звуковой волне, чтобы пройти вперед на расстояние, равное ее длине. Предположим, что длина волны 2 метра, а скорость звука в воздухе при температуре нашей залы 340 метров в секунду; в таком случае волна пройдет расстояние, равное ее длине в $\frac{1}{170}$ секунды; эта часть секунды и есть время, нужное каждой воздушной частичке для совершения целой вибрации. В воздухе определенной плотности и упругости известная длина волн всегда соответствует одинаковой высоте тона. Но предположим, что плотность или упругость не одинаковы, что, напр., звуковая волна от одного из наших камертонов переходит из холодного воздуха в теплый: тогда происходит увеличение длины волны без всякого изменения высоты тона потому, что не произошло никакой перемены в скорости, с какою волны достигают до нашего уха. И, наоборот, при одинаковой длине волн высота тона могла бы быть выше в теплом воздухе, чем в холодном, потому что волны могли бы быстрее следовать одна за другою. В атмосфере водорода волны в 2 метра длины произвели бы тон почти на две октавы выше, чем в воздухе, потому что вследствие большей скорости распространения число импульсов, получаемых в данное время ухом, в первом случае было бы почти в 4 раза больше, чем во втором.

§ 9. Определение октавы.

Если я открою вместе самый внутренний и самый крайний ряд отверстий нашей сирены, то будут ли они звучать вместе или один после другого, те из моих слушателей, которые имеют музыкальное ухо, сразу узнают отношение между двумя звуками. Они сразу скажут, что звук, производимый рядом из 16 отверстий, есть октава относительно звука, производимого рядом из 8 отверстий. Но на каждую волну, производимую последним, первый производит две волны. Этим и доказывается, что термин «октава» в физическом смысле означает тон, производимый числом вибраций вдвое большим против его основного тона. Помножая вибрации октавы на 2, мы получаем октаву этой октавы и посредством дальнейшего помножения этого рода получим ряд чисел, соответствующих ряду октав. Выходя, напр., из основного тона в 100 вибраций, мы пришли бы этим последовательным помножением, что пятая высшая октава этого тона производится 3200 вибраций, именно:

	200	800
	× 2	× 2
100 основной тон	400 вторая октава	1600 четвертая октава
× 2	× 2	× 2
200 первая октава	800 третья октава	3200 пятая октава

То же число получается скорее помножением вибраций основного тона на 2, возведенное в пятую степень. В следующей лекции мы еще возвратимся к этому вопросу о музыкальных интервалах. Для настоящей моей цели мне нужно было только определить октаву.

§ 10. Границы слуха и музыкальных звуков.

Я уже сказал, что ухо может слышать звуки только в известных границах. Восприятие им музыкальных звуков ограничено в обоих направлениях. Савар определял низшую границу человеческого уха 8 полными вибрациями в секунду; и для того, чтобы заставить эти медленные вибрации сливаться вместе, он принужден был употреблять колебания большой силы. Посредством зубчатого колеса и приделанного к нему аппарата, считающего обороты, он определил высшую границу слуха в 24000 вибраций в секунду. Гельмгольц определил низшую границу 16 вибрациями, а высшую 38000 в секунду. Депрец показал, употребляя весьма малые камертоны, что звук, соответствующий 38000 вибраций, может быть слышим ¹⁾. Исходя из тона в 16 вибраций и помножая его последовательно на 2 или, короче, возвысив 2 в 11-ю степень и помножая ее на 16, мы найдем, что 11-й октаве выше основного тона соответствуют 32768 вибраций. Таким образом, принимая границы, указанные Гельмгольцем, весь об'ем человеческой способности слуха обнимает около 11 октав. Но не все тоны, лежащие внутри этих границ, могут быть употребляемы в музыке. Обыкновенно употребляемые звуки лежат между 40 и 4000 вибраций в секунду, что круглым числом составляет 7 октав ²⁾.

Границы слуха у различных лиц различны. Волластон, который первый заметил это, стараясь определить высоту самых высоких тонов,

¹⁾ Ошибка Савара, как показал Гельмгольц, состоит в том, что он устраивал опыты таким образом, что при них верхние гармонические тоны (о них будет речь в III лекции), могут быть ошибочно приняты за основной тон.

²⁾ «Самый низкий тон оркестровых инструментов есть Е контрабаса с $41\frac{1}{4}$ вибраций. Новые фортепиано и органы идут обыкновенно до С' с 33 вибраций; большие новые рояли могут доходить до А'' с $27\frac{1}{2}$ вибраций. В больших органах вставляют еще более низкую октаву, которая достигает до С'' с $16\frac{1}{2}$ вибраций. Но все тоны ниже Е музыкально несовершенны, потому что они близки к границе, за которою ухо не может соединять вибраций в тон. В высоту фортепиано достигает *aiu* с 3520 или иногда *cu* с 4224 вибраций. Самый высший тон в оркестре есть вероятно *cl* piccoloфлейты с 4752 вибраций». Гельмгольц, *Ton-m. fundamen.* S. 30.—В этом обозначении мы выходим из С с 66 вибраций, обозначая первую низшую октаву С', а вторую С''; первую же высшую октаву мы обозначаем с, вторую с', третью с'', четвертую с''' и т. д. В Англии, как мне сообщил Макварен, самый низший тон есть не Е, но А около четверти октавы выше Е.

нашел у одного из своих друзей совершенную нечувствительность к звуку небольшой органной трубки, который, однако, лежал далеко внутри обыкновенных границ слуха. Чувство слуха у этого лица оканчивалось тоном на четыре октавы выше среднего *E* в фортепиано. Некоторые лица, имеющие чувствительное ухо к низким звукам, не слышат писка летучей мыши, звуков сверчка, даже чириканья обыкновенного воробья. Повышение на один тон иногда достаточно, чтобы превратить звук в молчание. «Внезапность перехода,—пишет Волластон,—от совершенного слышания к совершенному отсутствию восприятия поражает так сильно, что опыты подобного рода с рядом маленьких труб над различными лицами весьма забавны. Любопытно наблюдать, как в обществе из нескольких лиц разные лица высказывают последовательно изумление, когда звуки приближаются к границе их слуха или переходят ее. Те, которые радовались недавно своей победе, часто в свою очередь принуждены бывают сознаться, как далеко простирается их превосходство над другими». — «Ничего не может быть поразительнее,—пишет относительно этого предмета Гершель,—как видеть двух лиц вовсе не глухих, из которых одно жалуется на пронзительную резкость звука, между тем как другое утверждает, что вовсе нет никакого звука. Так, напр., между тем как одно лицо, приводимое Волластоном, едва только слышало тон четырьмя октавами выше среднего *E* фортепиано, другие лица воспринимали явственно тоны двумя октавами выше этого. Чириканье воробья составляет первую границу, а писк летучей мыши лежит почти октавою выше; жужжанье же некоторых насекомых вероятно еще октавой выше». В моем сочинении «Альпийские ледники» я привел случай малых границ слуха, виденный мною, когда я с одним другом переходил через Венгерн Альп. Луга по обеим сторонам дороги были полны насекомыми, которые для моего слуха наполняли воздух своим резким жужжанием. Но мой друг ничего этого не слышал; музыка насекомых лежала вне границ его слуха ¹⁾.

§ 11. Барабан уха. Евстахиева труба.

За барабанной перепонкой находится полость, барабан уха, отчасти занятая рядом косточек, отчасти наполненная воздухом. Эта полость сообщается со ртом посредством прохода, называемого Евстахиевой трубой. Обыкновенно эта трубка бывает закрыта и пространство за барабанной перепонкой отрезано от сообщения с наружным воздухом. Если при этих обстоятельствах наружный воздух становится плотнее, то он давливает барабанную перепонку внутрь. Напротив, если внешний воздух становится разреженнее, то когда Евстахиева труба бывает закрыта, он выпячивает барабанную перепонку наружи. В обоих этих случаях чувствуется боль и некоторая глухота. Когда я однажды ночью проходил с одним другом *Stelvio Pass*, он жаловался на сильную боль

¹⁾ Френсис Гальтон с свойственною ему своеобразною гениальностью с помощью придуманных им маленьких труб исследовал высшую границу слуха.

в ушах. Я посоветовал ему проглотить слюну; он сделал это и боль мгновенно исчезла. Во время акта глотания Евстахиева труба открывается, и таким образом восстанавливается равновесие между внутренним и наружным давлением.

Возможно сделать слух чувствительным к низким звукам, закрывая нос и рот и расширяя грудь, как при акте вдыхания. Это усилие уменьшает количество воздуха в пространстве за барабанной перепонкой, которая вследствие этого натягивается давлением наружного воздуха. Напротив, получается глухота к низким звукам, если зажать нос и рот и сильно надуться, как при акте выдыхания. В этом последнем случае воздух через Евстахиеву трубу вгоняется в барабан уха и таким образом барабанная перепонка растягивается давлением внутреннего воздуха. Подобный опыт можно сделать в вагоне железной дороги, и тогда тихие звуки исчезают или значительно ослабевают, между тем как громкие звуки слышатся с неизменной силой. Волластон умел легко закрывать Евстахиеву трубу и наполнять пространство за барабанной перепонкой сгущенным или разреженным воздухом. Он мог, таким образом, продолжить свою глухоту какое угодно время без малейшего усилия с своей стороны, всегда, конечно, уничтожая ее актом глотания. Внезапное сотрясение может произвести глухоту, или вгоняя воздух в барабанную полость или выгоняя его из нее. Летом 1858 года, когда я был в Швейцарии и спрыгнул со скалы на другую скалу, которая казалась мне покрытою толстым слоем снега, и сильно ударился, так как снег, оказалось, покрывал ее тонкой пленкой. Тотчас же для меня умолк шум ветра и снеговых потоков и все другие звуки, раздающиеся на горах в солнечный день. Я едва мог слышать звук голоса моего проводника. Эта глухота длилась с полчаса; затем от надлежащего движения Евстахиева труба открылась и с магической быстротой сделала слышными все звуки, наполнявшие воздух вокруг меня.

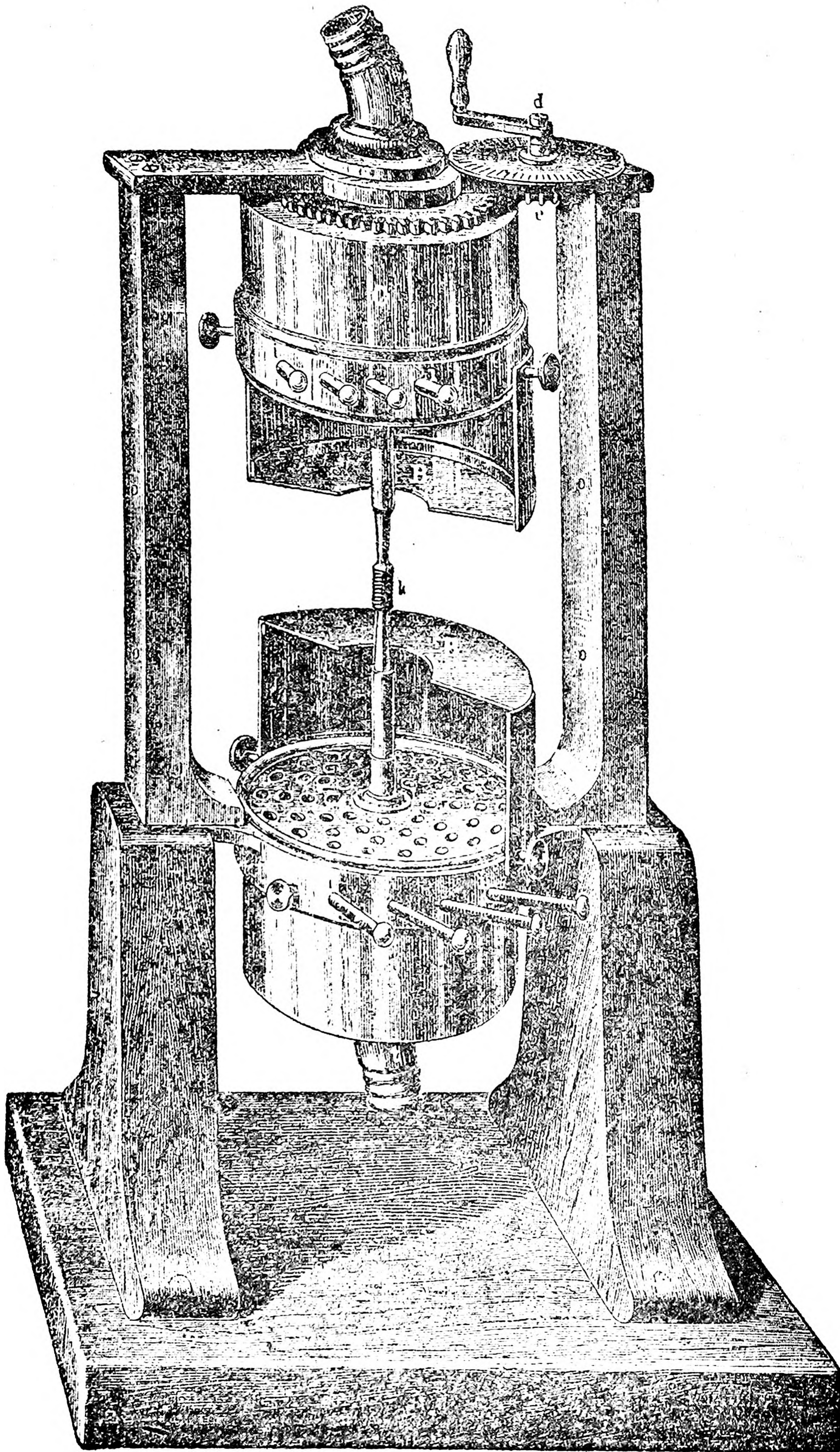
Свет, подобно звуку, также производится колебаниями или волнами; и свет различных цветов, подобно звукам различной высоты, возбуждается различными скоростями вибраций. Но по обширности границ восприятия ухо значительно превосходит глаз: тогда как первое воспринимает 11 октав, для второго возможно восприятие только несколько больше одной октавы. Самые быстрые вибрации, воспринимаемые глазом как свет, только почти вдвое превосходят по быстроте самые медленные ¹⁾, между тем как самые быстрые вибрации, действующие на слух, как музыкальный звук, более чем в две тысячи раз превосходят скорость самых медленных.

¹⁾ Едва ли нужно говорить здесь, что самые быстрые и короткие световые волны соответствуют крайнему фиолетовому цвету, между тем как самые медленные вибрации и самые длинные волны соответствуют крайнему красному цвету в спектре.

§ 12. Двойная сирена Гельмгольца.

Довэ, как мы видели, увеличил практичность и пользу сирены Каньяра де-ла-Тура тем, что сделал в ней четыре ряда отверстий вместо одного. Гельмгольц, удвоивши все части ее, очень увеличил ее силу. Здесь (фиг. 29) вы видите двойную сирену, как она называется. Она состоит из двух сирен Довэ, C и C' , из которых верхняя обращена вниз. В нижней сирене вы узнаете инструмент, с которым мы уже познакомились. Вы видите круг с его отверстиями и четыре штифта, служащие для открывания их. Круги обеих сирен имеют общую ось, так что когда вращается один, то вращается с ним и другой. Как и в прежней сирене, число оборотов показывается колесами и стрелкой (на рисунке их нет). Когда воздух вдувается через трубу t' , тогда звучит только верхняя сирена; когда же он одновременно вдувается через t' и t , тогда звучат обе сирены. Таким образом с этим инструментом мы можем производить больше комбинаций, чем с прежним. Гельмгольц дал еще инструменту такое устройство, при котором мог вращаться не только круг верхней сирены, но и цилиндр C' , находящийся над кругом. Это делается посредством зубчатого колеса и шестерни, приводимой в движение рукояткой. Под рукояткой находится циферблат со стрелкой, цель которого будет показана впоследствии.

Обратим сначала внимание на верхнюю сирену. Посредством каучуковой трубки я соединяю отверстие t' с нашими акустическими мехами и вдуваю воздух в C' . Круг его начинает вращаться и мы получаем посредством его все результаты, уже полученные с сиреной Довэ. Высота тона остается теперь неизменною. Затем я вращаю рукоятку, так, чтобы отверстия цилиндра C' встретились с отверстиями круга; ясно, что два ряда отверстий должны теперь проходить один над другим быстрее, чем в том случае, если бы цилиндр оставался без движения. Вы понимаете результат: когда рукоятка вращается, тотчас же тон становится выше. Давая рукоятке обратное движение, мы заставляем отверстия проходить одно над другим медленнее, чем в том случае, если бы цилиндр C' не двигался, и потому вы замечаете, что как только рукоятка начинает вращаться, тотчас же высота тона понижается. Таким образом, быстро переменяя вращение рукоятки то направо, то налево, мы получаем эти сменяющиеся повышения и понижения тона. Чрезвычайно поучительное явление этого рода можно наблюдать на всякой станции железной дороги при проходе поезда, идущего с большою скоростью. Во время его приближения звуковые волны, издаваемые свистком, укорачиваются и в данное время достигает до уха большее число их. Во время же удаления звуковые волны удлиняются. Следствием этого бывает то, что во время приближения свисток дает высший тон, а во время удаления—низший, против того, какой он дает, когда поезд стоит. Таким образом, когда поезд проходит мимо станции,



Фиг. 29.

замечается понижение тона свистка ¹⁾). Этот факт и служит основанием теории Допплера о цветных звездах. Он предполагает, что все звезды белы, но что некоторые из них быстро удаляются от нас и, таким образом, от удлинения своих световых волн становятся зелеными или голубыми. Эта теория чрезвычайно остроумна, но верность ее более чем сомнительна.

§ 13. Распространение музыкальных звуков в жидкостях и твердых телах.

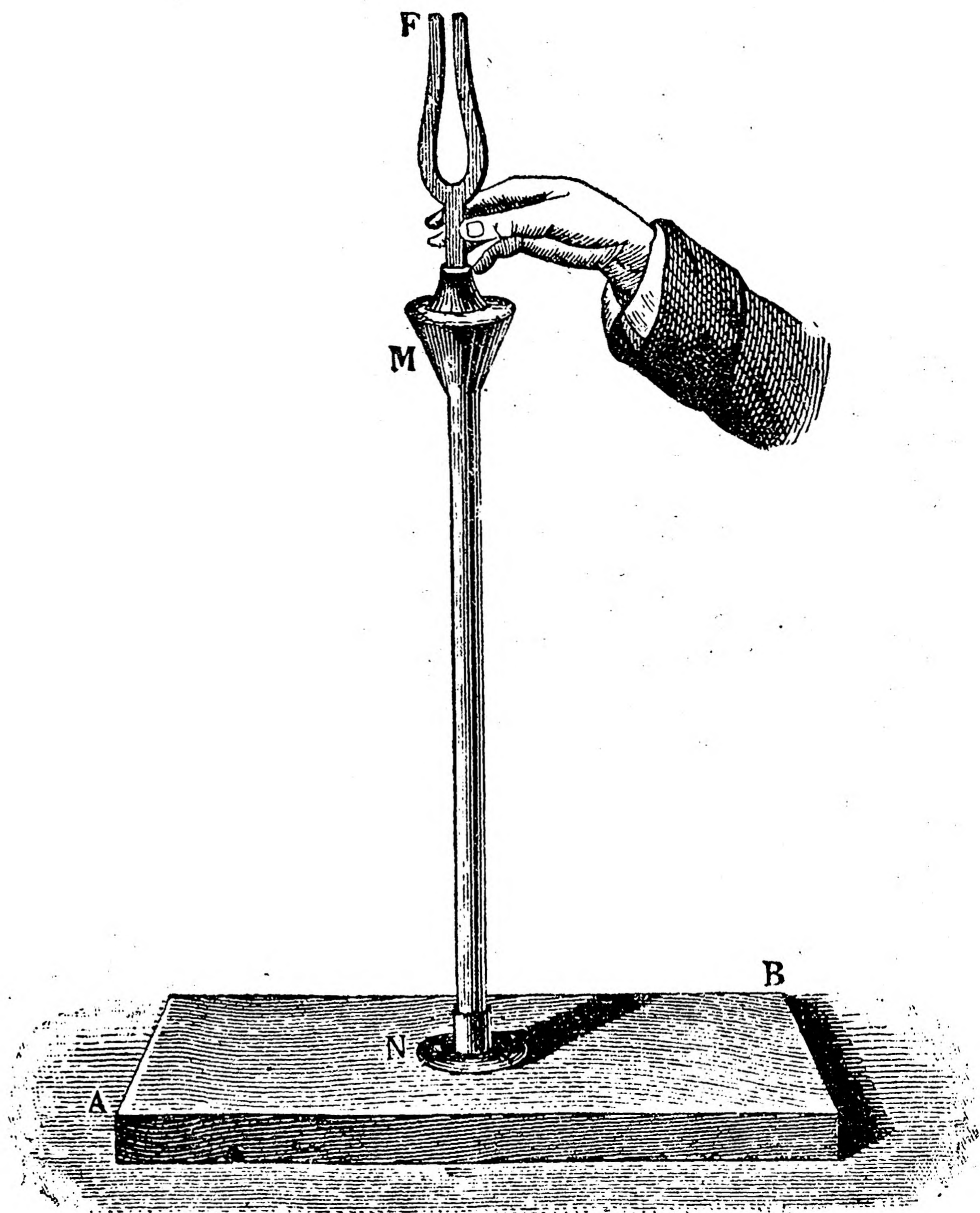
Мы занимались до сих пор распространением музыкальных звуков в воздухе. Они также хорошо распространяются в жидких и твердых телах. Чтобы доказать это, я ставлю на стол стакан и наполняю его водою. Я ударяю камертон и тем заставляю его вибрировать, но, за исключением лиц, находящихся вблизи меня, никто не слышит его вибраций. Затем, вот камертон привинчен к маленькой деревянной подставке, которую я погружаю в воду, но так, чтобы она не касалась стенок стакана. Тотчас же вы слышите музыкальный звук. Вот у меня (фиг. 30) трубка *MN*, в три фута длиною, стоящая вертикально на деревянной доске *AB*. Трубка оканчивается вверху воронкой, которую я всю наполняю водою. По-прежнему я заставляю камертон *F* издавать тон и опускаю подставку его в воронку наверху трубки; вы слышите музыкальный звук. Я должен, однако, сказать, что здесь издает звук главным образом деревянная доска. Она была приведена в вибрацию камертоном, но вибрации передались доске через воду. Через такую же среду вибрации сообщаются и слуховому нерву, конечные нити которого погружены в жидкость. Взявши вместо воды ртуть, мы получим подобный же результат.

Сирена обязана своим названием тому свойству, что она может петь и в воде. Сосуд, стоящий теперь перед столом, до половины наполнен водою, в которую погружена вся сирена. Если я отпущу этот кран, то вода из труб, по которым она проведена в это здание, устремится в инструмент. Круг его начинает вращаться и из сосуда выходит звук, высота которого быстро увеличивается, и оттого так быстро, что тяжелая и находящаяся под сильным давлением вода доводит круг до самой крайней быстроты его вращения. Я несколько убавляю приток воды и звук понижается. Таким образом, попеременно то отпирая, то запирая кран, я заставляю пение сирены то повышаться, то понижаться диким и меланхолическим образом. Вы конечно не поверите, чтобы в древности моряки очаровывались таким пением и из-за него жертвовали жизнью.

Распространение звука через твердые тела может быть также показано легким и приятным образом. Перед вами стоит деревянный шест

¹⁾ Опыты над этим явлением были впервые произведены Бюн Баллотом на голландских железных дорогах и потом их производил Скотт Россель в Англии. В настоящее время идеи Допплера применены к определению движений солнца и неподвижных звезд на основании изменений длины волн световых.

в 10 метров длины, который от этого стола через окно в потолке выходит на открытый воздух. Нижний конец шеста стоит на деревянной доске, которой я надеюсь передать музыкальный тон тела, находящегося на его верхнем конце. Мой помощник стоит там наверху с камертоном в руке. Он ударяет камертоном о подушку; камертон вибрирует, по



Фиг. 30.

вы ничего не слышите. Затем он приставляет камертон к концу шеста, и тотчас же деревянная доска на столе начинает издавать музыкальный звук. Однако высота этого звука совершенно равна высоте звука камертона; дерево совершенно пассивно относительно высоты, оно в точности передало сообщенные ему вибрации без всякого изменения. Я употребляю другой камертон и получаю тон другой высоты. Таким образом, я мог бы употребить последовательно 50 камертонов вместо

двух и шест в 100 метров вместо 10, и все-таки дерево передало бы именно те вибрации, которые сообщены ему, и никакие другие.

После этого мы уже можем понять прекрасный опыт, которым мы обязаны профессору Уитстону и который я могу произвести перед вами. В комнате, находящейся под этой залой через два этажа, стоит фортепиано. Из нее идет через два этажа оловянная трубка в 6 сантим. в диаметре. Внутри ее укреплен сосновый шест, конец которого выходит из пола перед этим столом. Шест обвит каучуковыми лентами, которые вполне наполняют все пространство оловянной трубки. Нижний конец шеста стоит на резонансовой доске фортепиано, а верхний вы видите перед собою. В это время артист играет на инструменте, но вы не слышите звуков. Я кладу скрипку на конец шеста; она вдруг начинает издавать тоны не вибрациями своих струн, а вибрациями фортепиано. Я снимаю скрипку, и звуки прекращаются; я помещаю на ее место гитару, и звуки снова возобновляются. Вместо скрипки и гитары я кладу эту обыкновенную деревянную доску; она тоже издает звуки. Вот наконец арфа, в резонансовую доску которой я упираю конец деревянного шеста; каждый тон фортепиано воспроизводится перед вами. Я отодвигаю арфу так, чтобы прекратилось ее сообщение с фортепиано, и звуки исчезают; но игра снова слышится в то мгновение, когда я касаюсь арфы шестом. Звук фортепиано до такой степени походит на звук арфы, что трудно победить впечатление, по которому кажется, будто слышимая музыка производится арфой. Необразованный человек мог бы легко поверить, что в произведении этой музыки участвует какая-нибудь волшебная сила.

Какая любопытная передача действия представляется здесь нашему уму! По импульсу воли музыканта его пальцы ударяют клавиши; молоточки бьют струны, в которых грубый механический удар превращается в сотрясения. Вибрации струн сообщаются резонансовой доске фортепиано. На доске стоит конец деревянного шеста, заостренный в тонкое острие, чтобы он легко мог пройти между струнами. По этому концу и потом по всей длине шеста передаются с непогрешимой точностью сложные толчки, производимые ударами десяти беглых пальцев. Резонансовой доске арфы, находящейся перед вами, шест верно передает вибрации, которые сообщены ему. Эта вторая резонансовая доска передает движение воздуху, рассекает и разлагает его на такие крайне сложные и перепутанные формы, что нужно было бы ожидать только запутанных впечатлений от толчков и перекрещиваний звуковых волн. Но чудесно организованное человеческое ухо воспринимает каждую форму и вид движения, и всю борьбу, столкновение и смешение сливает в мозгу в музыку ¹⁾.

¹⁾ Обыкновенный музыкальный ящик может заменить в этом опыте фортепиано.

ОБЗОР ВТОРОЙ ЛЕКЦИИ.

Музыкальный звук производится толчками, которые следуют один за другим через правильные промежутки и с достаточной быстротой.

Шум же производится неправильно следующими друг за другом толчками.

Музыкальный звук может быть произведен ударами, которые следуют быстро и правильно. Удары карты о зубцы вращающегося колеса обыкновенно употребляются для доказательства этого.

Музыкальный звук также может быть произведен дуновениями или воздушными толчками. Сирена есть инструмент, посредством которого получают такие толчки.

Высота музыкального тона зависит исключительно от числа вибраций, его производящих. Чем быстрее вибрации, тем выше тон.

Посредством сирены можно определить быстроту вибраций всякого звучащего тела. Для этого нужно довести звук сирены до одинаковой высоты с тоном звучащего тела, удержать на некоторое время оба звука в унисоне и посредством стрелки сирены сосчитать, сколько толчков сделал инструмент в это время. Число толчков выражает число вибраций, сделанных звучащим телом.

Когда тело, способное издавать музыкальный тон, напр., камертон, вибрирует, то оно производит в окружающем воздухе звуковые волны, из которых каждая состоит из сгущения и разрежения.

Длина звуковой волны определяется расстоянием от сгущения до сгущения или от разрежения до разрежения.

Длину волны можно найти, разделяя скорость звука в секунду на число вибраций, производимых в секунду звучащим телом.

Таким образом, камертон, вибрирующий 256 раз в секунду, производит в воздухе при 15° Ц., когда скорость звука составляет 340 метров в секунду, волны длиною в 133 сантиметра. Другие же камертоны, вибрирующие один 320, а другой 384 раз в секунду, производят волны длиною первый 106 см., а второй—89 см.

Вибрация, как ее определяют в Англии и Германии, состоит из движения взад и вперед. Она есть полная вибрация. Напротив, во Франции под вибрацией понимается движение только вперед или назад. Французские вибрации суть таким образом полувибрации.

Время, употребляемое частичкой воздуха, по которой проходит звуковая волна, на совершение полной вибрации, есть, таким образом, то время, которое нужно и звуковой волне на то, чтобы пройти расстояние, равное ее собственной длине.

Чем выше температура воздуха, тем длиннее звуковые волны, соответствующие каждой быстроте вибрации. Если дана длина волны и быстрота вибрации, то можно легко вывести из них температуру воздуха.

Человеческое ухо ограничено в восприятии музыкальных звуков. Если число вибраций меньше 16 в секунду, то мы можем воспринимать

их как отдельные толчки. Если же число больше 38000 в секунду, то также невозможно ощущение звука. Пространство между двумя крайними границами для самого лучшего уха составляет около 11 октав; но нередки случаи людей, у которых ухо обнимает только 6 или 7 октав.

Тоны, употребляемые в музыке, производятся вибрациями, лежащими в границах от 40 до 4000 в секунду. Они составляют 7 октав.

Объем слуха далеко превосходит объем зрения, которое обнимает едва больше октавы.

Посредством Евстахиевой трубы, которая открывается во время акта глотания, уравнивается давление по обеим сторонам барабанной перепонки.

Сгущая или разрежая воздух сзади барабанной перепонки, можно произвести глухоту к низким тонам.

Во время приближения поезда железной дороги тон свистка бывает выше, а во время удаления ниже, чем в том случае, когда поезд стоит.

Музыкальные звуки распространяются также в жидких и твердых телах. Такие звуки могут быть переводимы из одной комнаты в другую, из нижнего этажа до чердака дома, состоящего из нескольких этажей, так что звук не будет слышен в промежуточных комнатах, и становится слышимым только тогда, когда вибрации сообщаются надлежащей резонансовой доске.

Лекция третья.

Вибрации струн.—Их употребление в музыке.—Влияние резонансовых полостей.—Законы вибрирующих струн.—Опыты в больших размерах.—Комбинация прямых и отраженных импульсов.—Стоячие и поступательные волны.—Узлы и пучности.—Применение полученных результатов к вибрациям звучащих струн.—Опыты Мельде.—Струны, приводимые в вибрации камертонами.—Законы вибраций, объясненные этим способом.—Гармонические тоны струн.—Определения тембра или качества звука, верхних тонов и звуковых оттенков.—Уничтожение отдельных гармонических тонов.—Условия, определяющие силу гармонических тонов.—Оптические исследования вибраций фортепианной струны.

§ 1. Вибрация струн; влияние резонансовых поверхностей.

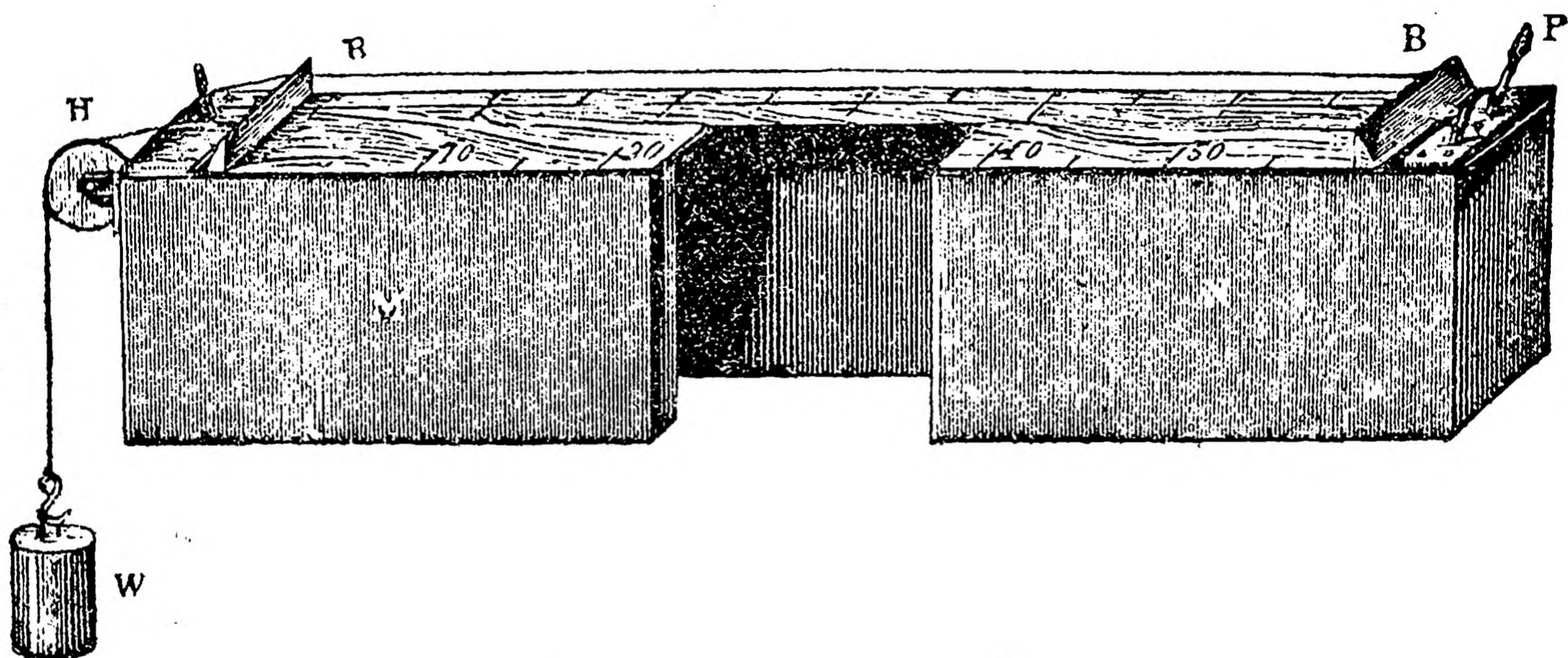
Сегодня мы начнем заниматься вибрациями струн или проволок, для того, чтобы изучить, каким образом эти тела употребляются как источники музыкальных звуков, и исследовать законы их вибраций.

Для того, чтобы струна могла вибрировать поперечно, она должна быть натянута между двумя укрепленными точками. Перед вами (фиг. 31) стоит инструмент, употребляемый для натягивания струн, так чтобы их вибрации могли быть слышимы. От колка p , к которому прикреплен один конец струны, она идет через две подставки B и B' и затем через весьма легко подвижный блок H . Струна наконец натягивается тяжестью W в 10 килограммов, прикрепленною к ее другому концу. Подставки B и B' , составляющие собственно концы струны, укреплены на длинном деревянном ящике MN . Весь этот инструмент называется монохордом или сонометром.

Я беру натянутую струну BB' за ее середину, оттягиваю ее несколько в сторону и затем вдруг пускаю ее. Мы будем вперед всегда называть это действие ударением в струну. Когда я ударю в струну и тем оттяну ее в сторону, она возвращается назад в свое прежнее положение, переходит за него и снова возвращается и таким образом некоторое время вибрирует сюда и туда около линии своего равновесия. Вы слышите звук и в то же время можете ясно видеть границы, между которыми вибрирует струна. Звуковые волны, которые в настоящее время ударяют в ваши уши, происходят не прямо от струны. Количество движения, какое может сообщить воздуху такое тоненькое тело, слишком мало, чтобы быть слышимым на некотором расстоянии. Но струна туго натянута на двух подставках BB' , и когда она вибрирует, то ее сотрясения сообщаются через эти подставки всей массе ящика MN

и воздуху, находящемуся внутри ящика, которые таким образом и становятся собственно звучащими телами.

Что одни вибрации струн еще недостаточны для произведения звука, это может быть доказано следующим опытом: AB (фиг. 32) — кусок дерева, лежащий на железном гвозде C . На каждом конце деревянного куска повешена веревка, окапчивающаяся петлей, и через эти две петли продет железный прут mn . На середине железного прута висит стальная проволока ss , натянутая тяжестью W в 14 килогр. Таким образом, проволока устранена от соприкосновения со всеми большими поверхностями, которым она могла бы сообщить свои вибрации. Но вот другая проволока tt' (фиг. 33) такой же длины, толщины и из такого же ма-



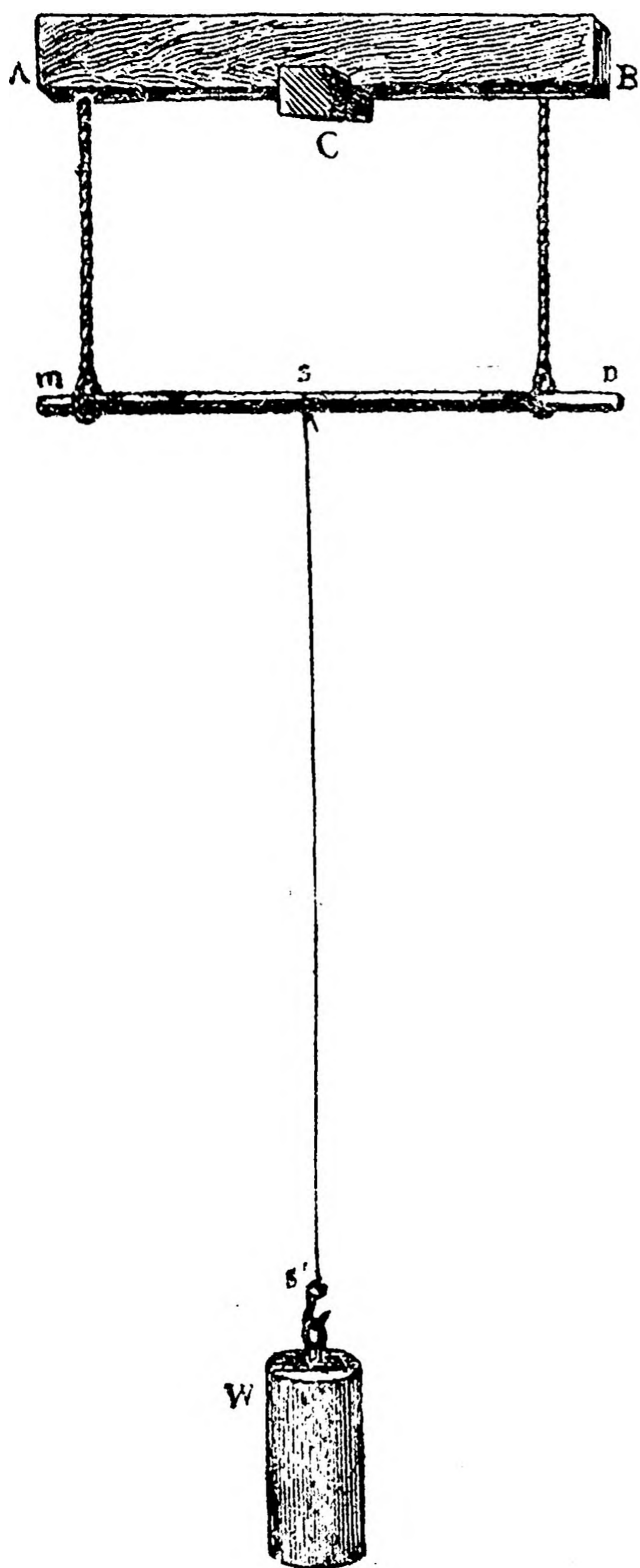
Фиг. 31.

териала, как проволока ss' , и прикрепленная одним из своих концов к деревянной доске AB . Эта проволока также имеет на другом конце тяжесть W в 14 килогр. Наконец, мы имеем еще третью проволоку, проходящую через подставки BB' сонометра (фиг. 31), во всех отношениях одинаковую с двумя первыми и подобно им также натянутую тяжестью W в 14 килогр. Я ударяю в проволоку ss (фиг. 32). Она сильно вибрирует, но даже сидящие на ближайших скамьях не слышат никакого звука. Сотрясения, какие она сообщает воздуху, слишком незначительны, чтобы они могли подействовать на слуховой нерв с некоторого расстояния. Затем я заставляю вибрировать проволоку tt' (фиг. 33), и вы все ясно слышите ее звук. Хотя только один конец этой проволоки соединен с доской AB , однако вибрации, сообщенные последней, достаточны для того, чтобы сделать ее звучащим телом. Наконец, я ударяю в проволоку сонометра MN (фиг. 31); звук, происходящий при этом, силен и полон, потому что инструмент специально устроен для того, чтобы воспринимать вибрации проволоки.

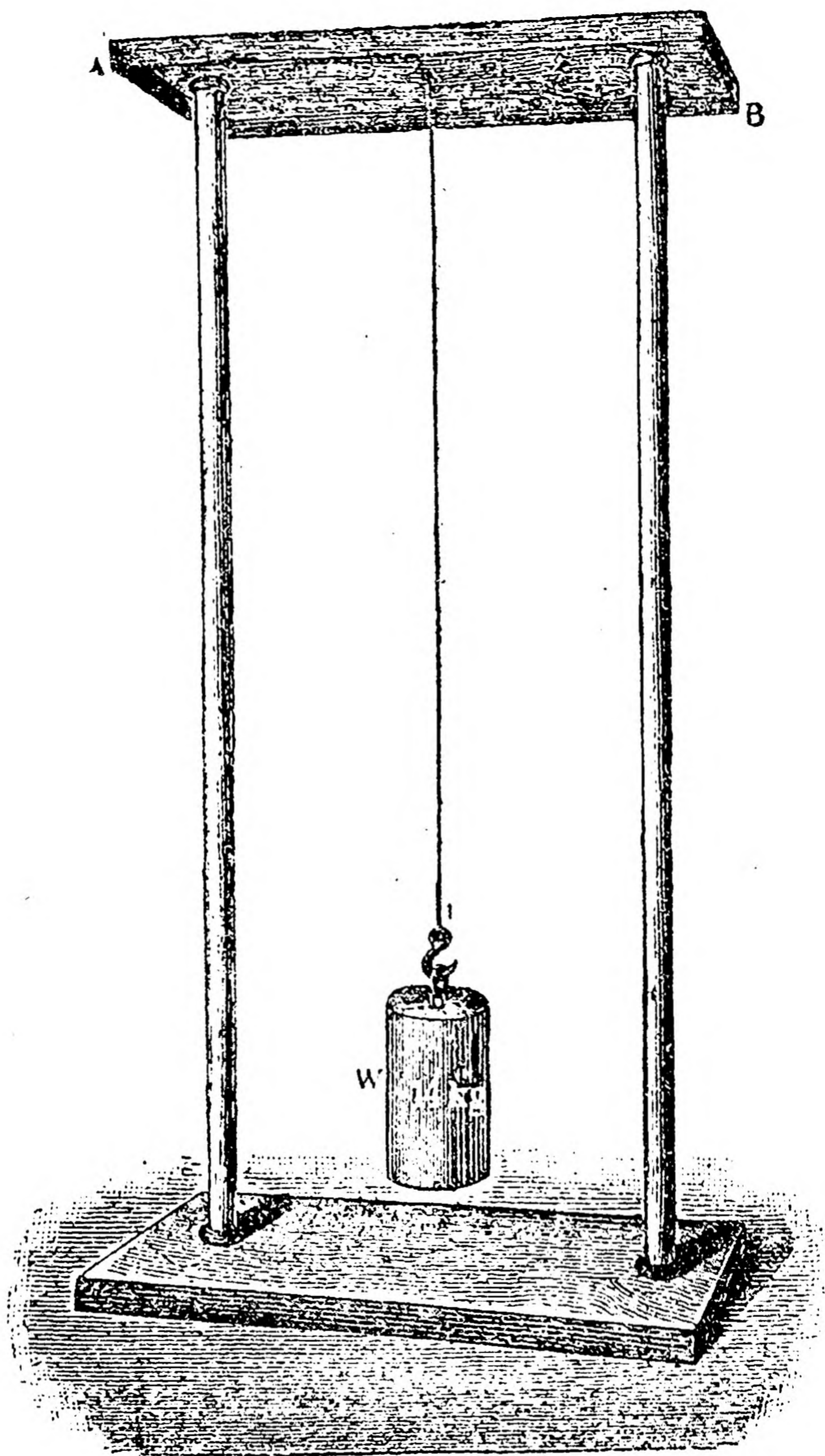
Эти опыты ясно показывают, как важно употребление в струнных инструментах надлежащих резонансовых или созвучающих аппаратов. В арфе, лютне, в фортепиано или скрипке вовсе не струны приводят воздух в звуковые вибрации; а это делают большие поверхности, с которыми соединены струны, и воздух, заключающийся между этими по-

верхностями. Качество таких инструментов зависит почти вполне от качества и расположения их резонансовых поверхностей ¹⁾).

Возьмем, напр., скрипку. Она делается или должна делаться из дерева самой большой упругости. Недостаточно упругое дерево тратит сообщаемое ему движение на трение своих собственных частиц; дви-



Фиг. 32.

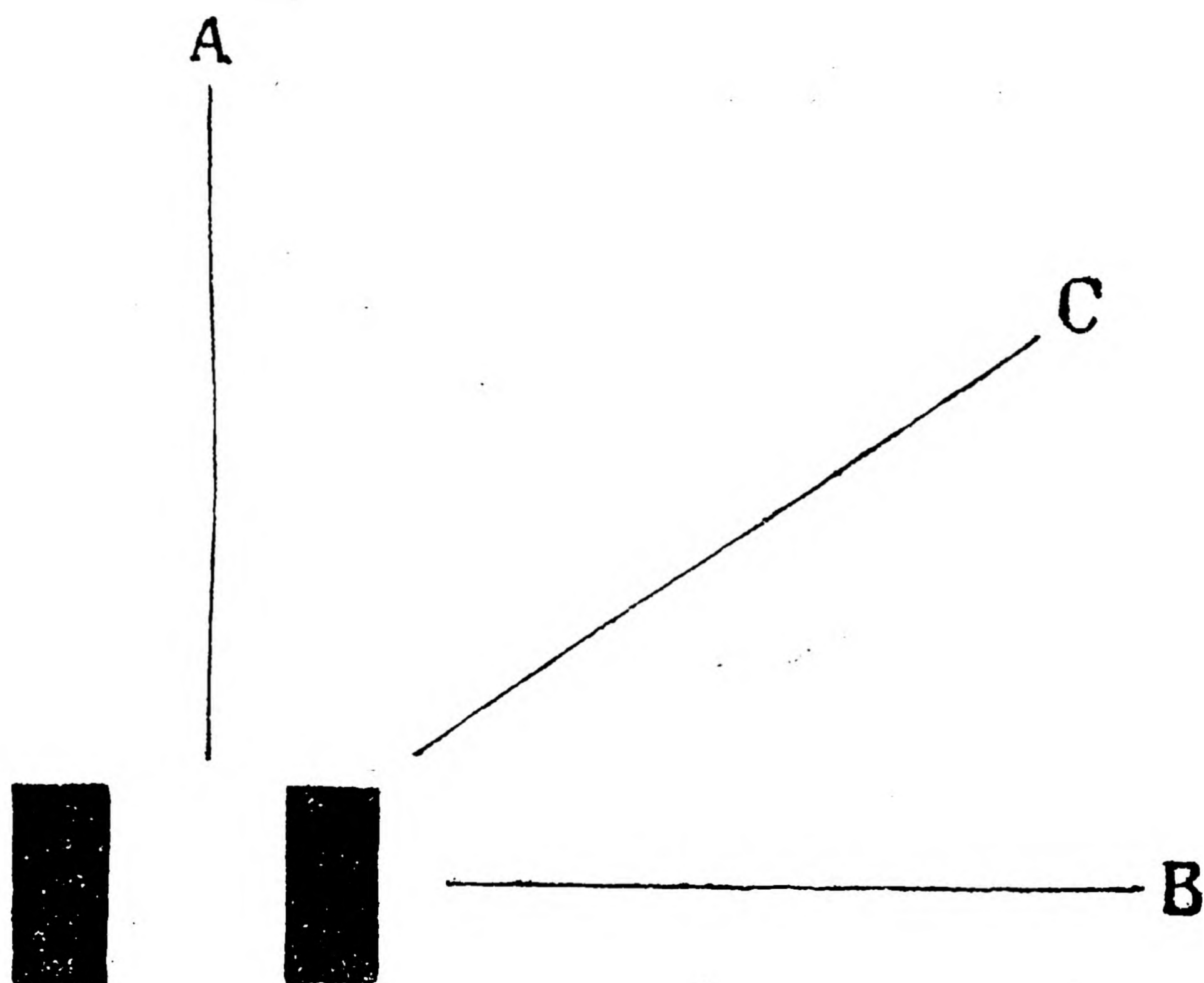


Фиг. 33.

жение вместо звука превращается в теплоту. Струны скрипки идут от места своего прикрепления через подставку к колкам, посредством вращения которых они могут быть натягиваемы. Смычок водится по струнам в точке, которая отстоит от подставки на $\frac{1}{10}$ всей длины струны. Обе ножки подставки упираются в самую тонкую часть деки скрипки, именно в то место ее, которое находится между отверстиями, имеющими

¹⁾ Чтобы показать влияние больших вибрирующих поверхностей на сообщение звукового движения воздуху, Кильборн клал музыкальный ящик в толстый войлочный футляр. Из футляра выдавался деревянный прут, упирившийся в ящик. Когда ящик играл, то его игры не было слышно все время, пока на пруте ничего не было; но как только к нему прикрепляли тонкий деревянный кружок, тотчас же игра ящика становилась слышною.

форму буквы S. Одна ножка укреплена на короткой палочке, которая называется «душой» скрипки и которая проходит внутри скрипки от деки до нижней доски. Таким образом, эта ножка остается укрепленной и только через другую ножку, которая не подпирается таким образом, вибрации сообщаются дереву инструмента, а от него воздух, находящемуся внутри и вне его. Те молекулярные изменения, которые происходят в дереве инструмента от времени, имеют значительную важность: звуковые качества дерева становятся от времени лучше. Кроме того самая игра имеет благодетельное влияние, очевидно заставляя частицы дерева, которые сначала оказывали сопротивление, сообразоваться наконец с сотрясениями вибрирующих струн.



Фиг. 34.

Профессор Стокс применил к резонансовым поверхностям соображение, которое дало ему возможность объяснить сделанное сэром Джоном Лесли наблюдение относительно действия водорода на звук. Когда вибрирует струна одна, то воздух легко может двигаться неправильно из стороны в сторону вокруг такого маленького тела, препятствуя образованию в нем правильных сгущений и разрежений. Но это неправильное движение не так легко может совершаться, когда вибрирует тело с значительной поверхностью. В этом случае воздух не может подвинуться вперед или ускользнуть назад прежде, чем он заметно не сгустится или не разрежится. Поэтому такие вибрирующие тела могут образовывать звуковые волны и производить громкие звуки, между тем как приводящие их в вибрацию тонкие струны, действуя одни, бывают почти неслышны.

Усиление звука, производимое задержанием неправильных боковых движений воздуха, экспериментально иллюстрировано профессором Стоксом. Предположим, что два черных прямоугольника (фиг. 34) предста-

влияют разрез ножек камертона. В то время, как камертон вибрирует, держите лист бумаги или клинок широкого ножа так, чтобы края их были параллельны оси камертона и находились как можно ближе к ножке, но не касались ее. Если эти препятствия поставить так, чтобы они были по направлению, означенному *A* или *B*, то не получается никакого действия; но если они поставлены в направлении *C* так, чтобы этим предупредить попеременное движение воздуха туда и сюда, то звук становится громче.

§ 2. Законы вибрирующих струн.

После того как мы, таким образом, узнали, как употребляются в музыке вибрации струн, нам нужно прежде всего исследовать законы таких вибраций. Я беру струну *BB'* (фиг. 31) за ее середину и ударяю в нее. Звук, слышимый при этом, есть основной или низший тон струны, для произведения которого она колеблется, как целое, сюда и туда. Помещая подвижную подставку под середину струны и натянувши струну на подставку, я разделяю этим струну на две равные части. Ударяя в ту или в другую из этих частей в их середине, я получаю музыкальный тон, который многие из вас признают октавой основного тона. Точно также во всех случаях и во всех инструментах октава какого-нибудь тона производится вдвое большим числом качаний против этого тона. Кроме того, как теоретически, так и на опыте можно доказать, что половина струны вибрирует со скоростью как раз вдвое большею, чем целая струна. Таким же образом может быть доказано, что треть струны вибрирует с быстротою втрое большею, производя квинту выше октавы, а четверть струны вибрирует с быстротою вчетверо большею, производя звук на две октавы выше, чем вся струна. Вообще, число вибраций обратно пропорционально длине струны.

Чем сильнее натянута струна, тем быстрее бывают ее вибрации. Я заставляю вибрировать эту струну сравнительно слабо натянутою, и вы слышите ее низкий основной тон. Поворачивая колок, вокруг которого обвит конец ее, я натягиваю струну; тон, издаваемый ею, становится выше. Держа моей левой рукой тяжесть *W*, прикрепленную к проволоке *BB'* нашего сонометра, и ударяя в проволоку пальцами правой руки, я попеременно то нажимаю на тяжесть, то поднимаю ее. Происходящие от этого быстрые изменения в натяжении струны выражаются этим изменяющимся жалобным тоном. Числа вибраций, совершающихся в единицу времени, находятся в определенном отношении к натягивающей силе. Прикрепляя к концу проволоки *BB'* различные тяжести и определяя в каждом случае число вибраций, совершающихся в секунду, мы находим, что получаемые таким образом числа пропорциональны квадратным корням натягивающей тяжести. Напр., струна, натянутая тяжестью в 1 кгр., совершает известное число вибраций в секунду; если мы хотим удвоить это число, то должны натянуть ее тяжестью в 4 кгр.; если мы хотим утроить ее, то должны взять тяжесть в 9 кгр. и т. д.

Вибрации струны зависят также от ее толщины; если натягивающая тяжесть, длина и материал струны остаются неизменными, то число вибраций бывает обратно пропорционально толщине струны. Таким образом, если из двух струн из одинакового материала, одинаковой длины и одинаково натянутых одна имеет диаметр вдвое больший, чем другая, то более тонкая будет совершать в равное время вдвое большее число вибраций, чем толстая. Если одна струна втрое толще, чем другая, то последняя будет совершать втрое большее число вибраций и т. д.

Наконец, вибрации струны зависят от плотности материала, из которого она сделана. Например, платиновая и железная проволоки одинаковой толщины и длины, натянутые одинаковою тяжестью, не будут вибрировать с одинаковою быстротой, потому что в то время, как удельный вес, или, другими словами, плотность железа есть 7,8, плотность платины составляет 21,5. При прочих равных условиях число вибраций обратно пропорционально квадратному корню плотности струны. Таким образом, струна, имеющая плотность вчетверо меньшую, чем другая струна такой же длины, толщины и с таким же натяжением, будет совершать свои вибрации вдвое скорее; если плотность ее в девять раз меньше, то она будет вибрировать втрое скорее и т. д. Соединяя два последние закона вместе, мы можем выразить их так: числа вибраций обратно пропорциональны квадратному корню веса струны.

В скрипке и других струнных инструментах мы пользуемся толщиной вместо длины для получения более низких тонов. В фортепиано мы не только увеличиваем толщину проволок для получения басовых тонов, но еще делаем их тяжелее, обвивая их другой проволокой. Они походят, таким образом, на тяжело нагруженных лошадей и движутся гораздо медленнее вследствие большей тяжести, которую должна преодолеть сила натяжения.

§ 3. Механические иллюстрации вибраций. Поступательные и стоячие волны. Пучности и узлы.

Таковы четыре закона, управляющие поперечными вибрациями струн. Перейдем теперь к некоторым родственным явлениям, которые хотя и требуют сложных механических соображений, однако, могут быть вполне усвоены при некотором внимании. А они должны быть усвоены, если мы хотим вполне понять теорию струнных инструментов.

На потолке этой залы *c* (фиг. 35) висит каучуковая трубка в 9 метров длины. Я наполнил ее песком для того, чтобы движения ее были медленны и легче заметны для глаза. Я беру ее свободный конец *a* и несколько ее натягиваю; затем надлежащим образом соразмеряя мои толчки, заставляю ее качаться сюда и туда, как одно целое, как показано на фигуре. Она имеет определенное время качания, зависящее от ее длины, веса, толщины и натяжения, и мои толчки должны согласоваться, быть синхроничными (равновременными) с этим временем.

Я останавливаю движение и затем быстрым сотрясением произвожу выгиб на трубке, который идет по ней как импульс к прикрепленному концу ее, где выгиб перевертывается и идет назад к моей руке. У прикрепленного конца трубки импульс по закону отражения принимает обратное положение и обратное направление в своем движении. Предположим, что c (фиг. 36) есть укрепленный конец трубки, а a — свободный конец, находящийся в руке; если импульс, достигши c , имел положение, показанное в (1), то после отражения он будет иметь положение, показанное в (2). Стрелки показывают направление его движения. Время, употребляемое импульсом на прохождение от моей руки до прикрепленного конца и назад, в точности равняется времени, в течение которого трубка, как одно целое, совершает одну полную вибрацию. Сообщение нескольких таких импульсов заставляет трубку непрерывно вибрировать, как целое.

Если вместо того, чтобы сообщать концу трубки только одно сотрясение, я сообщу ей ряд их и, таким образом, пушу вдоль трубки ряд импульсов, тогда каждый из них отразится вверху, и нам нужно теперь исследовать, как относятся между собою эти прямые и отраженные волнообразные движения.

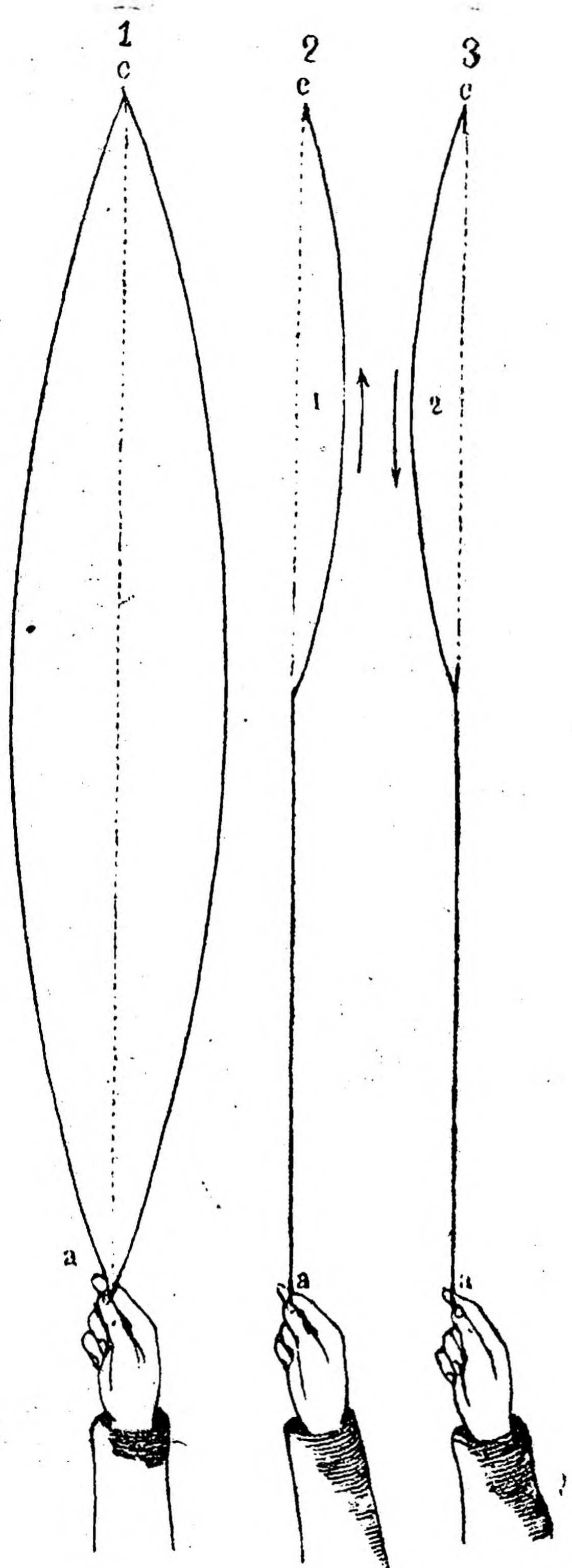
Я пускаю вдоль трубки импульс. Положим, что время, нужное ему на прохождение от моей руки до укрепленного конца, составляет одну секунду; по прошествии половины секунды он занимает положение ab (1) (фиг. 37), самая передняя точка его достигла середины трубки. По прошествии целой секунды он имел бы положение bc (2) и самая передняя точка его достигла бы укрепленного конца трубки c . В тот момент, когда началось отражение от c , сообщим трубке другое сотрясение в a ; отраженный импульс от c движется с такою же скоростью, как и прямой импульс от a , и самые передние точки обоих придут к середине трубки b (3) в один и тот же момент. Что же должно произойти? Выгиб ab стремится двигаться к c и при этом точка b должна двигаться вправо. Выгиб же bc стремится двигаться к a и при этом точка b должна двигаться влево. Точка b , увлекаемая в одно и то же время равными силами в двух противоположных направлениях, не пойдет ни по одному из этих направлений. При таких обстоятельствах две волны трубки ab и bc будут колебаться так, как будто бы они были независимы одна от другой (4). Таким образом, соединением двух поступательных импульсов, одного прямого и другого отраженного, мы производим два стоячие импульса на трубке ac .

Вибрирующие части ab и bc называются пучностями (брюшными сегментами, животами), а точка b , не имеющая движения, называется узлом.

Я употребляю здесь термин «импульс» нарочно для того, чтобы более употребительным словом «волна» не произвести путаницы в ваших понятиях, так как волна состоит из двух таких импульсов, заключая в себе как выгиб, так и следующую за ним вогнутость. Таким образом, длина волны вдвое больше длины пучности.

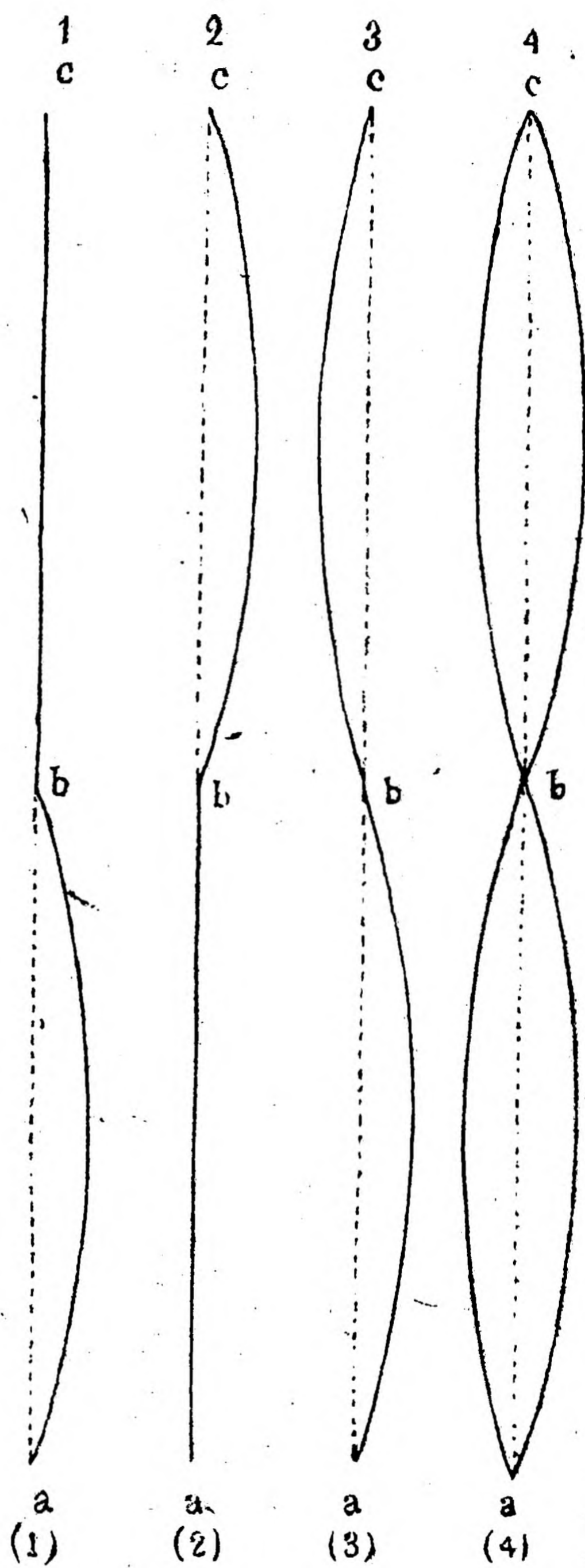
Предположим, что сообщаемые нами сотрясения рассчитаны так,

что каждое из них производит импульс, составляющий одну треть длины трубки. По прошествии одной трети секунды импульс будет находиться в положении ab (1) (фиг. 38). После двух третей секунды он достигнет положения bb' (2) (фиг. 38). Предположим, что в этот момент из a начинается новый импульс; тогда по прошествии целой секунды мы будем иметь два выгиба на трубке, один занимающий положение ab (3),



Фиг. 35.

Фиг. 36



Фиг. 37.

а другой $b'c$ (3). Очевидно, что конец импульса, отразившегося от c , и конец прямого импульса, идущего от a , достигнут точки b' в один и тот же момент (по прошествии $1/3$ второй секунды). Мы будем иметь, таким образом, положение вещей, представленное в (4) (фиг. 38), где импульс bb' стремится двигаться вверх, а cb' — вниз. Так как оба они действуют на точку b' в противоположных направлениях, то эта точка останется неподвижною, и потому дело примет такой вид, что и м п у л ь с

bb' кажется отраженным от этой точки, как будто бы она была укрепленной точкой, между тем как сегмент $b's$ качается, как будто совершенно особая независимая струна. Предположим теперь, что в тот момент, когда bb' начинает отражаться от b' , мы производим еще новый толчок в a ; он достигнет b (5) одновременно с импульсом, отразившимся от b' . Таким образом, эти импульсы нейтрализуют друг друга в b , и мы будем иметь теперь второй узел. Сопоставляя надлежащим образом наши сотрясения, мы можем разделить трубку на три пучности; отделенные одна от другой двумя узловыми точками. До тех пор, пока продолжается сотрясение, трубка вибрирует, как показано в (6).

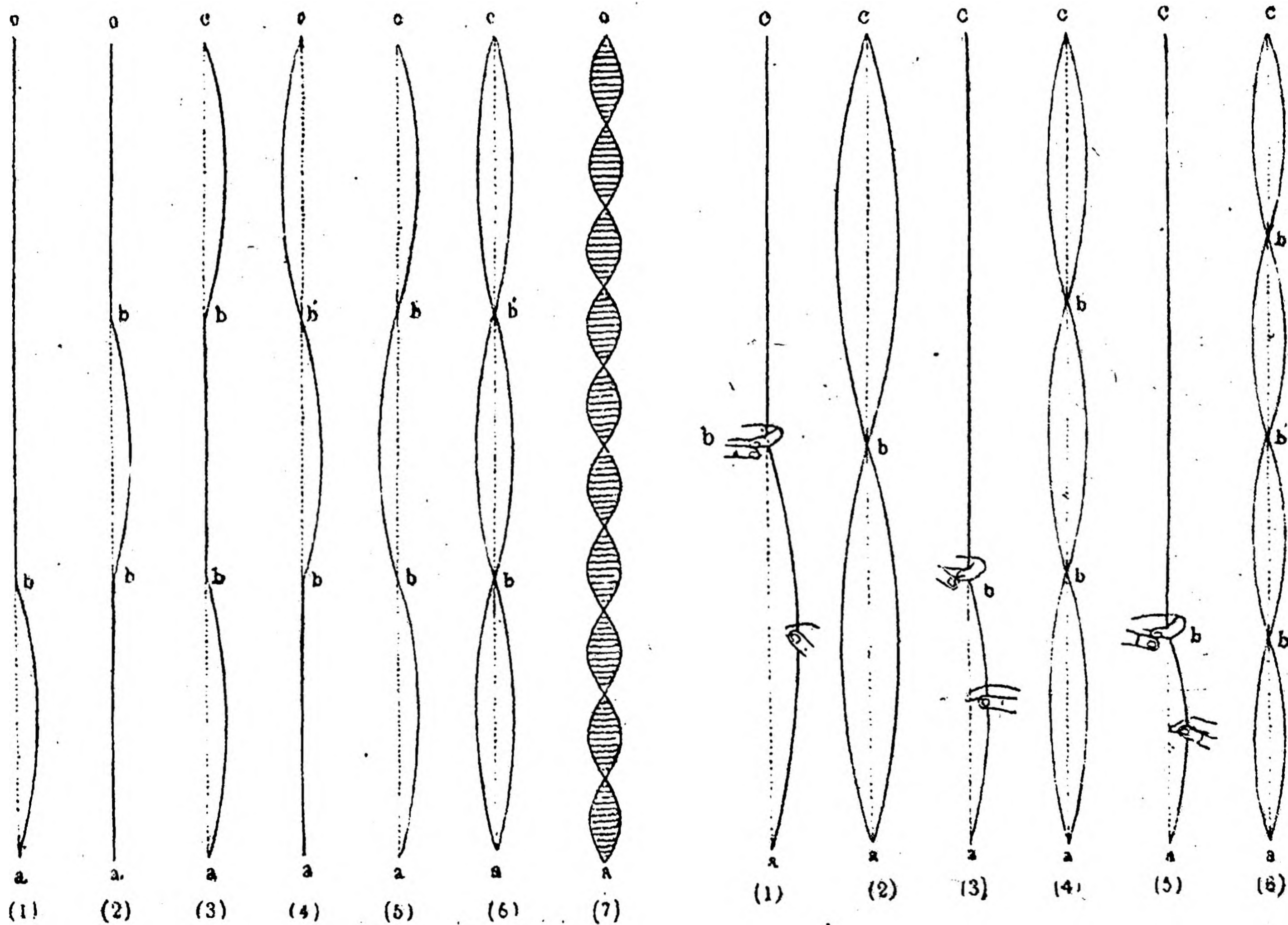
По теории число производимых, таким образом, узлов и пучностей неограниченно. Ускоряя импульсы, я разделяю трубку на четыре пучности, отделенные тремя узлами; затем я получаю пять пучностей и четыре узла. С этой трубкой рука может двигаться с достаточной быстротой, чтобы произвести десять пучностей, как показано в (7) (фиг. 38). Когда натягивающая сила остается постоянной, то число пучностей пропорционально скорости вибраций руки. Для того, чтобы произвести 2, 3, 4, 10 пучностей, нужно, чтобы вибрации совершались со скоростью в 2, 3, 4, 10 раз большею против скорости тех вибраций, когда трубка колеблется, как одно целое. Когда вибрации весьма быстры, то пучности кажутся рядом серых веретен, отделенных одно от другого темными неподвижными узлами. Этот опыт очень красив и его легко произвести.

Если вместо того, чтобы двигать рукой сюда и туда, мы будем описывать ею небольшой круг, то пучности станут поверхностями вращения. Вместо руки мы можем употребить крючок, вращаемый центробежной машиной или токарным станком. Перед вами веревка, более тугая, чем каучуковая трубка, в 25 футов длины, и один конец ее прикреплен к свободно движущейся скобе на потолке. Если я буду вращать машину, к которой прикреплен другой конец веревки, то она разделится на 20 пучностей, разделенных соответствующими узлами. Можно видоизменить этот опыт: взять нитку в 4 метра длины, нанизать на нее посеребренные бусы и натянуть ее горизонтально между вертикальным колесом машины и свободно движущейся скобой. Если вращать колесо и надлежащим образом регулировать натяжение и быстроту вращения, тогда можно струну с нанизанными бусами заставить вращаться, как целое, и последовательно разделяться на 2, 3, 4 или 5 пучностей. Если всю нитку поместить в световой цилиндр, исходящий из электрической лампы, тогда каждая буса описывает блестящий круг, и выходит великолепный эксперимент.

§ 4. Механические иллюстрации задерживания вибрирующей струны.

Стоячие волны были в первый раз изучены опытно Веберами в их превосходных исследованиях о волнообразном движении. Этот предмет

вознаградит вас за ваше внимание тем, что сделает вполне понятными для вас самые трудные явления музыкально-струнных движений. Чтобы сделать более наглядною связь между обоими классами вибраций, я изменю наши последние опыты. Перед вами каучуковая трубка в 3 или 4 метра длины, натянутая между *a* и *c* (фиг. 39) и прикрепленная к двум штифтам в *c* и *a*. Трубка выкрашена черной краской и сзади поставлена полоса белой бумаги, чтобы сделать ее движения более видимыми. Прежде всего я обхватываю трубку по середине ее (2) большим и указательным пальцами моей левой руки и затем, взявшись за середину нижней половины ее, ударяю в нее. От этого приходит в вибрацию не только нижняя половина ее, но и верхняя. Когда я совсем отниму мои пальцы прочь, то и тогда две волны *ab* и *bc* продолжают вибрировать, отделенные одна от другой узлом на середине в *b* (2).



Фиг. 38.

Фиг. 39.

Далее я обхватываю трубку в точке *b* (3) на одной трети ее длины от нижнего конца *a* и, взявши *ab* за середину, ударяю в нее; часть трубки выше моих пальцев *bc* тотчас же разделяется на две вибрирующие пучности. Когда я отниму мои пальцы, то вы видите, что трубка разделена на три пучности, отделенные одна от другой двумя неподвижными узлами *bb'* (4). Я перехожу к точке *b* (5), которая обозначает собою четверть длины трубки, обхватываю ее и ударяю в короткую часть. Длинная часть выше моей руки немедленно разделяется на три вибрирующие части так, что когда я отниму руку, то вы увидите трубку разделенною на четыре пучности, отделенные одна от другой тремя

узлами b b' b'' . Точно таким же образом я могу разделить трубку на 5 вибрирующих частей с 4 узлами.

Это внезапное разделение длинной верхней части трубы без всякой видимой причины кажется весьма удивительным; но если вы уделите мне ваше внимание на одно мгновение, то найдете, что эти опыты совершенно подобны тем, посредством которых мы показывали соединение прямых и отраженных волнообразных движений. Вспомните об этих последних опытах (стр. 70); в них вы наблюдали, что движение моей руки сюда и туда по пространству в один—два сантиметра было достаточно для того, чтобы заставить средние точки пучностей вибрировать, проходя пространство в 30—40 см. Посредством надлежащего соразмерения импульсов они скоплялись до того, что амплитуда вибраций вибрирующих частей значительно превосходила амплитуду вибраций, производимых моей рукой. В действительности моя рука составляла узловую точку, так мало было сравнительно ее движение. И в самом деле, совершенно верно считать, как это обыкновенно и делается, концы трубки узловыми точками.

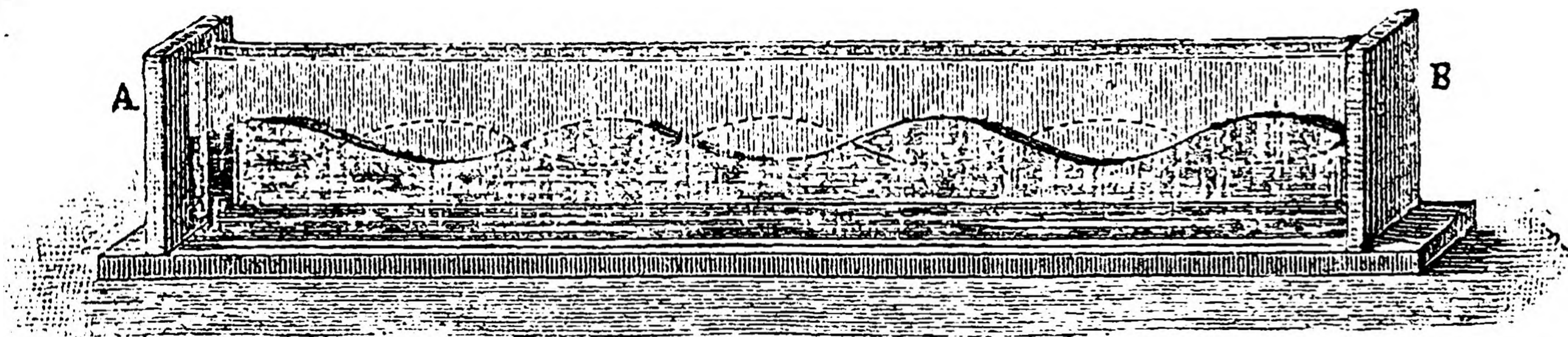
Рассмотрим теперь случай, представленный на фиг. 39 в (1), где трубка обхвачена по середине и нижняя часть ее ab приведена в вибрацию, соответствующую ее длине и натяжению. Круг, образованный моим указательным и большим пальцами, позволял трубке колебаться на протяжении сантиметра; и вибрации в этом месте действовали на верхнюю половину выше пальцев точно так же, как действовала моя рука, когда она заставляла трубку, висевшую на потолке, вибрировать, как целое, что представлено на фиг. 35. Вместо соразмеренных вибраций моей руки мы имеем здесь соразмеренные вибрации нижней половины трубки; и эти последние вибрации, хотя амплитуда их составляет всего один сантиметр в месте, охватываемом большим и указательным пальцами, скоро накапливаются и, наконец, производят вибрации, значительно превосходящие по амплитуде их собственную амплитуду. Это же соображение применяется ко всем другим случаям подразделения. Если бы вместо того, чтобы обхватывать точку моими пальцами и ударять в часть трубки, лежащую ниже ее, мы взяли эту точку рукой и стали бы двигать ее, соразмеряя движения с нижней частью трубки, то мы произвели бы совершенно такое же действие. Таким образом, мы сводим оба действия к одной и той же причине, именно к соединению прямых и отраженных волнообразных движений.

Здесь я должен прибавить, что, когда я разделял трубку соразмерно с движениями моей руки, то, строго говоря, ни один из узлов не был неподвижной точкой; потому что, если бы узлы не могли колебаться хоть с весьма малым размахом, то движение не могло бы сообщиться различным частям трубки.

§ 5. Стоячие водяные волны.

Что справедливо относительно волнообразных движений каучуковой трубки, то может быть применено ко всяким волнообразным дви-

жениям. Водяные волны, напр., следуют тем же законам, и соединение прямых и отраженных волн производит такие же явления. Я имею здесь длинный и узкий сосуд со стеклянными стенками, сделанный по образцу жолоба для волн братьев Вебер. Он наполнен до высоты AB (фиг. 40) окрашенной водою. Если я быстро тряхну край A , то этим произведу волну, которая движется к B и здесь отражается. Производя через надлежащие промежутки новые волны, я разделяю поверхность на две стоячие волны. Заставляя толчки следовать друг за другом быстрее, я могу разделить поверхность на три, на четыре (как показано на фигуре) или на большее число стоячих волн, разделенных между собою узлами. Водонос иногда размеряет свои шаги таким образом, что поверхность воды в его сосуде образует стоячие волны, которые могут увеличиваться в высоту до того, что вода расплескивается через край. Практика научила водоноса, что он должен делать; он иначе делает свои шаги, переменяет периоды своих импульсов и таким образом предотвращает накопление движения.



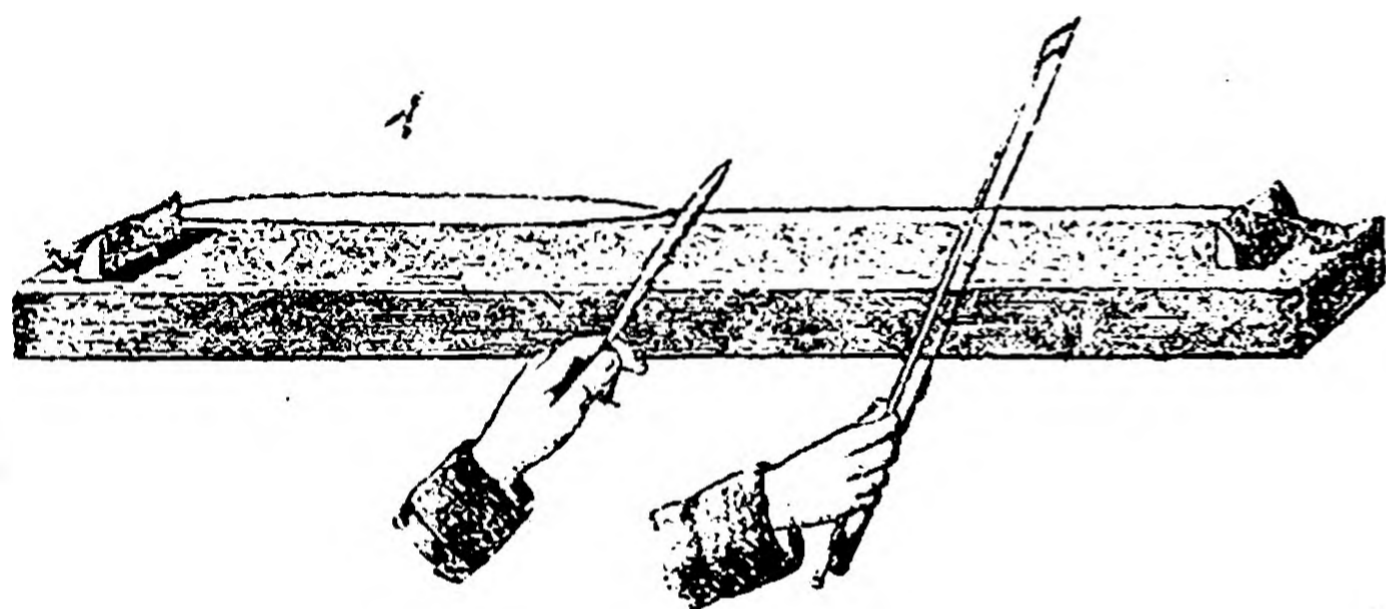
Фиг. 40.

Когда я несколько лет тому назад ехал с Томасом Карлейлем в купе вагона на французской железной дороге, то поставил бутылку, до половины наполненную водою, на один из маленьких столиков купе. Иногда вода стояла совершенно спокойно, а иногда сильно колебалась. Очень интересно было наблюдать это. Для пассажиров, находившихся в вагоне, не было заметно никакого изменения в движении, которому могло бы быть приписано это изменение в состоянии воды. Однако, на деле в одном случае в сотрясениях вагона не было вибраций, по времени совпадавших с периодами волнообразного движения воды, между тем как в другом случае были такие вибрации. Из запутанного множества толчков вода выбирала только некоторые соответствующие ее движению и делала очевидным их присутствие, между тем как пассажир совсем не замечал их появления.

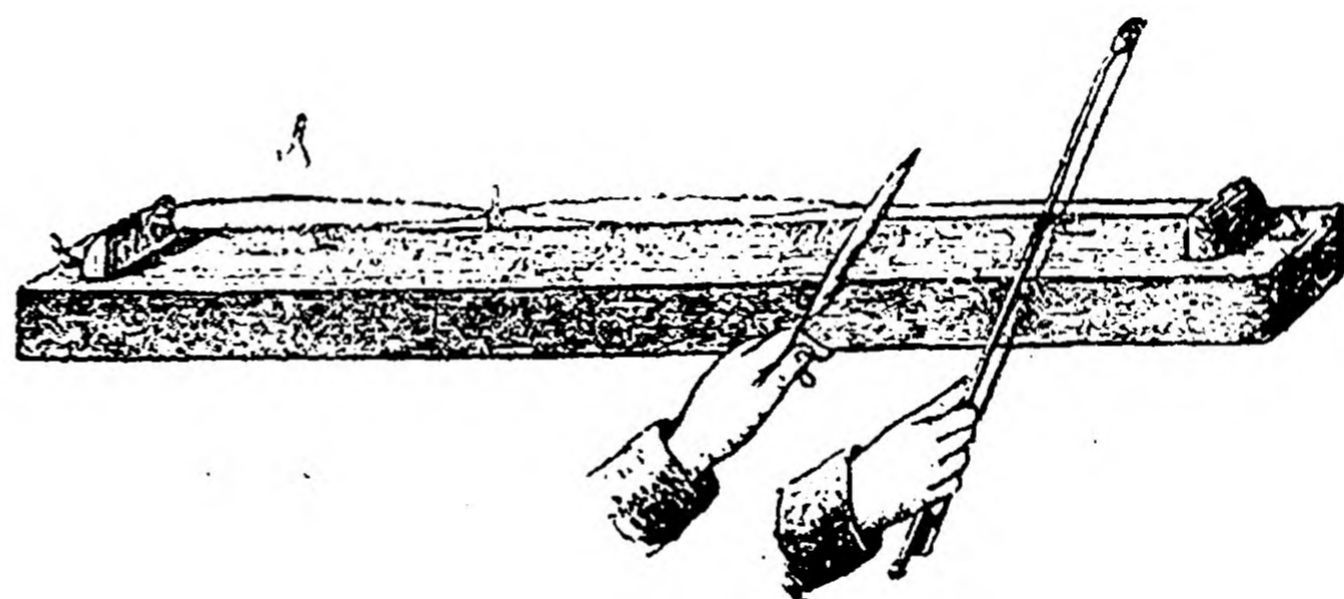
§ 6. Применение механических иллюстраций к музыкальным струнам.

От этих сравнительно грубых, но тем не менее красивых механических вибраций мы переходим к вибрациям звучащих струн. Вот наш монохорд с его стальной проволокою, которая уже давала нам разные звуки в то время, когда мы изменяли ее длину. Но в этих опытах, когда мне нужно было укоротить проволоку, я употреблял подвижную под-

ставку, натягивая проволоку на нее так, чтобы прижатая точка не имела ни малейшей возможности двигаться. Однако, такое сильное прижимание не нужно. Я кладу осторожно бородку гусиного пера на середину струны и затем провожу смычком по одной из ее половин; струна издаст топ, составляющий октаву тона, издаваемого всей струной. Одно легкое прикосновение пера к середине струны было достаточно для того, чтобы разделить ее на две вибрирующие части. Даже нет необходимости держать на струне перо в течение всего опыта; проведши смычком, я могу отнять перо; но струна будет продолжать вибрировать, издавая такой же тон, как и прежде. Мы имеем здесь случай совершенно подобный тому, когда я обхватывал среднюю точку нашей натянутой каучуковой трубки указательным и большим пальцами, как показано на фиг. 39 (2). При этом звучит не только та половина, по которой я провел смычком, но также и верхняя половина. В самом деле мы можем произвести с вибрирующими струнами все явления, полученные нами на трубке. Но этот предмет имеет такую важность, что я должен разъяснить его опытами.



Фиг. 41.



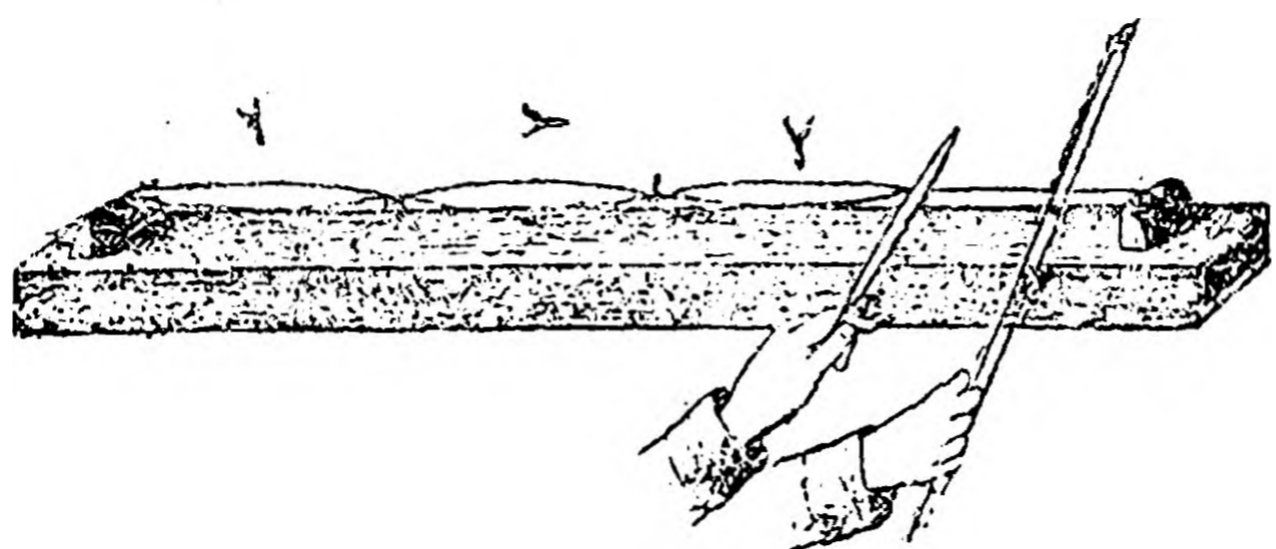
Фиг. 42.

Чтобы доказать вам, что когда я легонько касаюсь середины струны и провожу смычком по одной из ее половин, то тогда вибрирует и другая ее половина,—я кладу на середину нетронутой половины согнутый кусочек бумаги. Я прикасаюсь к середине струны и провожу смычком; струна дрожит вся и бумажка соскакивает (фиг. 41).

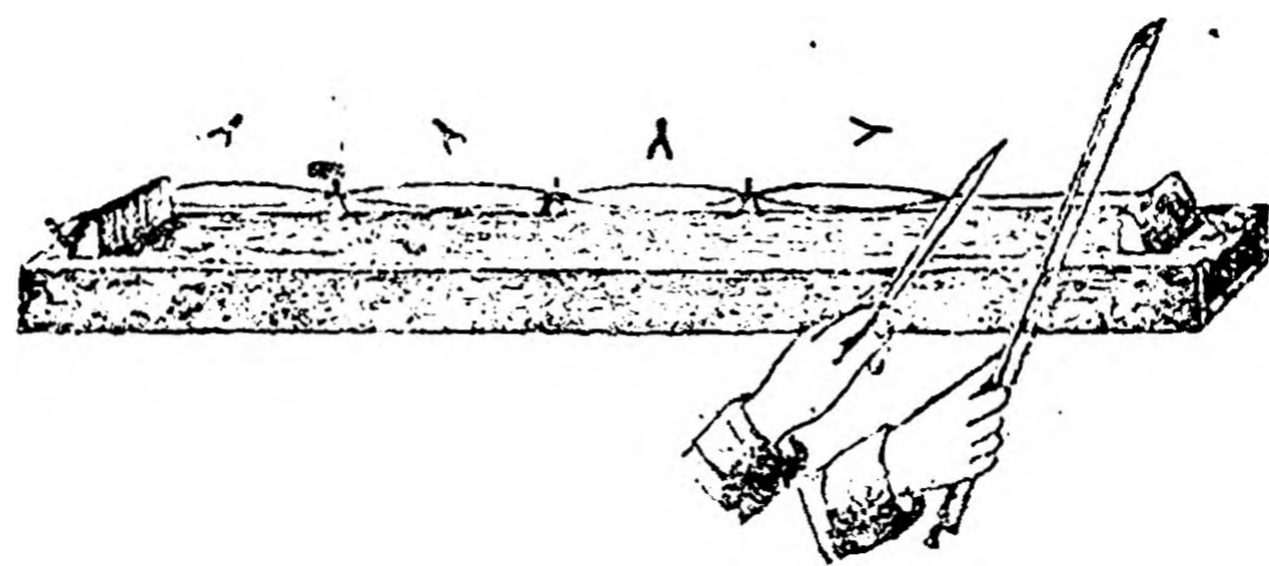
Затем я касаюсь струны в точке, определяющей треть ее длины, и провожу смычком по короткой части ее. Тогда приходит в вибрацию не только эта часть, но и длинная часть разделяется на две пучности с узлом между ними. Я докажу это, поместивши на пучности кусочки красной бумаги, а на узел синей. Когда я провожу смычком по короткой части, тогда вы замечаете дрожание красных бумажек, которые наконец соскакивают, между тем как синяя бумажка, сидящая на узле, остается в покое (фиг. 42).

Далее я касаюсь струны в точке, составляющей границу четверти ее длины, и утверждаю, что когда смычок пройдет по короткой ее части, то и остальная часть, составляющая три четверти ее длины, разделится на три пучности с двумя узлами между ними. Это доказывается тем, что три бумажки, помещенные на пучностях, соскакивают, между тем как две бумажки, лежащие на узлах, остаются спокойно на своих местах (фиг. 43).

Наконец, я касаюсь струны в точке, составляющей конец одной пятой ее длины. Располагая, как и в предыдущем опыте, красные бумажки на пучностях и синие на узлах, я одним ударом смычка заставляю соскочить четыре красные бумажки, между тем как три синие остаются на своих местах (фиг. 44). Таким образом, мы можем произвести с звучащею струною ряд таких же опытов, какие мы прежде производили с натянутою каучуковою трубкой, и в обоих случаях получаются одинаковые результаты ¹⁾.



Фиг. 43.



Фиг. 44.

Чтобы сделать еще более очевидным для вас это тожество, я натянул сзади стола от одной стены залы до другой толстую стальную проволоку в 10 метров длины. Я беру середину этой проволоки между указательным и большим пальцами и поручаю моему помощнику потянуть половину ее в сторону и потом быстро пустить. Она вибрирует, и вибрации, сообщенные другой половине, достаточно сильны для того, чтобы сбросить на воздух лежавший на проволоке большой кусок бумаги. С этой длинной проволокой и с бумажками, имеющими поверхность не в $\frac{1}{2}$ квадратного сантиметра, но в 200, 300 или 400 квадратных сантиметров, я повторяю все опыты, которые мы производили с звучащею струною. Куски бумаги, положенные на узлах, все остаются на своих местах, между тем куски, лежащие на пучностях, все вдруг подбрасываются на воздух, когда короткая часть проволоки приводится в вибрации. В этом случае, находясь вблизи проволоки, вы действительно могли бы видеть разделение проволоки.

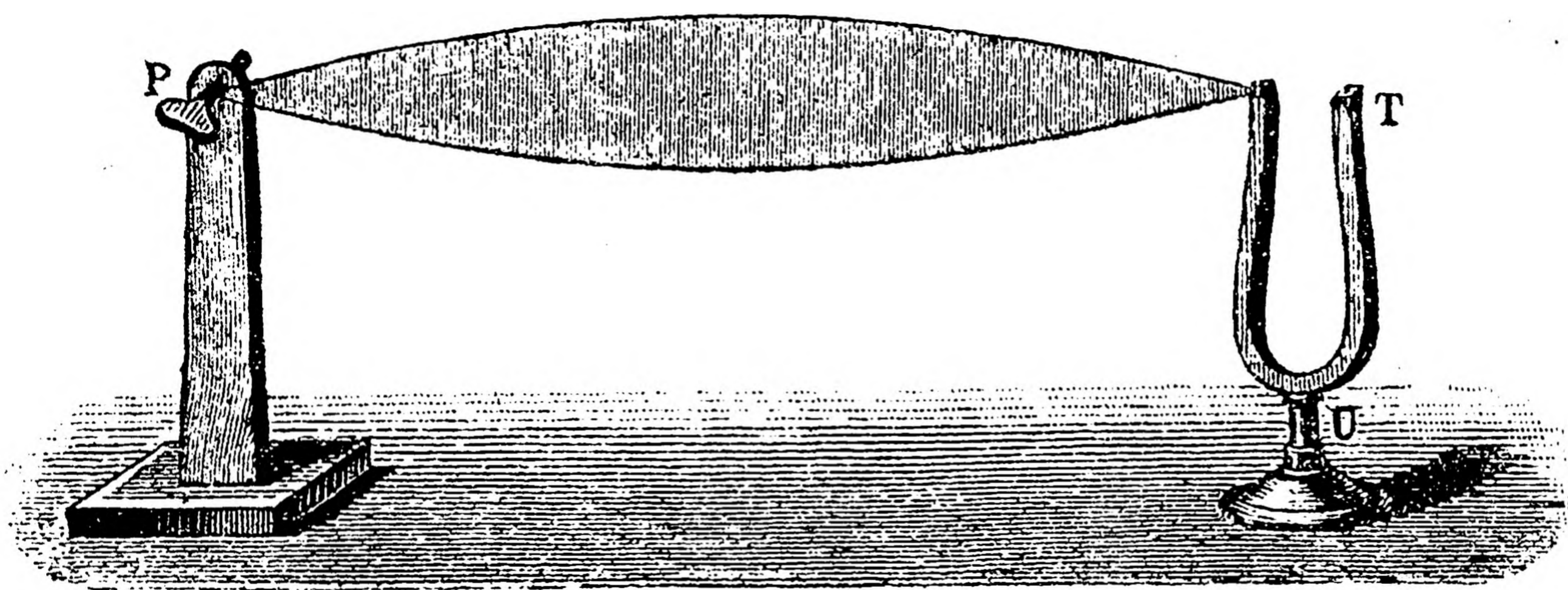
§ 7. Опыты Мельде.

Теперь вам можно показать некоторые новые опыты с вибрирующими струнами, которые имеют прелесть и изящество, далеко превосходящие все, что мы могли произвести нашим сонометром. Мы обязаны Мельде в Марбурге этим новым методом делать наглядными вибрации струн. Я произведу эти опыты в таких размерах и с такими видоизменениями, как это позволяют нам наши настоящие обстоятельства.

¹⁾ Хладни замечает („Akustik“ S 5), что обыкновенно приписывают Соверу открытие в 1701 году видов вибраций, соответствующих верхним гармоническим тонам струн, но что Нобль и Пигот открыли эти явления в Оксфорде в 1676 г. и что Совер отклонил от себя честь открытия, когда узнал, что другие прежде его сделали это наблюдение.

Во-первых, я имею здесь большой камертон *T* (фиг. 45) с маленьким винтом, прикрепленным к концу одной из его ножек; при помощи этого винта к ножке может быть прикреплена эта шелковая струна. От ножки струна идет к находящемуся в некотором расстоянии колку *P*, посредством вращения которого она может быть натянута до какой угодно степени. Я провожу смычком по камертону; от этого происходит только неправильное дрожание струны. Затем я натягиваю ее, и при надлежащем натяжении она расширяется в прекрасное воздушное веретено, имеющее более 20 см. в самой широкой своей части и блестящее, как перл. Натягивающая сила в настоящее мгновение такова, что струна качается сюда и туда, как одно целое, и ее вибрации совершаются в вертикальной плоскости.

Затем я ослабляю натяжение струны, и когда достигну надлежащего натяжения, то она вдруг разделяется на три вибрирующие части. Ослабляя натяжение еще больше, я разделяю ее на четыре вибрирующие части. И таким образом я могу продолжать разделять струну на 10 и даже на 20 пучностей, отделенных одна от другой соответствующим числом узлов.

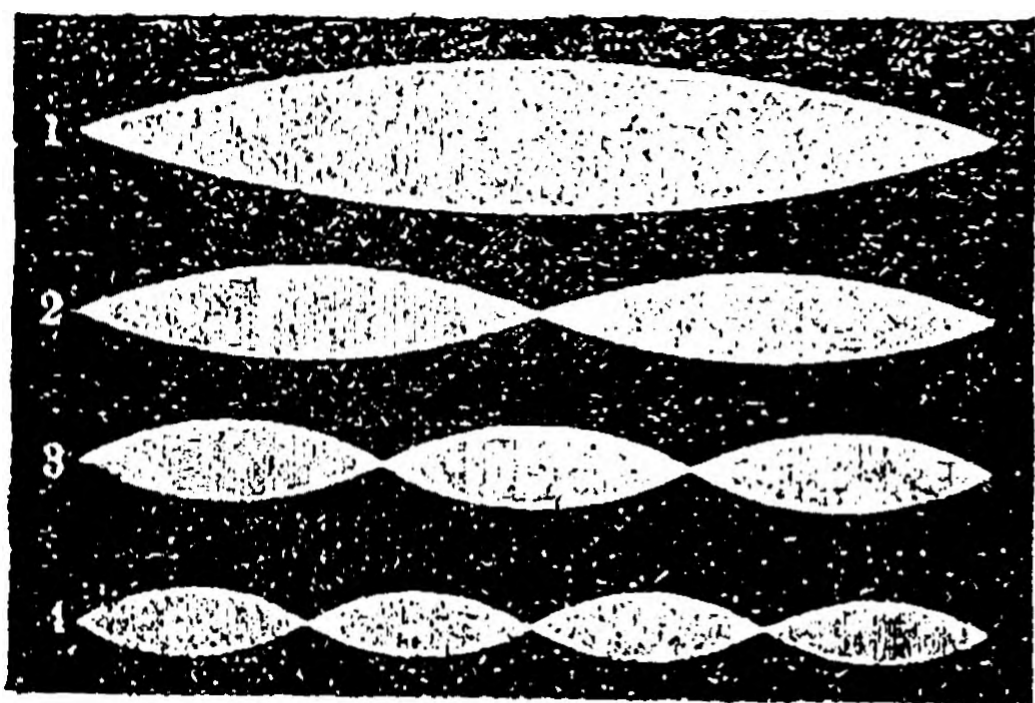


Фиг. 45.

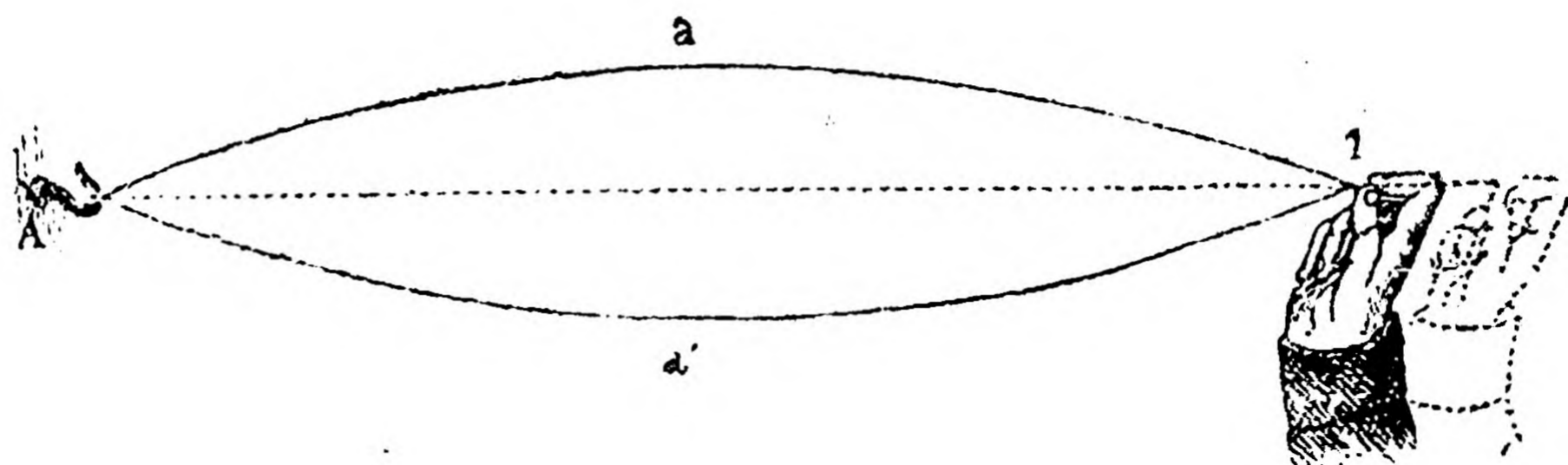
Когда таким образом вибрируют белые шелковые струны, то явление бывает необыкновенно красиво. Узлы кажутся совершенно неподвижными, между тем как пучности образуют такие нежные веретена, что они кажутся состоящими из блестящего воздуха; каждое выдающееся место на ссученной струне обозначает свое движение более или менее блестящей линией на поверхности воздушного веретена. Эти четыре способа вибраций представлены на фиг. 46—1, 2, 3, 4 ¹⁾.

¹⁾ Первый опыт был произведен на лекции со стальным прутом в 150 см. длины, 3 см. ширины и 1 см. толщины, изогнутым наподобие камертона, ножки которого имели между собою расстояние в 5 см., а сам он утверждался на тяжелой подставке. Прикрепленный к нему шнурок имел 20 см. длины и $\frac{1}{2}$ см. толщины. Ножки приводились в вибрации тем, что их ударяли быстро двумя свинцовыми кусками, покрытыми войлоком, из которых один держали одною рукою, а другой—другою. Ножки вибрировали поперечно к шнурку. Вибрации, произведенные одним ударом, были достаточны для того, чтобы произвести в шнурке несколько подразделений и потом снова сделать в ней только одну пучность;

Когда струна и камертон вибрируют вполне синхронно (т.-е. одновременно и с одинаковою скоростью), то вибрации струны спокойны и продолжаются долго. Малейшее уклонение от синхронизма производит тотчас же беспокойные движения, и пучности, хотя они и могут показаться на мгновение, скоро исчезают.



Фиг. 46.



Фиг. 47.

В произведенных сейчас опытах камертон вибрирует по направлению длины струны. Каждый толчок камертона вперед производит выгиб, который идет к противоположному концу струны и там отражается; так что, когда продольные импульсы соразмерены надлежащим образом, то они производят поперечные вибрации. Для объяснения этого я привязываю конец тяжелой веревки или цепи к крючку А (фиг. 47), вбитому в стену, и, взявши другой конец в руку, натягиваю веревку горизонтально. Затем я двигаю мою руку сюда и туда по направлению веревки. Она колеблется, как одно целое, и вы можете заметить, что всегда, когда веревка достигает границ своего размаха, моя рука уходит вперед (т.-е. ближе к стене) на самое большее расстояние. Если веревка вибрирует в вертикальной плоскости, то моя рука, для надлежащего соразмерения импульсов, должна подвинуться по направлению к крючку на самое большее расстояние до 1 в тот момент, когда веревка достигает верхней границы своего размаха в a , а также и точно в тот момент, когда она достигает его нижней границы в a' . Небольшого размышления достаточно, чтобы понять, что в то время, как моя рука совершает целую вибрацию, веревка делает только полувибрацию; другими словами, вибрации моей руки должны быть вдвое быстрее вибраций веревки.

т.-е. ударяя ножки и заставляя шнурок вибрировать, как одно целое, можно было посредством ослабления натяжения заставить его разделиться на две, на три или четыре вибрирующие части; и затем, увеличивая натяжение, опять вместо четырех, трех и двух делений получать одно, не прибегая к новому возбуждению вибраций в камертоне. Шнурок был такого свойства, что каждая его точка, вместо того чтобы двигаться сюда и туда в одной плоскости, описывала круг. Таким образом пучности, вместо того чтобы быть плоскими поверхностями, были поверхностями вращения, и одинаково хорошо были видны со всех мест залы. Камертоны, употреблявшиеся в следующих опытах, были сделаны для меня превосходным механиком акустиком Кеннгом в Париже и были вроде тех, какие обыкновенно употребляются для произведения проекций в опытах Лисажу.

Это же самое вполне применяется и к нашему камертону. Когда он вибрирует по направлению струны, то число полных вибраций, совершаемых им в данное время, бывает вдвое больше числа вибраций, производимых самою струною. И если при надлежащем расположении опыта камертон и струна вибрируют с быстротою, достаточною для произведения музыкальных звуков, то звук, производимый камертоном, будет октавою выше звука струны.

Но если вместо того, чтобы двигать мою руку сюда и туда по направлению этой тяжелой веревки, я стану двигать ее перпендикулярно к этому направлению, то каждое движение моей руки вверх совпадает с движением веревки вверх, и каждое движение моей руки вниз совпадает с таким же движением веревки. И действительно, в этом случае вибрации руки и веревки совершенно равномерны; и если бы рука могла производить тон, то и веревка дала бы тон одинаковой с ним высоты. То же самое происходит, когда вибрирующая рука заменяется вибрирующим камертоном.



Фиг. 48.



Фиг. 49.

Поэтому, если струна вибрирует, как одно целое, в то время, когда вибрации камертона совершаются по направлению ее длины, она разделится на две пучности, когда вибрации его будут перпендикулярны к ней; или говоря общее, при постоянной силе натяжения каково бы ни было число пучностей, производимых на струне камертоном, в то время когда его вибрации совершаются по направлению длины струны, это число будет вдвое больше, когда вибрации будут перпендикулярны к струнам. Вот, напр., струна *AB*, фигуры 48 и 49, проходящая по блоку *B* и натянутая известною тяжестью (не показанною на фигурах). Когда камертон *A* вибрирует по направлению длины струны, то она разделяется на две равные пучности. Я поворачиваю камертон так, чтобы он вибрировал перпендикулярно к струне. Теперь является четыре пучности (фиг. 49), или вдвое больше. Когда мы прикрепим к одному камертону две струны одинаковой длины, одну параллельно, а другую пер-

пендикулярно к направлению его вибраций, и обе натянем одинаковою тяжестью, то когда камертон вибрирует, последняя струна разделяется на число пучностей вдвое большее, чем первая.

С подобными вибрирующими струнами можно производить много красивых опытов. Путь, описываемый каждой отдельной точкой их, может быть прослежен, если по способу Юнга осветить эту точку и наблюдать световую линию, описываемую ею. Это очень хорошо можно сделать при помощи плоской полированной серебряной проволоки, изогнутой в виде спирали, от которой, если ее осветить, свет отражается через правильные промежутки. Прикрепленная к надлежащему камертону и освещенная электрическим светом, такая проволока правильно вибрирует перед вами, и ее светлые точки описывают прямые линии ослепительного блеска. Затем я несколько замедляю движение проволоки, но не настолько, чтобы произвести дальнейшее подразделение ее. Этим к общему движению проволоки мы придали множество меньших движений, соединение которых производит удивительные и необыкновенно красивые явления.

Придумывая наилучшие способы, как бы сделать видимыми для большего числа слушателей эти красивые явления, я напал на мысль употребить тонкую платиновую проволоку, нагретую до красного каления электрическим током. Такая проволока натянута от камертона через медную подставку и затем накинута вокруг колка. Медная подставка, с одной стороны, и камертон—с другой составляют полюсы вольтовой батареи, от которых ток проходит по проволоке и доводит ее до каления. Я провожу смычком по камертону; проволока вибрирует, как целое: оба ее конца блестят, между тем как ее середина темна, потому что она охлаждалась вследствие своего быстрого движения по воздуху. Таким образом, вы имеете здесь ослабление красного каления от концов к середине проволоки. Я ослабляю натяжение, проволока разделяется на две пучности; я ослабляю его еще больше и получаю три пучности; еще больше, и вы видите, как проволока разделилась на четыре пучности, отделенные одна от другой тремя блестящими узлами. Направо и налево от каждого узла красное каление до того ослабевает, что, наконец, совершенно исчезает. Вы видите также, что когда проволока правильно вибрирует, то узлы сияют большим блеском, чем какой имела проволока до начала вибраций. Причина этого следующая. Электричество проходит свободнее по холодной проволоке, чем по нагретой. Когда, таким образом, вибрирующие пучности охлаждаются вследствие своего быстрого движения по воздуху, то их проводимость увеличивается, и через вибрирующие части проволоки проходит больше электричества, чем через неподвижные части, представляющие большее сопротивление; вследствие этого и происходит большее раскаление и больший блеск узлов. Если до начала вибраций камертона проволока была доведена до ярко-красного каления, то когда он вибрирует, узлы доходят до температуры плавления.

§ 8. Новый способ определения законов вибраций.

Теперь мы можем применить опыты Мельде для определения законов вибрирующих струн. Вот у меня четыре камертона, a , b , c , d , числа вибраций которых относятся между собою, как 1, 2, 4, 8. Прикрепляя струну к самому большому камертону, a , я натягиваю ее тяжестью, которая заставляет ее вибрировать, как целое. Оставляя ту же самую натягивающую тяжесть, я определяю, какие длины должна иметь эта струна для того, чтобы, будучи привязана к другим трем камертонам, b , c , d , она колебалась, как целое, и нахожу, что длины в четырех соответствующих случаях относятся между собою, как числа 8, 4, 2, 1.

Из этого следует первый закон, который мы уже вывели другим путем: длина струны обратно пропорциональна быстройте вибраций¹⁾.

В этом случае самая длинная струна вибрирует, как целое, когда она прикреплена к камертону a . Я теперь переношу ее на b , оставляя прежнюю натягивающую тяжесть. Она тоже вибрирует, когда вибрирует b ; но каким образом? Она разделяется на две равные пучности. Только этим путем она может приспособиться к быстрейшим вибрациям камертона b . Прикрепленная к c , та же струна разделяется на четыре, а прикрепленная к d —на восемь пучностей. Число пучностей пропорционально быстройте вибраций. Очевидно, что мы имеем здесь только в более тонкой форме результат, уже полученный нами прежде в опыте с каучуковою трубкою, которая приводилась в движение рукою. Ясно также, что этот результат может быть выведен и теоретически из нашего первого закона.

Мы можем расширить опыт. Вот два камертона, тоны которых разделены музыкальным интервалом, называемым квинтой. Прикрепляя струну к одному из этих камертонов, я натягиваю ее до тех пор, пока она разделится на две пучности; прикрепленная к другому камертону и натянутая такою же тяжестью, она мгновенно делится на три пучности, когда камертон начнет вибрировать. Но для образования интервала квинты вибрации одного камертона должны относиться к вибрациям другого, как 2 : 3. Таким образом, деление струны уже показывает интервал. Вот еще два камертона, тоны которых отделены интервалом кварты. При известном натяжении один из этих камертонов разделяет нашу струну на три пучности; при том же натяжении другой камертон разделяет ее на четыре пучности, а этими числами и выражается отношение между их вибрациями. Подобным же образом может

¹⁾ Если смочить струну сернокислым хином и осветить ее фиолетовыми лучами электрической лампы, то она даст великолепную флуоресценцию. Когда камертон, к которому она прикреплена, вибрирует, то струна разделяется на ряд веретен, отделенных одно от другого гораздо более светлыми узлами, и издает самый нежный зеленовато-голубой свет.

быть показано деление струны в применении ко всем другим музыкальным интервалам ¹⁾).

Вот еще два камертона, a b , из которых один (a) вибрирует вдвое быстрее, чем другой. Я прикрепляю шелковую нитку к a , натягиваю ее до тех пор, пока вибрации ее станут одновременны с камертоном, и она будет вибрировать, как одно целое. Затем я составляю вторую нитку такой же длины, свивая вместе четыре первых нитки. Я прикрепляю эту сложную нитку к b и, оставляя такое же натяжение, как в предыдущем опыте, привожу b в вибрации. Сложная нитка вибрирует одновременно с b и вибрирует, как целое. Поэтому, так как камертон b вибрирует с вдвое меньшей быстротой, чем a , то, учетверивши вес струны, я уменьшил вдвое быстроту вибраций. Подобным же образом может быть доказано, что, увеличивая вес струны в 9 раз, мы уменьшаем число ее вибраций втрое. Мы выражаем этот закон таким образом: **б ы с т р о т а в и б р а ц и й о б р а т н о п р о п о р ц и о н а л ь н а к в а д р а т н о м у к о р н ю в е с а с т р у н ы.**

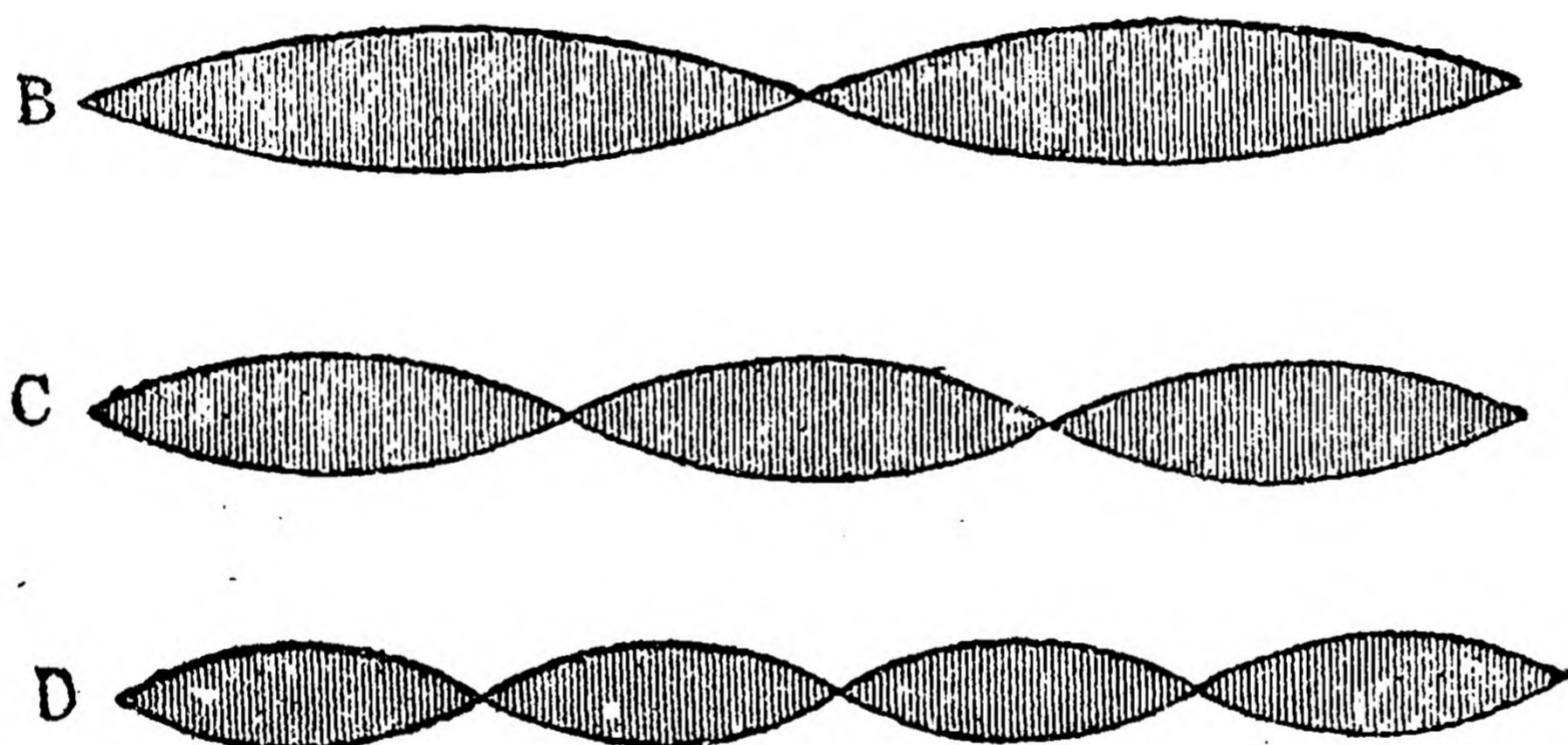
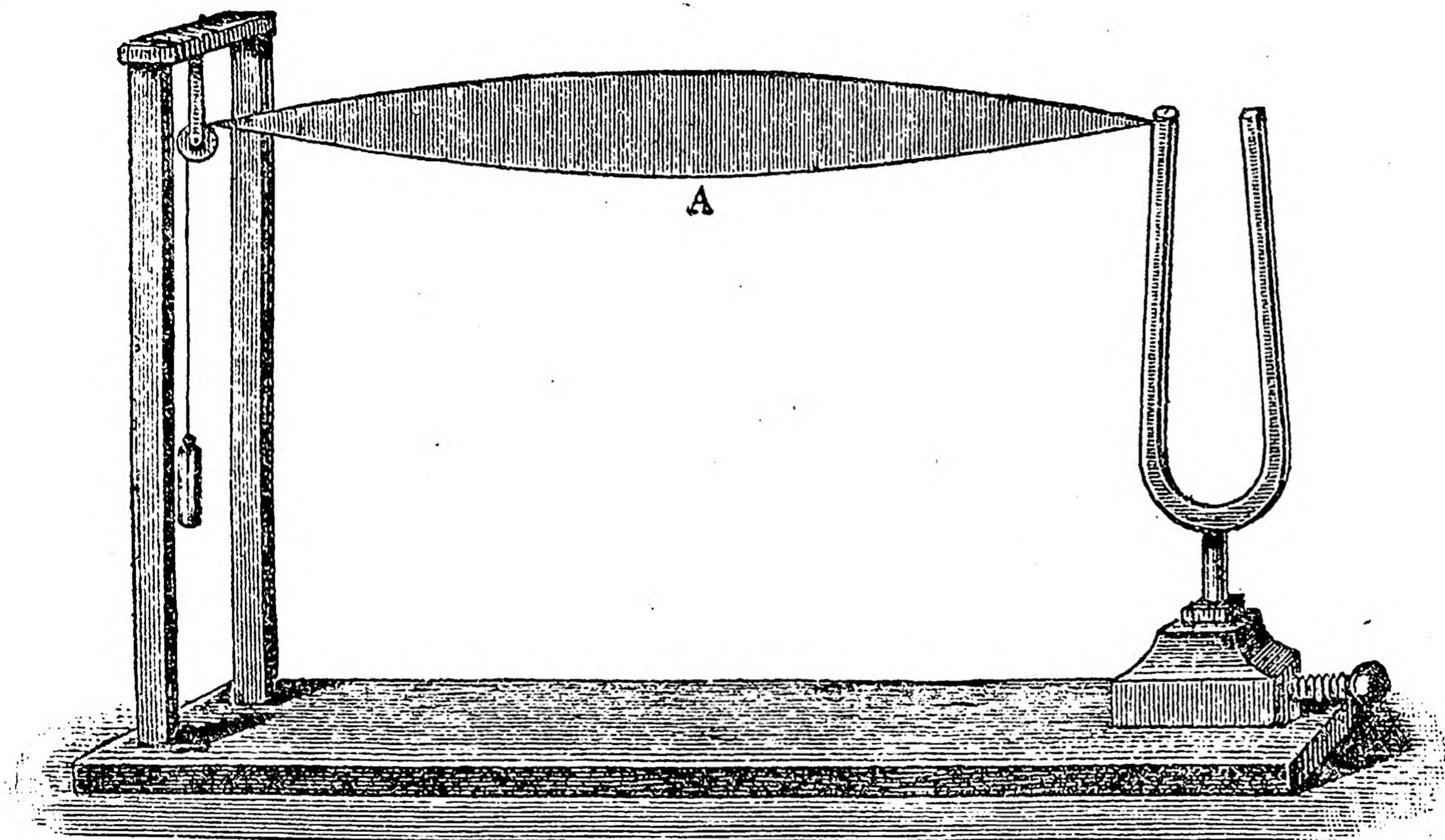
Прекрасное подтверждение этого закона может быть получено таким образом. К камертону прикрепляется шелковая струна в 3 метра длины. Один метр струны составлен из четырех отдельных ниток, свитых вместе, а остальные два метра состоят только из одной нитки. Я произвожу натяжение, которое заставляет струну разделиться на две пучности. Но как она разделится? Не по середине ее, как было бы в том случае, когда она имела бы везде одинаковую толщину, но в той точке, где оканчивается ее толстая часть. Эта толстая часть в 1 метр длины вибрирует с такой же быстротой, как и тонкая часть в 2 метра длины, результат, уже прямо вытекающий из двух изложенных нами законов. Поэтому результат этот служит подтверждением обоих законов. Едва ли мне нужно прибавлять, что если бы длины частей струны относились между собой иначе, чем как 1 : 2, то узел не образовался бы в точке соединения двух частей.

Вот еще у нас две струны одинаковой длины и толщины. Одна из них прикреплена к камертону b , а другая—к камертону a , который вибрирует вдвое быстрее b . Когда мы натянем струну, прикрепленную к b тяжестью в $1\frac{1}{2}$ грамма, то она вибрирует, как целое. Но если мы вместо b возьмем камертон a , то тяжесть в 6 граммов заставит ее вибрировать, как целое. Поэтому, чтобы увеличить вдвое быстроту вибраций, мы должны были увеличить в 4 раза натягивающую тяжесть. Подобным же образом может быть доказано, что для увеличения быстроты вибраций в 3 раза мы должны были бы взять натягивающую тяжесть в 9 раз большую. Отсюда третий закон таков: **б ы с т р о т а в и б р а ц и й п р о п о р ц и о н а л ь н а к в а д р а т н о м у к о р н ю н а т я ж е н и я.**

Теперь я изменю этот опыт. Я протягиваю эту шелковую нитку от камертона через блок и натягиваю ее тяжестью в 6 граммов. Нитка вибрирует, как целое, что показано в A на фиг. 50. Уменьшая тяжесть,

¹⁾ Музыкальные интервалы будут рассмотрены в следующей лекции.

я ослабляю натяжение нитки, которая, наконец, разделяется на две пучности, как показано в *B*. Какова же теперь натягивающая тяжесть? $1\frac{1}{2}$ грамма или четверть прежней. При натягивающей тяжести в $\frac{2}{3}$ грамма, нитка разделяется на три пучности, как показано в *C*, между тем как тяжесть в $\frac{3}{8}$ грамма разделяет ее на четыре пучности, как



Фиг. 50.

в *D*. Таким образом, уменьшение натяжения в четыре раза производит вдвое большее число пучностей, уменьшение в девять раз производит втрое большее, а уменьшение в 16 раз вчетверо большее. Вообще говоря, число пучностей обратно пропорционально квадратному корню натяжения. Этот результат может быть выведен теоретически из нашего первого и третьего закона, и доказательство его служит, таким образом, подтверждением верности этих законов.

Таким образом, ряд умозаключений и опытов, совершенно отличных от тех, которые мы употребляли прежде, приводит нас к тем же законам. В науке часто различные пути умозаключений приводят к одной и той же истине; и если бы мы только шли по ним как следует, то наверное достигли бы истины. Из наших умозаключений могут выходить

и часто выходят противоречия; но, возвращаясь снова назад, мы наверное найдем, что причина противоречий заключается не в недостатке постоянства в природе, но в недостатке тщательности у людей.

ГАРМОНИЧЕСКИЕ ВЕРХНИЕ ТОНЫ (ОБЕРТОНЫ).

§ 9. Тембр; звуковой оттенок.

Мы приступаем теперь к тому отделу нашего предмета, который, как окажется впоследствии, имеет весьма большую важность. Было доказано весьма разнообразными опытами, что натянутая струна может вибрировать, как одно целое, или может делиться на несколько равных частей, из которых каждая может вибрировать как самостоятельная струна. Но невозможно, чтобы струна звучала, как целое, не подвергаясь в то же время бóльшим или меньшим делениям, т.-е. к вибрациям всей струны всегда присоединяются в большей или меньшей степени вибрации ее частей. Высшие тоны, производимые этими последними вибрациями, называются гармониками или гармоническими тонами струн. То же бывает и с другими звучащими телами; во всех случаях мы замечаем совершающиеся одновременно различные вибрации. Верхние тоны смешиваются с основным тоном, и их соединение производит то, что мы за неимением лучшего термина называем качеством звука. Французы называют это тембром (timbre), а немцы—звуковым цветом (Klangfarbe). Это соединение высших и низших тонов дает нам возможность отличать один музыкальный инструмент от другого. Кларнет и скрипка, напр., хотя бы они издавали одинаковый основной тон, различаются между собою по качеству звука; придаточные верхние тоны скрипки отличны от придаточных тонов кларнета, и эти тоны, соединяясь с основным тоном, уничтожают тождество звуков.

Таким образом, все тела и инструменты, употребляемые для произведения музыкальных звуков, издают кроме своих основных тонов еще тоны, происходящие от высших порядков вибраций. Немцы обозначают все такие тоны одним общим термином «верхние тоны» (обертоны). Я думаю, что было бы хорошо и по-английски употреблять термин «верхние тоны» (overtones), как соответствующий немецкому термину. При этом случае нельзя не позавидовать немецкому языку в его способности применяться к требованиям этого рода. Напр., термин «звуковой цвет» (Klangfarbe), употребленный Гельмгольцем, чрезвычайно выразителен и в английском языке нет равносильного ему. Вы знаете, что цвет зависит от быстроты вибраций, что голубой цвет находится в таком же отношении к красному, как высокий тон к низкому: простой цвет имеет только одну быстроту вибраций, и на него можно смотреть как на аналогию с простым тоном в музыке. Тон, таким образом, можно определить как продукт вибраций, которые не могут быть разложены на простейшие вибрации. Смешанный цвет, напротив, происходит от смешения двух или более простых цветов; и смешение тонов, получаемое

тогда, когда звучат вместе основной тон и верхние тоны струны, называется по-немецки Klang. Почему бы и по-английски не употреблять слово clang для обозначения того же предмета и, таким образом, дать термину научный смысл, родственный с общепринятым его значением? И нельзя ли, подобно Гельмгольцу, прибавлять слово ц в е т или оттенок (colour или tint) для обозначения характера звука, употребляя, таким образом, термин звуковой оттенок (clangtint), как равнозначущий немецкому Klangfarbe? ¹⁾.

С вашего позволения я и буду вперед употреблять эти термины; и теперь мы должны несколько ближе, чем делали это до сих пор, рассмотреть разделение струны на ее гармонические части. Перед вами стоит наш монохорд с его натянутой проволокой. Скала этого инструмента разделена на 100 равных частей. На середине нашей проволоки стоит число 50; в точке, которая отстоит от конца почти на треть ее длины, находится число 33, на расстояниях, составляющих четверть и пятую часть ее длины от конца, стоят соответственно числа 25 и 20. Эти числа достаточны для нашей настоящей цели. Я ударяю проволоку при 50; вы слышите, что ее звук получается глухой и тупой. Я ударяю ее при 33; получается иной звук. Я ударяю ее при 25; получаемый при этом звук отличен от прежних. По мере того, как я удаляюсь от середины проволоки, звуковой оттенок становится более блестящим, тон более живым и резким. Какая же причина этих различий в тоне, издаваемом одною и тою же проволокой?

Знаменитый Томас Юнг, бывший некогда профессором в Королевском Институте, дал нам возможность разрешить этот вопрос. Он доказал, что когда ударена какая-нибудь точка струны, то все высшие тоны, которым нужна была эта точка как узел, не оказываются в звуке. Я объясню это опытом. Я ударяю точку 50 и оставляю струну звучать. При этом я убеждаюсь, что первого верхнего тона, соответствующего разделению струны на две вибрирующие части, нет в звуке. Если бы он был, то прикосновение к струне не уничтожило бы его, потому что эта точка была бы его узлом. Я касаюсь точки 50; основной тон прекращается и не слышно ни одной высшей октавы этого тона. Вместе с октавою исчезает из звука целый ряд верхних тонов, число вибраций которых вчетверо, в шесть, в восемь раз и т. д. больше основного тона. Всем этим тонам нужен узел в центре, где—по закону Юнга—он не может образоваться. Но я ударяю какую-нибудь другую точку, напр., 25, и касаюсь как прежде 50. Основной тон умолкает; но его октава, ясная и полная, звучит в ваших ушах. Так как в этом случае точка 50 не ударена, то в ней может образоваться узел; он действительно и о б р а з у е т с я, и две половины струны продолжают вибрировать и после того, как прекратились вибрации всей струны, как одного целого. Я еще ударяю струну в точке 33, и уверен, что в происшедшем звуке не будет второй гармоники или второго верхнего тона. Я доказываю это, касаясь

¹⁾ Последнее предложение Тиндаля относительно английской терминологии применяется и к русской. Прим. перев.

точки 33. Если бы вторая гармоника находилась в звуке, издаваемом струною, то это прикосновение не прекратило бы ее, потому что 33 есть узел этой гармоники. Однако, теперь не слышно ни одного тона, соответствующего разделению струны на три вибрирующие части. Тон не слышен, потому что его вовсе и не было.

Все верхние тоны, зависящие от этого деления, число колебаний которых в шесть, девять, двенадцать раз более основного тона, также не оказываются в звуке. Я ударяю теперь 20 и по-прежнему прикасаюсь к 33; прикосновение в этом случае не уничтожило второй гармоники, которая продолжает звучать ясно и полно и после уничтожения основного тона. В этом случае точка 33 не ударена и в ней может образоваться узел, и поэтому струна может разделиться на три части. Подобным образом, если я ударю 25 и коснусь 25, то не будет слышно третьей гармоники; но если я ударю точку между 25 и концом проволоки и затем коснусь 25, то третья гармоника будет слышна ясно. И таким образом мы могли бы продолжать далее, так как общее правило, высказанное Юнгом и доказанное этими опытами, говорит, что если мы ударим какую-нибудь точку струны или, как прибавляет Гельмгольц, проведем по ней смычком, то в общем звуке, издаваемом струною, не будет того гармонического верхнего тона, которому нужна эта точка как узел.

§ 10. Слитие верхних тонов с основным. Золова арфа.

Теперь вы можете понять, какое сильное влияние могут иметь эти верхние придаточные вибрации на качество тона, издаваемого струной. Тоны, которые так полно звучат в нашем ухе после прекращения основного тона, сливались с этим тоном прежде, чем он прекратился. Кажется странным, что тоны такой силы могли покрываться основным тоном до такой степени, что даже опытное ухо музыканта не в состоянии было отличить их. Но Гельмгольц вполне ясно показал, что это происходит от недостатка упражнения и внимания. Способности музыканта никогда не упражнялись в этом направлении. Есть многочисленные явления, которые музыкант может отличать, потому что его искусство требует от него навыка различать их. Но нет надобности для его искусства разлагать общий звук инструмента на составляющие тоны. Однако, при внимании даже неопытное ухо может сделать это, особенно если ум наперед знает, что должно найти ухо.

Я вспоминаю как бывший в этой зале при начале моего знакомства с ним Фаредей, когда я хотел показать ему особенное действие электромагнита на кристалл и все было уже готово, вдруг в тот самый момент, когда я хотел возбудить магнит, положил свою руку на мое плечо и спросил у меня: «На что же я должен обратить внимание?» Среди множества впечатлений, возбуждаемых экспериментом, даже этот первейший из всех экспериментаторов признавал, как необходимо было ему наперед знать, на какой особенный пункт обратить свое внимание. Такое пособие особенно необходимо там, где действия так перепутаны и так

тесно связаны между собою, как в сложных тонах звуков. Когда мы хотим изолировать какой-нибудь частный тон, то мы можем помочь нашему вниманию тем, если наперед на особой струне произведем этот тон, который должен звучать слабо. Когда, таким образом, слух узнает этот тон, то ему уже легче будет перейти от него к другому тону такой же высоты, находящемуся в сложном звуке, и скорее выделить его от сопровождающих его тонов. В предшествующих опытах, при которых целью нашей было во всех случаях давать полную силу верхним тонам струны, мы совершенно устраняли основной тон. Однако, мы можем только ослаблять его, не прекращая его вполне. Я ударяю струну при 33 и на мгновение тихонько прикасаюсь пером к струне в точке 50. Этим я до такой степени ослабляю основной тон, что октава его слышится ясно. Затем, прикасаясь еще раз к струне в 50, я еще более ослабляю основной тон, так что теперь его первая гармоника сильнее звучит, чем он сам. Вы слышите теперь оба тона; но вы могли бы слышать их с самого начала при достаточном напряжении внимания.

Гармонические верхние тоны струн могут быть усиливаемы или ослабляемы в широких границах ¹⁾. Они могут, как мы видели, покрываться основным тоном и могут также сами совсем покрывать его. Удар жестким телом благоприятствует их развитию, между тем как удар мягким телом не благоприятствует им. Кроме того, они зависят от скорости, с какою тело, ударяющее струну, отнимается от нее после удара. На них также имеет влияние вес и эластичность молоточков в фортепиано. Они также зависят от места, по которому делается удар. Напр., когда струна ударяется по середине, то гармонические звуки менее сильны, чем в том случае, когда удар делается ближе к концу ее. Гельмгольц, равно великий как математик и как экспериментатор, вычислил теоретическую напряженность гармоник, производимых различными способами, т.-е. действительную живую силу или энергию вибраций, безотносительно к их действию на ухо. Один пример, представленный им, может объяснить этот предмет. Если принимать силу основного тона в каждом случае во 100, то оказывается, что сила второй гармоники составляет 56,1 или несколько более половины, когда струна просто потянута в сторону в точке на $\frac{1}{7}$ ее длины от конца и потом пущена. Когда струна ударяется фортепианным молоточком, соприкосновение которого со стру-

¹⁾ При распространении сложного звука на большое расстояние верхние обертоны, входящие в состав его, испытывают большее поглощение в воздухе по сравнению с низким основным тоном и потому скорее затухают. Это ведет к своеобразному изменению тембра отдаленных звуков, позволяющему нам распознавать такие звуки не только, как более слабые, но и именно как идущие издалека; при некотором навыке можно даже и оценивать расстояние, отделяющее наблюдателя от источника звука. Почти все без исключения музыкальные инструменты, в том числе и камертон, дают звуки сложные, т.-е. состоящие из основного тона и обертонов. Посредством особого инструмента, называемого аудионом, описание которого приведено ниже (см. прим. редактора на стр 265), можно, однакоже, получать почти совершенно чистые звуки; музыкальная особенность их заключается в том, что они почти не поддаются локализации, т.-е. невозможно определить, на каком расстоянии от уха находится источник, издающий звук.

ною продолжалось $\frac{3}{7}$ времени вибрации основного тона, то сила того же тона бывает 9. В этом случае второй гармонический тон почти совершенно уничтожается. Но если время соприкосновения уменьшить до $\frac{3}{20}$ периода вибрации основного тона, то сила верхнего тона возрастает до 357, между тем, когда струна резко ударяется весьма жестким молотком, то сила доходит до 505, т.-е. бывает более, чем в 5 раз сильнее основного тона ¹⁾).

Фортепианные мастера нашли, что самый приятный тон получается тогда, когда точка, по которой ударяет молоточек, отстоит от конца струны на $\frac{1}{7}$ до $\frac{1}{9}$ длины струны от ее конца.

Но почему же это так? Гельмгольц дал ответ. До тех тонов, при которых на этих точках образуются узлы, все верхние тоны, как показал он, находятся в созвучии с основными тонами; но шестые и восьмые верхние тоны уже не имеют такого созвучия; они составляют диссонансы, и потому желательно устранять их. Это и достигается тем, что молоток падает на точку, в которой должен был быть их узел. Этим уничтожается возможность образования таких тонов, и вредное действие их устраняется.

Тоны эоловой арфы производятся разделением достаточно натянутых струн на большее или меньшее число гармонических частей действием проходящего около них тока воздуха. Инструмент обыкновенно помещается в окне между рамой и стеной, так, чтобы воздух мог проходить только через то место, где находятся струны. Уитстон рекомендует для произведения этого опыта натянуть скрипичную струну внизу под дверью, неплотно запирающеюся. Когда дверь затворена, ток воздуха, входящий снизу, приводит струну в вибрации, и если в комнате топится печка, то вибрации бывают так сильны, что одновременно образуется несколько различных звуков ²⁾). Один господин в Базеле устроил из железных проволок большой инструмент, который он назвал арфою погоды или исполинскою арфою и который, по словам его строителя, звучал при всякой перемене погоды. Звуки вызывались в нем также, как говорили, изменениями земного магнетизма. Хладни доказал ошибочность таких показаний и свел все действие инструмента на действие ветра на его струны.

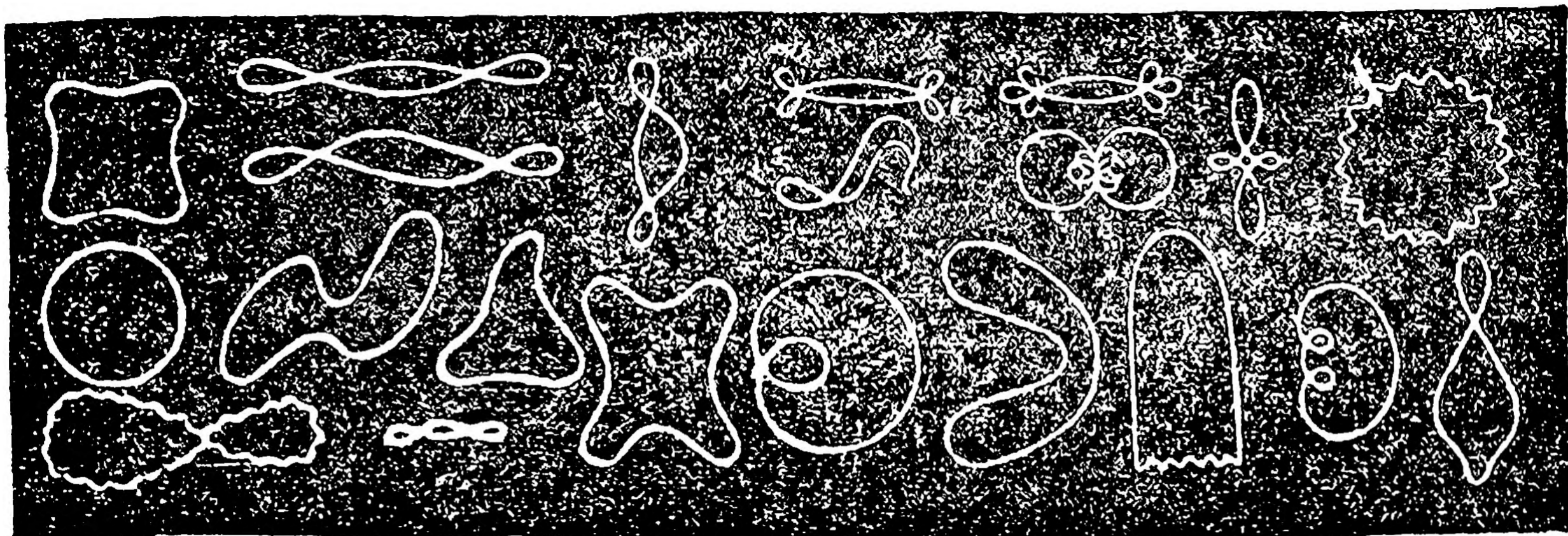
§ 11. Оптические иллюстрации Юнга.

Наконец, относительно вибраций проволок нужно упомянуть об опытах Юнга, который первый употреблял оптические методы при этих опытах. Он заставлял луч солнечного света падать на фортепианную проволоку и получал, таким образом, блестящую точку. Когда проволока приводилась в вибрацию ударом, то точка описывала светлую линию, подобную той, какая образуется в воздухе от вращения раскаленного

¹⁾ Lehre von den Tonempfindungen, S. 135.

²⁾ Такая струна действует так же, как сирена. Она периодически прерывает ток воздуха. Ее действие сходно таким образом с действием языка. См. V лекцию.

угля, и форма этой линии показывала характер вибраций. Эти опыты ясно показывали, что колебания проволоки не ограничиваются одною плоскостью, но что она в своих вибрациях описывает более или менее сложные кривые. К вибрациям всей струны присоединяются частные вибрации, выражающиеся извилинами и изгибами. Некоторые из этих



Фиг. 51.

линий, как их наблюдал Юнг, представлены на фиг. 51. Каждая из этих фигур соответствует особому виду движения, возбуждаемому струною в окружающем воздухе. Форма звуковых волн зависит от этих придаточных вибраций, и они, таким образом, имеют влияние на звуковой оттенок или на качество звука.

ОБЗОР ТРЕТЬЕЙ ЛЕКЦИИ.

Количество движения, сообщаемого воздуху вибрирующею струною, слишком мало для того, чтобы оно было воспринимаемо как звук, даже на небольшом расстоянии от струны.

Поэтому, когда струны употребляются как источники музыкальных звуков, они должны быть соединяемы с телами, имеющими большую поверхность, которые воспринимают их вибрации и передают их окружающему воздуху.

Таким образом, тон арфы, фортепиано, гитары или скрипки зависит главным образом от резонансовых поверхностей этих инструментов.

Следующие четыре закона управляют вибрациями струн: число вибраций обратно пропорционально длине; обратно пропорционально диаметру; прямо пропорционально квадратному корню натягивающей тяжести или натяжения, и обратно пропорционально квадратному корню плотности струны.

Когда берутся струны различных диаметров и плотностей, то закон устанавливает, что число вибраций обратно пропорционально квадратному корню веса струны.

Когда натянутая веревка или каучуковая трубка, наполненная песком и прикрепленная одним концом к неподвижному предмету, получает толчок на другом конце, то образовавшийся выгиб идет по трубке,

как импульс к ее неподвижному концу и, отразившись здесь, возвращается к руке, которая сообщила толчок.

Время, употребляемое импульсом на прохождение от руки до прикрепленного конца трубки и назад, равно времени, в течение которого вся трубка, как целое, совершает полную вибрацию.

Когда по трубке посылается последовательно ряд толчков, тогда прямые и отраженные импульсы встречаются и своим соединением делят трубку на ряд вибрирующих частей, называемых пучностями, которые отделяются одна от другой, повидимому, неподвижными точками, называемыми узлами.

Число пучностей прямо пропорционально числу вибраций на свободном конце трубки.

Рука, производящая вибрации, может совершать свое движение по пространству меньшему дюйма, между тем как скопление или суммирование ее импульсов может довести амплитуду пучностей до нескольких дюймов и даже до нескольких футов.

Если трубка, укрепленная обоими концами, обхватывается по середине указательным и большим пальцами, то когда одна из ее половин оттягивается в сторону и потом пускается, и другая половина ее также приходит в вибрации.

Если трубка обхвачена в точке на $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ или $\frac{1}{5}$ ее длины от одного из концов, то когда оттягивается в сторону и потом пускается более короткая часть, и длинная часть также разделяется на 2, на 3 или 4 вибрирующие части, отделенные одна от другой узлами.

Число вибрирующих частей зависит от числа вибраций в точке, обхваченной пальцами.

И здесь также амплитуда вибраций в месте, обхваченном пальцами, может быть не больше нескольких миллиметров, между тем как амплитуда пучностей может достигать десятков сантиметров.

Музыкальная струна, если коснуться ее бородкой пера в точке на $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$ и т. д. ее длины от конца и ударить ее более короткую часть, разделяется так же точно, как каучуковая трубка. Ее деления можно сделать наглядными, накладывая на нее маленькие изогнутые бумажки. Бумажки, лежащие на пучностях, сбрасываются, между тем как лежащие на узлах остаются на своих местах.

Тоны, соответствующие разделению струны на ее аликвотные части, называются гармониками или гармоническими верхними тонами струны.

Когда струна вибрирует, как целое, то она обыкновенно разделяется в то же время на несколько равных частей. Меньшие вибрации соединяются с большими; тоны, соответствующие меньшим вибрациям и называемые верхними тонами, смешиваются в то же время с основным тоном струны.

Присоединение этих верхних тонов к основному определяет тембр или качество звука или, как мы условились называть его, звуковой оттенок.

Присоединение этих верхних тонов к основным тонам одинаковой высоты дает нам возможность отличать звук кларнета от звука флейты и звук скрипки от звука обоих этих инструментов. Если бы чистые основные тоны этих инструментов могли быть изолированы, то мы не могли бы отличить их один от другого; но различная примесь верхних тонов в разных инструментах делает различными и потому отличными их звуковые оттенки.

Вместо тяжелой каучуковой трубки в вышеприведенных опытах мы можем употреблять легкие шелковые струны и вместо вибрирующей руки вибрирующие камертоны и заставлять их делиться на какое угодно число пучностей. Таким способом получаются весьма красивые явления, и посредством подобных опытов могут быть представлены все законы звучащих струн.

Когда натянутая струна ударена или приведена в движение смычком в какой-нибудь точке, то все верхние тоны, которым нужна эта точка для образования на ней узла, не оказываются в общем звуке струны.

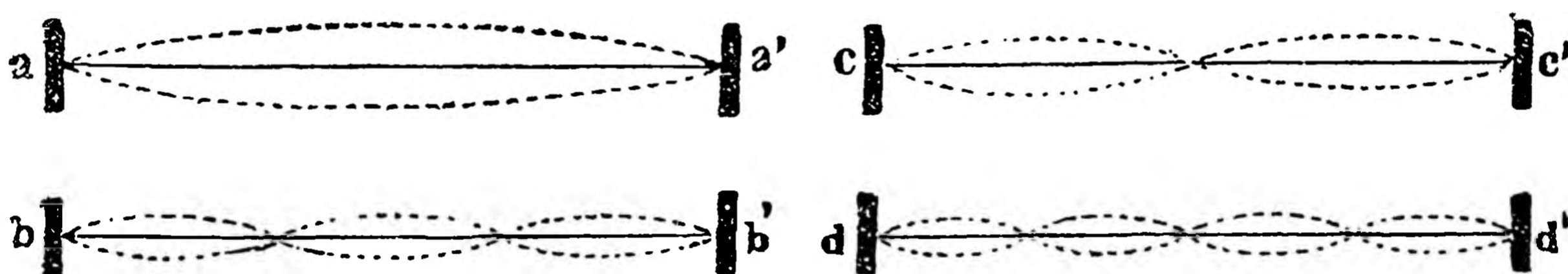
Точка фортепианной струны, ударяемая молоточком, отстоит от конца струны на $\frac{1}{7}$ до $\frac{1}{9}$ ее длины; при ударе этой точки не могут образоваться тоны, которым она нужна как узел, и этим устраняется источник диссонанса.

Лекция четвертая.

Вибрации прута, укрепленного на обоих концах: его разделения и соответствующие верхние тоны.—Вибрации прута, укрепленного на одном конце.—Калейдоскоп.—Железная скрипка и музыкальный ящик.—Вибраций прута, свободного на обоих концах.—Claque-bois и стеклянная гармоника.—Вибрации камертона: его подразделения и верхние тоны.—Вибрации квадратных пластинок.—Открытие Хладни.—Уитстонов анализ вибраций пластинок.—Хладниевы фигуры.—Опыты Фаредея и Стрелке.—Вибрации кружков и колоколов.

§ 1. Поперечные вибрации прута, укрепленного на обоих концах.

Нашу последнюю лекцию мы посвятили поперечным вибрациям струн. Настоящую же лекцию я намерен посвятить поперечным вибрациям прутьев, пластинок и колоколов; начнем с прута, укрепленного на обоих концах. Его вибрации совершаются точно так же, как и вибрации струн. Он вибрирует как одно целое и может так же делиться на две, на три, на четыре и более вибрирующих частей. Но по причине, которая будет сейчас объяснена, законы, определяющие высоту последовательных тонов, существенно различны в этих двух случаях.



Фиг. 52.

Таким образом, когда струна разделяется на две равные части, каждая из ее половин вибрирует со скоростью вдвое большею, чем целая струна; между тем как в пруте каждая из его половин вибрирует со скоростью почти втрое большею, чем весь прут. Выражаясь точнее, эти два числа вибраций относятся между собою как 9 : 25, т.-е. как квадрат 3 к квадрату 5. На фиг. 52, aa' , cc' , bb' , dd' представляют четыре вида вибраций прута, укрепленного на обоих концах; последовательные числа вибраций в этих четырех случаях находятся между собою в следующем отношении:

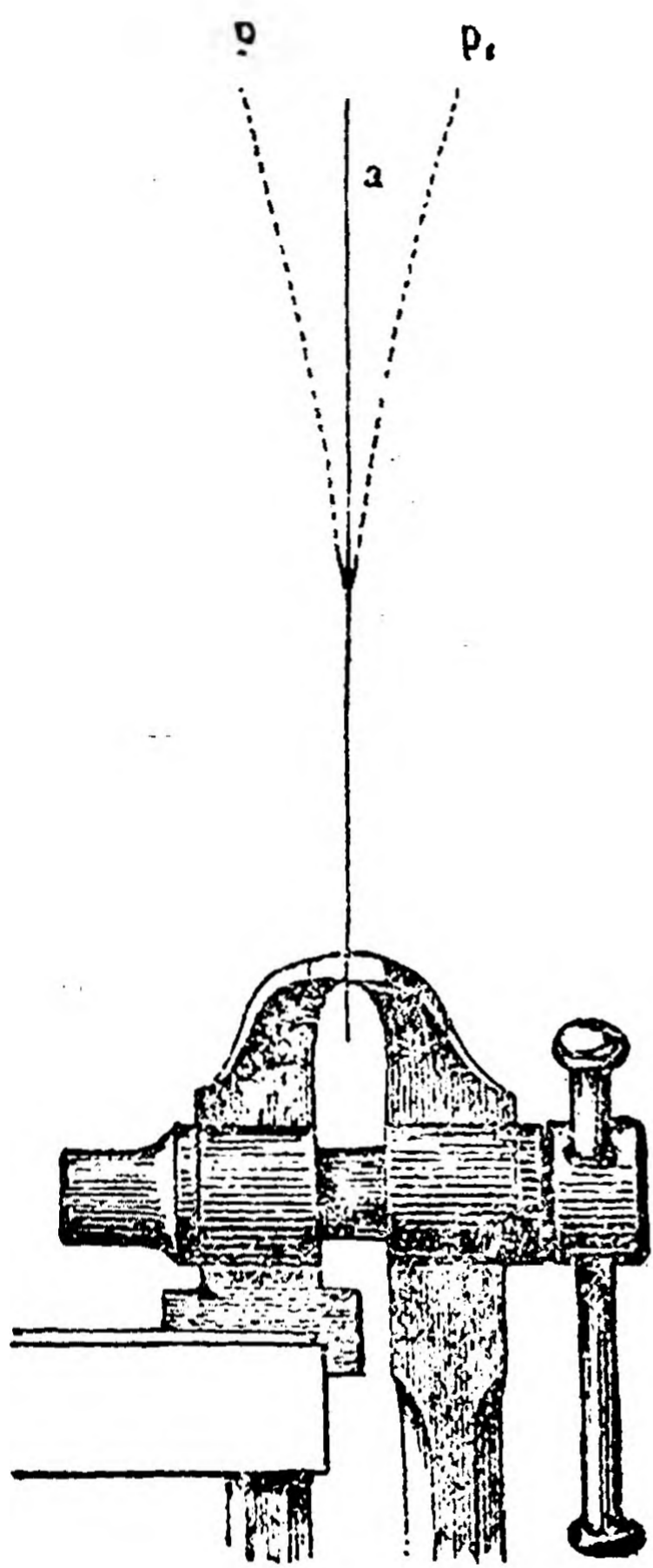
Числа узлов . . .	0 1 2 3	Числа вибраций . . .	9 25 49 81
-------------------	---------------	----------------------	------------------

Последний ряд чисел содержит в себе квадраты нечетных чисел 3, 5, 7, 9.

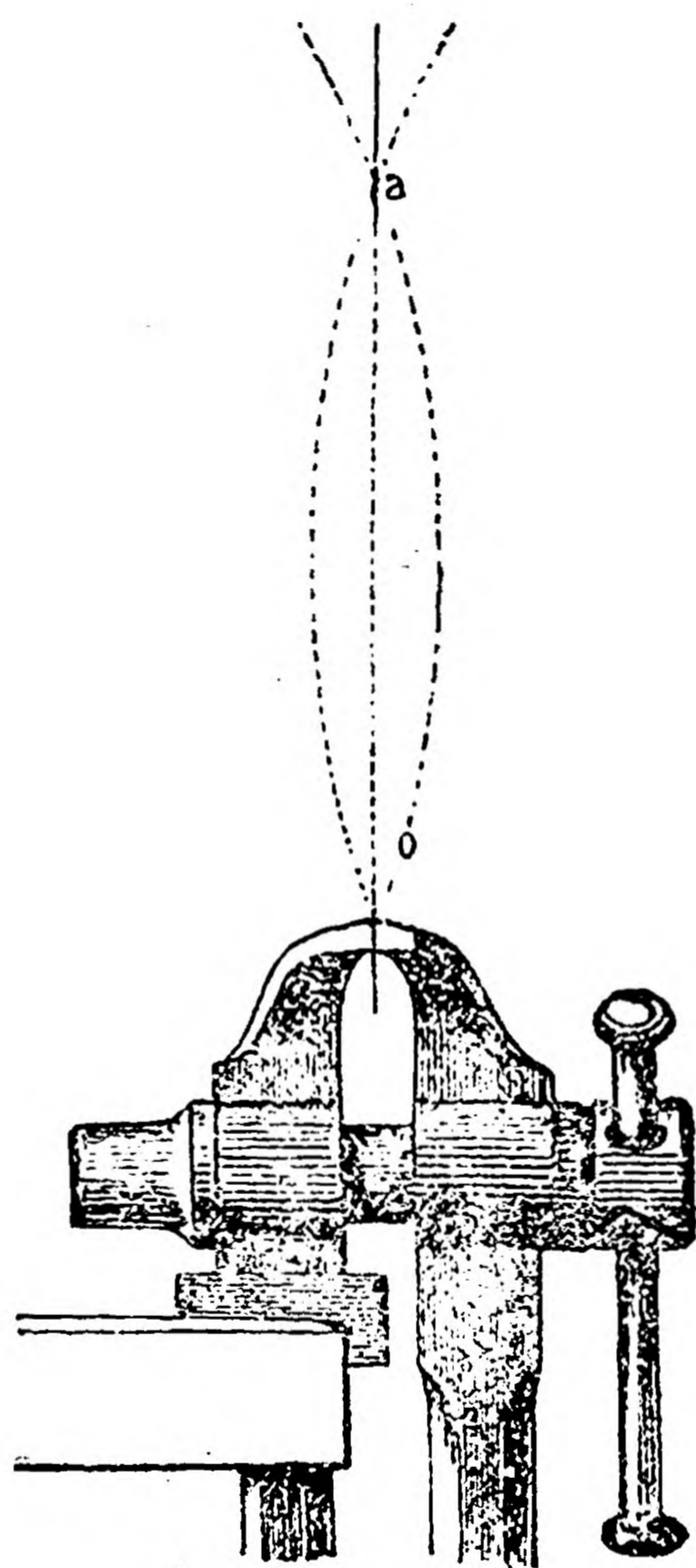
§ 2. Поперечные вибрации прута, укрепленного на одном конце.

В струне вибрации поддерживаются натяжением, прилагаемым извне; в пруте же вибрации поддерживаются упругостью самого прута. Способ деления в обоих случаях одинаков, но действующие при этом силы различны и потому различны также и последовательные числа вибраций.

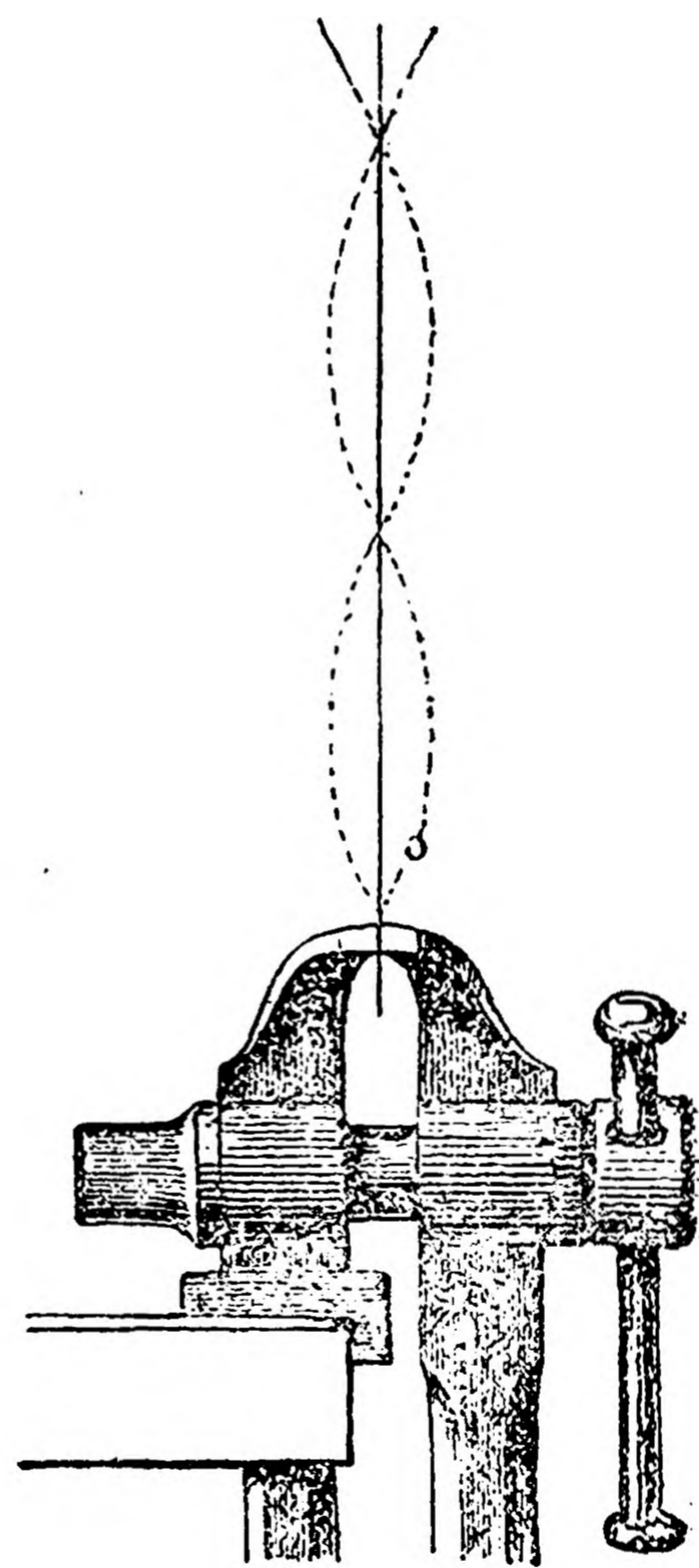
Перейдем теперь к рассмотрению прута, укрепленного на одном конце и свободного на другом. И в нем также вибрации поддерживаются не каким-нибудь внешним натяжением, а упругостью самого материала прута. Начиная по обыкновению более грубыми механическими движениями и переходя от них к звуковым, я укрепляю в тиски длинный же-



Фиг. 53.



Фиг. 54.



Фиг. 55.

лезный прут *a* (фиг. 53), оттягиваю его в сторону и затем пускаю. Чтобы сделать его вибрации более заметными, я при помощи электрического света отбрасываю его тень на экран. Он колеблется сюда и туда, как одно целое между точками *p p'*. Но прут может вибрировать и другим образом. Я касаюсь его в точке *a*, слабо держа его указательным и большим пальцами, и сильно ударяю его между *a* и *o*. Прут разделяется на две вибрирующие части, отделенные узлом (фиг. 54). Вы видите на экране это темное веретено между *a* и тисками внизу, а выше *a* веерообразную тень и между ними темный узел. Деление может быть произведено и без прикосновения к точке *a*, одним только быстрым и сильным ударом прута между *a* и *o*. В этом случае, однако, кроме качания частями, прут качается еще, как целое, и меньшие качания частей соеди-

няются с большими цельными качаниями. Кроме того, вы замечаете, что ширина или амплитуда частных колебаний зависит от быстроты моего удара. Когда удар совершается медленно, то частные деления обозначаются только слабо, между тем как полное колебание выступает весьма ясно. Но когда удар силен и быстр, то целое колебание слабо, между тем как частные колебания совершаются с силой. Если бы вибрации этого прута были довольно быстры для того, чтобы произвести музыкальный тон, то колебание прута, как одного целого, соответствовало бы его основному тону, между тем как деление на две вибрирующие части соответствовало бы первому из его верхних гармонических тонов. Кроме того, если бы прут вибрировал, как целое, и в то же время как разделенный на части, то основной тон и верхний были бы слышны одновременно. Прикасаясь к надлежащим точкам и сообщая надлежащие удары, я могу еще дальше подразделить прут, как показано на фиг. 55.

§ 3. Тонометр Хладни, железная скрипка, музыкальный ящик и калейдофон.

Теперь мы укоротим наш прут так, чтобы вибрации его могли возбуждать наши слуховые нервы. Он теперь около 10 см. длины; по его верхнему концу я провожу смычком, и вы слышите низкий музыкальный тон. Я еще больше укорачиваю прут; тон становится выше; продолжая укорачивание, я увеличиваю быстроту вибраций до того, что наконец тон становится пронзительно резким. Эти музыкальные вибрации отличаются только по быстроте от грубых вибраций, которые мы сейчас видели.

Увеличение быстроты вибраций, наблюдаемое здесь, подчиняется определенному закону: число вибраций, совершающихся в данное время, обратно пропорционально квадрату длины вибрирующего прута. Вы слышите тон этой медной полоски в 5 см. длины, когда я провожу смычком по ее концу. Я укорачиваю полоску вдвое, тон, издаваемый ею, есть вторая высшая октава первого тона; быстрота ее вибраций вчетверо больше. Таким образом, удвоив длину вибрирующей полоски, мы уменьшаем быстроту вибраций вчетверо; увеличивая длину втрое, мы уменьшаем быстроту вибраций в девять раз; увеличивая вчетверо, уменьшаем вибрации в 16 раз и т. д. Ясно, что, продолжая удлинение, мы дошли бы наконец до такой длины, при которой вибрации были бы достаточно медленны для того, чтобы их можно было считать глазами. Наоборот, начавши с длинной полоски, вибрации которой можно было бы сосчитать, мы, укорачивая ее, могли бы не только произвести тон, но и определить число вибраций, соответствующих ее различным тонам. Предположим, что мы начинаем с полоски в 36 см. длины, которая совершает одну вибрацию в секунду; когда мы укоротим ее до 12 см., то она, согласно указанному закону, сделает 9 вибраций в секунду; при укорачивании до 6 см. она даст 36 вибраций, до 3 см.—144; если она укоротится до 1 см. длины, то будет совершать 1296 вибраций в секунду. Легко пополнить промежутки между приведенными здесь длинами

и определить число вибраций, соответствующее каждому особенному тону. Этот метод был предложен и выполнен Хладни.

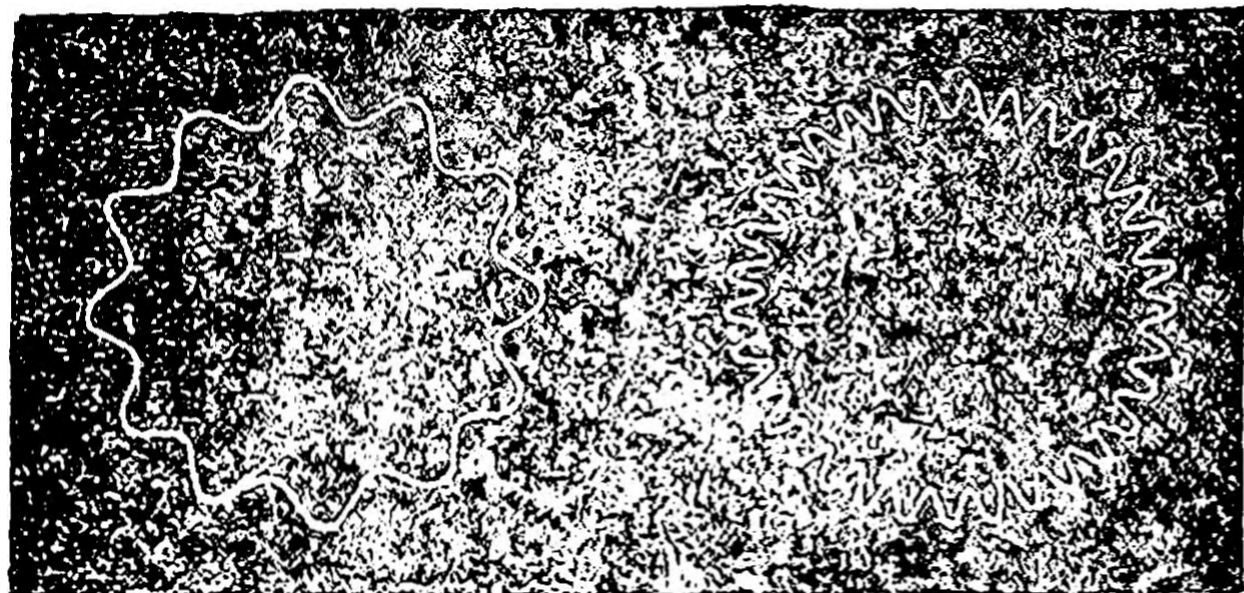
Можно устроить музыкальный инструмент из коротких прутьев. В этой обыкновенной деревянной доске укреплено несколько кусков толстой железной проволоки различной длины, расположенных полукругом. Я провожу скрипичным смычком по прутьям и получаю ряд весьма приятных звуков. Искусный музыкант мог бы наверное извлечь из достаточного числа этих железных колков довольно сносную музыку. Такой вид и имеет железная скрипка (*violon de fer*). Тоны обыкновенного музыкального ящика производятся также вибрациями металлических полосок, укрепленных одним концом. На вращающемся цилиндре находятся шпеньки, которые поднимают и тотчас же пускают свободные концы полосок. Полоски вибрируют, и их длина и толщина рассчитаны таким образом, чтобы каждая из них вибрировала с особою скоростью.

Уитстон придумал простой и остроумный оптический метод для наблюдения вибрирующих прутьев, укрепленных одним концом. Прикрепивши к концу металлического прута блестящий стеклянный, внутри посеребренный, шарик и наведши на него свет лампы или свечи, он получал небольшую сильно блестящую точку. Когда прут вибрировал, то эта точка описывала блестящую линию, которая и показывала характер вибраций. Вязальная игла, укрепленная в тисках и имеющая на верхнем конце сургучный шарик, вполне достаточна для этого опыта. В более полном инструменте, который Уитстон назвал к а л е й д о ф о н о м, вибрирующие прутья крепко ввинчены в массивную стойку. Посредством такого простого устройства получают чрезвычайно красивые фигуры, из которых некоторые я покажу вам в увеличенном виде на находящемся перед вами экране.

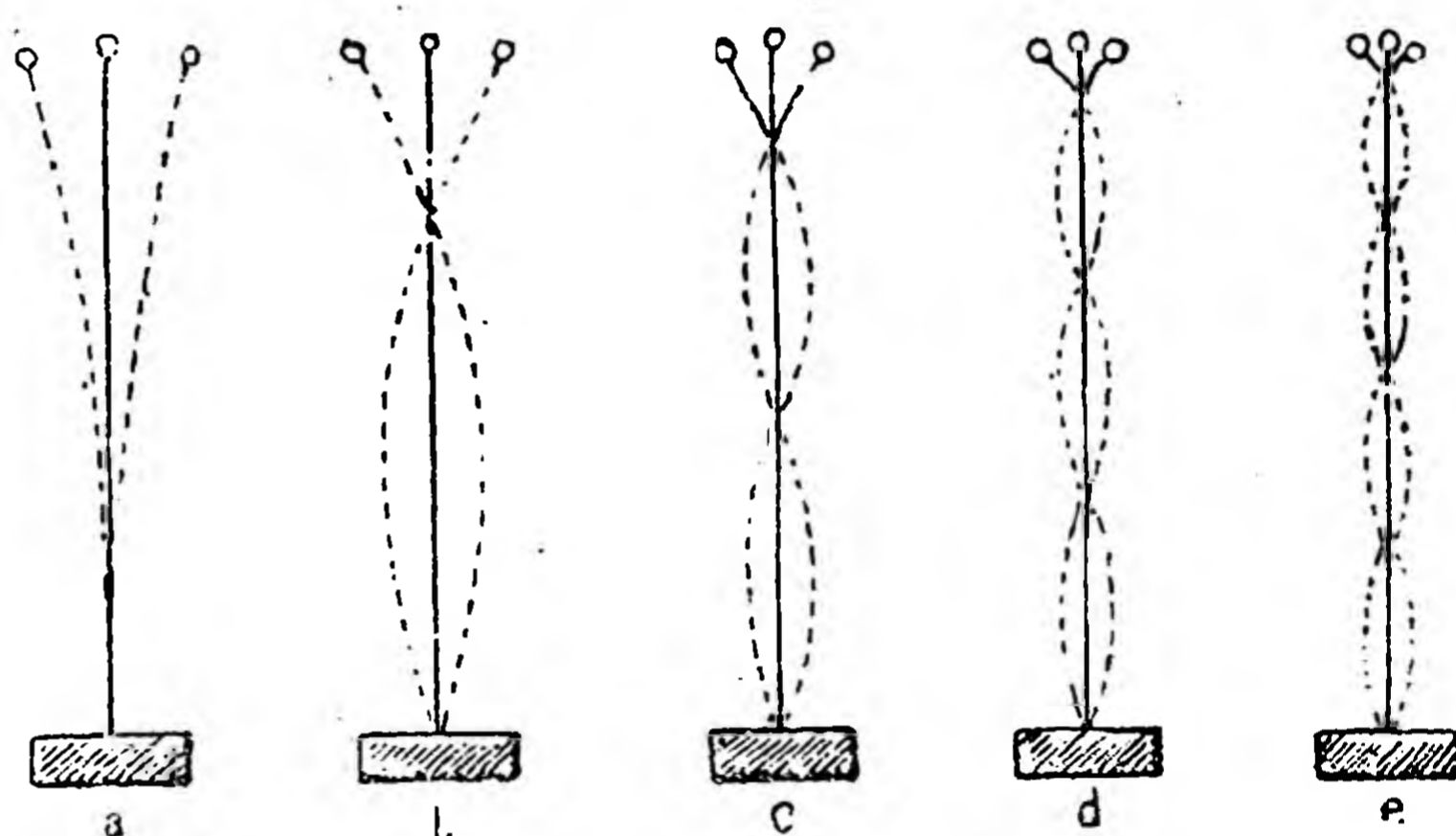
Укрепивши прут в тисках горизонтально, я навожу сосредоточенный луч электрической лампы на посеребренный шарик и, таким образом, получаю ослепительно блестящую точку. Помещая перед шариком чечевицу, я получаю на экране блестящее изображение точки и, потянув прут в сторону, вдруг пускаю его. Точка описывает светлую полосу, сначала прямую, которая переходит в эллипсис, потом в круг и затем снова обращается во второй эллипсис и в прямую линию. Это явление происходит оттого, что прут, укрепленный в тисках, вибрирует не только в том направлении, в котором он был оттянут, но также и под прямым углом к этому направлению. Кривая происходит от соединения двух перпендикулярных между собою вибраций¹⁾. Я теперь хочу показать вам, что в то время, как прут вибрирует как целое, он может быть также разделен на вибрирующие части. Проводя надлежащим образом по вязальной игле смычком, я получаю этот зубчатый круг (фиг. 56), так как несколько малых волнообразных движений ложится на большое. Кроме того, вы слышите музыкальный топ, кото-

¹⁾ Хладни также наблюдал это соединение вибраций и произвел ряд опытов, которые в их дальнейшем развитии привели к калейдофону. Соединение вибраций будет изучено несколько подробнее в следующей лекции.

рого вы не слышали, когда прут вибрировал как целое; его качания были слишком медленны, чтобы произвести такой тон. Вибрации, производящие эти извилины и соответствующие первому делению прута, совершаются с быстротою около $6\frac{1}{4}$ раз большею, чем вибрации прута, качающегося как целое. Я еще провожу смычком; тон повышается, извилины становятся ближе одна к другой, образуя на экране светлую волнистую линию, более тонкую и более красивую если хотите, чем была предыдущая (фиг. 57). Здесь мы имеем второе деление прута, извилины которого соответствуют скорости вибраций, превышающей в $17\frac{13}{36}$ скорость вибраций целого прута. Таким образом, каждое изменение в тоне прута сопровождается изменением фигур на экране.



Фиг. 56.



Фиг. 57.

Фиг. 58.

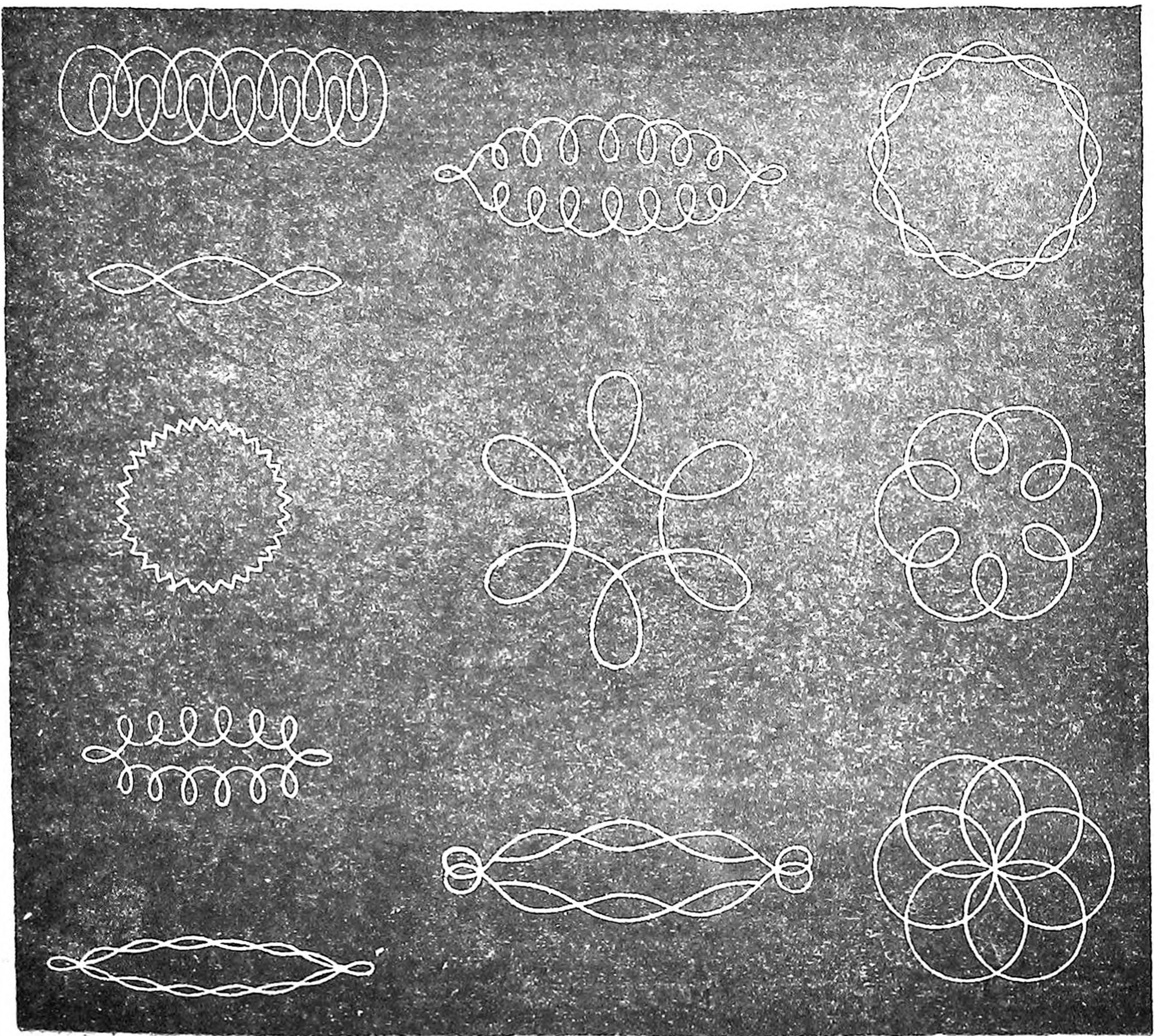
Число вибраций прута как целого относится к числу вибраций, соответствующему его первому делению, приблизительно как квадрат 2 к квадрату 5 или как 4 : 25. Поднимаясь вверх от первого деления, числа вибраций приблизительно пропорциональны квадратам ряда нечетных чисел 3, 5, 7, 9, 11 и т. д. Если принять, что число вибраций прута как целого есть 36, то вибрации, соответствующие этому и следующим делениям, выразились бы приблизительно следующим рядом чисел:

36, 225, 625, 1225, 2025 и пр.

На фиг. 58 показаны виды деления, соответствующие этому ряду чисел. Вы, конечно, заметили, что эти верхние тоны вибрирующего прута повышаются гораздо быстрее, чем верхние тоны струн.

Можно получить другие формы вибраций, если быстро ударять пальцем по пруту близ его укрепленного конца. Действительно, этим способом можно произвести почти бесконечное разнообразие блестящих колец, о красоте которых можно судить по приложенным фигурам, в первый раз полученным Уитстоном (фиг. 59). Они могут быть получены посредством освещения шарика солнечным светом или светом лампы и свечи. Кроме того, кольца можно удвоить, употребивши две свечи вместо одной. Тогда являются две светлые точки, из которых каждая описывает свою собственную блестящую линию, если игла приведена в вибрацию. Таким образом, Уитстон обратил калейдоскоп в фотометр ¹⁾.

¹⁾ Фотометр—прибор для сравнения силы света двух источников.



Фиг. 59.

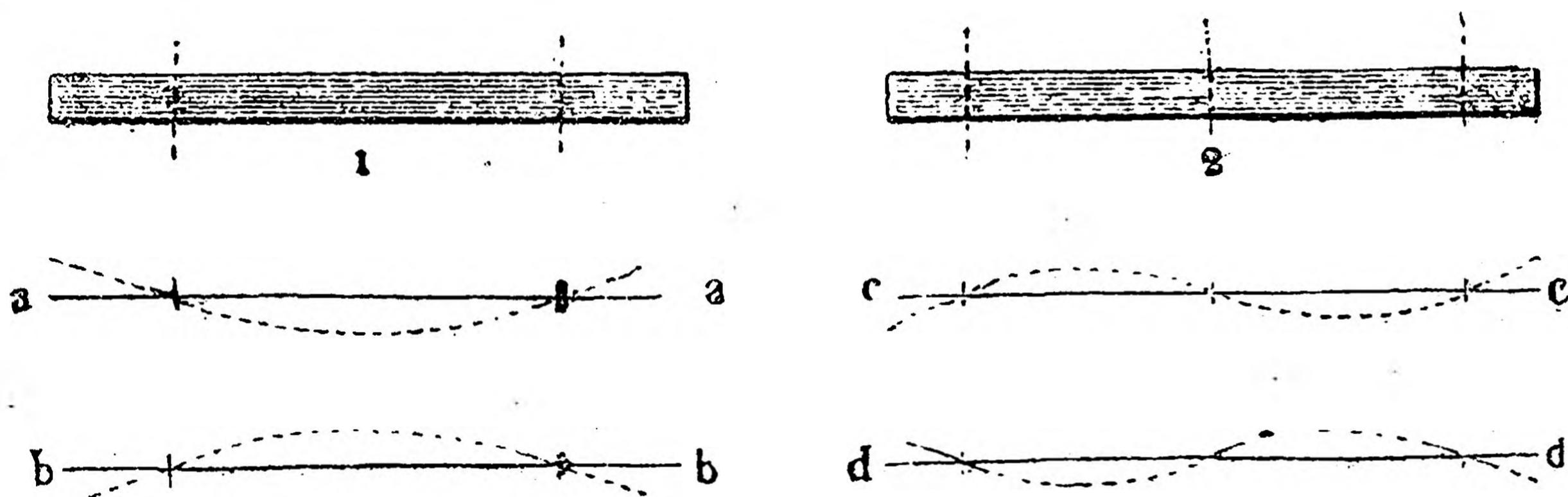
§ 4. Поперечные вибрации прута свободного на обоих концах Claque-bois и стеклянная гармоника.

От прута, укрепленного одним концом, мы перейдем теперь к прутьям свободным на обоих концах, потому что и такие прутья употребляются в музыке. Посредством метода, который будет описан впоследствии, Хладни, отец новой акустики, опытно определил виды вибраций, возможные в таких прутьях. Простейший возможный здесь вид деления происходит тогда, когда прут разделен двумя узлами на три вибрирующие части. Этот вид легко можно показать при помощи этой гибкой линейки в 180 см. длины. Если я буду держать ее в точках, отстоящих около 30 см. от обоих ее концов, указательным и большим пальцами моих рук и потом встряхну ее или заставлю кого-нибудь ударить по ее середине, то она вибрирует и ее средняя пучность образует тень веретенообразной формы, а оба конца образуют тень веерообразной формы. Тень линейки, падающая на экран, делает еще более очевидными ее вибрации. В этом случае расстояние каждого узла от конца линейки составляет около четверти расстояния между обоими узлами.

При втором виде вибраций прут или линейка разделяется на четыре вибрирующие части тремя узлами. На фиг. 60, в 1 и 2, показаны эти виды деления. Пунктирные линии на пруте 1 aa' и bb' показывают выгибы пучности вверх и вниз, когда происходит первое деление, между тем как cc' и dd' показывают вид вибраций, соответствующий второму делению. Самый низкий тон прута, свободного на обоих концах, выше самого низкого тона прута, укрепленного на одном конце в пропорции 4 : 25. Начиная с двух первых узлов, числа вибраций свободного прута увеличиваются с числом узлов в следующем отношении:

Числа узлов	2, 3, 4, 5, 6, 7.
Числа, квадратам которых приблизительно пропорционально число вибраций	3, 5, 7, 9, 11, 13.

Здесь также мы имеем столь же быстрое возвышение высоты тонов, как и в двух последних случаях.



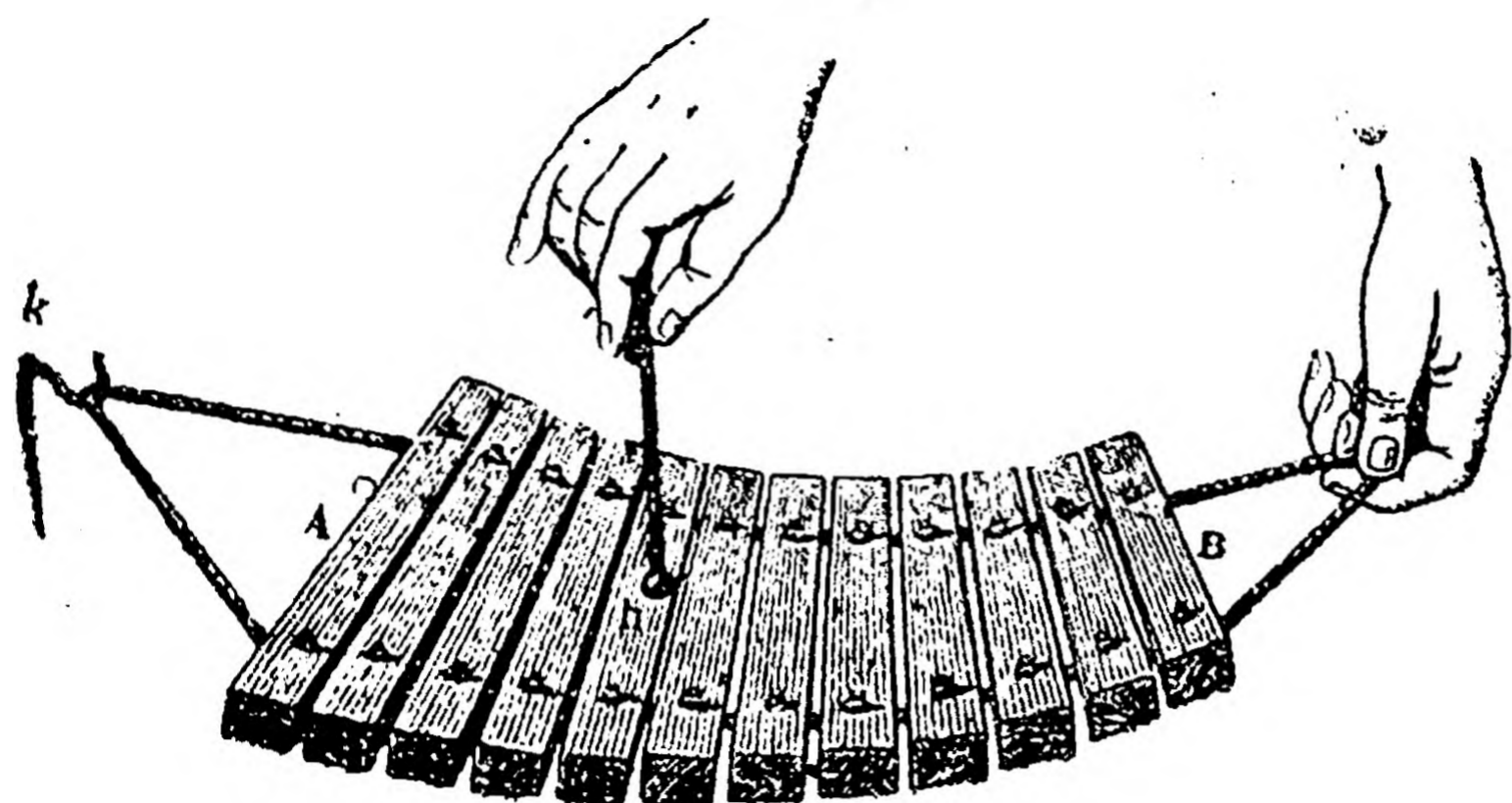
Фиг. 60.

Для музыкальных целей употребляется только первое деление свободного прута. Если деревянные палочки различной длины, ширины и толщины наизать на веревку, которая проходит через звуковые узлы, то получится французский музыкальный инструмент, *claque-bois*, который вы видите перед собою (фиг. 61). Если я, повесивши веревку с одной стороны на крючок, а с другой держа ее левой рукой, стану ударять молотком по палочкам, то этим произведу ряд приятных музыкальных тонов. Вместо того, чтобы наизывать палочки на веревку, можно их класть на скрученные пучки соломы, почему этот инструмент и называется иногда соломенной скрипкой. Хладни говорит, что этот инструмент был употреблен вместо игры на колокольчиках в опере Моцарта «Волшебная флейта». Если вместо деревянных палочек употреблять полоски стекла, то получится стеклянная гармоника.

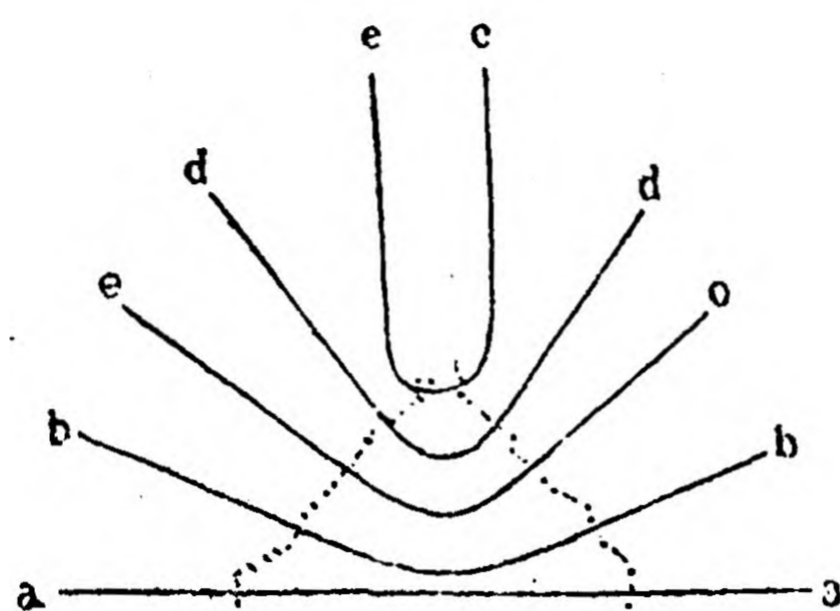
§ 5. Вибрации камертона.

От вибраций прута, свободного на обоих концах, мы можем легко перейти к вибрациям камертона, как они анализированы Хладни. Предположим, что aa (фиг. 62) представляет прямой стальной прут с узло-

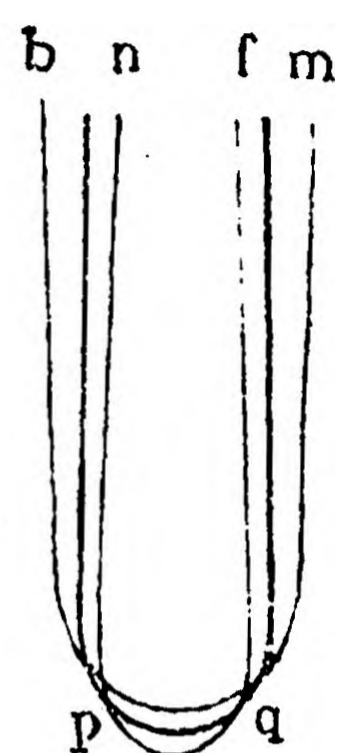
выми точками, которые обозначены отвесными пунктирными черточками. Затем согнем этот прут так, чтобы он принял форму *bb*; узловые точки сохраняются, но только они станут несколько ближе одна к другой. Тон изогнутого прута также несколько ниже, чем тон прямого. Проходя через различные степени сгибания, *cc*, *dd*, мы, наконец, пре-



Фиг. 61.



Фиг. 62.



Фиг. 63.

вратим прут в камертон *ee* с параллельными ножками; он также сохраняет свои две узловые точки, которые, однакоже, стали гораздо ближе друг к другу, чем были тогда, когда прут был прямым. Когда такой камертон издает свой самый низкий тон, то его свободные концы качаются, как показано на фиг. 63, где ножки его вибрируют между границами *bn* и *fm* и где *pq* суть узлы. В камертоне нет деления, которое соответствовало бы делению прямого прута тремя узлами. При втором виде деления, который соответствует первому верхнему тону камертона, мы имеем узел на каждой ножке и два узла на сгибе. Закон Юнга, изложенный выше, применяется и к камертонам. Если вы желаете получить основной тон без верхних тонов, то проводите смычком по камертону в том месте, где образуется узел, нужный для них. При третьем виде деления находятся два узла на каждой ножке камертона и один на сгибе, при четвертом делении находятся два узла на каждой ножке и два на сгибе, а при пятом—три узла на каждой ножке и один на сгибе. Первый верхний тон камертона требует, по Хладни, в $6\frac{1}{4}$ раз большего числа вибраций против основного тона. Верхние тоны камертонов легко получить. Вот, напр., наш прежний ряд камертонов, вибрирующих соответственно 256, 320, 384 и 512 раз в секунду. Я перехожу в каждом из них от основного тона к первому верхнему тону; вы замечаете, что интервал между ними гораздо больше, чем между основным тоном и первым верхним тоном натянутой струны. От чисел, приведенных выше, мы вдруг получаем соответственно 1600, 2000, 2400 и 3200 вибраций в секунду. Однако, хотя числа Хладни приблизительно верны, но они не всегда строго подтверждаются опытом. Напр., два камертона могут иметь основные тоны, составляющие между собою унисон, между тем как их верхние тоны разнятся между собою. Вы имеете перед собою два таких камертона. Я произвожу основные тоны обоих; унисон оказывается совершенным. Затем я произвожу первые верхние тоны обоих; вы слышите быстрые биения, которые неприятно

поражают слух. Прилепивши к одному из камертонов кусочек воска, я приведу в унисон оба тона; но зато теперь основные тоны производят биения, когда звучат вместе. Этого не могло бы быть, если бы первый верхний тон каждого камертона производился числом вибраций, ровно в $6\frac{1}{4}$ раз превосходящим число вибраций их основных тонов. В ряде камертонов, исследованных Гельмгольцем, число вибраций первого верхнего тона было в 5,8 до 6,6 больше вибраций основного тона. Если начать с первого верхнего тона, то числа вибраций последовательного ряда верхних тонов относятся между собою как квадраты чисел 3, 5, 7, 9 и т. д. Т.-е. в то время как первый верхний тон производит 9 вибраций, второй производит их 25, третий—49, четвертый—81 и т. д. Таким образом, верхние тоны камертона повышаются гораздо быстрее, чем верхние тоны струны. Они также и исчезают гораздо скорее, и поэтому своею примесью меньше портят основной тон.

§ 6. Хладниевы фигуры.

Изобретенный Хладни способ делать видимыми звуковые вибрации имел громадную важность для акустики. Лихтенберг сделал опыт, состоявший в том, что посыпался наэлектризованный порошок на наэлектризованном смоляном круге; распределение порошка показывало электрическое свойство поверхности. Этот опыт подал Хладни мысль делать видимыми звуковые вибрации при помощи песка, посыпанного по поверхности вибрирующего тела. Рассказ Хладни об этом открытии так интересен, что его стоит привести здесь.

«Довольно поздно, именно только на 19 году, я начал несколько учиться игре на фортепиано, и потом читал различные сочинения о музыкальном искусстве, при чем я нашел, что физически математические основания его были обработаны гораздо недостаточнее, чем другие отрасли естествознания, поэтому я думал, что здесь всего более можно было сделать открытий. При некоторых опытах, которые я производил над известными вибрациями струн и над определенными Даниилом Бернулли и Л. Эйлером вибрациями прута, опыт вполне согласовался с теорией: относительно многих звучащих тел опыт не подтвердил того, что об них сказано в теории, а о роде вибраций и звуковых состояниях различного рода звучащих тел я нигде не мог найти сведений. Между прочим я заметил, что каждая не очень малая стеклянная или металлическая пластинка издает разнообразные тоны, если я касаюсь ее и ударяю ее в различных местах, и я желал узнать причину этого еще никем неисследованного различия тонов. Я укрепил в тиски медный кружок, принадлежащий к шлифовальной машине находившейся в середине его осью и заметил, что, проводя по нем смычком, можно произвести различные тоны, которые бывают сильнее и продолжительнее, чем получаемые посредством ударения. Что не только струны, но и другие упругие тела можно заставить издавать звуки, проводя по ним смычком,—это вовсе не мое открытие, так как железная скрипка существует уже давно, и я читал известия об устроенном в Италии аббатом Маццоки инструменте,

в котором по колоколам проводили одним или несколькими смычками; но мне первому пришла мысль применить смычок к исследованию звучащих тел. Наблюдения Лихтенберга над фигурами, которые появлялись при посыпании смоляным порошком стеклянных или смоляных пластинок с различными электричествами (в Мемуарах геттингенского ученого общества), над чем я производил различные опыты, подали мне мысль,



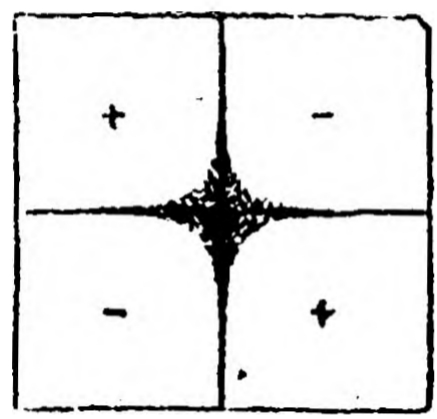
Хладни.

что, может быть, разнообразные виды вибраций кружка также обнаружатся различными фигурами, если я посыплю его песком или чем-нибудь подобным. При этих опытах появились на упомянутом уже кружке звездовидные фигуры; затем одни наблюдения следовали за другими, из которых многие как о вибрациях пластинок, так и о других акустических предметах описаны мною в сочинении: «Entdeckungen über die Theorie des Klanges» (Лейпциг, 1787, 4) ¹⁾.

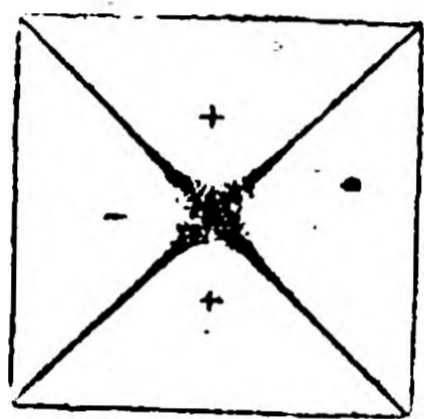
¹⁾ Хладни. Akustik, Предисловие, с. XVI.

§ 7. Вибрации квадратных пластинок; узловые линии.

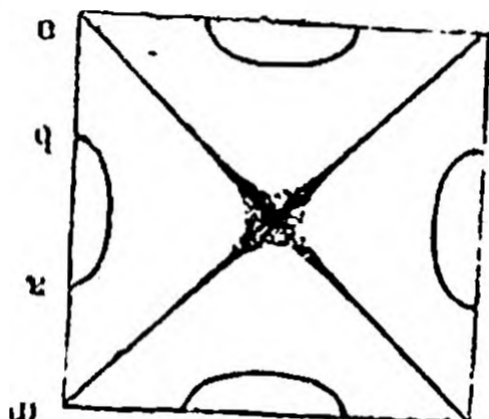
Я теперь хочу показать опыты Хладни, начав с квадратной стеклянной пластинки, укрепленной посредине в надлежащие тиски. Я мог бы держать пластинку указательным и большим пальцами, если бы только они могли доставать до середины. Посыпав пластинку сверху мелким песком, я касаюсь погтем точки, лежащей посредине одного из ее краев, и провожу смычком по краю пластинки ближе к одному из ее углов. Песок соскакивает с известных частей поверхности и собирается по длине двух узловых линий, которые разделяют большой квадрат на четыре меньшие (фиг. 64). Это деление пластинки соответствует самому низшему тону ее.



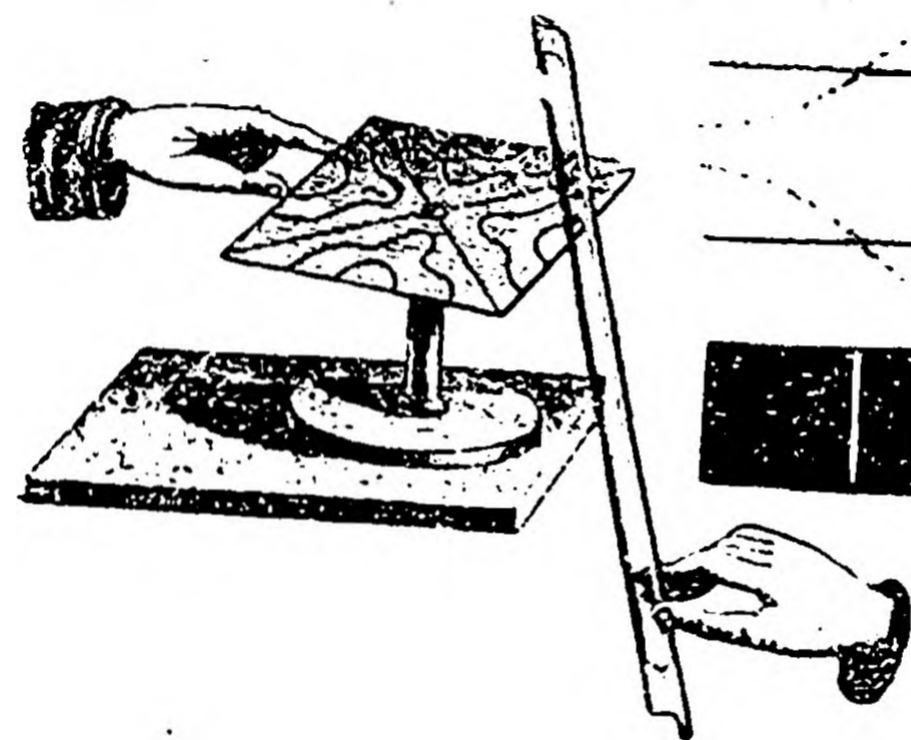
Фиг. 64.



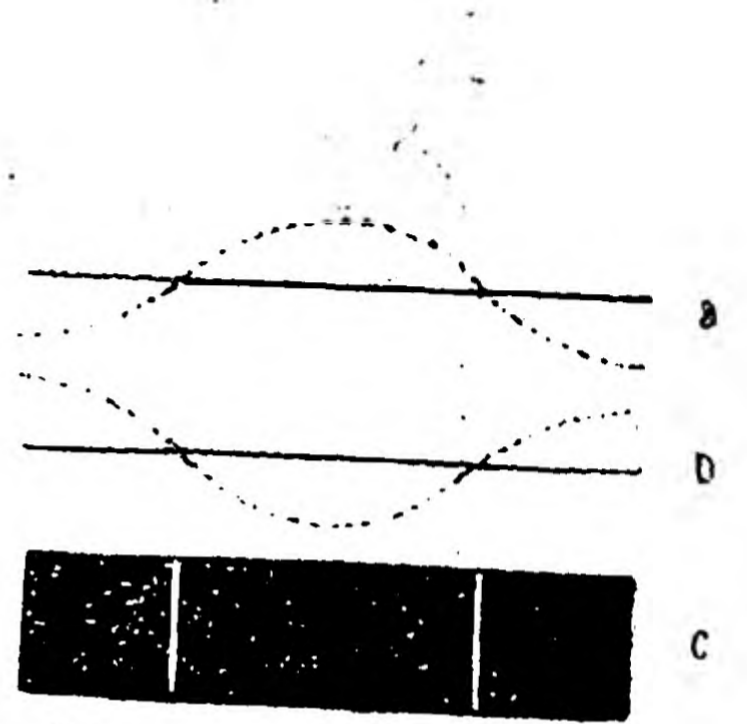
Фиг. 65.



Фиг. 66.



Фиг. 67.

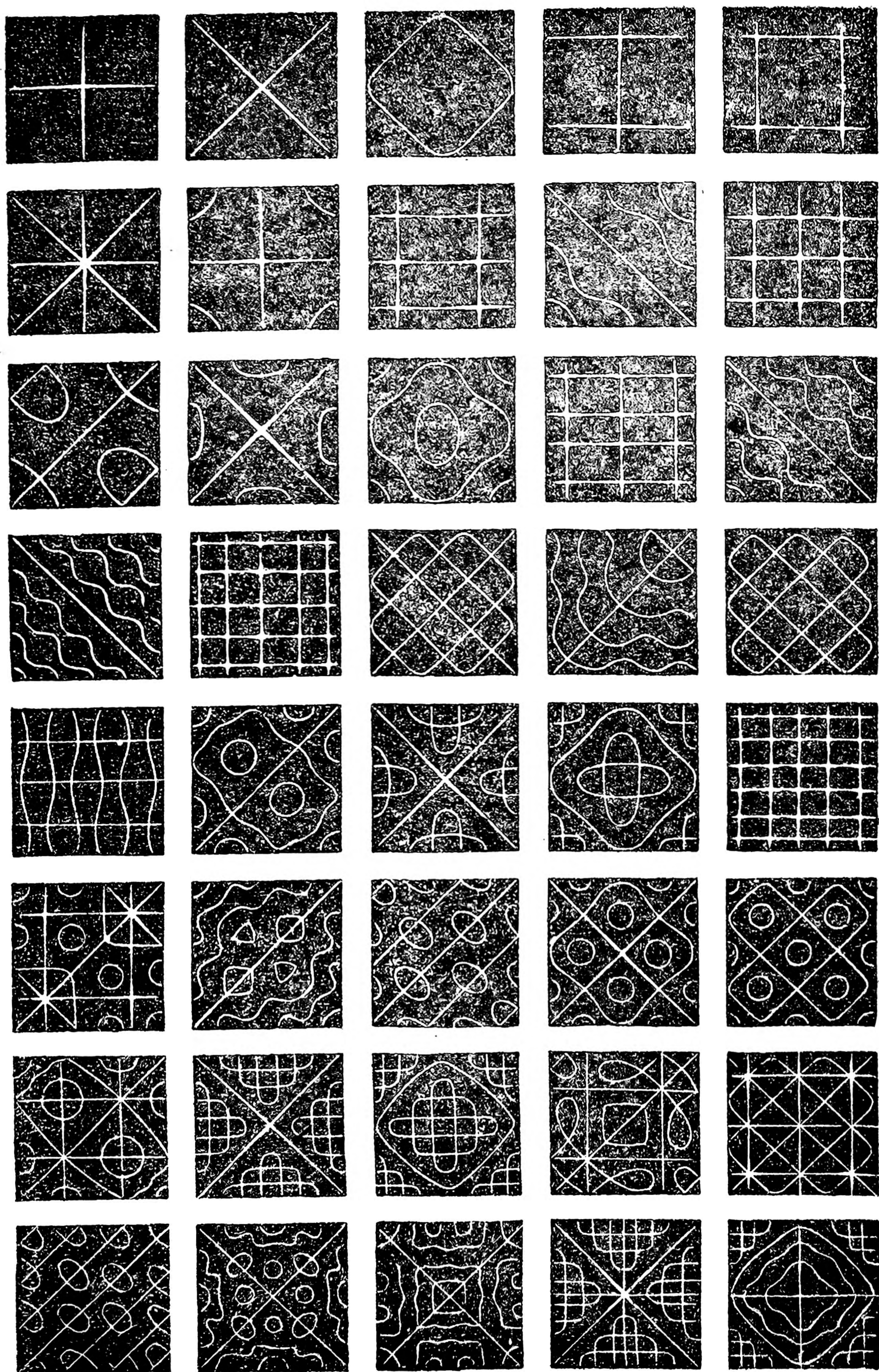


Фиг. 69.

Употребленные здесь знаки + и — обозначают, что два квадрата, на которых они стоят, движутся в противоположных направлениях. Когда квадраты, обозначенные +, находятся выше среднего уровня пластинки, тогда квадраты, обозначенные —, находятся ниже его; и когда обозначенные — находятся выше среднего уровня, тогда обозначенные + находятся ниже его. Узловые линии обозначают границы этих противоположных движений. Они суть места перехода от одного движения к другому и поэтому не участвуют ни в одном из них.

Посыпав еще раз песком поверхность пластинки, я касаюсь одного из ее углов и провожу смычком по середине одного из ее краев. Песок танцует по поверхности и, наконец, распределяется в две резко обозначенные полосы, проходящие по ее диагоналям (фиг. 65). Издаваемый при этом пластинкой тон составляет квинту прежнего ее тона. Затем, касаясь точек *a* и *b* (фиг. 66) и проводя смычком по середине противоположной стороны пластинки, мы получаем еще более высокий тон, чем в первых двух случаях, и вид вибраций пластинки, производящих этот тон, представлен на фигуре.

Я употреблял стеклянные пластинки, поддерживаемые тисками в середине их. Металлические пластинки также годятся для этих опытов. Фиг. 67 представляет медную квадратную пластинку в 30 см., поддерживаемую надлежащей подставкой. Касаясь указательным и большим пальцами моей левой руки двух точек по ее краю и проводя смычком по вибрирующей части на противоположном крае, я получаю эту сложную фигуру.



Фиг. 68.

Фиг. 68 представляет ряд красивых фигур, полученных Хладш прикосновением и возбуждением смычком квадратных пластинок различными способами. Не только интересно, но даже поразительно видеть, как быстро образуются резко очерченные фигуры от движения смычка некусного экспериментатора.

§ 8. Уитстонв анализ вибраций квадратных пластинок.

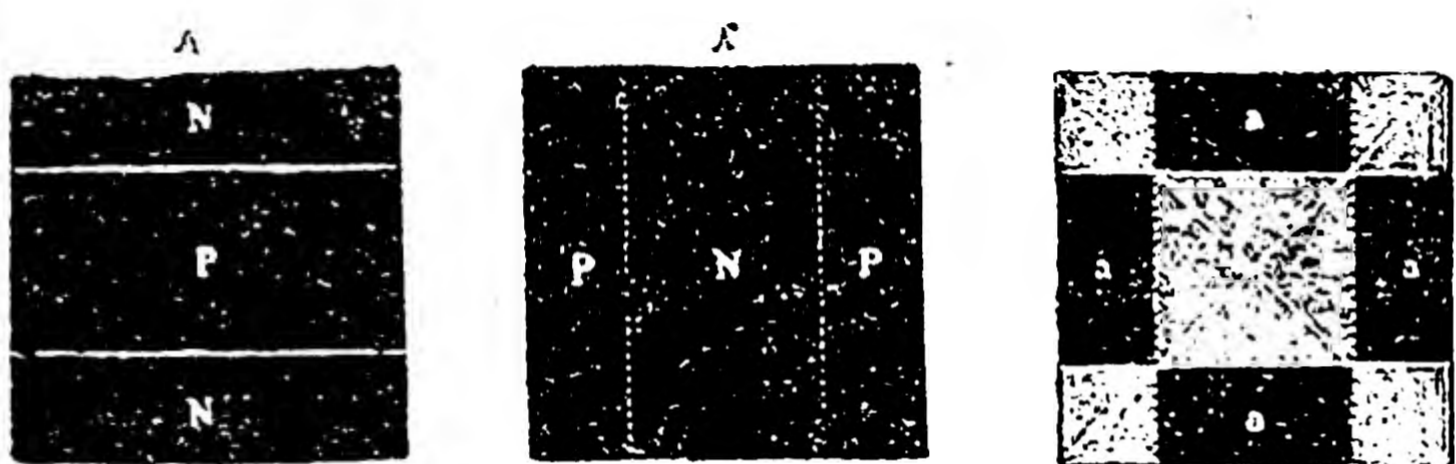
Теперь рассмотрим ближе механизм этих вибраций. Вы знаете, каким образом разделяется прут свободный на обоих концах, когда он вибрирует поперечно. Прямоугольный кусок стекла или металлической жести, напр., стеклянные полоски гармоники, следуют законам прутьев или брусков, вибрирующих своими свободными концами. На фиг. 69 представлен четырехугольник *a* с обозначенными на нем узлами, соответствующими его первому делению, а под ним находится фигура, показывающая, каким образом прямоугольник, если смотреть на него со стороны, изгибается вверх и вниз, когда он вибрирует ¹⁾). Для ясности, изгибания представлены преувеличенно. Фигуры *b* и *c* показывают, что вибрирующие части пластинки попеременно то поднимаются выше, то опускаются ниже среднего уровня пластинки. В один момент, напр., центр пластинки находится выше уровня, а концы ее ниже его, как показано в *b*; между тем как в следующий момент центр находится ниже уровня, а оба конца выше его, как в *c*. Вибрации пластинки и состоят в том, что она быстро и последовательно принимает эти два положения. Подобные замечания применяются ко всем другим видам деления.

Теперь предположите, что прямоугольник постепенно расширяется, так что наконец становится квадратом. В этом случае нет никакого основания, почему бы узловые линии стали параллельны к одной паре сторон скорее, чем к другой. Мы теперь и рассмотрим, какое действие может произвести соединение двух таких систем вибраций.

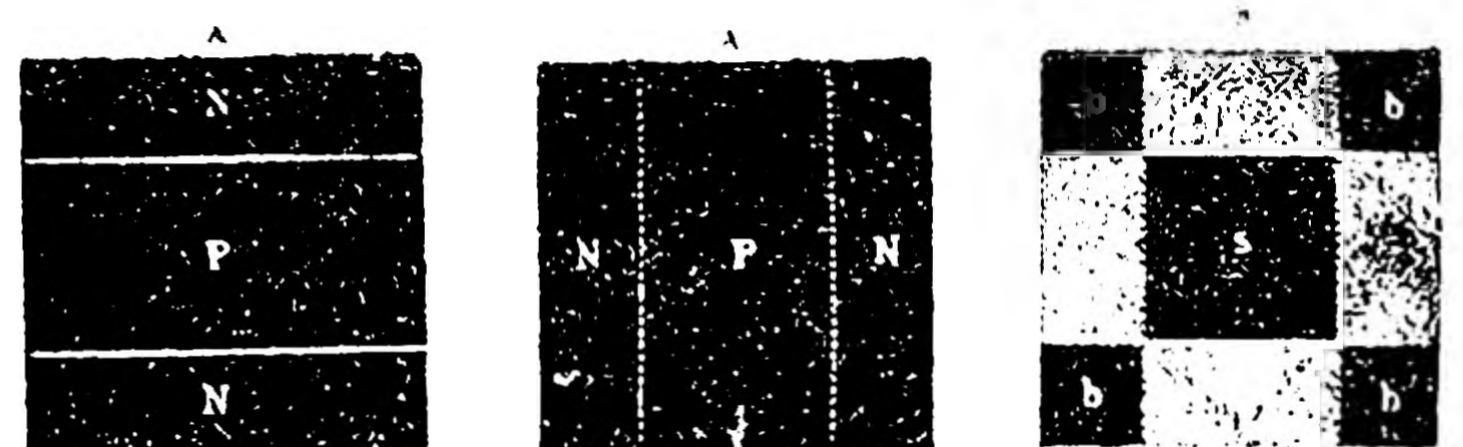
Для ясности представления вообразите себе две квадратные стеклянные пластинки и проведите на каждой из них узловые линии, принадлежащие четырехугольнику. Проведите на одной пластинке белые линии, а на другой—черные; это поможет вам представлять пластинки так ясно, как будто бы вы видели их. Теперь положите один квадрат на другой так, чтобы их узловые линии совпадали, и представьте совершенно ясно, что обе пластинки вибрируют. Предположим прежде всего, что вибрации обеих пластинок согласны между собою, что средняя часть и конечные части обеих поднимаются и опускаются в одно время и что вибрации одной пластинки передаются другой. Каков будет результат этого? Очевидно, тот, что вибрации пластинки, получившей такое приращение, будут иметь амплитуду вдвое большую. Но предположим, что вибрации двух пластинок, вместо того, чтобы быть согласными, прямо противоположны одна другой, что когда средняя часть одной поднимается, тогда средняя часть другой опускается: что произойдет, когда они соединятся? Очевидно, нейтрализация всех вибраций.

¹⁾ Я занимаюсь эту фигуру из мемуара Уитстона; но узлы однако должны были бы быть ближе к концам, и свободные концы пунктирных линий не должны быть загнутыми вверх или вниз. На обеих следующих фигурах узловые линии также нарисованы слишком далеко от концов пластинок.

Вместо того, чтобы помещать пластинки таким образом, чтобы их узловые линии совпадали между собою, мы расположим их так, чтобы эти линии были под прямым углом одни к другим, т.-е. наложим A на A' (фиг. 70). В этих фигурах P означает положительное движение, т.-е. что та часть пластинки, на которой оно стоит, имеет движение вверх; между тем как N означает отрицательное движение, т.-е. что место, на котором оно стоит, движется вниз. Затем вы имеете род узора, который представлен на третьем квадрате и который состоит из квадрата s , находящегося посредине, из меньших квадратов b , находящихся на каждом углу, и четырех прямоугольников, находящихся на средних частях четырех сторон. Заставим пластинки вибрировать и пусть вибрации их соответствующих частей будут согласны между собою, как указывается буквами P и N , и затем предположим, что вибрации одной из них передаются другой. Что тогда произойдет? Одна минута размыш-



Фиг. 70.



Фиг. 71.

ления покажет вам, что большой средний квадрат будет вибрировать с силой вдвое большею, чем прежде; то же самое будет и с четырьмя меньшими квадратами по четырем углам; но вы тотчас же сообразите, что вибрации в четырех прямоугольниках противоположны между собою, и что там, где их амплитуды равны, они должны взаимно уничтожаться. Таким образом средняя точка каждой стороны стеклянной пластинки находится в покое; точки, в которых узловые линии обеих пластинок пересекаются, также находятся в покое. Проведите линию через каждую из этих точек, и вы получите второй квадрат, вписанный в первом. Стороны этого квадрата суть линии, не имеющие движения.

До сих пор это были только теоретические соображения; но теперь я ущемляю квадратную стеклянную пластинку в точке, лежащей посредине одного из ее краев, и, проводя смычком по близлежащему углу пластинки, получаю, если стекло однородно, фигуру очень похожую на этот вписанный квадрат. Причина та, что если пластинка движется таким образом, то два ряда вибраций, теоретически представляемых нами, действительно существуют вместе в пластинке и своим соединением производят представленную в B фигуру.

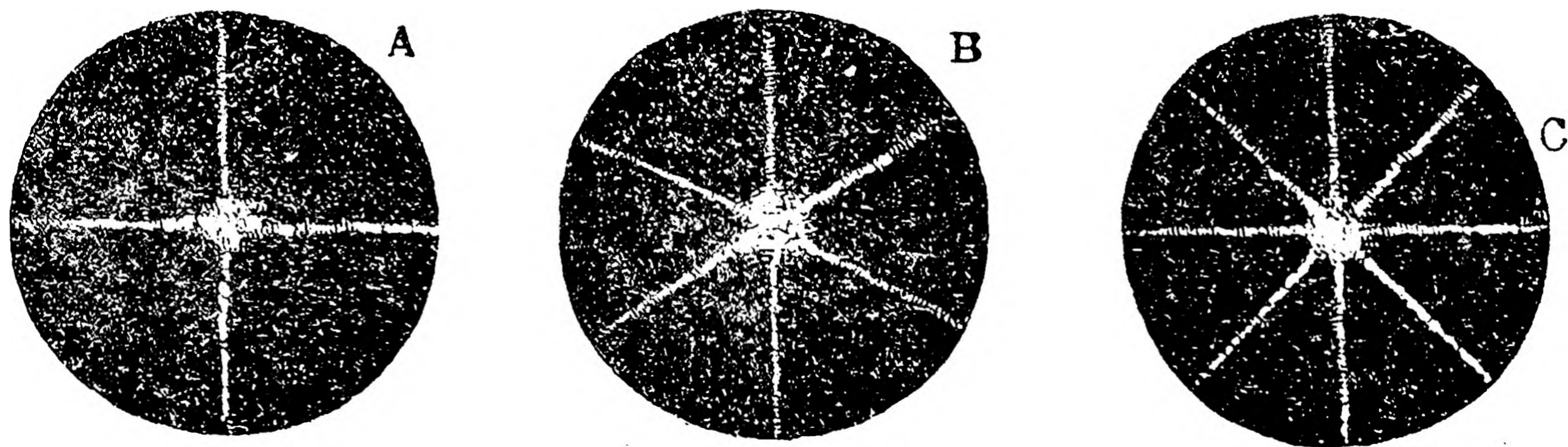
Наложим еще стеклянные пластинки одна на другую, как было в последнем случае; но предположим, что их вибрации несогласны между собою, а что их соответствующие части движутся противоположным образом, т.-е. наложим A на A' (фиг. 71). Очевидно, что при соединении вибраций средняя точка нашего среднего квадрата должна быть точкою покоя, потому что в ней вибрации равны и противоположны. Пересечения узловых линий тоже суть точки покоя так же, как и каждый

угол самой пластинки, потому что и здесь соединяющиеся вибрации равны и противоположны. Мы имеем, таким образом, четыре точки покоя на каждой диагонали квадрата. Проведите диагонали и они будут представлять узловые линии, происходящие от соединения двух рядов вибраций.

Эти две системы действительно существуют вместе в одной пластинке, если ущемить ее центр, коснуться одного из ее углов и в это время провести смычком по середине одной из ее сторон. В этом случае песок, обозначающий линии покоя, располагается по диагоналям. В этих объяснениях я старался представить вам в возможно простейшей форме образчик Уитстоновского анализа этих наложенных один на другие вибраций.

§ 9. Вибрации круглых пластинок.

Перейдя от квадратных пластинок к круглым, мы и здесь получим различные красивые явления. Вот, напр., медный кружок, укрепленный горизонтально на вертикальной стойке. Кружок черен, и я насыпаю его мелким белым песком. Он может разделяться различным образом и издавать тоны различной высоты. Прежде всего я хочу получить самый низкий основной тон кружка; этого я достигаю, касаясь его края в какой-нибудь точке и проводя смычком по краю в точке, отстоящей от первой на 45° . Вы слышите тон и видите песок. Он соскакивает с квадратов круга и располагается на двух его диаметрах (фиг. 72 А). Когда диск разделен таким образом на четыре вибрирующие части, то он издает свой самый низкий тон. Затем я останавливаю вибрации, счищаю кружок и снова насыпаю его песком. Когда я коснусь его края в известной точке и проведу смычком в другой точке, отстоящей от этой на 30° , то песок немедленно располагается в форме звезды. Здесь мы имеем шесть вибрирующих сегментов, отделенных один от



Фиг. 72.

другого узловыми линиями (фиг. 72 В). Затем я еще касаюсь какой-нибудь точки и провожу смычком в точке, лежащей ближе к ней, чем было в предыдущем случае; кружок разделяется на 8 вибрирующих сегментов с линиями песка между ними (фиг. 72 С). Этим путем я могу продолжать делить кружок на 10, 12, 14, 16 секторов, и число их есть всегда четное число. По мере того как деления становятся

мельче, вибрации совершаются быстрее, и тон следовательно становится выше. Тон, проходящий при 16 сегментах, на которые разделяется кружок, так резок, что его почти больно слушать. Это было первое открытие Хладни. Вы можете понять его волнение, когда он увидел это чудесное действие, «которого до тех пор не видал никто из смертных!» Оставляя свободным центр кружка и касаясь надлежащих точек его поверхности, можно получить узловые круги и другие кривые линии.

Скорость вибраций кружка прямо пропорциональна его толщине и обратно пропорциональна квадрату его диаметра. Я имею здесь три кружка; два из них одинакового диаметра, но один вдвое толще, чем другой, и два из них одинаковой толщины, но один вдвое больше диаметром, чем другой. Согласно только что указанному закону, быстрота вибраций этих трех кружков выражается числами 1, 2, 4. Я заставляю их издавать тоны один после другого, и те из слушателей, которые имеют музыкальное ухо, действительно подтвердят, что эти тоны относятся между собою как основной тон к первой и второй октаве.

§ 10. Опыты Стрелке и Фарадея; перенос легких порошков.

Что песок действительно движется к узловым линиям, это можно видеть, если смешать песок с каким-нибудь полужидким веществом. Вот несколько образчиков, для произведения которых песок был смешан с гуммиарабиком, который замедляет движение его частичек. Отдельные кривые линии, описываемые ими, весьма ясно обнаруживаются на пластинках. Стрелке рисовал эти фигуры, и у него я заметывал рисунки, представленные на фиг. 73, А, В, С.



Фиг. 73.

Фиг. 74.

Фиг. 75.

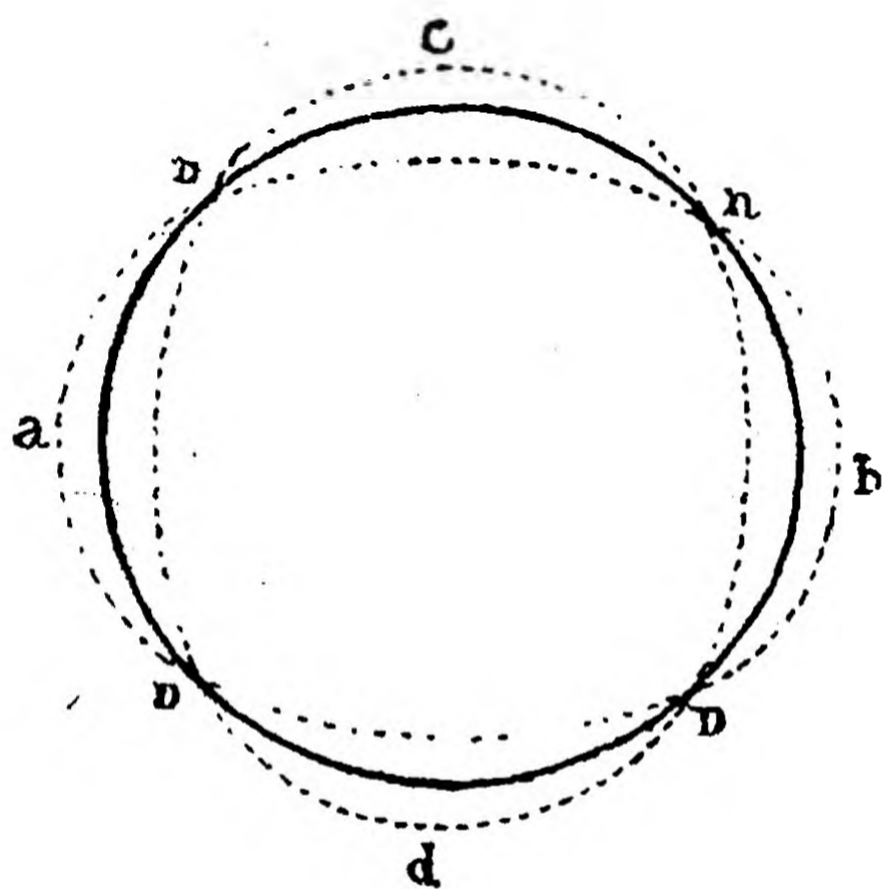
Фиг. 76.

Здесь следует упомянуть о явлении при вибрирующих пластинках, которое долгое время затрудняло экспериментаторов. С песком, рассыпанным по этой пластинке, смешан тонкий порошок; для того, чтобы явление было для вас заметнее, я нарочно смешал с песком тонкий порошок ликоподия. Это легкое вещество, вместо того, чтобы собираться вдоль узловых линий, образует маленькие кучки на местах наиболее сильного движения. Вы видите эти кучки на углах пластинки (фиг. 74), на четырех сторонах ее (фиг. 75) и между ее узловыми линиями (фиг. 76). Эти три фигуры представляют три рода вибраций, разъясненные выше на фиг. 64, 65 и 66. Во всех случаях порошок выбирает места наибольшего движения. Были представлены различные объяснения

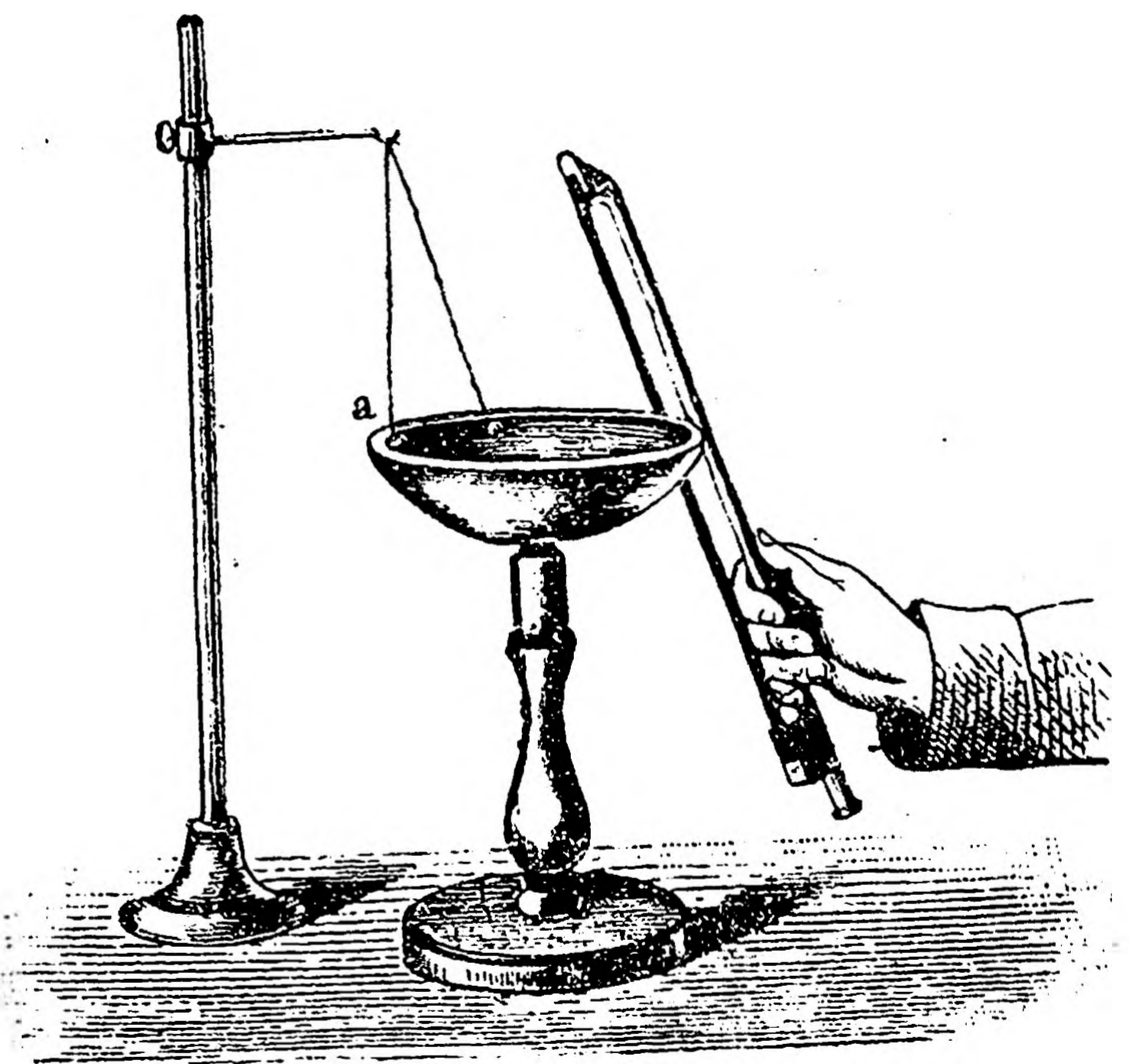
этого явления, но только Фаредею удалось показать причину его, чрезвычайно простую. Легкий порошок увлекается маленькими воздушными вихрями, которые производятся вибрациями пластинки; он не может противиться этим маленьким циклонам, тогда как более тяжелые песчаные частички свободно проходят через них. Таким образом, когда движение прекращается, легкий порошок оседает кучками на местах наибольшего движения. В безвоздушном пространстве этого явления не бывает; здесь все частички, и легкие и тяжелые, движутся к узловым линиям.

§ 11. Вибрации колоколов; способ сделать их видимыми.

Вибрирующие части и узлы колокола бывают такие же, как и на кружках. Когда колокол издает свой самый низкий тон, то соединение его пульсаций заставляет его разделяться на четыре вибрирующие сегмента, разделенные между собою четырьмя узловыми линиями, которые



Фиг. 77.



Фиг. 78.

идут от краев к голове колокола. Место, в которое ударяет язык, всегда находится посредине вибрирующего сегмента; точка, диаметрально противоположная этому месту, есть также середина такого сегмента. На 90° от этих точек мы также имеем вибрирующие сегменты, между тем как на 45° вправо и влево от них мы встречаем узловые линии. Если мы предположим, что сплошной черный круг (фиг. 77) представляет окружность колокола в состоянии покоя, то когда язык ударяет в одну какую-нибудь из частей, *a*, *c*, *b*, *d*, край колокола периодически представляет изменения, обозначенные пунктирными линиями. В один момент он есть овал, длинный диаметр которого находится в *ab*, между тем как в следующий момент он представляет овал с длинным диаметром в *cd*. Переходы одного овала в другой действительно и составляют вибрации ко-

колокола. Четыре точки, n, n, n, n , в которых пересекаются овалы, составляют узлы. Так же, как и в кружках, число вибраций, совершаемых колоколом в данное время, прямо пропорционально толщине и обратно пропорционально квадрату диаметра колокола.

Также, подобно кружку, колокол может делиться на какое угодно число вибрирующих сегментов, но всегда четное. Касаясь последовательно различных точек, можно заставить колокол разделиться на 6, 8, 10 и 12 вибрирующих частей. Начиная основным тоном, числа вибраций, соответствующих различным делениям колокола и кружка, идут в таком порядке:

Числа делений	4, 6, 8, 10, 12
Числа, квадраты которых выражают быстроту вибраций	2, 3, 4, 5, 6

Если, таким образом, число вибраций основного тона 40, то число их при следующем высшем тоне будет 90, далее 160, потом 250, 360 и т. д. Если колокольчик тонок, то стремление его к разделению так велико, что почти невозможно получить из него чистый основной тон без примеси верхних тонов.

Я хочу теперь показать вам опыт весьма простой, но поучительный. Эта обыкновенная кружка, когда я проведу смычком по ее краю, разделяется на четыре вибрирующие сегмента совершенно так, как колокол. Кружка эта с ручкой, и я хочу показать вам влияние этой ручки на тон. Я провожу смычком по краю в точке, диаметрально противоположной ручке. Затем я делаю то же в точке, отстоящей на 90° от ручки; в обоих этих случаях высота тона одинакова. В обоих случаях ручка занимала средину вибрирующего сегмента, давя на него своею тяжестью. Но теперь я провожу смычком на угловом расстоянии в 45° от ручки; тон, происходящий теперь, значительно выше, чем был прежний. Ручка в последнем опыте занимает узел; она не давит на вибрирующий сегмент, и потому уругая сила, преодолевая меньшую тяжесть, производит более быстрые вибрации. Опыт, производимый нами с кружкой, Хладни производил с чайной чашкой. Колокола часто бывают неодинаковой толщины на краях, что равносильно отсутствию симметрии в нашей кружке; и мы впоследствии узнаем, что перемежающийся звук многих колоколов происходит от соединения двух различной быстроты вибраций, производимых этим отсутствием однородности.

В звучащем колоколе нет точек абсолютного покоя, потому что узлы верхних тонов не совпадают по положению с узлами основного тона. Но что различные части края колокола, когда основным тон преобладает, вибрируют с весьма различными степенями напряженности, — это легко показать. Если мы повесим маленький шарик из сургуча a (фиг. 78) на нитке так, чтобы он едва прикасался к внутренней поверхности этого опрокинутого колокола, то он отпрыгивает туда и сюда, когда колокол звучит. Но скачки сургучного шарика бывают гораздо сильнее, когда он висит против вибрирующих сегментов, чем когда он висит против узлов. Держа костяной шар короткого маятника сначала

подле вибрирующего сегмента, а потом подле узла большого вестминстерского колокола, я нашел, что в первом положении он отскакивает на $12\frac{1}{2}$ см., между тем как в последнем только на 7 см., когда молот ударяет в колокол.

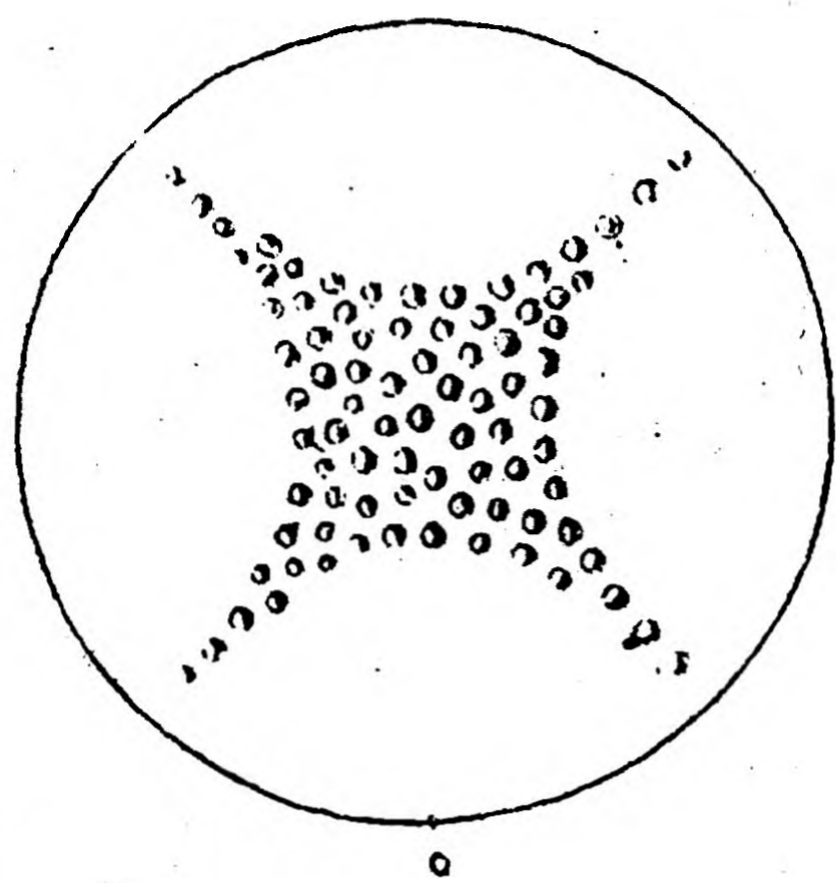
Если бы можно было опрокинуть большой вестминстерский колокол и наполнить его водою, то при ударе в него его вибрации обнаружались бы красивою зыбью на поверхности жидкости. Подобная же зыбь может быть получена и с небольшими колокольчиками, или даже произведена пальцем в рюмке, но она была бы слишком мала для моей настоящей цели. Я имею здесь большой полусферический стакан, который издает полный низкий тон. Я наполняю его водою и провожу смычком по его краю; зыбь немедленно покрывает его поверхность. Если я проведу смычком сильно, то вы увидите, что вода отскакивает от четырех вибрирующих сегментов в виде дождя из жидких шариков. Я постараюсь показать вам эту звуковую зыбь. Большой пучок света от электрической лампы, падающий на спокойную поверхность воды, отражается под подлежащим углом; на пути отраженного луча я помещаю эту большую чечевицу, которая отбрасывает на экран великолепное изображение поверхности воды. Я теперь провожу слабо смычком по краю этого стакана, или тихо тру его пальцем; вы слышите низкий тон и в то же время замечаете, как появляется зыбь, эта видимая музыка, на четырех секторах жидкой поверхности.

Вы знаете опыт Лейденфроста, которым показывается сфероидальное состояние воды. Вы знаете, что если влить воду в раскаленный докрасна серебряный сосуд, то она не вдруг обращается в пар, но несколько времени качается на своем собственном паре. Подобный же эффект получится, если мы капнем летучей жидкости, напр., эфира, на поверхность теплой воды. Капля удерживает свою сфероидальную форму. Наполняя стеклянный колокол эфиром или алкоголем и проводя резко смычком по краю колокола, мы увидим, что при этом отрываются жидкие шарики, которые, падая назад, не смешиваются с жидкостью, но поддерживаются паром над поверхностью и уносятся к узловым линиям. Нагревание жидкости, как и следует ожидать, увеличивает эффект. Мельде, которому мы обязаны этим красивым опытом, сделал рисунки (фиг. 79 и 80), изображающие то, что происходит, когда поверхность разделяется на 4 и на 6 вибрирующих частей. С тонкой рюмкой и крепким спиртом также можно произвести этот опыт ¹⁾.

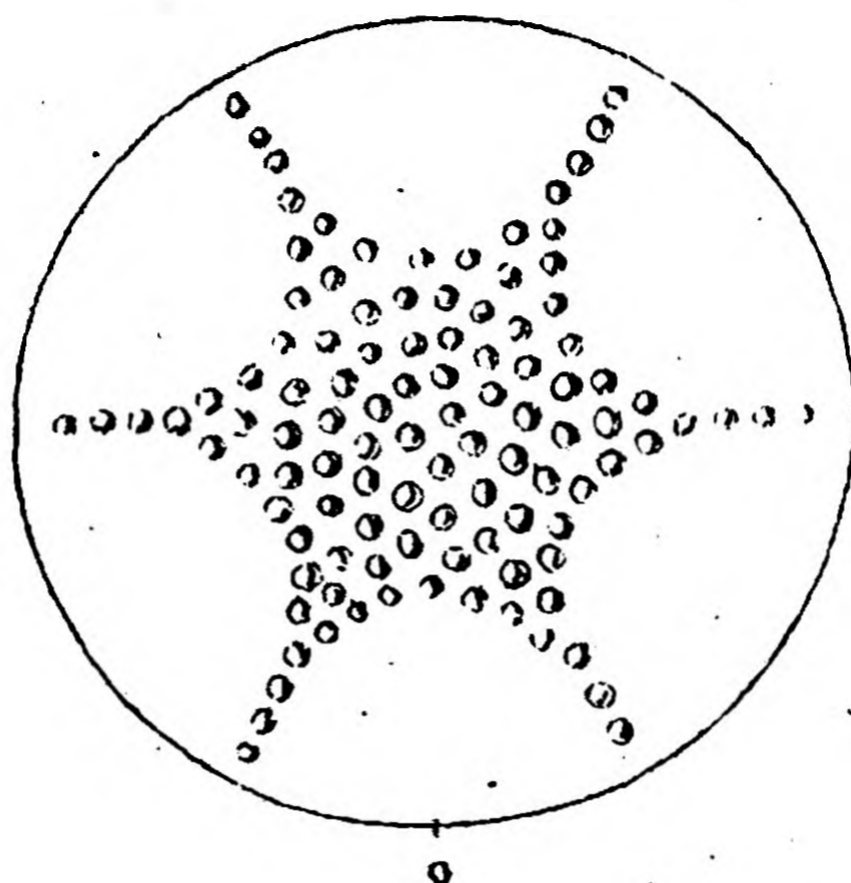
Стакан и жидкость, заключающаяся в нем, вибрируют вместе, и все, что нарушает совершенную однородность всей массы, мешает звукам. Трещина в стакане, идущая от края вниз, уничтожает его звуковую способность. То же самое будет, если нарушена непрерывность жидкости. Для доказательства этого, я наполнил стакан раствором угле-

¹⁾ Под выступом Веттергорна я видел в 1867 г. пруд чистой воды, в которую падали кусочки темного нависшего над прудом известняка. Подскакивавшие капли воды, падая назад вниз, катились мриадами по поверхности воды. Почти в каждом фонтане можно видеть такое же явление, когда брызги падают в бассейн.

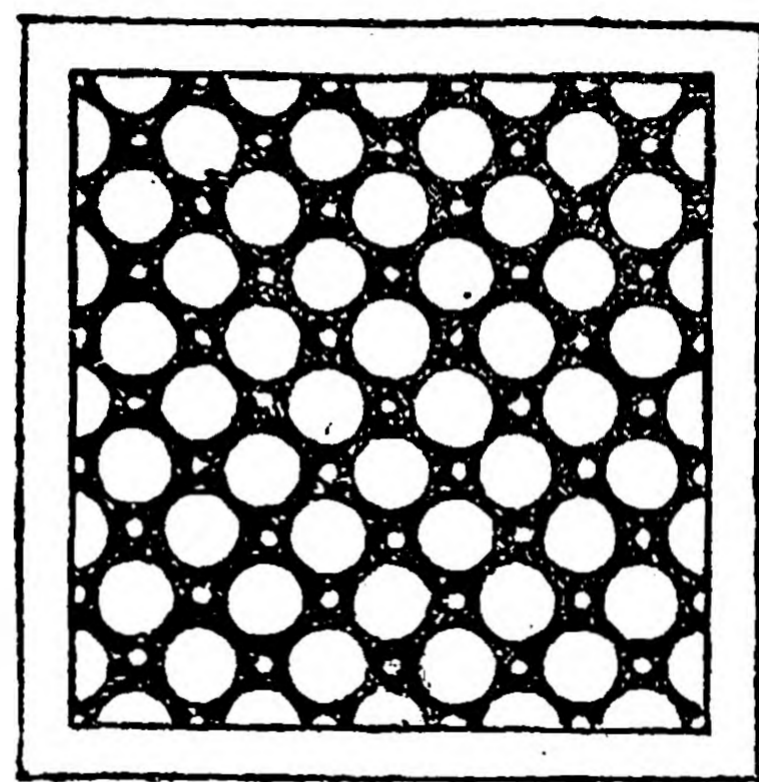
кислого патра. Я ударяю стакан, и вы слышите этот ясный музыкальный тон. Затем я прибавляю к жидкости немного виннокаменной кислоты; она мутится и вместо музыкального тона получается глухой не музыкальный шум. Когда муть исчезнет, то звуковая способность снова возвращается, и теперь, когда жидкость стала светлой, вы слышите, как прежде, музыкальный звук.



Фиг. 79.



Фиг. 80.



Фиг. 81.

Зыбь и волны прилива оставляют свой след на песке, по которому они проходили. Зыбь, производимая звуковыми вибрациями, делает то же самое, как доказал Фаредей. Если укрепить стеклянную пластинку на длинной гибкой доске и налить на стекло тонкий слой воды, то, когда доска вибрирует, ее сотрясения производят из воды красивую мозаику зыби. Тонкий слой песка, насыпанный на пластинку, движется вместе с водою и производит узоры, образчик которых представлен в уменьшенном виде на фиг. 81.

ОБЗОР ЧЕТВЕРТОЙ ЛЕКЦИИ.

Прут, укрепленный на обоих концах и приведенный в вибрации, разделяется совершенно так же, как и струна, вибрирующая поперечно.

Однако, последовательный ряд его верхних тонов не таков, как у струны, потому что, между тем как ряд тонов, издаваемых струною, выражается естественным рядом чисел, ряд тонов прута выражается квадратами нечетных чисел 3, 5, 7, 9 и пр.

Прут, укрепленный на одном конце, может также вибрировать, как целое, и может делиться на вибрирующие части, отделенные одна от другой узлами.

В этом случае скорость вибраций основного тона относится к скорости вибраций первого верхнего тона, как 4 : 25, или как квадрат 2 к квадрату 5. Начиная с первого деления при следующих дальнейших делениях скорости вибраций пропорциональны квадратам нечетных чисел 3, 5, 7, 9 и пр.

В прутах различной длины скорость вибраций обратно пропорциональна квадрату длины прута.

Если прикрепить стеклянный внутри посеребренный шарик к свободному концу прута и осветить его, то световая точка, отраженная от него, описывает кривые различной формы, когда прут вибрирует. Таким образом устроен калейдофон Уитстона.

Железная скрипка и музыкальный ящик суть инструменты, тоны которых производятся прутьями или пластинками, укрепленными на одном конце и свободными на другом.

Прут, свободный на обоих концах, также может быть источником звуковых вибраций. При простейшем виде его деления он имеет два узла; следующие же верхние тоны соответствуют делениям 3, 4, 5 и пр. узлами. Начиная с первого деления, тоны прута при следующих делениях выражаются квадратами нечетных чисел 3, 5, 7, 9 и пр.

Claque-bois, соломенная скрипка и стеклянная гармоника суть инструменты, тоны которых извлекаются из прутьев или брусков, свободных на обоих концах и поддерживаемых на их узлах.

Если прямой, на обоих концах свободный прут постепенно сгибать в центре, то два узла, соответствующие его основному тону, постепенно сближаются. Наконец, он принимает форму камертона, который, издавая свой основной тон, разделяется двумя узлами подле основания его ножек на три вибрирующие части.

В камертоне не может быть деления тремя узлами.

При втором виде деления, соответствующем первому верхнему тону камертона, бывает по одному узлу на каждой ножке и два узла на сгибе камертона.

Основной тон камертона относится к его первому верхнему тону приблизительно как квадрат 2 к квадрату 5. Таким образом, вибрации первого верхнего тона около $6\frac{1}{4}$ раз быстрее вибраций основного. Начиная с первого тона, следующие выше скорости вибраций выражаются квадратами нечетных чисел 3, 5, 7, 9 и пр.

Мы обязаны Хладни экспериментальным исследованием всех этих пунктов. Возможность произвести эти исследования дала ему то его открытие, что если посыпать песком вибрирующую поверхность, то он соскакивает с вибрирующих частей поверхности и собирается вдоль узловых линий.

Хладни производил исследования над пластинками различных форм. Напр., квадратная пластинка, укрепленная в центре и издающая свой основной тон, разделяется на 4 меньшие квадрата линиями параллельными к ее сторонам.

Та же самая пластинка может делиться на четыре треугольные вибрирующие части, когда узловые линии совпадают с диагоналями. Тон, издаваемый при этом, есть квинта относительно основного тона пластинки.

Пластинка может делиться еще дальше, производя чрезвычайно красивые песчаные фигуры; тон повышается по мере того, как деления пластинки становятся мельче.

Эти фигуры могут быть объяснены соединением различных систем вибраций.

Когда круглая пластинка, ущемленная в центре, издает основной тон, то она разделяется на 4 вибрирующие части, разделенные 4 радиальными узловыми линиями.

Следующий тон пластинки соответствует ее делению на 6 вибрирующих секторов, дальнейший—на 8; такая пластинка может делиться на множество вибрирующих секторов, при чем песчаные фигуры принимают красивые звездообразные формы.

Скорости вибраций, соответствующие делениям кружка, выражаются квадратами чисел 2, 3, 4, 5, 6 и пр. Другими словами, скорость вибраций пропорциональна квадратам чисел, выражающих число секторов, на которые делится кружок.

Когда колокол издает свой самый низкий тон, то он разделяется на 4 вибрирующие части, отделенные одна от другой узловыми линиями, которые идут вверх от краев и пересекаются в голове колокола.

Он может делиться так же, как кружок, и давать такой же ряд тонов.

Скорость вибраций кружка или колокола прямо пропорциональна толщине и обратно пропорциональна квадрату их диаметра.

Лекция пятая.

Продольные вибрации проволоки.—Скорость звука в латуни и железе.—Продольное колебание прута, укрепленного с одного конца, и прута, свободного с обоих концов.—Узловые точки и верхние тоны продольно колеблющихся прутьев.—Наблюдения над прутьями при поляризованном свете.—Скорость звука в твердых телах.—Резонанс.—Вибрации в закрытых с одного конца трубках; их деления и верхние тоны.—Как относятся тоны таких трубок к тонам открытых трубок.—Состояние воздушного столба в издающей тон органной трубе.—Обыкновенные язычки и трубки с язычками.—Голос.—Верхние тоны голосовых связок.—Звуки гласных.—Телефон Белля.—Телефон Эдиссона.—Микрофон.—Фонограф.—Опыты Кундта.—Новые способы определения скорости звука.—Превращение лучистой теплоты в звук.

§ 1. Продольные вибрации проволок и прутьев; превращение продольных вибраций в поперечные.

Мы до сих пор занимались исключительно поперечными вибрациями, т.-е. колебаниями, направление которых перпендикулярно к направлению струн, прутьев, пластинок, колоколов и т. д.

Но струна может также колебаться продольно, по направлению ее длины, и в таком случае сила, обуславливающая колебания, заключается в упругости самих ее частиц. Упругость же частиц гораздо значительнее той, какую мы можем вызвать в струне каким-либо внешним натяжением; поэтому и тоны, соответствующие продольным колебаниям, вообще гораздо выше вызываемых поперечными колебаниями. Эти продольные колебания можно вызвать, если провести смычком по струне вкось. Еще легче достигнуть того же, если быстро тереть взад и вперед струну куском сукна, кожи, или даже просто пальцами, на которые было насыпано предварительно немного канифоли. Я ударяю по струне монохорда, и вы слышите тон, вызванный поперечными колебаниями. Я тру ту же струну насмоленной кожей вдоль, и вы слышите тон гораздо более пронзительный, вызванный продольными колебаниями. Сзади стола натянута толстая железная проволока в 7 метров длины. Один конец ее укреплен неподвижно в деревянном станке; другой наматывается на штифт, укрепленный в одной из наших скамеек. Посредством ключа я могу поворачивать штифт и натягивать проволоку. Я тру вдоль этой проволоки кожей, и вы слышите полный музыкальный звук. Беру проволоку пальцами за середину и тру одну из ее половин. Звук, который слышится теперь, составляет октаву предыдущего; колебания его вдвое

быстрее. Я придерживаю проволоку на одной трети ее длины и тру короткую ее часть. Нота, которую она издает теперь, на одну квинту выше предыдущей. Придерживаю проволоку на одной четверти ее длины и тру эту четверть; нота на две октавы выше той, которую издавала в самом начале вся проволока, а число колебаний теперь вчетверо больше первоначального. Итак, число колебаний при продольных, как и при поперечных колебаниях проволоки обратно пропорционально длине ее.

Теперь обратите внимание на поразительную силу этих звуков, если тереть проволоку сильно. Я укорачиваю все более и более натягаемую часть проволоки, и высота звука возрастает до того, что он делается наконец почти невыносимым. Однако, не сама проволока издает этот звук, но деревянный станок, которому один из ее концов передает эти колебания. Так как колебания проволоки суть продольные, то колебания станка, который стоит перпендикулярно к проволоке, должны быть поперечны. В этом мы имеем наглядный пример обращения одних колебаний в другие.

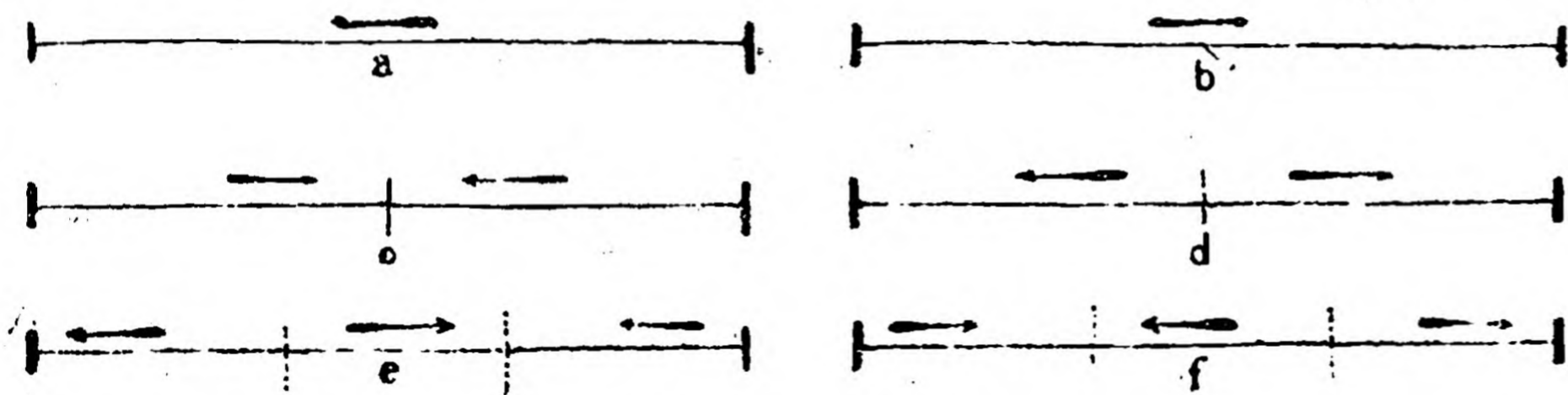
§ 2. Продольные волны в железе и латуни; определение их скорости.

Я снова заставляю проволоку совершать продольные колебания по всей ее длине. В то же время мой ассистент поворачивает штифт и увеличивает натяжение проволоки. Звук, который она издает, от этого несколько не изменяется. Итак, когда проволока достаточно натянута для того, чтобы плотно прилегать к точкам ее прикрепления, то дальнейшее натяжение не оказывает на продольные колебания того влияния, какое замечается в подобном случае относительно поперечных колебаний.

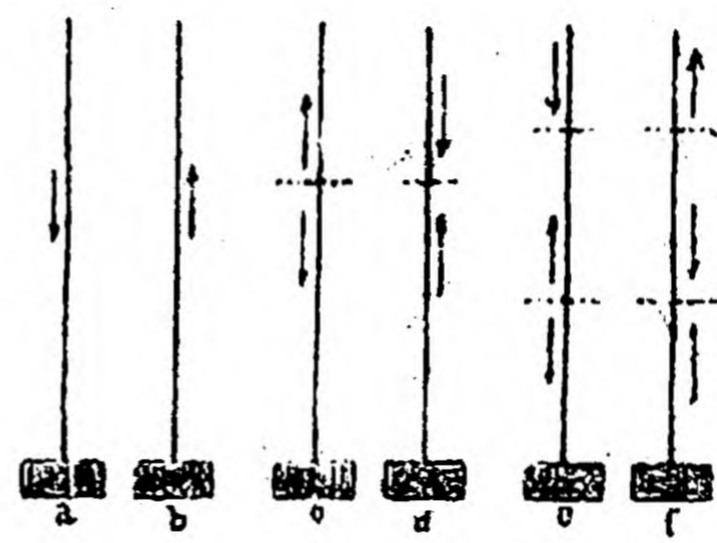
У меня другая проволока из латуни такой же длины и толщины, как и железная. Я тру обе, и звуки, которые они издают, не одинаковы. Звук железной значительно выше. Почему?—Просто потому, что скорость звуковых волн больше в железе, чем в латуни. Толчки идут в этом случае от одного конца проволоки к другому взад и вперед. В одно мгновение проволока толкает доску штатива вперед, в следующее—оттягивает ее назад. Все это происходит вследствие движения взад и вперед продольных колебаний самой проволоки. Время, которое употребляет такая продольная волна для прохождения от одного конца проволоки до другого и обратно, соответствует одному полному колебанию. В течение его проволока сообщает доске один толчок вперед и один раз оттягивает ее обратно; доска передает, таким образом, одно целое колебание воздуху, который, в свою очередь, точно также сообщает один толчок вперед и одно движение назад барабанной перепонке. После этого ясно, что скорость колебаний, или, другими словами, высота звука зависит от той быстроты, с какою звуковая волна протекает по проволоке.

Таким образом, само собой является нам решение весьма интересной задачи. Я ущемляю латунную проволоку все ближе и ближе к дру-

тому концу, пока, наконец, звук, который она издает, не станет одинаков с звуком железной проволоки. Вы слышите, что теперь обе проволоки звучат одинаково. Это означает, что звуковая волна по латунной проволоке, длина которой теперь равна 4,7 метра, пробегает в такое же время, как по железной проволоке длиной в 7 метров. Длина одной проволоки относится к другой, как 11 к 17, и это отношение и есть отношение скоростей звука в латуни и железе. Само собою разумеется, что этот способ может быть применен и к другим металлам. Когда продольно вибрирующая проволока издает свой самый низкий звук, то колебания ее не представляют узлов. Толчок пробегает по всей длине ее взад и вперед. Но, подобно струне, вибрирующей поперечно, и эта проволока может делиться на пучности, разделенные узлами.



Фиг. 82.



Фиг. 83.

Если мы дотронемся до проволоки посередине, то тут образуется узел. Толчки идут от обоих концов проволоки и встречаются в этой точке; отталкиваются, идут назад и т. д. Звук, который они издают теперь, составляет октаву основного тона. Если разделить струну таким образом на три части, разделенные двумя узлами, то получится следующая высшая нота. Первое из трех означенных колебаний изображено на фигуре 82 под лит. *a* и *b*, второе—под лит. *c* и *d* и третье—под лит. *e* и *f*. Узлы означены пунктирными поперечными линиями, а направление движения толчков—стрелками.

Скорости колебаний выражаются и здесь, точно так же, как и при поперечных колебаниях, рядом чисел 1, 2, 3, 4, 5 и т. д.

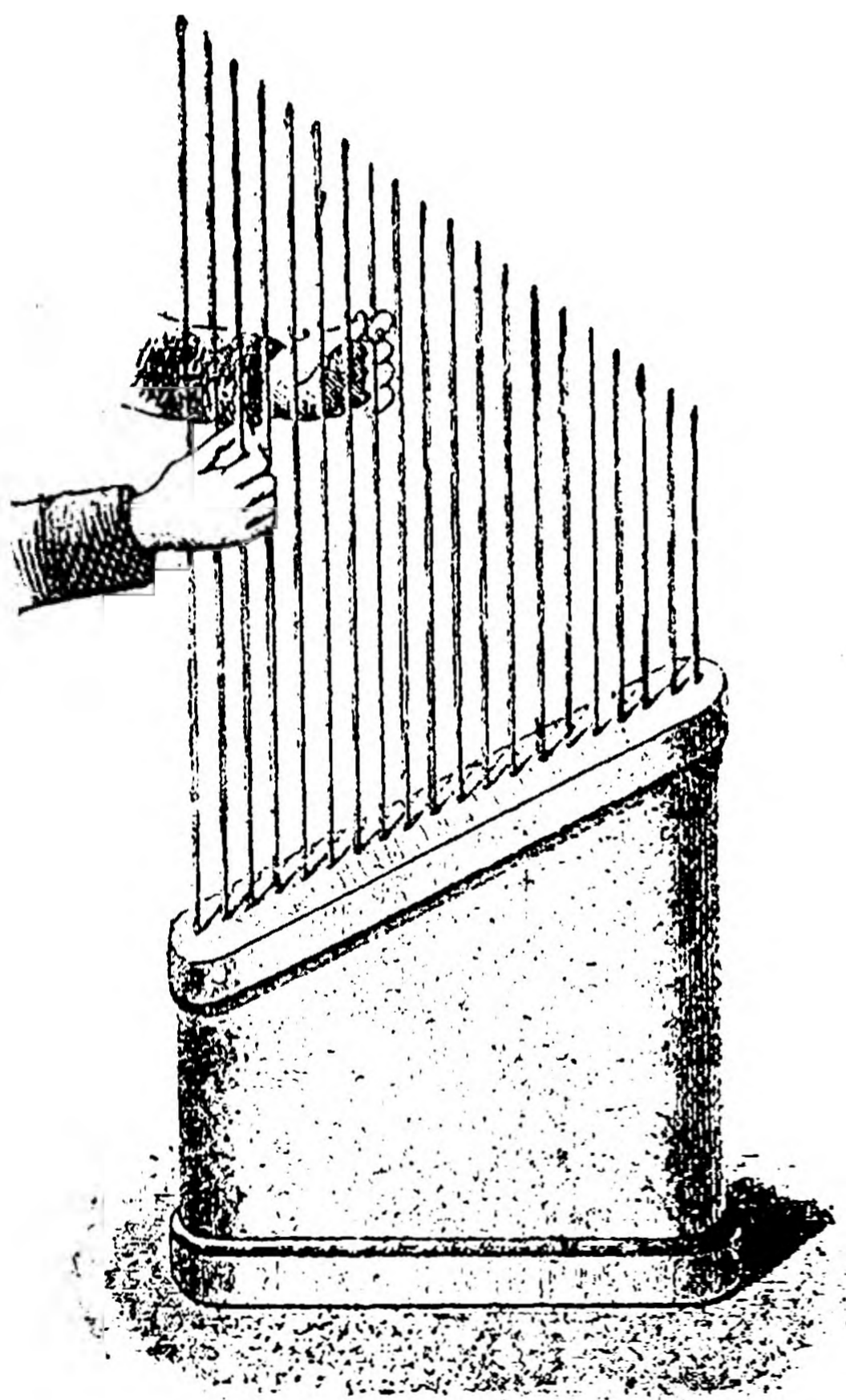
Прут деревянный или металлический, укрепленный с обоих концов и приведенный в продольные колебания, дает такие же узлы, как и проволока, и звуки следуют в нем в том же порядке.

§ 3. Продольные вибрации прутьев, укрепленных с одного конца. Музыкальные инструменты, основанные на этом принципе.

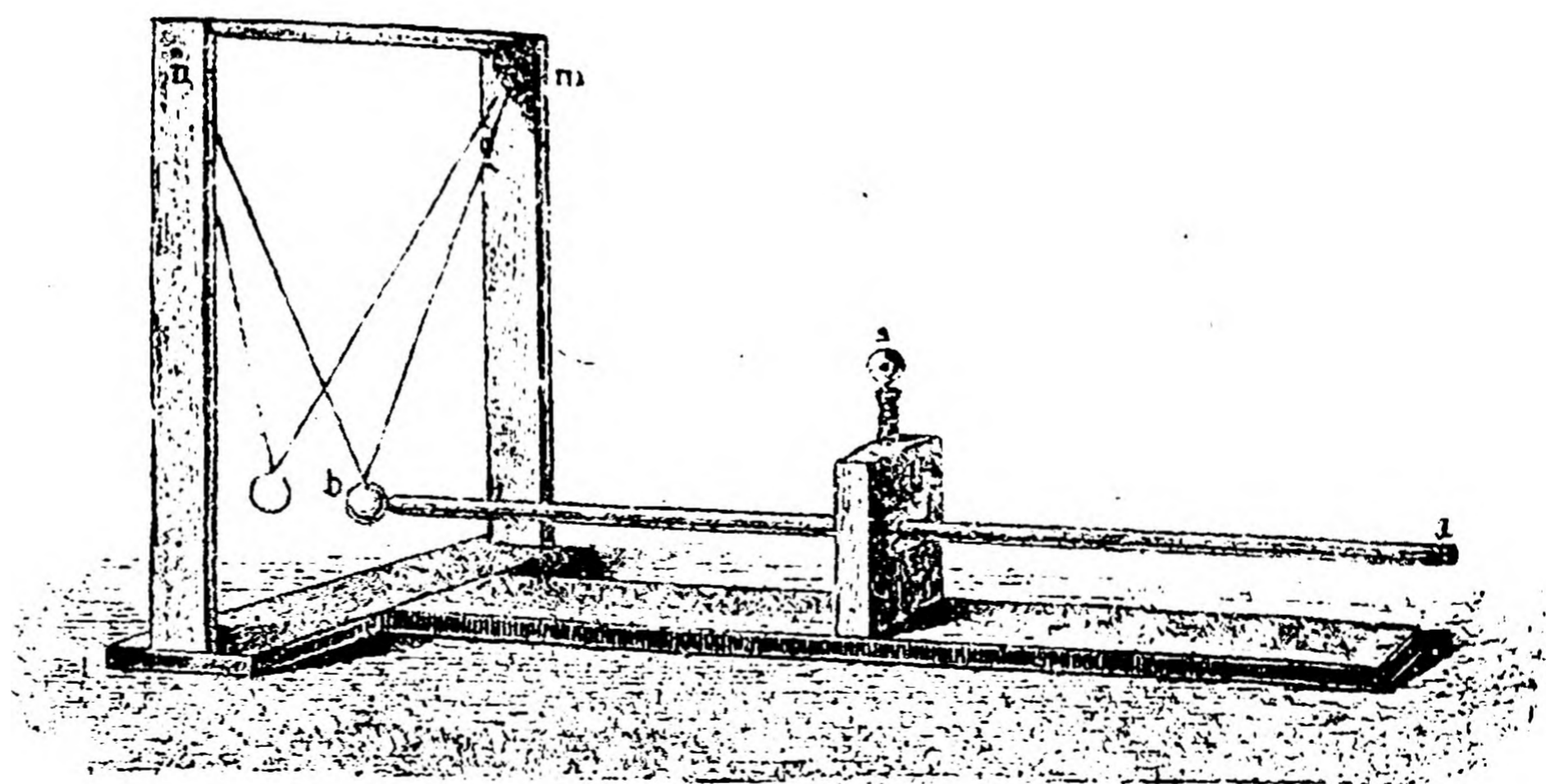
Прутья, укрепленные с одного конца, также могут быть приведены в продольные вибрации. Если тереть такой прут продольно, то он издает музыкальный звук. Если он издает свой самый низкий тон, то он просто удлиняется и сокращается весьма быстро и не дает узлов. Если сравнивать несколько таких прутьев различной длины, то высота звука, который они издают, будет обратно пропорциональна их длине. Это следует необходимо из того, что целое колебание требует столько

времени, сколько его нужно звуковой волне для того, чтобы пройти взад и вперед по пруту. Первый верхний тон прута, укрепленного с одного конца, соответствует его делению узлом в точке, которая отстоит от свободного конца прута на одну треть всей длины прута. Его второй верхний тон соответствует разделению двумя узловыми точками, из которых одна отстоит на одну пятую всей длины прута от свободного конца, а другая делит остальную часть прута на две равные части.

Фиг. 83 представляет в *ab*, *cd*, *ef* состояния прута, которые соответствуют отдельным видам его вибраций. Узлы означены пунктиром, а направление толчков—стрелками. Тоны продольно вибрирующих прутьев, укрепленных с одного конца, относятся между собою, как ряд нечетных чисел 1, 3, 5, 7, 9 и т. д.; и можно легко понять почему. Так как



Фиг. 84.



Фиг. 85.

время колебаний для *e* или *d* определяется длиною части прута, помещающейся поверх пунктирной линии, и так как эта длина равна одной трети длины всего прута, то и ее колебания должны быть втрое быстрее. Для *e* и *f* тон должен соответствовать длине верхнего отрезка прута, и так как этот отрезок составляет одну пятую часть всего прута, то и его колебания должны быть в пять раз быстрее колебаний, совершаемых *a* и *b*. Поэтому числа колебаний отдельных тонов относятся как ряд нечетных чисел. На фиг. 84 вы видите музыкальный инструмент, в котором звуки образуются продольными колебаниями ряда сосновых прутьев различной длины. Когда я тру их поочередно намоленными пальцами, то получаю ряд звуков различной высоты. Искусный музыкант мог бы придать этим звукам надлежащую приятность.

§ 4. Вибрации прутьев, свободных на обоих концах.

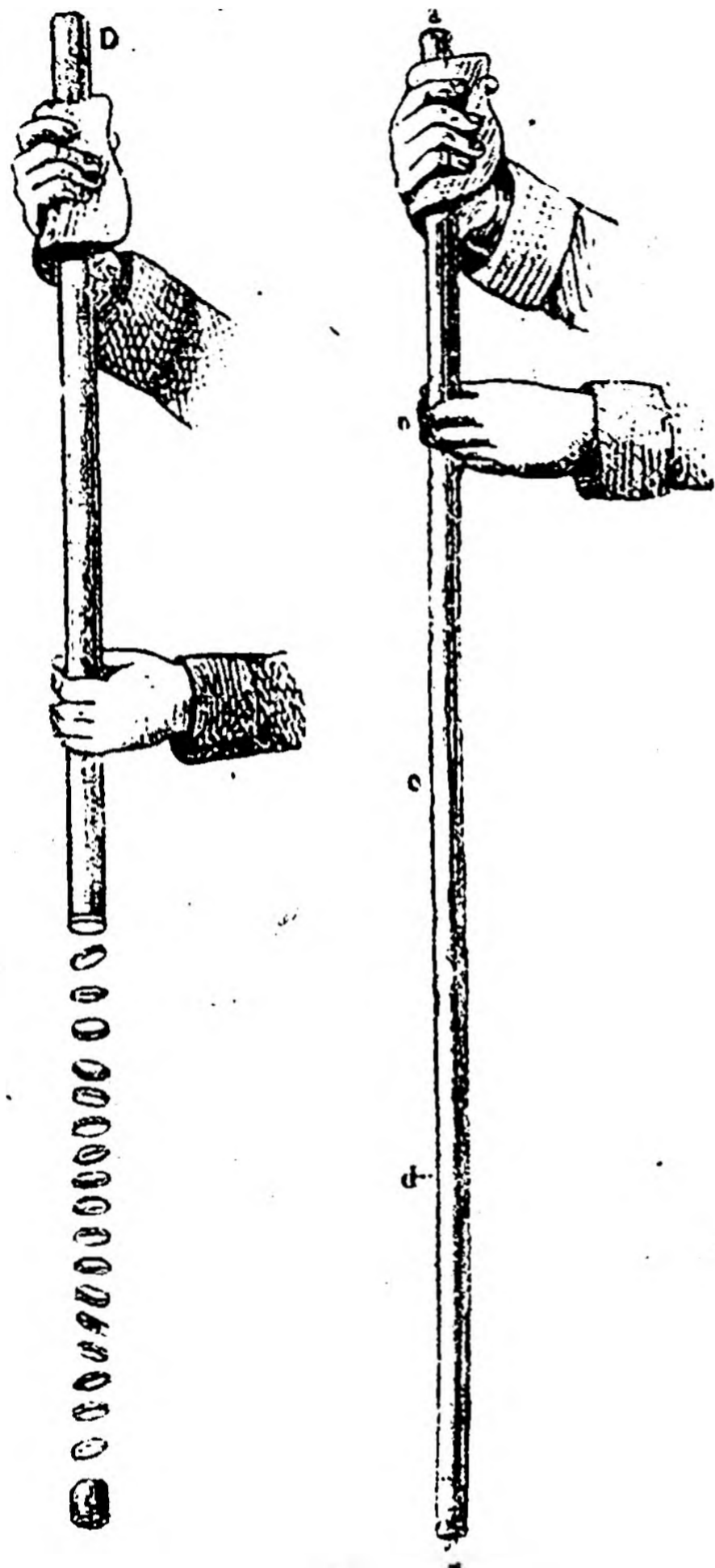
Прутья, свободные на обоих концах, могут также вибрировать продольно и производить музыкальный тон. Исследование этого предмета приведет нас к крайне важным результатам. Я беру левой рукой длинную стеклянную трубку как раз за самую середину и тру другою рукой одну из ее половин мокрым сукном. От этого происходит музыкальный звук. То же будет, если вместо трубки я возьму стеклянную палку. В этом случае на середине трубки образуется узел, а обе части ее быстро и попеременно то сокращаются, то удлиняются. Кениг в Париже приготовил инструмент, который показывает это явление наглядным образом. Латунный прут ab (фиг. 85) ущемляется посредине тисками s . Шарик слоновой кости, повешенный на двух нитках, идущих от точек m и n деревянной рамки, прикасается к одному концу прута. Когда я тру слегка наканифоленной кожей правую половину прута близ a , то он приходит в продольные вибрации. В середине его образуется узел; но покачивание, в которое приходит шарик b , доказывает вам, что и другая половина прута находится также не в покое. Я тру сильнее, шарик стучит, и наконец колебания становятся столь значительны, что он с силой отбрасывается назад каждый раз, как только приходит в соприкосновение с прутом.

§ 5. Разбивание стеклянной трубки звуковыми вибрациями.

Когда я тру мокрым сукном по поверхности стеклянной трубки, то могу заметить, что пленки жидкости, остающиеся позади сукна, образуют узкие дрожащие кольца по всей длине трубки. Это дрожание жидкости есть следствие колебания стекла, и это колебание можно довести до того, что трубка даже разбивается на части. Первый доказал это Савар. Я уже два раза повторял здесь этот опыт и каждый раз жертвовал для этого трубку в 2 метра длины и 15 см. в диаметре. Я держал трубку по середине в s (фиг. 86) и сильно тер другою рукой часть CD до тех пор, пока, наконец, другая часть трубки не распадалась на кольцеобразные куски. Рассматривая эти кольца, можно было заметить, что многие из них, как бы они ни были узки, имели на себе следы кольцеобразных трещин, деливших их на еще более дробные кольца.

И в этом случае скорость колебаний также обратно пропорциональна длине. Трубка вдвое меньшей длины производит колебания вдвое более быстрые; втрое меньшей длины—в три раза более быстрые, и т. д. Так как продолжительность одного полного колебания зависит от времени, которое употребляет толчок для того, чтобы пройти по трубке взад и вперед, а это время прямо пропорционально длине ее, то скорость колебания естественно обратно пропорциональна той же длине трубки.

Это деление трубки одним узлом по середине соответствует самому низкому тону, какой она может дать при продольных колебаниях. Но точно так же, как и при всех до сих пор рассмотренных случаях, прутья и трубки, свободные на обоих концах, могут делиться на большее число узлов.



Фиг. 86. Фиг. 87.

Я держу длинную стеклянную палку ac (фиг. 87) в точке b , лежащей на одной четверти длины ее, и тру короткий конец ab мокрым сукном. В точке b образуется узел и соответственно ему такой же другой в точке d . Таким образом, палка делится на три части: пучность bd , соответствующую одному полному колебанию, и две полупучности ab и de . Тон, соответствующий такому делению палки, есть октава ее основного тона.

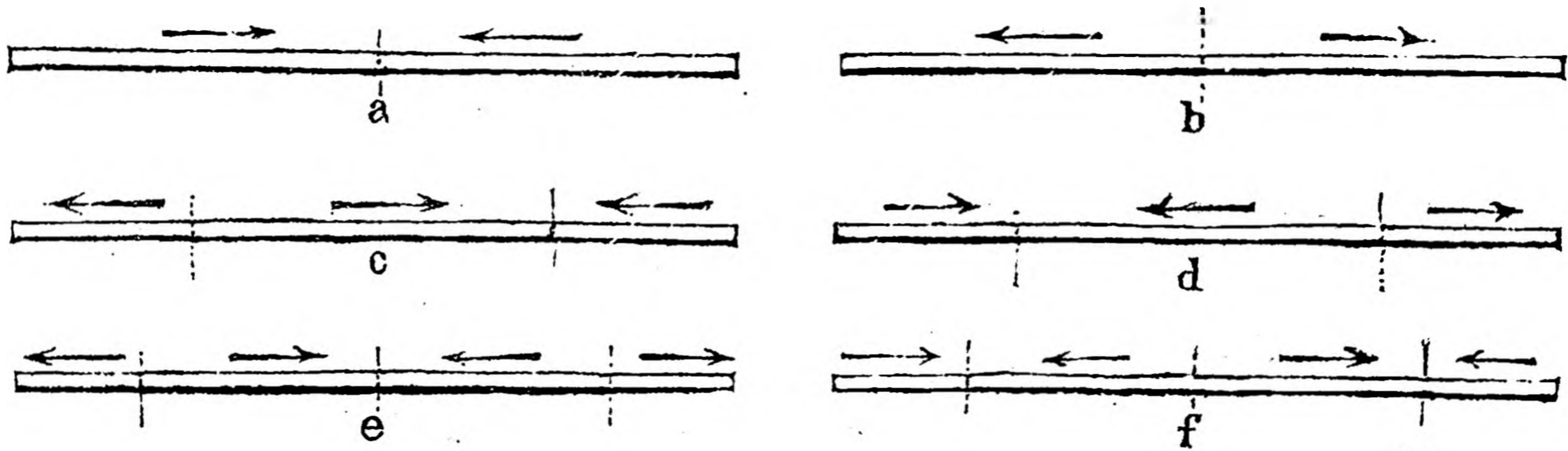
Вы можете теперь проверить два мои положения. Ибо если только-что описанное деление палки дает октаву основного тона и палка половинной длины дает ту же октаву, то целая палка, будучи придерживаема на одной четверти своей длины от одного конца, должна была бы давать тот же тон, как и палка половинной длины, придерживаема по середине. Кто-нибудь из вас должен заставить звучать палку половинной длины в то время, как я буду заставляю звучать палку целой

длины. Вы слышите оба тона и они одинаковой высоты. В фиг. 88 в a и b , c и d , e и f показаны три первые рода деления палки, свободной с обоих концов и приведенной в продольные колебания. Узлы по-прежнему изображены пунктиром, а направление колебаний—стрелками. Последовательность тонов выражается цифрами 1, 2, 3, 4, 5 и т. д.

§ 6. Действие звуковых вибраций на поляризованный свет.

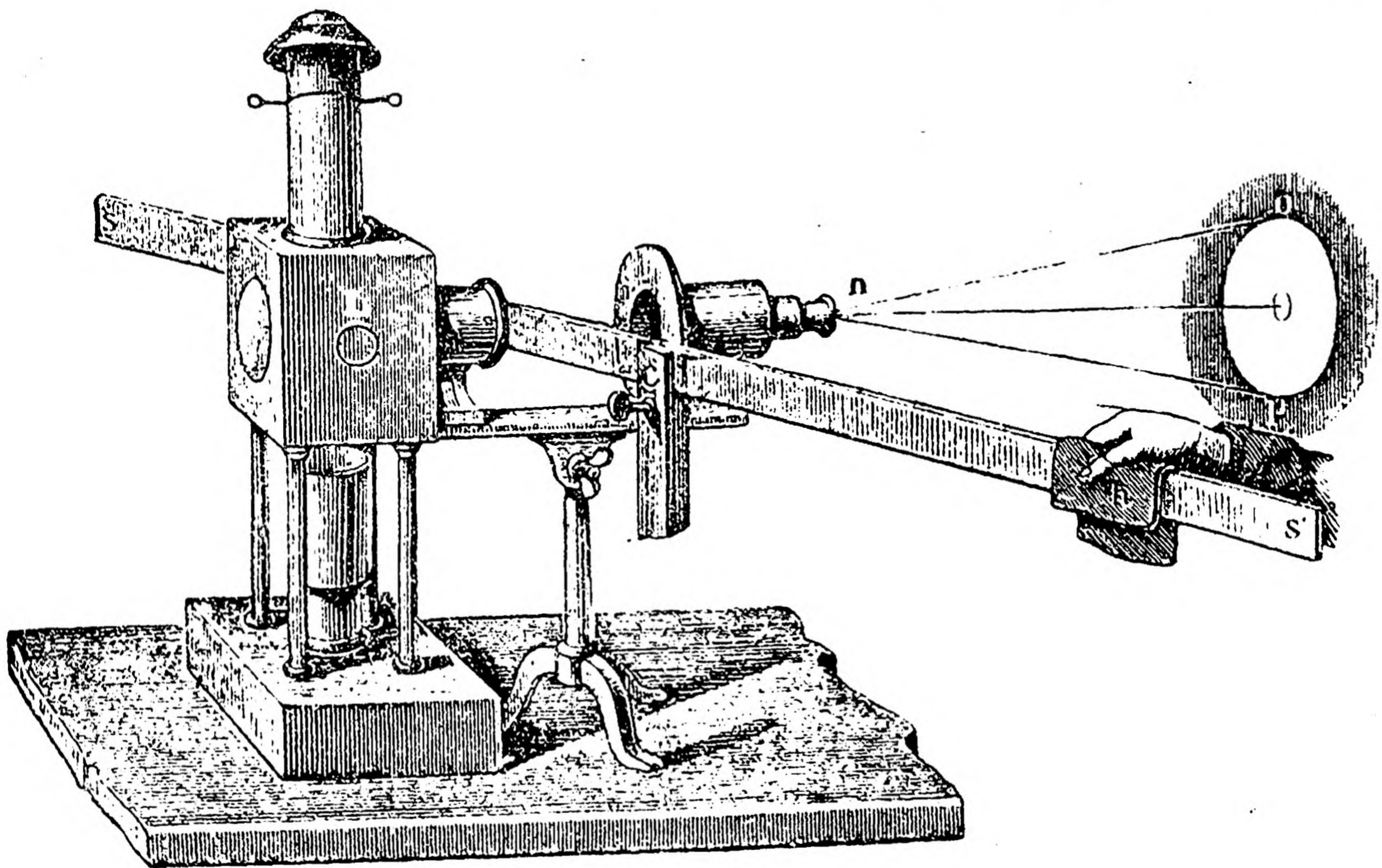
Когда стеклянная трубка или палка, приведенная в продольные колебания, дает основной тон, то оба конца ее совершенно свободны в своих колебаниях, и стекло здесь не испытывает ни натяжения, ни давления. Совершенно иное происходит посредине ее. Тут, правда, нет вибраций, но быстрый обмен давлений и натяжений. Когда звуковые толчки набегают к середине,—они сжимают стекло; когда они отражаются назад,—они растягивают его. Таким образом, на обоих концах мы получаем наибольшие колебания, но никакого изменения плотности, тогда как посредине имеем наибольшее изменение плотности, но никаких колебаний.

Мы проложили теперь себе путь к прекрасному опыту, который много лет тому назад сделал Био, но который, сколько мне известно, с тех пор ни разу не был повторен в тех размерах, в каких я вам



Фиг. 88.

намерен его представить. Я пропускаю свет пашей электрической лампы L (фиг. 89) через призму из исландского шпата и таким образом получаю луч поляризованного света ¹⁾. Этот луч я заставляю падать на вторую такую же призму n , и хотя обе призмы совершенно прозрачны, тем не менее свет, прошедший через первую призму, уже



Фиг. 89.

не может пройти через вторую. Но я вам покажу, однако, что если поместить между обеими призмами кусок стекла и начать его сжимать

¹⁾ Поляризованным светом называется световой луч, колебания которого, вообще поперечные, совершаются лишь в одной определенной плоскости, проходящей через направление луча. Луч неполяризованный поляризуется, будучи пропущен сквозь кристалл исландского шпата (так назыв. николю, поляризатор). Если этот поляризованный луч пропустить далее через второй кристалл (анализатор), поставленный таким образом, что обыкновенный луч, пройдя сквозь него поляризовался бы, в плоскости, перпендикулярной плоскости поляризации данного луча, то этот последний оказывается погашенным.

или растягивать в надлежащем направлении, то свет будет проходить через обе призмы.

Я помещаю между двумя призмами кусок зеркального стекла в 2 метра длины, 5 см. ширины и 1 см. толщины. Луч, исходящий из L , встречает стекло близ его середины, где оно ущемлено тисками s . Когда я тру мокрым сукном часть cs' , то посредине стекла образуется узел. Во время продольных колебаний, как сказано, стекло то сжимается, то растягивается, вследствие чего получают такие условия для света, что он может проходить через вторую призму n . Наблюдайте за опытом. Экран совершенно темен; я тру мокрым сукном по стеклу взад и вперед; вы слышите звук и одновременно появляется светлый кружок на экране в 3 фута в диаметре; как только прекращаются колебания, исчезает и свет для того, чтобы появиться при всяком новом трении.

Свет кружка, появляющегося на экране, кажется совершенно непрерывным; но в действительности он не таков, ибо он может появляться только тогда, когда стекло или сжимается или растягивается; при переходе из одного состояния в другое существует момент, когда стекло находится в естественном состоянии, которое если бы продолжалось, то и экран остался бы неосвещенным. Но впечатление, произведенное светом, вызванным растяжением или сжатием стекла, на сетчатую оболочку глаза, длится гораздо долее, чем нужно для того, чтобы мы могли ощутить темные промежутки. Поэтому экран кажется освещенным непрерывно. Я ставлю стекло таким образом, что поляризованный свет проходит через него вблизи конца s . Продольные колебания не обнаруживают никакого действия на поляризованный свет. Таким образом, этим способом мы можем доказать, что середина стекла, где колебания равны нулю, подвергается быстрому сжатию и растяжению, в то время как оба конца стекла, где колебания наибольшие, не испытывают ни того, ни другого ¹⁾.

§ 7. Вибрации деревянных прутьев; определение относительных скоростей в дереве разных родов.

До сих пор я употреблял почти только стеклянные палки и трубки; но так же приводятся в продольные колебания и деревянные и металлические прутья. Только в этом случае их натирают не мокрым сукном, а куском кожи или просто пальцами с камифолью. Способ колебания тот же; но только высота тона изменяется скоростью, с какою звуковая волна проходит по различным родам дерева. У меня два прута одинаковой длины; один сосновый, другой из испанского красного дерева, которые я и заставляю звучать одновременно. Последний дает более низкий тон. Почему? Потому, что звуковые волны по этому особому виду красного дерева распространяются гораздо медленнее, чем в сосновом дереве. Отношение скоростей мы можем определить

¹⁾ Этот опыт удастся также хорошо и со стеклянной трубкой. Цветные кольца вогнутой селенитовой пластинки могут становиться обратными от действия звучащего куска стекла.

весьма просто. Будем укорачивать прут из красного дерева до тех пор, пока звук обоих прутьев не будет одинаков. Я укорачиваю осторожно и последовательно прут; звуки сближаются. Теперь они слились. Прут из красного дерева имеет теперь 2 метра в длину, и звуковая волна проходит по этому пруту в такое же время, в какое она проходит по сосновому пруту в 3 метра длины. Стало быть, эти числа и выражают относительную скорость распространения звука в обоих родах дерева. Способы исследования, на которые я только намекнул в моих предыдущих чтениях, стали нам теперь совершенно понятны. Когда я говорил в первой лекции о скорости звука в воздухе, то вам вероятно приходило на ум само собою несколько способов измерения этой скорости, потому что мы имели там дело с расстояниями в несколько миль; но как измерить скорость звука в металле или дереве, где не может быть и речи о таких протяжениях? Тем способом, который мы только что описали. По тем звукам, которые они издают, когда приводятся в колебания надлежащим способом, мы можем с уверенностью определить относительную скорость распространения звука в различных твердых веществах. И если мы затем сравним скорость звука в каком-либо одном из этих веществ со скоростью его в воздухе, то можем построить таблицу абсолютных скоростей звука в различных веществах; но как ввести в наш ряд воздух? Мы скоро будем в состоянии ответить на этот вопрос, приближаясь к тому через ряд явлений, которые на первый взгляд не имеют с этим вопросом никакой связи.

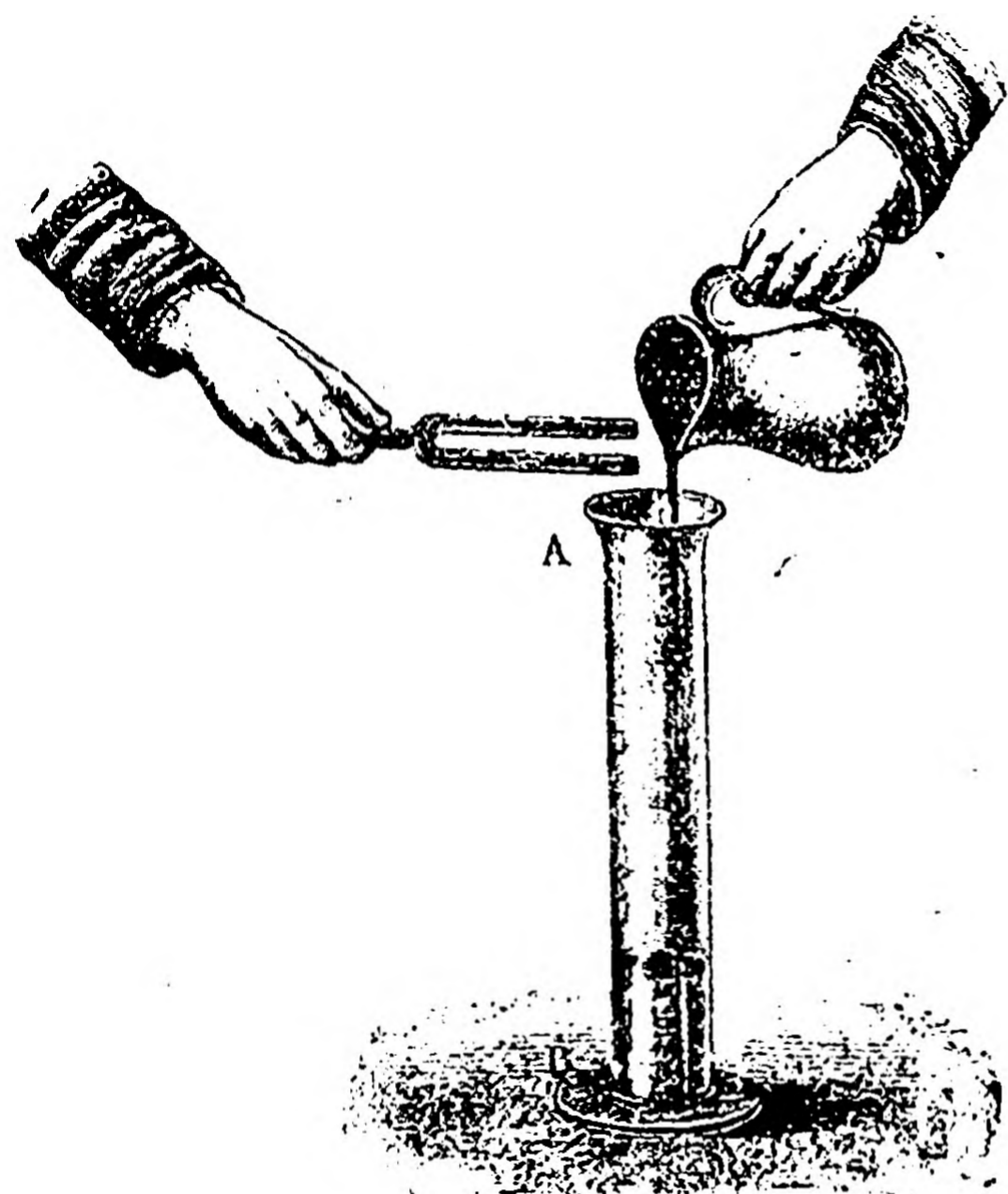
РЕЗОНАНС.

§ 8. Опыты с стеклянными сосудами-резонаторами. Об'яснение их.

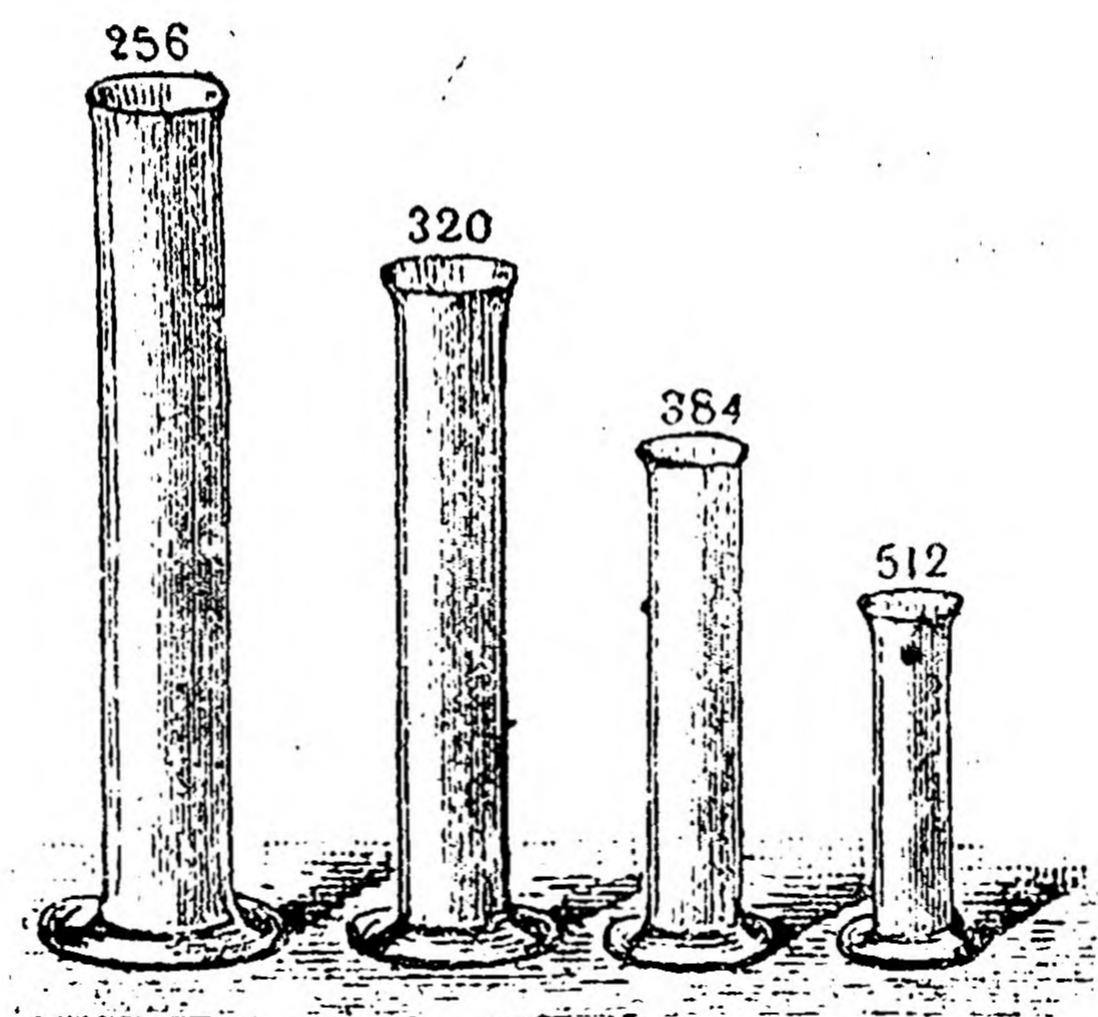
Перед вами стоит ряд камертонов, скорость колебаний которых определена уже посредством сирены. Вы должны помнить, что этот первый камертон делает 256 колебаний в секунду; и потому длина звуковой волны, которую он производит, равна 133 см. Я снимаю камертон с его ящика; вы теперь едва слышите его, когда он приведен в сотрясение. В этом виде я держу его над отверстием цилиндрического стеклянного сосуда *AB* (фиг. 90), глубина которого равняется 45 см. Но вы все-таки не слышите звука камертона. Продолжая держать его в том же положении, я осторожно, стараясь произвести как можно менее шума, лью воду в стеклянный сосуд, благодаря чему столб воздуха, находящийся под камертоном в сосуде укорачивается. Вы замечаете, что звук теперь усиливается и достигает значительной силы по мере возвышения водяного столба. Я подливаю еще воды; звук ослабевает и наконец исчезает совершенно. Выливая осторожно воду из сосуда обратно, я заставляю звук снова появляться и усиливаться. Подобные опыты убеждают меня, что звук камертона достигает своей наибольшей силы только при известной высоте находящегося под ним водяного столба. Это усиление звука и называется **резонансом**.

Повторяя тот же опыт с отдельными камертонами, я нахожу, что каждому соответствует своя особая высота воздушного столба, при которой звук его слышен всего сильнее. Столбы воздуха становятся короче с увеличением скорости колебаний. Фиг. 91 представляет ряд сосудов, над которыми написаны числа колебаний, соответствующие тем тонам, которые они усиливают.

Спрашивается, почему же сосуды становятся все короче и каков физический смысл этого в высшей степени замечательного явления? Для того, чтобы решить этот вопрос, мы должны вспомнить, в каком отношении находится движение воздуха к движению звуковой волны, которую камертон вызывает. Предположим, что одна из ножек камер-



Фиг. 90.



Фиг. 91.

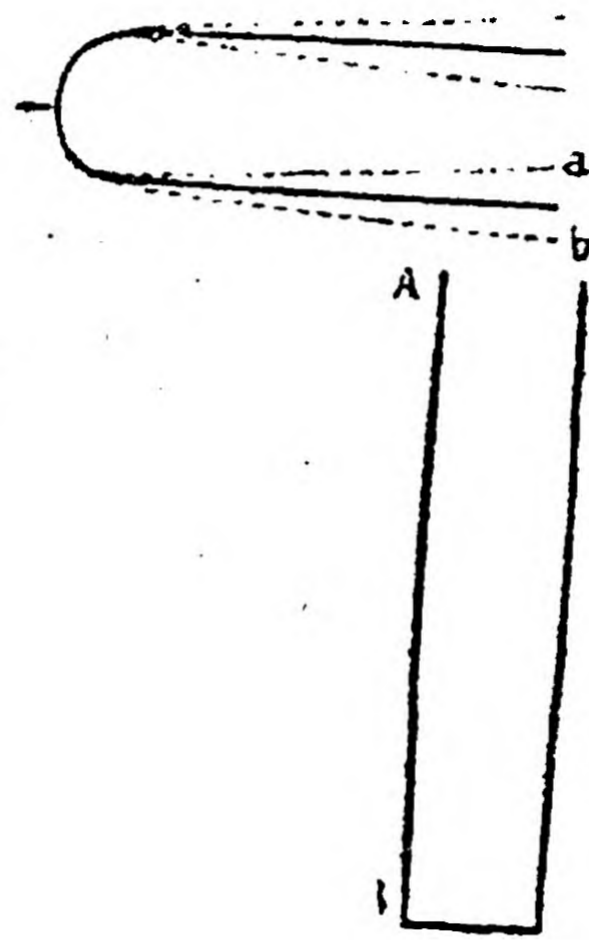
тона производит 256 колебаний в секунду, вибрируя между двумя точками *a* и *b* в фиг. 92. В своем движении от точки *a* до точки *b* ножка эта вызывает половину волны, и так как целая волна такого камертона равна 132 см., то в тот момент, когда эта ножка находится в точке *b*, передняя точка звуковой волны должна находиться в точке на расстоянии 66 см. от камертона. Движение волны следовательно гораздо быстрее, чем движение камертона. В действительности расстояние *ab* не более $\frac{1}{10}$ см., и в то время, которое употребляет ножка камертона для того, чтобы пройти это расстояние, звуковая волна проходит путь в 66 см. Для более низких камертонов эта разница еще значительнее.

Ближайший вопрос для нас состоит в длине воздушного столба, при которой резонанс этого камертона сильнейший. Измеряя, я нахожу его равным 33 см., но вся длина волны, образуемой камертоном, равна 132 см. Следовательно, высота воздушного столба, при которой резонанс наибольший, равна $\frac{1}{4}$ длины звуковой волны, образуемой камертоном. Это правило общее и может быть подтверждено всяким другим из наших камертонов.

Представьте себе ножку камертона, колеблющуюся между *a* и *b*, и под нею сосуд *AB* (фиг. 93). В то время, как эта ножка проходит расстояние от *a* до *b*, сжатие воздуха, которое она вызывает, достигает дна сосуда и отбрасывается назад; так как высота сосуда, взятая два раза, составляет 66 см., то отраженная волна встречает ножку камертона в тот момент, когда она готова возвратиться от *b* к *a*.



←----- 65 cm -----> C



Фиг. 92.

Фиг. 93.

Вместе с этим движением ножки начинается фаза волны, соответствующая разрежению воздуха. Это разрежение точно также достигает дна сосуда; возвращается назад для того, чтобы встретить ножку в тот момент, когда она достигает точки *a*. Отсюда очевидно, что вибрации камертона вполне совпадают, т.-е. совершаются одновременно с вибрациями воздушного столба *AB*. Вследствие этого движение накапливается в сосуде, распространяется по комнате и производит усиление звука.

Допустим, что вместо воздуха в сосуде находится какой-нибудь иной газ другой упругости, и мы должны будем изменить величину столба для резонанса. Скорость звука в светильном газе относится к скорости звука в воздухе приблизительно как 8 к 5. Следовательно, для вибраций, согласных с камертоном, сосуд, наполненный светильным газом, должен бы быть глубже, чем сосуд, наполненный воздухом. Я держу этот сосуд 45 см. глубины над закрытым газовым рожком; привожу в сотрясение камертон и держу его против отверстия сосуда; звук его едва слышен. Наполненный воздухом сосуд на 12 см. глубже, чем нужно для этого камертона. Теперь я открываю край газового рожка, и по мере того, как сосуд наполняется газом, звук усиливается, что и доказывает, что для более упругих газов глубина в 45 см. не слишком велика. И действительно, она еще недостаточна в настоящем случае, ибо, впуская слишком много газа, мы замечаем ослабление резонанса. Переворачиваю сосуд, продолжая держать над ним камертон; газ улетает вверх и при этом наступает в сосуде момент такой смеси газа и воздуха, при которой звук достигает прежней силы¹⁾.

¹⁾ Опыт этот трудно удаётся; его лучше делать с водородом, чем с светильным газом.

§ 9. Усиление резонансом звука колокола.

Другой опыт, показывающий действие резонанса, придуман Саваром. Предо мной прекрасный, полпозвучный колокол (фиг. 94), который приводится в сильное колебание трением смычка о его края. Вы слышите его чистый, но не сильный тон. Но я приближаю эту широкую трубку, замкнутую с одного конца, к одной из сторон колокола, и вы слышите усиление звука. Я приближаю трубку вполне к колоколу, и звук достигает крайней силы, оставаясь мягким и музыкальным. Поэтому, приближая и удаляя последовательно трубку, я могу усилить и ослабить звук. Удаляя трубку, я ослабляю его до того, что он становится вовсе не слышен. Затем приближаю ее снова, и звук, который только-что был совершенно не слышен для сидящих сзади, раздается по всей комнате. Затем я беру другую трубку, раздвижную, так что ее можно удлинять и укорачивать, но открытую с обоих концов. Я приближаю ее к звучащему колоколу; резонанс слаб; но вот я удлиняю трубку, и звук усиливается; удлиняю ее еще более, и звук снова ослабевает. Я хочу обратить ваше внимание на то, что трубка, открытая с обоих концов, должна быть вдвое длиннее трубки, открытой с одного конца. Впоследствии я объясню это явление.

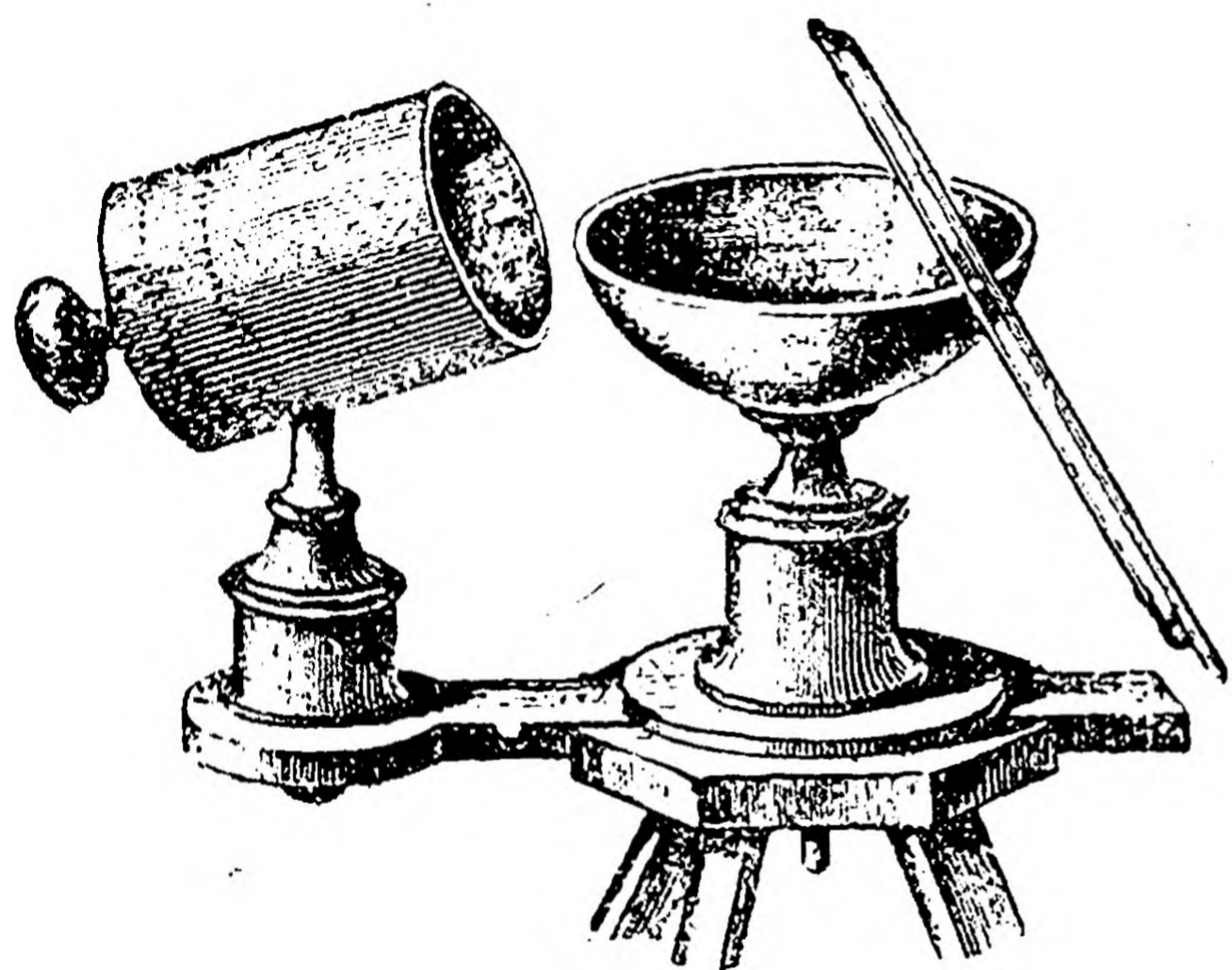
§ 10. Затрата движения при резонансе.

Когда я в третьей лекции брал копец каучуковой трубки и находил нужным, двигая ее, соблюдать в моих движениях известный такт, для образования различных систем узлов и пучностей, то я мог заметить, что мои мускулы уставали более при таких ритмических, чем при беспорядочных движениях. То же самое можно заметить, если рюмку до половины наполнить водой и затем двигать ее так, чтобы движения руки совпадали с движением находящейся в ней воды. В этом случае вам кажется, как будто бы вода сделалась тяжелее в рюмке. То же самое происходит и с камертоном. Когда его движения вполне совпадают с движением воздушного столба в сосуде, то он совершает больше работы, чем в противном случае. Вследствие этого камертон, который мы держим над сосудом, приходит ранее в покой, чем камертон, находящийся просто в воздухе или над сосудом, высота которого не соответствует его колебаниям ¹⁾.

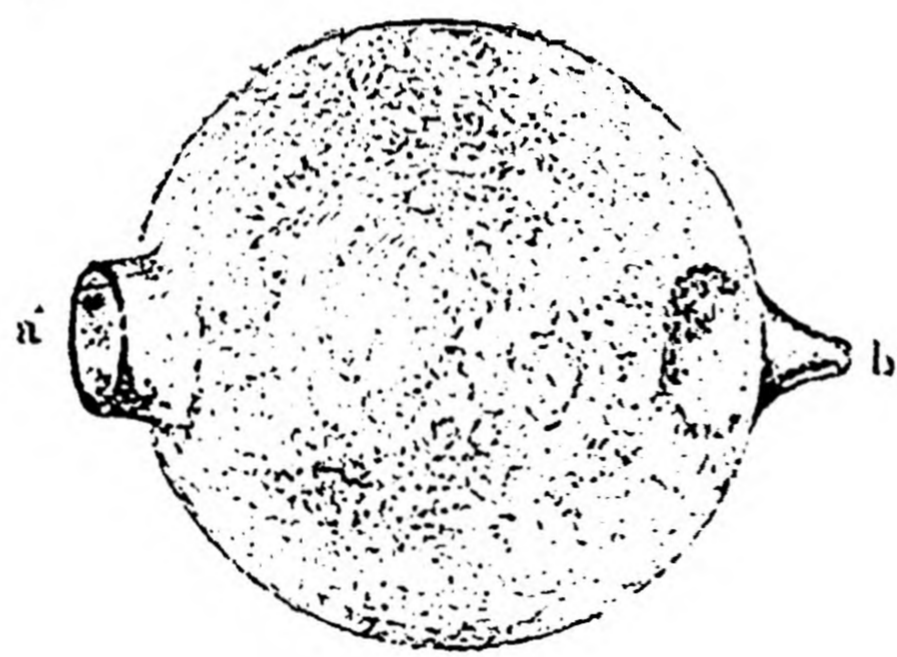
С помощью того, что мы узнали, вы можете без труда решить следующую задачу: вам дан камертон и сирена и с помощью этих двух инструментов вы можете определить скорость звука в воздухе. Для того, чтобы решить эту задачу, самое большее, чего вам может не доставать, это искусства манипуляции, которое приобретается упражнением. Вы прежде всего постараетесь определить посредством си-

¹⁾ На образование звука обращается только весьма незначительная часть работы камертона; остальная часть идет на преодоление трения самых частиц камертона или, иными словами, почти вся работа обращается в теплоту.

рены число колебаний вашего камертона в секунду, затем высоту воздушного столба, соответствующего его резонансу. Эта высота, помноженная на 4, даст приблизительно длину звуковой волны; а длина волны, помноженная на число вибраций в секунду, и выразит скорость звуковой волны. Таким образом, вы можете решить эту задачу, не выходя из этой комнаты. С вашего согласия мы будем продолжать далее тем же путем изучать наш предмет шаг за шагом.



Фиг. 94.



Фиг. 94а.



Фиг. 95.

§ 11. Резонаторы Гельмгольца.

Гельмгольц воспользовался принципом резонанса для разложения сложных звуков. Он употреблял небольшие полые стеклянные шары, называемые резонаторами. Один из них представлен на фигуре 94 а. Небольшой выступ, имеющий отверстие *b*, вставляется в ухо, а звуковые волны входят в полый шар через широкое отверстие *a*. Чтобы известный определенный тон выделить из сложного звука и исследовать только его, нужно усилить его при помощи резонанса такой шаровой полости и тем сделать его более громким и слышным, чем остальные сопровождающие его тоны.

ОРГАНЫЕ ТРУБКИ.

§ 12. Принципы резонанса, примененные к органным трубкам.

Теперь мы уже можем приступить к изучению органых трубок, представляющему большую важность. Передо мною на столе стоят два сосуда-резонатора. В обеих руках я держу по камертону; привожу их в колебание и держу над одним сосудом. Только один камертон звучит; держу оба над другим сосудом, и теперь звучит также только один из камертонов, но только не тот, который звучал прежде, а другой. Каждый из сосудов избирает тот камертон и усиливает его звук, который соответствует его собственным колебаниям. Вместо двух камертонов я мог бы взять две дюжины их, и из этого числа сосуд выбрал бы и усилил звук только того камертона, который соответствует его собственному периоду вибраций.

Я беру сосуд в руки, приближаю его к губам и дую над его отверстием; или еще лучше, так как сосуд слишком широк для такого опыта, заменяю его трубкой t_{11} (фиг. 95), одинаковой длины с сосудом, но диаметр которой равен 2 см. Этим я вызываю ряд неправильных толчков воздуха в устье трубки. — Что же от этого происходит? — Трубка избирает из этих воздушных сотрясений то, которое соответствует ее длине, и обращает его в музыкальный звук. Вы замечаете, что звук этот тот самый, который происходит, если держать надлежащий камертон над отверстием трубки. Столб воздуха в трубке в настоящем опыте образовал сам для себя соответствующий ему камертон; колебания воздушного столба в трубке, действуя на ток воздуха, выходящий из моих губ, приводят этот ток в однозвучные с собою колебания и заставляют его таким образом играть роль камертона.

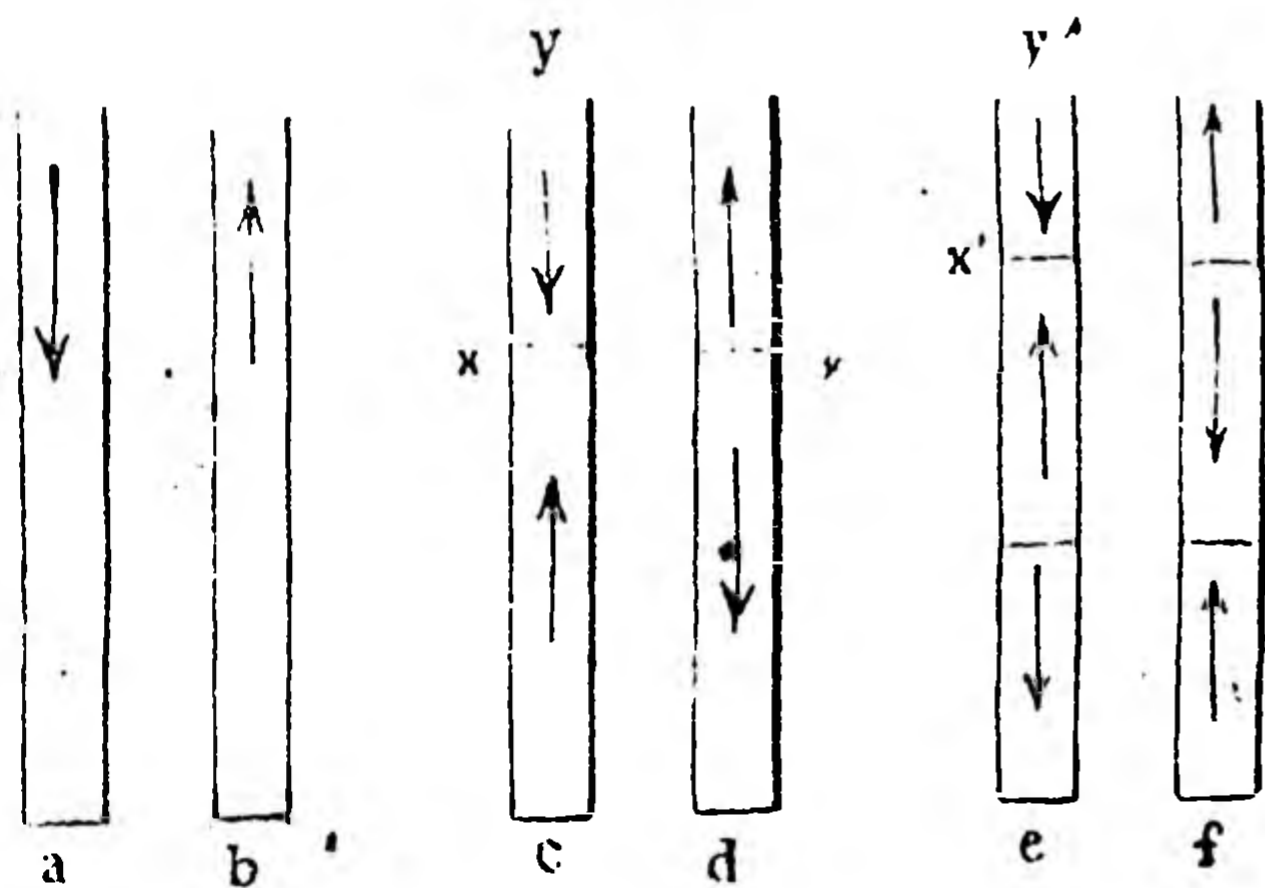
Я беру наши другие камертоны, выбираю для каждого соответствующую ему трубку и нахожу, что звук, который издает трубка вследствие моего дуновения, тот же, как и звук соответствующего ей камертона.

Если сравнить различные трубки, то число колебаний, соответствующее каждой, обратно пропорционально длине трубки. У меня тут три трубки в 60, 30 и 15 см. длины. Я дую слегка над 60-сантиметровой трубкой и заставляю ее звучать; повторяю то же с 30 см. трубкой и получаю октаву первого тона; повторяю то же с 15 см. трубкой и получаю октаву 30-сантиметровой. Ясно, что это и должно быть так; ибо если число колебаний зависит от пути, который должна пройти звуковая волна для совершения полного колебания, то, употребляя трубку двойной длины, я должен получить и вдвое меньшее число колебаний. Вообще число колебаний находится в обратном отношении к длине трубки, по которой пробегает звуковая волна.

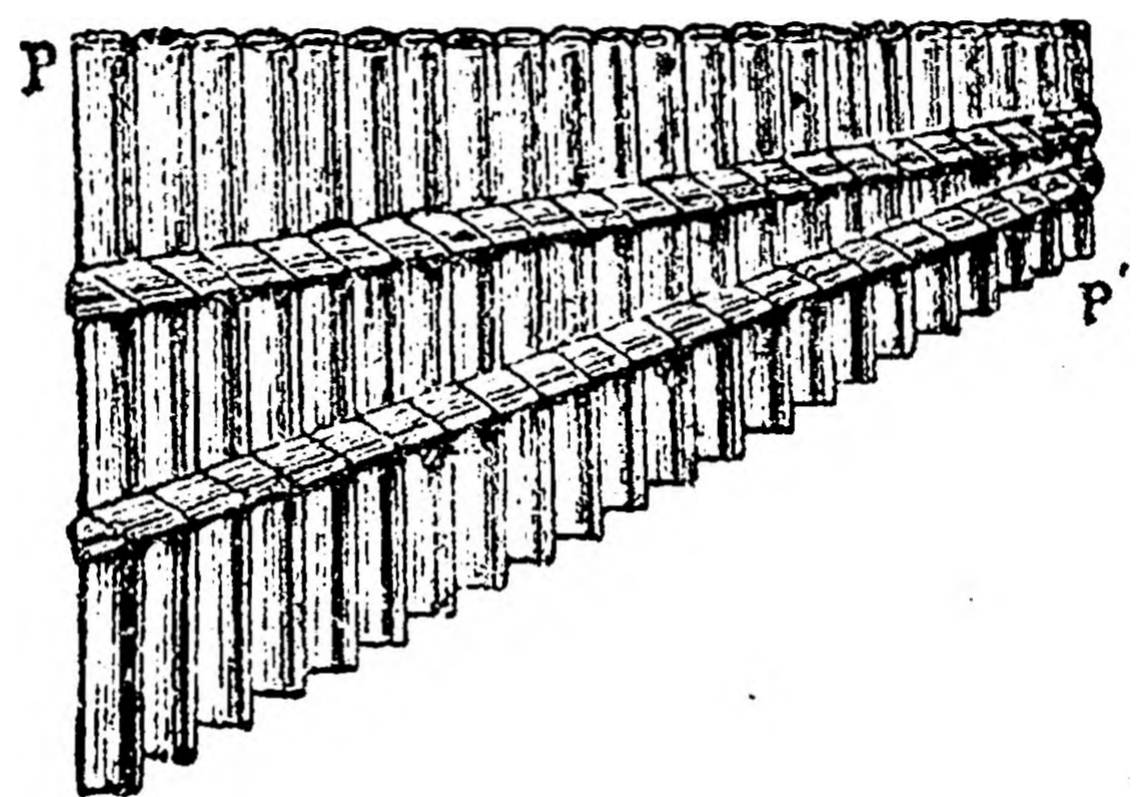
§ 13. Вибрации закрытых трубок; деление их; верхние тоны.

Чтобы примениться к длине трубки, воздушная волна должна обладать известной степенью подвижности или уступчивости. При небольшом размышлении вы поймете, что влияние, которое производит отраженный толчок на ток воздуха, должно зависеть в некоторой степени от силы этого тока. Более сильный ток, точно так же, как и сильнее натянутая струна, требует большей силы для своего отклонения; и раз он отклонен, то движется быстрее; поэтому я должен дуть очень слабо над отверстием трубки для того, чтобы вызвать ее основной тон. При этом я получаю полный и сильный музыкальный тон; если я дую сильнее, то этот тон переходит в шум. Я дую еще сильнее и получаю снова музыкальный тон, но уже более высокий, чем основной тон трубки; это и есть ее первый верхний тон, для произведения которого столб ее воздуха должен был разделиться на две части, образуя один узел. Дую еще сильнее и получаю еще более высокий тон; трубка разделилась теперь на три части, образуя два узла. Дую возможно

ильнее и получаю тон, который выше всех остальных, до сих пор мною
 званных в этой трубке. Фиг. 96 представляет деление воздушного
 столба, соответствующее первым трем верхним тонам трубки, закры-
 той с одного конца. В *a* и *b* трубка не разделена; дно трубки соста-
 вляет единственный узел в этой трубке, и толчок идет от дна ее к
 отверстию и обратно, как показывает стрелка. В *c* и *d*, соответствую-
 щих первому верхнему тону, мы имеем один узел, место которого
 означено пунктиром. К нему доходят толчки и отражаются как от твер-
 дой стены. Этот узел лежит на $\frac{1}{3}$ длины трубки от открытого конца.
 В *e* и *f*, что соответствует второму верхнему тону, мы имеем два узла,
 из которых верхний лежит на $\frac{1}{5}$ длины трубки от открытого конца;
 тогда как остальные $\frac{4}{5}$ делятся вторым узлом на две части. Стрелки
 показывают направление толчков. Спрашивается, в каком отношении
 находятся эти звуки между собой? Мы расстояния между двумя узлами



Фиг. 96.



Фиг. 97.

называли до сих пор пучностями колебаний; поэтому расстояние от
 средних такой пучности до узла есть половина пучности. Вы легко
 удержите в памяти то правило, что число колебаний прямо пропор-
 ционально числу полупучностей, на которые делится столб воздуха
 в трубке. Когда дан основной тон, то мы имеем всего одно отделение
 или одну полупучность. Дно сосуда составляет узел, а отверстие трубки—
 среднюю пучности. При тех делениях, которые мы замечаем в *c* и *d*,
 мы имеем три полупучности, в *e* и *f* пять. Вибрации, соответствующие
 ряду звуков, растут здесь следовательно как нечетные числа 1, 3, 5;
 и если бы мы могли вызвать еще более высокие тоны, то числа коле-
 баний их выразились бы числами 7, 9, 11, 13 и т. д.

Немного подумав, вы убедитесь в этом; ибо время колебания в
c и *d* равно времени колебания в замкнутой трубке длиной в *x y*. Эта
 же длина составляет $\frac{1}{3}$ длины всей трубки; поэтому и колебания в
 ней должны быть втрое быстрее. В *e* и *f* время колебаний одинаково
 с временем колебаний в замкнутой трубке длиной в *x'y'*. И так как эта
 последняя равна $\frac{1}{5}$ длины всей трубки, то и колебания ее должны
 быть в пять раз быстрее. Так получаем ряд чисел 1, 3, 5, который
 продолжился бы и далее в том же порядке, если бы мы захотели тем
 же путем продолжать опыт далее.

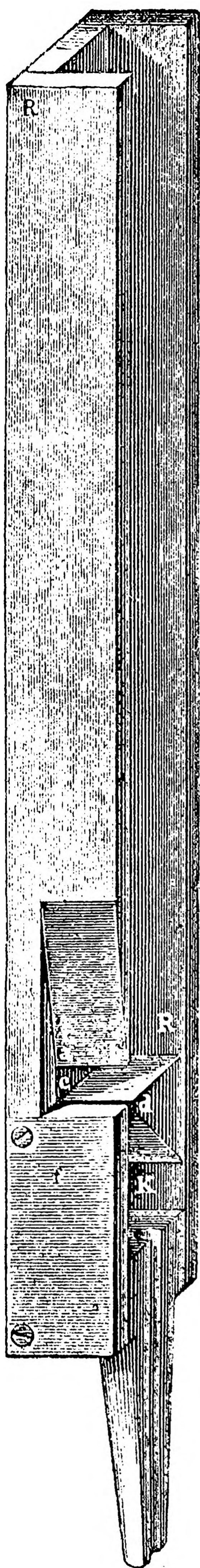
Тут вы можете точно также проверить опытным путем мои слова. Я держу две трубки, из которых одна втрое длиннее другой. Прежде всего даю основной тон длинной трубки и затем следующий тон за этим основным. Колебания обоих тонов должны относиться между собою как 1 к 3. Этот последний тон должен быть, поэтому, одинаковой высоты с основным тоном короткой трубки. Заставляю звучать последнюю и получаю действительно этот тон. Едва ли нужно прибавлять, что стоит взять ряд таких трубок различной длины, для того чтобы составить столь известный античный инструмент — флейту Пана (фигура 97 PP').

Различные деления и отношения верхних тонов в пруте, укрепленном с одного конца, совершенно одинаковы следовательно с воздушным столбом рассмотренной нами закрытой с одного конца трубки.

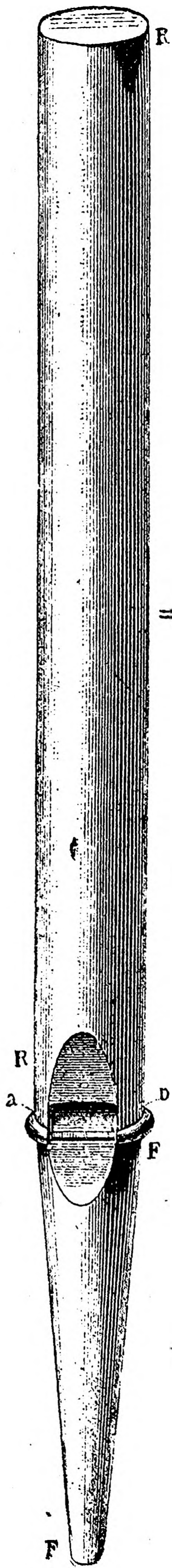
§ 14. Вибрации открытых трубок; деления их и верхние тоны.

От замкнутых с одного конца трубок мы перейдем к изучению трубок, открытых с обоих концов, которые и будем называть открытыми трубками. Сравнивая такую открытую трубку с закрытой с одного конца, но одинаковой длины, мы находим, что звук последней на одну октаву ниже первой. Открытая трубка всегда дает тон на одну октаву выше тона трубки, закрытой с одного конца, но одинаковой с ней длины. Я выбираю из этого ряда открытых трубок четыре, соответствующие по резонансу нашим четырем камертонам. Каждая открытая трубка должна быть вдвое длиннее закрытой с одного конца, для того, чтобы соответствовать тому же камертону и давать одинаковый тон с открытой трубкой. Так как длина закрытой трубки должна составлять $\frac{1}{4}$ длины звуковой волны ее основного тона, то длина открытой трубки должна быть равна половине длины воздушной волны ее тона.

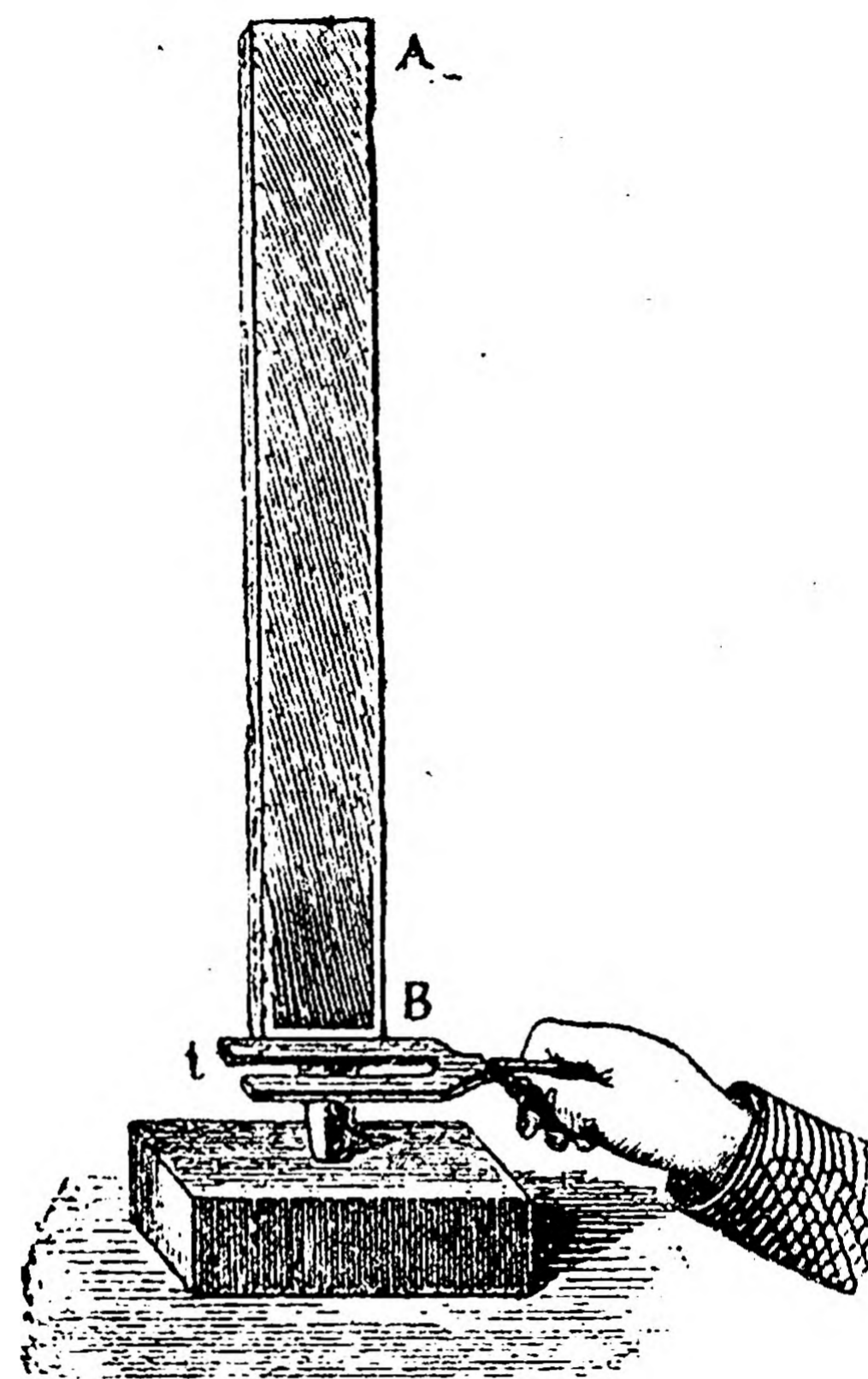
Не совсем легко вызвать в таких трубках вообще продолжительный тон посредством дуновения; но и короткого тона достаточно для опытного уха, чтобы определить его высоту. Последняя всегда равна тону трубки, закрытой с одного конца половиной длины сравнительно с открытой. Есть различные способы для приведения в звуковые сотрясения воздуха в таких трубках. В органых трубках это происходит через направление тонкого слоя воздуха на острое ребро. Этим вызывается сотрясение, которое, передаваясь столбу воздуха, образует музыкальный звук. Вам не трудно будет понять устройство этих открытых органых трубок (фиг. 98); такая трубка представлена здесь в разрезе для того, чтобы вы могли видеть ее внутреннее устройство. Через нижнюю трубку воздух из органного меха входит в камеру *K*, которая, сверху закрытая, имеет только узкую щель *cd*. Через эту щель воздух, сгустившийся в камере *K*, тонкой струей ударяется об острое ребро *ab*, производя здесь шум, некоторые звуковые толчки которого усиливаются резонансом трубки и превращаются таким образом в му-



Фиг. 98.



Фиг. 99.



Фиг. 100.



Фиг. 101.

зыкальный звук. Пространство между ребром *ab* и находящеюся под ним тонкою щелью называется амбушюрой (дульцем). Фиг. 99 представляет закрытую с одного конца трубку такой же длины, как и изображенная на фиг. 98 и дающую поэтому тон на одну октаву ниже первой трубки.

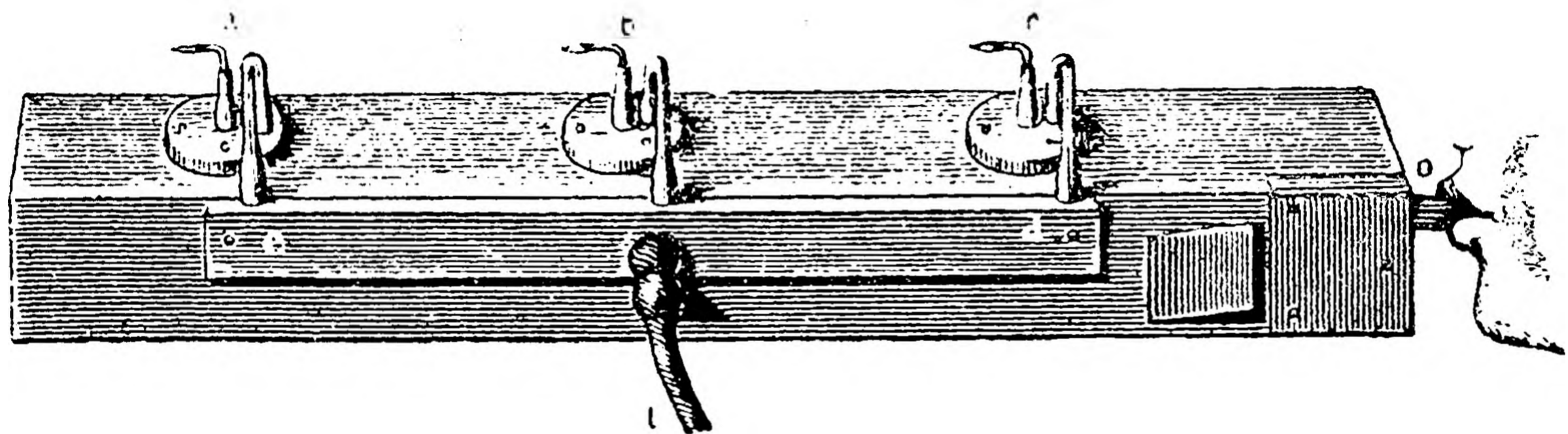
Вместо того, чтобы вдуть в трубку воздух, я могу точно также держать камертон перед отверстием трубки, которой длина соответствует его тону, как это показано на фиг. 100 *AB*. Трубка издает тон. Я беру четыре открытых трубки различной длины и четыре камертона; начинаю с самой длинной: привожу в сотрясение камертон, производящий самые медленные колебания, и держу его против отверстия трубки: трубка звучит сильно. Я дую в нее и нахожу, что тон, который она издает теперь, совершенно одинаков с предыдущим. Повторяю то же со всеми взятыми мною трубками и камертонами: и каждый раз нахожу, что данная трубка издает одинаковый тон, вызываю ли я его посредством дуновения или посредством камертона. Если бы я стал держать все четыре камертона против отверстия одной трубки, то через это вызвал бы в ней четыре воздушных волны различных периодов; тем не менее трубка ответила бы только звукам, соответствующим одному из камертонов: и если бы вместо четырех я взял четыреста камертонов, то и тут трубка отыскала бы соответствующий ей камертон. То же самое делает она, когда мы заменяем камертон струей воздуха, ударяющегося в острый край амбушюры.

Тяжелая колеблющаяся масса камертона не поддается влиянию колебаний воздушного столба трубки. Иначе бывает в тех случаях, когда камертон заменяется струей воздуха. В этом случае трубка, как выше сказано, устраивает сама для себя из струи воздуха камертон, заставляя струю совершать одинаковые с собою колебания.

Мы должны спросить теперь, в каком состоянии находится воздух в открытой органной трубке, когда она издает свой основной тон. В ней происходит то же, что и в пруте, свободном с обоих концов, но укрепленном по середине и приведенном в продольные колебания. Оба конца ее суть места вибраций, а в середине—узел. Откуда же я это знаю? Есть ли какой-нибудь способ определить, где в колеблющемся столбе воздуха лежат узлы и места вибраций? Вильям Гопкинс дал нам следующий способ решить этот вопрос. Вот небольшое кольцо *m*, на котором натянута тонкая перепонка, образующая род барабана, и органная трубка *ab* (фиг. 101), корпус которой сделан из стекла, для того, чтобы мы могли видеть в ней положения всякого предмета. При посредстве нитки я могу перемещать внутри этой трубки наш небольшой барабан по всей длине ее. Теперь барабан находится у самого верхнего края трубки. Я заставляю трубку издавать тон, и вы слышите звучание перепонки. Я опускаю барабан ниже; его тон ослабевает и, наконец, исчезает вовсе. Если бы даже я не видел самой перепонки, то мог бы наверное сказать, что она должна находиться в середине трубки. Она не звучит более, ибо в этом месте воздух находится в совершенном покое. Я опускаю барабан еще ниже, и он снова начи-

нает звучать. Когда я двигаю таким образом перепонку вверх и вниз, то имею два звуковые периода, разделенные между собой моментом покоя. Если бы на перепонку был посыпан песок, то он стал бы прыгать в верхней и нижней половине трубки, между тем как на середине ее оставался бы в совершенном покое. Этот опыт доказывает, что органная трубка, когда она дает свой основной тон, делится узлом на две полупучности.

В каком состоянии находится воздух в точке узла? Опять точно так же, как и в случае прута, свободного на обоих концах и приведенного в продольное колебание, толчки, отражающиеся от обоих концов прута или воздушного столба, встречаются в середине и производят здесь сжатие, затем возвращаются назад и производят разрежение. Таким образом, хотя по середине воздушного столба и нет никаких колебаний, однако, здесь происходит наибольшее изменение плотности воздуха, а на обоих концах частицы его колеблются взад и вперед без заметного сжатия или разрежения.



Фиг. 102.

Если бы звучащая трубка имела посредине отверстие, затянутое перепонкой, то уплотняющийся воздух выдавливал бы эту перепонку наружу, а при разрежении внутреннего воздуха давление внешнего воздуха вдавливало бы эту перепонку внутрь. Вследствие этого перепонка колебалась бы согласно с движениями воздушного столба. Органная трубка, которая у меня в руках (фиг. 102), устроена таким образом, что небольшая горелка газа может быть зажжена против середины трубки, и колебания перепонки могут действовать на ток газа. Две такие же горелки и перепонки расположены в *a* и *c* на половине расстояния между серединой и оконечностями трубки. Эти три горелки снабжаются газом следующим образом: газ поступает через *t* в камеру *ed*, из которой три трубки, показанные на фигуре, проводят его в три отдельные коробки, дно которых и образуют перепонки, находящиеся в соприкосновении с воздухом органной трубки. К этим-то трем коробкам и приделаны газовые горелки. Я зажигаю их и затем дую в трубку так, чтобы она давала свой основной тон. Все три пламени приходят в движение, но среднее всего больше. Я уменьшаю эти пламени, дую снова, и среднее пламя потухает, в то время как оба крайние остаются; я повторяю то же несколько раз сряду и получаю тот же результат.

Когда я дую сильнее в трубку, то она дает свой первый верхний тон; теперь нет более узла посредине. Тут должны быть наибольшие

колебания и вместо того должны образоваться два узла на середине каждой половины трубы. Если это действительно так, то теперь должны потухнуть обе горелки в *a* и *c* и продолжать гореть горелка в *b*. Я повторяю опыт три, четыре раза для того, чтобы убедить вас, что мы действительно получаем такой результат не случайно. Когда я заставляю трубку дать ее первый верхний тон, то пламя остается почти неизменным в *b* и непременно потухает в остальных двух горелках.

Теоретически число узлов как в закрытых с одного конца трубках, так и в открытых может быть неограниченно велико. В закрытых трубках мы начинаем с одной полупучности и затем доходим до 3, 5, 7 и т. д., в то время как числа колебаний возрастают в том же отношении. В открытых трубках мы начинаем с двух полупучностей и доходим до 4, 6, 8, 10 и т. д., а числа колебаний возрастают опять в том же отношении, т.-е. как 1: 2: 3: 4: 5 и т. д.

Поэтому, переходя в органной трубке от ее основного тона к ее первому верхнему тону, мы получаем его октаву. Делая то же в трубке, закрытой с одного конца, получаем звук, который на одну квинту выше октавы. Ни в том, ни в другом случае нельзя получить промежуточного тона. Когда основной тон выражается 100 колебаниями в секунду, то первый верхний тон выражается 300 колебаниями, второй 500 и т. д. Такая трубка не может дать, напр., 200 или 400 колебаний в секунду и точно также открытая трубка, которой основной тон дает 100 колебаний в секунду, не может дать 150 колебаний, а дает 200, 300, 400 и т. д.

В открытых трубках, как и в закрытых с одного конца, число колебаний в единицу времени обратно пропорционально длине трубки. Это следует из того уже не раз высказанного нами положения, что время одного колебания зависит от расстояния, которое должен пройти звуковой толчок для того, чтобы совершить полное колебание. Фиг. 103 в *a* и *b* представляет деление открытой трубки, соответствующее основному тону; *c* и *d*—деления ее, соответствующие первому верхнему тону; а в *e* и *f*—второму верхнему тону. Расстояние *mn* равно половине, *op*—четверти и *st*— $\frac{1}{6}$ всей длины трубки. Эти расстояния относятся следовательно как 1: 2: 3; но высота тона *a* есть та же, как и высота тона закрытой трубки, длина которой равна *mn*. Тон *c* равен тону закрытой трубки длиной равной *op*, а тон *e*—тону закрытой трубки, длиной равной *st*. Так как эти величины относятся между собою как 1: 2: 3, то и числа колебаний должны находиться в том же отношении. Таким образом, по одному роду колебаний мы можем уже заключить, что порядок тонов в открытой трубке должен соответствовать ряду натуральных чисел.

Я нарочно нарисовал трубку *a* (фиг. 103) вдвое длиннее трубки *a* на фиг. 96. Ясно, что в том и другом случае толчок должен пройти одинаковое пространство для того, чтобы совершить полное колебание. Поэтому высота тона той и другой трубки должна быть одинакова. Открытая трубка *an* состоит как бы из двух закрытых трубок с узловой поверхностью в середине ее *m*, служащей для них общим основа-

нием. Такое отношение закрытой трубы к открытой и подтверждается опытом.

На фиг. 103 открытая трубка *an* состоит собственно из двух трубок, разделенных узлом в *m*, которая служит их общим основанием, следовательно простой взгляд на данный род колебания показывает, что отношения колебаний в закрытой и открытой трубке должны быть именно таковы, как их показывает опыт.

§ 15. Скорость звука в газах, жидкостях и твердых телах, определяемая при помощи музыкальных вибраций.

Мы знаем, что относительные скорости звука в различных твердых телах могут быть определены на основании тонов, которые они дают при продольных колебаниях. И знаем точно также, что для составления таблицы абсолютных скоростей звука в различных телах нам нужно только определить отношение скорости звука в каком-либо одном из этих тел к скорости его в воздухе. Теперь мы можем решить эту задачу; ибо мы знаем, что воздушные колебания в открытой органной трубке совершаются точно так же, как и в свободном с обоих концов пруте. На этом основании всякое различие в скорости колебаний такого прута и органной трубы одинаковой с ним длины должно зависеть исключительно от скорости распространения звука в воздухе и в веществе прута. Возьмем, поэтому, органную трубку определенной длины и дающую известный тон; прищем к ней сосновый прут, который бы давал тот же самый тон. Такой прут должен быть в десять раз длиннее нашей органной трубки. Следовательно, скорость распространения звука в сосне в 10 раз превышает скорость его распространения в воздухе. Но абсолютная скорость звука в воздухе равна 331 метрам в секунду; следовательно, абсолютная скорость в сосне равна 3310 метрам в секунду, как это мы уже сказали в первой лекции. Мы обязаны Аладни этим методом определения скоростей звука в различных телах. В первой лекции мы дали также таблицу таких скоростей для различных газов. Каким образом она могла быть составлена? Я убежден, что по некотором размышлении вы сами ответите на вопрос. Стоит только составить ряд трубок, которые, будучи наполнены отдельными газами, давали бы один и тот же тон. Длина этих трубок и показала бы относительную скорость звука в этих газах. Таким образом мы бы нашли, что трубка, наполненная водородом, должна быть вчетверо длиннее наполненной кислородом, для того чтобы давать тот же тон. Откуда следует, что скорость звука в первом случае вчетверо больше, чем в последнем.

Мы также дали таблицу скорости звука в различных жидкостях. Как могло быть это сделано?—Заставляли жидкости протекать сквозь устроенные для этого органные трубки и сравнивали при этом музыкальные звуки трубок. Так мы нашли бы, что для воды трубка должна быть немного длиннее 2 метров, для того чтобы давать одинаковый

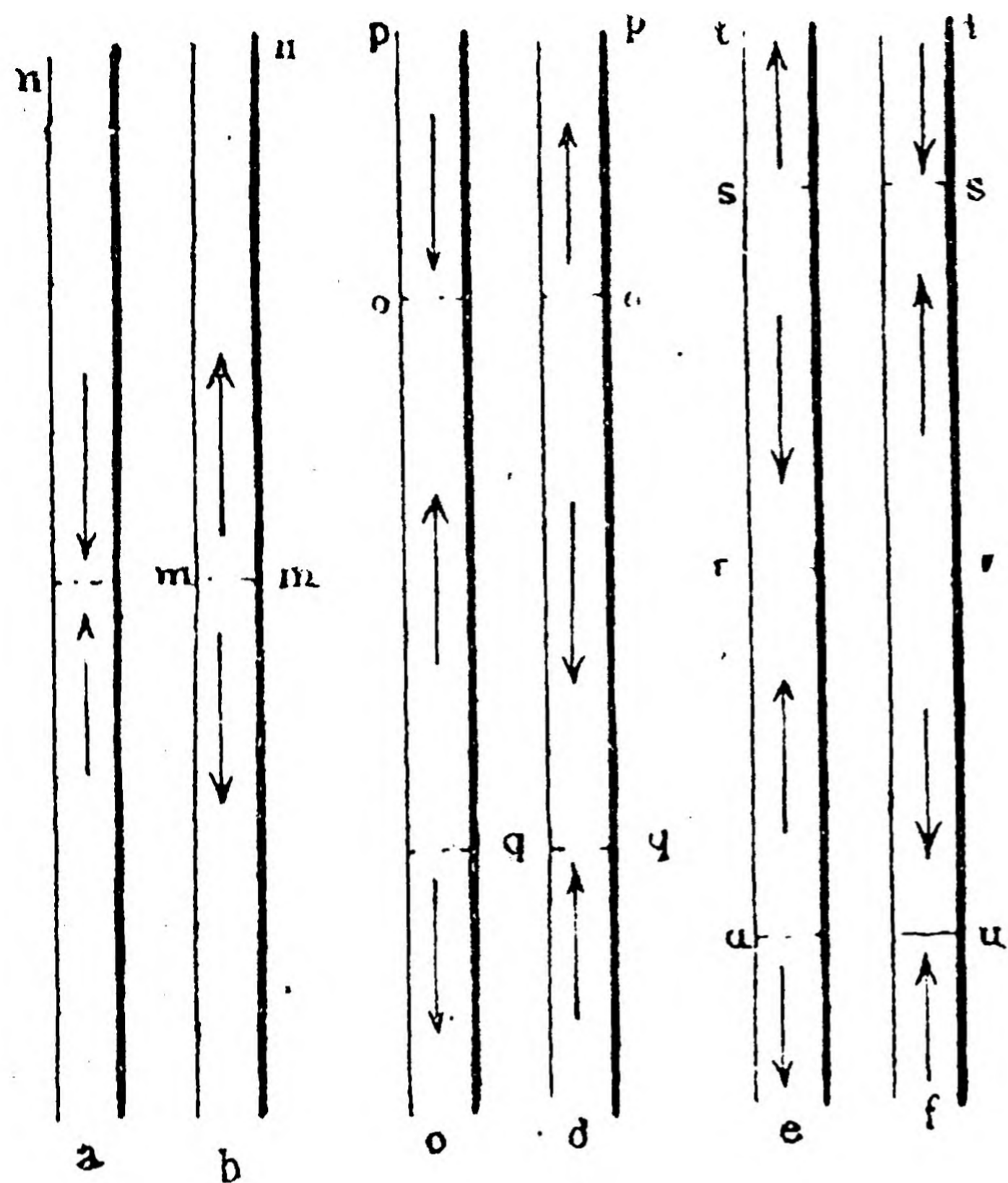
тон с трубкой в $\frac{1}{2}$ метра длины, наполненной воздухом; это показывает, что скорость звука в воде в четыре раза превышает скорость его в воздухе. Цель моя здесь состоит в том, чтобы дать вам ясное понятие о том, каким образом научный опыт приводит к решению, по-видимому, непреодолимых задач. Я не вхожу далее в тонкости самых измерений, ибо это не относится в настоящую минуту к моей цели; но вы легко поймете, что все опыты с газами могут быть произведены с одной и той же трубкой и что скорость звука в каждом газе может быть определена на основании высоты звука. При трубке постоянной длины высота тона или, другими словами, число колебаний должно находиться в прямом отношении к скорости звука. Так, сравнивая кислород с водородом, мы нашли бы тон последнего на две октавы выше первого. И отсюда заключили бы, что скорость звука в водороде вчетверо больше его скорости в кислороде; то же самое применимо и к жидкостям. И в этом случае можно употреблять одну и ту же трубку, и о скорости звука судить по его высоте.

Так как длина открытой трубки, как уже сказано, равна половине ее звуковой волны, то нужно только посредством сирены определить число колебаний, которое совершает трубка в секунду, и это число умножить на удвоенную длину трубки. Тогда мы будем иметь скорость звука в газе, наполняющем трубку. Трубка в 66 см. длины, наполненная воздухом, совершает 256 колебаний в секунду. Длина ее звуковой волны равна 132 см. Умножая 256 на $4\frac{1}{3}$, получим для скорости звука в воздухе 338 метров в секунду. В трубке, наполненной углекислотой, колебания совершались бы медленнее, а в наполненной водородом—быстрее. И эти скорости в том и другом случае могли бы быть нами определены по только-что изложенным правилам. Применение этого способа не ограничивается одними газами. Длина открытой трубки, наполненной водою, точно также равна половине звуковой волны. Твердый прут, свободный с обоих концов, точно также равен половине длины своей звуковой волны, поэтому нам нужно только сосчитать число колебаний такого прута и умножить его на удвоенную длину для того, чтобы получить скорость звука в данном веществе. Вы, без сомнения, удивитесь тем средствам, какими владеет уже естествознание для решения подобных задач; и вы не откажете, конечно, в вашем удивлении знаменитому давнишнему исследователю Хладни, который указал нам, как разрешить их опытным путем.

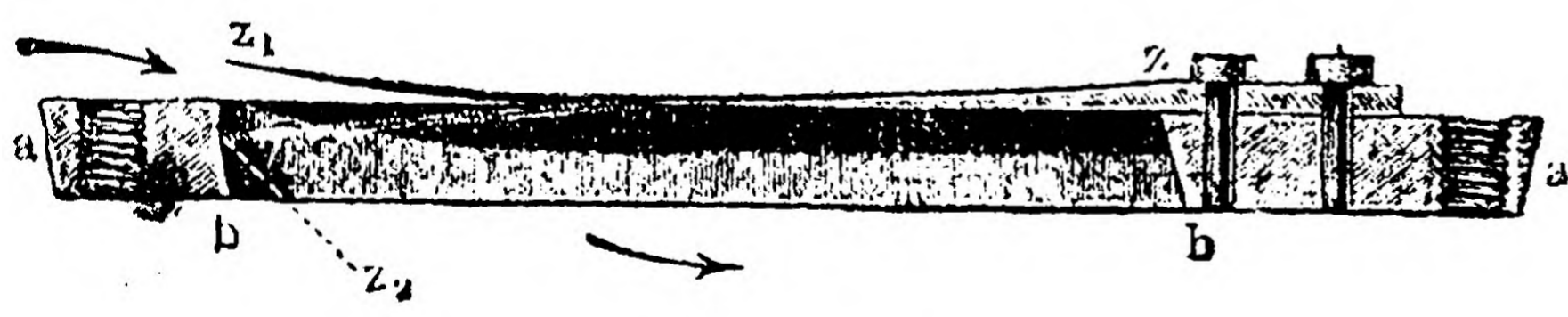
ЯЗЫЧКИ И ТРУБКИ С ЯЗЫЧКАМИ.

В вашей памяти еще, конечно, свежо устройство сирены. Музыкальный звук производится здесь раздроблением тока воздуха на ряд отдельных толчков. То же достигается посредством дрожащих язычков, какие употребляются в фисгармонии, концертно и гармонии. В этих инструментах музыкальный звук производится колебаниями самого язычка, которые передаются сперва окружающему воздуху, а через посредство его нашему уху. Язычок создает только условия, необходимые

для звука, но не производит самого звука. Он превращает непрерывный ток воздуха в ряд прерывистых толчков. Когда такие язычки соединяются с органными трубками, то либо они определяют колебания воздуха в этих трубках, либо, наоборот, колебания воздуха определяют колебания язычков. Если язычки не гибки, то от них зависит колебание воздуха. Если же они гибки, то сами подчиняются этим колебаниям.



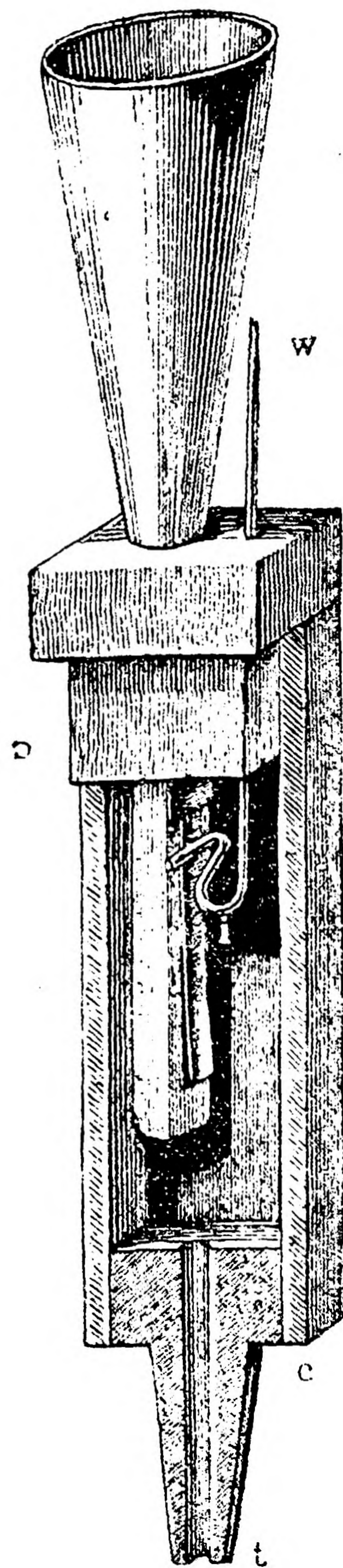
Фиг. 103.



Фиг. 104.



Фиг. 106.



Фиг. 105.

В первом случае для того, чтобы соединение такого язычка с трубкой достигало своей цели, нужно, чтобы длина трубки была такова, чтобы ее основной тон или один из верхних тонов соответствовал колебаниям язычка. Металлический язычок, обыкновенно употребляющийся в органных трубках, представлен на фиг. 104 А в перспективе и В в разрезе. Он состоит из длинной и гибкой металлической полоски *zz*, утвержденной над четырехугольным отверстием, через которое входит воздух. Фиг. 105 представляет способ помещения язычка в органной трубке;

передняя стенка камеры, в которой заключен гибкий язычок, сделана из стекла, чтобы вы могли видеть внутренность камеры. На фигуре камера представлена в разрезе. Над язычком расположена коническая трубка ¹⁾. Проволока *w*, которая, как вы видите, давит на язычок, употребляется для того, чтобы удлинить его и укорачивать, и таким образом изменять в известных пределах скорость его вибраций. Язычки бывают ударяющие и свободные. Первые закрывают отверстие, падая на его края и таким образом периодически открывая и закрывая его. Такие язычки употребляются в органах и других инструментах. Свободные же язычки могут свободно вибрировать между краями отверстия, не касаясь этих его краев. Они употребляются в инструментах, похожих на фисгармонию и гармонию. В органе трубка подчиняется язычку, а в кларнете и гобое, которые имеют гибкие деревянные язычки, язычок подчиняется трубке. Когда колебания язычка вполне совпадают с колебаниями трубки, т.-е. когда те и другие синхронны, то тон необыкновенно чист и силен; но не вредит делу, если совпадение колебаний бывает неполное до некоторых пределов.

Самый простой пример действия язычка представляет соломинка. Приблизительно на расстоянии 2 см. от узла я делаю перочинным ножом надрез на такой соломинке *sr* (фиг. 106), глубиной до $\frac{1}{4}$ ее диаметра, затем поворачиваю лезвие параллельно ее длине и провожу его в этом направлении до самого узла, устраивая таким образом соломенную полоску длиной в один дюйм. Эта полоска *sr'* будет язычком; а сама соломинка—нашей трубкой. Длина ее теперь равна 20 см. Я дую в нее, и вы слышите музыкальный звук. Я отрезаю часть соломинки так, что длина ее теперь равна всего 15 см., и получаю более высокий тон. Уменьшаю соломинку до 10 см., и тон еще более повышается. Уменьшаю ее до 5 см., и получаю весьма резкий пронзительный тон. Во всех этих опытах мы употребляли один и тот же язычок, который должен был подчиняться условиям воздушного столба трубки.

Кларнет есть такая трубка с язычком. Она имеет всего один широкий язык, соединенный с длинной цилиндрической трубкой. Конец, на котором находится язычок, берется между губами и их давлением щель между язычком и его рамкой суживается насколько нужно. Верхние тоны кларнета иные, чем флейты. Флейта есть открытая трубка, кларнет же—закрытая с одного конца, именно с того, на котором находится язычок. Звуки флейты следуют ряду натуральных чисел 1, 2, 3, 4 и т. д., или четных чисел 2, 4, 6, 8 и т. д., тогда как звуки кларнета следуют ряду нечетных чисел 1, 3, 5, 7 и т. д. Промежуточные тоны производятся через открытие боковых отверстий в этих инструментах. Уитстон был первый, который указал это различие между флейтой и кларнетом, и его указания согласуются с позднейшими исследованиями Гельмгольца. В гобое и фаготе мы имеем два язычка, которые накло-

¹⁾ Изображение органных трубок и язычков, как они представлены здесь и в лекции VШ, заимствованы из превосходного сочинения Гельмгольца „Tonempfindungen“. На самых лекциях были употреблены трубки, которые могли разбираться, так что можно было видеть их внутреннее устройство.

нены друг к другу под острым углом, а между ними находится щель, через которую входит воздух. Трубка гобоя конусообразна и верхние тоны ее суть верхние тоны открытой трубки, следовательно другие, чем в кларнете. Посредством сдавливания мягкого конца свежей еще зеленой соломинки можно расщепить ее так, что она будет представлять двойной язычок этого рода, и такая соломинка дает действительно музыкальный тон. В рожке и трубе губы музыканта заменяют язычок. Эти инструменты состоят из длинных конусообразных труб и имеют те же верхние тоны, как и открытые органные трубы. Звук старых инструментов этого рода ограничивались их верхними тонами, и каждый извлекаемый тон зависел от силы дутья и напряжения губ. Теперь же для получения промежуточных тонов между верхними тонами в трубе приделывают клапаны, посредством которых музыкант может изменять в них длину воздушного столба.

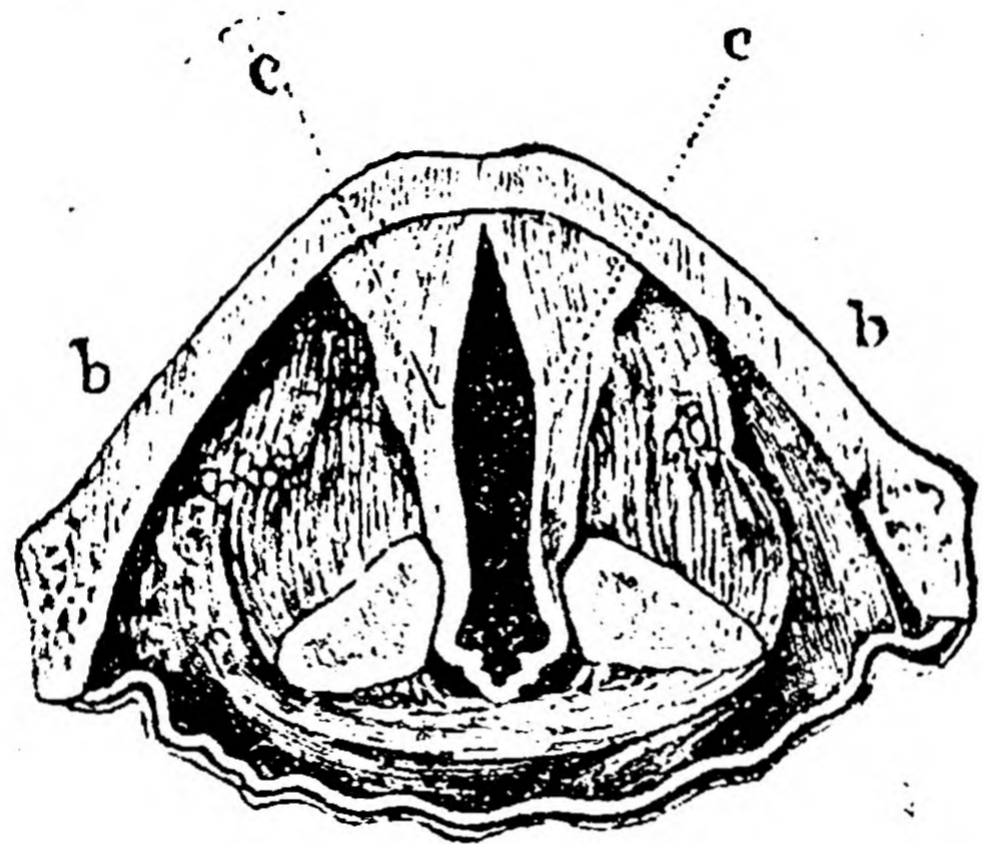
§ 16. Г о л о с.

Самый совершенный из всех инструментов с язычками есть орган голосовой. Он помещается у человека над дыхательным горлом, составляющим воздушную трубу, верхний конец которой почти закрывается особыми эластическими связками. Когда воздух выгоняется из легких через щель, образуемую этими голосовыми связками, то последние приходят в колебание. Через изменение их натяжения скорость колебаний изменяется, а с нею и высота звука. Колебания голосовых связок существенно не зависят от резонанса рта, хотя мы после увидим, что резонанс, усиливая тот или другой звук голосовых связок, оказывает большое влияние на тембр голоса. Мягкость и гладкость голоса зависит от того, что голосовая щель во время колебания связок вполне закрывается в правильные промежутки времени.

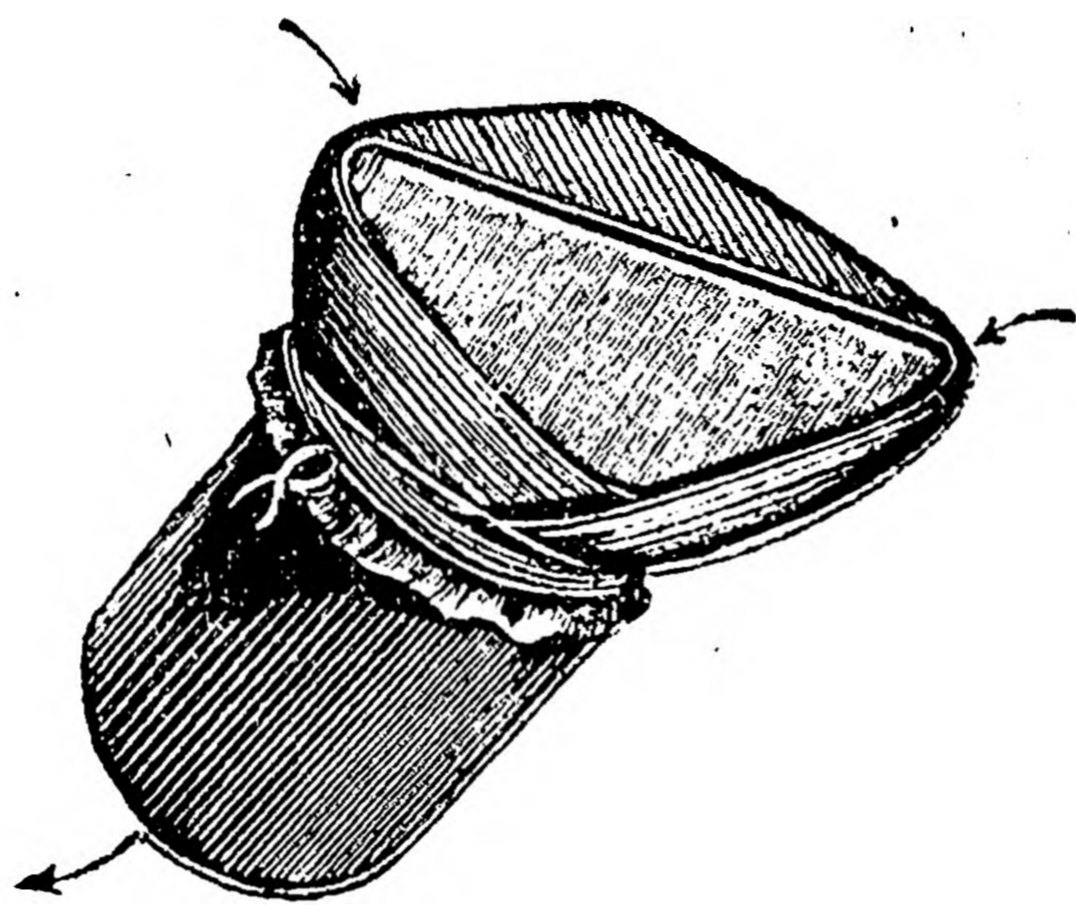
Голосовые связки можно осветить и сделать видимыми в зеркале, которое помещается надлежащим образом в задней части рта. Разные опыты этого рода были произведены синьором Гарсиа. Я пробовал раз в этой самой зале проектировать изображение гортани Чермака, что удалось мне однако только отчасти. Но голосовой орган можно наблюдать прямо посредством ларингоскопа, в котором его движения при пении, разговоре или кашле рисуются весьма ясно. Фиг. 107 представляет этот орган в состоянии покоя. Хрипелость голоса при простуде обуславливается, по объяснению Гельмгольца, мокротой, которая попадает в щель между голосовыми связками и может быть видима посредством гортанного зеркала. Фистула (фальцет), как думает Гельмгольд, происходит вследствие передвижения в сторону покрывающей связки с их нижней стороны и служащего грузом для них слизистого слоя, отчего края голосовых связок делаются острее, а вес их легче, сохраняя ту же упругость, вследствие чего они колеблются быстрее. Скорость и точность, с какою голосовые связки изменяют свое натяжение, форму и ширину щели,—все это вместе в связи с резонансом рта, ко-

торый может также изменяться, делает человеческий голос самым совершенным инструментом.

Знаменитый анатом Иоганн Мюллер пробовал устроить нечто подобное голосовому аппарату, заменяя голосовые связки каучуковыми. Он закрывал отверстие стеклянной трубки двумя такими перепонками, между которыми оставлял щель. Когда воздух прогонялся через эту щель, то связки приходили в колебание и давали музыкальный звук. Гельмгольц советует надрезать для этого трубку (фиг. 108), не под прямым углом к ее оси, но с двух сторон, наискось. Самым легким образом получаются тоны из подобных трубок, если тонкую перепонку каучука обвить вокруг стеклянной трубки так, чтобы она приблизи-



Фиг. 107.



Фиг. 108.

тельно на один дюйм выступала за края этой трубки. Если затем взять эту выступающую часть каучука в двух противоположных точках и растянуть в противоположные стороны, то получается щель, и если через нее вдуть воздух, то получается музыкальный звук, высота которого изменяется с натяжением краев щели.

§ 17. Гласные звуки.

Образование гласных в человеческом голосе было давно предметом научного исследования. Мы можем отличить одну гласную от другой, хотя бы высота и сила звука их были одинаковы. Что же тут производит различие?—В 1779 году этот вопрос был предложен на конкурсе Петербургской академией, и Краценштейн получил премию за удачный способ воспроизведения гласных звуков механическим способом, им предложенным. Одновременно Кемпелен из Вены делал подобные же опыты с более совершенными аппаратами, и затем тем же вопросом занялся Виллис, который превзошел в своих опытах по этому предмету всех своих предшественников. Теория гласных звуков дана была первоначально Уитстоном и исчерпана Гельмгольцем. При настоящем состоянии ваших сведений вам будет вовсе не трудно понять происхождение гласных звуков.

Вы видите в моей руке свободный язычок, вделанный в надлежащую рамку, не связанный ни с какой трубкой. Я приставляю его к акустическим мехам, прогоняю воздух через отверстие и заставляю его

звучать. Теперь я ставлю на язычок конусообразную приставную трубку. Вы замечаете изменение в характере звука, и когда я провожу над открытым концом трубки ладонью руки, то вы не можете не заметить сходства получающегося звука с человеческим голосом. Я закрываю конец трубки совершенно ладонью; затем два раза сряду, быстро один за другим, поднимаю ладонь, и вы слышите слово «мама» так же ясно, как если бы его произносил ребенок. Вместо этой конусообразной приставной трубки я беру более короткую; повторяю тот же опыт: слово «мама» звучит теперь так, как если бы его произносил ребенок с зажатым носом. Таким образом, приставляя к язычку ту или другую трубку, мы можем заставить его подражать особенностям человеческого голоса.

В человеческом голосовом органе язычок заменяется голосовыми связками. В связи с ними находится полость рта, которая может изменять свою форму и удовлетворять условиям резонанса как на основной тон голосовых связок, так и на их верхние тоны. Изменяя положение рта, мы можем соединить основной тон и верхние тоны голоса в различной пропорции. И такие различные сочетания образуют различие гласных звуков. Передо мною ряд камертонов; привожу в колебание один из них и держу перед открытым ртом, изменяя форму полости моего рта до тех пор, пока не получаю сильного резонанса. Тогда отнимаю прочь камертон и, не изменяя положения рта, выдуваю воздух через голосовую щель, получаю гласный тон «у» и никогда никакого другого. Беру другой камертон, держу его перед отверстием рта, изменяя форму последнего, пока не получаю резонанса, удаляю теперь камертон и, выдувая воздух через голосовую щель, — получаю гласную «о»; беру третий камертон, настраиваю мой рот таким же порядком согласно с ним и получаю гласный звук «а». Во всех этих случаях голосовые связки находились в одинаковом положении; они давали тот же основной тон и те же верхние тоны; различие в звуках зависело от того, что в различных случаях резонансом рта усиливались не одни и те же звуки. Дондерс первый показал, что для различных гласных рот должен быть различно настроен.

При образовании различных гласных звуков резонансовая полость рта подвергается, по Гельмгольцу, следующим изменениям.

Для получения гласной «у (и)» губы должны быть сильно вытянуты и сужены. Это положение соответствует самому низкому резонансу, при чем полость рта становится наиболее глубокою, а отверстие рта самое меньшее, к которому только способен рот. В это время основной тон усиливается, а более высокие тона отходят на второй план.

Гласная «о» требует более открытого рта, при этом выступают те частные тоны, которые лежат около « b_1 » (среднее b сопрано).

Для получения «а» мы придаем рту воронкообразную форму, расширяющуюся кнаружи; он настроен при этом на одну октаву выше, чем при «о»; поэтому теперь усиливаются верхние тоны, лежащие близ b_2 (высокое b сопрано): так как при этом рот весьма открыт,

то мы слышим также и другие верхние тоны, хотя в более слабой степени.

При произношении «e», «i» задняя часть полости рта расширена, в то время как передняя часть языка поднимается к нёбу и здесь образует трубку. Эта трубка дает высший резонанс, который возрастает постепенно от «e» до «i», в то время как задняя часть полости рта дает другой более низкий резонанс, который всего ниже при «i».

Особенность гласных заключается, следовательно, в том, что усиленные резонансом частные тоны сохраняют постоянную высоту, тогда как высота основного тона изменяется.

Эти примеры достаточно раз'ясняют вопрос о гласных. Мы можем смешивать различным образом между собою элементарные цвета спектра и через это получить бесчисленное множество сложных цветов. Точно так же и различные элементарные тоны, смешанные между собою различным образом, дают все звуковые оттенки. После того как Гельмгольц разложил человеческий голос на его составные основные части, ему удалось, воспроизводя отдельные тоны посредством камертона и смешивая их надлежащим образом, воспроизводить гласные звуки со всеми их оттенками¹⁾.

§ 18. Телефон Белля.

Возьмем железную полосу и обмотаем ее близ одного из ее концов проволокою, покрытою сверху шелком или бумагою, и приведем в металлическое прикосновение два свободные конца проволочной обмотки. Если после этого взять магнит и двигать полюс его по направлению к обмотанному концу железной полоски, то во время движения магнита вперед в проволочной обмотке появится электрический ток, который затем прекращается, когда будет прекращено движение магнита.

Если магнит удалять от обмотки, то во время его удаления в обмотке тоже возбуждается электрический ток, но идущий в направлении, противоположном направлению тока, возбужденного в первом случае.

Изменим расположение опыта и внутрь спиральной проволочной обмотки вставим вместо железной полоски магнит так, чтобы полоска была вне обмотки; тогда при приближении полоски к магниту и при удалении от него в спиральной обмотке последовательно возбуждаются два тока, по направлению противоположные друг другу, как было и в первом опыте. Чем быстрее бывает приближение и удаление полоски, тем быстрее происходит возбуждение и смена токов.

Самого незначительного движения достаточно для того, чтобы возбудить такие токи. Поместим ножки камертона перед магнитом,

¹⁾ Прибор Гельмгольца, позволяющий производить синтез гласных звуков, состоит из ряда камертонов каждый со своим резонатором. Камертоны могут приводиться в колебание электрическим током. Та или иная комбинация камертонов при соответствующем подборе силы звучания каждого из них воспроизводит с полною отчетливостью все гласные звуки.

вставленным в проволочную спираль. Когда мы посредством смычка заставим камертон звучать, то его вибрации, как бы малы они ни были, возбудят в спирали переменные токи, при чем токи, возбужденные приближением ножки, будут по направлению противоположны тем токам, которые возбуждены удалением ее.

Если токи, таким образом возбужденные камертоном, будут проходить не по одной спирали, но будут проведены во вторую подобную спираль, снабженную вторым магнитом, то притяжение, обнаруживаемое этим магнитом на находящуюся перед ним ножку второго камертона, будет претерпевать изменения, соответствующие токам, идущим вокруг магнита. Ножка, таким образом, будет попеременно то притягиваема, то отпускаема магнитом; и если период ее вибрации будет точно такой же, как у камертона, возбуждающего ток, то второй камертон будет звучать в унисон с первым. Таким образом при посредстве электрических токов вибрации одного камертона могут быть сообщены другому.

Тонкие пластинки и перепонки легко отвечают на звуковые вибрации. Напр., песок, рассыпанный по натянутой перепонке, начинает двигаться и прыгать, когда на перепонку действует звук. Такая способность и нашей барабанной перепонки воспринимать и передавать все вибрации внешнего воздуха дает нам возможность слышать бесконечное разнообразие звуков, доступных нашему слуху. Таким образом, если поместить железную пластинку надлежащей толщины перед одним из наших магнитов, то при направлении звуков нашего голоса на эту пластинку она начнет вибрировать и ее вибрации подобно камертону возбудят электрические токи, и эти токи, если они будут проведены во вторую спираль, окружающую второй магнит, воспроизведут во второй тонкой железной пластинке, помещенной перед этим магнитом, все вибрации, сообщенные первой пластинке. В этом заключается принцип телефона Белля.

Таким образом, действие телефона Белля основывается на способности тонкой железной пластинки воспринимать вибрации человеческого голоса, на способности магнита отвечать на вибрации такой пластинки слабыми колебаниями его магнетизма, на способности таких колебаний возбуждать электрические токи, соответствующие им по силе, по направлению и по продолжительности, и, наконец, на способности этих токов передаваться на расстояния и здесь воспроизводить вибрации, совершенно сходные с теми, которые возбуждали ток.

Эти токи, их происхождение и законы были хорошо известны и до Белля. Известно было также и то, что слабое движение кусочка железа в присутствии магнита достаточно для того, чтобы возбудить эти токи и что они могут передаваться на расстояния. Но до Белля никто не имел понятия о том, что такие токи могут быть возбуждаемы вибрациями столь малыми и сложными, как вибрации членораздельной речи, и что они могут быть соединены и переданы таким образом, что воспроизведут эту речь.

§ 19. Телефон Эдиссона.

В телефоне Эдиссона звуки передаются также через посредство электрических токов, но эти токи возбуждаются и применяются иначе. В 1879 г. действие Эдиссоновского телефона было показано в зале Королевского института. Благодаря любезности почтового ведомства, провод, идущий по воздуху от Королевского института до цирка в Шикадилли, был предоставлен в мое распоряжение. Оба конца этого провода были соединены на указанных станциях с водопроводными трубами и таким образом получалась цепь, по которой мог проходить ток. В цепь был введен на каждом конце воздушного провода обыкновенный угольный телефон (о нем будет сказано ниже), перед которым произносились передаваемые слова. У цирка аппаратом, принимающим слова, передаваемые из Королевского института, был магнитный телефон Белля, который нужно было приставлять к уху, а принимающим аппаратом в Королевском институте был громко говорящий телефон Эдиссона. Племянник Эдиссона, носящий ту же фамилию, находился у цирка, а Адамс оперировал с новым инструментом здесь, в институте. Отрывки из Шекспира, Скотта, Теннисона, Маколея и Бёрнса, произнесенные мною в угольный телефон, были слышны у цирка, и их повторял там Эдиссон, при чем они возвратились к нам и раздавались в зале так отчетливо и громко, что слышны были на всю залу. Не только были слышны таким образом отдельные фразы, но целая поэма Эмерсона была прочитана здесь, а затем возвратилась и повторилась телефоном от слова до слова совершенно верно и явственно. Даже разные восклицания, раздававшиеся при этом, напр., «великолепно», «совершенно удовлетворительно», «очень хорошо», скоро возвращались назад и повторялись телефоном, возбуждая изумление и удовольствие слушателей. Но кажется самым поразительным доказательством чувствительности и гибкой приспособляемости инструмента служит его способность воспроизводить даже свист. Свист Эдиссона у цирка был слышен здесь в институте почти так же явственно, как если бы кто-нибудь свистал тут же на месте. После лекции я уходил из залы, и в это время мое место занимали и разговаривали по телефону некоторые из слушателей. Возвратившись в залу, я опять стал говорить в угольный телефон, и Эдиссон сейчас же заметил разницу и узнал мой голос, потому что на вопрос, кто теперь говорит, он ответил правильно. Таким образом, новый инструмент может воспроизводить с замечательною точностью все своеобразные оттенки и особенности разных голосов.

Эти удивительные эффекты получены посредством аппарата столь простого и, повидимому, столь грубого, что, не слышавши самого аппарата, едва ли можно было бы поверить тому, что он может произвести такое действие. Я постараюсь простым способом объяснить вам его устройство и действие. Вообразите себе, что наблюдатель положил ладонь руки на поверхность вращающегося цилиндра и делает такое нажатие, чтобы происходило значительное трение между цилиндром

и рукою. Положим, что направление вращения таково, что трение тянет наблюдателя к цилиндру, а он в то же самое время ставит свой корпус так, чтобы сопротивляться этому притяжению. Если бы поверхность цилиндра была везде одинаково гладкая, то испытывалось бы одинаковое сопротивление трению и наклон корпуса наблюдателя оставался бы постоянно одинаковым. Но предположим, что различные части поверхности представляют различные степени гладкости с быстрыми переходами от скользкости льда до шероховатости кровельного картона или войлока; тогда ясно, что при переходе от шероховатой и тянущей поверхности к гладкой произойдет быстрое ослабление трения. Сила, которая прежде употреблялась на то, чтобы удержать корпус от наклона по направлению к цилиндру, теперь заставит корпус наклоняться назад, пока рука снова не будет захвачена следующей шероховатой частью поверхности. Очевидно, что цилиндр, вращаясь с равномерною скоростью, в силу попеременного скольжения и захватывания руки заставит корпус наблюдателя двигаться вперед и назад, словом вибрировать.

Эдиссоновский телефон состоит из небольшого вращающегося цилиндра и металлической дощечки, один конец которой прижимается пружиной к цилиндру. Другой же конец этой трущейся о цилиндр дощечки прикреплен к центру тонкой круглой слюдяной пластинки около $\frac{1}{4}$ дюймов в диаметре. Цилиндр сделан из истолченного мела, смешанного с небольшим количеством едкого кали и уксуснокислой ртути; порошок этот спрессован до затвердения в цилиндрической форме. Через центр цилиндра проходит металлическая ось. Она соединена с одним концом вторичной проволоки маленькой индукционной спирали, а другой конец этой проволоки соединен с упомянутой металлической дощечкой, прижатой к цилиндру. Цилиндр, если его смочить, становится во всех отношениях электролитом и каждый проход тока производит в цилиндре определенное количество химического разложения, вполне соответствующее силе и продолжительности тока.

От небольшой вольтовой батареи ток проходит по первичной проволоке маленькой индукционной спирали, а из нее идет в угольный телефон, находящийся у меня, а отсюда в цирк Пикадилли и оттуда возвращается под землею в институт. Пока этот ток идет без всякого изменения его силы, он не производит никакого действия на Эдиссоновский телефон. Рука, вращающая рукоятку мелового цилиндра, испытывает сопротивление, и слюдяная пластинка втягивается внутрь с постоянно неизменной силой. В угольном телефоне, употребляющемся в этих опытах, тонкая лепешечка нежной ламповой сажи помещается между двумя тонкими платиновыми пластинками, в одну из которых ударяют звуки голоса. Попеременное сжатие и расширение ламповой сажи изменяют ее электрическое сопротивление, а эти изменения производят колебания тока, соответствующие вибрациям голоса. Каждое колебание, произведенное таким образом в первичном токе, возбуждает индуцированный ток в небольшой вторичной спирали, а такой возбужденный индуцированный ток производит соответствующее ему количе-

ство химического разложения на общей поверхности мелового цилиндра и металлической дощечки. Вследствие такого разложения получается на цилиндре смазывающее вещество под дощечкой, которая тотчас же начпнает скользить, и потому слюдяная пластинка, освободившись от натяжения дощечкой, выпрямляется, т.-е. подвигается кнаружи. Но такое скольжение продолжается только одно мгновение и за ним следует опять притяжение от трения, которое снова тянет слюдяную диафрагму внутрь. Далее опять скольжение и притяжение, вследствие чего она вибрирует. Таким образом, вибрации голоса, его основные и верхние тоны, прежде всего действуют на первичный ток и каждое изменение этого тока сопровождается соответствующим разрядом вторичных токов в индукционной спирали. Эти индуцированные разряды своим электролитическим действием вызывают и прекращают скольжение металлической дощечки, заставляя ее вибрировать продольно в соответствии с голосовыми вибрациями. Эти последние удивительно точно и со всеми своими качествами передаются слюдяной пластинке, а от нее окружающему воздуху. Таким образом, на слюдяную пластинку можно смотреть, как на увеличенную барабанную перепонку, которая тоже подобно пластинке втягивается внутрь косточками уха. Кажется просто чудом, что слюдяная пластинка может воспринимать и воспроизводить с такою силою и отчетливостью разнообразнейшие вибрации, производящие свист и говор, но это чудо было предвосхищено художником более древним, чем Эдиссон, в устройстве самой барабанной перепонки.

Зачаточное наблюдение, если можно так выразиться, из которого вырос громко-говорящий телефон, было сделано Эдиссоном в 1872 г., когда он производил опыты с влажной бумагой в видах телеграфных применений. Он тогда уже заметил происходящее от электролиза скольжение, которое он так прекрасно применил теперь на деле. Смазывающим веществом на цилиндре вероятно служит водород ¹⁾.

§ 20. Микрофон.

Устройство микрофона основано на том же принципе, который лежит в основании устройства угольного телефона, и действие микрофона тоже зависит от быстрых колебаний вольтова тока, производимых изменениями сопротивления ему. Но микрофон все же особый инструмент и употребляется для иных целей. Он изобретен Юзом. В чашечку, выдолбленную в куске угля, ставится стоймя заостренная угольная палочка и, чтобы она не падала, на нее сверху накладывается другая угольная чашечка. Чашечки не плотно нажимают на палочку, так что она может свободно дрожать при малейшем сотрясении, производимом акустически или механически. Обе угольные чашечки, поддерживающие

¹⁾ Несмотря на все остроумие идеи Эдиссона, положенной в основу устройства его телефона, последний оказался мало пригодным и дальнейшего развития не получил. В настоящее время почти исключительно пользуются телефоном Белля, соединенным с микрофоном.

палочку, соединены с полюсами небольшой вольтовой батареи, в цепь которой включен и телефон. Ток от одного полюса батареи идет через угольную палочку и от нее через телефон возвращается к другому полюсу. Пока нет изменений в контакте (соприкосновении) угольков, ток остается постоянным и в телефон ничего не слышно. Но малейшее содрогание стойки стоящего уголька изменяет контакт, действует на ток, колебания которого тотчас же дают себя чувствовать в телефоне. Дрожание палочки может быть вызвано неслышной ездой экипажей на улицах, говором, трением щетки и даже ходьбою большой мухи. Отсюда произошло и название инструмента (аналогично названию микроскопа, дающего возможность видеть невидимо малые предметы). Не нужно, впрочем, думать, будто здесь происходит увеличение звуков, собственно как звуков, а действие происходит от механического дрожания угольков, которые, изменяя силу тока, изменяют соответствующим образом силу телефонного магнита, заставляя этим силу его притяжения изменяться и возбуждать в телефоне Белля вибрации тонкой железной пластинки, служащие ближайшим источником звука ¹⁾.

§ 21. Фонограф.

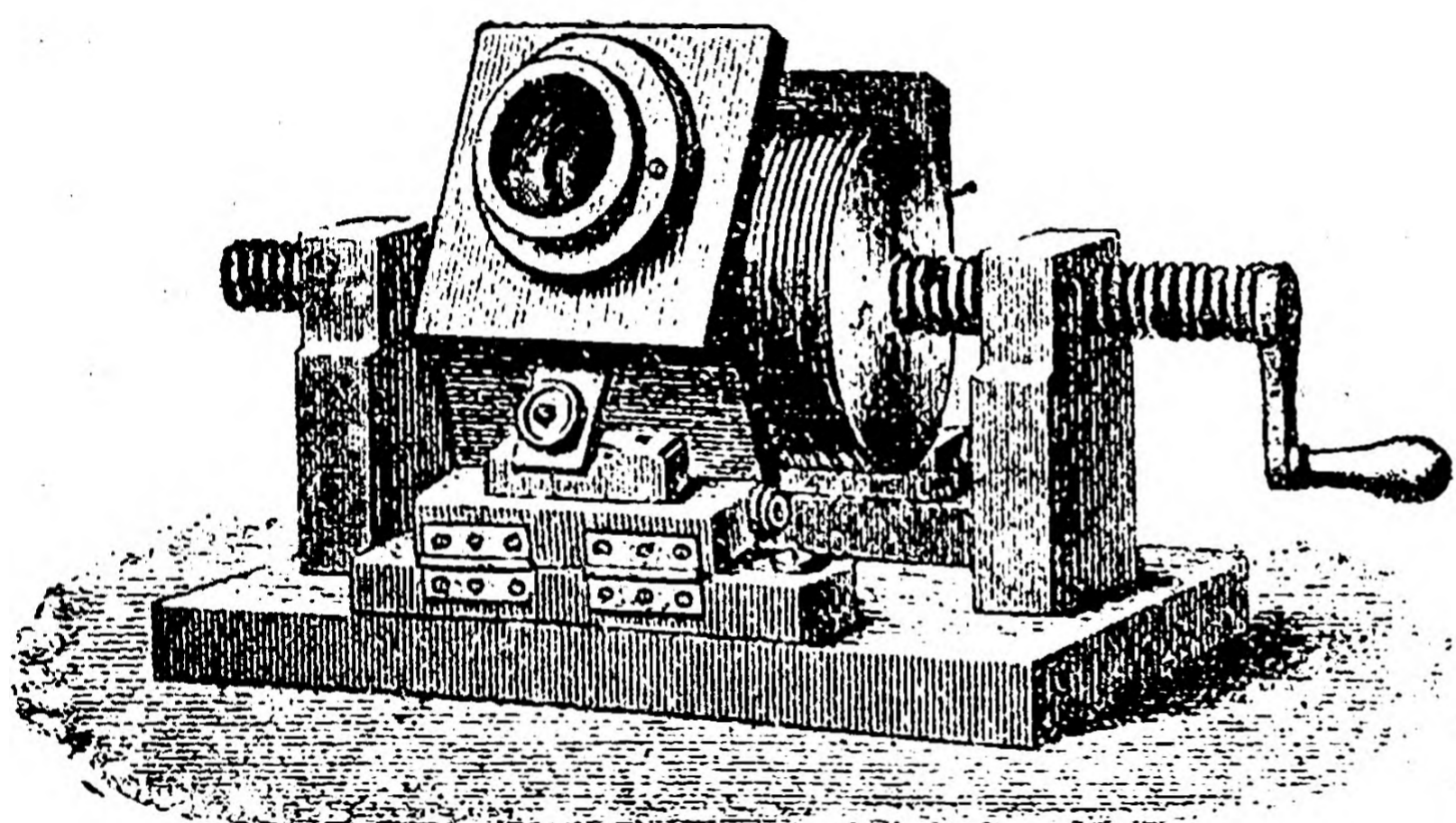
Этим инструментом мы обязаны изобретательному гению Эдиссона. Фиг. 109 представляет изображение фонографа в перспективе, а фигура 110 в разрезе.

В этом изображении *C* есть медный цилиндр, имеющий на всей своей поверхности от одного конца до другого спиральную бороздку или винтовой нарез. Он держится на оси (ясно видной на фиг. 109), длина которой около трех раз больше его длины. На конце оси находится рукоятка, и на пространстве между нею и цилиндром нарезан винт с нарезками, равными нарезкам на цилиндре, т.-е. по 3 на сантиметр. Ось вращается в двух медных стойках, из которых одна имеет внутри винтовой нарез, соответствующий винту на оси.

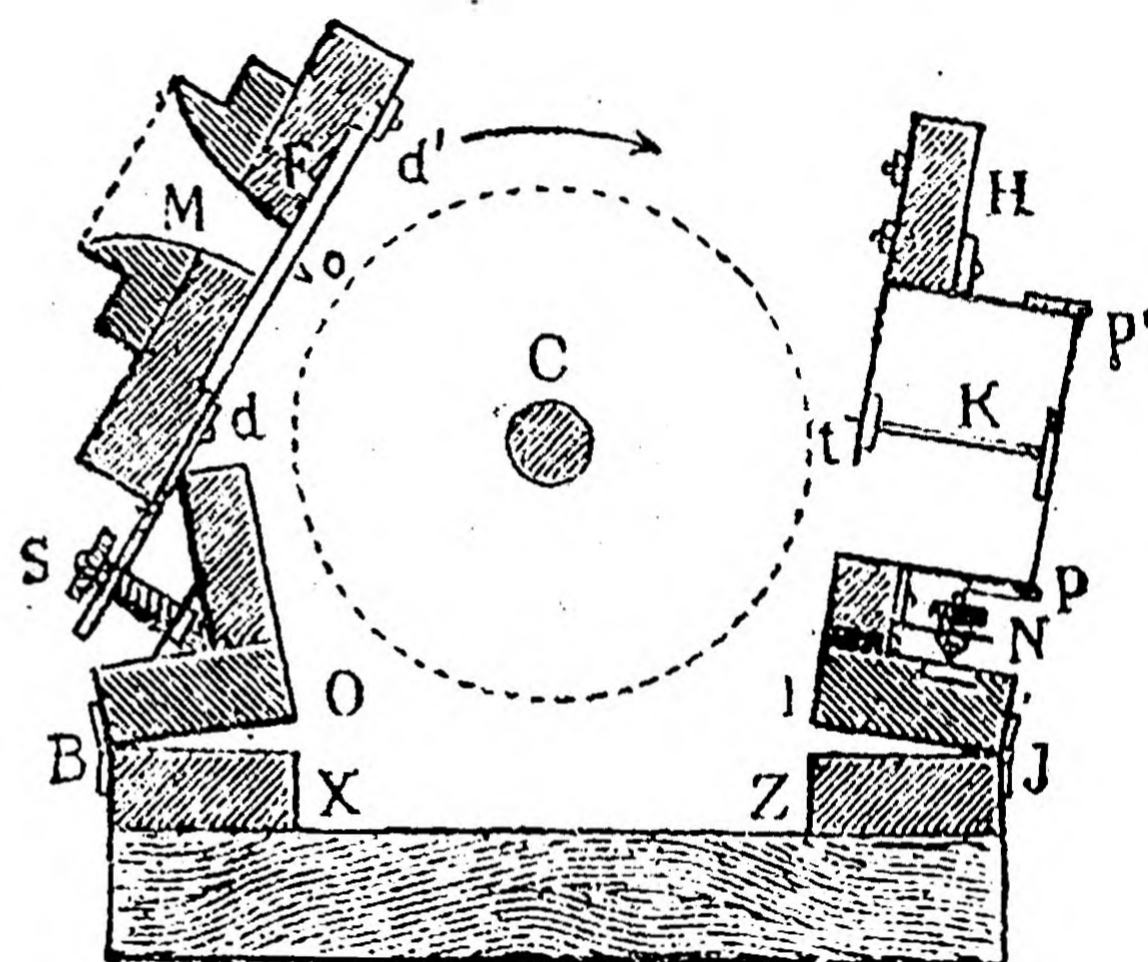
Звук голоса принимает диафрагма *dd'* (фиг. 110), состоящая из весьма тонкого железного листка. При помощи медной оправы она укреплена под неглубоким круглым углублением, прорезанным в деревянной рамке *F*. Посредине углубления находится круглое отверстие, ведущее в мундштук *M*. Перпендикулярно к железной диафрагме, в ее центре *o* укреплен короткий кусок закаленной стальной проволоки, сточенный в тупое острие и тщательно отполированный.

¹⁾ В настоящее время угольный стерженек микрофона заменяется угольным порошком; при давлении на порошок проводимость его сразу же в значительной мере возрастает. В силу этого его свойства каждый толчок мембраны микрофона дает начало усилению тока, который и переносится на проволоке, заставляя звучать телефон приемного аппарата. Чувствительность угольного порошка велика лишь до тех пор, пока он рыхлый. Иногда случается, что микрофон отказывается работать, так как угольный порошок в нем слежался. При этом бывает достаточно лишь несколько встряхнуть телефонную трубку или постучать по ней, чтобы чувствительность микрофона тотчас же восстановилась.

С другой стороны цилиндра тоже находится другая диафрагма pp' , воспроизводящая звуки голоса. Она сделана из растительного пергамента и натянута вроде барабана на небольшую медную трубку в $2\frac{1}{2}$ сантиметра длины и в 7 сант. в диаметре, укрепленную в деревянной оправе II . К концу стальной пружины прикреплено стальное острие t , по своему положению совпадающее с круглым отверстием в H . Тонкая сосновая палочка K имеет на своем конце, обращенном к пружине, маленькую подушечку из вулканизированного каучука, а на другом конце несет кружок из тонкого железного листа полдюйма в диаметре. Давление пружины таково, что держит диафрагму слегка выпуклою.



Фиг. 109.



Фиг. 110.

Четырехугольная рама K , держащая тонкую железную диафрагму, принимающую звуки, прикреплена на петлях к куску дерева, соединенному неподвижно с O , а O опять соединено на петлях B с X . При помощи этих петель и винта S острие o может быть приближено к цилиндру настолько, что оно войдет в бороздку на его поверхности. Расположение частей на другой стороне цилиндра почти такое же. В j и J находятся петли, а в N —винтовая гайка и пружина для регулирования глубины, до какой t входит в бороздку.

Инструмент приводится в действие таким образом. Обе диафрагмы откидываются назад, а на цилиндр наклеивается кусок толстого листового олова и затем посредством вращения рукоятки цилиндр подвигается вправо насколько возможно. Диафрагмы приводятся в положение, показанное на фиг. 110; деревянный брусок O поворачивается настолько, чтобы острие нажимало на оловянный лист, и цилиндр вращают на полоборота. Затем dd' слова отодвигают, и если бороздка, произшедшая от движения оловянного листа под острием, окажется или слишком глубокою или слишком мелкою, то винтовая гайка S поворачивается вправо или влево. Когда достигнута надлежащая глубина—что можно узнать только по опыту—то же самое проделывается и с другой диафрагмой, и инструмент готов к действию. Острие o наставляется на оловянный лист, а диафрагма pp' держится отодвинутою, как показано в фиг. 110. Затем рукоятка вращается равномерно и со скоростью около одного оборота в секунду и в то же самое время отчетливо произносятся слова в мундштук M . Когда речь кончена, dd'

отодвигают от оловянного листа и на нем оказывается бороздка с зазубринами в виде возвышений и углублений, которые произведены движениями острья, соответствовавшими вибрациям голоса. Затем цилиндр приводится в свое первоначальное положение, и острье t наводится на бороздку в оловянном листе. Опять вращают рукоятку, причем зазубрины на листе проходят под острием t . Первоначальный процесс происходит в обратном смысле: зазубрины сообщают второму острию движения, вполне сходные с теми, которые совершало первое острье, производя зазубрины на листе. Вибрации t через палочку K сообщаются пергаментной диафрагме pp' , а ею передаются воздуху, и таким образом получаются звуки, по высоте и по всем качествам подобные тем, которые приводили в движение железную диафрагму. Для усиления и отчетливости звука на трубку pp' наставляется конус из толстого картона или тонкого железного листа.

Для образования зазубрин и для воспроизведения звуков может быть употребляема одна и та же диафрагма, и действительно некоторые инструменты построены на этом принципе. Но устройство, описанное выше, как оказывается, дает лучшие результаты. За это описание я обязан Шельфорду Бидуэллю.

§ 22. Опыты Кундта; новые способы определения скорости звука.

Вы уже слышали звуки стеклянной трубки, открытой с обоих концов, и знаете деления ее в случае продольных колебаний. Вы знаете, что когда она дает основной тон, то обе половины ее быстро удлиняются и сокращаются. Если бы трубка была закрыта с обоих концов, то она пришла бы также в колебания, которые бы передались столбу воздуха, заключенному в трубке, и если бы скорость звука в воздухе и стекле была одинакова, то этот столб воздуха колебался бы созвучно с трубкою. Но так как скорость звука в воздухе гораздо меньше, чем в стекле, то для того, чтобы колебаться с одинаковой скоростью с трубкой, воздушный столб в ней должен разделиться в это время на несколько колеблющихся отделов надлежащей длины. В весьма интересном исследовании, в *Annalen Poggendorfa*, Кундт в Берлине показал, как эти отделы могут быть сделаны видимыми. Я беру немного порошка ликоподия, всыпаю его в эту трубку двухметровой длины так, чтобы он распределился по всей длине трубки. Теперь я закрываю трубку с обоих концов, беру ее за среднюю пальцами, или, еще лучше, утверждаю в клещах и затем тру мокрым сукном одну половину трубки. Мгновению порошок, который пристал к внутренней поверхности трубки, падает на дно ее и образует там рисунок, представленный на фиг. 111 и показывающий, как разделился воздушный столб в трубке. Каждый узел здесь окружен кольцом порошка, между тем как между двумя такими кольцами на пространстве одной пучности порошок располагается поперечными линиями.

Вы легко убедитесь, что мы здесь производим тот же опыт, который Мельде производил с колеблющейся струной. Когда струна была слишком длинна для того, чтобы колебаться как целое, она применялась к колебаниям камертона, разделяясь на несколько колеблющихся отделов; но длина пучности всегда равна половине длины волны; следовательно в нашей трубке мы имеем 16 полуволн (рисунок представляет их только четыре). Длина же нашей трубки, в то время, когда она производит продольные колебания, представляет также половину длины звуковой волны в стекле; следовательно в настоящем случае, при одинаковом числе колебаний, длина полуволны в стекле в 16 раз больше длины той же полуволны в воздухе. Другими словами, скорость звука в стекле в 16 раз больше скорости его в воздухе. Этим способом одним движением сукна по трубке мы решаем в высшей степени важный вопрос. Как показал Кундт, мы можем не ограничиваться только воздухом, мы можем ввести в трубку всякий другой газ и определить скорость звука в нем по отношению к стеклу тем же способом. Если введем водород, то число пучностей будет меньше, а для угольной кислоты больше, чем для воздуха.

По известной скорости звука в воздухе, сравнивая ее с длиной одного из показываемых порошком делений, мы можем немедленно определить число колебаний, которые делает сама трубка в секунду. Я беру трубку за середину и тру мокрым сукном одну из ее половин. Длина каждого из отделов, образуемых порошком, составляет $6\frac{1}{4}$ см.; следовательно длина воздушной звуковой волны равна $12\frac{1}{2}$ см. Скорость звука в воздухе при настоящей температуре равняется 340 метрам в секунду и на этом пространстве поместилось бы 2720 наших звуковых волн. Это число показывает следовательно число колебаний в секунду, совершаемых трубкой в настоящем случае.

Вместо того, чтобы брать трубку за середину, мы можем взять ее за всякое другое место. Если я ее беру, например, на $\frac{1}{4}$ длины от одного из концов и тру, теперь мы знаем, что она разделяется на 3 колеблющиеся части двумя узлами. Мы знаем также, что тон, который теперь является, составляет октаву того, который дает трубка, взятая за середину, ибо колебания теперь должны быть вдвое быстрее. Следовательно теперь та же трубка вместо 16 дает 32 отдела, обнаруживаемые лycopодием. Кундт наполнял 4 трубки: одну—воздухом, другую—углекислотою, третью—светильным газом и четвертую—водородом. Он тер их таким образом, чтобы образовалось два узла, и находил следующее число делений, образуемых порошком в трубке.

Воздух	32	Углекислота	40
Светильный газ	20	Водород	9

Если взять скорость звука в воздухе за единицу, то эта скорость выразится следующими дробями:

$$\text{Углекислота. } \frac{32}{40} = 0,8. \quad \text{Светильный газ. } \frac{32}{20} = 1,6, \quad \text{Водород. } \frac{32}{9} = 3,56.$$

Из таблицы, которую я дал в первой лекции, оказывается, что Дюлон совершенно другим способом определил скорость звука в углекислоте—0,86, а в водороде—3,8 раз больше скорости его в воздухе. Дюлон наполнял для этого органические трубки соответствующими газами. Мы пришли почти к тем же числам теперь гораздо более простым способом. Если посыпать внутреннюю поверхность таких трубок порошком, наполнить их надлежащими газами и запаять концы, то можно сохранить их в таком виде на неопределенное время. Стоит встряхнуть такую трубку так, чтобы внутренняя ее поверхность покрылась по всей длине порошком, и тогда одного движения мокрым сукном по трубке достаточно для того, чтобы вызвать деления, показывающие скорость звука в данном газе.

Савар нашел, что вокруг продольно колеблющейся трубки или прута образуется спиральная узловая линия; а Зебек показал, что эта линия образуется не вследствие продольных, а вследствие появляющихся в то же время вторичных поперечных колебаний. Эта спиральная узловая линия легко спутывает рисунок делений, о котором мы только что говорили. Поэтому желательно было устранить ее вовсе. Кундт достиг этого тем, что он вызывал продольные колебания в одной трубке, между тем как деления образовывались в другой, в которую первая входила как поршень. Фиг. 112 представляет стеклянную трубку в 2 м. длины и в 75 см. в диаметре. Один конец этой трубки закрывается подвижной пробкой *b*, в другой конец вставлена пробка *kk*, через которую проходит более узкая трубка *Aa*, которая плотно обхватывается пробкой *KK*. Конец внутренней трубки *Aa* также закрывается пробкой *a*, которая почти выполняет внутренность широкой трубки, но может двигаться в ней все-таки настолько свободно и с столь малым трением, чтобы не мешать колебаниям самой трубки. После того как внутренняя поверхность трубки между *a* и *b* покрылась легким слоем порошка, я быстро тру мокрым сукном трубку *AK* и на пространстве между *a* и *b* порошок немедленно делится на ряд пучностей. Если длина столба *ab* равна длине трубки *Aa*, то число пучностей равно 16. Если же, как показано на рисунке, *ab* равно всего половине *Aa*, то число пучностей равно 8. Мы должны заметить, что этот способ может иметь весьма обширное применение; вместо стеклянной трубки *Aa*, мы можем взять трубку из другого вещества, напр., дерева или металла, и таким образом определить скорость в нем звука относительно воздуха. Я беру, вместо стеклянной, трубку из желтой меди такой же длины и тру ее накалифоленным сукном; вследствие этого пространство *ab* делится на число пучностей, соответствующее колебаниям этого металла. Таким образом, Кундт брал медные, стеклянные и латунные прутья, и его опыты доказали, что этот способ измерения допускает большую точность. Три отдельные опыта, произведенные над латуною, дали следующие результаты, если принять скорость звука в воздухе за единицу:

1-й опыт 10,87, 2-й опыт 10,87, 3-й опыт 10,86.

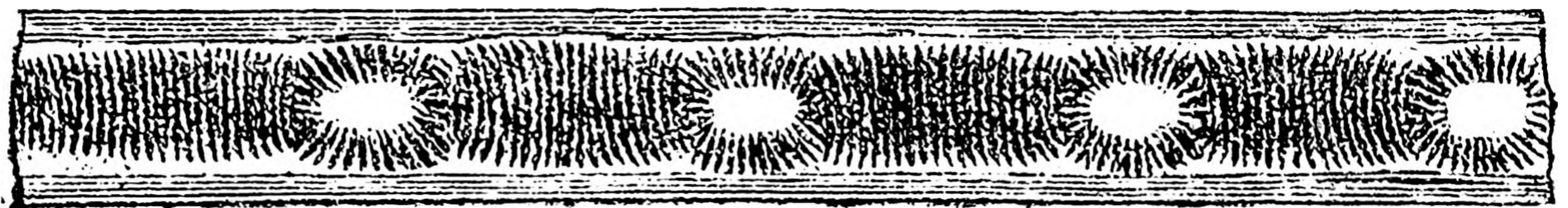
Совпадение здесь необыкновенно близкое. Для того, чтобы показать, какую степень точности допускает этот метод, я прибавлю, что длина образуемых порошком отделов при 27 испытаниях колебалась между 43 и 44 миллиметрами, ни разу не достигая совершенно ни 43, ни 44. Отношение длины металлического прута к длине одного из таких отделений и показывает в данном случае отношение скорости звука в металле и воздухе.

Три подобные же опыта дали для скорости звука в стали следующие числа:

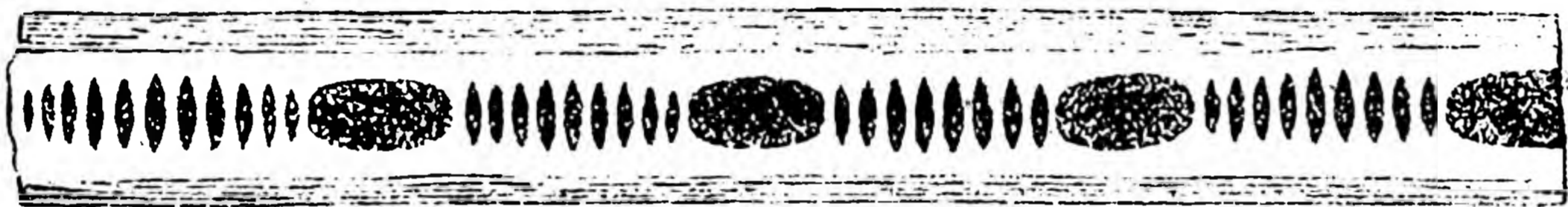
1-й опыт 15,34, 2-й опыт 15,33, 3-й опыт 15,34.

Тут совпадения столько же совершенны, как и при опытах с латушью. Для стекла тем же способом найдено: 15,25¹⁾.

Наконец, для меди найдено: 11,96.



Фиг. 111.



Фиг. 113.



Фиг. 114.

Фиг. 112.

Эти результаты как нельзя более согласуются с полученными посредством других методов. Вертгейм нашел, например, для скорости звука в стальной проволоке 15,108; Кундт—15,34; далее Вертгейм для скорости звука в меди—11,17; Кундт—11,96. Разность этих чисел не столь велика, чтобы ее нельзя было отнести к разности материалов, употреблявшихся обоими наблюдателями.

Длина воздушного столба бывает кратной длины волны или не бывает точной, смотря по скорости колебания прута. В последнем случае порошок располагается в каждом отделении, как показывает фиг. 113. Но когда при посредстве подвижной трубки длина воздушного столба

¹⁾ Скорость в стекле меняется в зависимости от сорта стекла, и потому результат каждого опыта справедлив только относительно того стекла, которое было при этом употреблено.

приводится в точное кратное отношение к длине волны, то порошок оставляет вовсе колеблющиеся промежутки и скопляется в узлах, как показывает фиг. 114.

§ 23. Об'яснение затруднения.

При этом рождается следующее затруднение. Закрытый конец трубки *b* (фиг. 112) представляет, конечно, такое место, в котором нет колебаний, так что здесь, как и в узлах, должно происходить скопление порошка; но в тех случаях, когда длина воздушного столба составляла кратные длины волны, Кундт находил постоянно такое скопление порошка в точке *a*. Таким образом казалось, будто то место, с которого началось все движение, было, повидимому, неподвижно. Кундт обратил внимание на это обстоятельство, но не об'яснил его. Я полагаю, что мы будем теперь в состоянии сделать это. В третьей лекции я имел уже случай заметить, что, строго говоря, узел не есть место совершенного покоя, а только место наименьших колебаний и что сильные колебания могут образоваться там, где слабые колебания, которые посылает от себя узел, будут суммироваться. Концы трубок Кундта суть такие точки наименьших колебаний, а колеблющиеся отделы всегда так велики, что вследствие соединения набегающих и отраженных волн в одной точке, отстоящей от конца трубки на одну полупучность, воздух колеблется гораздо сильнее, чем в самом конце трубки. Это суммирование отдельных толчков происходит тем совершеннее, чем точнее длина воздушного столба приближается к целому кратному длины воздушной волны, и вот причина, следовательно, почему в настоящем случае колебания становятся достаточно сильны, чтобы прогнать весь порошок из пределов, в которых происходят наибольшие колебания. Подобный же пример представляют опыты Мельде, в которых камертоны, служа источниками всего движения, составляют однако узловые точки.

Тут может иметь весьма поучительное применение один из опытов Гельмгольца. У меня в руке камертон, производящий 512 полных колебаний в секунду. Я ставлю его на струну монохорда, и вы не слышите пока никакого усиления в звуке камертона. Струна остается в покое. Но ядвигаю камертон вдоль струны, и, когда он становится против деления равного 33, струна вдруг издает громкий звук. При данном натяжении струны длина 33 дает колебания вполне равносильные с колебаниями камертона. Следовательно через посредство струны колебания камертона могут быть переданы монохорду и через последний—воздуху. Звук продолжается, пока колеблется камертон. Малейшее перемещение камертона вправо и влево от найденной точки сопровождается внезапным уничтожением звука. Я натягиваю струну сильнее ключом, и звук также исчезает. Действительно, при новом натяжении струны она должна быть длиннее для того, чтобы отвечать камертону. Я отдвигаю поэтому камертон до 36 деления, и струна снова звучит. Натягиваю струну еще более и нахожу, что камертон

должен быть помещен на 40-м делении для получения сильнейшего звука. Теперь я спускаю струну, она должна быть короче для того, чтобы давать одинаковый тон с камертоном, и получаю этот звук при 25-м делении. Я переношу опять камертон на 35-е деление. Теперь ничего не слышно; но вот я осторожно натягиваю струну снова. Точка струны, находившаяся только-что против 25-го деления, вследствие натяжения струны начинает подходить, так сказать, теперь к камертону, и в тот момент, когда она совершенно подойдет к нему и остановится против 35-го деления, вы слышите снова чистый и полный звук. Каждый раз при приближении этой точки, перед совпадением ее с камертоном мы слышим биения, которые, как будет объяснено ниже, происходят от одновременного действия близких к унисону, но несоставляющих унисона тонов камертона и струны.

Во всех этих опытах колебания камертона, когда они соответствуют длине струны, передаются последнею дереву и от него окружающему воздуху. Во всех случаях точка, на которой стоит камертон, составляет узел или неподвижный конец струны, колебания которого согласуются с колебаниями камертона. Этот случай аналогичен тому, когда мы держим каучуковую трубку в руке и приводим ее в колебание, или положению камертона в опытах Мельде. То же самое получается у Кундта в том случае, когда один конец столба воздуха, находящийся в соприкосновении с вибрирующим прутком, представляет узловую точку, а не середину пучности.

§ 24. Превращение лучистой теплоты в звук.

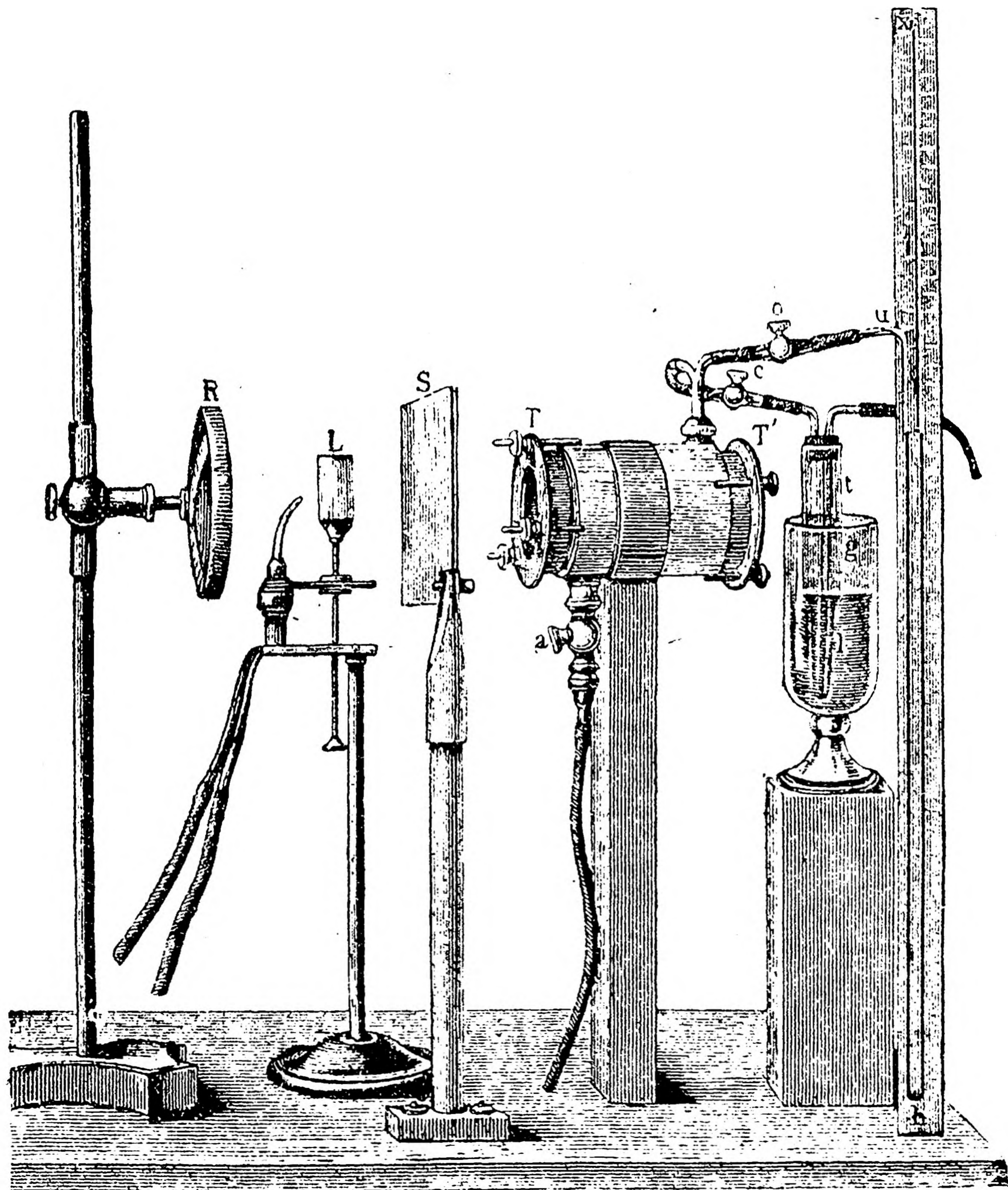
Я намерен теперь познакомить вас с рядом опытов, в которых музыкальные звуки получаются новым и поучительным способом, и которые в то же время проливают свет на важные вопросы в молекулярной физике.

Профессор Грагам Белль первый показал, что пучок перемежающегося света, падая на кружки твердого вещества, производит слабые, но явственные звуки. Когда я в первый раз увидел эти опыты, то сразу же пришел к заключению, что звуки производятся здесь ритмическими поглощениями и испусканиями лучистой теплоты.

Тела поглощают теплоту в различной степени. Напр., лучи обыкновенного огня проходят через каменную соль с большею легкостью, чем через стекло. Вследствие этого стекло нагревается, между тем как соль не нагревается. Термин теплопрозрачный (диатерманный) употребляется для выражения прозрачности относительно лучистой теплоты, и о каменной соли говорят, поэтому, что она более теплопрозрачна, чем стекло. При наших опытах нередко случается, что стеклянные линзы наших электрических ламп трескаются от теплоты, поглощенной ими. Если бы линзы были из каменной соли, то они не трескались бы.

В газообразных телах и в парах тел тоже существуют подобные различия относительно поглощения лучистой теплоты. Некоторые из

них в высшей степени теплопрозрачны, а другие в высшей степени нетеплопрозрачны для лучистой теплоты. Совершенно теплопрозрачный газ, когда через него проходит лучистая теплота, не претерпевает никакого изменения в его температуре. Обыкновенный воздух, напр.,



Фиг. 115.

почти совершенно теплопрозрачен, и через него, когда он сух, могут проходить самые сильные тепловые лучи, не нагревая его. Когда газ нагревается, то он расширяется, а когда охлаждается, то сжимается. Если, таким образом, подвергнуть газ действию перемежающегося теплового луча, то когда луч упадет на газ, последний расширяется; когда же луч будет задержан, то газ будет сжиматься. И такие расширения и сжатия, если они следуют одно за другим с достаточною быстротою, могут произвести звуковые пульсации, или музыкальные звуки. И кроме того, если величина расширения определяется количеством поглощенной лучистой теплоты, то звуковая способность газов может служить мерою их поглощающей способности относительно лучистой теплоты.

Что газы поглощают лучистую теплоту и при этом подвергаются тепловому расширению в весьма различной степени,—это может быть легко показано помощью аппарата, который мы здесь опишем. В фигуре 115 TT' есть стеклянная трубка 10 см. длины и $7\frac{1}{2}$ см. в диаметре. На концах она снабжена флянцами, которые уменьшают ее диаметр до 6 см. К этим флянцам прикреплены герметически прозрачные пластинки каменной соли. Герметичность достигается при помощи каучуковых колец, смазанных жиром, или при помощи цемента. Кран a на одном конце TT' соединен с барометрической трубкой и с воздушным насосом. А находящаяся на другом конце надставка в виде буквы T соединена одним рукавом с пробирной склянкой t , погруженной в воду, содержащуюся в стеклянном сосуде g . Пробирная склянка соединена с очистительным аппаратом (не показан на рисунке), состоящим из двух трубок в виде U , из которых в одной находятся кусочки мрамора, смоченные едким кали, а в другой — куски стекла, смоченные серной кислотой. До входа в эти трубки воздух очищается от взвешенных в нем частиц при помощи пробки из ваты. Другой рукав надставки в виде T соединен с тоненькой стеклянной трубкой, изогнутой в виде U , в обоих коленах которой находится окрашенная жидкость. Столб жидкости, когда он стоит в обоих коленах на одинаковом уровне, имеет высоты 350 миллиметров, а открытое колено трубки U (укороченное на рисунке) достигает в высоту около 500 миллиметров над уровнем жидкости. Источником теплоты служит известковый цилиндр L , накалываемый пламенем светильного газа и кислорода. Лучи от известкового цилиндра принимаются вогнутым зеркалом R , посеребренным с передней стороны, и оно направляет их сходящимся пучком через трубку TT' . Фокус пучка находится в трубке ближе к ее отдаленному концу. Газ и кислород доставляются из газгольдеров, специально устроенных для этих и подобных опытов. При этом важно, чтобы газ, получаемый из газовых заводов, или сжатый в железных бутылках и содержащийся в особых газгольдерах, находился постоянно под неизменным давлением.

Опыт ведется таким образом. Пробирная склянка t (фиг. 115) наполняется жидкостью, пар которой желают исследовать. Через пробку, закрывающую пробирную склянку, проходит узкая стеклянная трубка, оканчивающаяся узеньким отверстием близ дна склянки и на значительной глубине от поверхности жидкости. Чтобы увеличить эту глубину и сэкономить жидкость, нижняя половина склянки делается суженною. Другая узкая трубка тоже герметически проходит через пробку и оканчивается как раз под нею. Над пробкой обе трубки изогнуты под прямым углом. Из трубки TT' выкачивается содержащийся в ней воздух, и если затем открыт кран c , то наружный воздух, очищенный от угольной кислоты, от влажности и от взвешенных в нем веществ, проходит в виде пузырьков через жидкость в пробирной склянке, а оттуда идет в трубку TT' . Для сбережения кислорода его газгольдер запирается в промежутке между двумя последовательными опытами, а светильный газ горит постоянно. Когда трубка TT' напол-

няется, при чем наполнение производится всегда через отверстие определенного размера, пускают кислород, и цилиндр в течение минуты подвергается действию сильного газового пламени. В это время двойной серебряный экран *S* задерживает лучеиспускание. К концу минуты этот экран удаляется, и луч тогда проходит через смесь воздуха и пара жидкости. Жидкость в ближайшем колене узенькой *U* трубки немедленно понижается, а жидкость в другом колене на столько же повышается. Повышение этого столба над исходной точкой, обозначенной нулем на миллиметрической шкале, тщательно измеряется. Удвоенная величина этого повышения дает разность уровня в двух коленах *U*, и это «водяное давление» выражает увеличение упругости вследствие поглощения лучистой теплоты ¹⁾.

Приводим здесь несколько измерений, полученных посредством описанных опытов.

П а р ы.

Увеличение упругости от лучистой теплоты.

Название жидкости.	Водяное давление.	Характер звука.
1. Серный эфир	300 миллиметр.	Весьма сильный.
2. Пентап	279 »	»
3. Ацетон	267 »	»
4. Муравьинокислый эфир	261 »	»
5. Уксуснокислый эфир	248 »	Сильный.
6. Маслянокислый эфир	183 »	»
7. Муравьиная кислота	180 »	»
8. Валераль	172 »	»
9. Валериановокислый эфир	168 »	»
10. Уксуснокислый пропил	166 »	»
11. Бензол	117 »	Умеренный.
12. Углекислый эфир	108 »	»
13. Иодистый ацетил	92 »	»
14. Хлороформ	89 »	»
15. Сероуглерод	81 »	»
16. Цианистый метил	64 »	Слабый.
17. Четырех-хлористый углерод	58 »	»
18. Кеплоль	44 »	»
19. Амиловый алкоголь	42 »	»
20. Иодистый амил	42 »	»

Поглощающая способность газов была определена этим же прибором и получились следующие результаты.

¹⁾ Метод этого опыта, расширенный в подробностях, был придуман профессором Рентгеном.

Г а з ы.

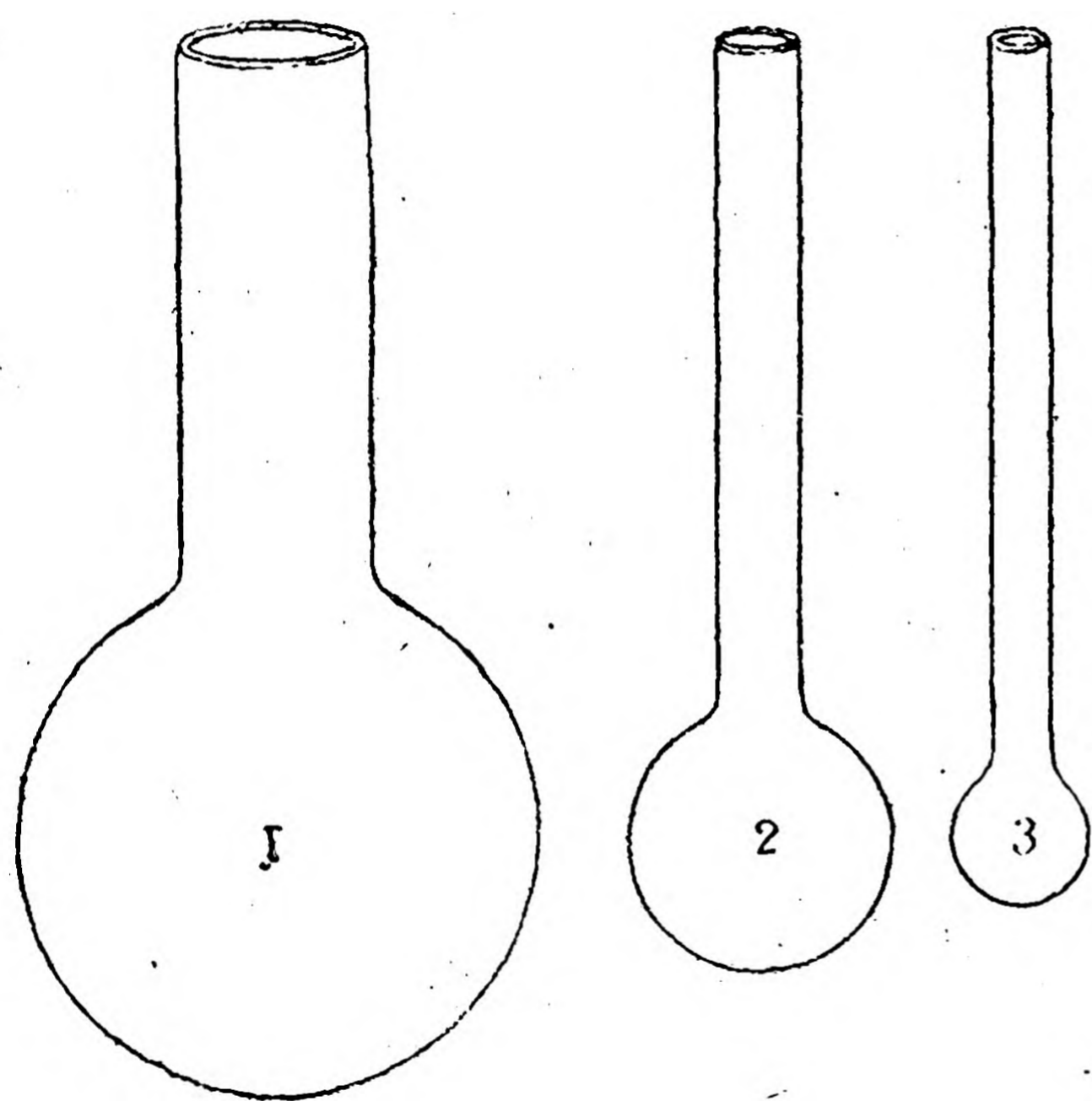
Название газа.	Водяное давление.	Название газа.	Водяное давление.
Хлористый метил	350 миллим.	Угольная кислота	144 миллим.
Альдегид	325 »	Окись углерода	116 »
Маслородный газ (этилен)	315 »	Кислород	5 »
Серный эфир	300 »	Азот	5 »
Закись азота	198 »	Сухой воздух	5 »
Болотный газ (метан)	164 »	Влажный » при 50° Ц.	130 »

Серный эфир вставлен здесь с тою целью, чтобы связать эту таблицу с предшествующей. Из всех исследованных газообразных тел хлористый метил есть самый энергичный поглотитель и самый сильный звукопроизводитель, между тем как сухой воздух, кислород, водород и азот остаются почти совершенно молчаливыми при действии самых сильных лучей. За хлористым метилом следует альдегид с точкой кипения 21° Ц. Цифра 5, стоящая против элементов-газов и сухого воздуха, выражает не поглощение лучистой теплоты, но расширение, происходящее от прикосновения с слегка нагретым аппаратом. Испытуемая закись азота получалась из железной бутылки, в которой она хранилась для медицинских целей. В некоторых моих опытах болотный газ оказывается еще лучшим поглотителем, чем закись азота. Это было, напр., в опытах, произведенных весною 1880 г. с манометром. Болотный газ, с которым был получен указанный результат, был тщательно приготовлен в нашей химической лаборатории.

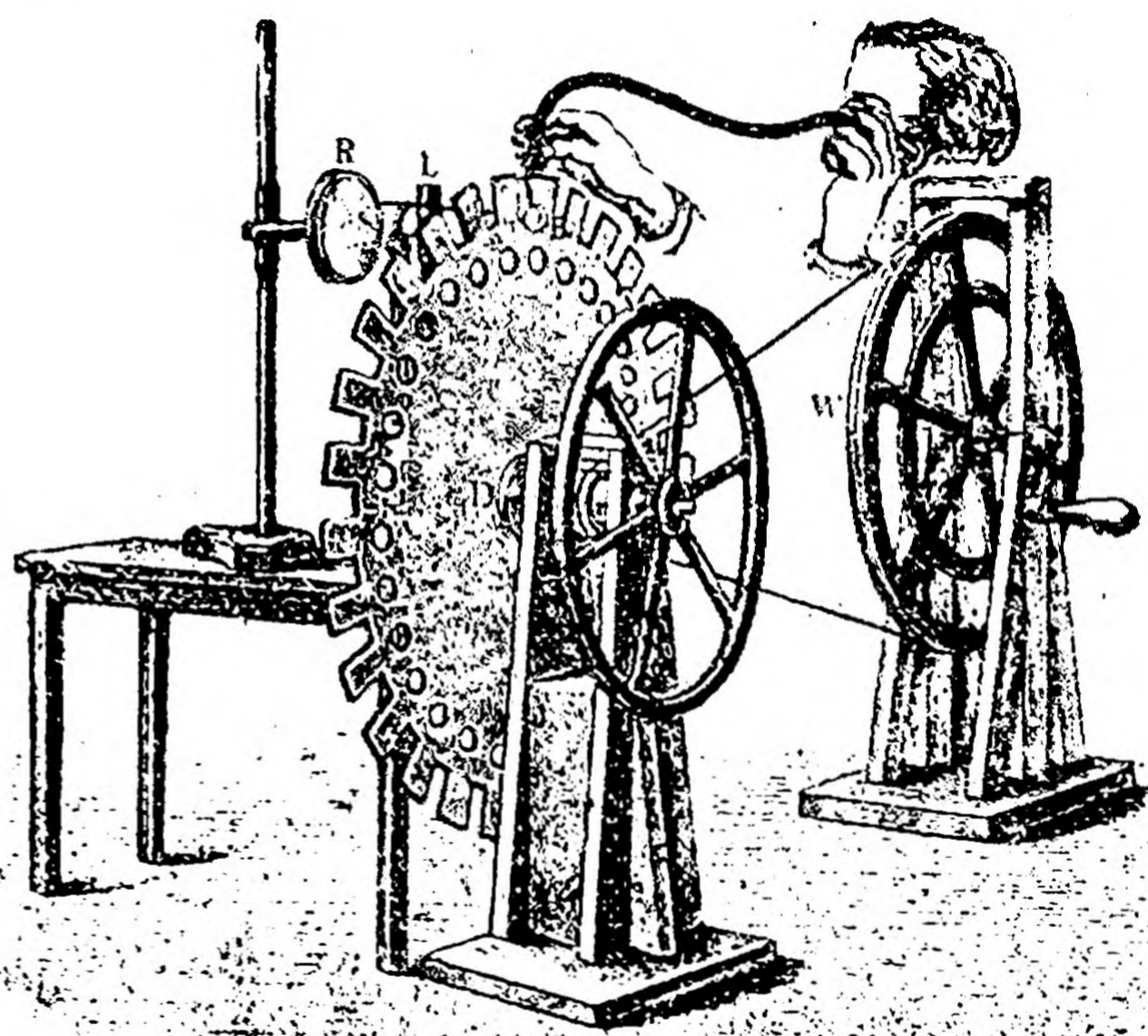
Температура 50° Ц. для влажного воздуха была получена в деревянной камере, устроенной в нашей лаборатории. Через камеру были проведены две жестяные трубки 10 см. в диаметре, через которые проходил нагретый воздух и продукты горения из двух больших круглых горелок. Камера имела 2,58 м. длины, 1,31 м. ширины и 17½ см. высоты. Температуру воздуха внутри ее можно было легко повысить до 60° Ц. В описанных опытах брался наружный воздух при помощи трубки, проходившей через деревянную стенку камеры. Воздух пропускался через воду в большой бутылки, которая несколько времени стояла в теплой камере. Воздух, смешанный с паром, проходил в трубку *TT'* при температуре на несколько градусов низшей, чем температура самой трубки. При самом тщательном рассматривании все части этой трубы оказывались светлыми и сухими в то время, когда в них пахотился воздух, насыщенный парами. Когда через эту смесь пропускался луч от раскаленной извести (горением светильного газа в кислороде), то сейчас же наблюдалось повышение на 65 миллиметров. Когда же луч задерживался, то столб быстро возвращался к нулю. Дважды 65 или 130 миллиметров показывали разность уровня в двух коленах трубки *U*.

Музыкальные звуки из этих паров и газов извлекались следующим образом. В небольшую колбу паливается немножко жидкости; она испаряется, и ее пары насыщают воздух в колбе над жидкостью. Колбы

таких размеров, как показанные на фиг. 116, 1, 2, 3, оказались очень подходящими. Чтобы получить требуемую перемежаемость, я сначала употреблял диск из листового цинка 40 см. в диаметре, снабженный по окружности радиальными щелями. Но потом я употреблял другой диск такого же диаметра, но снабженный по окружности зубцами и промежутками. Диск был укреплен вертикально на вращающемся станке и, вращаясь, пересекал луч близ фокуса вогнутого зеркала. Сейчас же за диском помещалась колба, содержащая испытуемый газ или пар, и каучуковая трубка, имевшая на конце полый деревянный или слоновой кости конус, соединяла колбу с ухом. При помощи таких приспособлений, как они ни просты, получались звуки удивительной силы от всех тех газов и паров, которые по моим предварительным опытам с экспериментальной трубкой и термоэлектрическим столбиком оказывались сильными поглотителями лучистой теплоты. Окончательное расположение аппарата показано на фиг. 117.



Фиг. 116.



Фиг. 117.

Источником теплоты служит тщательно отделанный и правильный известковый цилиндр *L*, накаливаемый пламенем гремучего газа. Лучи от этого источника падают на вогнутое зеркало *R* и сходятся на колбе *B*, содержащей испытуемое вещество. Колба соединена с ухом каучуковою трубкой, имеющей на конце слуховой деревянный или слоновой кости цилиндрик. Перемежаемость теплового луча достигается при помощи диска. Диск из толстого картона снабжен по окружности 29 зубцами и соответствующими промежутками¹⁾. Диск приводился во вращение колесом *W*, с которым он был соединен бесшумным ремнем. Положения звучащей колбы и ее слуховой трубы показаны на фигуре. Когда испытывается газ более легкий, чем воздух, то колба держится отверстием вниз, а когда более тяжелый, чем воздух, то она держится отверстием вверх. Когда исследуются пары, то в колбу наливается

¹⁾ Иногда перемежаемость получалась посредством равноотстоящих круглых отверстий, показанных на фиг. 117.

немножко жидкости и затем колба потряхивается, чтобы пары распространились по воздуху в колбе над жидкостью. Колба помещается в том месте, на которое приходится максимум сосредоточения луча.

С этим аппаратом я несколько раз исследовал звуковую способность десяти газов и 8 паров. Первое место, как звукопроизводитель, занимает хлористый метил. За ним близко следуют альдегид, маслородный газ и серный эфир, при чем два последние почти не уступают один другому. Летучесть жидкости, над которой исследуется, есть, конечно, важный фактор для результата. Потому что, как бы ни была велика способность частицы поглощать теплоту, но если этих частиц мало по количеству, то действие их будет незначительно. Слабые пары могут специфическую слабость своих частиц восполнять до некоторой степени большим количеством их. Однакоже, по нескольким примерам мы можем видеть, что специфическое действие частиц пересиливает иногда действие летучести. Сероуглерод с точкой кипения 42° Ц. действует менее сильно, чем уксуснокислый эфир с точкою кипения 74° . Четырех-хлористый углерод кипит при 77° , но его звук не может равняться с звуком ацетона, который кипит при 104° . Хлороформ с точкою кипения 61° менее силен, как производитель звука, чем валерьял, кипящий при 100° , или даже чем валериановый эфир с точкою кипения 144° . Синеродистый метил кипит при 82° , но производит меньше звука, чем уксуснокислый пропиол, кипящий при 120° . Один взгляд на приведенную таблицу паров показывает, что напряженность звука пропорциональна поглощающей способности пара и, начиная от «весьма сильный» у серного эфира с водяным давлением в 300 миллиметров, спускается через «сильный», «умеренный» и «слабый» до подистого амила, расширение которого от лучистой теплоты способно произвести водяное давление только в 42 миллиметра.

Особенно интересовало меня действие водяного пара вследствие его повсюдного присутствия и связанных с этим вопросов. Я сначала не думал, что состояние пара, разлитого в атмосфере при обыкновенной температуре, может произвести звуковые волны заметной силы. Поэтому при моих первых опытах я нагревал воду в колбе почти до точки кипения. Я нагревал колбу выше воды спиртовой лампой, чтобы рассеять всякие следы сгустившегося и осевшего пара, и затем подвергал чистый невидимый пар действию перемежающегося луча. Этот опыт был решающим для вопроса, прав ли я был или ошибался, приписывая пару способность поглощать лучистую теплоту. Пар ответил на мой вопрос музыкальным тоном, который, если его надлежащим образом довести до барабанной перепонки, кажется столь же громким, как звук органа. Когда температура понизилась с 100° Ц. до 10° Ц., звук вопреки моему ожиданию не исчез. Он оставался не только явственным, но и громким. Колбы, употреблявшиеся в этих опытах, были высушиваемы различными способами, которые я описал в другом месте и которые сами собой представляются всякому экспериментатору в этой области. Колбы, стоявшие открытыми в лаборатории, подвергнутые действию перемежающегося луча, всегда оказывались до некоторой степени звучащими.

Помещенные под колокол воздушного насоса подле серной кислоты и высушенные поэтому здесь, они становились молчаливыми. Но введение в них даже небольшого количества влажного воздуха снова делало их звучащими. Стоит один момент дохнуть в сухую и молчащую колбу, она тотчас же может издавать громкий звук.

ОБЗОР ПЯТОЙ ЛЕКЦИИ.

Если тереть натянутую струну вдоль, то она приходит в продольное колебание. Она может колебаться либо как одно целое, либо делится узлами на вибрирующие сегменты.

Тоны такой струны следуют ряду натуральных чисел 1, 2, 3, 4 и т. д.

Поперечные колебания укрепленного с обоих концов прута следуют иному порядку, чем поперечные колебания струны, ибо силы, действующие в обоих случаях, неодинаковы, как показано в четвертой лекции; но продольные колебания натянутой струны следуют тому же порядку, как и продольные колебания прутьев, укрепленных на обоих концах, ибо сила, здесь действующая, одна и та же, именно упругость самого вещества.

Прут, укрепленный с одного конца и приведенный в продольные колебания, колеблется либо как одно целое, либо делится узлами на 2, 3, 4 и более вибрирующих частей. Тоны в таком пруте следуют ряду нечетных чисел 1, 3, 5, 7 и т. д.

Прут свободный с обоих концов дает также продольные колебания; его самый низкий тон соответствует одному делению прута на две колеблющиеся части одним узлом посередине прута. Верхним тонам такого прута соответствуют его деления на 3, 4, 5 и т. д. части 2, 3, 4 и т. д. узлами. Тоны такого прута следуют ряду чисел 1, 2, 3, 4, 5 и т. д.

Мы можем выразить это также и так: тоны прута, укрепленного с обоих концов, следуют ряду нечетных чисел 1, 3, 5, 7, тогда как тоны прута, свободного с обоих концов, — ряду четных чисел 2, 4, 6, 8 и т. д.

В точках наибольших колебаний прут не претерпевает изменения плотности. В узлах, напротив, это изменение наибольшее. Это может быть доказано действием такого прута на поляризованный свет.

Воздушные столбы определенной длины резонируют определенным камертонам. Длина воздушного столба, резонирующего определенному камертону, равняется одной четверти длины звуковой волны, возбуждаемой камертоном.

Это основывается на совпадении между фазами колебаний камертона и воздушного столба.

Если дуть над отверстием трубки, закрытой с противоположного конца, то резонанс трубки обращает в музыкальный звук ряд толчков воздуха, которые при этом образуются.

Тон бывает тот же, который слышится, если держать над отверстием трубки такой камертон, скорость колебаний которого соответствует колебаниям трубки.

Когда трубка, закрытая с одного конца, например, закрытая органная трубка, дает свой самый низкий тон, то столб воздуха, в ней заключенный, не разделяется узлом.

Верхние тоны такой трубки соответствуют тем же делениям, как и в пруте, укрепленном с одного конца и приведенном в продольные колебания; тоны следуют здесь ряду нечетных чисел 1, 3, 5, 7 и т. д. Это доказывается делениями воздушного столба.

В органных трубках воздух приводится в колебание таким образом, что он вдвигается через узкую щель и ударяет в острое ребро. Отсюда получается ряд толчков, которые резонанс трубки обращает в музыкальный тон.

Если вместо того, чтобы вдвигать воздух, держать соответствующий камертон перед амбушурой такой трубки, то последняя дает звук, соответствующий камертону.

При дуновении органная трубка сама устраивает себе соответствующий камертон, заставляя слой воздуха у ее амбушоры вибрировать согласно с собою.

Тон открытой органной трубки на одну октаву выше закрытой с одного конца. Это отношение есть необходимое следствие различия колебаний в той и другой.

Когда такая закрытая с одного конца трубка дает свой самый низкий тон, то, как сказано, столб воздуха не разделяется в ней узлом. В этом же случае открытая трубка представляет один узел посредине.

Открытая трубка состоит, таким образом, собственно из двух закрытых с одного конца трубок, имеющих одно общее дно посредине. Отсюда ясно, что тон открытой трубки должен быть тот же, как и тон закрытой с одного конца трубки половиной длины.

Длина закрытой с одного конца трубки равняется одной четверти длины волны ее звука, тогда как длина открытой трубки равняется половине ее звуковой волны.

Звуки открытой трубки следуют ряду чисел 2, 4, 6, 8 и т. д., или же ряду чисел 1, 2, 3, 4, 5 и т. д.

Как при закрытых с одного конца трубках, так и при открытых число колебаний, совершаемых в определенное время, находится в обратном отношении к длине трубки.

Места наибольших колебаний и в органных трубках также представляют наименьшее изменение плотности; тогда как места наименьших колебаний—наибольшее.

Скорость звука в различных газах, жидкостях и твердых телах может быть определена на основании звуков, которые они издадут при одинаковой длине, или на основании длины этих веществ при одном и том же звуке.

Язычки часто соединяются с вибрирующими воздушными столбами; они состоят из гибких пластинок, которые могут колебаться в

четырёхугольном отверстии взад и вперед и при этом прерывать в определенные промежутки струю воздуха, проходящую через такое отверстие.

Действие язычка то же, как и сирены.

Гибкие деревянные язычки, которые употребляются иногда в органичных трубках, колеблются согласно с столбом воздуха этих трубок. Другие язычки слишком мало гибки для того, чтобы подчиняться колебаниям воздуха, и в таком случае столб воздуха должен быть достаточно длинен, чтобы его колебания совпадали с колебаниями язычка. Соединяя надлежащим образом трубки с язычками, мы можем заставить их подражать человеческому голосу.

Человеческий голосовой орган есть такой инструмент с язычком. Язычок заменяется здесь эластическими связками, помещенными над верхним отверстием дыхательной трубки и способными к различному натяжению.

Резонанс рта не имеет особенного влияния на скорость колебания голосовых связок; но, изменяя форму рта, можно заставить его резонировать или основному тону, или отдельным верхним тонам голосовых связок.

Усиливая отдельные тоны с помощью резонанса рта, мы изменяем качество голоса.

Гласные звуки происходят от различных соединений основного тона с верхними тонами голосовых связок.

Действие телефона Белля основано на способности тонкой железной пластинки воспринимать вибрации человеческого голоса, на способности магнита отвечать на вибрации такой пластинки слабыми изменениями его магнетизма, на способности таких изменений возбуждать электрические токи, соответствующие им по силе, направлению и продолжительности и, наконец, на способности таких токов передаваться на расстояния и здесь воспроизводить вибрации совершенно сходные с теми, которые были первоначальным источником этих токов.

В телефоне Эдиссона первоначальным агентом служит обыкновенный вольтов ток, проходящий через всю цепь. В известном месте в цепи находится тоненькая лепешка из сажи, слабо зажатая между двумя тонкими платиновыми пластинками, так что ток проходит через пластинки. В одну из этих пластинок ударяют звуки голоса, и происходящие от этого ее вибрации, изменяя величину соприкосновения (контакта) между платиной и углеродом, этим самым вызывают соответствующие изменения в силе тока.

В другом месте в цепь введена небольшая индукционная спираль, через первичную проволоку которой проходит ток. Всякое изменение в силе тока возбуждает индуцированный ток во вторичной проволоке спирали. Индуцированные токи через металлическую дощечку идут в цилиндр, сделанный из смеси мелового порошка с известными минеральными солями, которая спрессована в форме, так что стала компактною и смочена водой. Этот цилиндр вращают рукою. Вследствие электрического действия индуцированных токов на массу цилиндра

изменяется сила трения об него металлической дощечки. Цилиндр поэтому движется скачками, соответствующими вибрациям голоса, и эти скачки, передаваясь тоненькой слюдяной пластинке, соединенной с металлической дощечкой, воспроизводят звуки голоса, бывшие их первоначальной причиной.

В микрофоне ток проходит между двумя кусочками угля, слегка прижатыми один к другому. В цепь вводится и телефон Белля. Малейшее сотрясение кусочка угля, даже такое, какое может произвести ползающее насекомое, вызывает изменения в контакте между кусочками угля и соответствующие им изменения в силе тока, проходящего через телефон. А эти последние изменения, действуя на магнит телефона, сообщают ему способность привести в вибрацию железную пластинку, которая сделает слышным даже ползание насекомого. Нужно, однако, помнить, что роль насекомого здесь чисто механическая; изменение контакта между угольками.

В фонографе вибрации голоса передаются тонкой железной пластинке, а через нее острию, которое слегка нажимает на оловянный лист, навернутый на цилиндр. Когда цилиндр вращается, это острие производит в нем зазубрины, большие или меньшие углубления. Затем это же острие, или, лучше, другое подобное заставляют проходить по этим зазубринам, и оно при этом воспроизводит те самые вибрации, которые первоначально произвели эти зазубрины, и таким образом получается воспроизведение звуков человеческого голоса.

Когда твердое вещество трубки, закрытой с одного или с обоих концов, приведено в колебание, то воздух приходит в ней также в колебание.

Если внутреннюю поверхность трубки посыпать порошком, то можно видеть, каким образом колебания делят в ней воздушный столб. На основании такого деления воздушного столба можно определить относительную скорость звука в веществе трубки и в воздухе.

Вместо воздуха можно также брать другие газы и определять в них скорость колебаний сравнительно со скоростью звука в веществе трубок.

При посредстве продольных колебаний прута можно привести в колебание столб воздуха, заключенный в трубке, и заставить его разделиться на пучности. Эти пучности можно сделать видимыми также при посредстве легкого порошка. По их длине можно вычислить точно также скорость звука в пруте сравнительно со скоростью в воздухе.

Этим способом можно определить относительную скорость звука во всех твердых телах, которые можно обделать в форму прута и привести в продольные колебания.

Газы и пары теплопрозрачны в различной степени. Совершенно теплопрозрачное тело вовсе не поглощает лучистой теплоты, и только те газы и пары, которые поглощают ее, претерпевают изменение в температуре. Когда на поглощающий газ или пар действует перемежающийся луч, то при падении луча на газ или пар происходит расширение их, за которым следует сжатие, когда луч задерживается.

Такое ритмическое действие производит звуковые волны, которые при достаточной быстроте дают музыкальные тоны.

Сила звука при этом зависит от величины поглощения лучистой теплоты, и эта сила от максимума в хлористом метиле, обнаруживающем наибольшее поглощение, спускается до минимума в сухом воздухе, в котором поглощение почти равно нулю.

Лекция шестая.

Поющие пламена.—Влияние трубки, которая окружает пламя.—Влияние величины пламени.—Гармонические звуки пламени.—Влияние унисонных звуков на поющие пламена.—Влияние звука на свободные пламена.—Опыты с горелками, дающими пламя формы рыбьего хвоста и летучих мышей.—Опыты с узким пламенем.—Необыкновенная чувствительность пламеней как акустических реагентов.—Действие говора на пламя.—Действие музыкальных звуков на струи дыма.—Образование и форма водяных струй.—Теория Плато о разделении жидкой струи на капли.—Действие музыкальных звуков на водяные струи.—Чувствительность водяной струи может не уступать чувствительности уха.

§ 1. Ритм трения. Музыкальное вытекание жидкости из узкого отверстия.

Всякое трение ритмично. Когда мы проводим паканифоленным смычком по струпе, то ритм трения зависит от натяжения струны. Когда мы проводим мокрым пальцем по краю стакана, то ритмичность трения выражается в музыкальном звуке, который издает стакан. Опыты Савара доказывают, что даже трение жидкости о края отверстий, через которые она протекает, может производить музыкальные звуки. Мы можем повторить его опыт.

Трубка *AB* (фиг. 118) наполнена водой, а нижний конец ее *B* закрыт медной пластинкой с круговым отверстием посредине, диаметр которого равняется толщине самой пластинки. Если открыть это отверстие, то вода вытекает из трубки, и в то время, как она в ней понижается, слышится мягкий музыкальный звук. Вода вытекает из трубки через отверстие с перемежками, и от этого весь столб ее приходит в колебание. Когда льют чай из чайника, то наклонность жидкости к таким ритмическим движениям выражается в кругообразной ряби на падающей струе. Те же перемежки замечаются в густом дыму паровоза, выбрасываемом ритмическими кольцами. Неприятный шум песмазанных машин доказывает точно также отсутствие в этом случае непрерывного однообразного трения и присутствие постоянного захватывания и опускания трущихся поверхностей.

Подобное же явление замечается и при трении газов. Пуля, вылетевшая из ружья, издает звук, и когда шумит сосновый лес, то этот шум, напоминающий шум водопада, происходит от трения воздуха о стволы и ветви деревьев. Если двигать быстро зажженную свечу по воздуху, то она оставляет зазубренный световой след, свидетельствующий о перерывах, и в то же время замечается почти музыкальный звук,

служащий акустическим доказательством ритма. Если слегка дуть на пламя свечи, то слышится также шум, свидетельствующий о ритмичности происходящих при этом движений. Мы знаем уже, что происходит с трубкой, в которой производятся подобные воздушные толчки. Мы знаем, что она избирает из всех воздушных толчков ряд толчков, соответствующих ее резонансу, и обращает их в музыкальный звук. С той же целью можно употребить шум горящего пламени. Пламя паяльной трубки с дутьем в нашей лаборатории, если его окружить надлежащей трубкой, вместо обыкновенного шума издает особый рокочущий звук. Избранная резонансом волна действует на пламя, уничтожает другие волны и заставляет пламя вибрировать в такт с собою, и накопляющиеся удары волн могут быть так сильны, что от действия их пламя может потухнуть, даже если бы оно было значительных размеров.

§ 2. Музыкальное пламя.

Для получения таких волн не нужно никаких особых приспособлений; стоит только окружить газовое пламя трубкой и тогда достаточно обыкновенного тока воздуха, чтобы вызвать ритмические движения, заставляющие пламя издавать музыкальный звук. И эту музыку пламени можно сделать очень громкою. У меня вот круглая горелка *B* с 20-ю отверстиями с зажженным газом (фиг. 119). Я помещаю над нею оловянную трубку в $1\frac{1}{2}$ м. длины и 6 см. ширины. Сначала пламя колеблется неправильно, но скоро толчки его становятся правильными; они уясняются, и вы слышите низкий музыкальный звук. Темп его волн зависит в известной степени от объема пламени, и когда я уменьшаю длину пламени газа, то звук, который оно издавало до сих пор, прекращается. Но через мгновение он появляется снова, и теперь пламя издает другой тон, составляющий октаву прежнего. Прежний звук был основной тон трубки, окружающей пламя. Последний звук есть ее первый верхний тон. В действительности мы имеем здесь, как и в органных трубках, дело с воздушным столбом, который делится узлами на пучности.

Позвольте мне теперь исследовать действие этой трубки *ab* (фиг. 119) в $4\frac{1}{2}$ метра длины и 10 см. ширины, которая была предназначена для совершенно другой цели. Она поддерживается крепкой стойкой *ss'*, и я вдвигаю в нее снизу тонкую горелку, которая в увеличенном виде представлена в *B*. Вы слышите сначала шум, а затем звук; я вдвигаю горелку далее; звук усиливается, и вы слышите наконец настоящий громовой тон, выходящий из трубки; но вот вдруг все стихает, ибо пламя гасится действием вызванных им самим воздушных волн. Я зажигаю снова пламя, но уменьшаю его; ввожу его в трубку, и оно издает теперь один из своих верхних тонов; открываю кран более, и звук на мгновение прекращается; но затем вы слышите снова начинающееся приближенно музыкальной бури, которая вскоре и разражается. Если я уменьшу пламя, то основной тон исчезает, и вы слышите первый верхний тон трубки. Если я его уменьшу еще, то исчезает первый верхний тон

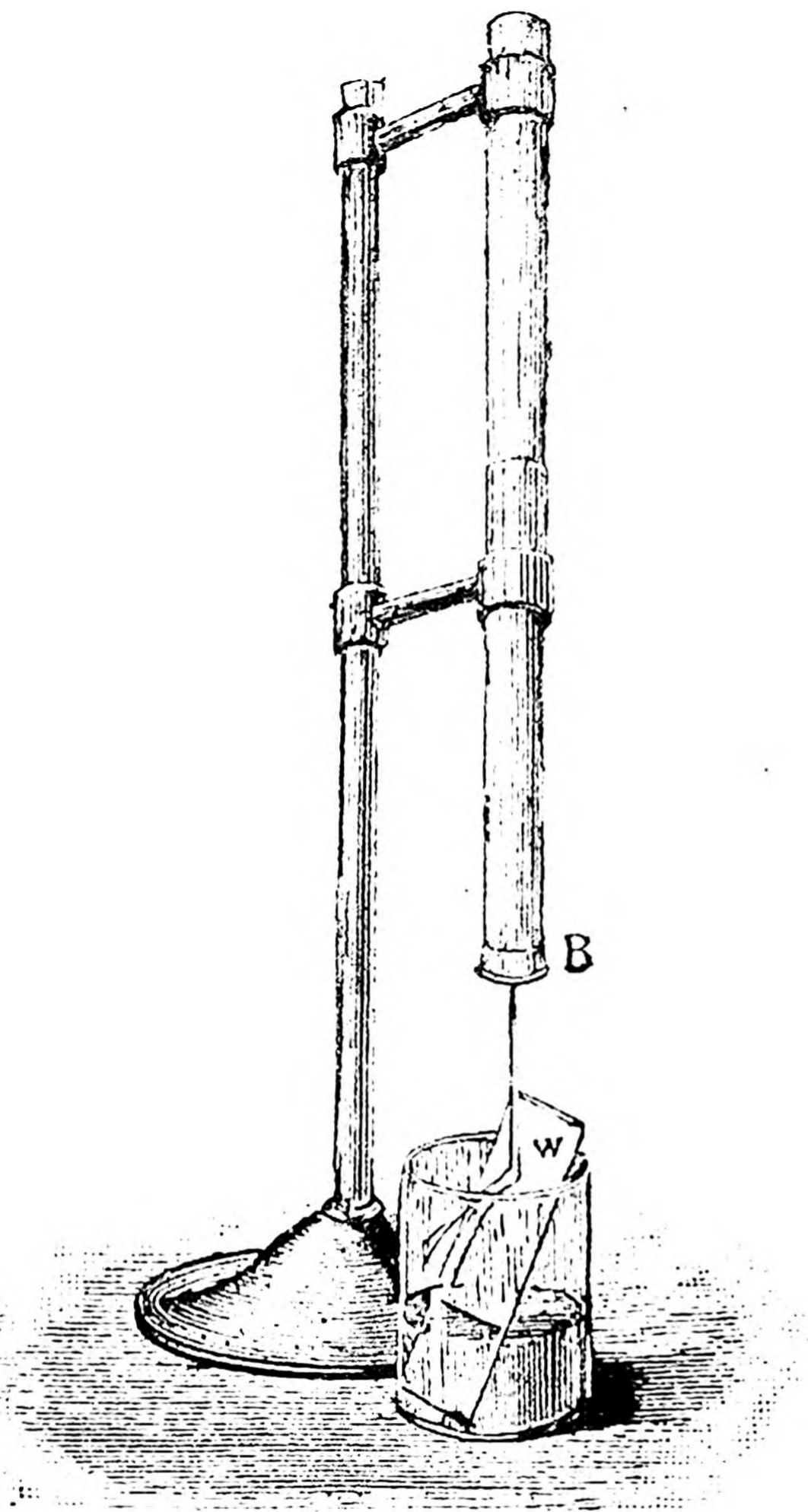
и появляется второй. Так как вы освоились теперь с этими тонами, то я открываю кран вполне; вы слышите теперь смесь основного тона с верхними тонами, находящимися как бы в борьбе между собою. С помощью большой бунзеновской горелки звук этой трубки будет достаточно силен, чтобы привести в сотрясение пол этой комнаты, мебель и многочисленных слушателей. А когда пламя погасится под влиянием действия на него воздушных волн, то вы услышите выстрел, подобный выстрелу из пистолета. Вы поймете, что дымовая труба представляет подобную трубку большого размера, и шум пламени в такой трубе представляет только грубый опыт подобного рода.

Я перехожу теперь к более коротким трубкам и малым пламенам и имею для этого восемь трубок различной длины. Когда я их помещаю над горелками, то они поют, и звук тем ниже, чем длиннее трубка. Трубки подобраны таким образом, что они составляют восемь последовательных тонов гаммы. На некоторых из них вы замечаете бумажную надставку *s* (фиг. 120), посредством которой можно удлинять или укорачивать трубку. В то время как пламя поет, я подвигаю эту надставку кверху, и тон немедленно понижается; я опускаю ее ниже, и тон повышается. Этот опыт доказывает, что пламя подчиняется длине трубки. Действием воздушных волн его движение становится периодическим, тогда как длина этого периода определяется, как и в органных трубках, длиной стеклянных трубок.

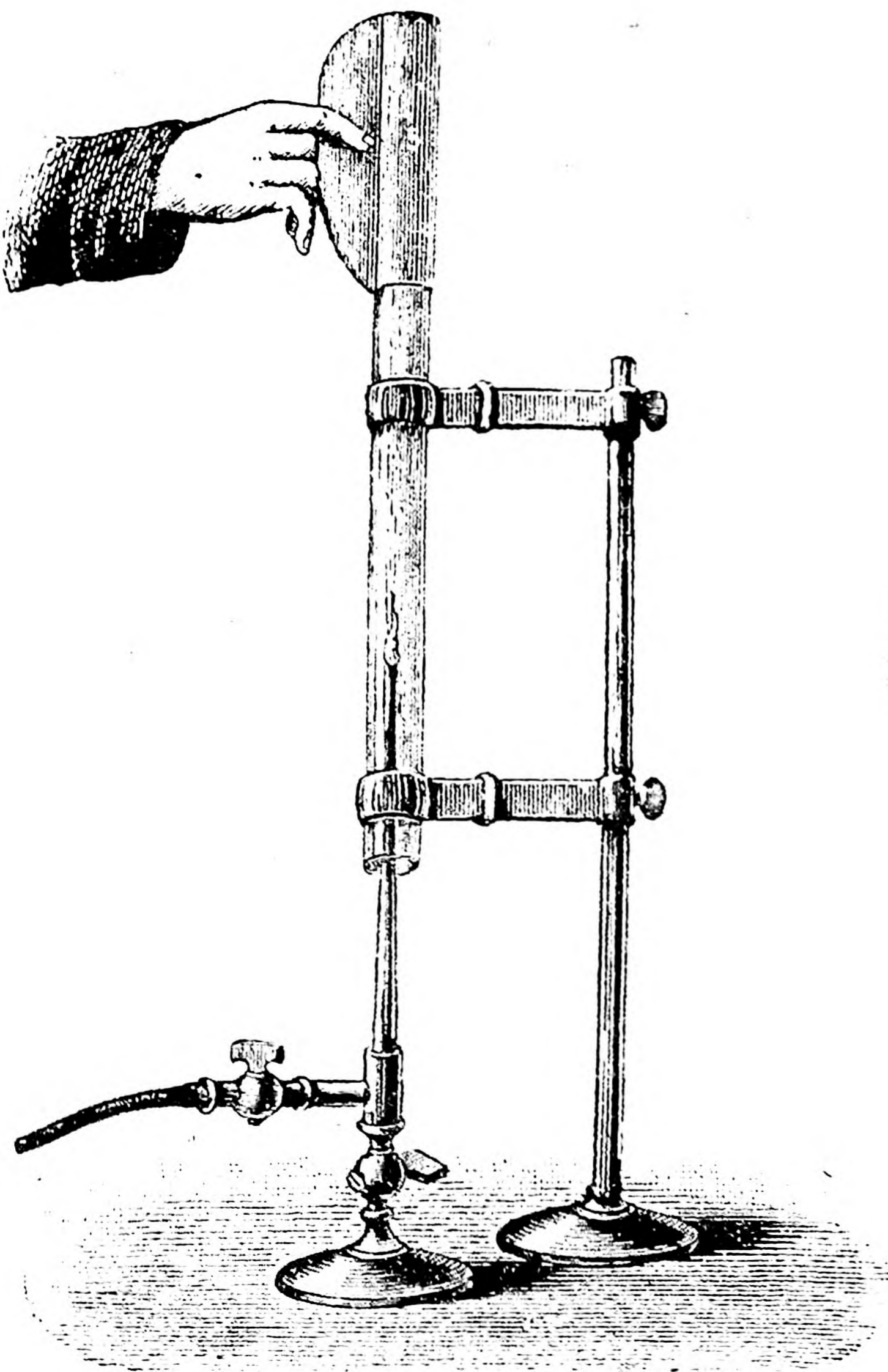
Неподвижные звезды, особенно вблизи горизонта, имеют беспокойный свет и по временам меняют цвет. Я часто наблюдал на альпийских возвышенностях то красно-рубиновый, то зелено-изумрудный цвет больших и более отдаленных звезд. Поместите против такой звезды зеркало так, чтобы в нем рисовалось ее изображение, и затем поворачивайте его быстро взад и вперед; вы не увидите при этом непрерывной световой линии, но ряд цветных искр, необыкновенно красивых. То же самое будет, если вы будете смотреть в бинокль на такую звезду и двигать им при этом туда и сюда. Этот опыт показывает, что при мерцании свет звезд исчезает местами и темные промежутки между светлыми искрами соответствуют таким исчезновениям света. Наше поющее пламя есть такое мерцающее пламя. Вы замечаете в нем дрожание в то время, когда оно начинает петь, и можете разложить его дрожание при посредстве зеркала или бинокля, точно так же, как разлагали мерцания звезды. Я поместил маленькое зеркало так, чтобы видеть в нем изображение пламени. Когда я поворачиваю зеркало так, что свет его должен был бы дать круговую линию, то линия эта не оказывается непрерывною, как это было бы в том случае, если бы пламя было совершенно спокойно, но делится на ряд или цепь отдельных пламеней (фиг. 121).

§ 3. Экспериментальный анализ музыкального пламени.

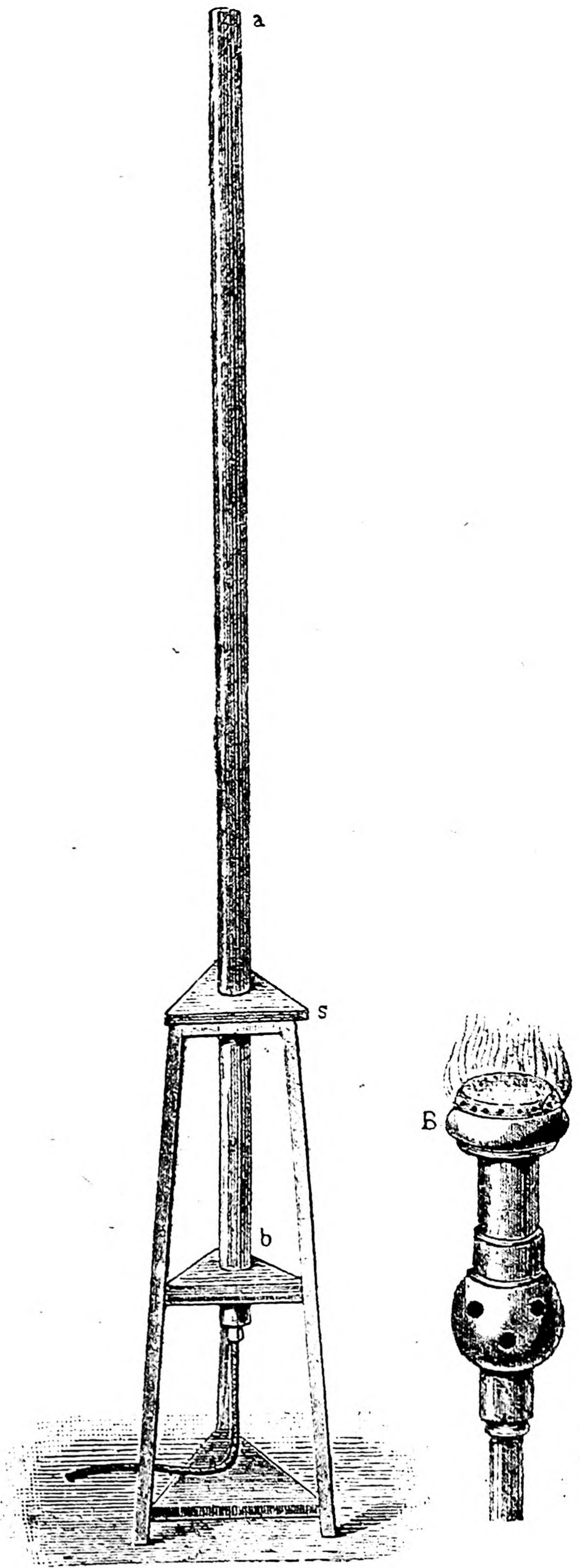
Если мы возьмем более светлое и менее быстро мерцающее пламя, то вы можете все заметить перерывы, о которых идет речь. Над этим



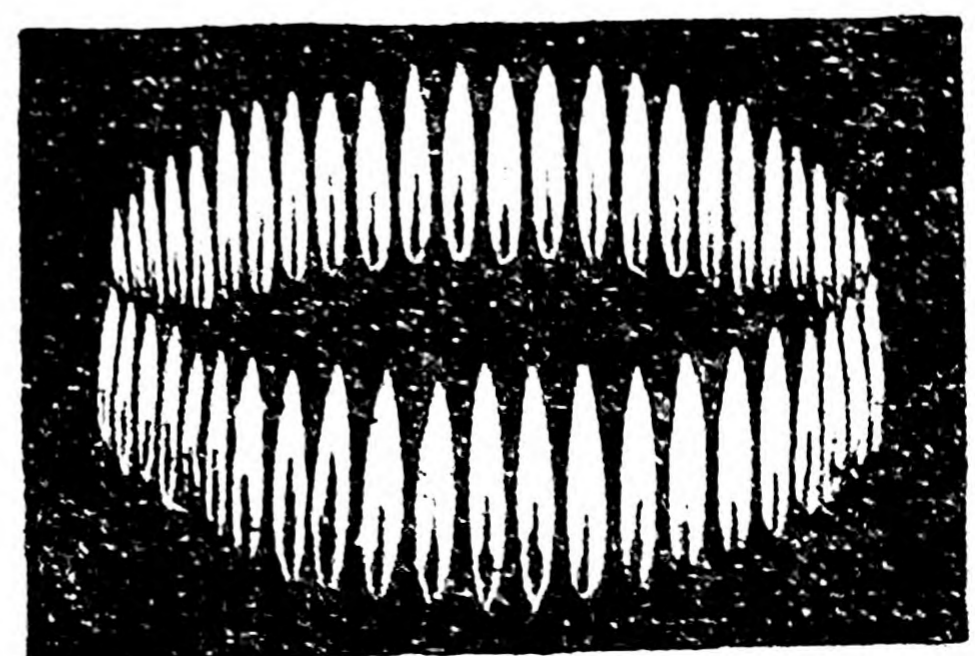
Фиг. 118.



Фиг. 120.

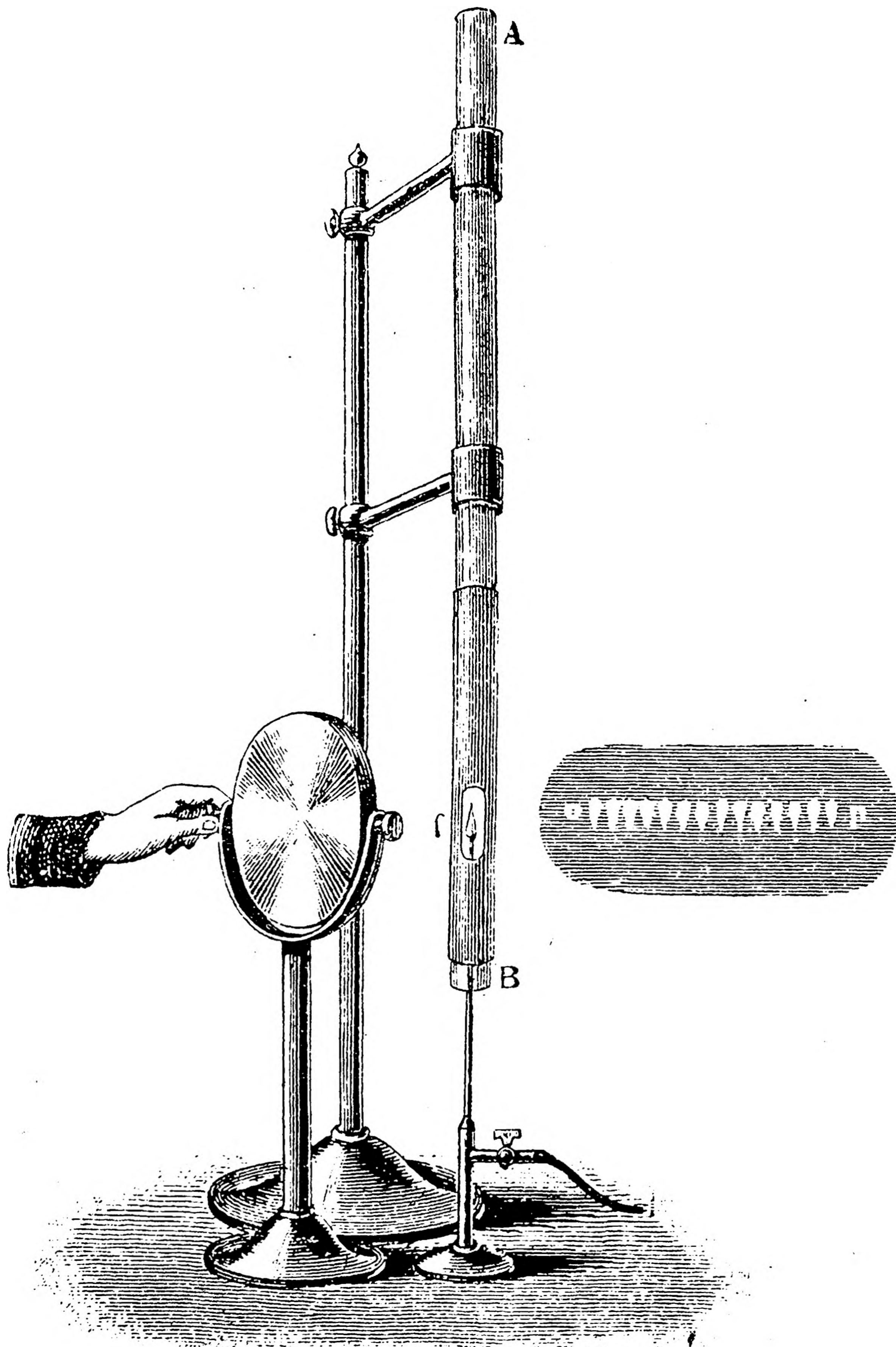


Фиг. 119.



Фиг. 121.

газовым пламенем f (фиг. 122) помещена трубка AB в 2 метра длины и 5 см. в диаметре. Часть трубки вычернена, так что свет пламени не может прямо падать на экран. Против трубки помещено вогнутое зеркало M , отбрасывающее на экран увеличенное изображение пламени.



Фиг. 122.

Я могу поворачивать зеркало рукою так, чтобы при этом изображение пламени двигалось по экрану. Если бы пламя было совершенно спокойно и беззвучно, то мы получили бы непрерывную световую линию на экране; но оно дрожит и издает низкий сильный тон; поэтому, поворачивая зер-

кало, вместо непрерывной линии мы получаем ряд светлых изображений *ор*, образующих световую цепь. Вращая зеркало скорее, я заставляю эти образы более отдаляться друг от друга; замедляя движение зеркала, я заставляю их снова сближаться. Когда я закрываю нижнее отверстие трубки *B* рукою, то от этого прекращается приток воздуха в трубку и пламя приходит в покой, и при повороте зеркала вы видите теперь непрерывную световую полосу. Обратите внимание, как мгновенно эта непрерывная полоса в тот момент, когда я отнимаю руку и делаю снова возможным приток воздуха, превращается в разорванный ряд изображений.

Звучащее пламя Рийке

Рийке употребляет остроумный и до него неизвестный способ приведения воздушного столба в музыкальные вибрации. Внутри трубки и в поперечном направлении он помещал диафрагму из проволочной сетки, которую он накаливал до-красна либо пламенем, либо электрическим током. В первом случае звук, в начале очень сильный, скоро прекращался. Во втором же случае звук оставался постоянным, потому что было постоянно и накаливание сетки. Он употреблял трубки стеклянные и металлические разных размеров. Когда трубка была очень большая и сетка накаливалась очень сильно, то получались очень громкие звуки.

Рийке нашел, что когда проволочная сетка помещалась на одной четверти длины трубки от ее нижнего конца, то эффект получался наибольший. Сетка быстро накаливалась бунзеновской горелкой. Затем пламя отнималось, и немедленно получался тон, зависевший по высоте от длины трубки и от температуры воздушного столба. Звук понижался по мере того, как падала температура сетки, и совсем прекращался, когда сетка охлаждалась до температуры окружающего воздуха. Звук в трубках Рийке происходил, очевидно, от внезапного расширения воздуха при его прохождении через раскаленную сетку. Первое расширение производит толчок, действовавший и здесь так, как он обыкновенно действует в открытой трубке, и отнятие теплоты от раскаленной сетки становилось периодическим. Опыт, служивший как бы дополнением к опытам Рийке, был произведен Боскиа и Рейссом, которые получали музыкальные звуки, направляя горячий воздух на холодную металлическую сетку.

§ 4. Скорость вибраций пламени. Опыт Теплера.

Когда небольшое пламя исследуется при помощи вращающегося зеркала, то светлая линия состоит из ряда пламеней с темно-голубым основанием и желтым острием. В большинстве случаев эти пламена казались мне совершенно отдельными и промежутки между ними абсолютно-темными; нужно думать, поэтому, что настоящее пламя действительно погашается в известные промежутки и только остается достаточное количество жара, чтобы снова зажечь газ. А это возможно, потому

что газ может быть зажжен на расстоянии¹⁾. С помощью сирены мы можем определить, сколько раз в секунду это пламя погасает и снова зажигается. По мере того как звук сирены приближается к звуку пламени, мы слышим знакомые нам биения, свидетельствующие о сближении звуков, которые наконец сливаются в унисон. Я заставляю таким образом звучать сирену в течение одной минуты. По истечении этого времени циферблат показывает 1.700 оборотов; так как кружок имеет 16 отверстий, то каждому обороту соответствует 16 волн. Умножая 1.700 на 16, получаем 27.200 волн в минуту. Столько же раз погасало и зажигалось снова наше маленькое пламя в течение опыта, т.-е. оно погасало и зажигалось 453 раза в секунду.

Вспышки света, даже мгновенные, производят на сетчатку впечатление, которое длится одну десятую секунды и даже более. Если летящая ружейная пуля была освещена вспышкой молнии, то нам показалось бы, что она стоит неподвижно в воздухе в течение одной десятой секунды. На черном диске с радиальными белыми полосами, если его умеренно осветить и быстро вращать, черные и белые места сливаются и получается серый цвет: между тем при свете электрической искры или при вспышке молнии кажется, как будто диск остается неподвижным и на время ясно видны радиальные полосы. Точно также и поющее пламя состоит из вспышек пламени, и Теплер показал, что если полосатый диск вращать с надлежащей быстротою при освещении таким пламенем, то покажется, будто диск остается неподвижным и белые полосы будут видны явственно. Этот опыт и не труден и интересен.

§ 5. Гармонические звуки пламени.

Поющее пламя так уступчиво по отношению к воздушным волнам, в него ударяющим, что оно почти совершенно подчиняется влиянию трубки, его окружающей. Я говорю почти совершенно, но не совсем. Высота тона зависит в известной степени от величины пламени. Это становится очевидным, если два пламени заставить издавать одинаковый звук и затем одно из них уменьшить или увеличить, тогда унисон немедленно прерывается биениями. Этим способом изменяя величину пламени, можно вызывать верхние гармонические тоны трубок, в которых горит пламя. Лучшее всего этот опыт производится с водородом, потому что здесь сгорание совершается с большею энергией, чем в случае обыкновенного газа. Если трубку, длина которой равна 2 метрам, поместить над большой горелкой водорода, то мы получим основной тон трубки, которому соответствует одно деление воздушного столба посредине. Если я помещу другую трубку в 1 метр длины над тем же пламенем, то не слышно никакого музыкального звука, потому что большое пламя не подчиняется колебаниям более короткой трубки; однако, если я уменьшу пламя, то снова слышится звук, составляющий октаву предыдущего. Я

¹⁾ Газовую горелку, например, можно зажечь, держа ее на расстоянии пяти дюймов над верхушкой другого газового пламени, т.-е. на таком расстоянии, на котором не раскаляются листочки платины.

спимаю короткую трубку и заменяю ее снова длинной; она издает теперь не основной тон, а тот же тон, какой только-что издавала короткая. Соответственно колебаниям короткого пламени, длинный столб воздуха в трубке делится теперь подобно делениям органной трубки, когда последняя дает свой первый гармонический тон. Поэтому, изменяя величину пламени, можно с этой трубкой воспроизвести ряд тонов, числа колебаний которых относятся между собою как 1, 2, 3, 4, 5 и т. д., т.-е. воспроизвести основной тон и четыре первые верхние гармонические тоны.

Хотя поющие пламена никогда не были получены столь сильными и в таком разнообразии, как в настоящее время, тем не менее они известны очень давно. В 1777 году доктор Гигинс обратил внимание на звуки водородного пламени. В 1802 году их подробно исследовал Хладни и указал также на неверное объяснение, данное им Ледюком. Хладни показал, что звуки пламени зависят от трубок, их окружающих, и ему удалось воспроизвести также два первые верхние тона. В 1802 году по тому же предмету делал опыты Деларив. Он вливал немного воды в шарик термометра, подогревал его и получал при этом сильные и мягкие музыкальные звуки, производимые паром в трубке термометра. Вследствие этого он приписал звуки пламени расширению и сгущению водяных паров, образующихся при горении. Мы можем легко повторить его опыт, наполнив водою шарик термометрической трубки и держа его над пламенем спиртовой лампы вкось; звук слышится, как только вода придет в кипение. В 1818 году Фарадей показал, однако, что звуки эти происходят и в том случае, когда воздух, окружающий горелку, имеет температуру выше 100° Цельсия, когда сгущение паров невозможно, и далее, что звуки эти издает также пламя окиси углерода, при сгорании которой не образуются водяные пары.

§ 6. Действия посторонних звуков на пламя. Опыты Шафгона и Тиндаля.

После этих опытов в Берлине был сделан в 1857 г. первый опыт по тому же предмету ныне умершим графом Шафгочем, который показал, что обыкновенное газовое пламя, над которым помещена короткая трубка, при сильном звуке голоса фистулой начинает дрожать, когда этот звук соответствует тону трубки или его высшей октаве. В тех случаях, когда тон трубки был достаточно высок, пламя даже погасало под влиянием звука голоса.

Весной 1857 года я узнал об этом опыте и пробовал повторить его. Краткое сведение об нем в *Poggendorfs Annalen* не давало никаких указаний для этого. Стараясь достигнуть результатов самостоятельно, я обратил внимание на множество замечательных явлений. Между тем граф Шафгоч продолжал свои опыты; долго трудились мы на том же поприще, не зная результатов, достигнутых друг другом; но насколько наши опыты были согласны между собою, его результатам принадлежит первенство. Позвольте мне повторить здесь его первый опыт. В этой трубке длиною 27½ см. спокойно горит маленькое газовое пламя,—оно светло и не производит никакого шума. Я определил заранее тон, соот-

ветствующий этой трубке, и вот воспроизвожу его на некотором отдалении от пламени. Вы все видите, как пламя при этом дрожит. Для того, чтобы оно погасло, отверстие горелки должно быть очень узко. Когда я произвожу тихо тон, соответствующий окружающей трубке, то пламя дрожит. Я усиливаю мой голос, и пламя тухнет.

Причина дрожания пламени лучше всего уяснится при посредстве сирены. Я помещаю инструмент на известном отдалении от поющего пламени; сообщаю его с акустическим поддувалом. По мере того, как звук сирены приближается к тону поющего пламени, вы слышите биения и вместе с тем видите, что пламя начинает танцевать в такт с этими биениями. Чем более звук приближается к тону пламени, тем скачки последнего становятся медленнее и наконец прекращаются вовсе при унисоне; затем, когда звук сирены становится выше звука пламени, они появляются снова и становятся тем быстрее, чем более увеличивается различие между звуками сирены и пламени. Мои опыты показали мне причину этих скачков пламени, которые наблюдал граф Шафгоч; пламя прыгало, потому что тон окружающей его трубки только приблизительно, но не вполне соответствовал тону голоса экспериментатора.

Совпадение скачков пламени с звуковыми биениями лучше всего наблюдается при посредстве камертона, дающего тот же тон, как и пламя. Если на такой камертон налить немного воска, то тон его уже не будет вполне соответствовать тону пламени, и если держать такой звучащий камертон вблизи трубки, в которой поет пламя, то скачки последнего вполне совпадают с звуковыми биениями. Если при этом камертон держать над сосудом, соответствующим ему по резонансу, то вы все можете одновременно слышать биения и видеть танец пламени. Можно изменять темп звуковых биений, увеличивая количество воска, прилепленного к камертону, или уменьшая величину пламени; но всегда биения слышатся одновременно с скачками.

При производстве этих опытов я заметил раз, что когда я возвысил свой голос до известной высоты, одно из пламеней, находившееся до тех пор в совершенном покое, начало петь; я повторил то же несколько раз и каждый раз пламя отвечало на мой голос. То же наблюдение было сделано несколько ранее графом Шафгочем, хотя это было мне неизвестно. Я помещаю трубку в 30 см. длиною над пламенем таким образом, что последнее помещается приблизительно на 1 см. выше нижнего конца трубки: когда дана соответствующая нота, то пламя танцует, но не звучит. Я опускаю трубку ниже, так чтобы оно находилось на 7 см. выше нижнего конца трубки, и оно само собою начинает петь. Между этими двумя положениями есть еще третье, при котором пламя горит молча, но под влиянием внешнего звука начинает петь.

Одно поющее пламя может заставить петь другое пламя. Перед вами два маленьких пламени f и f' (фиг. 123), находящиеся на расстоянии трех футов друг от друга. Трубка над f' имеет 26 см. длины, трубка над f —30 см. Над короткой трубкой помещена небольшая подвижная бумажная надставка, при посредстве которой я могу изменять тон трубки. Пламя f' теперь поет, а пламя f спокойно: я поднимаю надставку над

трубкой f' , и как только достигаю вышины, соответствующей длине трубки f , то последнее пламя начинает также петь. Опыт может быть произведен и иначе: заставив сперва петь трубку f и затем передвигая надставку над f' , можем заставить петь ее пламя, прежде молчавшее. Таким образом одно пламя может действовать на другое на значительном расстоянии, и если вполне соблюдены необходимые условия, то опыт всегда удается. Я считаю пужным еще прибавить, что при посредстве внешнего звука можно также заставить замолчать поющее пламя.

Открытые чувствительные пламена ¹⁾.

Мы до сих пор занимались пламенами, которые окружены трубками и которые без этого не давали бы никакого ответа на те внешние шумы и звуки, которые мы производили для того, чтобы заставить колебаться эти пламена. Но и открытые пламена точно также могут быть сделаны чувствительными.

Это действие музыкального звука на открытые пламена в первый раз заметил профессор Леконт в одном музыкальном обществе в Соединенных Штатах. Он описывает свое наблюдение следующим образом. «Вскоре после начала музыки я заметил колебания пламеней, которые по времени совпадали с слышными биениями. Это явление особенно становилось заметно при сильных звуках виолончели. Было весьма любопытно наблюдать, с какою точностью и совершенством колебания пламеней отвечали даже на трели этого инструмента. Глухой мог бы следить глазами за музыкальной гармонией. К концу вечера, когда потребление газа в городе уменьшилось, и поэтому давление его в горелках усилилось, явление становилось еще явственнее; скачки пламеней усиливались, становились несколько неправильнее, и наконец они начинали мигать, при чем появлялся характеристический шум, доказывающий, что из рожков выходит более газа, чем обыкновенно; тогда я убедился опытом в том, что явления эти не имели бы места без соответствующего им регулирования давления газа в горелке, так чтобы пламя шумело и мигало. Я точно также убедился в том, что эти скачки происходили не вследствие сотрясения стен и пола, т.-е. что они передавались пламенам не косвенным образом через посредство стен, но происходили вследствие непосредственного действия воздушных волн на пламена ²⁾.

То важное наблюдение, что танец пламени замечается не ранее, чем пламя приблизится к состоянию шума и мигания, дает нам возможность повторить опыт Леконта, а точное знание условий явления дает нам возможность изменять его и даже значительно усилить. Перед вами горит свеча: я могу кричать, хлопать, свистать, колотить молотком по на-

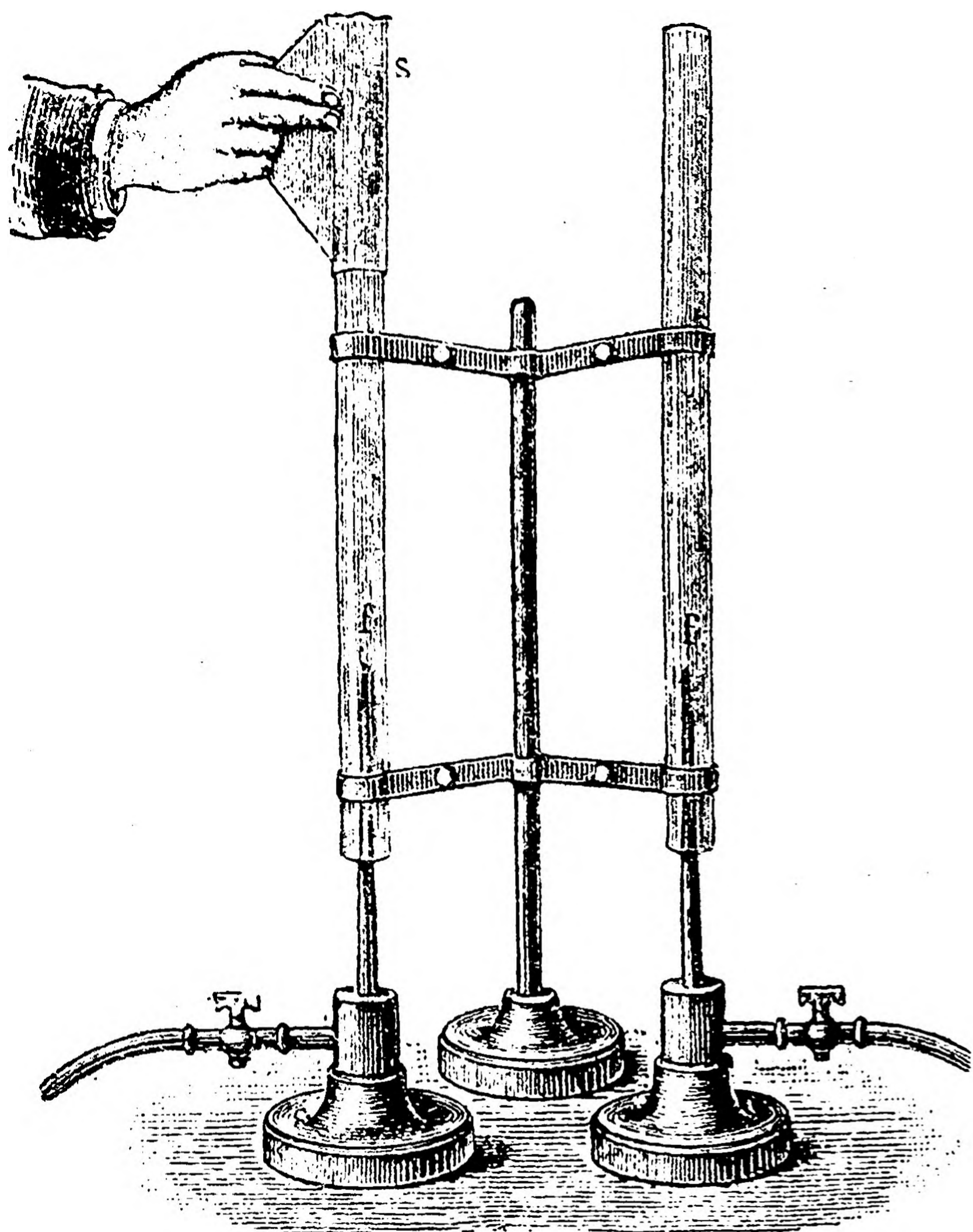
¹⁾ Несклоняемость слова пламя во множественном числе представляет столько неудобств и так мешает ясности, что мы позволили себе отступить от принятой несклоняемости и склонять это слово и во множественном числе.

Прим. перевод.

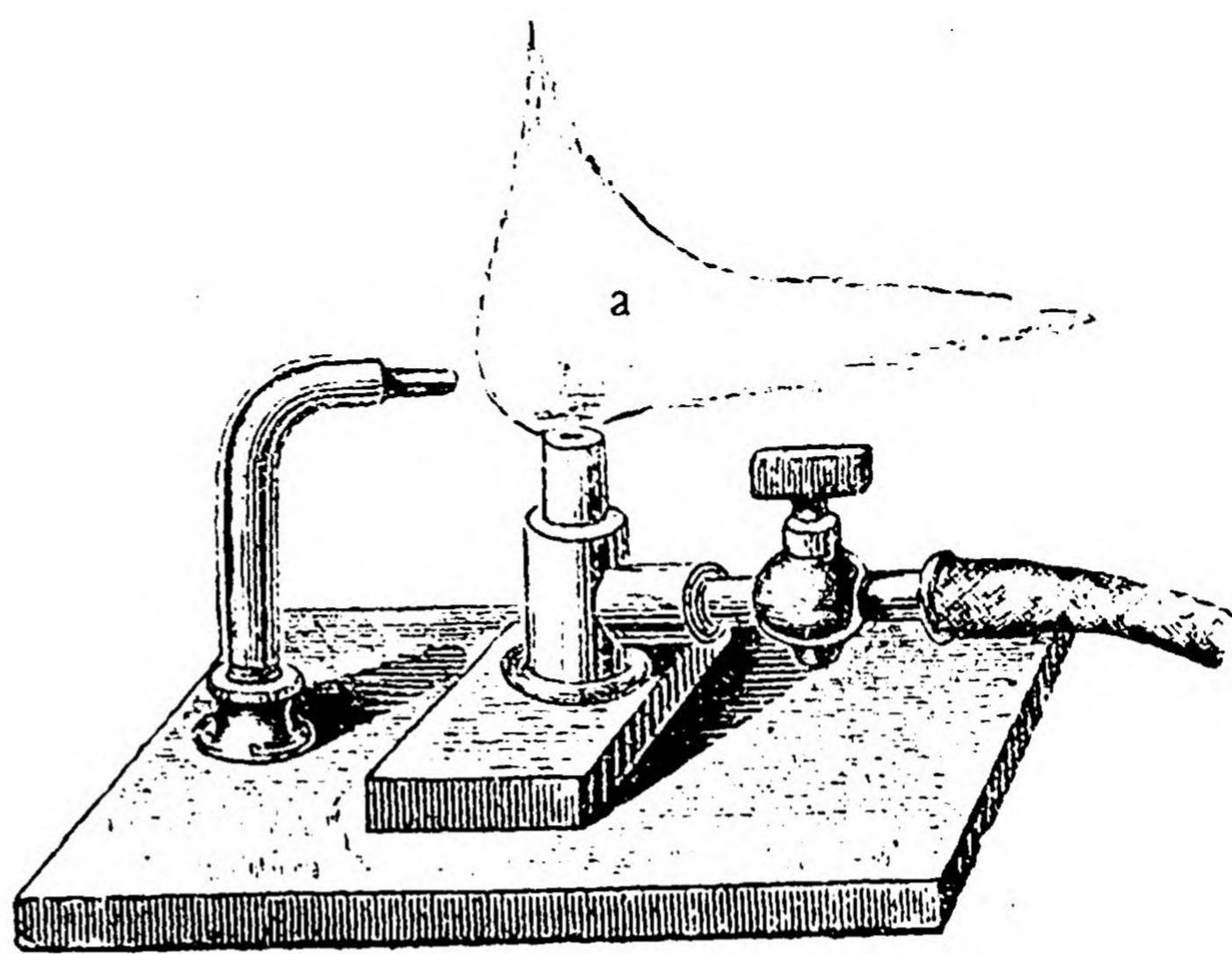
²⁾ «Philosophica Magazine». March 1858, стр. 235. В „Приложениях“ помещена целиком интересная статья Леконта.

вальне, взрывать гремучий газ, и хотя во всех этих случаях являются звуковые воздушные волны, тем не менее свеча остается к ним совершенно нечувствительною.

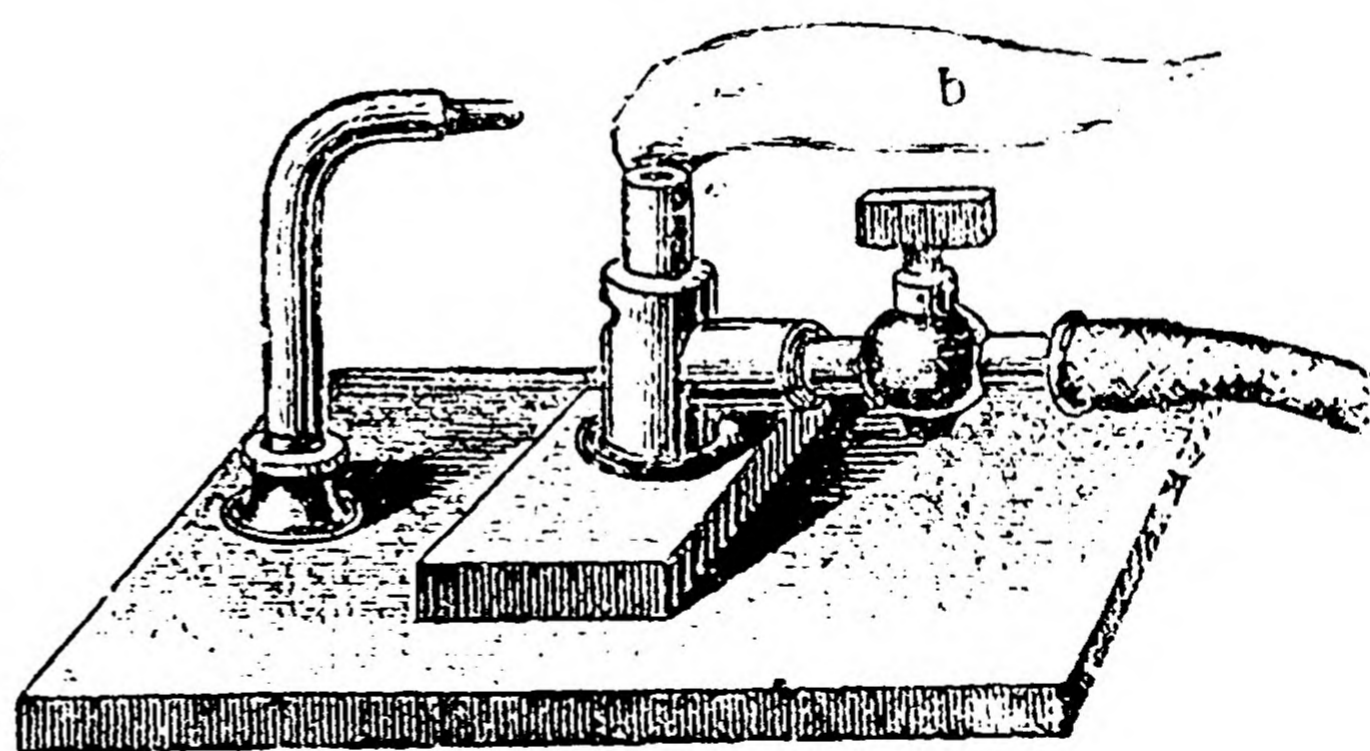
Но я пускаю сквозь пламя тонкую струю воздуха из этой небольшой паяльной трубки, и вследствие этого пламя начинает шуметь, мигать и теряет блеск. Если я теперь свистну, то пламя начинает танцовать. Опыт



Фиг. 123.



Фиг. 124.



Фиг. 125.

можно сделать также таким образом, что вследствие свиста пламя приобретет свой прежний блеск, или совершенно потускнеет. Пламя паяльной горелки в нашей лаборатории совершенно нечувствительно к свисту, пока через него не пропускают тока воздуха. Сорамеряя силу дутья, я достигаю того, что пламя принимает форму, показанную на фиг. 124. Когда я теперь свищу, то направленная вверх часть пламени ложится, и пока продолжается звук, все пламя сохраняет форму, показанную на фиг. 125.

§ 8. Опыты с пламенами, имеющими форму рыбьего хвоста и крыла летучей мыши.

Вот перед нами пламя, имеющее форму рыбьего хвоста: оно горит спокойно и ясно и нечувствительно ни к каким музыкальным, ни немусикальным звукам (фиг. 126). Вы можете издавать тоны какой угодно высоты, свистать, заставляя звучать камертоны, колокола, трубы, и пламя останется спокойным. Едва заметное движение по-

является в нем, если пронзительно свистнуть совершенно близко к нему. Но я больше открываю кран, пламя приближается к границе шума и мигания, и вы замечаете теперь при свисте совершенно неожиданное явление: пламя дает теперь семь волнующихся языков (фиг. 127); пока звук продолжается, языки эти находятся в сильном движении; как только звук прекращается, они исчезают и пламя приходит в покой.

Если вместо горелки, дающей пламя формы рыбьего хвоста, употребим горелку, дающую пламя формы крыла летучей мыши, то такое пламя, изображенное на фиг. 128, будет нечувствительно к самым сильным музыкальным звукам. Это пламя снабжается газом из особого маленького газового резервуара, так что от меня зависит сделать напор газа к горелке сильнее того, который существует в общих газопроводных трубах здания ¹⁾. Я увеличиваю пламя, и вот при свисте край его приходит в движение. Я открываю кран еще более, так что пламя почти начинает шуметь, как это замечается при сильном напоре газа. Я свищу, пламя явственно шумит и принимает немедленно форму, изображенную на фиг. 129.

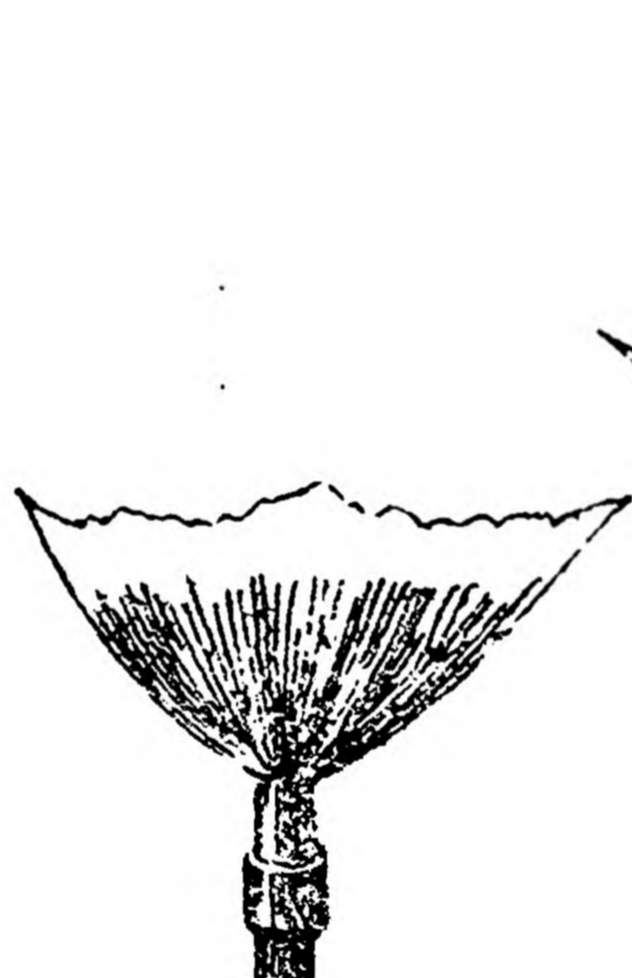
Я ударяю молотком по наковальне в некотором отдалении; языки пламени немедленно вытягиваются.



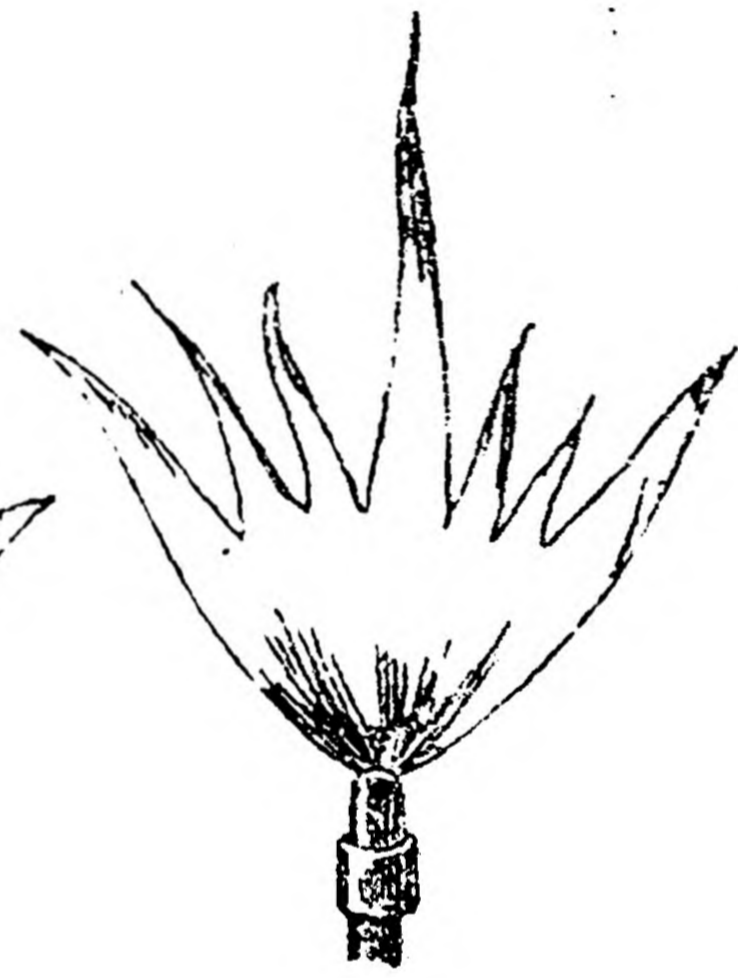
Фиг. 126.



Фиг. 127.



Фиг. 128.



Фиг. 129.

Весьма важное условие для успеха опыта уяснилось мне следующим случайным образом. Я работал в комнате, в которой находилось два газовых рожка с пламенами формы рыбьего хвоста; одно из них танцевало при свисте, другое нет. Кран нечувствительного пламени я закрыл для того, чтобы усилить напор газа к рожку чувствительного пламени. Оно начало шуметь и мигать, и его кран был несколько завернут, чтобы сделать пламя пониже; но оно оказывалось нечувствительным, как бы близко мы ни доводили его до точки шума и мигания. Узкое отверстие, которое оставлял полузавернутый кран, как будто мешало теперь его чувствительности. Когда же кран был вполне открыт и пламя было уменьшено через открытие крана нечувствительной горелки, то оно становилось

¹⁾ Можно также для этих опытов выпускать газ из надлежаще нагруженного газового мешка.

снова чувствительным. До тех пор мы испытывали много обыкновенных горелок и многие из них оказались совершенно нечувствительными; но когда обратили внимание на только что изложенное обстоятельство и стали достаточно открывать краны горелок, то самые упорные горелки становились чувствительными.

Этим способом можно легко и поразительно иллюстрировать наблюдение доктора Леконта. При наших дальнейших, гораздо более тонких опытах применение только что указанного правила еще важнее.

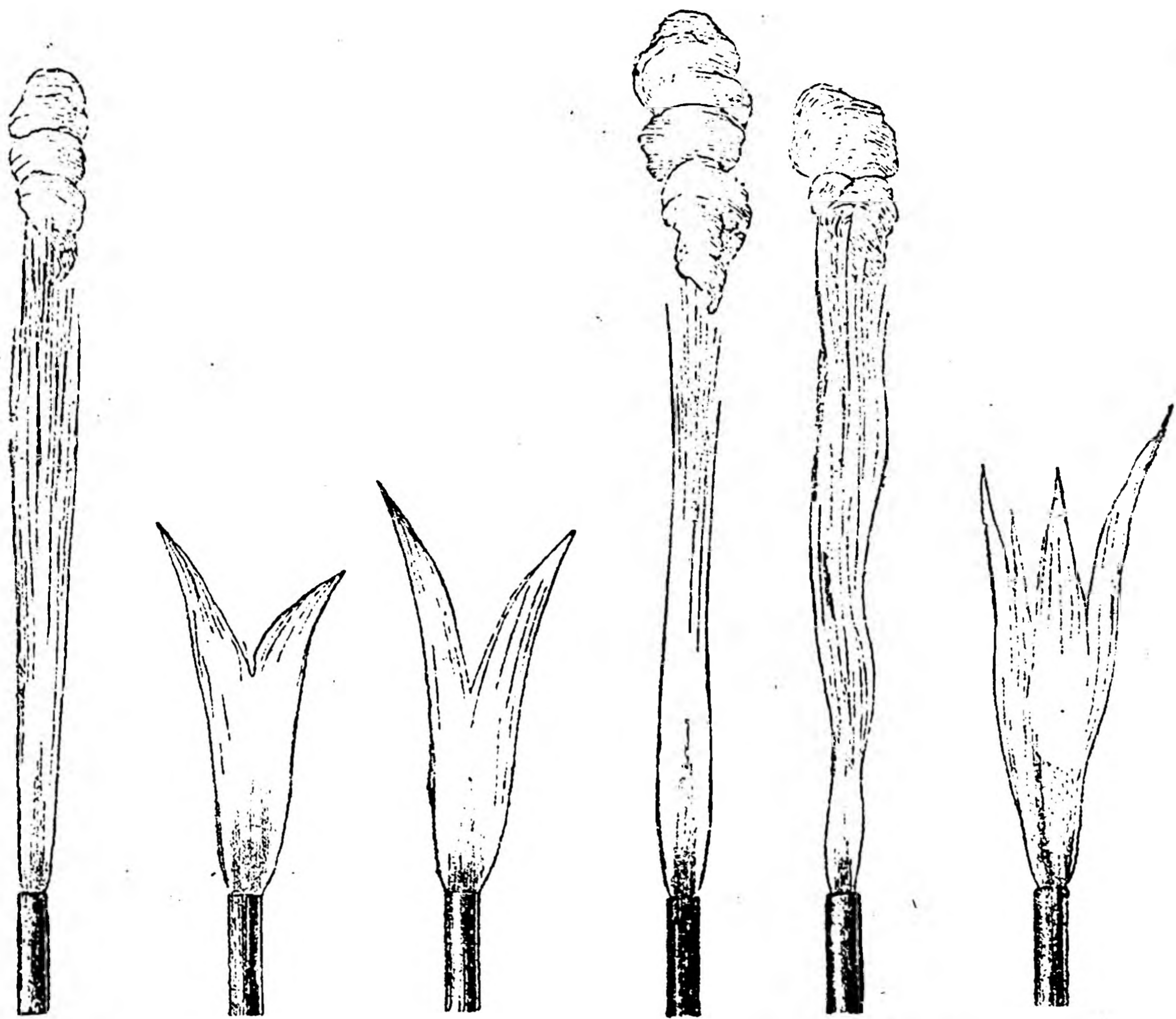
§ 9. Опыты с пламенами из круглых отверстий.

Посредством звуковых вибраций можно, смотря по обстоятельствам, изменять величину пламени в значительной степени, или укоротить длинное пламя, или удлинить короткое. Вот два пламени. Одно (фиг. 130) длинно, прямо и коптит, другое (фиг. 131) коротко и блестяще. При свисте длинное становится коротким и блестящим, как изображает фиг. 132, короткое же удлиняется и коптит, как показывает фиг. 133. Одно пламя таким образом претерпевает превращение совершенно обратное другому. Фиг. 134 представляет другое коптящее пламя, которое при свисте принимает форму, изображенную на фиг. 135. Если темную комнату осветить блестящим чувствительным пламенем и в это время звонить в ней в колокольчик, то получается ряд периодических ослаблений света вследствие влияния звука. Каждый удар колокольчика сопровождается мгновенным затемнением комнаты.

Предыдущие опыты показывали удлинение и укорачивание пламени вследствие звука; но пламя может также быть приведено звуком во вращение. У меня здесь различные горелки собственного изделия, из которых выходят плоские пламена, все приблизительно вышиною в 25 см., наибольшая ширина которых равняется $7\frac{1}{2}$ см. Если свистнуть, то пламя поворачивается на 90 градусов и остается в этом положении, пока продолжается звук.

Вы видите перед собою пламя, необыкновенно спокойное и блестящее; оно горит из одного кругового отверстия соскообразной железной горелки. Пламя такой горелки приходит в беспокойство только при весьма значительном напоре газа, и выбрано мною нарочно для того, чтобы совершенно ясно показать последовательный переход его от апатии к чувствительности. Оно теперь имеет 10 см. в высоту и совершенно нечувствительно к звуку. Усиливая напор газа, я довожу его до 15 см., но оно все-таки нечувствительно. Довожу его до 30 см., и едва заметное дрожание отвечает на свист; но когда я довожу его до 40—45 см., то оно живо танцует, если ударить молотком по наковальне или свистнуть. Я усиливаю давление газа еще более, доводя пламя до 50 см., и вы замечаете, что оно дрожит с определенными промежутками, что показывает близость его к шуму и миганию. Еще немного более напора газа, и оно шумит и в то же время сокращается до 20 см. Я уменьшаю немного давление, пламя удлиняется до 50 см., но находится на границе к тому, чтоб укоротиться снова и шуметь. Как поющее пламя, возбуждаемое внешним звуком, оно находится теперь на краю пропасти, в которую

может его столкнуть надлежащий звук. Оно укорачивается при свисте. точно так же, как это оно делало только что при сильнейшем давлении газа. Это напоминает рассказ о швейцарских пастухах, которые будто снимают в известных местах колокольчики с мулов для того, чтобы звук их не заставил упасть лавину. Равновесие снега должно быть весьма неустойчиво, для того чтобы такая осторожность могла иметь свое основание, и я не думаю, чтобы действительно могло когда-нибудь случиться что-либо подтверждающее такую осторожность. Во всяком случае, если бы это было так, то наше чувствительное пламя могло бы служить объяснением теории такого явления. Мы приводим пламя к границе падения, и звуковые волны довершают то, что уже было готово совершиться.

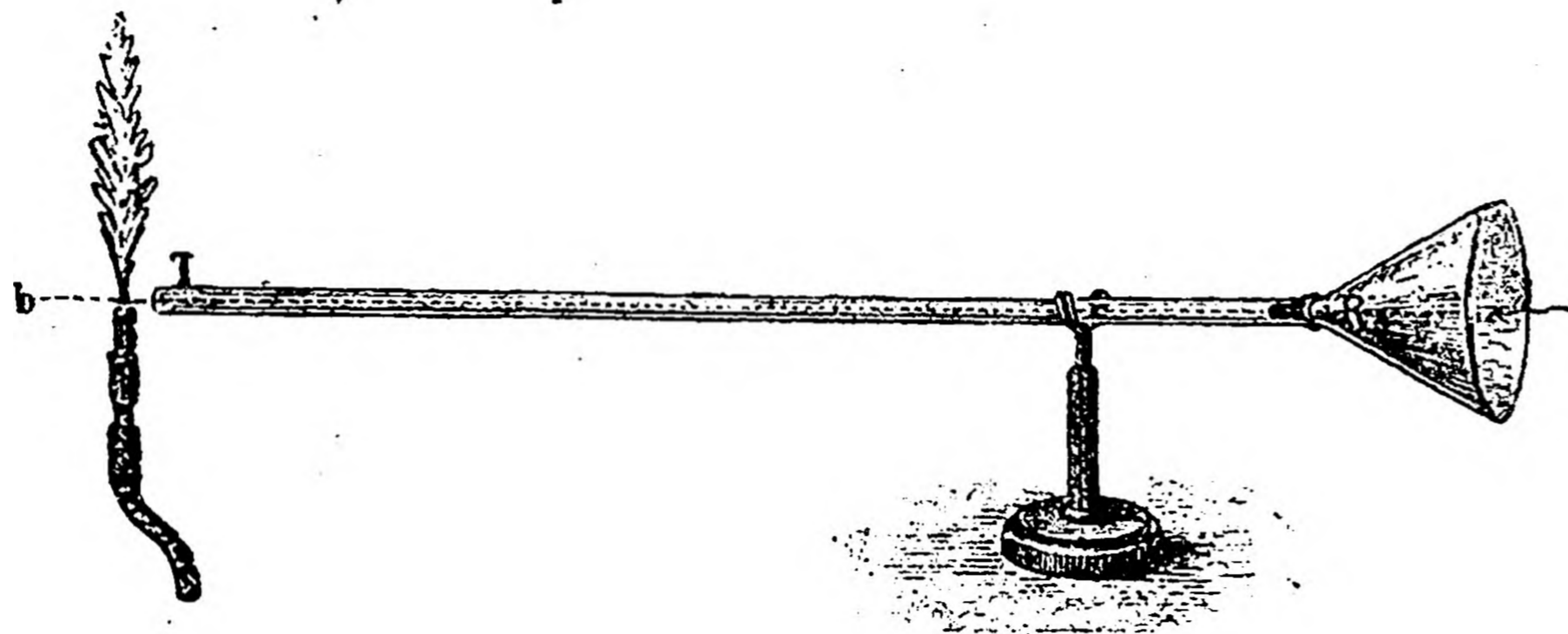


Фиг. 130. Фиг. 131. Фиг. 132. Фиг. 133. Фиг. 134. Фиг. 135.

Если пламя мигает, то это доказывает, что газ в отверстии горелки пришел в колебание, и обратно: если газ в отверстии горелки колеблется, то пламя начинает мигать, если оно перед тем стояло на границе к тому. Следовательно, звуковые колебания, достигая газа при выходе его из горелки, действуют на него точно так же, как и увеличение давления или напора газа из резервуара. Мы видим здесь физическую причину шума и мигания пламени при сильном напоре газа. Явление это, как оно ни обыкновенно, тем не менее, сколько мне известно, не было никогда объяснено. Газ претерпевает в отверстии горелки трение, вследствие которого струя газа при некотором напоре приходит в состояние вибрации, что производит мигание. И вот потому что здесь происходит мигание, ничтожного количества энергии в форме вибраций надлежащей скорости достаточно для того, чтобы произвести действие совершенно такое же, какое бы произвело значительное увеличение давления.

§ 10. Место чувствительности.

Мы таким образом доказали, что внешние вибрации действуют на газ в отверстии горелки, а не на самую горелку, как думают некоторые ученые, не на трубку, ведущую к ней, и не на пламя, находящееся над ней. Стеклянная воронка *R* (фиг. 136) прикреплена к трубке в 1 метр длины и 1 см. в диаметре. Чувствительное пламя *b* помещается у конца трубки *T*, а в самой воронке при *R* помещен мундштук с язычком, дающий высокую ноту. Когда звук направляется на основание пламени, как в фиг. 136, то действие получается наибольшее; когда же направляется



Фиг. 136.

на точку около 1 см. выше горелки, как в фиг. 137, или на 1 см. ниже горелки, как в фиг. 138, то не получается никакого действия. Можно обойтись и без стеклянной трубки и действовать только одной воронкой, при чем нужно только стараться устранять всякие звуки, кроме тех, которые проходят через воронку ¹⁾.

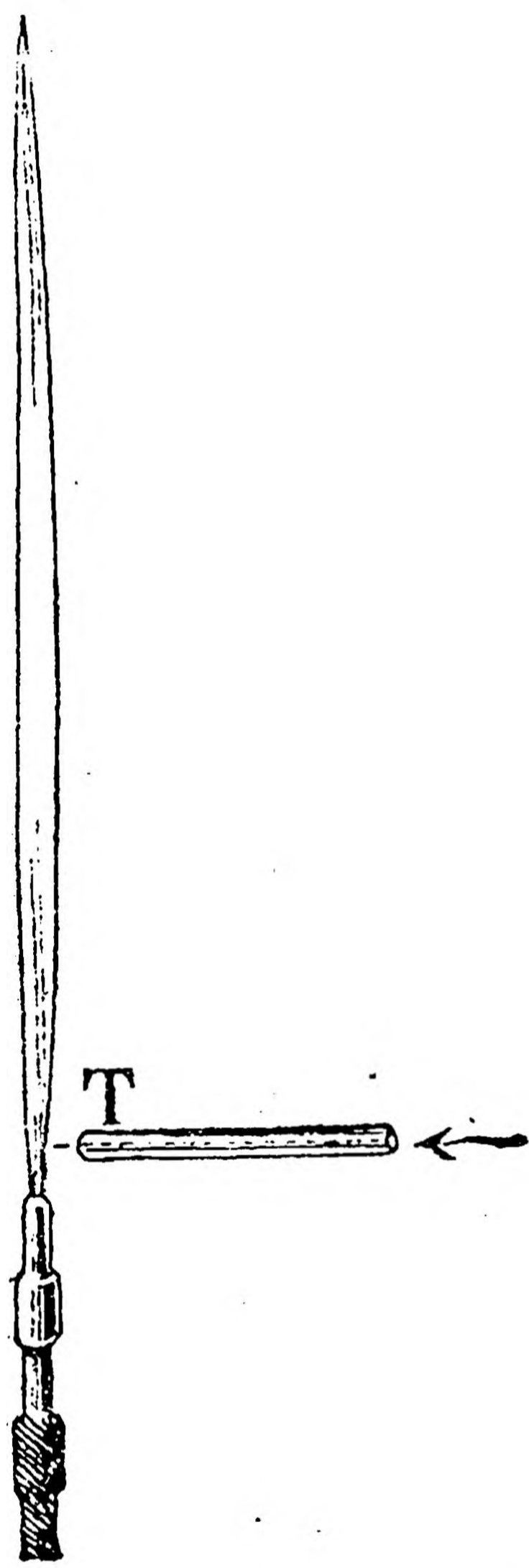
§ 11. Влияние высоты звука.

Не все звуки действуют одинаково на пламя; наибольшее действие производят волны определенной скорости. Весьма действительны волны, движущиеся в такт с прыжками или колебаниями, которые претерпевает газ вследствие трения о края отверстия. При низком давлении низкий мягкий свист действует на пламя сильнее, чем высокий и резкий. При высоком же давлении возбуждающие дрожания должны быть очень быстры и звук, следовательно, высокий и резкий. Из четырех камертонов, производящих 256, 320, 384 и 512 колебаний в секунду, ни один не производит ни малейшего впечатления на пламя нашей сосковой горелки. Но эти камертоны сверх основных тонов могут давать верхние тоны большой высоты. Я заставляю их звучать; они совершают теперь 1.600, 2.000, 2.400 и 3.200 колебаний в секунду; при каждом из них пламя танцует, но всего скорее и живее при тоне наибольшей высоты.

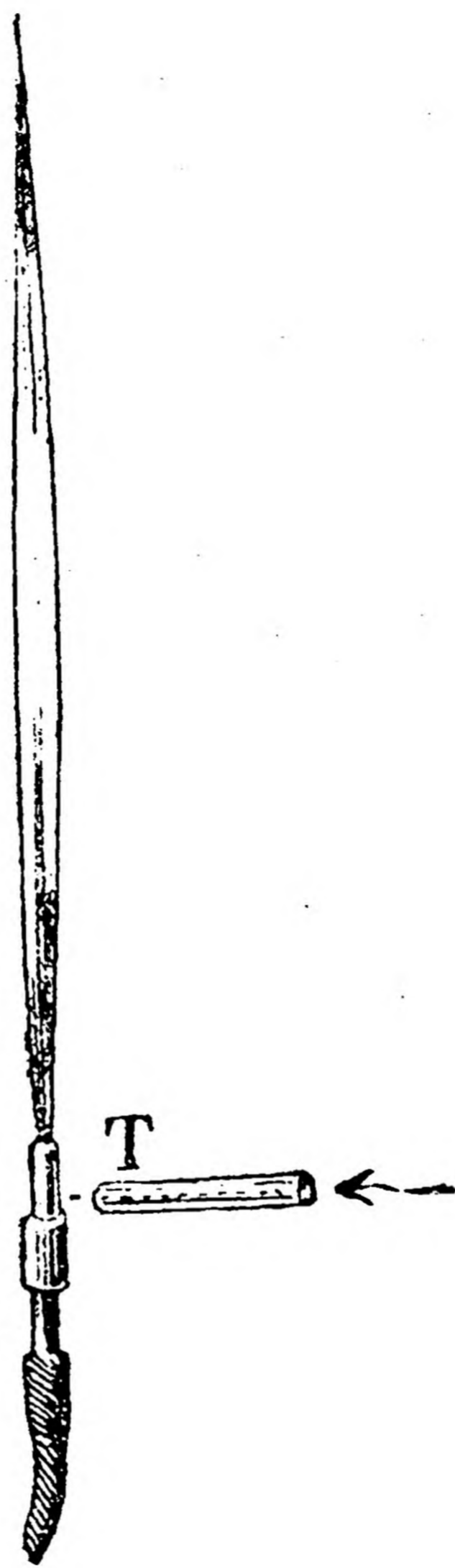
Если ударить молотком по доске, то пламя отвечает; если ударить им по наковальне, то оно отвечает живее и сильнее. Причина этому та, что звук наковальни включает больше высоких тонов, к которым пламя

¹⁾ В описанных выше опытах с паяльной трубкой и пламенем свечи внешние вибрации действовали прямо на струю воздуха, выходящую из паяльной трубки, а не на самое пламя.

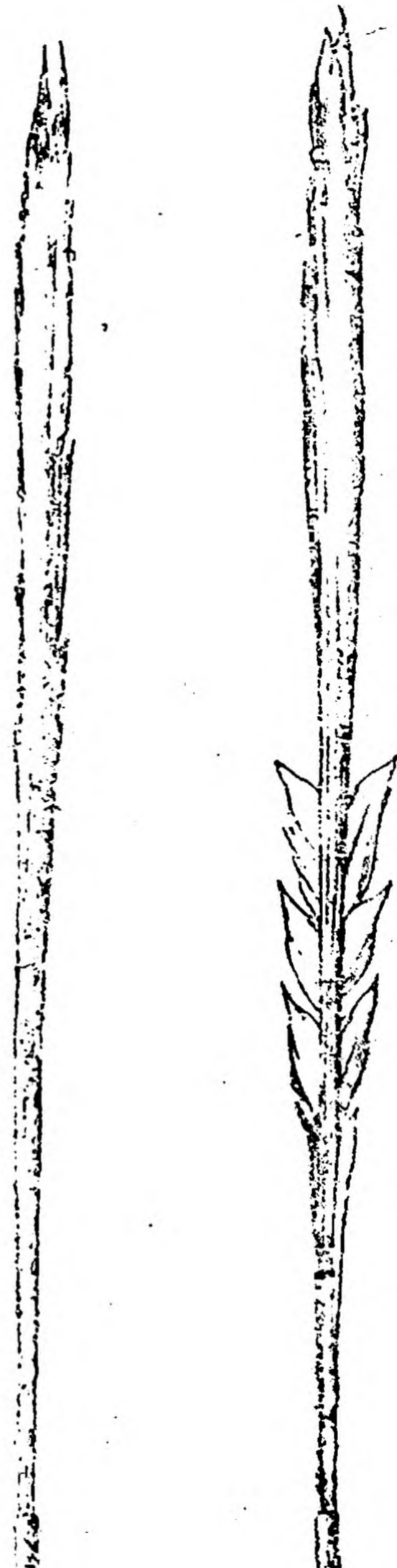
чувствительно. Сильный тон нашего повернутого вверх колокола, когда вблизи последнего помещена его резонансовая трубка, не оказывает никакого действия на пламя; колокол звучит, но последнее остается спокойным. Я привожу в соприкосновение с колеблющеюся поверхностью небольшую монету; дребезжание, которое при этом происходит, заключает в себе высшие ноты, к которым пламя чувствительно; оно немедленно сокращается, как только монета прикасается к колоколу. Мой ассистент уносит другой маленький колокольчик с бьющим в него молотком на другой конец залы, и при каждом ударе молотка о колокольчик пламя сокращается с 50 см. на 20 и при этом шумит.



Фиг. 137.



Фиг. 138.



Фиг. 139. Фиг. 140.

Скорость, с которою распространяется звук по воздуху, весьма ясно обнаруживается в этом случае, ибо между ударом колокольчика и понижением пламени не замечается никакого промежутка.

Если звук, который действует на пламя, весьма короток, то замечается очень оригинальное и поучительное явление: края пламени по середине его мгновенно делаются бахромистыми и украшенными блестяще-светящимися язычками, в то время как средняя часть пламени не изменяет ни высоты, ни толщины. Пламя в нормальном состоянии изображено на фиг. 139, а с бахромами—на фиг. 140. Явление это впрочем чисто субъективное, зависящее от сохранения на сетчатке на некото-

рое время подействовавшего на нее впечатления. В действительности пламя понижается до основания бахром, но снова возвышается столь быстро, что глаз не замечает его укорачивания¹⁾.

§ 12. Действие гласных на пламя.

Я покажу вам теперь удивительно чувствительное пламя. Горелка его, сделанная из стеатита, имеет всего одно отверстие и пламя в 60 см. вышины. Малейший удар по наковальне на известном расстоянии от пламени заставляет его уменьшиться до 17½ см. Когда я приведу в сотрясение эту связку ключей, то пламя приходит в сильное беспокойство и шумит. Если на расстоянии 20 метров от пламени заставить упасть в руке одну небольшую серебряную монету на другую, то оно немедленно опадает; я не могу пройти по комнате без того, чтобы оно не пришло в движение; скрип моих сапогов, разрыв куска бумаги или шум шелкового платья приводят его уже в сильное беспокойство; дождевая капля приводит его уже в колебание; я держу мои часы возле пламени; никто из вас не слышит их стука, но вы видите их действие на пламя, которое падает при каждом их ударе. Такое же беспокойство замечается, если начать заводить часы. Отдаленное чириканье воробья, шум сверчка уже заставляют его падать. Я шепчу на расстоянии 30 м. от пламени, и оно также понижается, шумит; я произнесу несколько стихов Спенсера, пламя выбирает из моих слов известные звуки; в ответ одним оно понижается слегка, в ответ другим больше и наконец в ответ третьим весьма сильно, в то время как оно остается совершенно нечувствительным ко многим из них.

На фиг. 141 представлено это прямое и высокое пламя. Когда я на некотором расстоянии встряхиваю эту связку ключей или шепчу, то вся длина пламени от *a* до *b* исчезает, и пламя принимает вид, изображенный на фиг. 142. Свет его почти угасает и остается только бледный остаток его. Рисунки взяты с фотографий, которые были сняты с пламени. Когда мы делали опыты с этим пламенем в лаборатории, мы его всегда называли пламенем гласных, потому что отдельные гласные действуют на него различно. Я громко произношу низкое полноразличное «у», пламя остается покойно; я изменяю звук в «о», и оно дрожит; произношу «и», и оно сильно движется. Я произношу последовательно слова б у т, б о т, б и т; на первое пламя не дает ответа, при втором оно вздрагивает, а при третьем приходит в сильное колебание. Звук «а» действует еще сильнее. Если бы мы не знали состава гласных, то явление это было бы неразрешимой загадкой; но теперь оно подтверждает только теорию гласных звуков. Так как пламя чувствительнее к высшим звукам, то из его колебаний мы можем заключить, что звук «а» включает высшие звуки, чем

¹⁾ Эти опыты можно варьировать весьма разнообразно: можно употреблять другие горючие газы. Смеси газов дали также весьма поразительные результаты; найдено при этом, что ничтожнейшее количество нечистоты, механически примешанной к газу, оказывает весьма значительное влияние на опыт.

звук и; последний—высшие, чем о, и о—высшие чем у. Считаю лишним прибавлять, что это вполне согласно с анализом Гельмгольца.

Это пламя особенно чувствительно также к букве с. Если бы самый отдаленный из слушателей начал шептать, то пламя отреагировало бы на шепот. Шепот включает те звуковые элементы, которые всего сильнее действуют на пламя. Газ, вытекающий из рожка, производит звук, похожий на шепот, и потому-то последний так сильно действует на пламя. У меня металлический сосуд, наполненный сжатым воздухом. Как только я открываю на мгновение кран, то происходит толчок воздуха, и пламя понижается не вследствие этого толчка воздуха, потому что я нахожусь на таком расстоянии от пламени, при котором подобное объяснение немислимо, а вследствие звука, который производит этот толчок. Я посылаю кого-нибудь на противоположный конец залы, где сжатый воздух начинает выпускаться толчками; при каждом толчке пламя понижается; таким образом шепот одного отверстия действует на пламя, выходящее из другого. В заключение я кладу на стол музыкальный ящик и заставляю его играть, и пламя относится к звукам как чувствительное существо,—опускается то более, то менее при различных звуках.

§ 13. Чувствительное пламя Филиппа Барри.

Филипп Барри открыл новую и весьма подвижную форму чувствительного пламени, которую он описывает в письме ко мне таким образом. «Это самое чувствительное пламя из всех, какие мне известны, хотя по своей небольшой величине оно не так поразительно, как ваше пламя гласных. Оно имеет то преимущество, что обыкновенное давление в газовых трубах совершенно достаточно для того, чтобы произвести его. Способ его получения состоит в том, чтобы зажигать обыкновенный каменноугольный газ не у самой горелки, а на несколько дюймов выше ее, помещая между горелкой и пламенем кусок проволочной сетки. Расположение опыта можно видеть на следующем рисунке (фиг. 143). Пространство между горелкой и сеткой составляет два дюйма. Сетка имеет около 44 квадр. сантиметров и держится на кольце подставки для реторт. На линейном сантиметре она имеет 13 петель. Горелкой служила стеатитовая горелка Сугга с маленьким отверстием, такая, какая употреблялась для пламени гласных.

Пламя имело форму правильного конуса около 10 см. высоты и верхняя часть его издавала блестящий желтый цвет, тогда как основание было несветящееся голубое. При малейшем шорохе это пламя шумит, опускается вниз до сетки и в то же самое время становится невидимым. Оно весьма деятельно в своих ответах и, будучи шумящим, кажется поразительным для уха так же, как для глаза.

На гласные звуки оно отвечает не так отчетливо, как пламя гласных. Оно очень чувствительно к А, слабо чувствительно к Е, несколько более к I, совершенно нечувствительно к О и слегка чувствительно к У.

Оно прекрасно танцует при игре музыкального ящика и в высшей степени чувствительно к большей части звуковых вибраций, действующих на пламя гласных».

§ 14. Чувствительное пламя лорда Рейлея.

Лорд Рейлей недавно придумал новое приспособление для чувствительных пламен. Струя каменно-угольного газа или горелки с маленьким отверстием поднимается вертикально во внутренность полости, из которой удален воздух. Затем струя проходит в медную трубку в несколько дюймов длиною и, достигши ее верхушки, горит на открытом воздухе. Передняя стенка полости состоит из подвижной перепонки из тонкой прозрачной бумаги, через которую внешние звуки могут сообщаться горелке.

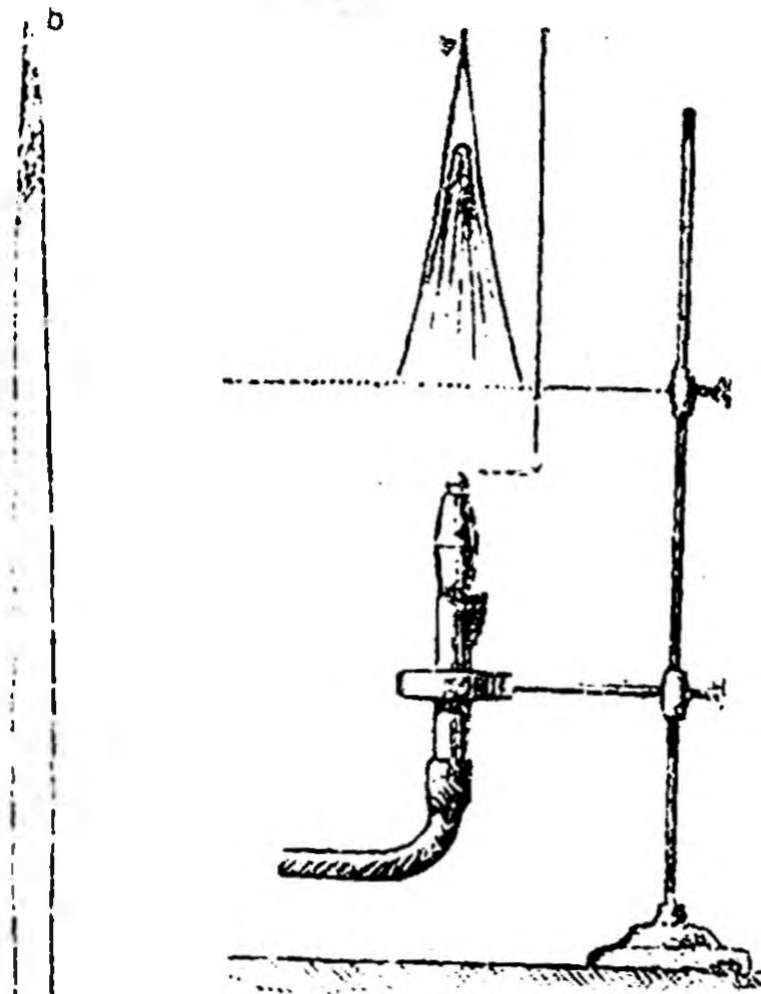
Принцип тот же, что и при пламени Барри. В обоих случаях неважная часть струи есть чувствительный агент, а пламя есть только указатель. Пламя Барри можно сделать весьма чувствительным к звуку, но оно представляет то неудобство, что расстраивается при малейшем движении воздуха. Несколько лет назад Риду предложил заключать струи газа в трубку, непроницаемую для воздуха со дна ее, и зажигать струю только когда она достигнет верхушки трубки. В этом случае, однако, внешние вибрации имеют весьма неполный доступ к чувствительной части струи, и когда они достигнут ее, то представляют то неудобство, что имеют мало движения в поперечном направлении к движению струи. Приспособление лорда Рейлея очень удовлетворительно комбинирует чувствительность к звуку с нечувствительностью к движению воздуха. Если требуется крайняя чувствительность, то нужно приспособлять давление газа до тех пор, пока струя придет в положение мигания без звука.

§ 15. Собирающие и рассеивающие звук чечевицы.

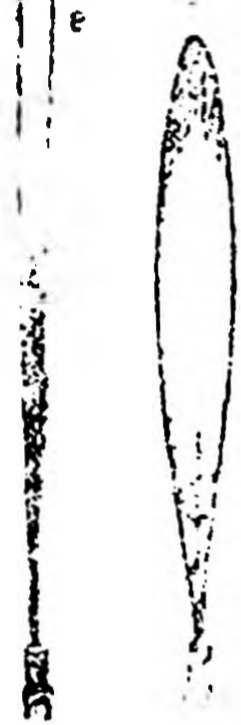
Прежде чем покончить с чувствительным пламенем, я хочу произвести перед вами поучительный опыт преломления звука. Этот предмет уже был иллюстрирован; но предстоящий опыт будет доступен наблюдению не одного только лица, но будет виден всем вам. Он так же покажет нам как собирающие, так и рассеивающие чечевицы.

Закись азота—газ, так часто употребляемый зубными врачами—имеет плотность почти равную плотности угольной кислоты. Этот газ, более подходящий для нас, чем угольная кислота, я и решаюсь употребить его для нашей собирающей звук чечевицы. Сжимая каучуковый мешок, содержащий газ, я делаю большой мыльный пузырь, который и будет служить для нас чечевицей. При *a* (фиг. 144) помещен язычок от фисгармонии, издающий высокий тон. При *c* находится чувствительное пламя. Давление регулируется таким образом, чтобы пламя горело постоянно и спокойно, когда звучит язычок. Затем я помещаю мыльный пузырь *b* (фиг. 145) перед язычком; пламя приходит в бурное волне-

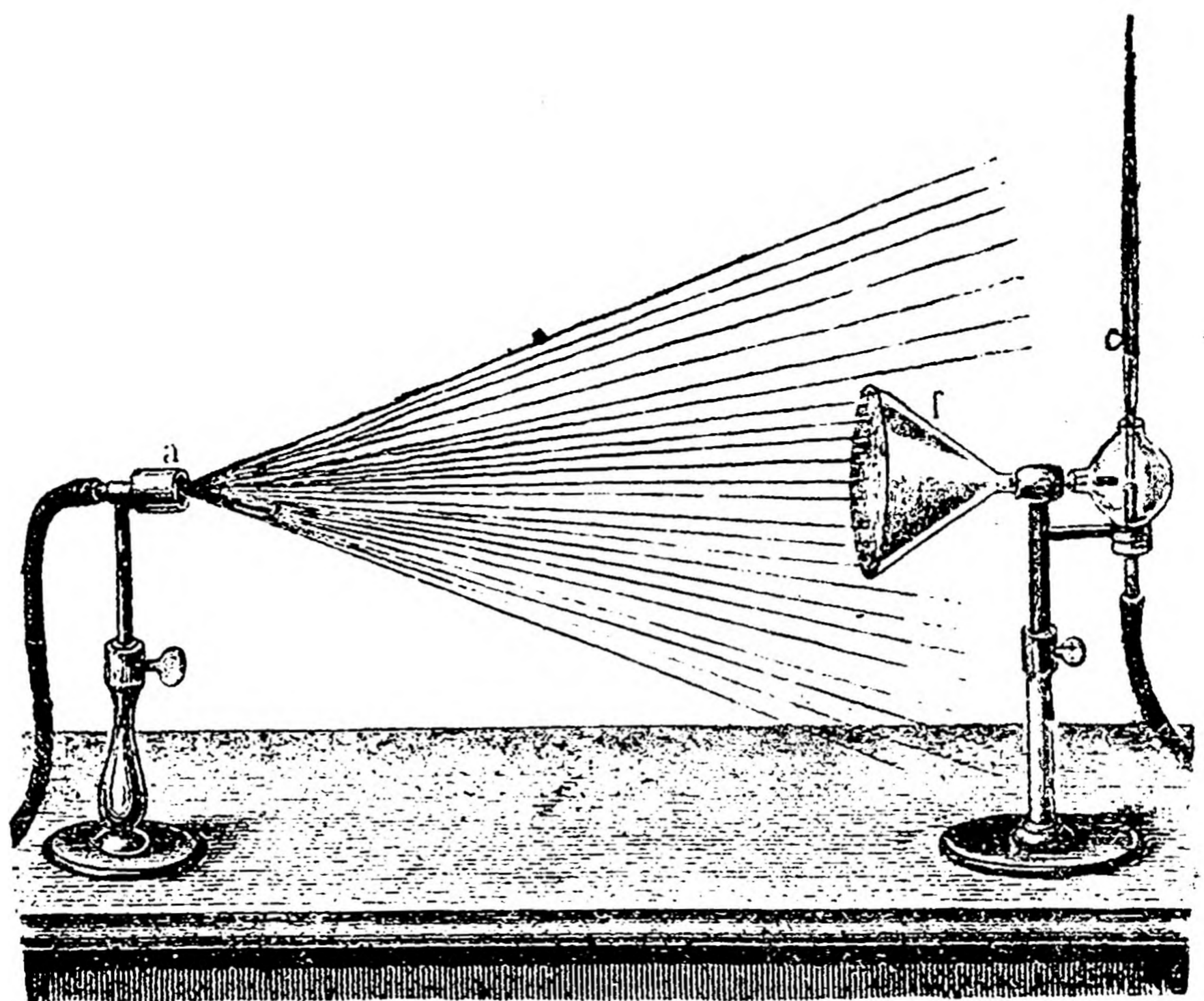
ние вследствие собранных на нем лучей звука ¹⁾. Отодвигаю пузырь, и пламя приходит в спокойное состояние. Я повторяю опыт несколько раз кряду; всякий раз, когда нет пузыря, пламя горит ровно и спокойно; а



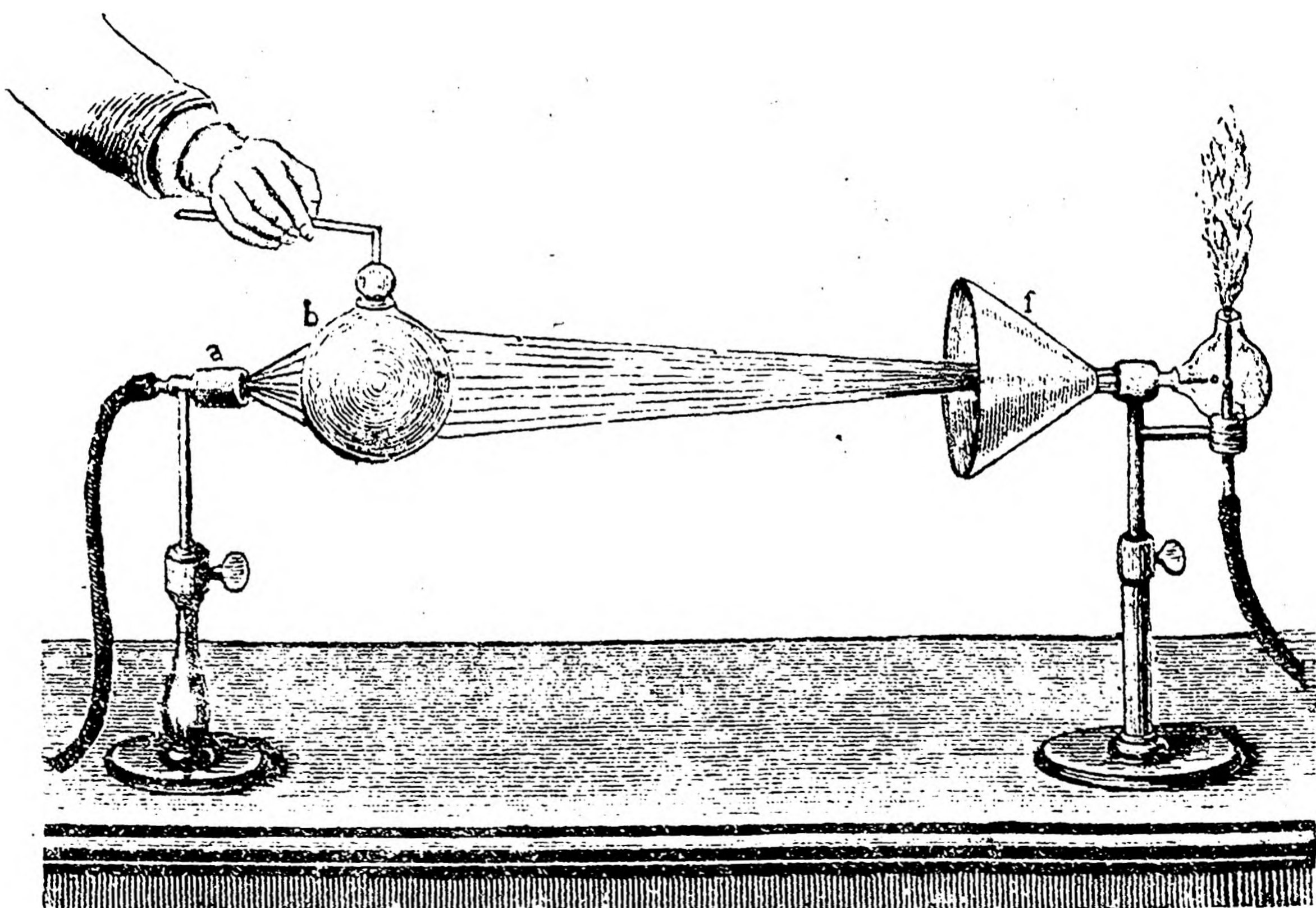
Фиг. 143.



Фиг. 141—142.



Фиг. 144.

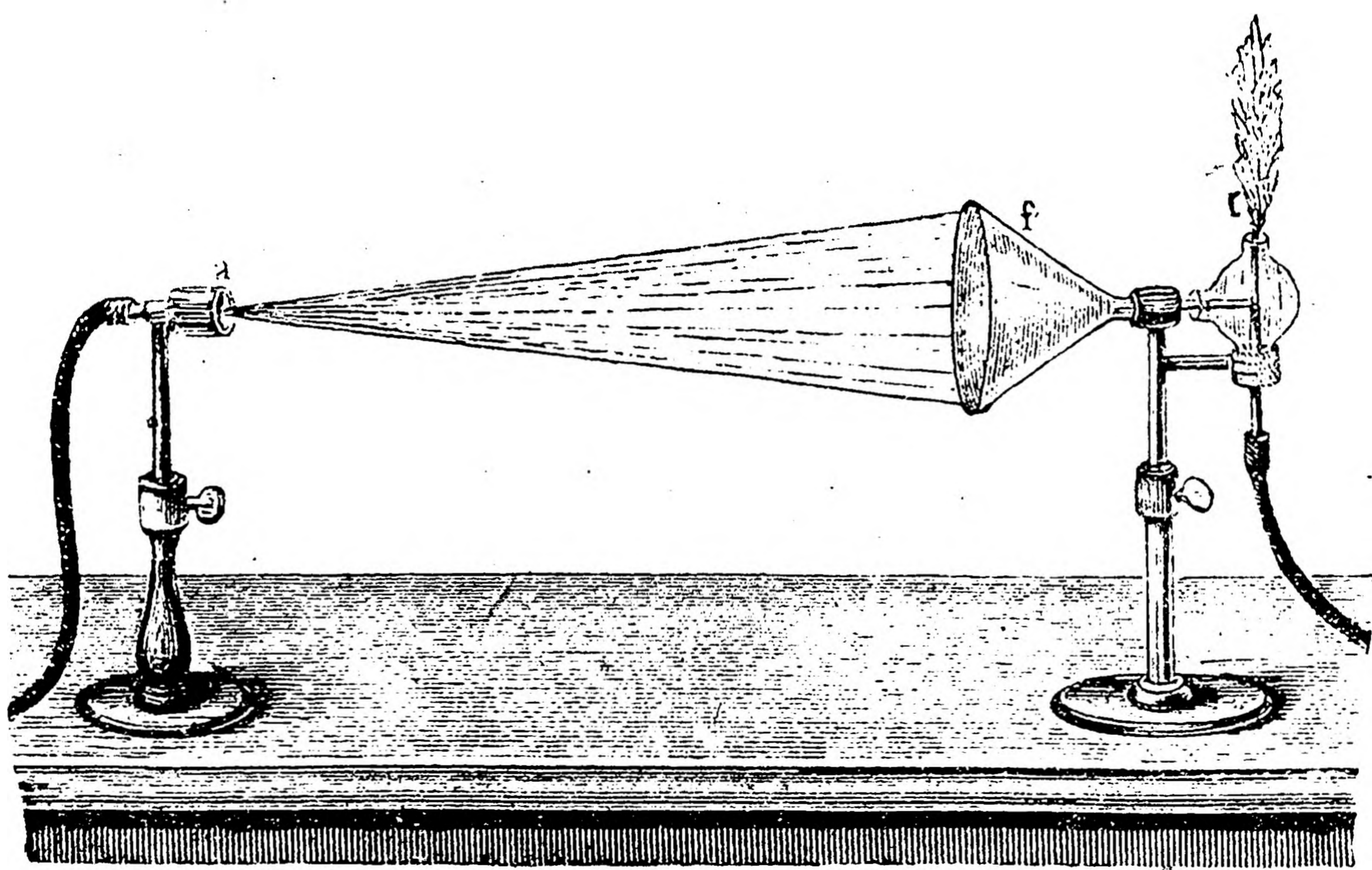


Фиг. 145.

когда вводится пузырь, оно мигает и шумит. Действие пузыря на волны звука вполне соответствует действию двояковыпуклой стеклянной чечевицы на волны света.

¹⁾ Они представлены линиями, идущими от язычка.

А вот другой дополнительный опыт. По закиси азота звук движется медленнее, чем по воздуху; этим и объясняется его способность концентрировать звуковые волны. По водороду же, как вы знаете, звук распространяется с гораздо большей скоростью, чем по воздуху и потому чечевица из этого газа вместо того, чтобы собирать звуковые волны, должна заставлять их расходиться. Посмотрим так ли это. По-прежнему, при помощи смеси Плато я выдуваю большой пузырь водорода. При *a* (фиг. 146) находится наш звучащий язычок, а при *c* наше чувствительное пламя, при чем давление регулируется таким образом, чтобы пламя пришло в сильную ажитацию от звука язычка. Затем я ввожу водородный пузырь *b* (фиг. 147); пламя мгновенно делается длинным и спокойным и продолжает спокойно гореть все время, пока пузырь находится перед язычком. Это действие произошло вследствие расхождения волн звука. Такое действие вполне аналогично действию двояковогнутой чечевицы на лучи света.



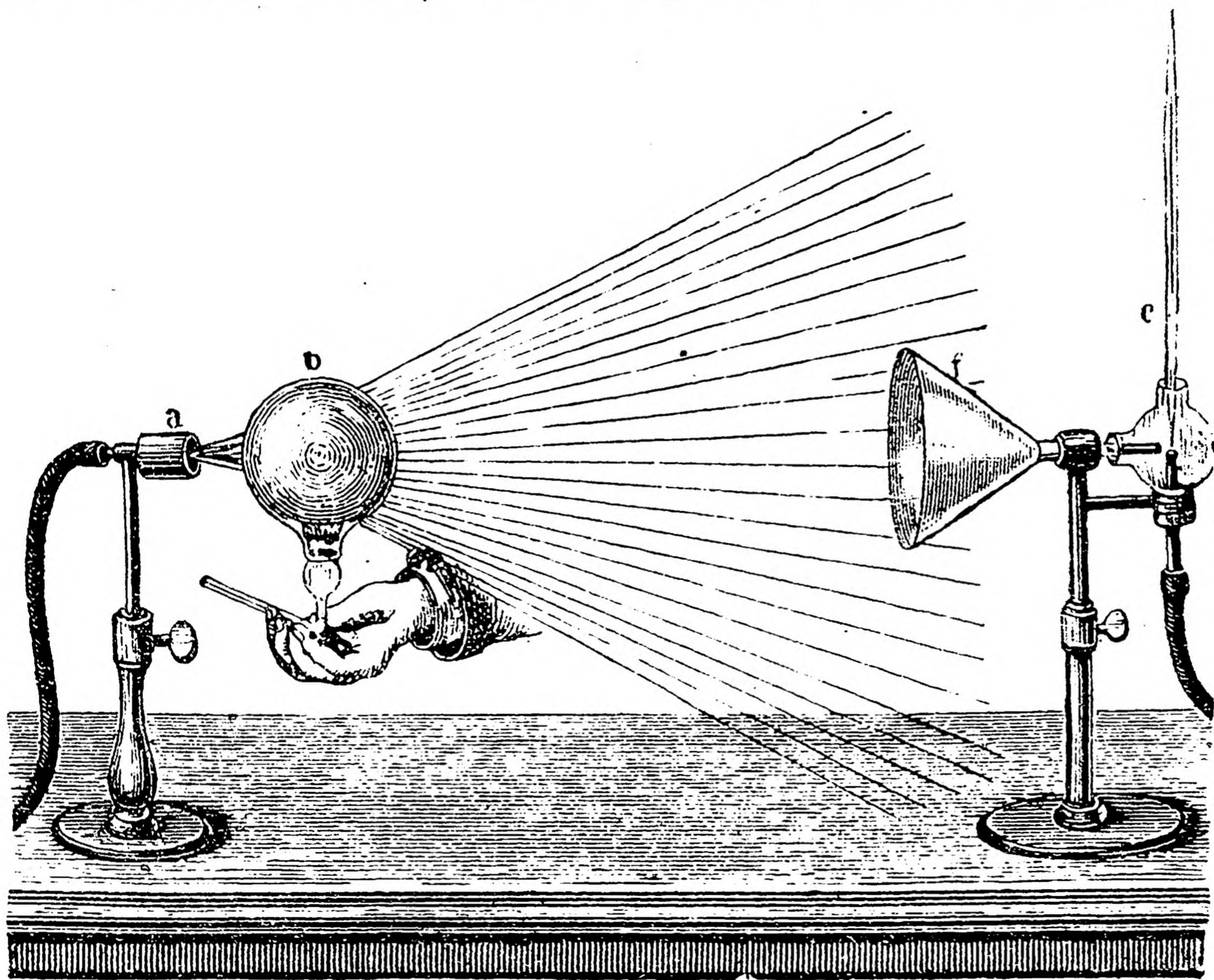
Фиг. 146.

Звуковые чечевицы, употребляемые здесь, не имеют никаких неровностей или неправильностей в кривизне. В этом отношении они совершеннее, чем чечевицы, употреблявшиеся Зондгаузом. Кроме того, они с совершенною приспособляемостью воспринимают и передают звуковые волны. Закись азота более годится для этих опытов, чем угольная кислота, которая быстро повреждает пленку и заставяет пузырь лопаться. Я могу прибавить, что шары из коллодиума, наполненные закисью азота или водородом, также могут служить прекрасными чечевицами.

В предшествующих фигурах *f*, как и прежде, представляет воронку, узкий конец которой направляет звуковые волны на основание пламени.

§ 16. Чувствительные струи дыма.

Явления, которыми мы только-что занимались, не составляют исключительной принадлежности пламеней. То же происходит, если выпускать струю незажженного газа, углекислоты, водорода или даже просто воздуха через отверстие при надлежащем давлении. Так как, однако, ни один из этих газов, выходя в воздух, не виден, то мы должны соединить их с каким-либо веществом, которое бы разделяло их движения и



Фиг. 147.

вместе с тем делало бы последние видимыми. Многие из вас, вероятно, давно знают способ, который мы применяем для того, чтобы делать видимыми воздушные вихри; ударяя по перепонке, затягивающей широкое отверстие наполненной дымом воронки, мы получали дымные кольца, показывавшие движение воздуха. Если мы смешаем в настоящем случае дым с нашими газами, то мы сделаем точно также видимыми движения газов, и при этом окажется, что и незажженные газы столь же чувствительны, как и пламена. Дымные струи прыгают, укорачиваются, делятся вилкообразно, удлиняются в столбики при надлежащих погах. Опыты делаются таким образом: к газу, употребляемому для опыта, присоединяют соляной кислоты и аммиака; пары того и другого вещества, смешиваясь, образуют белые пары нашатыря, которые примешиваются к газу газометра. Мы можем употреблять светильный газ, углекислоту, воздух, водород; все они дают хорошие результаты. Здесь также всего удобнее применять нашу стеатитовую горелку. Я могу из нее выпустить тонкую струю газа, при этом свист, который так сильно действовал на пламя,

теперь не действует. Даже самые высшие ноты из ряда трубок свирели Пана не действуют, так же точно, как и самые низшие. Но если взять среднюю трубку из ряда и заставить ее звучать, то дымовая струя газа понижается, образуя на коротком стержне курчавую голову; струя падает точно также при ударе по столу, точно ее принижает вертикальная струя ветра. Каждый такой удар заставляет струю падать, между тем как удар по наковальне не производит никакого действия. Оказывается, что звуки, к которым чувствительна струя газа, гораздо ниже тех, к которым чувствительно пламя.

Некоторые из этих дымных столбов укорачиваются по длине гораздо более, чем пламена. Удар по столу заставляет 45-ти-сантиметровую дымную струю понижаться до 2 см. Кроме того, такой столб подчиняется звукам человеческого голоса; кашель заставляет его падать, а часы с музыкой—танцовать. При некоторых звуках он принимает форму букета; при других звуках букет образуется на половине высоты; тогда как при некоторых нотах вся струя собирается в облако, оставляя небольшой стержень, едва достигающий одного дюйма. Если музыка продолжается, то движение дымной струи выражается в быстром изменении одной формы в другую. Фиг. 148 представляет различные формы такой танцующей струи.

В совершенно спокойном воздухе эти дымные столбы достигают иногда высоты почти двух футов; в таком случае наши чувствительнейшие пламена уступают таким столбам. Их крутящиеся кольца часто, если не столь поразительны, то более изящны, чем пламена. Не только отдельные слова, но каждый слог приводит такую чувствительную струю в большое беспокойство; но для этого окружающий воздух должен быть совершенно спокоен. И опыты с пламенами возможны там, где нечего и думать об опытах с дымовыми струями¹⁾.

§ 17. Строение жидких струй. Чувствительные водяные струи.

Мы до сих пор рассматривали газовые струи зажженного или незажженного светильного газа, угольной кислоты, водорода и воздуха. Теперь обратимся к водяным струям. Здесь мы встречаемся с рядом необыкновенно красивых опытов, которые известны уже очень давно и имеют некоторую связь с только-что описанными. Это опыты Феликса Савара над водяными струями, которые были повторены различным образом здесь уже не раз. Если в сосуде, наполненном водою, сделать круглое отверстие, то вытекающая струя воды делится на несколько ясно отдельных частей. Часть струи, ближайшая к отверстию, прозрачна, спокойна и подобна стеклянной стержню; книзу ее диаметр уменьшается

¹⁾ Указывая на эти явления, Гельмгольц говорит: Удивительная чувствительность к звуку воздушной струи, пропитанной дымом, описана Тиндалем; мои опыты подтвердили ее. Очевидно, это есть свойство плоскостей раздельности (Trennungsf lächen), которое очень важно при дутье в музыкальные трубки. Discontinuirliche Luftbewegung, Monatsbericht, April. 1868.

до известного предела, начиная от которого струя становится мутной и беспокойной. Кроме того, здесь протяжение струи представляет правильные расширения и сжатия. Савар представил вид такой струи, как она изображена на фиг. 149. В этом рисунке *a* представляет начало струи у отверстия; часть *an* прозрачна и спокойна, в то время как вся часть, лежащая ниже *n*, находится в дрожательном движении. Глазу эта часть струи кажется непрерывною, но если быстро провести поперек струи пальцем, то последний часто окажется не смоченным, чего не могло бы быть, если бы струя была действительно непрерывна. Сквозь верхнюю часть струи нельзя ничего видеть, а через нижнюю можно, и это даже в том случае, если мы воду заменим ртутью. В действительности, следовательно, ниже точки *n* струя делится на жидкие шарики, и ее кажущаяся непрерывность есть следствие продолжающегося впечатления, которое производят падающие капли на сетчатую оболочку. Если капли следуют одна за другою в промежутке меньшем, чем $\frac{1}{10}$ секунды, то впечатление, которое производит одна капля, возобновляется последующей, прежде чем впечатление первой успеет изгладиться, и отсюда происходит кажущаяся непрерывность струи. Если, наблюдая нижнюю часть струи, быстро опустить голову, то струя на мгновение делится на отдельные капли. Самый простой способ сделать видимыми отдельные шарики струи есть, может быть, тот, который я уже давно употреблял, именно освещать в темной комнате такую струю электрическими искрами. Каждая искра показывает капли как бы совершенно неподвижно висящими в воздухе.

Если бы можно было удержать вид струи таким, как он представляется при таком освещении, то он подобен был бы представленному на фиг. 150, и тут легко понять причину видимых расширений и сжатий струи. Капли во время падения постоянно изменяют свою форму; там, где они только-что отделяются от непрерывной части струи, они имеют вид продолговатого сфероида, которого длинная ось вертикальна. Но жидкость не может сохранить этой формы, будучи предоставлена исключительному действию взаимного притяжения ее частиц. Сфероид стремится превратиться в шар; поэтому длинная ось капли укорачивается; но как в маятнике, стремящемся возвратиться в положение покоя, сжатие капли по ее горизонтальной оси идет далее шарообразного состояния и она принимает форму приплюснутого сфероида. Таким образом утончение струи образуется в тех местах, где длинная ось сфероида вертикальна, а расширение там, где она горизонтальна. Можно заметить, что между каждыми двумя такими каплями помещается третья, значительно меньшая. Каждый раз как большая капля отделяется от струи, вновь сокращающаяся струя отделяет вслед большой капле маленького спутника. По словам Савара, это явление замечается постоянно. При помощи простого, по красивому опыту я наглядно покажу вам строение жидкой струи. В нашей электрической лампы мы вынули собирающую чечевицу, так что свет может проходить прямо через вертикальную щель, находящуюся перед камерой. Полученная таким образом полоса света оказывается до того расходящейся, что освещает сверху до низу жидкую струю

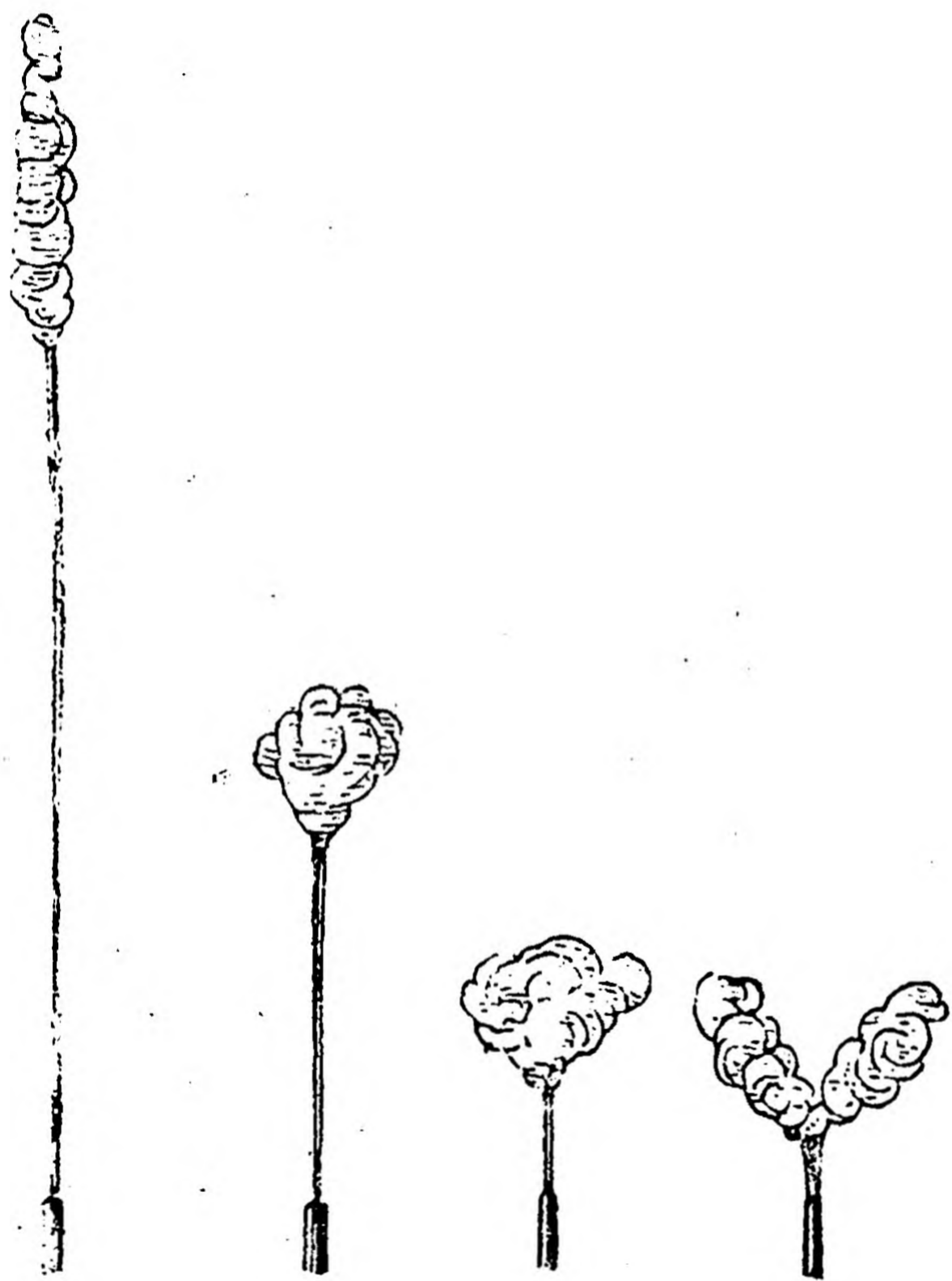
более метра длины, находящуюся в некотором расстоянии от лампы, непосредственно перед которой находится большой цинковый диск, с шестью радиальными щелями около 25 см. длины и $2\frac{1}{2}$ см. ширины. При вращении диска свет падает на струю отдельными вспышками, и когда будет достигнута надлежащая быстрота вращения, то струя покажется разделенной на отдельные шарики. Когда мы примем тень струи на белый экран, то строение ее ясно будет видно всем присутствующим.

Это разделение струи на капли было предметом многих опытов и ему давались разные объяснения. Савар нашел, что пульсации начинаются у отверстия, но не приписывал причину их трению. Но какова бы ни была причина, во всяком случае они подчиняются влиянию звуковых волн. Внутри большого города едва возможно спокойствие воздуха, необходимое для того, чтобы непрерывная часть струи могла достичь своей полной длины, хотя Савару удалось настолько устранить посторонние влияния, что непрерывная часть струи удлинялась до величины, изображенной на фиг. 151. Таким образом фиг. 149 представляет струю, подверженную действию неправильных сотрясений среди города Парижа, тогда как фиг. 151 представляет струю, образовавшуюся среди таких же условий, но свободную от этих сотрясений.

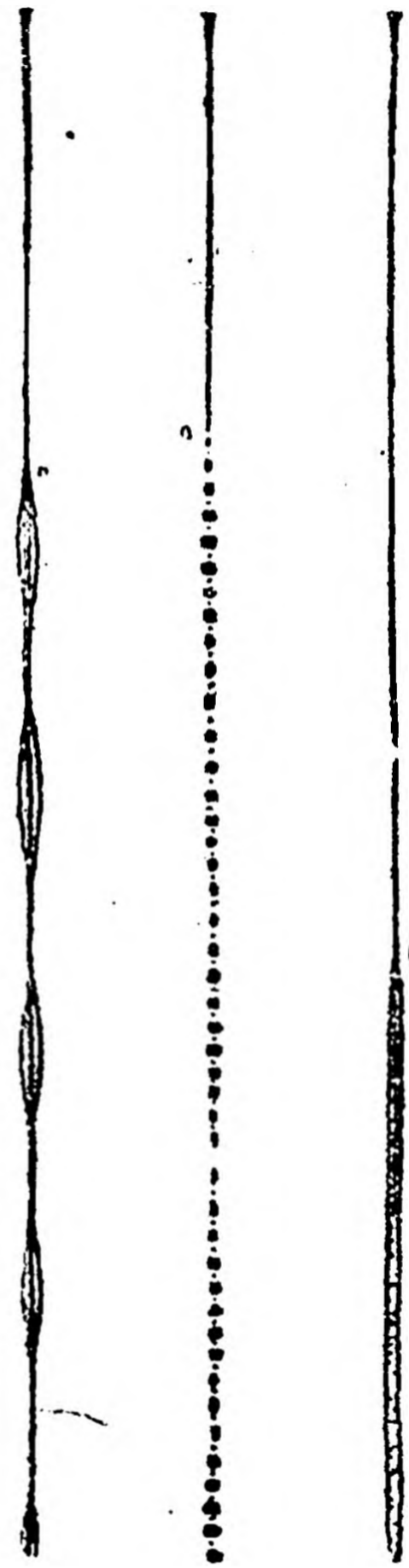
Капли, на которые распадается струя, приготовляются уже в ее чистой или непрерывной части, где они имеют вид кольцеобразных выступов, которые становятся все резче и определеннее, пока не разделятся совсем. Образование их начинается у самого отверстия, и они следуют друг за другом даже при умеренном давлении с такой быстротой, что вызывают слабый музыкальный звук. Если заставить эти капли падать на тонкую перепонку, то можно определить высоту этого звука. Мы приближаемся теперь к опытам, связующим явления чувствительных пламеней с жидкими струями. Если произвести звук вблизи струи однозвучный (в унисон) с нею, то непрерывная прозрачная часть струи немедленно укорачивается. Высота звука может в известной степени даже изменяться, и все-таки производить укорачивание, но всего действительнее звук вполне созвучный струе. Мы недавно повторяли опыты Савара с вертикальными струями в нашей лаборатории с большим успехом. Непрерывная прозрачная часть струи сокращалась под влиянием звука органной трубки средней силы, но надлежащей высоты и находившейся на расстоянии 30 метров от струи.

Плато, производя исследования о фигурах равновесия, принимаемых телами свободными от действия тяжести, нашел, что жидкий цилиндр сохраняется цельным до тех пор, пока его длина не увеличится втрое против его диаметра, или, точнее, пока отношение между длиной и диаметром не превысит отношения диаметра круга к его окружности, или 3,1416. Если оно хотя немного превысит, то цилиндр начинает суживаться к той или другой точке его длины; затем этот самый перехват разрывается, и тотчас же образуются два шарика. Если отношение длины цилиндра к его диаметру значительно превысит 3,1416, тогда цилиндр разрывается не на два шарика, а на несколько их.

Жидкий цилиндр можно получить, вводя оливковое масло в смесь спирта с водою, имеющую плотность одинаковую с плотностью масла. Масло принимает форму шарика. Затем два диска с меньшим диаметром, чем шарик, приводятся в соприкосновение с ним и потом несколько отдаляются; масло прилипает к дискам и шарик превращается в цилиндр. Если количество масла недостаточно, чтобы образовать максимум длины цилиндра, то можно прибавить его посредством пипетки. При этом опыте замечается, что если получится длина больше надлежащей, то перехва-



Фиг. 148.



Фиг. 149—150—151.

ченная часть цилиндра удлиняется и несколько мгновений держится весьма тонкий и жидкий цилиндр, соединяющий два начинающихся шарика; и когда затем последует разрыв, то тонкий цилиндр, превысивший свою надлежащую длину, тоже разрывается и образует маленький шарик между двумя большими шариками. Этот пункт имеет значительную важность для нашего настоящего вопроса.

Плато утверждает, что такая игра молекулярных сил в жидком цилиндре не нарушается и при его поступательном движении. Первая часть водяной струи, выходящая из отверстия, есть цилиндр, к которому вполне применяются законы, установленные им для неподвижных цилиндров. В тот момент, когда падающая струя превысит надлежащую длину, на ней образуются перехваты, и она начинает превращаться в капли; но, увлекаемая вперед давлением сверху и своею собственною тяжестью, она в течение момента времени, необходимого для округления капли, уходит на известное расстояние от отверстия. На этом расстоянии, так как давление остается постоянным и струя свободна от внешних возмущений, непременно совершается разрыв. И этот разрыв сопро-

вождается явлением, которому выше я придал значительную важность. А именно, между каждыми двумя последовательными большими шариками образуется маленький шарик, как показано в фиг. 150.

Если струю масла заставить течь из отверстия не в воздух, а в смесь спирта с водой надлежащей плотности, то можно очень явственно видеть непрерывную часть струи, ее распадение на капли и образование маленького шарика между каждой отделившейся каплей и концом жидкого цилиндра, от которого она только-что оторвалась. Эти и другие подобные опыты приводят к убеждению, что изящное объяснение, данное Плато, верно. Разные законы, установленные экспериментально Саваром, все прямо вытекают из теории Плато.

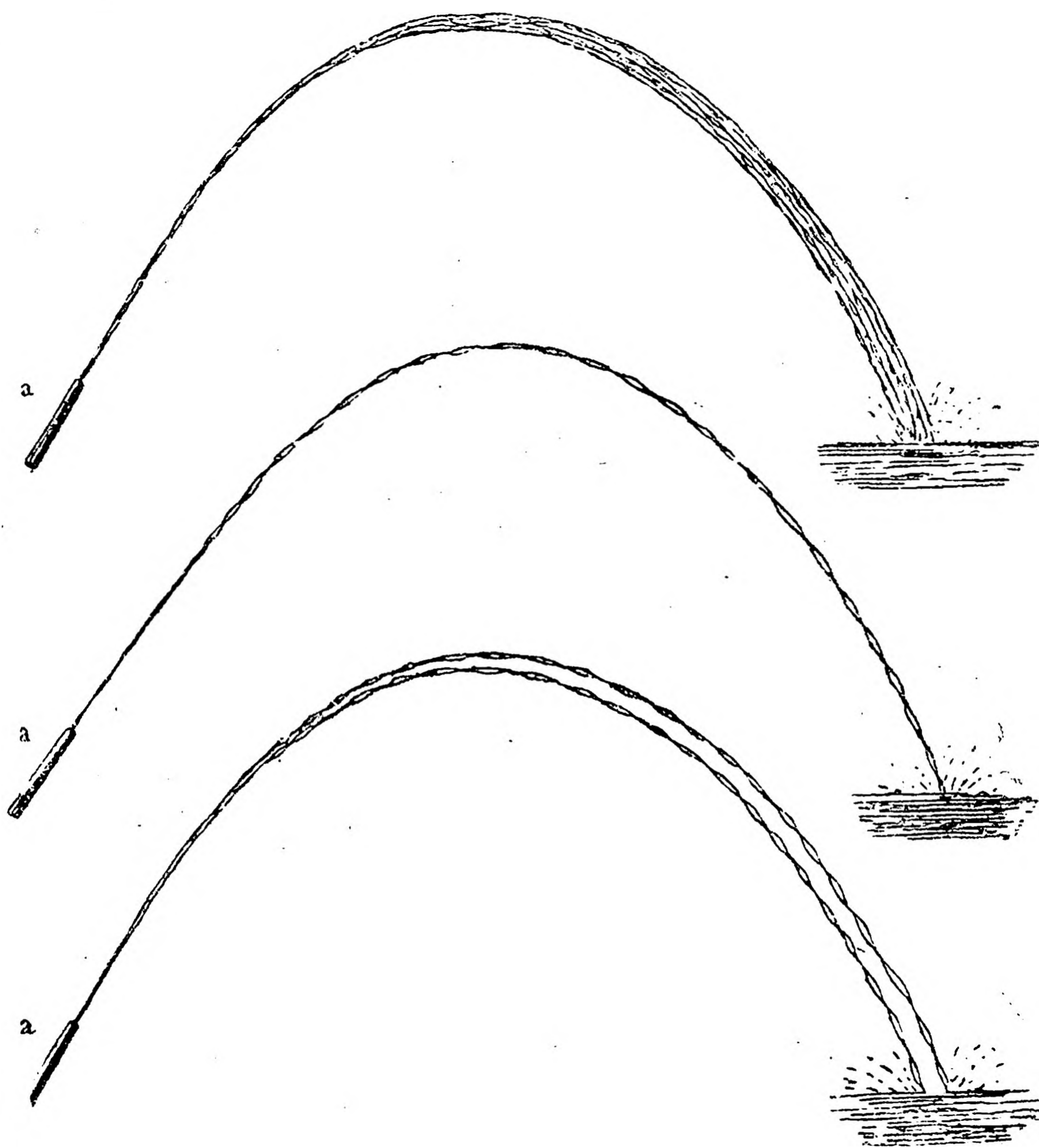
В небольшом моем печатном мемуаре я обратил внимание на тот факт, что если вытекающая струя пересекает какую-нибудь жидкую поверхность выше точки своего разрыва, то если давление не слишком велико, она входит в жидкость молча; но если жидкая поверхность пересекает струю ниже точки разрыва, то слышится журчанье и образуется много пузырьков. В первом случае не только нет сильного разбрызгивания жидкости по сторонам, но она еще собирается в кучу вокруг основания струи и в противоположность своему движению вследствие ее поверхностного натяжения или капиллярного притяжения. Этот эксперимент можно красиво и поучительно комбинировать с двумя другими наблюдениями Савара. Кроме укорачиваний под влиянием звука непрерывной части струи, Савар еще нашел, что если его перепонка пересекала струю в одном из ее расширений, то звук был громче, чем в том случае, когда пересечение находилось на суженном перехвате.

А вот я выпускаю струю почти без давления из трубки в три четверти дюйма в диаметре, и она молча входит в бассейн воды около 50 см. ниже отверстия. Если при этом сильно звучит камертон, вибрирующий 128 раз в секунду, то прозрачная часть струи немедленно разрывается и появляются три расширения выше поверхности воды. Сейчас же слышится журчанье воздушных пузырьков, и бассейн наполняется ими. По мере того как звук ослабевает, непрерывная часть струи удлиняется, при чем замечается ряд изменений в образовании пузырьков. Когда поверхность воды в бассейне пересекают расширения струи, то пузырьков бывает много и слышно громкое журчанье; а когда поверхность пересекается суженною частью, то пузырьков бывает немного, и журчанье едва слышно. Наконец струя, когда звук прекратится, принимает вид первоначальной непрерывности и постоянства.

Если удалить бассейн и на место его поставить железную тарелку, то при звуке камертона струя, которая сначала беззвучно ударяла в тарелку, начинает журчать, и это журчанье усиливается или ослабевает с ослаблением звука, смотря по тому, расширения ли или сужения струи ударяют в поверхность. Это—простые, но красивые опыты.

Савар исследовал также струи горизонтальные и наклонные к горизонту под различными углами и нашел, что в известных случаях, под влиянием звуков, струя может делиться на три ветви. В этих опытах жидкость вытекала через отверстие, сделанное в топкой пластинке. Мы

заменим ее нашей стеатитовой горелкой, потому что и в этих случаях она имеет такое же превосходство над другими, как и в опытах с пламенами и газами. Кроме того, она дает нам еще новые результаты. Посредством каучуковой трубки эта горелка соединена с водопроводом здания. Направляя ее наискось вверх, получаем прекрасную параболическую струю (фиг. 152,1). На определенном расстоянии от отверстия струя делится на красивые капли, которые следуют недостаточно быстро друг за другом для того, чтобы луч казался непрерывным. На вершине пара-



Фиг. 152—153—154.

болы капли разошлись на расстояние более одного дюйма, а у конца струи еще дальше. Если провести смычком по камертону, дающему 512 колебаний в секунду, то капли сближаются точно под влиянием взаимного притяжения и образуют, повидимому, непрерывную дугу в несколько метров вышины и длины (фигура 153,2).

Пока длится звук, струя кажется как бы замерзшей и неподвижной. Я останавливаю звук камертона, и струя снова распадается на капли. Каждый новый удар смычка о камертон заставляет их снова соединиться.

Свисток, органная трубка, человеческий голос, дающие ту же ноту как и камертон, действуют также сильно на струю. Взяв надлежащую ноту моим голосом с умеренной силой, я заставляю разрозненные капли

струи собираться. Повидимому, нет разницы, будет ли действовать мой голос на расстоянии 20 м. от струи или у самого ее истока.

При помощи быстро вращающегося цинкового кружка с радиальными щелями на струю можно направить ряд вспышек. Тогда распадение ее на капли делается очевидно заметным и в то же время каждый из присутствующих в этой большой зале может видеть образование и расположение новых капель на конце непрерывной части струи в то время, когда звучит надлежащий музыкальный тон. Это один из самых эффектных опытов.

Влияние биений на такую струю также поучительно. Биения можно получить или при посредстве органичных трубок или при посредстве камертонов. В следующей лекции мы увидим, что если звучат два камертона, из которых один производит 512, а другой 508 колебаний в секунду, то они дают 4 биения в секунду. Я заставляю звучать оба камертона и замечаю, что струя собирает и рассыпает свои капли в такт с биениями. Если поместить оба камертона на отдаленном столе и заставить их биения замирать постепенно, то струя продолжает свое ритмическое движение, пока только можно слышать звуки. Подобная струя может превзойти чувствительностью даже ухо, что весьма замечательно, если принять в соображение необыкновенную тонкость этого органа¹⁾.

Если лейденскую банку ввести в цепь сильной индукционной спирали, то получается ряд блестящих искр, длящихся одно мгновение. Я произвожу темноту в комнате и освещаю струю такими искрами; капли становятся видимыми, ибо каждая из них превращается в маленькую звезду поразительного блеска. Они разрознены. Я произвожу надлежащей высоты звук, и струя собирает свои капли в жемчужную нить ни с чем несравнимой красоты.

При этих опытах капли соединились в непрерывную дугу при надлежащем звуке; но, изменяя опыт, можно также заставить струю разделиться на две или более ветвей, как показывает фиг. 154,3. Впрочем рисунки здесь совершенно излишни, ибо самое замечательное в этих опытах, это—мгновенные переходы струи из одного состояния в другое. Поразительная сторона явления заключается в движении, а движение нельзя нарисовать²⁾.

1) Когда эти оба камертона были приведены в соприкосновение с сосудом, из которого вытекала струя, то видимое их влияние на струю продолжалось долго после того, как звук их перестал быть слышен.

2) Опыты над звучащими пламенами в последнее время весьма расширены моим ассистентом Котрелем. Если произвести трение одного пламени о другое, то можно произвести различные музыкальные звуки, из которых одни походят на звуки трубы, другие напоминают пение жаворонка. Трение незажженных токов газа дает подобные же, но не столь поразительные результаты. Если направить оба пламени обыкновенной горелки, дающей пламя формы рыбьего хвоста на платиновую пластинку, как это делается в «перфекторах» Шоля, то звук походит на звук трубы и бывает весьма силен. Две зажженные струи газа можно

ОБЗОР ШЕСТОЙ ЛЕКЦИИ.

П о ю щ и е п л а м е н а.

Когда газовое пламя горит в трубке, то воздух, проходящий через пламя, приходит в колебание, от которого происходит музыкальный звук. Если сделать поправку на температуру столба воздуха, находящегося над пламенем, то высота звука пламени соответствует открытым органным трубкам такой же длины, как и труба, окружающая пламя.

Колебания пламени, пока продолжается звук, заключаются в том, что пламя ритмически совершенно или наполовину угасает и снова загорается.

Периодичность движения может быть показана с помощью вогнутого зеркала, отбрасывающего изображение явления на экран. Если изображение ясно, то движение зеркала обращает изображение пламени в ряд таких изображений. Темные места между изображениями соответствуют погасанию пламени, а самое изображение—его новому возникновению.

Кроме основного тона трубок, пламя может также производить их высшие гармонические тоны. Деление воздушного столба при этом одинаково с делением органной трубы, дающей верхний тон.

Если произвести звук почти созвучный с трубкой, в которой горит пламя незвучащее, то оно начинает прыгать; и если его положение в трубке надлежащее, то можно его заставить звучать посредством посторонних звуков.

Когда пламя поет, посторонний звук, находящийся почти в созвучии с ним, но не совершенно в унисоне, вызывает биеция, с которыми в ритм прыгает пламя. Скачки пламени появляются также и тогда, когда положение пламени в трубке не то, при котором оно звучит.

Ч у в с т в и т е л ь н ы е п л а м е н а

Когда давление на питающий пламя газ усиливается, то пламя увеличивается до известного размера. При более сильном давлении пламя шумит и мигает.

Шум и мигание пламени происходят от тех колебаний, в которые приходит газ в отверстии горелки, если давление, которым он выгоняется, слишком сильно.

Если внешним звуком производятся колебания у отверстия горелки, то пламя мигает уже при незначительном давлении. Газ, вытекающий при сильном давлении, проходя через горелку, приходит в колебание

заставить сделаться плоскими подобно водяным струям Савара. Или же их можно заставить свернуться в два полых рога, представляющих поучительный пример вихревых плоскостей (*Wirbelflächen*) Гельмгольца. Частицы угля, несущиеся в пламени, поднимаются вместе с рогами в виде непрерывной раскаленной добела или докрасна спирали, которая тухнет на высоте нескольких дюймов от места ее образования.

определенной скорости. Чтобы производить наибольшее действие на пламя, колебания внешнего тона должны совпадать с колебаниями вытекающего газа.

Когда найден такой тон и пламя находится близко к состоянию мигания, то оно представляет весьма чувствительный акустический реактив.

Чирикание воробья, например, в состоянии привести его в движение на расстоянии 30 метров.

Посредством мыльных пузырей, надутых закисью азота для одной цели и водородом для другой, можно прекрасно и поразительно иллюстрировать рассеивание и собирание звуковых волн. Собирающая звуковая чечевица приводит спокойное пламя в бурное волнение. А рассеивающая звуковая чечевица сильно волнующееся пламя делает совершенно покойным. Действие двояковыпуклых и двояковогнутых стеклянных чечевиц на свет имеет полнейшую аналогию в явлениях звука. Действия чувствительных пламеней должны быть приписаны не самому пламени; подобные же явления замечаются с незажженными струями газов, светильного, углекислоты, водорода и воздуха. Эти струи могут быть сделаны видимыми при посредстве дыма, и такие дымовые струи чувствительностью едва ли не превосходят даже пламена.

Когда блестящее чувствительное пламя освещает темную комнату, в которой звонит колокольчик, дающий звуки подлежащей высоты, то при этом происходит правильно повторяющееся погасание света. Каждый удар колокольчика сопровождается моментальной темнотой в комнате.

Струя воды, вытекающая из круглого отверстия, состоит из двух отдельных частей: одна прозрачная и спокойная, другая сотрясающаяся. Если анализировать первую часть, то она оказывается непрерывной; другая же часть состоит из последовательных капель.

Если эти капли принимать на перепонку, то является музыкальный звук. Если вблизи струи раздается посторонний звук такой же высоты, то непрерывная часть укорачивается.

Разорванная часть струи представляет ряд расширений и сужений, из которых в первых капли являются плоскими, а в последних—удлиненными. Звук, производимый плоскими каплями, при ударе в перепонку бывает громче, чем производимый удлиненными каплями.

Выше точки разрыва водяная струя входит в воду беззвучно; но если при этом звучит надлежащий тон, то немедленно слышится журчание пузырьков; разорванная часть струи поднимается выше поверхности и по мере ослабления звука последовательные расширения и сужения производят изменения в количестве пузырьков и в звуке их.

В струях, вытекающих наклонно, надлежащий звук может собрать раз'единенные водяные капли, так что образуется видимо непрерывная жидкая дуга.

Жидкие струи можно анализировать посредством электрических искр, или ряда вспышек, освещающих струю.

Лекция седьмая.

ЧАСТЬ I.

ИССЛЕДОВАНИЯ ОБ АКУСТИЧЕСКОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ В ПРИМЕНЕНИИ К ВОПРОСУ О СИГНАЛИЗАЦИИ ПРИ ТУМАНАХ.

Введение.—Приборы и наблюдения.—Влияние звуковой тени.—Противоречивые результаты.—Разрешение противоречий.—Воздушное отражение и его причины.—Воздушное эхо.—Акустические облака.—Экспериментальное доказательство задержки звука вследствие воздушного отражения.

§ 1. Введение.

Забота о своих моряках есть одна из первых обязанностей морской нации, а одна из величайших опасностей для моряка есть его близость к берегам в ночное время. Отсюда явилась идея предупреждать его о такой близости зажиганием огней иногда на естественных возвышенностях, а иногда на башнях, специально построенных для этой цели. Близ Довер Кестль находится старинный маяк такого рода.

Но по мере развития английского мореходства, требовались более совершенные маяки с лампами, которые помощью параболических рефлекторов разливали бы свой свет над морем. Иногда несколько таких ламп группировались вместе для усиления света, который на небольшом расстоянии казался исходящим как будто из одного источника. Это «катоптрическая» форма аппарата и теперь еще иногда употребляется на английских маяках; но уже с давнего времени она все более и более заменяется большими чечевицами, придуманными знаменитым французом Френелем.

В первоклассном диоптрическом аппарате свет получается от ламп с несколькими концентрическими светильниками и достигает большой силы вследствие очень сильной тяги. В неподвижных лампах чечевицы преломляют лучи, исходящие из них таким образом, что они образуют световую плоскость, распространяющуюся на морской горизонт. В вращающихся лампах чечевицы собирают лучи в отдельные пучки, подобно спицам колеса, которое вертится над морем, и пучки последовательно попадают в глаз моряка.

Наибольшая сила света предназначается не для ясной погоды, потому что при такой погоде она не нужна. Не предназначается она и для

очень туманной погоды, потому что при такой погоде она недействительна. Но она требуется для пасмурной погоды, когда идет снег или дождь, потому что при такой погоде сильный свет может быть виден, тогда как слабый свет совсем не будет виден. Обыкновенная первоклассная лампа имеет четыре светильни, но сэр Джеймс Дуглас, искусный и неутомимый инженер Trinity House, увеличил число светильней до шести, и они дают великолепное пламя¹⁾. Лампе с светильнями предшествовала и превосходила ее силой горелка Вигама в Дублине, которому мы обязаны удачным применением газа к освещению маяков. В некоторых маяках сила горелок была от 28 до 108 газовых струй, между тем как в маяке Гелли Гид можно было по желанию пустить 432 струи. Такая большая сила требовалась только во время тумана, и горелка в 28 струй была вполне достаточна при ясной погоде. Переход от малой горелки к большой и от большой к малой можно было делать легко, быстро и верно. Это употребление газа практиковалось в Ирландии, но торговая палата с благоразумною щедростью предоставляла Вигаму все способы для развития его изобретения.

Новейший сильный агент, употребляющийся для маячного освещения, есть электричество. В этом самом институте Фарэдей, начиная с 1831 г., доказал существование и разъяснил законы тех индуктивных токов, которые в настоящее время получили такое удивительное развитие. К этому именно предмету относятся следующие пророческие слова Фарэдея: «Я желал,—писал он в 1831 г.,—лучше открывать новые факты и новые отношения, зависящие от магнито-электрической индукции, чем увеличивать силу уже открытых, в полной уверенности, что последние найдут свое полное применение впоследствии». Труды современных электриков представляют блестящее исполнение этого пророчества.

Наши самые сильные источники света, лампа с 6-ю светильнями, Вигамова газовая лампа и электрический свет, предназначенные помогать морякам в пасмурную погоду, могут считаться в известном смысле туманными сигналами. Но мы знаем, что паровое облако, выходящее из трубы локомотива, может затмить лучи даже полуденного солнца; поэтому неудивительно, что в густой туман наши самые сильные освещения, не исключая и электрического света, могут оказаться бесполезными для моряка.

Последствием этого могут быть самые гибельные кораблекрушения. В течение 10 лет до 1874 не менее 273 судов погибло у английских берегов во время тумана или пасмурной погоды. Я думаю, что еще больше потерь было у американских берегов, где судовое движение гораздо больше и туманы бывают гораздо чаще, чем в Англии. Неудивительно поэтому, что самые серьезные усилия делаются для того, чтобы найти замену света в звуковых сигналах, настолько сильных, чтобы давать предупреждения и указания морякам в то время, когда они еще находятся в безопасном расстоянии от берегов.

¹⁾ Позже была устроена под руководством инженера от Trinity House лампа с 8 светильнями.

Такие сигналы устроены и на английских берегах, но их гораздо больше на берегах Канады и Соединенных Штатов. Доказательства же их действительности и пользы имеют противоречивый характер, и не имеется тщательных исследований, которые разъяснили бы с несомненностью и примирили противоречивые наблюдения. По возвращении моем из Америки в 1873 г. «Старшие Братья» Trinity House предложили мне взять на себя руководство исследованиями, которые должны были пополнить указанный пробел. Я принял предложение побуждаемый скорее чувством долга, чем надеждою, так как я боялся, что наблюдения будут неинтересны, научные результаты ненадежны. Но изучение всякой естественной проблемы, если его вести тщательно, наверное в конце концов вознаградит исследователя. И таким образом в настоящее время, после нескольких предварительных попыток ощупью, на этот предмет стал проливаться свет, обнаруживший много прежних ошибок и открывший несколько новых истин.

§ 2. Положение вопроса.

В весьма дельном и обстоятельном письме, адресованном президенту торговой палаты в 1863 г. ¹⁾, Робинсон из Армаха сумму наших знаний о туманных сигналах сводит к следующему. «Почти все, что известно о туманных сигналах, находится в Report on Lights and Beacons; и в нем многое не больше как одни догадки. Вот сущность того, что известно. Свет едва ли пригоден для этой цели. Синие огни употребляются в Гугли; но неизвестно, на каком расстоянии они видны во время тумана; их сияние видно дальше, чем их пламя. Было бы однако желательно определить, как далеко можно заметить электрический свет или его вспышки ²⁾. Звук есть единственное вполне действительное средство; но сведения о нем противоречивы и едва ли есть хоть один факт об нем как о сигнале, который можно было бы считать вполне установленным. Даже самый важный вопрос, на каком расстоянии он перестает быть слышимым, остается нерешенным. До настоящего времени все звуковые сигналы делались в воздухе, хотя эта среда представляет большие неудобства: собственные течения воздуха мешают звуковым волнам, так что выстрел или звон, которые слышны на несколько миль по ветру, становятся неслышны даже на $\frac{1}{8}$ часть мили против ветра. Еще большее неудобство состоит в том, что он бывает наименее действителен именно в то время, когда он наиболее нужен, так как туман сильно ослабляет звук».

Робинсон выражает здесь господствующее мнение и при этом указывает теоретическую причину акустической непрозрачности тумана. «Туман,—говорит он,—есть смесь воздуха и пузырьков воды и на каждой из бесчисленных поверхностей, которыми они соприкасаются, часть

¹⁾ Report of the British Association for 1863, p. 105.

²⁾ С того времени на берегах Англии установлены сильные электрические маяки.

вибраций отражается и теряется ¹⁾... Снег производит такое же действие, но еще более вредное».

Если, таким образом, признавалось, что на поверхностях взвешенных частиц происходит отражение, то из этого уже следовало, что чем больше таких частиц, другими словами, чем гуще туман, тем вреднее его действие на звук. Поэтому оптическая прозрачность считалась мерою акустической прозрачности. Об этом предмете Робинсон в указанном письме говорит таким образом: «Прежде всего очевидно, что для того чтобы производить сравнимые опыты, мы должны иметь какую-нибудь меру способности тумана ослаблять звук, без чего можно ожидать самых аномальных результатов. Кажется вероятным, что она находится в некотором простом отношении к непрозрачности тумана для света и что расстояние, на котором исчезает данный предмет, напр., флаг или вежа, может быть принято за меру этой способности». «Спокойный ясный воздух признается в этом письме наилучшим проводником звука, а предполагаемое действие туманов, дождя и снега приписывается тому, что они делают атмосферу разорванной средой».

Александру Бизли мы обязаны очень ценным сводом существующих знаний о туманных сигналах ²⁾. Он описывает различные употреблявшиеся в дело инструменты и действия их. Относительно влияния тумана на звук положения, высказанные в его мемуаре, согласны с вышеприведенными мнениями Робинсона. «Туманы,—говорит он,—имеют замечательную способность ослаблять звук и действуют в этом отношении так неправильно, что опыты, произведенные в ясную погоду, имеют весьма мало или почти никакого значения, кроме разве только того, что дают сравнительные пробы разных инструментов».

Во время прений, последовавших за чтением мемуара Бизли в Институте гражданских инженеров, Гладстон, бывший членом комиссии о маяках, сказал следующее: «Трудность при употреблении звука состоит в том, что туманы очень сильно ослабляют звук; но свидетельства об этом пункте очень противоречивы. На суше в тумане очень трудно слышать езду экипажей или вообще шум на близком расстоянии; точно также и на море звуковые сигналы с трудом проникают через туман, защитой от которого они должны служить».

По тому же поводу Джеймс Дуглас, инженер Trinity House, искусство которого как наблюдателя я очень ценю, утверждал, что при его опытах он нашел мало разницы в распространении звука в туманную и ясную погоду. Во время тумана он у Small Rock в Бристольском канале ясно слышал выстрел, произведенный у Мильфорда, на расстоянии 40 километров. Бизли также слышал в Гартленд Поинт выстрел, произведенный в Лонди Исланд, на расстоянии 16 килом. во время густого тумана, и потому в заключении своего мемуара он должен был признать, что предмет кажется ему очень мало исследованным, и что чем больше он

¹⁾ Так же смотрел на этот предмет сэр Джон Гершель (Essay on Sound pag 38).

²⁾ Proceedings of the Institution of Civil Engineers, March 14, 1871, и Lecture of the United Service Institution, May 24, 1872.

вникает в него, тем яснее обнаруживается тот факт, что свидетельства относительно действия тумана на звук крайне противоречивы.

В мемуаре, представленном литературному и философскому обществу в Манчестере 16 декабря 1873 г., профессор Осборн Рейнольдс подтверждал разделяемое им господствовавшее мнение и сделал остроумную попытку объяснить его. «Что звук,—говорит он,—не легко проникает через туман,—это известно из многих наблюдений. Звон и звуки рожков на кораблях во время тумана слышатся не так хорошо, как в ясную погоду. При тумане в Лондоне шум экипажей значительно ослабевает, так что кажется, будто он идет с значительного расстояния, между тем как он раздается вблизи». Рейнольдс отражение на поверхностях частичек не считает достаточным для объяснения непрозрачности тумана для звука. Он приписывает ослабление звука трению между воздухом и посторонними частичками, взвешенными в нем. По его словам, «действие звуковых волн, проходящих по известной части воздуха, состоит в том, что они сообщают ей то ускорение, то замедление. И если при этом в воздухе находятся капельки воды, то они воспринимают движение, сообщаемое волною, не так легко как самый воздух. Поэтому воздух движется взад и вперед около этих частичек, и таким образом получается трение, уменьшающее эффект волны».

Дальше будет показано на основании наблюдений и опытов, что туманы вовсе не оказывают такого действия на звук, какое ему приписывалось указанными учеными.

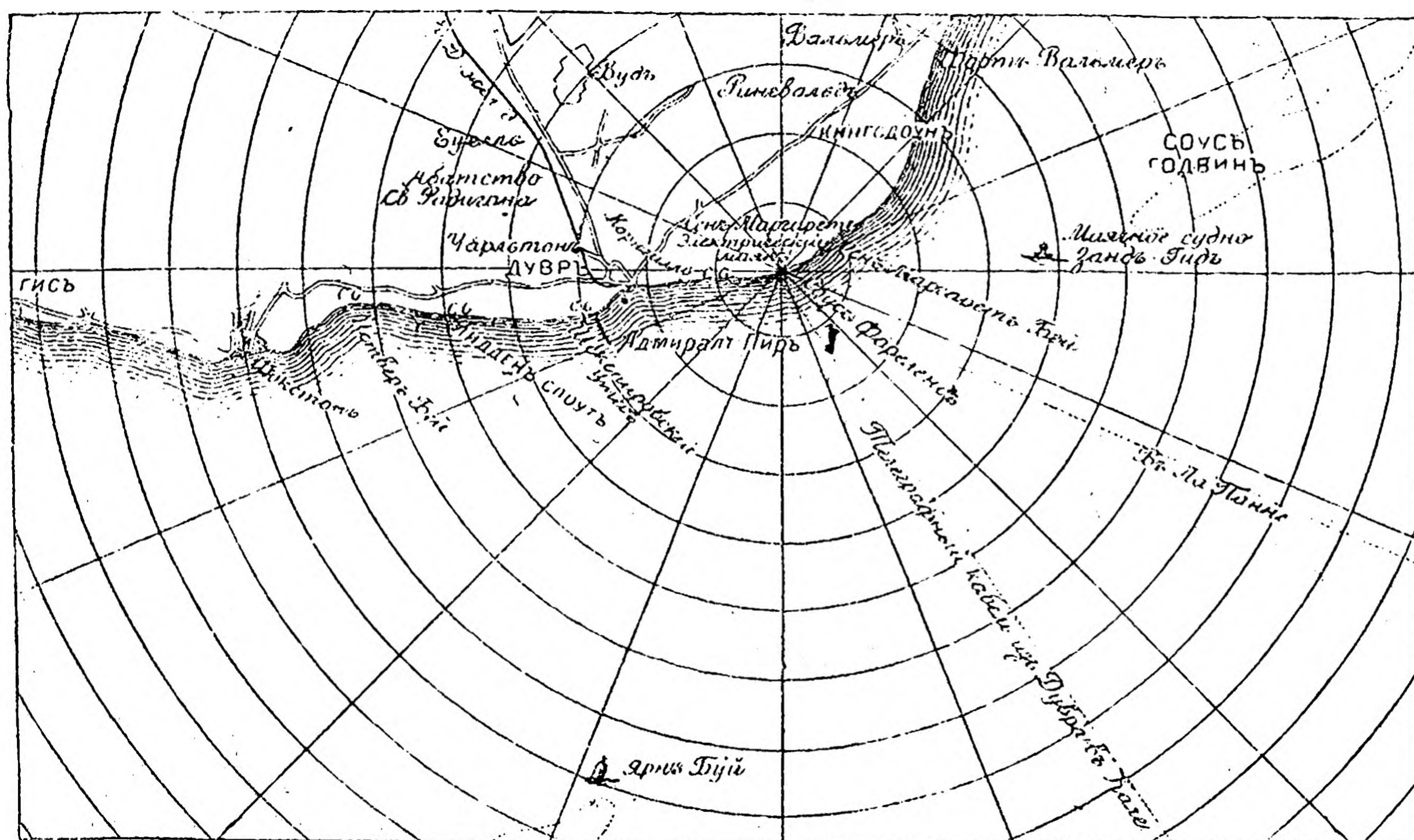
§ 3. Приборы и наблюдения.

Приведенные выдержки достаточно показывают, в каком неопределенном положении находился вопрос к 19 мая 1872 г., когда начались мои исследования. Соус Фореленд близ Дувра был выбран как сигнальная станция и там стоял пароход, на котором можно было получить два сильных электрических света. Наблюдения производились большею частью на ходу на воде, для чего служила одна из яхт корпорации Trinity. Были устроены две станции—одна на вершине, а другая у подошвы скалы Соус Фореленд и на каждой находились трубы и воздушные и паровые свистки больших размеров. Сначала употреблялись свистки английского изделия, но впоследствии «Старшие Братья» предоставили нам славящиеся своей силой американский и канадский свистки.

В октябре был употреблен в дело другой прибор, игравший особенно важную роль в этих наблюдениях. В бытность мою в Америке я ездил с генералом Вудруфом в Зенди Гук со специальной целью познакомиться с действием паровой сирены, которая, по указаниям профессора Джозефа Генри, была введена в маячную систему Соединенных Штатов. Я унес с собою самое живое воспоминание о механическом действии звука на мои уши и на все тело. Поэтому мне хотелось попробовать сирену в Соус Фореленде. Мое желание, прежде чем оно было выражено, было предупреждено «Старшими Братьями», а их желание, в свою очередь, было предупреждено любезностью маячного управления в Вашингтоне. Получив

от майора Элнота из армии Соединенных Штатов извещение о том, что мы начали свои опыты, управление прислало корпорации для испытания сильный инструмент, который и был установлен в Соус Фореленде.

В патентованной паровой сирене Броуна в Нью-Йорке находятся два диска, неподвижный и вращающийся, как в обыкновенной сирене; но вместо круглых отверстий в обоих дисках вырезаны радиальные щели. Один диск вертикально укреплен в устье конической трубы 5 метр. длины и 125 мм. в диаметре в том месте, где укреплен диск, а далее труба постепенно расширяется, так что на другом конце диаметр ее составляет 700 мм. За неподвижным диском укреплен вращающийся диск, который приводится в движение особым механизмом. Труба соединена с паровиком.



Фиг. 155.

В наших опытах мы действовали паром большею частью с давлением около 5 атмосфер. Совершенно так же, как и в обыкновенной сирене, сильный звуковой удар пара вылетает тогда, и только тогда, когда радиальные щели обоих дисков совпадают. И таким образом по воздуху распространяются звуковые волны большой силы, и высота этого звука зависит от быстроты вращения.

Кроме сирены, труб и свистков у нас были три пушки: 18-фунтовая, 5½-дюймовая гаубица и 13-дюймовая мортира. Во время наших летних опытов мы стреляли из всех трех пушек; но гаубица оказалась лучше других пушек, и мы употребляли ее в наших осенних опытах, так как она давала самые лучшие сигналы. Заряды мы брали такие, какие обыкновенно употребляются на маячных судах в Голланд, Лонди Исланд и Кнш, именно 3 фунта пороха. Гонги и колокола не употреблялись при наших опытах, так как предварительные наблюдения показали, что они менее пригодны, чем трубы и свистки.

Сказанное может дать читателю общее понятие о приборах, употреблявшихся при наших опытах; а по карте (фиг. 155) он может видеть положение большей части местностей, о которых мы будем говорить.

Приборы, приготовленные к 19 мая, были следующие:

На вершине скалы.

а) Две медные трубы или рожки 335 см. длины, 5 см. в диаметре у амбушюры, а на другом конце 56 см. в диаметре. Они были снабжены вибрирующими стальными язычками 22½ см. длины, 5 см. ширины и ½ см. толщины, и звук вызывался в них воздухом с давлением в 1¼ атм.

б) Свисток в форме локомотивного 15 см. в диаметре; звук вызывался также воздухом с давлением 1¼ атм.

в) Паровой свисток 30 см. в диаметре, соединенный с паровиком; звук вызывался паром с давлением 4 атм.

У подошвы скалы.

д) Две трубы или рожка таких же размеров и такого же устройства, как показанные выше, и звук вызывался в них воздухом с таким же давлением.

е) 15-см. воздушный свисток, подобный описанному выше, и звук в нем вызывался таким же способом.

Верхние инструменты находились на 71½ метров над уровнем высокой воды, а нижние—на 12 м. Таким образом вертикальное расстояние, разделявшее инструменты, составляло 59½ м. Шахта, имевшая 12 лестниц, вела от верхней станции к нижней.

Трубы были сделаны искусным механиком Гольмсом и все время находились под его личным наблюдением. Они укреплены были вертикально на резервуаре с сжатым воздухом, но на расстоянии около 60 см. от конца они были изогнуты под прямым углом, так что отверстия их были обращены к морю. Цель их конструктора состояла в том, чтобы звук равномерно распределялся по дуге в 180°. Для этого он поставил горизонтальные части труб перпендикулярно одна к другой, при чем одна обращена была на Ю.-Ю.-З., а другая на В.-Ю.-В., и каждая обнимала дугу в 90°.

Паровой 30-сантиметровый свисток был устроен Байли в Манчестере.

Наши первые опыты с этими инструментами были скорее подготовительными упражнениями, чем работами для получения результатов. 19 мая мы плавали вокруг Фореленда и далее в море по направлению осей труб. Наибольшее расстояние, на которое достигал звук, было 5,5 кил. Ветер при этом был сильный и море волновалось, так что местные звуки до некоторой степени мешали нам судить о звуке труб.

Моряки выражают силу ветра рядом чисел, от 0—тихо до 12—ураган, и небольшая практика уже устанавливала между разными наблюдателями замечательное согласие относительно силы ветра. Спла 19 мая

была 6 и в промежутке между осями двух труб он дул под прямым углом к направлению звука.

Те же самые инструменты действовали 20 мая на большее расстояние, но немного большее, хотя возмущения от местных звуков отсутствовали. В $6\frac{1}{2}$ килом. расстояния по осям труб они были едва слышны, хотя в это время было тихо и море было спокойно, и все другие обстоятельства были совершенно такие, какие до сих пор считались самыми благоприятными для распространения звука. Мы отплыли несколько дальше и при самом напряженном внимании на расстоянии $9\frac{1}{2}$ кил. слышали только самый слабый гул труб. Отъехав несколько дальше, мы остановились, и несмотря на то, что местные звуки отсутствовали и мы слушали внимательно, мы ничего не слышали.

Это место, очевидно находившееся вне действия свистков и труб, было избрано нами для производства того, что мы считали решающим сравнительным опытом между трубами и пушками как инструментами для туманных сигналов. На мысль об этом сравнении навод нас явственный звук пушечного выстрела, произведенного в 12 часов в Дувре 19 мая, и благодаря любезности генерала сэра А. Горсфорда мы могли произвести это сравнение. Ровно в 12 ч. 30 сек. мы увидели огонь выстрела из 18-фунтовой пушки с 3 фунтовым зарядом, произведенного в Дувре, отстоявшем около мили дальше, чем Союз Фореленд. Спустя 36 секунд мы услышали громкий звук выстрела, и таким образом, повидимому, было доказано полное превосходство пушки над трубами. Мы дополнили это наблюдение, отплывши дальше на $13\frac{1}{2}$ кил., где мы все хорошо слышали второй пушечный выстрел. На расстоянии 16 кил. только некоторые из нас слышали третий выстрел, а на расстоянии $15\frac{1}{2}$ кил. все мы явственно слышали четвертый выстрел.

Результат казался нам вполне решающим. По закону обратных квадратов звук пушечного выстрела на расстоянии 10 кил. от Фореленда должен был быть почти в три раза сильнее, чем звук трубы. При таких обстоятельствах едва ли можно было считать поспешным вывод о безусловном превосходстве пушки как туманного сигнала. Насколько мне было известно, не существовало в литературе ни одного опыта, который бы доказывал, что звук, в одном случае обнаруживший превосходство, не будет обнаруживать его и всегда во всех случаях, или что атмосфера в разные дни дает превосходство различным звукам. Однакоже впоследствии в нескольких случаях я убедился, что звук труб имеет решительное преимущество над звуком пушечных выстрелов. Эта и з б и р а т е л ь н а я способность атмосферы обнаружилась гораздо поразительнее в наших осенних, чем в летних опытах, при чем она давала себя знать даже на расстоянии немногих часов в течение одного дня; напр., из двух звуков *A* и *B*,—один, *A*, имеет наибольшее распространение в 10 часов утра, а другой, *B*—в 2 часа пополудни.

В опытах 19 и 20 мая оказалось решительное превосходство труб над свистками и за немногими исключениями это превосходство оказывалось во все время наших исследований. Но исключения все-таки были. Напр., 2 июня звук свистков в нескольких случаях равнялся звуку труб,

а в немногих случаях даже превосходил его. Звук изменялся изо дня в день. Июня 2 звучала одна труба, две трубы и три трубы вместе; но наибольшее распространение самого громкого звука, даже когда пароход стоял, не превосходило 10 килом. С целью концентрирования силы звука оси труб были поставлены при опытах 2 июня в одинаковом направлении, и это делалось во всех последующих опытах, где не будет сказано противное.

Июня 3 три описанные пушки были окончательно установлены в Соус Фореленде, и ими действовали артиллеристы из Дувра.

В определенный час того же дня небо было покрыто густыми облаками и некоторые из них были особенно черны и грозны, но в передаче звука по воздуху замечалось улучшение. На расстоянии 10 кил. звуки труб несколько не ослаблялись шумом паровых колес; на 13 кил. были слышны свистки, а трубы слышались еще лучше; тогда как на 14¼ кил., при остановленных колесах, ясно были слышны только звуки труб. При этом наблюдалось замечательно поучительное явление. Над нами проходил проливной дождь, который до сих пор считался агентом, сильно ослабляющим звук. Однако во время дождя я не заметил ни малейшего ослабления в силе звука. Вероятно даже, что если бы ум мой был свободен от предубеждения, то я заметил бы усиление звука, какое очень явственно оказывалось в разных дальнейших случаях во время сильного дождя.

Влияние «блещей» было испытано 3 июня, для чего трубы были слегка выведены из унисона; но хотя эти блещи придали звуку особую характерность, но не увеличили предела его распространения. На некотором расстоянии от станции замечены были любопытные колебания в силе звука. Не только изменялись в силе звуки разных труб, но и наблюдалось внезапное усиление и ослабление звука одной и той же трубы. Это происходило не от каких-нибудь изменений в частях инструментов, но единственно от изменений в среде, проходящей звуком.

Во время опытов мы различным образом передвигали трубы и язычки с целью получения наибольшей силы их. Предел наших лучших труб 10 июня был 14 кил. Пушечные выстрелы на этом расстоянии были весьма слабы. Что сила звука зависит от формы пушки, это доказывалось тем фактом, что гаубица с 3-фунтовым зарядом слышалась гораздо лучше, чем другие пушки. По осям труб звук обнаруживает наибольшую силу и значительно ослабевает по мере увеличения углового расстояния от оси¹⁾.

Свистки же не имеют таких осей и посылают свои звуковые волны с одинаковою силою по всем направлениям. Поэтому, когда трубы были обращены к морю, то по линии, соединяющей Фореленд с маячным судном

¹⁾ Когда впоследствии мы сравнили звук на продолжении оси пушки с силою звука перпендикулярно к оси, то разница хотя и была заметна, но оказалась весьма небольшою. Это согласуется с прежними наблюдениями. Звуковые волны имеют почти одинаковую силу везде вокруг пушки.

в Соус Заид Гид с одной стороны, и по линии, соединяющей Фореленд с Адмиралтейским пиром (пристанью) с другой, свистки по временам несколько не уступали трубам и даже превосходили их.

§ 4. Влияние звуковой тени.

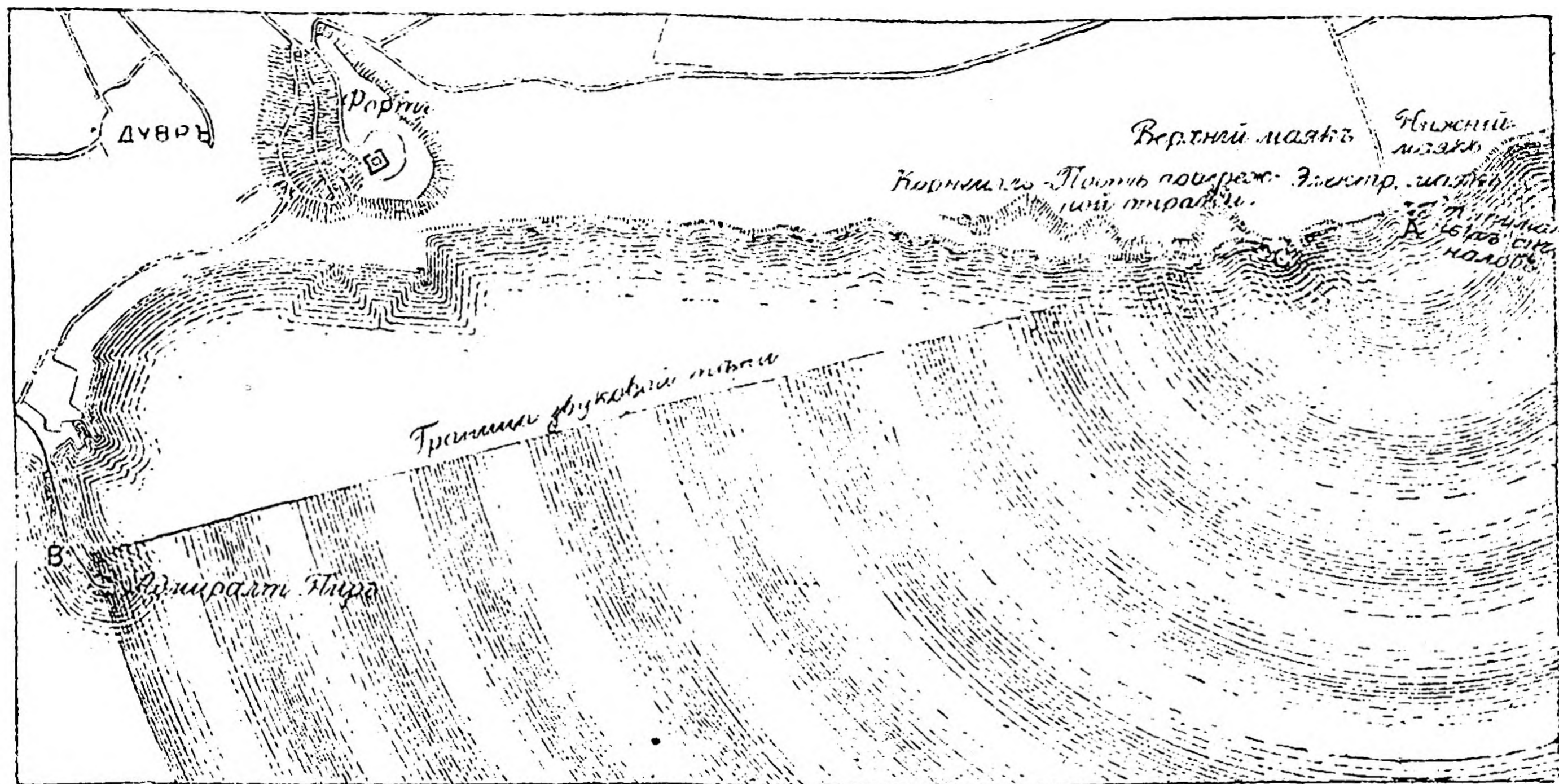
19 мая мы наблюдали явление, имеющее большую важность в вопросах о туманных сигналах. Я разумею быстрое ослабление силы звука по обеим сторонам сигнальной станции в Соус Фореленде. Мы стояли между станцией и маячным судном в Соус Заид Гид на расстоянии 4 кил. от станции. Трубы и свистки звучали, но были почти не слышны. Мы подвинулись поближе; но даже на расстоянии одной мили, когда мы ясно видели приборы на станции, звуки их не доходили до нас. Правда, дувший при этом слабый ветер был противоположен звуку. Но когда мы поравнялись с сигнальной станцией, трубы звучали весьма сильно; когда же мы приблизились к линии, соединяющей Фореленд с концом Адмиралтейского пира, то звуки сильно ослабели, несмотря на то, что в этом случае ветер был благоприятен для звука. Таким образом, для объяснения этого явления приходится искать какую-нибудь другую причину кроме ветра.

10 июня то же явление обнаружилось поразительным образом. По окончании нашей дневной работы мы плыли мимо Фореленда к концу пира. На расстоянии мили от Фореленда звуки ослабели с такою быстротой, что я подумал, не случилось ли чего-нибудь с трубами и свистками. К счастью, для проверки этой догадки можно было прибегнуть к пушкам. В двух милях расстояния мы дали им сигнал. Ни один выстрел с 3-фунтовым зарядом не был слышен, хотя огни их были видны явственно; выстрел из 18-фунтовой пушки с 6-фунтовым зарядом едва был слышен; гаубица была слышна несколько лучше, между тем как мортира была совсем неслышна. Таким образом, явление это не могло быть объяснено никакими изменениями в трубах или свистках.

11 июля повторилось то же явление. На линии, соединяющей Фореленд и конец Адмиралтейского пира и на расстоянии 1,2 кил. от станции, звук быстро ослабел в силе и вскоре затем стал неслышным. На расстоянии $2\frac{1}{2}$ кил. мы дали сигнал пушкам; выстрел в каждом случае слышен был как слабый неясный гул. От туманных сигналов необходимо требуется, чтобы они при всяких обстоятельствах были слышны на расстоянии 6 кил. И когда мы начали наши исследования, то нашли, что пушки дают сигнал с наибольшим пределом действия. Но вот мы убеждаемся, что могут существовать условия, при которых даже пушка может оказаться недействительною менее чем на половине требуемого расстояния.

Карта (фиг. 156), представляющая в увеличенном виде часть фиг. 155, поможет нам при объяснении этих наблюдений. Близ станции туманных сигналов находится выдающаяся меловая скала при *C*; в нее ударяют звуковые волны и она посредством отражения рассеивает их. Все пространство моря между линиею *AB* и утесами внизу форта в

Дувре находилось в звуковой тени. Внутри этой линии приборы не могли быть видны, а вне от нее могли; и нам, таким образом, трудно объяснить факт ослабления звука не только внутри разграничивающей линии, но и вне ее, где приборы были видны. Внезапное ослабление звука наблюдалось всякий раз, когда мы пересекали границу АВ по направлению к берегу и, наоборот, внезапное усиление, когда пересекали ее по направ-



Фиг. 156.

влению к морю; но прекращение звука при вступлении в тень было далеко не полное. Все теневое пространство было наполнено звуком ослабленной силы, который произведен большей частью расхождением по этому пространству волн, соприкасающихся с границей. Вследствие этого расхождения сила прямых волн ослабела и больше всего ослабели части, ближайшие к тени. (На карте сгущения и разрежения прямых волн показаны круговыми линиями с разными расстояниями между ними). Здесь, следовательно, мы имеем одну причину ослабления звука в соседстве с акустической тенью. Другою причиною может быть интерференция¹⁾ прямых волн с отраженными от С и от других частей утеса. Объяснения, представленные здесь относительно звуковой тени к западу от Фореленда, приложимы и к тени по другую сторону его.

25 июня наблюдалось значительное улучшение в передаче воздухом звука от утра до вечера, но максимальный предел был все-таки незначителен. Колебания звука были очень велики; то они ослабевали до того, что становились неслышными, то достигали весьма большой силы. Подобное явление, происходящее от подобной же причины, часто замечалось на церковном звоне. Акустическая прозрачность воздуха еще более усилилась 26 июня; на расстоянии 15 кил. от станции свистки и трубы были ясно слышны против ветра силою в 4; между тем как 25 при благоприятном ветре наибольший предел был только 10 кил. Таким образом ясно, что что-нибудь другое, кроме ветра,

¹⁾ Явления интерференции будут объяснены в VIII лекции.

должно оказывать влияние на предел распространения звука.

Во вторник, 1 июля, были произведены наблюдения над ослаблением звука на разных угловых расстояниях от оси трубы. Как и можно было ожидать, по оси трубы звук оказывался самым громким и постепенно ослабевал по обеим сторонам. День был акустически ясный. На расстоянии 16 килом. трубы слышны были явственно, а американский свисток кажется даже превосходил трубы. Густая мгла в это время почти закрывала Фореленд. В 17 килом. по временам слышны были трубы, но через несколько времени всякие звуки перестали быть слышными. Казалось, как будто воздух, ставши чрезвычайно прозрачным, затем постепенно становился непрозрачным для звука.

В 4 ч. 45 м. пополудни мы взяли на борт Irene смотрителя маячного судна Варн (на карте Ярн Буй). Он и его товарищи по временам слышали звуки в течение дня, хотя ветер был противный и они находились на расстоянии 20 килом. от источника звука.

Здесь уместно будет сделать одно замечание по поводу наших наблюдений. Как уже было сказано, господствовавшее мнение было таково, что волны звука отражаются от ограничивающих поверхностей маленьких частичек, составляющих мглу и туман, и этим объяснялось предполагаемое ослабление звука во время тумана. Но если действительно это есть настоящая причина ослабления звука и если ясный спокойный воздух, как это предполагалось, есть наилучший проводник звука, то решительно невозможно понять, каким образом сегодня при густой мгле звук достигал расстояния в 20 килом., тогда как 20 мая при совершенно ясном и спокойном воздухе наибольший предел был от 8 до 10 килом. Такие факты предвещают революцию в наших понятиях о действии мгли и туманов на звук, и эта революция будет полная.

Промежуток времени в 12 часов достаточен для того, чтобы изменить до удивительной степени акустическую прозрачность в воздухе. 1 июля звук имел предел почти в 21 килом.; между тем как 2 июля этот предел не превосходил $6\frac{1}{2}$ килом.

§ 5. Противоречивые результаты.

До сих пор в наших исследованиях не было и проблеска принципа, который связал бы эти несогласные между собою результаты. Расстояние, которого достигал звук 19 мая, было 6 килом.; 20-го оно было 9 килом.; 2 июля $9\frac{1}{2}$ килом.; 3-го около 15 килом.; 10-го тоже 15 килом.; 25-го оно уменьшилось до $10\frac{1}{2}$ килом.; 26-го оно снова увеличилось более чем до 15 килом.; 1-го июля, как мы сейчас видели, оно составляло 20 килом., между тем как 2-го предел звука уменьшился до $6\frac{1}{2}$ килом. Ни один из метеорологических агентов, наблюдавших в это время, не мог быть признан причиною этих колебаний. Ветер, по общему признанию, оказывает влияние на звук, но им нельзя объяснить всех этих явлений. Напр., 25 июля, когда предел был только 10 килом., ветер был благоприятный, а 26-го, когда предел превосходил 15 килом., ветер был противный. Нельзя было

сослаться для объяснения и на изменение оптической ясности атмосферы: потому что 1 июля, когда предел был 20 кил., густая мгла скрывала белые утесы Фореленда, тогда как в другие дни, когда акустический предел не достигал и половины указанного, атмосфера была оптически чиста и ясна. До 3 июля все оставалось загадочным; но в этот день были сделаны наблюдения, которые, по моему мнению, должны были внести в наши затруднения и неопределенные догадки ясный свет физического доказательства.

§ 6. Разрешение противоречий.

3 июля мы прежде всего отплыли на 2,9 мили к Ю.-З. от сигнальной станции. На этом расстоянии неслышны были никакие звуки, даже выстрелы из пушек. На расстоянии 2 миль они также не были слышны. Но так как это было место, на котором звуки, хотя и слышные по оси труб, всегда ослабевали, то мы поплыли как раз по тому направлению, с которого мы производили наши наблюдения 1 июля. В 2 ч. 15 м. пополудни и на расстоянии $5\frac{1}{2}$ к. от станции, при ясном и тихом воздухе и при спокойном море, трубы и американский свисток звучали, но не были слышны. Удивленные этим результатом, мы дали сигнал пушкам. Они все стали стрелять; но хотя дым был ясно виден, однако до нас не доходило никакого звука. Июля 1 в этом же направлении наблюденный предел как труб, так и пушек был 17 кил., между тем как по направлению маячного судна Варн (на карте Ярн) он был почти 21 кил. Мы отошли на 3 мили, остановились и слушали с большим вниманием; но ни трубы ни свисток не были слышны. Поэтому мы опять дали сигнал пушкам; пять из них выстрелили одна за другою, но ни одна из них не была слышна. Мы приблизились все в том же направлении до 3 кил. и видели, что выстрелы были направлены прямо на нас. Гаубица и мортира с 3-фунтовым зарядом производили только слабый гул, между тем как 18-фунтовая пушка была совсем не слышна. На основании закона обратных квадратов следует, что при гораздо худшем, по господствующим понятиям, состоянии воздуха и моря звук в 3 кил. расстояния 1 июля более чем в 40 раз превосходил ту силу, какую он имел на том же расстоянии 3-го в 3 ч. пополудни.

«По гладкой поверхности воды,—говорит сэр Джон Гершель,—звук распространяется с замечательной чистотой и силой». Вот, значит, необходимое условие. Однако же, когда Фореленд был так близко от нас, когда море было так тихо и гладко, а воздух так прозрачен, мы не слышали никаких звуков и с трудом могли поверить, чтобы в это самое время пушки стреляли и трубы звучали. Какая же могла быть причина этого?

Сера в однородных кристаллах чрезвычайно прозрачна для лучистой теплоты, между тем обыкновенный продажный серный цвет в высшей степени непроницаем для нее, и причина этого та, что серный цвет не обладает молекулярною непрерывностью кристалла, а есть просто агрегат маленьких зерен, не находящихся в совершенном оптическом соприкосновении между собою. А при этих условиях часть теплоты всегда отра-

жается при входе и выходе из зерна; поэтому, когда зерна малы и многочисленны, то это отражение повторяется столь часто, что теплота вся истратится прежде, чем она успеет проникнуть в вещество до какой-нибудь глубины. Это же самое замечание приложимо к снегу, пене, облакам и обыкновенной соли и вообще ко всем прозрачным веществам в порошкообразном состоянии; они все непроницаемы для света не вследствие поглощения света, но вследствие повторного внутреннего отражения.

Гумбольдт в своих наблюдениях над водопадами Ориноко применил эти принципы к звуку. Он нашел, что шум водопадов гораздо сильнее ночью, чем днем, несмотря на то, что в этой стране ночь вообще гораздо шумнее, чем день. Равнина между шум и водопадами состояла из пространств, покрытых попеременно травой и голым камнем. При дневной жаре он нашел, что температура камня гораздо выше, чем температура травяных пространств. Из этого он заключил, что над каменной почвой поднимается столб воздуха, разреженного теплотой, а его место занимает нисходящим более тяжелым воздухом. И он приписывал ослабление звука отражениям от разграничивающих поверхностей между разреженным и плотным воздухом. Это физическое объяснение сделало общеизвестным тот факт, что неоднородная атмосфера неблагоприятна для распространения звука.

Но 3 июля, когда основанием для атмосферы была не различно нагретая равнина, но спокойное море, какая же причина могла расстроить однородность атмосферы до того, что она была в состоянии погасить такую огромную массу звука и на таком коротком расстоянии? Ход моих мыслей в это время получил такое направление. Когда я стоял на палубе *Tigre* и обдумывал вопрос, то чувствовал, что солнце очень сильно греет меня в спину и нагревает все предметы около меня. Лучи такой же силы падают на море и должны производить обильное испарение. Было в высшей степени невероятно, чтобы образующийся пар, поднимаясь и смешиваясь с воздухом, производил абсолютно однородную среду. Наверное, думал я, пар поднимается невидимыми токами, прорывается через лежащий сверху воздух то в одном, то в другом месте и атмосфера становится таким образом клочковатой, клубящейся и полосатой. На разграничивающих поверхностях таких клубов и полос мы имели бы условия, необходимые для образования отдельных эхо, а вследствие этого и для ослабления звука. Воздушные токи различной температуры, поскольку они существуют, также содействовали бы этому явлению.

Условия, необходимые для проверки этого объяснения, представились немедленно же. В 3 ч. 15 м. popol. небольшое облако закрыло солнце и затенило все пространство между нами и Соус Форелендом. Этот экран уменьшил нагревание воды и образование пара и воздушных токов; поэтому была вероятность внезапного улучшения передачи. Чтобы поверить это предположение, мы немедленно повернули назад и поплыли на то место, с которого мы ничего не слышали. Звук, как я ожидал, был здесь слышен явственно, хотя и слабо. Это было на расстоянии 5 кил. Когда мы были на расстоянии 6 кил., пушки стреляли и прямо и вверх,

Мы слышали как будто слабое хлопанье; но все-таки слышали, тогда как прежде решительно ничего не слышали ни здесь, ни на километр ближе. Мы отплыли на 7 кил., где звуки одно мгновение были слабо слышны, но затем прекратились и хотя на борте была полнейшая тишина и хотя на море не было ряби, но мы не слышали ничего. Мы могли ясно видеть вырывающиеся клубы пара, указывавшие на начало и конец дутья в трубы, но самые звуки от этого дутья не были слышны.

Было 4 часа попол., и я сначала думал остановиться на этом расстоянии, которое было недалеко за пределом распространения звука, и посмотреть, не восстановится ли при понижении солнца способность атмосферы передавать звук. После недолгого ожидания мне предложили оставить здесь бот на якорь, а пароход употребить для другой работы; и хотя мне неприятно было лишиться возможности самому услышать предполагаемое возобновление звука, но я согласился на предложение. Два матроса были оставлены в боте и им поручено было внимательно слушать, не будет ли каких-либо звуков. При совершенной тишине вокруг они ничего не слышали. Далее им было приказано поднять сигнал, если они услышат звуки, и держать его поднятым все время, пока будут продолжаться звуки.

В 4 ч. 45 м. мы оставили их и поплыли к маячному судну при Соус Запад Гид. Ровно через 15 минут после того как мы ушли от них, они подняли флаг; значит звуку удалось наконец пробиться через массу воздуха между берегом и ботом. Возвратившись к ним, мы сами тоже слышали звуки.

Мы продолжали нашу проверку, отплывши дальше. На 9 километрах мы остановились и слышали звуки; на $9\frac{1}{2}$ кил. мы слышали их ясно, но столь слабо, что нам казалось, что мы уже достигли предела звука. Но в то время как мы ждали здесь, звуки усилились. Мы дошли до буя Варн (на карте Яри), который отстоит от станции на $12\frac{1}{2}$ кил. и слышали здесь звуки гораздо лучше, чем на $9\frac{1}{2}$ к. расстояния. Мы продолжали идти дальше до 16 кил.; остановились здесь на короткое время, но ничего не слышали.

Однако, плывя около маячного судна при Варн, находящегося на другом конце мелн Варн, мы окликнули смотрителя и он сообщил нам, что до 5 часов он не слышал ничего, но с этого времени стали слышаться звуки. Он описывал один из них как «очень грубый и похожий на рев быка», что совершенно верно характеризовало звук большого американского свистка. Таким образом на маячном судне при Варн звуки были слышны к концу дня, хотя он отстоит на 20 кил. от сигнальной станции. Я считаю вероятным, что в 3 кил. от Фореленда звук в 5 часов имел силу в 50 раз большую, чем была сила его в 2 часа. Вот какие невероятные колебания представляет атмосфера! По возвращении в залив Дувра мы слышали не только явственные, но и громкие звуки, между тем как здесь же утром мы ничего не слышали.

§ 7. Эхо от невидимых акустических облаков.

Но как указанное объяснение, так и объясняемые явления имеют дополнительную сторону, которую мы теперь должны рассмотреть. Мы доказали, что слой воздуха менее чем в 5 кил. толщиной при гихой погоде может заглушить канонаду пушек и звук труб в Фореленде, и согласно данному объяснению этот результат есть следствие отражения звука от невидимых акустических облаков, которые наполняли атмосферу в день совершенной оптической прозрачности. Но если согласиться с этим, то кажется невероятным, чтобы такая масса звука совершенно исчезала на таком небольшом расстоянии, не оставив по себе никакого следа. Предположим теперь, что вместо того, чтобы стать сзади акустического облака, мы стали впереди его,—не можем ли мы ожидать, что, согласно закону сохранения энергии, мы путем отражения услышим тот звук, который не доходил до нас путем прямой передачи. Такой случай был бы вполне аналогичен с отражением света от обыкновенного облака для наблюдателя, находящегося между облаком и солнцем.

Первым делом моим в этот день было убедиться в том, что нам не слышны были звуки не вследствие каких-нибудь неисправностей в наших приборах на берегу. В сопровождении Приса Эдвардса в 1 час попол. отправился я на берег и высадился у подошвы утеса Соус Фореленд. Таким образом масса воздуха, которая обнаружила такую необыкновенную способность задерживать звук и которая особенно явно проявила эту способность в дальнейшие часы дня, находилась теперь перед нами. В нее ударяли звуковые волны и от нее отражались назад с удивительной силой. Приборы, не видные для нас, находились на вершине утеса на 71 метр над нами, море было гладко и на нем не было судов, атмосфера была безоблачная и не было в виду ни одного предмета, который бы мог произвести наблюдавшееся нами явление. От совершенно прозрачного воздуха получалось эхо сначала с силой немногим меньшей, чем сила прямого звука, а затем с постепенным замиранием. Заметка, сделанная моим талантливым компаньоном в его записной книжке, показывает, до какой степени поразило его это явление. «Если не сказать, что эхо шло от безбрежного океана, то решительно не представлялось возможным указать какой-либо другой предмет, от которого происходило отражение». И действительно такого предмета не было; эхо как будто по какому-то волшебству шло к нам от невидимых акустических облаков, которые наполняли оптически прозрачную атмосферу. Существование таких облаков во всякую погоду, оптически туманную или ясную, есть один из важнейших фактов, установленных нашими исследованиями.

Здесь, я думаю, мы имеем ключ ко многим недоумениям и необъяснимым противоречиям по этому вопросу. Изложенные наблюдения показывают, что нет основания сомневаться ни в правдивости, ни в точности противоречивых сообщений, потому что изменения в атмосфере более чем достаточны для их объяснения. Действительно, ошибка до сих пор состояла не в неверных сообщениях, но в том, что пренебрегали монотонной операцией повторения наблюдений в течение достаточного времени.

И буду дальше иметь случай указать на крайне невыгодные последствия того, что морякам даются инструкции, основанные на таких неполных наблюдениях.

Требовались, однако, продолжительные размышления и повторительные наблюдения, прежде чем это заключение утвердилось в моем уме; потому что оно противоречило результатам великих наблюдателей и мнениям знаменитых ученых. Считалось доказанным наблюдениями, что существуют эхо от облаков и в то же время признавалось установленным фактом, что слышимые эхо никогда не бывают при оптически ясном воздухе. Это последнее мнение пущено было в ход Араго в его замечательном в других отношениях отчете об опытах, произведенных в Монлери и Вильжюиве для определения скорости звука¹⁾. Араго описывает явление, замеченное им и его товарищами, следующим образом: «Оканчивая настоящее сообщение, мы прибавим только, что выстрелы, производимые в Монлери, сопровождались раскатом, подобным раскату грома, продолжавшимся от 20 до 25 секунд. Ничего подобного не было в Вильжюиве. Однажды мы слышали два отдельных звука от выстрела в Монлери, с промежутком в секунду. В двух других случаях за звуком выстрела от той же пушки следовал продолжительный раскат. Эти явления никогда не получались без облаков. При ясном небе звуки были единичные и мгновенные. Не можем ли мы заключить из этого, что кратные звуки выстрелов в Монлери, слышанные в Вильжюиве, были эхо от облаков и не можем ли мы принять этого в качестве факта, благоприятного для предложенного некоторыми физиками объяснения раскатов грома?»

Мой ответ на этот вопрос был бы решительно отрицательный. Потому что сотни выстрелов были произведены в Соус Фореленде и не было ни одного случая, чтобы выстрел не сопровождался раскатом, подобным тому, о котором говорит Араго. И, кроме того, раскат следовал за прямым звуком так скоро, что едва ли был заметный перерыв между звуком и его эхо. Этого не могло бы быть, если бы эхо происходило от облаков. Отражающее облако на расстоянии километра оставило бы между звуком и эхо промежуток почти в 7 секунд, и если бы такой промежуток существовал, то едва ли он был бы не замечен французскими физиками, производившими опыт. Однако они не говорят о нем.

Я думаю, что как приведенный факт, так и заключение, выводимое из него, нуждаются в пересмотре. Потому что наши наблюдения доказывают,

¹⁾ Сэр Джон Гершель так излагает наблюдение Араго. «Раскаты грома приписывались отражениям от облаков, и если считать, что облако есть собрание частичек воды в жидком состоянии и способных таким образом отражать звук каждою в отдельности, то нет причины, почему бы очень громкие звуки не могли отражаться от облака беспорядочно и смешанно (подобно зарницам). И что это действительно так—это доказано прямым наблюдением над пушечными выстрелами. Араго, Матье и Прони при их опытах с распространением звука наблюдали, что при совершенно ясном небе звуки выстрелов были единичны и резки; между тем когда небо было облачно и даже когда одно облако закрывало значительную часть горизонта, звуки часто сопровождались долго продолжавшимся раскатом подобно грому». *Essay on Sound*, pag. 38. Отдаленные облака дают основание предполагать длинные промежутки между звуком и его эхо; но об этом ничего не говорится.

что воздух, оптически совершенно прозрачный, может давать эхо значительной силы и продолжительности. Предмет заслуживает добавочного разъяснения. Как уже сказано, 8 октября в Соус Фореленде была установлена сирена. В этот день я посетил станцию и слушал эхо сирены. Оно было гораздо сильнее, чем эхо трубы. Эхо, как и в другие раза, было совершенно непрерывно и замирало постепенно, как бы удаляясь. Прямой звук казался сложным и многократным от многих эхо, которые были похожи на отряд трубачей, сначала ответивших на звук сейчас вблизи и затем быстро отступавших к французскому берегу. Эхо сирены в этот день длилось 11 секунд, а эхо труб—8 секунд.

Кроме того, у сирены явственно было заметно усиление звука вследствие эхо. Через секунду после начала звука сирены эхо раздавалось точно новый звук. Таким образом, это первое эхо должно было быть отражено слоем воздуха не более 200 или 300 метров толщины. Немногие разбросанные облака были видны в это время на расстоянии нескольких миль и, конечно, не имели никакого отношения к описываемому явлению.

10 октября я снова был в Фореленде и слушал разные эхо и результаты получились тождественные с описанными. Но 15-го я имел случай заметить в Дунгенессе относительно их нечто новое. Здесь была установлена труба, подобная тем, которые были в Соус Фореленде, хотя не столь сильная. Она вращалась автоматически по дуге в 210° , при чем останавливалась в четырех разных точках дуги и издавала звук, продолжавшийся 6 секунд, и эти звуки отделялись один от другого промежутками беззвучия в 20 секунд.

Новый замеченный мною факт состоял в следующем. При вращении трубы эхо возвращались всегда по линии, по которой направлена была ось трубы. Стоя сзади или спереди маячной башни или даже закрывши глаза, чтобы не видеть положения трубы, всегда можно было узнать направление оси звучащей трубы по тому направлению, по которому достигали берега воздушные эхо. Таким образом **н а п р а в л е н и е** можно было узнать не только по звуку, но и по воздушным эхо звука.

17-го октября, около 5 ч. пополудни, при совершенно безоблачном небе мы приплыли к Фореленду, высадились и пошли по водорослям к подошве утеса. Когда я достиг утеса, положение «Galatea» было таково, что от ее бока отражалось эхо удивительной силы; казалось, как будто оно выходило из особого источника звука, находившегося на борте парохода. Оно прекращалось внезапно, а воздушные эхо замирали постепенно.

У подошвы утеса ряд согласных наблюдений показал продолжительность воздушных эхо сирены от 13 до 14 секунд.

Когда я лежал на камешках под нависшею меловою скалою, до меня доходили звуки, несколько ослабленные диффракцией, и я мог слышать с большою отчетливостью спустя секунду после начала звучания сирены эхо, совпадавшие с прямым звуком и усиливавшие его. Первый звук эхо был весьма силен, и он шел как обыкновенно от слоя воздуха в 200 или 300 метров толщины. И опять наблюдения показали, что продолжительность эхо составляла от 14 до 15 секунд. Совершенная ясность послеполуденного времени побудила меня выбрать это время для исследования эхо.

Достоинно замечания, что это был день самых продолжительных эхо, а также и день наибольшей акустической прозрачности; и это совпадение наводит на мысль, что продолжительность эхо может быть мерою атмосферной глубины, из которой оно исходит. Нужно заметить, что не было ни одного дня, когда бы атмосфера была свободна от невидимых акустических облаков, и в этот день, когда их присутствие не мешало прямому звуку достигать расстояния 25 километров, они все-таки могли посылать нам эхо продолжительностью в 15 секунд.

В нескольких случаях, когда мы находились в трех милях от берега и Форелец был к северу от нас, мы слышали явственные эхо сирены, отраженные к нам южным безоблачным воздухом.

Подведем итоги по этому вопросу о воздушных эхо. Сирена издавала три звука в минуту продолжительностью каждый в 5 секунд. По числу дней и по числу часов в день, в течение которых наш прибор находился в действии, можно вычислить число произведенных звуков. Оно достигает почти 20 тысяч. Звуки труб превосходят это число, и из пушек были сделаны сотни выстрелов. Какова бы ни была погода, было ли туманно или ясно, ветрено или тихо, но воздушные эхо, хотя различной силы и продолжительности в разные дни, всегда бывали, и в некоторые дни при совершенно ясном небе они достигали удивительной силы при звуках сирены. Несомненно, что этими воздушными эхо, а не облачными эхо следует объяснять в большей части раскаты грома.

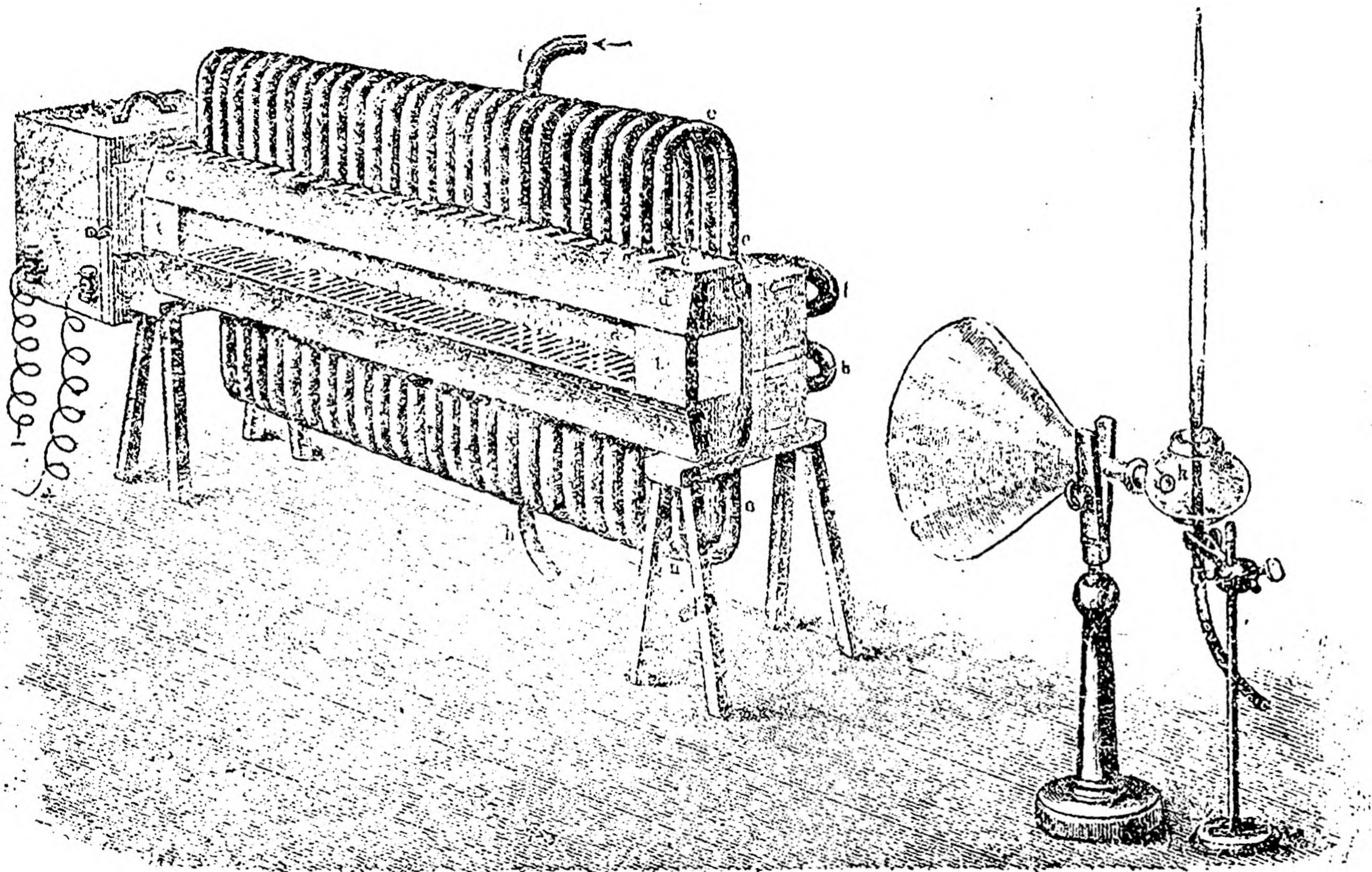
§ 8. Экспериментальное доказательство отражения звука от газов.

До сих пор мы вращались только в области предположений, потому что задержка звука вследствие воздушного отражения никогда не была доказана экспериментально, а на основании наблюдений Араго, бесспорно признанных в науке, даже не признавалось ее существование. Но сила науки состоит в проверке, и мне очень хотелось подвергнуть вопрос о воздушном отражении экспериментальной проверке. Познания, приобретенные нами в последней лекции, дадут нам возможность устроить эту проверку: но как во многих подобных случаях, с первого раза были придуманы не самые простые комбинации. Нужно было взять два газа различной плотности, и мы взяли угольную кислоту и светильный газ. При содействии моего искусного ассистента был устроен канал, по которому 25 слоев угольной кислоты должны были опускаться вниз, а попеременно с ними 25 слоев светильного газа в это время подымались вверх. По этому каналу пропускался звук, который при своем прохождении должен был сделать 50 переходов из одной среды в другую. Я предполагал, что при этих переходах значительная часть звука потеряется вследствие воздушных отражений.

Самым лучшим объективным показателем этой потери оказалось одно из чувствительных пламеней, описанных в предыдущей лекции. Так как мы знакомы с ним, то можем понять рисунок и описание аппарата, сначала употребленного мною для доказательства воздушного отражения.

Вот как был описан этот аппарат в еженедельном журнале «Nature» (Febr. 5, 1874).

Канал tt' (фиг. 157) в 5 см. в квадрате и 140 см. длины, открытый с обеих сторон и имеющий стеклянную переднюю стенку, проходит через ящик $a b c d$. Пространства над ним и ниже его разделены на 50 отделений, которые сообщались с каналом посредством поперечных отверстий, точно приходившихся одни над другими. Каждое нечетное отделение верхнего ряда: 1-е, 3-е, 5-е и т. д.—сообщалось изогнутой трубкой (eee) с общим верхним резервуаром g , а соответствующее ему отделение в нижнем ряду имело свободный выход в воздух. Подобным же образом каждое четное отделение нижнего ряда сообщалось изогнутой трубкой (nnn) с нижним резервуаром i и имело прямой выход в воздух через от-



Фиг. 157.

деление, находящееся как раз над ним сверху, Распределители газа g и i наполняются одновременно с обоих концов, верхний—угольной кислотой, а нижний—светильным газом при помощи трубок f и h . Ящик P , выложенный мягкой подкладкой и открытый со стороны обращенной к концу канала, образует небольшую полость, из которой исходят звуковые волны, производимые электрическим колокольчиком (на фиг. он обозначен точками). В нескольких футах от другого конца канала и на одной прямой с ним находится чувствительное пламя. k , снабженное воронкою, собирающею звук, и защищенное колпаком от возможных движений воздуха.

Колокольчик заставляют звонить. Пламя, быстро отвечающее на каждый удар молотка, производило шум несколько музыкальный, при чем укорачивалось и удлинялось по мере того, как до него доходили последовательные звуковые волны. Затем в аппарат пускались газы. Таким образом 25 плоских струй светильного газа поднимались вверх из ниж-

них трубок и 25 струй угольной кислоты падали вниз из верхних. То, что было до сих пор однородной средой, оказалось теперь состоящим из 50 разграничивающих поверхностей, от каждой из которых отражалась часть звука. После нескольких моментов эти последовательные отражения произвели такое действие, что ни один звук, достаточно сильный для того, чтобы подействовать на чувствительное пламя, не мог проникнуть через ясную, оптически прозрачную, но акустически непрозрачную атмосферу в канале. Во все время, пока продолжался приток газов, пламя оставалось совершенно спокойным. Когда же приток был останавливаем, газы быстро рассеивались по воздуху. Атмосфера канала снова становилась однородною и таким образом акустически прозрачною, и пламя по-прежнему отвечало на каждый звуковой удар.

Не только газы различной плотности действуют таким образом на звук, но и атмосферный воздух, если он состоит из слоев разной температуры, производит такое же действие. По каналу такому же, как *tt'* (фиг. 157), было натянута 66 платиновых проволок и все они находились в металлическом соединении. Колокольчик в том же ящике был помещен на одном конце канала, а на другом находилось чувствительное пламя *k*, близкое к точке мигания. Когда колокольчик звонил, пламя мигало. Затем по проволокам был пущен сильный электрический ток и они нагрелись; от них поднялись струи нагретого воздуха и волнение пламени немедленно прекратилось. При остановке тока волнение снова начиналось. В этом опыте платиновые проволоки нагревались не до красного каления. Когда было взято половинное число проволок при той же батарее, то они нагрелись до красного каления и действие на звуковые волны было тоже сильно. Когда же была взята только треть проволок при батарее той же силы, то проволоки накалились до-бела. При этом пламя немедленно успокоилось вследствие задержки звука.

§ 9. Отражение от паров.

Не одни только газы различной плотности и воздух различной температуры действуют таким образом на звук, но можно доказать опытами, что и воздух, насыщенный в различной степени парами летучих жидкостей, производит такое же действие. Вместо угольной кислоты, употреблявшейся в нашем первом опыте, я взял склянку, часто употребляемую мною для насыщения воздуха парами. Через летучую жидкость, до половины наполнявшую склянку, воздух вгонялся в канал *tt'*, который таким образом разделялся на пространства, содержавшие воздух, насыщенный парами, и другие пространства с обыкновенным воздухом. Действие такой среды на звуковые волны, идущие от колокольчика, весьма сильно, и бурно волнующееся пламя мгновенно делается тихим и спокойным. Удаление же разнородной среды мгновенно восстанавливает шумное мигание пламени.

Мы приведем здесь несколько примеров действия неоднородных масс воздуха, образовавшихся вследствие насыщения их парами летучих жидкостей.

С е р о у г л е р о д.—Пламя весьма чувствительно и отвечает на звук шумом. Действие неоднородной среды быстро и сильно, успокаивая волнуемое пламя.

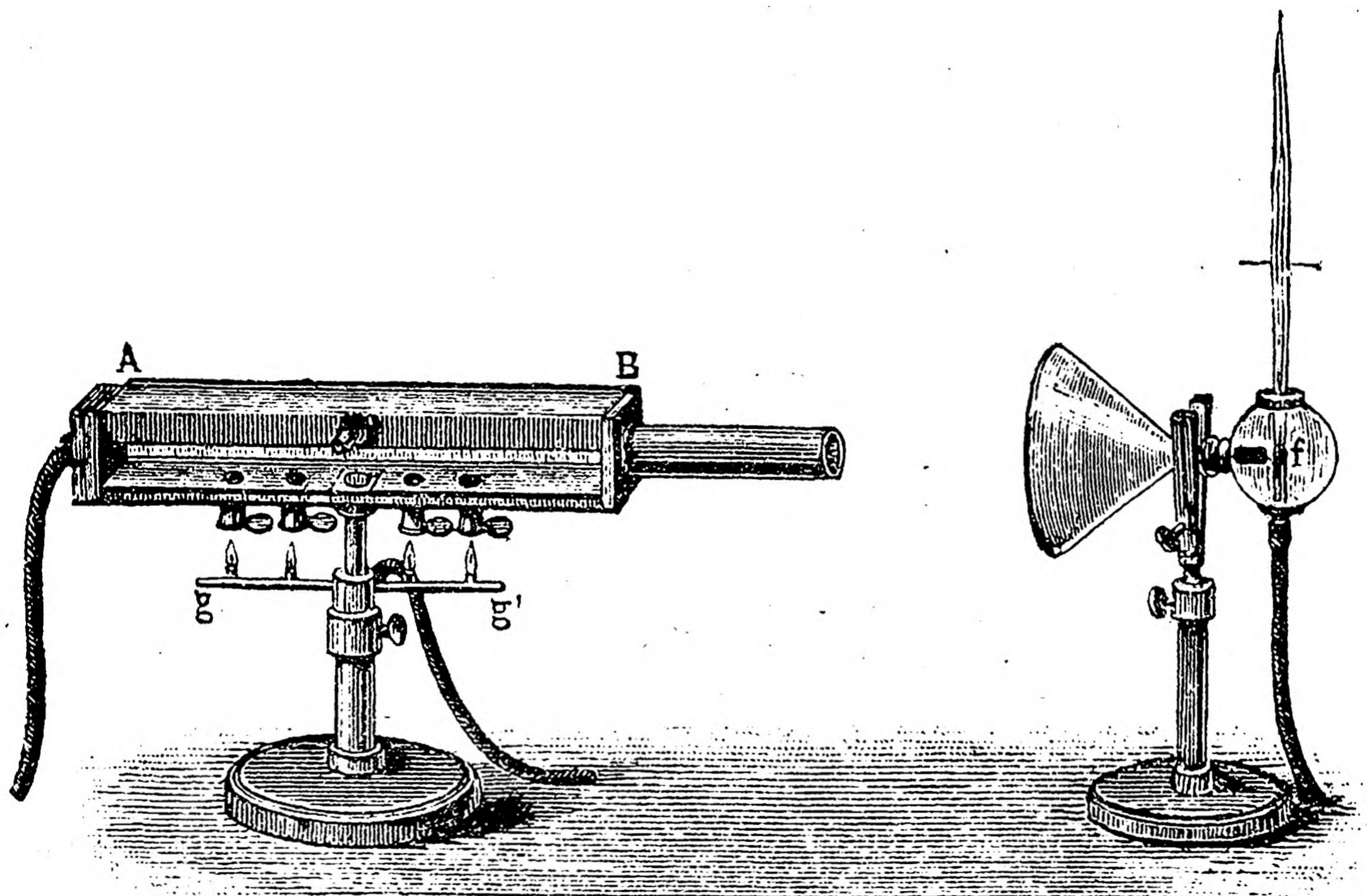
Х л о р о ф о р м.—Пламя весьма чувствительное; действие подобно предыдущему.

И о д и с т ы й м е т и л.—Действие быстрое и сильное.

А м л е н.—Весьма красивое действие; короткое и сильно волнуемое пламя немедленно становилось большим и спокойным.

С е р н ы й э ф и р.—Действие быстрое и сильное.

Водяной пар при обыкновенной температуре находится в воздухе в таком небольшом количестве и так разрежен, что требуются особые предосторожности, чтобы увидеть его действие. При соблюдении таких предосторожностей оказалось, что он может сделать спокойным волнуемое пламя.

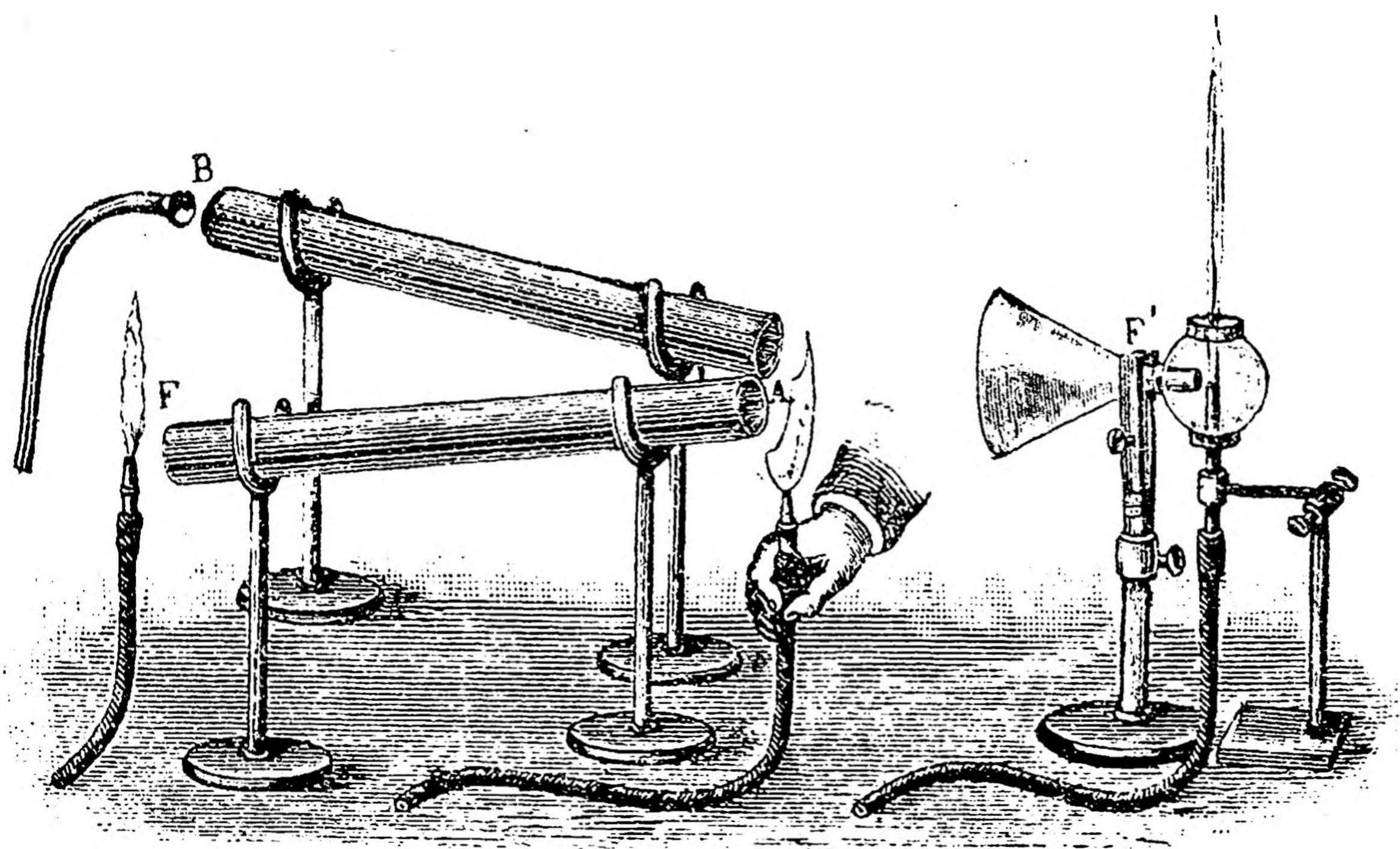


Фиг. 158.

По мере того как увеличивается искусство и опытность экспериментатора, он часто находит возможность упрощать свои первоначальные комбинации. Так в настоящем случае, при помощи надлежащей установки источника звука и чувствительного пламени, найдено было, что не только 25 слоев, но три или четыре слоя светильного газа и угольной кислоты достаточны для того, чтобы сделать спокойным волнуемое пламя. Да при усовершенствованной манипуляции можно было явственно видеть действие даже одного слоя того или другого из этих газов. Далее оказалось, что теплота от пламени двух-трех или даже одной свечи и теплота от нагретой кочерги была достаточна для того, чтобы остановить мигание пламени. Это же замечание применяется к парам. Три или четыре слоя воздуха, насыщенного парами жидкости, делали пламя спокойным, а при усовершенствованной манипуляции было заметно дей-

ствие даже одного насыщенного слоя. Во всех этих случаях колокольчик мог быть с пользою заменен небольшим язычком высокого тона.

Простой аппарат, представленный на фиг. 158 и предназначенный для показания отражения звука газами, парами и нагретым воздухом, был придуман моим ассистентом. На конце *A* квадратной трубки *AB* находится небольшой язычок высокого тона от фисгармоники и звук его сильно волнует чувствительное пламя *f*. К горизонтальной трубке *gg* приделаны четыре небольших горелки и над ними укреплены четыре отводных трубочки, по которым газы, нагретые горящим в горелках газом, могут подниматься в *AB*. Когда крышки, запирающие трубочки, сняты и зажжен газ, то воздух внутри *AB* быстро становится неоднородным и немедленно успокаивает волнуемое пламя.



Фиг. 159.

Трубу *AB* можно перевернуть верхом вниз и отверстием, находящимся посредине между *A* и *B*, надеть на стойку, поддерживающую газовую трубку. Через *t* открывается вход в неглубокий четырехугольный щиток, который рядом поперечных отверстий сообщается с *AB*. Когда воздух, насыщенный парами летучей жидкости, пропускается через эти отверстия, то воздух *AB* немедленно становится неоднородным, и волнуемое пламя быстро становится спокойным.

Опытами в Соус Фореленде было доказано не только то, что акустические облака задерживают звук, но и то, что звуки, передача которых была задержана вследствие отражения, возвращаются назад. Желая подтвердить экспериментально это отражение звука, я сказал моему ассистенту, что мы должны найти способ исполнить это. Он удовлетворил моему желанию следующим изящным экспериментом, который был описан на одном из заседаний Королевского Общества.

Вибрирующий язычок *B* (фиг. 159) был расположен таким образом, чтобы звуковые волны от него шли по оловянной трубке 95 см длины и $4\frac{1}{2}$ см. в диаметре в направлении *BA*, при чем действие звука

обнаруживалось в том, что он заставлял чувствительное пламя, помещенное в F' , сильно волноваться.

Невидимый нагретый слой воздуха как раз над светящеюся частью горящего газа, вышедшего из обыкновенной плоской горелки, поднимался вверх у конца A оловянной трубки. Часть звука, вышедшего из трубки, отражалась от ограничивающей поверхности нагретого слоя; часть же, проходившая через него, могла только слегка волновать чувствительное пламя при F .

Затем нагретый слой был поставлен под таким углом, чтобы отраженная часть звука проходила по второй оловянной трубке AF' (таких же размеров как BA). Действие этой части проявлялось в том, что она заставляла сильно волноваться второе чувствительное пламя, помещенное на другом конце трубки в F . Это эхо продолжалось и действовало все время, пока присутствовал нагретый слой; но когда он был устранен, то чувствительное пламя, находящееся в F' , подвергаясь действию всего прямого звука, начинало сильно волноваться и в тот же момент чувствительное пламя в F , на которое прекратилось теперь действие отраженного звука, пришло в прежнее покойное состояние.

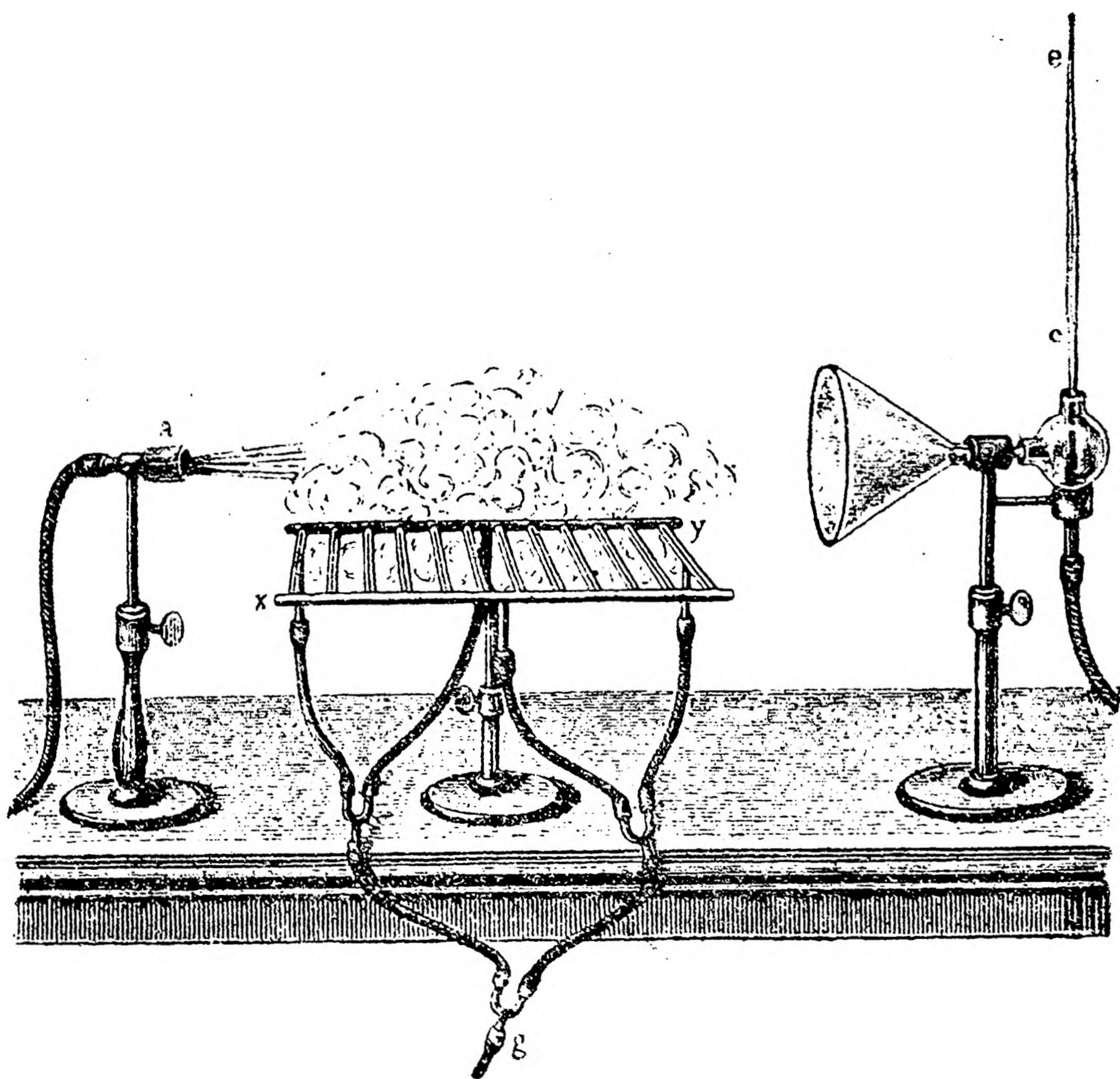
Получалось совершенно такое же действие, когда отражающим слоем была светящаяся часть газового пламени, но в описанных опытах употреблялся только невидимый слой выше пламени. При надлежащей установке давления газа пламя при F' можно сделать столь слабо чувствительным к прямым звуковым волнам, что часть звука, проходящая через отражающий слой, будет не в состоянии действовать на это пламя. Тогда, поднося к трубам или отнимая от них газовое пламя обыкновенной горелки, можно заставить оба чувствительные пламени попеременно то оставаться спокойными, то сильно волноваться.

Этими экспериментами доказывается совершенная аналогия между светом и звуком; потому что если пропустить пучок света от B к F' и поместить стеклянную пластинку как раз в то место, где находился отражающий слой газа, то пучок разделится и одна часть отразится в направлении AF , а другая пройдет через стекло к F' совершенно так же, как звуковая волна разделялась слоем нагретого газа или пламенем на отраженную и проходящую части.

Чтобы еще полнее иллюстрировать экспериментально явления, наблюдаемые нами в обширных размерах в Соус Фореленде, мы придумали следующее расположение приборов. На фиг. 160 *xy* представляет решетку, поперечные перекладины которой суть медные трубки 1 см. в диаметре и на верхней стороне их находятся отверстия величиною в $1\frac{1}{2}$ мил. Решетка соединена каучуковыми трубками с газовыми трубами здания, так что если открыть кран g , то газ довольно равномерно распространяется по решетке и вытекает из отверстий. Если газ зажечь, то получается ряд невысоких параллельных пламеней. На небольшом расстоянии от одного конца решетки установлен язычок фисгармоники a , который когда зазвучит, то приводит чувствительное пламя C в сильное движение. Если зажечь газ, то пламя немедленно успокаивается вследствие невозможности для звука пройти через невидимый, но клубящийся

воздух. Таким образом поразительно иллюстрируется непрозрачность, наблюдавшаяся во многих случаях в Соус Фореленде.

Оставляя язычок в том же положении, мы берем чувствительное пламя и ставим его сзади язычка, как показано на фиг. 161. На этом месте звук до такой степени слаб, что пламя здесь остается совершенно спокойным, когда звучит язычок. Оставляя все в прежнем положении, мы зажигаем газ, вследствие чего воздух над решеткой становится клубящимся. Звук немедленно отражается назад, получают воздушные эхо, которые настолько сильны, что могут привести в бурное движение пламя *сд.* Этот результат получается постоянно. Когда газ заперт, то после нескольких секунд, потребных для того, чтобы охладить поперечные трубки, пламя начинает гореть спокойно и затем снова волнуется в тот момент, когда образуется над решеткою невидимое облако. Мы получаем таким образом точное подражание воздушным эхо в Соус Фореленде.

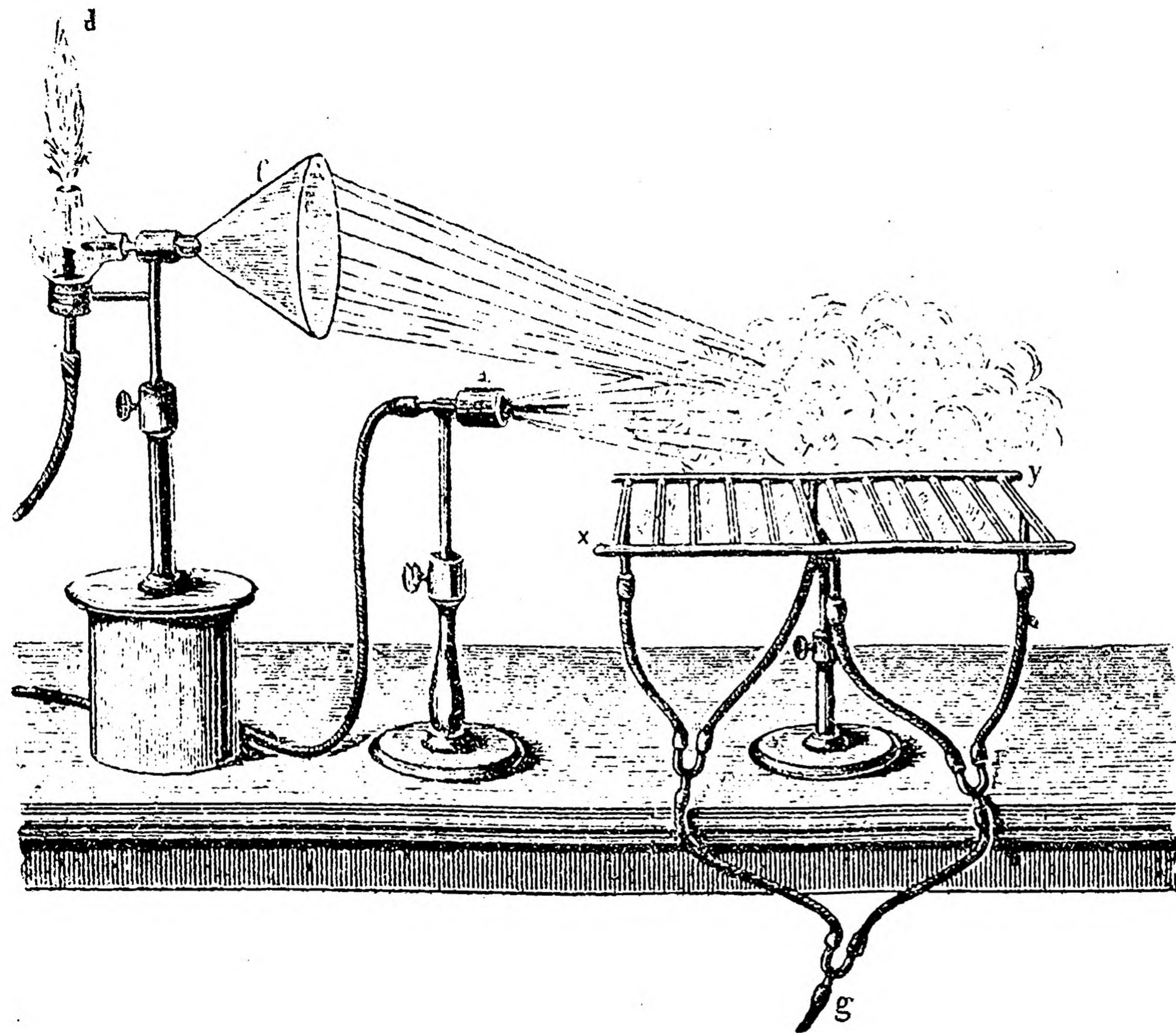


Фиг. 160.

Когда мы поставим по другую сторону решетки, не зажигая газа, другое пламя, на которое падают прямые звуковые волны, то оно мигает и шумит, между тем как пламя сзади язычка остается спокойным. По зажжении же газа оба меняют свой вид: получающее прямые звуки успокаивается, а получающее отраженные—волнуется.

Решетка, употреблявшаяся при моих первоначальных опытах, имела раму в $62\frac{1}{2}$ см. длины и 30 см. ширины, и трубки, составлявшие раму, не имели отверстий. Она имела 23 поперечных трубки, отверстия

которых отстояли одно от другого на $2\frac{1}{2}$ см. Решетка половинных размеров и с половинным числом отверстий дала бы те же результаты.



Фиг. 161.

Таким образом мы поставили наш предмет на твердую почву опыта и мы увидим, что опыт будет оказывать нам поддержку и дальше.

ЧАСТЬ II.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН, КОТОРЫЕ ДО СИХ ПОР СЧИТАЛИСЬ ПРЕПЯТСТВУЮЩИМИ РАСПРОСТРАНЕНИЮ ЗВУКА ПО ВОЗДУХУ.

Действие града и дождя.—Действие снега.—Действие тумана: наблюдения в Лондоне.—Опыты с искусственными туманами.—Наблюдения над туманами в Соус Фореленде.—Действие ветра.—Атмосферный отбор.—Влияние звуковой тени.

§ 1. Влияние града и дождя.

В первой части этой лекции было доказано, что оптическая прозрачность и акустическая прозрачность нашей атмосферы вовсе не совпадают между собою, что в дни удивительной оптической ясности атмосфера могла быть наполнена непроницаемыми акустическими облаками, между тем как дни оптически пасмурные могли быть акустически ясными. Теперь нам предстоит подробно рассмотреть влияние различных

агентов, о которых до сих пор предполагалось, что они оказывают сильное действие на распространение звука в воздухе.

Дождю приписывалась способность сильно затруднять звук. Мы уже указывали на наблюдение 3 июня, что оно ставит под сомнение это положение. Два другие решающие наблюдения ясно покажут его несостоятельность. Утром 8 октября в 7 ч. 45 м. утра над Дувром разразилась гроза, сопровождавшаяся сильным дождем. Но затем тучи рассеились и солнце сильно освещало море. Мы вышли в море. Некоторое время атмосфера была оптически необыкновенно ясна, но акустически была непрозрачна. В 2 ч. 30 м. пополудни густая черная туча покрыла небо на ЗЮЗ. Мы находились на расстоянии 10 кил. от Соусе Фореленда и на борту все было тихо; труба была слышна весьма слабо, сирена гораздо лучше, между тем как гаубица была слышна лучше, чем когда-либо, хотя не лучше сирены.

С запада к нам приближался шквал. И в Альпах и в других местах я редко видел небо более черным. Густые кучевые облака плыли к СВ. и ЮВ.; сильные струи дождя падали на ЗСЗ.; огромные тучи висели на С.; но на ССВ. видны были светлые голубые пространства.

В 11 кил. расстояния сирена и труба были слышны слабо, между тем как выстрел из пушки звучал сильно. Густой дождь закрыл Фореленд.

Наконец дождь дошел до нас и падал между нами и Форелендом; по звук вместо того, чтобы ослабеть, заметно усилился. Затем к дождю присоединился град, достигший тропической силы, и градины густо покрывали залитую дождем палубу. Среди этого яростного шквала как труба, так и сирена слышны были явственно, и когда ливень ослабел и местный шум от этого уменьшился, звуки до того усилились, что мы слышали их на расстоянии 12 кил. и они были заметно громче, чем слышали их без дождя на расстоянии 8 кил.

В 4 ч. попол. дождь прекратился и солнце светило при спокойной атмосфере. В 15 кил. расстояния труба была слышна слабо, сирена — явственно и выстрелы гаубицы были очень громки. На этом расстоянии все звуки мы слышали гораздо лучше, чем они были слышны нам на 9 кил., из чего по закону обратной квадратной пропорциональности следует, что сила звука при 9 кил. расстояния должна была увеличиться вследствие дождя по крайней мере втрое.

23 октября наш пароход, чтобы укрыться от бури, ушел от нас, и я решился воспользоваться такой погодой, чтобы произвести наблюдения по обеим сторонам туманосигнальной станции. Дуглас, главный инженер Trinity House, взял на себя наблюдение на СВ. от Фореленда, а Айрес, помощник инженера, наблюдал на противоположной стороне. В 12 ч. 50 м. попол. дул сильный ветер, сопровождавшийся грозою и ливнем. Внутри и вне Корнильской станции береговой стражи в одной миле расстояния от наших приборов по направлению к Дувру среди шторма Айрес слышал звук сирены, и после того как дождь перестал, все звуки были гораздо громче, чем прежде. Дуглас послал заранее впереди себя экипаж в Книгедоун и кучер должен был 15 минут ждать его прихода.

В течение этого времени он не слышал звуков, хотя как раз в это время было произведено 40 звуков из трубы, и находившийся на посту береговой стражник, опытный наблюдатель, в течение дня не слышал никаких звуков. Но во время грозы и когда шел проливной дождь, который Дуглас назвал ливнем, звуки были слышны и все их слышали.

Словом, я никогда не наблюдал, чтобы дождь оказывал хоть малейшее ослабляющее влияние на звук. Предрассудок, будто «дурная погода» представляет препятствие для распространения звука, был одною из причин, задерживающих устройство звуковых сигналов на английских берегах, и нужно надеяться, что устранение этого предрассудка послужит к пользе будущих поколений моряков.

§ 2. Действие снега.

Падающий снег также считался сильнейшим препятствием при всякой передаче звуков. Мы не продолжали наших наблюдений в Соус Фореленде до наступления снежного времени, но одно из моих прежних наблюдений прямо относится к этому предмету. В рождественскую ночь 1859 г. я прибыл в Шамони по снегу столь глубокому, что он покрывал придорожные перила и до невозможной степени затруднял ходьбу. Густой снег шел также 26 и 27. 27-го, когда мятель приостановилась, я достиг Монтанвера, иногда по пояс в снегу. На следующий день нам удалось с большим трудом поставить поперек ледника два ряда вех с целью определения его движения зимою. В моем дневнике 29-го было записано утром: «снег, густой снег; должно быть он шел всю ночь, свежее-выпавшее количество так велико».

При таких обстоятельствах я поставил мой теодолит подле Мер-де-Гляс, куда я дошел почти по пояс в снегу, который был сух. Мои помощники были посланы через ледник с поручением измерить перемещение поперечного ряда вех, расставленных прежде. Мятель поднималась из долины и, приближаясь, затемняла воздух. Наконец она дошла до нас. Снег падал такой густой, какого я никогда не видал. Он образовал целую кучу на моем теодолите и густо покрыл мое платье. Здесь, таким образом, были налицо вместе и снег в воздухе и рыхлый свежий снег на земле, чего мне прежде никогда не приходилось встречать; и однакоже при таком состоянии атмосферы мои приказания были слышны через ледник на расстоянии полумили, и обратный опыт показал, что и я мог слышать голос одного из моих помощников.

И впоследствии я имел несколько случаев наблюдать при суровых условиях действие падающего снега на звук. Напр., в 1878 г. я взял с собою на Альпы колокольчики, которые заставлял звучать ударами точно определенной силы. 25 сентября моя жена взяла в свое распоряжение один из колокольчиков, а я отошел от нее на известное расстояние среди густого тумана и глубокого снега. Таким образом у нас были вместе два агента, которые до сих пор считались самыми неблагоприятными для передачи звука. Однако акустическая прозрачность в этот день была необыкновенная. Никогда ни в одном случае колокольчик не распространял

своих вибраций на такое большое расстояние. При обыкновенных условиях предел звука в 810 метров считался значительным; но 25-го этот предел был 1.170 метров.

§ 3. Прохождение звука через ткани и искусственный дождь.

Хлопья снега падали на Мер-де-Гляс так густо, что я только по временам мог видеть фигуры удалявшихся людей. Однако воздух, в котором падали эти хлопья, был непрерывен и однороден. Только ли пассивно хлопья поддавались звуковым волнам, качаясь подобно частичкам самого воздуха туда и сюда в то время, когда через них проходили звуковые волны, или же посредством диффракции волны огибали хлопья кругом и уходили дальше без чувствительной потери? Опыт поможет нам здесь и покажет, что звук обладает удивительной способностью легко проходить через препятствия и проникать через ткани, если только воздух в промежутках между ними сохраняет свою непрерывность.

Кусок картона или стекла, деревянная доска или рука, если их держать перед открытым концом t канала $a b c d$ (фиг. 157, стр. 216), останавливают звук колокольчика, находящегося в ящике P , и приводят в спокойное состояние чувствительное пламя K .

Напротив, обыкновенный бумажный носовой платок, помещенный перед концом канала, не оказывал заметного влияния на звук. Через платок, сложенный в два слоя, пламя сильно волновалось; через четыре слоя оно еще волновалось; а через шесть слоев оно хотя и успокоилось, но не совсем.

Но если тот же платок смочить водою и держать в один слой перед концом канала, то он успокаивал пламя так же, как картон или дерево. Но если положить платок между двумя листами пропускной бумаги, сжавши их так, чтобы они впитали в себя воду из платка, то способность передавать звук немедленно восстанавливается. Из этого мы заключаем, что звуковые волны проходят через промежутки бумажной ткани.

Через один слой тонкого шелка звук проходит без заметного прерыва; через шесть слоев пламя сильно волнуется; а через двенадцать слоев волнение едва заметно.

Один слой этого шелка, если его смочить, успокаивает пламя.

Один слой мягкого льняного полотна оказывает слабое действие на звук; слой толстой фланели также почти не оказывал никакого действия. Через четыре слоя фланели пламя заметно волновалось. Через один слой байки звук проходит почти так же свободно, как через воздух; через четыре слоя байки действие все еще было заметно. Через слой плотного твердого войлока в 1 см. толщины звуковые волны проходили с такой силой, что заметно волновали пламя. Через 200 слоев сетки, сплетенной из бумаги, воздух проходил свободно. Я не мог без удивления смотреть на эти явления. Держа перед ртом войлок или бумажную сетку, можно было втягивать через них воздух. И однакоже они были непроницаемы для света.

Один слой тонкого промасленного шелка останавливал звук и успокаивал пламя. Лист обыкновенной писчей бумаги или кредитный пятифунтовый билет также останавливали звук.

При этих опытах нет надобности непременно в чувствительном пламени. Повесьте тикающие карманные часы на расстоянии 15 см. от уха; помещенный между ними и ухом бумажный носовой платок не оказывает заметного влияния на тиканье; кусок же клеенки или сильно нагретый столб воздуха делает тиканье почти совершенно неслышным.

Но хотя промасленный шелк, почтовая бумага или кредитный билет могут задержать звук, однако листочек, достаточно тонкий для того, чтобы поддаваться действию воздушных волн, пропускает его. Толстая мыльная пленка оказывает заметное влияние на чувствительное пламя, а весьма тонкая не оказывает никакого. Усиление проходящего звука может быть наблюдаемо одновременно с появлением и усиливающейся яркостью радужных цветов, что указывает на уменьшающуюся толщину пленки. Весьма тонкая пленка коллоидума действует точно так же.

Эти опыты можно произвести весьма легко, заставляя звучать небольшой язычок фисгармоники на одном конце оловянной трубки и помещая чувствительное пламя на небольшом расстоянии от другого конца.

Узнав приведенные факты относительно прохождения звука через бумажные, льняные и шелковые ткани, через фланель, байку, войлок и бумажную сетку, вы без колебания согласитесь с тем положением, что звуковые волны передаются без всякой заметной задержки через искусственный дождь, град и снег. Водяные капли, семена, песок, отруби и разного рода хлопья употреблялись для этой цели; через все эти вещества, так же как и через настоящий дождь и град и через снег Мер-де-Гляс, звук проходил без заметного ослабления.

§ 4. Действия тумана. Наблюдения в Лондоне.

Но величайшего врага моряков, именно туман, мы должны рассмотреть подробнее; здесь однако для нас долгое время не представлялось условий, благоприятных для опытов. До конца ноября часто бывали дни с такой густой мглой, что она затемняла белые утесы Фореленда, но настоящих туманов не было. Однако, и представлявшиеся нам случаи решительно доказали, что принимавшиеся до сих пор мнения об отражении звука взвешенными частицами ложны; потому что в дни самой густой мглы звук распространялся на расстояние вдвое большее, чем в другие дни совершенной оптической прозрачности. Такие факты разрушили предполагавшуюся доселе связь между акустической прозрачностью и прозрачностью оптической, но они не решили вопроса о действии густых туманов.

9-го декабря Лондон был окутан необыкновенным туманом. Я телеграфировал в Trinity House и предлагал сделать несколько наблюдений над пушечными выстрелами. Очень скоро получен был ответ, что выстрелы будут произведены в Блеквеле после полудня. Я отправился в Гринвич в надежде услышать выстрелы через реку; но поезд вследствие

тумана запоздал, и я прибыл слишком поздно. Над рекой стоял густой туман; но различные звуки слышались среди него очень явственно. Сигнальный колокол на невидимой барже промежутками был слышен ясно, и я также ясно мог слышать удары молотов в Кубит Тоуне в 1 километре расстояния на противоположной стороне реки. Нигде не заметно было ослабления звука вследствие тумана.

Среди этого тумана и при разных местных звуках капитан Аткинс и Эдвардс слышали выстрелы из 12-фунтового орудия с фунтовым зарядом гораздо лучше, чем был слышен выстрел из 18-фунтового орудия с 3-фунтовым зарядом 3 июля при оптически ясной атмосфере и при отсутствии всякого местного тумана.

Желая наилучшим образом воспользоваться явлением, которого мы так долго ждали, я попробовал решать нашу задачу опытами в малых размерах. 10 декабря я поставил моего ассистента со свистком и органной трубкой у юго-западного конца моста, отделяющего Гайд Парк от Кенсингтон Гарденс. С восточного конца Серпентина¹⁾ я ясно слышал как свисток, так и трубку, которые производили 380 воли в секунду. Переменившись местами с ассистентом, я несколько времени слышал только свисток. Наконец до меня дошел и более низкий звук органной трубки, который то усиливался и становился очень явственным, то ослабевал до того, что был вовсе не слышен. Свисток представлял ту же перемежаемость во времени, но в противоположном смысле; когда звуки свистка были слабы, тогда трубка звучала сильно, и наоборот. Чтобы получить основной тон трубки, нужно было дуть слабо; вообще свисток оказался наиболее способным проникать через туман.

Во время этих опытов необыкновенно большая масса звуков наполняла воздух. Отраженный шум улиц Бейсватер и Нейтсбридж, звон большого колокола в Вестминстере, частые железнодорожные свистки и туманные сигналы, раздававшиеся на разных столичных станциях,—все эти звуки были очень сильны. Этого никак нельзя было согласить с категорическим утверждением об акустической непроницаемости лондонского тумана.

11 декабря туман стал еще гуще, но я слышал каждый звук свистка, а иногда и звуки трубки на расстоянии между мостом и восточным концом Серпентина. Сойдясь с моим ассистентом на мосту, мы оба ясно слышали громкий пушечный выстрел. Полицейский надзиратель утверждал, что, идя из Вульвича, он слышал несколько выстрелов около 2 часов пополудни и раньше. Это сообщение, если только оно соответствовало действительности, имеет величайшую важность, и потому я немедленно телеграфировал в Вульвич за сведениями. Профессор Абель любезно сообщил мне следующие подробности.

«Выстрелы производились в 1 час. 40 мин. пополудни. Испытываемые орудия были небольшого калибра 64-фунтовые с 10-фунтовым зарядом.

¹⁾ Серпентин, это—длинный пруд между указанными в тексте местностями и расстояние пункта наблюдения от пункта сигналов составляет около $\frac{3}{4}$ версты.

«Сотрясения, которые ощущались в моем доме и в служебном помещении около трех четвертей мили от побережья, были гораздо сильнее, чем те, которые ощущались при испытании самых тяжелых орудий с зарядами в 110 и 120 фунтов. Во время стрельбы стоял здесь густой туман».

Это были выстрелы, слышанные полицейским надзирателем; при последующих справках оказалось, что два выстрела были сделаны около 3 часов пополудни. Это были выстрелы, которые я слышал.

Профессор Абель также сообщил мне следующий факт. «Звонок нашего сторожа у ворот арсенала небольшой и не очень звонкий; но профессор Блоксам ясно слышал его только тогда, когда был северозападный ветер. В течение всей последней недели звонок был весьма явственно слышен, а ветер был югозападный (противный звуку). Расстояние звонка от дома Блоксама по прямому направлению около трех четвертей мили».

Несомненно, что ни один научный вопрос столько не нуждался в проверке, как этот вопрос о распространении звуков в атмосфере. Медленно, но верно мы шли к его решению, и чем дальше мы подвигались, тем более становилось ясным, что наше воображаемое знание о нем было от начала до конца ошибочным.

Утром 12-го туман достиг наибольшей густоты. Невозможно было читать у моего окна, перед которым было открытое западное небо. В 10 ч. 30 м. я отправил ассистента на мост и слушал его свисток и трубку с восточного конца Серпентина. Свисток звучал так пронзительно сильно, как никогда прежде, но иногда он ослабевал так, что почти не был слышен. Это показывало, что хотя в целом воздух был очень однородным, однако по туману тянулись акустические облака. Другая трубка, которая почти не была слышна вчера, сегодня утром была явственно слышна. Сегодня мы могли переговариваться между собою через Серпентин гораздо легче, чем вчера.

Во время наших летних наблюдений мы раз или два могли при густой мгле определить положение Фореленда по направлению звука. Сегодня мой ассистент отправился к сараю лодочника и стал там свистать в свисток; я же ходил по противоположной стороне Серпентина и повременам часто замечал, что линия, соединяющая нас, была наклонна к оси пруда. Дойдя до места, которое показалось мне находящимся как раз против него, я заметил это место, и на следующий день, когда туман прояснился, оказалось, что я определил это место совершенно точно. Если не мешает эхо, то ухо при небольшом упражнении способно определить направление звука с большой точностью. Это предмет очень трудный и несмотря на то, что им занимались лорд Рейлей и другие, его нельзя еще считать разъясненным.

Когда я утром пришел к Серпентину, то начавшийся в это время звон колоколов казался мне ужасно близким, так что мне нужно было несколько подумать, чтобы убедиться, что звон происходил к северу от Гайд Парка. Звуки обнаруживали удивительные колебания в своей силе. Прежде чем большой вестминстерский колокол стал бить 11 часов, другой

ближайший колокол зазвучал очень сильно. Затем были слышны первые пять ударов вестминстерского колокола, и один из них был особенно громок; но последние шесть ударов были не слышны. Я поручил ассистенту дожидаться боя 12 часов. Удары ближайшего колокола, столь громкие в 11 часов, были не слышны в 12 ч., между тем как из 12 ударов вестминстерского колокола 8 были не слышны. Вот какие удивительные изменения могут происходить в атмосфере!

В 7 часов пополудни удары вестминстерского колокола, пробившего 7 ч., вовсе не были слышны с Серпентина, между тем упомянутый уже ближайший колокол слышен был явственно. Туман рассеялся и прояснился, и горевшие фонари на мосту ясно были видны с восточного конца Серпентина, но усиление света не соответствовало усилению звука и то, что должно быть названо акустическим туманом, заступило место своего оптического предшественника. Несколько серий свистков и органичных трубок звучали последовательно одна за другою; и из них была слышна только одна серия свистков, все же остальные были совсем не слышны. Три серии органичных трубок были слышны, но чрезвычайно слабо. Когда мы переменились местами и инструменты звучали по-прежнему, то решительно ничего не было слышно.

В 8 часов звон колоколов и часовые удары вестминстерского колокола были очень громки. Акустический туман исчез.

Необыкновенные колебания силы замечались и в звоне церковных колоколов; в течение нескольких секунд они то звучали громко и вдруг ослабевали до совершенного беззвучия, то столь же быстро достигали прежней силы. Прохождение тумана перед солнечным диском, вследствие чего свет солнца попеременно то закрывается, то снова появляется, представляет оптическую аналогию этим звуковым явлениям. Относительно этих изменений акустическое действие атмосферы есть верное воспроизведение ее оптического действия.

В 9 часов были слышны только три удара вестминстерского колокола, другие же были не слышны. Воздух пришел частью в то состояние, в котором он находился в 7 часов, когда все удары были не слышны. Тишина парка в этот вечер, составлявшая контраст с гулким шумом, наполнявшим воздух в оба предшествующие дня, была поразительная. Звуки были заглушены оптически ясною, но акустически пасмурною атмосферою.

13-го туман заменился тонкою мглою, и я снова отправился на Серпентин. Стук экипажей был чрезвычайно слаб. Шум на улицах Найтсбридж и Бейсватер казался слабым, шаги отряда солдат, проходивших недалеко от нас, были неслышны, а в 11 часов утра были заглушены звон церковных колоколов и удары часового колокола вестминстерских часов. С субъективной стороны все благоприятствовало слуховым впечатлениям; но та же самая причина, которая ослабляла местные шумы, заглушала и наши экспериментальные звуки. Голос моего ассистента, которого я ясно видел, звучал с Серпентина гораздо слабее, чем тогда, когда мы были скрыты один от другого самым густым туманом.

Поместив источник звука на восточном конце Серпентина, я пошел вдоль по краю его от моста к концу. Расстояние между этими двумя пунктами около 1.000 шагов. После того как я сделал 500 шагов, звук был не столь громок, как я слышал его с моста в день самого густого тумана. Таким образом оптическое прояснение воздуха вследствие испарения тумана до такой степени затемнило его акустически, что произведенный на восточном конце Серпентина звук на полпути между концом и мостом ослабел до одной четверти своей первоначальной силы.

К этим наблюдениям нужно еще прибавить одно или два последующих. В начале 1874 было несколько влажных и теплых дней, и в эти дни в полдень я остановился у решетки Сент-Джемского парка близ Букингемского дворца в трех четвертях мили от башни часов, которая ясно была видна. Ни один удар большого колокола «Big-Ben» не был слышен. 19 января туман и крупный дождь окутали и скрыли башню; однако с того же самого места я не только слышал удары большого колокола, но и звон колоколов, бивших четверти.

Во время чрезвычайно густого и моросившего тумана 22 января с того же самого места я слышал каждый удар колокола. В конце Серпентина, когда туман был наиболее густ, удары вестминстерского колокола в 11 часов раздавались громко. К вечеру туман стал рассеиваться и в 6 часов я отправился на Серпентин, чтобы наблюдать действие оптического прояснения на звук. Ни один удар не дошел до меня. В 9 и в 10 часов мой ассистент был на том же месте и в оба раза не слышал ни одного удара. Здесь повторилось совершенно то же, что наблюдалось 13 декабря, когда разрежение тумана сопровождалось акустическим потемнением воздуха¹⁾.

§ 5. Наблюдения в Соус Фореленде.

Как ни были удовлетворительны и решительны эти результаты, но мне очень хотелось подтвердить их экспериментами с помощью приборов, действовавших теперь в Соус Фореленде. 10 февраля я имел удовольствие получить следующее письмо с приложением от представителя Trinity House.

«Дорогой мой Тиндаль, прилагаемое при сем сообщение покажет вам, как точно подтвердились ваши взгляды, и я посылаю его вам, не дожидаясь подробностей. Я думаю, вам будет приятно получить их, и как только мне доставлен будет отчет, я сейчас же отправлю его вам. Дней десять тому назад я подумал, что недурно было бы произвести наблюдения при погоде, слегка расположенной к туманности, и поэтому тотчас отправил «Argus» и просил, чтобы на нем был один из членов туманной комиссии. В пятницу я так был уверен, что начнется туман, что послал Эдвардса записывать наблюдения... Преданный вам Ф. Арроу».

¹⁾ Один знакомый сообщил мне, что когда он следил за сворой собак в ясный и тихий день, то не слышал никакого звука от собак, но в тихие туманные дни он с такого же расстояния явственно слышал музыкальный звук лая собак.

Упомянутое сообщение состояло из заметок капитана Аткинса и Эдвардса. Аткинс писал: «Как было условлено, я отправился со скорым поездом и встретил Эдвардса на Кеннон Стрит; мы вышли в Дувр Кестле, и на следующее утро в 7 часов я был разбужен звуками сирены. Вскочивши, я увидел, что долго желанный туман явился и что «Argus» уже снялся с якоря.

Но если бы даже я сам попал на борт его, то инструкции, данные мною Трифтопу, штурману «Argus», не могли быть лучше исполнены. Около полудня туман рассеялся, и «Argus» возвратился на свою якорную стоянку, и я узнал, что они слышали звуки как сирены, так и труб, на расстоянии 18 кил. от станции, где они оставили буй. Это вполне подтвердилось, так как я нынешним утром нашел буй и проверил расстояния, указанные Трифтопом. Я также побывал у плавучего маяка Варн (20½ кил. от Фореленда) и убедился, что во время тумана в субботу перед полуднем там явственно слышались звуки».

Эдвардс, который постоянно был при мне во время наших летних и осенних наблюдений и который был вполне компетентен для сравнительной оценки силы звуков, утверждал, что звуки в 7 часов были «чрезвычайно громки», так что разбудили как его, так и Аткинса. Он не помнит, чтобы когда-нибудь прежде он слышал такие громкие звуки в Дувре; казалось, как будто наблюдатели находились вблизи звучащих приборов.

Другие туманные дни предшествовали этому и это все были дни акустической прозрачности; дни самого густого тумана были самые ясные акустически.

Изложенные результаты имеют величайшую важность, потому что они ставят нас лицом к лицу с самым густым туманом и с настоящими туманными сигналами и самым решительным образом подтверждают наблюдения, сделанные в Лондоне.

Чрезвычайно интересно сравнить передачу звука 7 февраля и 14 октября. В оба эти дня ветер имел одинаковые силу и направление. Мои заметки, сделанные во время наблюдений, показывают, что второй день весь был оптически чрезвычайно ясен. Предел распространения звука был 16 кил. Во время тумана 7 февраля «Argus» слышал звуки на расстоянии 18 кил., и звуки были слышны также на плавучем маяке Варн, который отстоит от Фореленда на 20½ килом.

Следует также заметить, что во время того же тумана звуки были слышны на плавучем маяке Соус Занд Гид, который находится в противоположном направлении от Соус Фореленда и фактически находится сзади сирены. Нельзя упускать из вида этого важного обстоятельства: сирена 7 февраля была случайно направлена не на «Argus», но на Дувр. Если бы яхта находилась на оси прибора, то почти несомненно, что звук был бы слышен на всем пространстве до берегов Франции.

Едва ли мне нужно прибавлять хоть одно слово в предупреждение возможного перетолкования, будто бы я думаю, что самый туман помогает звуку. Частилки тумана оказывают небольшое влияние на волны

звука, чем взвешенные частички, носящиеся над мелями Ньюфаундленда на волны Атлантики. При туманах обыкновенно воздух бывает однородным и от этого происходит акустическая ясность туманной погоды.

§ 6. Опыты с искусственными туманами.

Эти наблюдения были неопровержимо подтверждены лабораторными опытами. Здесь же, между прочим, нам дан будет урок, до какой степени должен быть осторожен экспериментатор.

Дым от тлеющей серой бумаги входил в канал *tt'* (фиг. 157) через прямоугольные отверстия в нем; действие его на звуковые волны было сильно и сделало короткое и волнующееся пламя $\frac{1}{2}$ большим и спокойным.

Воздух, прошедший через аммиак и потом через хлористоводородную кислоту, и таким образом наполненный густыми парами нашатыря, был проведен в канал; волновавшееся пламя немедленно сделалось спокойным, что указывало на весьма решительное действие искусственного тумана.

Воздух, прошедший через хлористое олово и направленный в канал, произвел очень густые пары. Действие их на звуковые волны было весьма сильно.

Густой дым смолы, горящей перед открытым концом канала и вгоняемый в него мехом, тоже задерживал звуковые волны и успокаивал волнующееся пламя.

Вывод из этого, повидимому, был ясен, и он, повидимому, неопровержимо подтверждал господствовавшие априорные понятия о действии тумана на звук. Но вот тут-то и нужна осторожность. Дым тлеющей бумаги был горяч; склянка, содержащая хлористоводородную кислоту, была горяча, и содержащая хлористое олово тоже была горяча; и дым от смолы, образовавшийся от прикосновения нагретой до-красна кочерги, тоже, очевидно, был горяч. Чему же после этого приписать результаты, парам или разности температур? Наблюдения могли устроить западню для неосторожного мыслителя.

Вместо дыма и нагретого воздуха в канал впускался только воздух, нагреваемый четырьмя раскаленными до-красна кочергами; действия на звуковые волны было весьма сильное, хотя канал оптически был пустой. На другом конце канала было помещено пламя свечи и горячий воздух над его верхушкой вдувался в канал; действие на чувствительное пламя было очевидно. Такое же действие получилось и тогда, когда воздух, поднимающийся от раскаленного до-красна железа, вдувался в канал.

Во всех последних случаях канал оставался оптически ясным, между тем наблюдалось то же действие, какое производили смола, дым и пары. Ясно поэтому, что мы не имеем права приписать без дальнейшего исследования искусственному туману то действие, которое могло быть произведено сопровождавшим его воздухом.

Устранив таким образом туман и доказав, что действие принадлежит здесь неоднородному воздуху, мы завершим свое доказательство, если устраним теплоту и докажем, что один туман не оказывает никакого действия на звук.

Вместо канала *tt'* (фиг. 157), ящик со стеклянными стенками 1 метр длины, 60 см. ширины и около 150 см. вышины был наполняем парами разного рода. Мы рассчитывали, что пары могут оставаться здесь довольно долго, пока не исчезнет разница температуры. Были сделаны два отверстия в противоположных стеклянных стенках, разделенных расстоянием в 1 метр. Перед одним отверстием был поставлен колокольчик в ящичке, выложенном мягкой подкладкой, а сзади другого отверстия и на некотором расстоянии от него находилось чувствительное пламя.

В закрытый стеклянный ящик была помещена чашечка с плавившим на воде фосфором, который был зажжен. Дым был так густ, что проходимый звуком слой его меньше чем в 1 метр совершенно затемнял яркое пламя свечи. Сначала было заметно слабое действие на звук, но оно быстро прекратилось, и пламя не представляло никаких изменений, как будто звук проходил через чистый воздух. Первое действие, очевидно, было вызвано разностью температуры, и оно прекратилось, когда температура сравнялась.

Затем ящик был наполнен густым пороховым дымом. Сначала было слабое действие, но оно прекратилось даже скорее, чем при опыте с фосфором, и звук проходил как будто дыма вовсе не был. При фосфоре действие прекращалось через полминуты, а при пороховом дыме достаточно было нескольких секунд. А эти пары и дым были более чем достаточны для того, чтобы затемнить пламя свечи.

Густой дым смолы, когда сравнялась температура, не оказывал никакого влияния на звук.

Пары хлористого олова, хотя очень густые, не производили заметного действия на звук.

Затем ящик был наполнен чрезвычайно густыми парами нашатыря. Пространство, проходимое звуком, было достаточно для того, чтобы затемнить пламя свечи. Тотчас же после того, как ящик был наполнен, звук проходил без малейшего заметного изменения. Отверстие наверху ящика было открыто; но хотя через него выходил столб густого дыма, прошло все-таки несколько минут прежде, чем можно было через разредившиеся пары увидеть пламя свечи.

Из медного котла был впущен в ящик пар в таком количестве, что весь наполнил его густым облаком. Никогда в природе натуральное облако не бывает таким густым; однакоже, звук проходил через него без малейшего заметного ослабления. Ввиду такого факта невероятно отражение звука облаками, облачное эхо.

Во всех этих случаях, когда внутри ящика, содержащего дым, зажигалась пара бунзеновских горелок, менее чем в минуту воздух становился до такой степени неоднородным, что чувствительное пламя вполне успокаивалось.

Эти акустически недеятвующие туманы, как оказалось впоследствии, были в состоянии задерживать электрический свет.

Таким образом опыты и наблюдения вполне согласуются между собою и доказывают, что туманы не оказывают заметного влияния на звук. И после того как мнение о их непроницаемости, столь сильно замедлявшее введение береговых звуковых сигналов, в настоящее время вполне нами опровергнуто, мы имеем полное основание надеяться, что в будущем значительно уменьшатся несчастные случаи от туманов и пасмурной погоды.

§ 7. Действие ветра.

В бурную погоду наш пароход часто оставлял нас и уходил, чтобы укрыться от ветра, в Доунс или в Маргет Роде, и этими случаями мы пользовались, чтобы определять действие ветра. 11 октября в сопровождении Дугласа и Эдвардса я шел вдоль скалистого берега от форта Дувр к Фореленду и ветер дул противоположно звуку. Около полутора миль от Фореленда мы прежде всего услышали слабый, но явственный звук сирены. Звуки труб были неслышны. Пушечный выстрел, сделанный в то время, когда мы остановились, также не был слышен нам.

Когда мы приближались к Фореленду, то увидели дым из пушки. Эдвардс слышал слабый звук, но Дуглас и я ничего не слышали. В то же время звук сирены становился пронзительно сильным. Мы прождали 10 минут, и тогда был произведен другой выстрел. Дым был весьма близко, и мне показалось, будто я слышу гул, но сказать уверенно не могу. Мои спутники ничего не слышали. Измерив впоследствии это расстояние, мы нашли, что оно составляет 561 метр. Мы в это время были закрыты небольшою возвышенностью как от сирены, так и от пушки; но этим невозможно было объяснить полное погашение звука выстрела на таком коротком расстоянии в то время, когда сирена посылала нам такие громкие звуки.

По моему предложению Айрес пошел против ветра вдоль утеса, Дуглас же в это время отправился дальше к Сен-Маргарет Бей. Во время их отсутствия были произведены выстрелы из трех орудий. Айрес слышал только один из них. Но Дуглас, благоприятствуемый ветром, на вдвое большем расстоянии и гораздо глубже погруженный в звуковую тень, слышал все три выстрела чрезвычайно явственно.

Соединившись с Дугласом, мы продолжали наш путь на расстоянии трех четвертей мили за Сен-Маргарет Бей. Здесь мы шли как раз по ветру, который дул с прежней силой, и звук сирены доходил до нас с необыкновенной силой ¹⁾. На этом месте мы слышали также громкий выстрел и два других выстрела с промежутком 10 секунд, когда возвращались в Фореленд.

Следует упомянуть, что выстрел из пушки 11 октября был слышен пять раз и мог бы быть слышен и 15 раз как по ветру, так и против ветра.

¹⁾ Трубы в это время не звучали, но несомненно, что и они были бы слышны.

В ветряную погоду короткость звука пушки составляет серьезное препятствие к употреблению ее для сигнала. При трубах же и сирене звук продолжается достаточно для того, чтобы обратить на себя внимание, и отдельный порыв ветра, отрывая часть звука, не вполне его уничтожает. Но такой порыв может быть убийственным для моментального пушечного выстрела.

По ветру от Фореленда звуки были слышны 23 октября по крайней мере в четыре раза дальше, чем против ветра, между тем сирена обнаруживала наибольшую силу в обоих направлениях.

24 октября ветер перешел в В.-Ю.-В., и звуки, которые при З.-Ю.-З. не достигали Дувра, были слышны на улицах при сильном дожде. В течение 27 числа ветер был В.-С.-В. В нашем кабинете в гостинице Lord Warden, в спальне и на лестнице звук сирены доходил до нас с удивительной силой, несмотря на свист и завывания ветра, который дул через Дувр к Фокстону. Звуки были слышны мною и Эдвардсом в 9 кил. от Фореленда по дороге в Фокстон, и если бы приборы не перестали звучать, то были бы слышны еще дальше. На плавучем маяке Соус Занд Гид, в трех с половиною милях в противоположную сторону, весь день не было слышно никаких звуков. Но 28-го, когда ветер был С.-В., звуки были слышны в центре Фокстона, на расстоянии 13 кил., между тем в противоположном направлении они не достигали и 6 кил. 29-го пределом звука был Иствер Бей с одной стороны и Кингсдоун—с другой; 30-го же пределами были Кингсдоун с одной стороны и Фокстонский пир—с другой. При ветре с силою в 4 или 5 обыкновенно наблюдалось, что в одном направлении звук распространяется втрое дальше, чем в другом. Ввиду таких результатов, которые по числу, разнообразию и определенности, вероятно, превосходят все до сих пор получавшиеся результаты, я, конечно, не могу не придавать важного значения влиянию ветра на звук.

Описанное действие ветра долгое время оставалось загадкой. Я слышал и хорошо помню, как сэр Джон Гершель, автор самого важного по тому времени трактата о звуке, выражал свое удивление по поводу разницы в звуковой силе церковных колоколов в Гакгорсте в зависимости от того, совпадало ли направление звука с направлением ветра или же было противоположно ему. При этом он потряс головой в знак того, что это еще нерешенная задача. Однако, в 1857 г. трудность решения этого вопроса была побеждена профессором Стоксом.

Вот его объяснение. Во время ветра поступательное движение воздуха близ земной поверхности совершается медленнее, чем в известном расстоянии над нею, потому что воздух задерживается трением о землю и собственным внутренним трением. Положим, что положение в известный момент небольшой части звуковой волны, движущейся против ветра, представляет вертикальную линию. Та вершина волны, которая далее всего отстоит от земной поверхности, толкается назад гораздо сильнее, чем самая нижняя часть ее, которая испытывает сопротивление ветра меньшей скорости. Поэтому волна перестает быть верти-

кальной и ее верхняя часть наклоняется назад. Движение же волны совершается всегда перпендикулярно к ее передней стороне, и небольшое размышление показывает, что волна, которую ветер заставил наклониться описанным образом, будет двигаться вперед не горизонтально, но наклонно вверх.

Доказательство этой теории оказалось гораздо более легким, чем это предполагалось сначала, и профессору Осборну Рейнольдсу мы обязаны экспериментальным подтверждением ее. В его опытах источником звука служит электрический звонок, который можно было поднимать вверх и опускать вниз. Когда он в ветряную погоду заставлял звонок звучать и сам становился против ветра, то находил, что на известном расстоянии звуковые волны проходили над его головой совершенно так, как этого требовала теория Стокса. Он нашел также, что если поднять звонок, то звуки его слышны против ветра дальше, чем тогда, когда звонок находился близ земной поверхности. Я сам произвел несколько подобных опытов на Вимблдон Коммон, и они подтвердили результаты профессора Рейнольда. Было устроено так, что звонок поднимался на блоке на высоту 3 метров от земли. Когда звонок, находившийся на земле, заставляли звучать ударами молоточка, сила которых регулировалась приспособленной пружиной, тогда наблюдатель удалялся от него против ветра до тех пор, пока звон переставал быть слышимым. Затем звонок поднимался, и его опять заставляли звонить. Звук его немедленно становился слышим, так как поднятие звонка не произвело до некоторой степени отклонения вверх звуковой волны. По укрепленной в землю лестнице я мог поднять свою голову до высоты 3—3½ метров над землею. Лестница была поставлена против ветра, звонок звучал и его относили дальше, пока ухо, находившееся у земли, переставало слышать звуки. Но, поднявшись на лестницу, мы находили там отклонившиеся волны и звуки были явственно слышны. Эти результаты были подтверждены опытами в больших размерах, произведенными в Пагоде ботанического сада в Кью.

Очевидно, что всякая другая причина, производящая разницу в движении различных частей звуковой волны, может оказывать такое же влияние на звук, какое оказывает ветер. Профессор Осборн Рейнольдс настолько вникнул в предмет, что заметил, что здесь могут играть роль и различия в температуре. Предположим, напр., что воздух близ земной поверхности теплее, чем находящийся повыше над нею; конец звуковой волны, ближайший к земле, и в тихую погоду будет двигаться быстрее, чем части волны, находящейся на некоторой высоте над нею. Вследствие этого волна, вначале вертикальная, наклонится и вследствие наклонного положения пойдет дальше косвенно вверх, как при противоположном ветре. Указываемая профессором Осборном Рейнольдсом причина действительно действует здесь, но я надеюсь он извинит меня, если я не во всех случаях соглашусь с объяснениями, которые он основывает на ней.

§ 8. Атмосферный подбор.

Утверждают, что атмосфера в разные дни оказывает предпочтение разным тонам. Этот предмет заслуживает дальнейшего разъяснения.

После проливного дождя, разразившегося над нами 18 октября, звуки всех приборов, как было сказано, заметно усилились; но было замечено, что звук трубы, который был ниже по тону, чем звук сирены, наиболее усилился и по временам не только равнялся со своим соперником, но и превосходил его. Из этого можно заключить, что атмосферная перемена, произведенная дождем, благоприятствовала преимущественно передаче более длинных волн.

Но наша программа дала нам возможность пойти дальше простого предположения. Было условлено в указанный день, что до 3 ч. 30 мин. сирена будет делать 2400 оборотов в минуту, производя 480 волн в секунду. Пока сохранялась эта скорость, после дождя преимущество было на стороне трубы. Затем быстрота вращения была изменена до 2000 оборотов в минуту или до 400 волн в секунду, и тогда звук сирены немедленно превзошел звук трубы. Таким образом установлена была ясная связь между воздушным отражением и длиной звуковых волн.

Канадский 25-сантиметровый свисток был устроен таким образом, что мог издавать звуки различной высоты, и 10 октября я произвел наблюдения над целым рядом его звуков. Самые высокие звуки, повидимому, имели наибольшую силу и пронзительность. И по общепринятому мнению звуки такого характера (которые вблизи сильно и даже болезненно действуют на слух наблюдателя) имеют и наибольший предел распространения. А. Гордон в своем показании перед комитетом маяков в 1845 г. выразился таким образом: «Если вы имеете резкий звук высокого тона, то такой звук распространяется дальше, чем звук низкого тона». Я слышал, что и другие ученые высказывали такое же мнение.

14-го октября этот предмет был подвергнут экспериментальному испытанию. Было условлено, что до 11 ч. 30 мин. утра канадский свисток, который с такой пронзительной силой был слышен 10-го, будет издавать свой самый высокий звук. К указанному времени мы находились у буя Варн в 12½ километрах от Фореленда. Когда мы приближались к бую, то сирена была слышна среди шума колес; трубы были также слышны, но слабее, чем сирена. Мы останавливались у буя и ждали пушечного выстрела в 11 ч. 30 м. Все мы слышали его звук. Ни до остановки, ни во время остановки мы ни разу не слышали пронзительно звучащего канадского свистка. В условленное время его заставили издавать его обыкновенный звук низкого тона, и он тотчас же стал слышен. Когда мы отошли дальше, низкий гул пушечного выстрела продолжал быть слышен, после того как все другие звуки перестали быть слышными.

Но это преимущество длинных волн оказывалось только в первую половину дня. В 3 ч. пополудни отношения совершенно изменились,

так что высокий звук сирены был слышен, в то время как другие звуки были неслышны. И в другие дни мы наблюдали изменения в сравнительной силе сирены и пушки. 9-го октября была сильнее то одна, то другая. Утром 13-го мы ясно слышали сирену у Шекспировского утеса, в то время как мы видели две вспышки выстрелов, но самых выстрелов не слышали. 16-го октября в двух милях от станции пушечный выстрел в 11 часов был слабее сирены, но оба были слышны. В 12 ч. 30 мин. при расстоянии в 10 кил. выстрел был почти не слышен, между тем как сирена была слышна слабо. Потом в этот же день опыт был повторен два раза. Каждый раз вспышка выстрела была видна, но ничего не было слышно. В последнем опыте, когда звук выстрела не был слышен, сирена посылала такие сильные звуки, что их не мог заглушить шум колес. День был, очевидно, неблагоприятен для распространения длинных звуковых волн.

17-е октября началось благоприятно для коротких волн. В 11 ч. 30 мин. утра ясно было заметно превосходство сирены над пушкой; в 12 ч. 20 мин. пушка слегка превзошла сирену; в 1 ч., 2 ч. и 2 ч. 30 м. пушка удерживала превосходство. И это превосходство длинных волн продолжалось и 18-го октября. 20-го октября день начался благоприятно для пушки; затем обе они сравнялись и, наконец, взяла верх сирена. Но дальше началась буря, которая всегда неблагоприятна для моментального звука пушки. Эти же замечания применимы и к опытам 21-го октября. В 11 час. утра при расстоянии $10\frac{1}{2}$ кил., когда звук сирены был слышен несмотря на шум ветра, моря и колес, сделан был выстрел из пушки; но хотя мы слушали с полным вниманием, но никакого звука не слышали. Спустя полчаса результат был тот же. 24-го октября пятеро наблюдателей видели вспышку выстрела на расстоянии 8 кил., но ничего не слышали; но все они на этом же расстоянии явственно слышали сирену. Второй опыт в тот же день дал такой же результат. В течение 27-го сирена также имела перевес; в трех различных случаях 29-го она имела решительное превосходство над пушкой. Такие опыты вызывают новые представления о рассеянии звука в атмосфере.

§ 9. Заключительные замечания.

Настоящую главу уместно будет закончить несколькими заключительными замечаниями и выводами. Доказано, что при известных состояниях погоды выстрел гаубицы с 3-х фунтовым зарядом имеет больший предел, чем свистки, трубы и сирена. Так было особенно 17-го октября, когда пределы всех звуков достигали максимума.

Но зато в другие дни преимущество сирены над пушкой было доказано яснейшим образом. Вспышки пушечных выстрелов очень ясно были видны в Ферленде, но звуки их были не слышны, хотя в то же самое время звуки сирены доносились до нас с значительной силой.

Недостатки пушек состоят в следующем:

а) Продолжительность звука так коротка, что если наблюдатель не насторожился, то звук может быть неслышен скорее от недостатка внимания, чем вследствие слабости самого звука.

б) Звук их может быть заглушен порывом ветра, действующего на ухо одновременно с выстрелом. На это указывал Араго в отчете о знаменитых опытах в 1822 г. При продолжительном звуке такой порыв производит мгновенный перерыв в звуке, а не полное погашение его.

в) Звук выстрелов могут сильно ослабляться или отклоняться в сторону от действия противного ветра. Был случай, когда звук выстрела не слышен был на расстоянии 561 метра от места выстрела против сильного ветра, хотя в то же самое время звук сирены доносился с большой силой.

Однако, я думаю, что, несмотря на эти недостатки, пушка все-таки имеет право стоять в числе первоклассных сигналов. Я имел случай наблюдать ее большую пользу в Голигиде и плавучем маяке Киш близ Кингстоуна. Капитаны Голигидских судов единогласно одобряют пушку. Важное добавочное свидетельство в ее пользу представляет тот факт, что во время тумана вспышка или блеск часто может помогать звуку. Это очевидно.

Могут быть случаи, в которых можно желать соединения пушки с одним из прочих сигналов. Когда требуется дать туманному сигналу безошибочную характерную особенность, то такое соединение может быть употреблено с пользою.

Если пушка будет удержана как одна из форм туманных сигналов (и я бы не решился в настоящее время рекомендовать ее совершенное устранение), то она должна быть подходящей конструкции. Наши опыты доказали, что звук пушки зависит от ее формы, и мы не знаем, была ли в нашем употреблении наилучшая форма. Поэтому было бы желательно устроить пушку со специальным назначением произведения звуков.

Еще более важное значение, чем форма пушки, имеет качество пороха. Для произведения звуковой волны требуется резкий удар; поэтому быстро сгорающий порох более пригоден. Пироксилин и динамит, как производители звуков, превосходят обыкновенный порох.

Безусловно неизменного превосходства во всякие дни нельзя приписать ни одному из приборов, подлежащих нашему испытанию; но наши наблюдения были столь многочисленны и так продолжительны, что дали нам возможность прийти к несомненному заключению, что в общем паровая сирена есть самый сильный из туманных сигналов, до сих пор испытанных в Англии. Она особенно сильна в тех случаях, когда нужно преодолеть местные шумы, шум ветра и такелажа, разбивающихся волн, берегового прибоя и рокотания валунов. Густота, качество, высота и пронзительность ее звуков делают то, что она преобладает над такими шумами, в то время как другие звуковые сигналы заглушаются ими.

Поэтому я не колеблясь рекомендую введение сирены как звукового сигнала.

Для всех случаев было бы желательно приспособить к этому прибору вращательный аппарат, так, чтобы лицу, управляющему им, дать возможность направлять трубу против ветра и во всяком другом желаемом направлении. Такое приспособление было сделано в Соус Фореленде, и оно не представляло никакой механической трудности. Также было бы желательно установить сирену так высоко, чтобы трубу ее можно было понижать на 15° или на 20° ниже горизонта.

При выборе места для установки туманных сигналов необходимо принять во внимание и тщательно обсудить возможное влияние звуковой тени, возможное погашение звука вследствие интерференции прямых волн с отраженными от берега. В большей части случаев необходимы предварительные испытания, прежде чем окончательно будет избрано место, на котором должен быть установлен прибор.

Ни один из испытанных туманных сигналов не оказался удовлетворяющим тем условиям, которые были поставлены в упоминавшемся уже письме, именно, «чтобы всякий туманный сигнал был явственно слышен на расстоянии по меньшей мере 6 кил. при всяких обстоятельствах». Могут существовать такие обстоятельства, при которых самый сильный звук становится неслышным даже на вдвое меньшем расстоянии. Все, что можно утверждать с уверенностью, это то, что почти во всех случаях на сирену можно смело полагаться на расстоянии 3 кил.; в значительном большинстве случаев на нее можно полагаться на расстоянии 5 кил. и в большинстве случаев на расстоянии не более 5 кил.

К счастью, произведенные опыты показывают согласно, что именно в то время, когда необходимы туманные сигналы, воздух, содержащий в себе туман, бывает в высшей степени однороден; поэтому весьма вероятно, что при тумане можно ожидать, что сигналы будут действительны на больших расстояниях, чем указанные выше.

Мне бы очень не желалось внушать морякам уверенность, которая может оказаться обманчивою. Когда он слышит туманный сигнал, то он, как общее правило, должен предполагать (до тех пор во всяком случае, пока более точное исследование не покажет противного), что источник звука отстоит от него не более 3—5 кил., и должен прибегнуть к промерам или принять другие необходимые меры предосторожности. Если он ошибется в оценке расстояния, то ошибка будет в сторону безопасности.

Если бывшие в нашем распоряжении приборы умело расположить вдоль берегов, то, по моему мнению, спасенное имущество в течение 10 лет будет иметь ценность во много раз большую, чем те издержки, которые потребуются для установки таких сигналов. А спасение человеческих жизней требуется высшими мотивами гуманности.

В отчете, написанном для Trinity House по вопросу о туманных сигналах, мой знаменитый предшественник, профессор Фарадей высказал мысль, что обманчивое обещание для моряка хуже, чем никакое

обещание. Окидывая взором изложенные здесь наблюдения, мы находим, что предел звука в ясные дни колеблется от 3 до 26½ килом. Очевидно, что инструкция, основанная на последнем наблюдении, будет представлять опасный риск при погоде, соответствующей первому наблюдению. Моряку необходимо запечатлеть в уме не максимум, но минимум предела звука. Недостаточное соблюдение этого правила может сопровождаться гибельными последствиями.

Это замечание сделано мною не без основания. Я имею перед собою «Указания для моряков» относительно туманного свистка, недавно установленного на Кап-Рес; уверяют, будто он имеет предел в 32 кил. в тихую погоду, 48 кил. при ветре и в бурную погоду или против ветра от 11 до 16 кил. Несмотря на расстояния, на какие распространялся звук при наших опытах, я был бы согласен допустить возможность, что при атмосфере более однородной, чем была у нас, предел звука сильного свистка в некоторые тихие дни может быть 32 кил. и в некоторые слегка ветреные дни 48 кил.; но я питаю твердую уверенность, что указание таких расстояний или расстояний в 11 или 16 кил. против ветра без всяких оговорок и ограничений может внушить моряку обманчивую уверенность. Я беру смелость утверждать, что в Кап-Рес могут случиться такие спокойные дни, когда предел звука будет менее трети указанного предела. Подобные публикации не должны содержать в себе и следа преувеличений и должны сообщать только такие данные, на которые моряк может положиться с полным доверием. Распространяя мои наблюдения на такой продолжительный период, я имел целью доказать всем, как было бы ошибочно и как могло быть опасно выводить общие заключения из наблюдений, произведенных при погоде с большою акустическою прозрачностью.

Этим и окончилось, по крайней мере на настоящий раз, наше исследование, которое будет иметь, как я уверен, некоторую важность как научную, так и практическую. В заключение я могу выразить удовольствие по поводу того, что я пользовался постоянною помощью и содействием «Старших Братьев» Trinity House. Капитан Дрю, капитан Клоз, капитан Вер, капитан Аткинс и старший депутат все время-от-времени принимали участие в исследовании. Знаменитому арктическому мореплавателю, адмиралу Коллинсону, который постоянно обнаруживал неослабный, можно даже сказать философский интерес к исследованию, я много обязан за самую важную практическую помощь. Он всегда был со мною, сравнивал свои взгляды с моими, ставил пароход в требуемые положения и производил с искусством и быстротою необходимые наблюдения с секстантом. Я также глубоко признателен за важные услуги, оказанные мне Дугласом, искусным и неутомимым инженером, Айресом, помощником инженера, и Присом Эдвардсом, который был в то время частным секретарем старшего депутата Trinity House.

Офицеры и артиллеристы в Соус Фореленде также заслуживают

моей живейшей благодарности, как и Гольме и Ледлоу, которые следили за трубами, свистками и сиреной.

В последующей экспериментальной обработке предмета мне помог мой прекрасный ассистент Джон Котрель ¹⁾.

ОБЗОР СЕДЬМОЙ ЛЕКЦИИ.

Седьмая лекция содержит отчет по исследованиям об акустических качествах атмосферы применительно к вопросу о туманных сигналах и о лабораторных опытах, вызванных этими исследованиями.

Сначала было изложено прежнее положение вопроса; затем следует описание приборов и приспособлений, устроенных в 1873 в Соус Фореленде с целью исчерпывающего исследования предмета. Исследование производилось на счет правительства и при содействии «Старших Братьев» Trinity House.

Сначала получались самые противоречивые результаты. 19-го мая 1873 г. предел распространения звука был 6 кил.; 20-го он был 9 кил.; 2-го июня $9\frac{1}{2}$ кил.; 3-го более чем 15 кил.; 10-го 15 кил.; 25-го $9\frac{1}{2}$ кил.; 26-го 15 кил.; 1-го июля $20\frac{1}{2}$ кил.; 2-го 6 кил.; между тем как 3-го, при ясной тихой атмосфере и спокойном гладком море, он был менее 5 кил.

Оказалось, что эти несогласия большею частью зависят от известного состояния воздуха, которое так относится к звуку, как облачность к свету. Вследствие токов воздуха с различной температурой или насыщенного в различной степени водяным паром атмосфера становится мутною для звука.

Действительно, акустические облака постоянно плавают или летают по воздуху. Они не имеют никакого решительно отношения к обыкновенным облакам, туману или мгле. Самая прозрачная атмосфера может быть полна ими и таким образом может обратить дни оптически чрезвычайно прозрачные в дни столь же чрезвычайно непрозрачные акустически.

Таким образом было опровергнуто предполагавшееся доселе существование связи между ясной атмосферой и распространением звука.

Задерживаемый звук тратится на повторные отражения в акустическом облаке, подобно тому как свет тратится на повторные отражения в обыкновенном облаке. И подобно тому, как свет, отраженный от обыкновенного облака, достигает глаза, и звук, отраженный от совершенно невидимого акустического облака, достигает уха.

Таким образом могут получаться воздушные эхо необыкновенной силы и большой продолжительности. Вопреки господствовавшему до сих пор мнению, они могут происходить при самой ясной атмосфере.

¹⁾ В Приложении помещена краткая статья об «акустической обратимости», в которой описаны дополнительные опыты. Там же описаны два случая акустической непрозрачности, самые замечательные из всех наблюдавшихся доселе.

Существование таких воздушных эхо было доказано как наблюдениями, так и опытами. Они могут происходить или от воздушных токов, различно нагретых, или от воздушных токов, различно насыщенных паром.

Дождь неспособен заметно задерживать звук.

Град неспособен заметно задерживать звук.

Снег неспособен заметно задерживать звук.

Туман неспособен заметно задерживать звук.

Воздух, смешанный с туманом, как общее правило, в высшей степени однороден и благоприятствует распространению звука. Существовавшее до сих пор мнение о действии тумана на звук оказалось несостоятельным.

Опыты с искусственным дождем, градом и снегом и с искусственными туманами необыкновенной густоты подтвердили результаты указанных наблюдений.

Пока воздух представляет непрерывную среду, количество звука рассеиваемое маленькими телами, взвешенными в нем, удивительно мало.

Это доказывается тою легкостью, с какою звук проходит через слои колена, кембрика, шелка, фланели, байки и войлока. Он свободно проходит через все эти вещества при толщине их, достаточной для того, чтобы задержать лучи солнца.

Например, через шесть слоев тонкого шелка он проходит без малейшей задержки; он проникает через слой плотного войлока в полдюйма толщины и не вполне задерживается 200 слоев бумажной сетки.

Атмосфера обнаруживает избирательное действие, действуя различно на разные звуковые волны, и это действие бывает различно в разные дни и даже в разные часы дня. Иногда она благоприятствует распространению более длинных, а иногда более коротких звуковых волн.

Общепризнанное действие ветра подтвердилось моими исследованиями.

Это действие объяснено теорией профессора Стокса, которая была подтверждена прежде всего опытами профессора Осборна Рейнольдса.

Лекция восьмая.

Закон колебаний в воде и в воздухе.—Встреча колебаний.—Интерференция и совпадение звуковых волн.—Уничтожение звука звуком.—Соединенное действие двух почти созвучных звуков.—Теория биений.—Оптическое изображение интерференции.—Увеличение интенсивности через уничтожение одного из тонов.—Беззвучные зоны Дуана.—Производные тоны.—Условия их образования.—Опыты по этому предмету.—Теория Юнга и Гельмгольца.

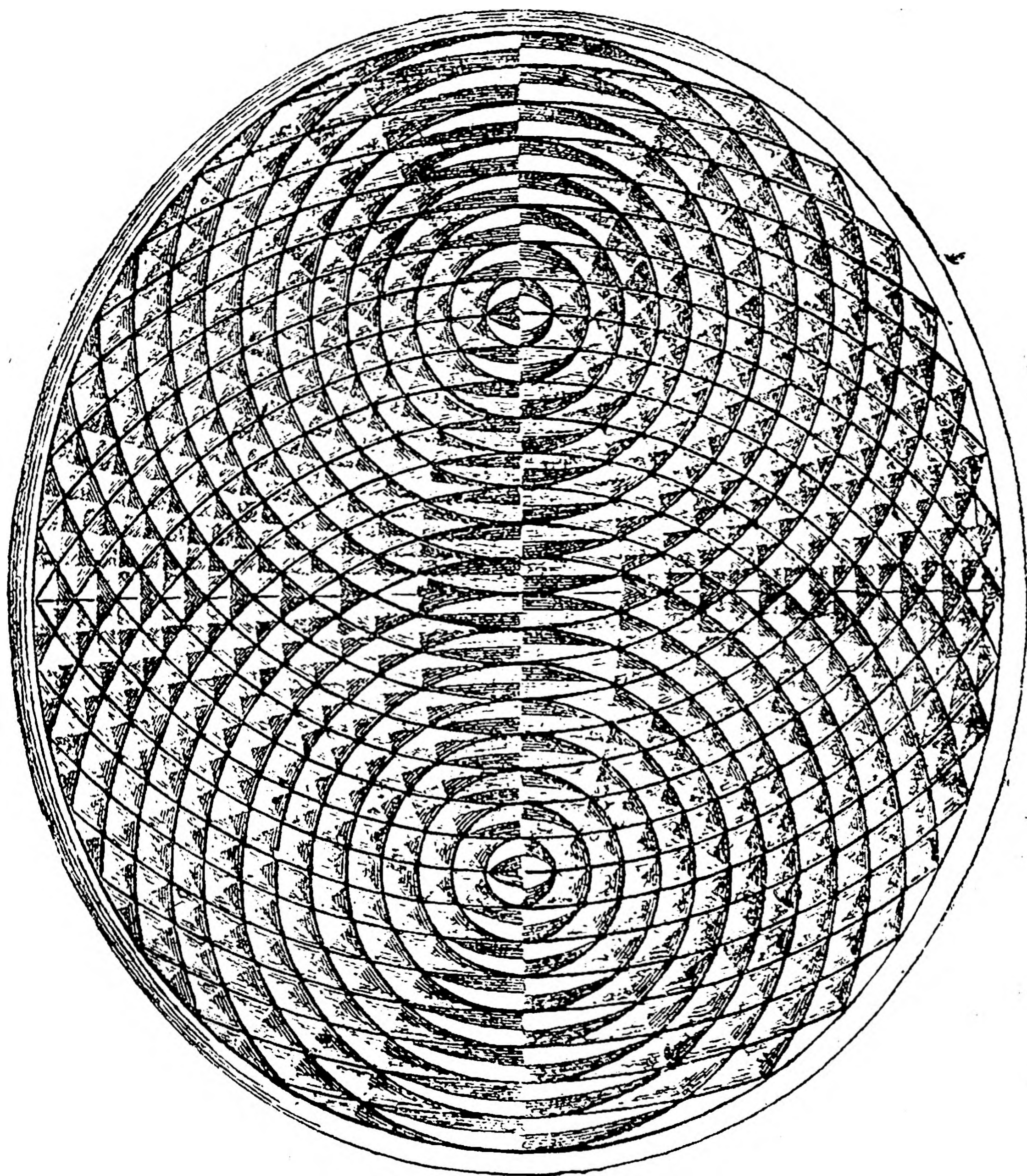
§ 1. Закон колебаний в воде и воздухе. Встреча колебаний.

В Ковесе, сидя на лодке, я часто наблюдал лодки, мачты и канаты кораблей, отражающиеся на воде. Изображения канатов представляли состояние водяной поверхности; длинными и широкими неправильностями рисовались большие волны; меньшими же зазубринами рисовались зыби, которые производили паразиты, плавающие на поверхности больших волн. Море приспособлялось к требованиям всех этих волнообразных движений, больших и малых. И когда я опускал весло в воду или сбрасывал с него капли в море, то и тогда даже оказывалось место для еще новых возникающих вследствие этого водяных колебаний. Это расчленение водяной поверхности на водяные волны и зыбь имело свои границы только вследствие ограниченности моих способностей наблюдения. Каждая волна, каждая маленькая зыбь занимали свое место и сохраняли свою индивидуальность среди массы других движений, которым подвергалась вода.

Закон, лежащий в основании этого перекрещивания и смешения бесчисленных волн, есть следующий: результирующее движение каждой частицы воды есть сумма частных сообщенных ей движений. Когда на какую-либо частицу в один и тот же момент с двух сторон действуют два толчка, заставляющие ее подниматься, то она поднимается с силою, которая есть сумма обоих толчков. Если оба толчка направлены таким образом, что один стремится поднять частицу, другой ее понизить, то результирующее действие равняется разности обоих толчков. Поэтому, когда я говорю о сумме движений, то я разумею их алгебраическую сумму и рассматриваю движение, стремящееся поднять частицу, как положительное, а стремящееся понизить ее, как отрицательное.

Если два камня бросить в спокойную воду на расстоянии 5—10 метров, то вокруг каждого образуется целый ряд кольцеобразных волн, из которых каждая состоит из выступов и углублений. По истечении некоторого времени волны соприкасаются и делают поверхность на небольшие возвышения и углубления. Там, где возвышение встречается

с возвышенном, вода поднимается на двойную высоту; где углубление встречается с углублением, получается двойное углубление. Результирующее движение в каждой точке воды, как сказано, есть алгебраическая сумма движений, действующих на эту точку. Если вместо двух центров движения мы произведем их десять, сто или тысячу, действие будет то же. Подробно проследить эти явления наблюдением мы не в



Фиг. 162.

силах; но вышеприведенный закон тем не менее действует всегда. Вместо взаимной встречи волн, берущих начало в двух отдельных точках, мы можем заставить перекрещиваться прямые и отраженные волны, исходящие из одной точки. Многие из вас знают, какое красивое явление представляет свет, отраженный от поверхности маленьких волн воды, заключающихся в обыкновенном сосуде и принятых на экран. Если вместо воды употребить ртуть, то явления бывают еще красивее. Сотрясая надлежащим образом сосуд с жидкостью, можно заставить перекрещиваться прямые и отраженные волны. Следующий рисунок (фиг. 162), заимствованный из сочинения братьев Веберов («Wellenlehre»), может дать вам понятие о красоте явления. Он представляет волнения, образующиеся в круглом сосуде вследствие пере-

крещивания прямых и отраженных волн. Исходная точка движения, которая представлена на рисунке в виде наименьшего из кружков, лежит на половине расстояния между центром сосуда и его краем.

Эта способность воды принимать различные импульсы и распространять их далее свойственна точно также и воздуху, и он дает место какому угодно числу звуковых волн. Тот же воздух в состоянии воспринять и передать в одно и то же время звуки тысячи инструментов.

Если бы мы захотели представить себе наглядным образом такое движение воздуха, то этого не в состоянии были бы сделать при самом крайнем напряжении воображения, тем не менее среди означенной путаницы волн выраженный закон действует; движение каждой частицы есть алгебраическая сумма отдельных сообщенных ей движений. Поразительнее всего то, что человеческое ухо, представляющее воздушную трубку толщиной не более обыкновенного гусиного пера, в состоянии воспринять все эти движения и отделить каждый тон от другого в этой смеси воздушных волн.

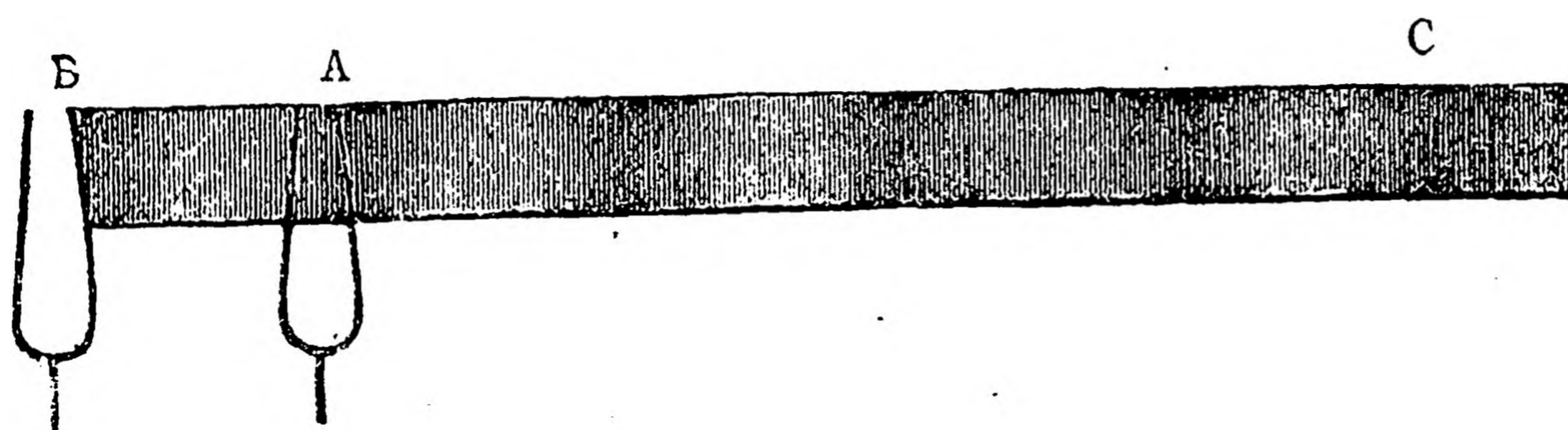
§ 2. Интерференция звука.

Если два в унисон настроенные камертона звучат вместе, то легко понять, что камертоны могут колебаться таким образом, что сгущения волн одного могут совпадать с сгущениями волн другого; точно так же, как и разрежения. Если это имеет место, то камертоны помогают друг другу. Сгущения усиливаются точно так же, как и разрежения; и так как сила (громкость) звука зависит от различия плотности между разрежениями и сгущениями, то оба камертона усиливают друг друга и дают более сильный тон, чем если бы каждый звучал отдельно.

Легко понять также, что оба камертона могут звучать таким образом, что сгущения, производимые одним, будут совпадать с разрежениями, производимыми другим, и что один камертон толкает частицы воздуха вперед, в то время как другой толкает их назад. Если действующие в том и другом направлении силы одинаковы, то частицы воздуха не будут двигаться ни вперед, ни назад, а останутся в покое. Таким образом, присоединяя к звуку одного камертона звук другого, можно заставить уничтожиться звуки обоих. Этим явлением более чем всяким другим характеризуется волнообразное движение. Оно привело в оптике к волнообразной теории света, главное доказательство которой основывается на том, что, прибавляя свет к свету, мы можем производить темноту; точно так же как, присоединяя один звук к другому, мы можем произвести тишину.

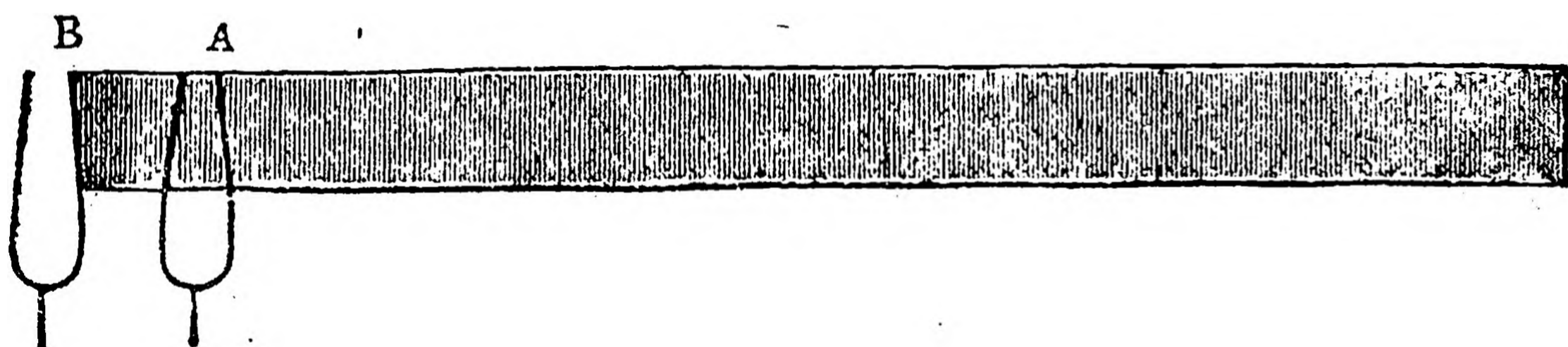
Во время колебания камертона расстояние между его ножками попеременно то увеличивается, то уменьшается. Мы назовем движение, которое стремится увеличить расстояние, движением наружу, а то, которое направлено к его уменьшению, движением внутрь, и примем, что наши оба камертона *A* и *B* (фиг. 163) достигают крайних точек своего колебания в один и тот же момент. В этом случае, выражаясь

технически, фазы их колебаний одинаковы. Для простоты остановимся на правых ножках обоих камертонов *A* и *B*, оставляя левые без внимания, и спросим, каковы должны быть расстояния между ножками для того, чтобы сгущения и разрежения, производимые обоими, изображенные здесь более густой и легкой тушевкой, совпадали? Небольшое размышление покажет, что когда расстояния от *B* до *A* будут равны длине волны, тогда должно существовать совпадение между двумя системами волн, исходящими из того и другого камертона. То же самое будет иметь место, когда то же расстояние будет вдвое, втрое, вчетверо



Фиг. 163.

более длины целой волны. В этом случае будет совпадение колебаний, и вследствие этого усиление звуков одного камертона звуками другого. Сгущения и разрежения между *A* и *C* будут здесь резче выражены, чем в том случае, если бы в действии был всего один камертон.



Фиг. 164.

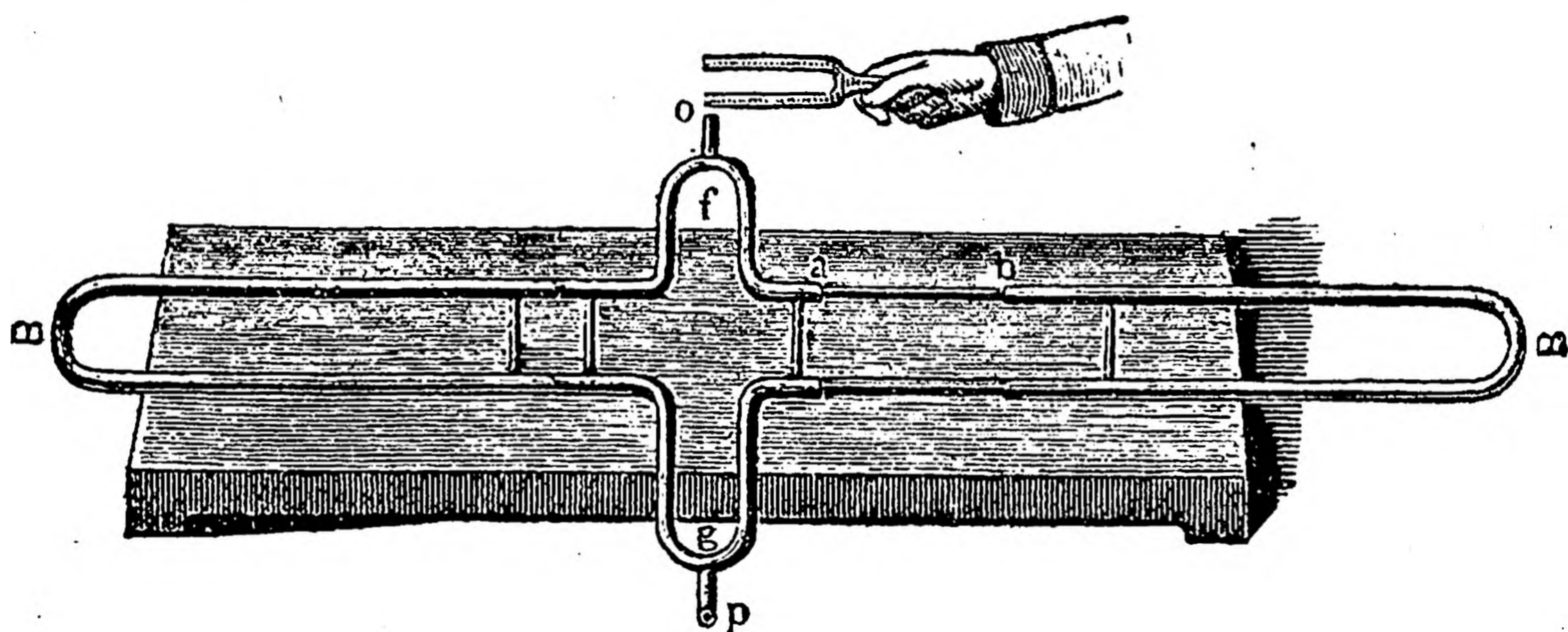
Но что будет, если ножка *B* будет отдалена от ножки *A* всего на расстоянии полволны? Очевидно, что в таком случае разрежения одной системы должны будут встречаться с сгущениями другой, и мы получим тогда интерференцию. Вправо от точки *A* воздух будет приведен в покой, как это изображено на фиг. 164, где ровность тушевки выражает отсутствие колебаний. Когда *B* будет помещено на расстоянии двух полуволн, то мы получим снова совпадение; на расстоянии трех полуволн—опять интерференцию. Или, говоря вообще, мы имеем или совпадение или интерференцию, смотря по тому, равняется ли расстояние между камертонами четному или нечетному числу полуволн. Точно то же бывает и со световыми волнами. Когда вследствие какой-либо причины одна система световых волн следует за другой на расстоянии целой волны, то волны друг друга усиливают, встречаясь между собою, и мы получаем более света. Если же это расстояние равняется только полуволне или вообще нечетному числу полуволн, то они точно так же

противодействуют одна другой, и получается отсутствие света вследствие их слияния.

Это явление как в области звука, так и в области света называется *интерференцией*.

§ 3. Экспериментальные доказательства.

Джон Гершель первый предложил разделить поток звуковых волн на два рукава различной длины, которые бы потом могли снова встречаться друг с другом и взаимно интерферироваться. Эта мысль осуществлена Квинке и Кенигом. Фиг. 165 показывает принцип этого опыта.



Фиг. 165.

Трубка *of* делится в точке *f* на две ветви, которые загибаются в точках *m* и *n*. В точке *g* обе ветви снова соединяются и сходятся в общий канал *gp*; часть трубки *bn* может выдвигаться, и от этого длина обоих рукавов может изменяться. Если поместить звучащий камертон перед отверстием *o*, а ухо в точке *p*, то звуковые волны будут достигать последней точки в одно и то же время в том случае, если длина обоих рукавов трубки будет одинакова; но если выдвигать подвижной рукав, то можно уловить положение, когда звук перестанет быть слышен. Это произойдет тогда, когда расстояние *ab* будет равно одной четверти волны или вообще правый рукав будет на полуволну длиннее левого. Если отодвинуть правый рукав еще далее, то звук будет снова слышен, и если удвоенное расстояние *ab* составит длину целой волны, то звук достигнет максимума. Таким образом мы получим то усиление, то уничтожение двух рядов волн, смотря по тому, будет ли удлиннен правый рукав на полволны или на целую волну. При производстве опыта трубка *of* должна быть удлиннена настолько, чтобы прямой звук камертона вовсе не был слышен наблюдателю, и последний мог бы устремить внимание исключительно лишь на звуки камертона, доходящие через трубку.

Ясно, что при помощи этого аппарата легко определить длину волны каждого простого звука. Нужно только определить расстояние, на которое должна быть раздвинута трубка для того, чтобы произвести интерференцию. Удвоенное это расстояние дает длину волны и если

при этом известно еще число колебаний, то можно определить и скорость звука в воздухе.

Каждый из двух находящихся здесь перед вами камертонов производит ровно 256 колебаний в секунду, так что тоны их вполне совпадают друг с другом и они звучат в унисон. Я прилеплю к одному из них кусочек воска, вследствие чего колебания его должны замедлиться. Примем, что он производит теперь 255 колебаний в секунду; что должно произойти, если заставить их звучать теперь вместе? Если они начинают звучать в один и тот же момент, то сгущения не будут все время совпадать с разрежениями. Камертоны спустя некоторое время начнут производить совершенно противоположные действия на окружающий воздух. На 128 колебания их фазы станут совершенно противоположны и один опередит другой на полволны. Один будет производить сгущения там, где другой будет производить разрежения. Результат этого будет тот, что оба камертона будут нейтрализовать друг друга, и мы не получим никакого звука. С этого момента однако колебания снова начнут приближаться к согласию, пока в конце секунды, когда первый достигнет своего 255, а другой 256 колебания, их колебания снова совпадут совершенно; тогда сгущение будет совпадать с сгущением, разрежение с разрежением и ухо будет ощущать действие обоих звуков.

Ясно, что в этом случае мы не получаем непрерывного течения совершенного унисона, но слышим только попеременно то усиление, то ослабление звука. Получается то, что в музыке называется б и е н и я м и, которые, как мы объяснили выше, и суть результаты интерференции.

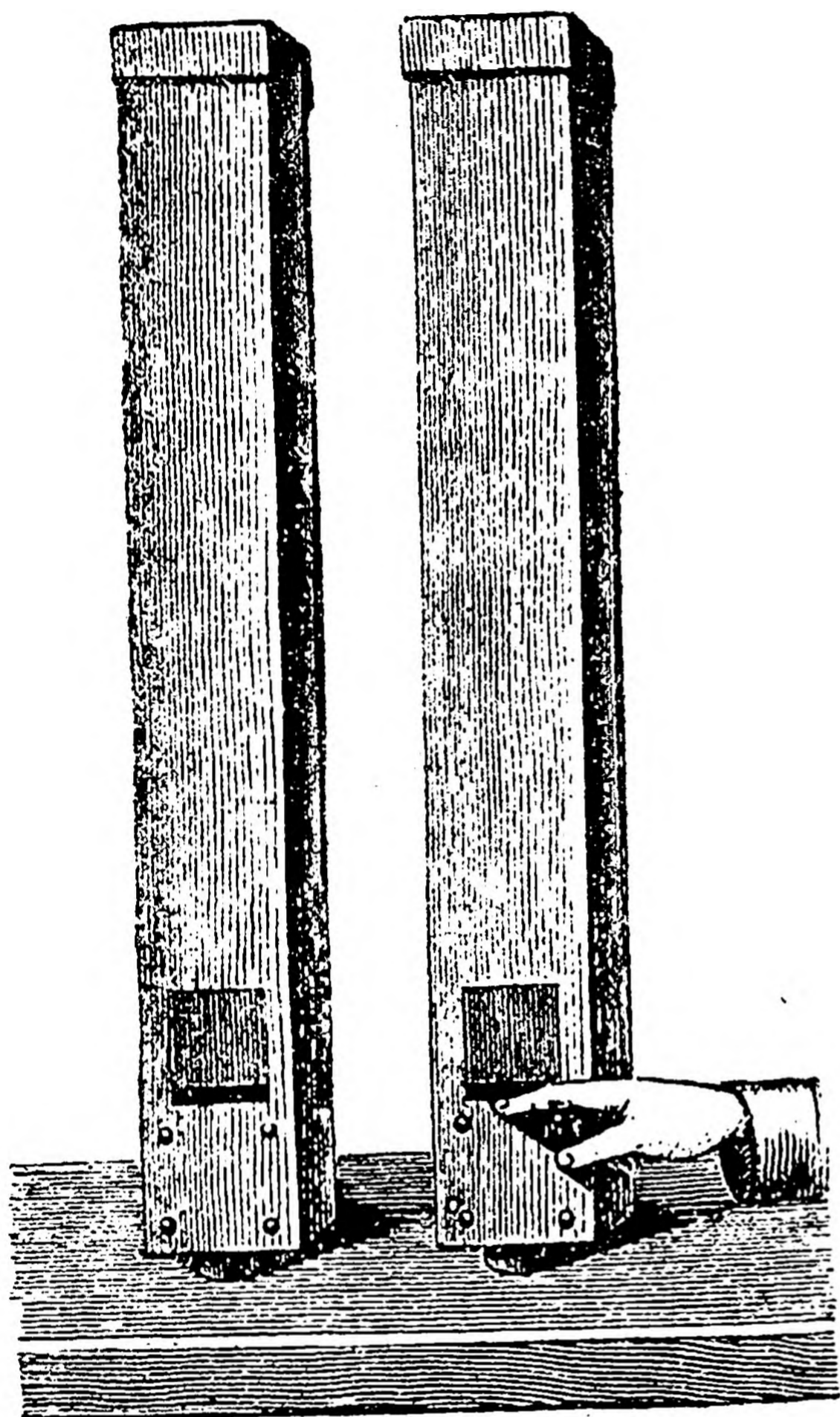
Я прилеплю к камертону более тяжелый кусок воска, и совпадения и интерференции следуют теперь быстрее друг за другом, чем прежде. В первом опыте один камертон совершал одним колебанием более в секунду, чем другой, и мы имели одно биение в это же время, теперь он совершает шестью колебаниями более, чем другой, и мы получаем 6 биений в секунду. При небольшом размышлении не трудно понять, что в промежуток времени, которого требует один камертон для того, чтобы произвести одним колебанием больше другого, должно происходить одно биение звука, и так как в настоящем случае в течение секунды должно наступить шесть таких моментов, то мы и должны в течение секунды получить шесть таких биений тона. Короче, число биений в секунду всегда равно разности между числом колебаний двух камертонов в секунду.

§ 4. Интерференция волн органичных трубок.

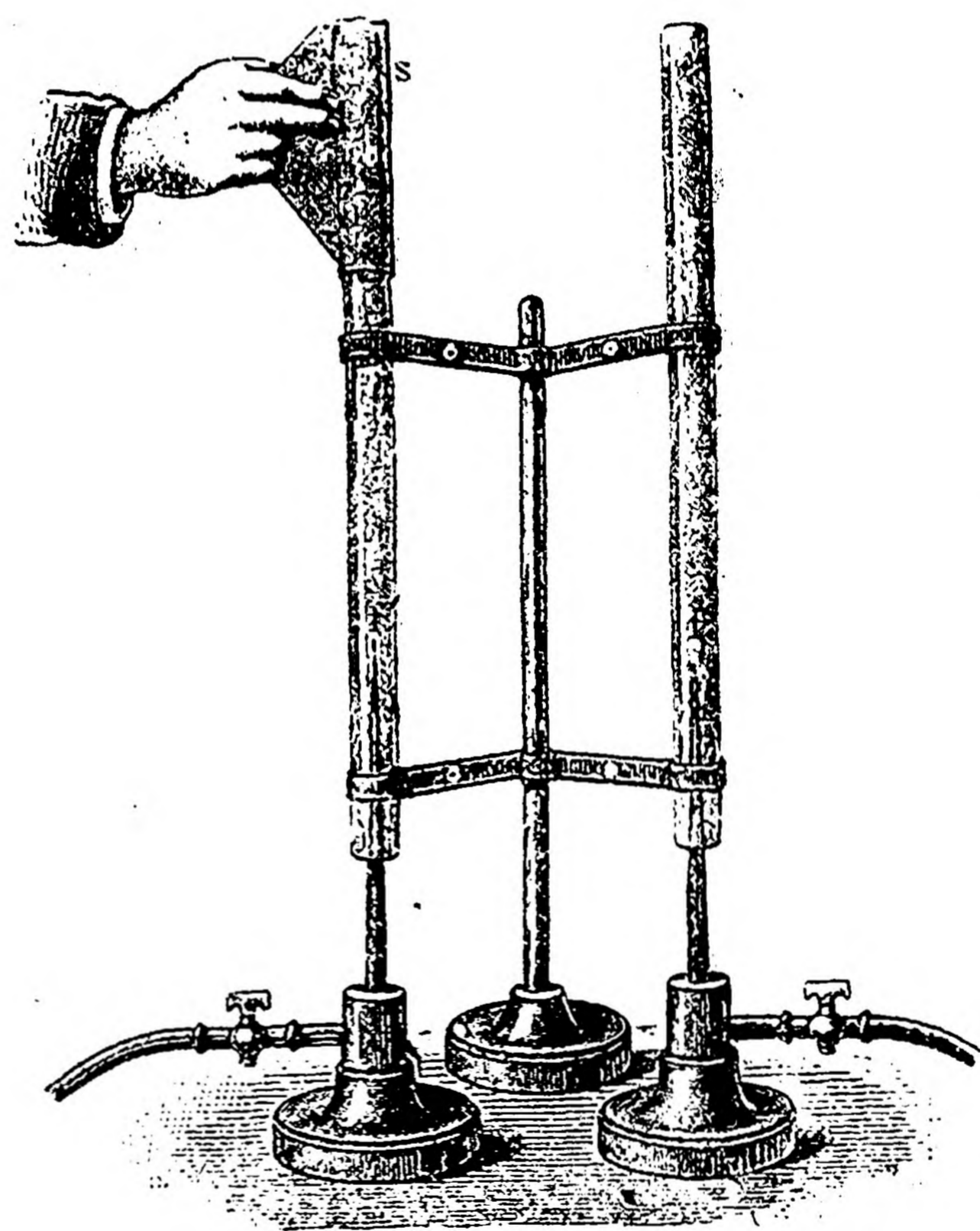
Биения могут быть произведены всеми звучащими телами. Перед вами две органичные трубки, которые дают весьма сильные биения, если они звучат вместе, и если одна несколько короче другой. Здесь другие две трубки одинаковой длины, звучащие в унисон; но стоит только поднести палец к нижнему отверстию одной из трубок (фиг. 166), и

одно это уменьшит число ее колебаний и произведет быстрые и громкие биения. Также, когда я помещу руку над верхним отверстием трубки, я уменьшаю число ее колебаний и вызываю биения; более сильным вдуванием воздуха в трубку производятся оба первые верхние тона трубок, и эти тоны также интерферируют и дают биения.

Поющие пламена представляют прекрасную иллюстрацию этого явления. Перед вами два таких пламени; трубки, которые их окружают, снабжены двумя выдвижными надставками (фиг. 167); в настоящую минуту они не дают биений, так как они недостаточно близки к унисону. Я удлиняю мало-по-малу более короткую трубку, выдвигая



Фиг. 166.



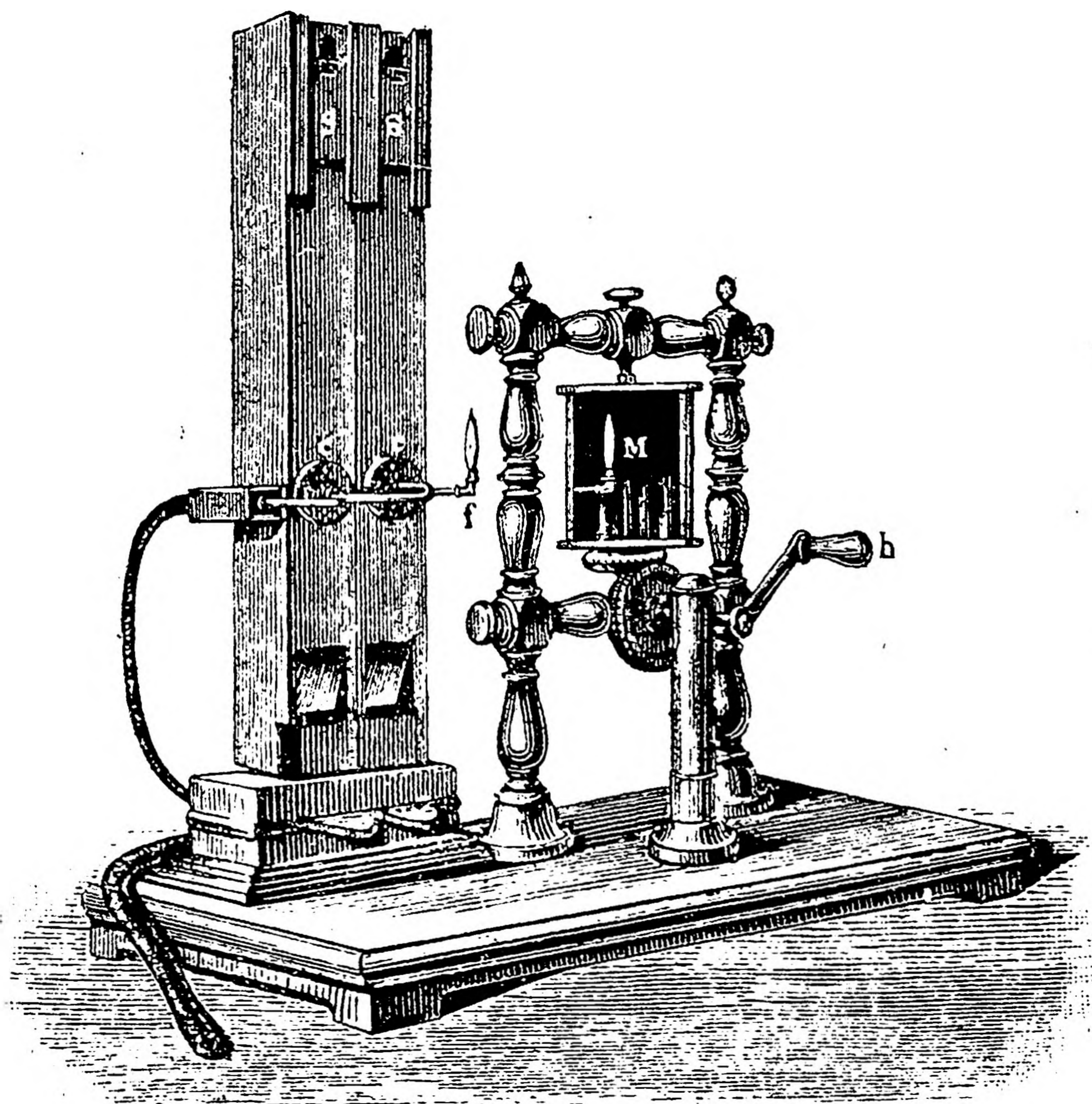
Фиг. 167.

надставку, и вот слышатся биения сперва быстрые, а потом более медленные; и оба пламени поют в унисон. Продолжая выдвигать надставку, я заставляю биения появиться снова, быстрота их растет до крайности. Вы замечаете, как пламена танцуют в такт с этими биениями. Как было сказано, эти биения приводят спокойное пламя в дрожание и при надлежащей высоте постороннего тона и надлежащем положении пламени могут заставить пламя петь. Употребляя горелки, имеющие форму розы, и оловянные трубки от 1 до 3 метров длины, мы достигаем, как вы замечаете, биений необыкновенной силы.

Вы только-что слышали биения, которые производились двумя органами трубами, близкими к унисону. Теперь перед нами две подобные же трубки (фиг. 168), из которых каждая посредине снабжена перепонкой, долженствующей действовать на пламя, как было описано в лекции пятой. Две маленькие трубочки выходят из мест трубок, за-

крытых перепонками, и затем соединяются вместе, так что перепонки обеих трубок сообщаются с одним и тем же пламенем.

Посредством подвижных надставок *ss* мы можем приводить трубки в созвучие или диссонанс. Я дую в обе трубки; они не созвучны и потому дают биения, быстро следующие, и пламя танцует им в такт. Перемещая надставки, я привожу трубки ближе к унисону, и быстрота биений замедляется; пламя периодически то угасает, то снова появляется; с ним происходит нечто похожее на процесс вдыхания и выдыхания. Если вращать теперь зеркало, то на экране появляется светлая полоса частью сплошная, частью разорванная на отдельные



Фиг. 168.

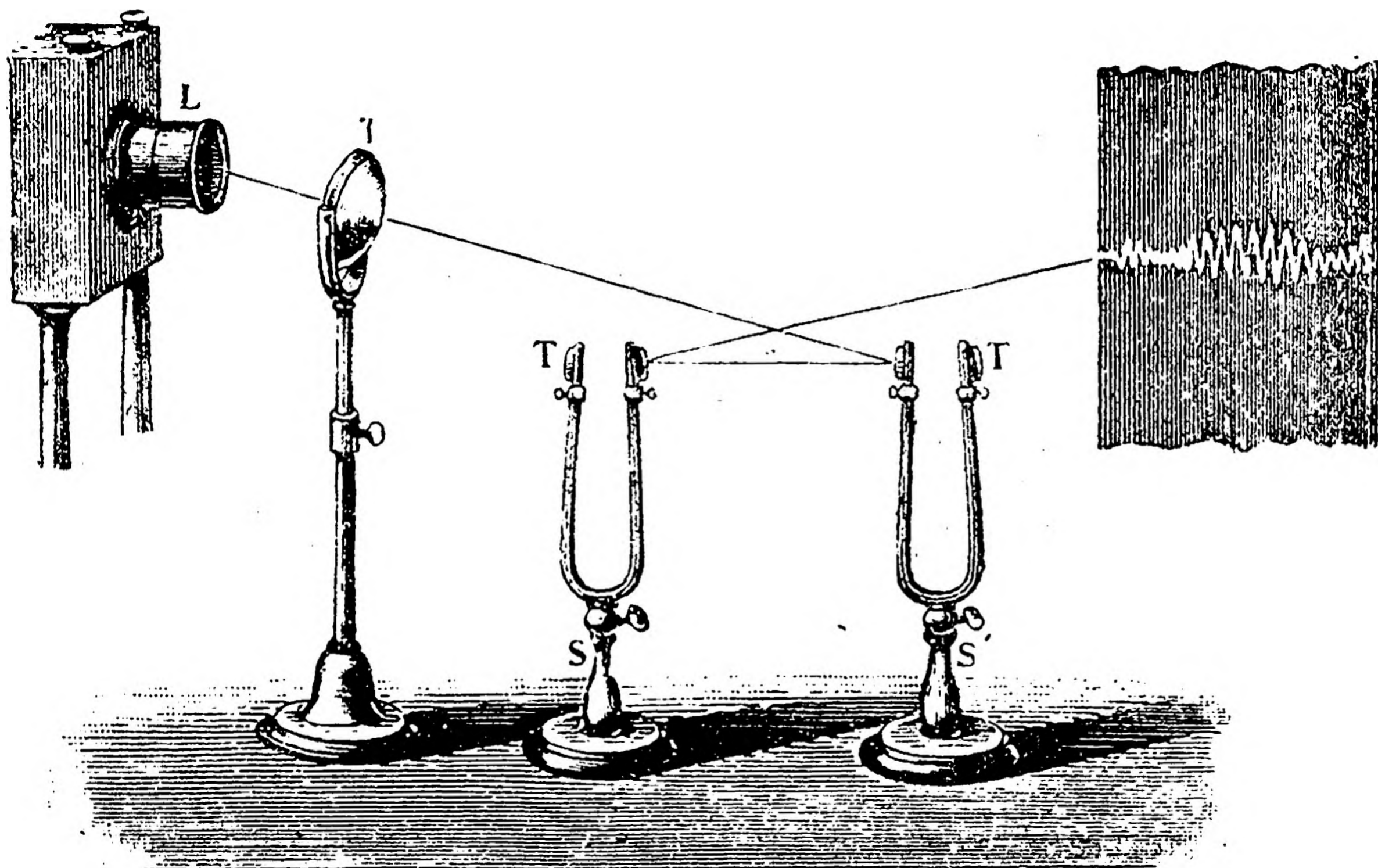
изображения пламени. Непрерывные места соответствуют периодам интерференции, когда обе системы волн взаимно уничтожают друг друга.

Вместо того, чтобы действовать обеими трубками на одно пламя, мы можем снабдить каждую трубку особым пламенем, при чем они будут находиться на одной вертикальной линии, так что одно пламя помещено как раз под другим. Приводя трубки в унисон и вращая зеркало, мы получаем ряд светлых изображений для каждого пламени; но при этом замечаем также, что изображения одного пламени приходятся в промежутках между изображениями другого. Следовательно, моментам угасания одного пламени соответствуют моменты появлений другого. Этот опыт доказывает, что когда две одинаково настроенные трубки находятся на таком близком расстоянии друг от друга, то их

колебания находятся в противоположных фазах. Отсюда следует, что обе системы колебаний взаимно уничтожают друг друга, так что на некотором расстоянии от трубок нельзя слышать основного тона каждой. По этой причине нехорошо в органах располагать плотно друг к другу трубки одинаково высокого тона.

§ 5. Придуманное Лиссажу оптическое изображение биений двух камертонов.

При биениях амплитуда колебаний воздуха периодически достигает то максимума, то минимума. При посредстве прекрасного опыта Лиссажу мы можем сделать это совершенно наглядным. Я ставлю большой камертон T' (фиг. 169) против электрической лампы L .



Фиг. 169.

Луч лампы, падающий на зеркало, находящееся на конце ножки камертона T' , принимается зеркалом другого камертона T , и отсюда отражается на экран, и вы видите на экране световое пятно. Я провожу смычком по камертону T' , при чем луч прыгает вверх и вниз и световое пятно удлиняется на экране в ленту в 1 метр длины. Теперь привожу в колебание камертон T ; колебания обоих камертонов могут или совпадать или противоречить друг другу, при этом световая лента или удлиняется, или укорачивается. Если они совпадают, то ленты удлиняются, если не совпадают, то звуки одного камертона будут частью или вполне нейтрализовать звуки другого. На этот раз случилось так, что колебания совпадают и усиливают друг друга, так что мы получили ленту длиной 150 см. Я настроил эти камертоны с возможной точностью одинаково, так что каждый из них производит 64 колебания в секунду. Поэтому отношение между их фазами остается постоянно одинаково,

и вы замечаете постепенное укорачивание ленты, которая наконец сокращается в первоначальное светлое пятно, стоящее неподвижно на экране.

Я прилепляю мелкую монету посредством воска к ножке одного из камертонов и через то уменьшаю скорость его вибрации; фазы их теперь не могут постоянно совпадать, один камертон постоянно опережает другой, вследствие чего фазы их постоянно то сходятся, то расходятся. В настоящий момент оба камертона друг друга усиливают, и мы имеем ленту в 150 см. длины. Затем она сокращается в круглое пятно, но только на мгновение, после чего снова удлиняется в ленту. Изменения эти происходят достаточно медленно; но я ускоряю их, прилепляя еще такую же монету к тому же камертону. Пятно теперь укорачивается и удлиняется ритмически; в моменты наибольшего удлинения колебания совпадают, в моменты наибольшего сокращения они прямо противоположны. Это явление, оптически наглядное, сообщается также воздуху комнаты; частицы его попеременно приходят то в колебание, то в покой, а поэтому-то мы слышим биения одновременно с изменениями световой фигуры на экране.



Фиг. 170.

Время, которое проходит между maximum'ом и maximum'ом и minimum'ом и minimum'ом, есть то, которое употребляет один камертон для того, чтобы сделать одним полным колебанием больше, чем другой камертон. Теперь это время равно двум секундам: в каждые две секунды происходит следовательно одно биение. Я увеличиваю диссонанс, увеличиваю груз; ритмические удлинения и сокращения пятна следуют теперь быстрее, так что теперь происходит шесть таких укорачивается и удлиняется ритмически; в моменты наибольшего удлинения, и теперь вы слышите три биения в секунду. Увеличивая груз, я могу увеличить число биений насколько мне угодно, так что наконец глаз будет не в состоянии за ними следить; отдельные биения не будут более слышны и производят на ухо впечатление хрипоты.

Во второй лекции в моих опытах с одним камертоном (фиг. 22) я заставлял падать луч, отбрасываемый камертоном, на зеркало и, вращая последнее, заставлял этот луч рисоваться на экране длинной волнообразной линией. Я тогда объяснял, что сила звука зависит от глубины волнообразных углублений. Поэтому, если амплитуда колебаний выражает силу звука, то в настоящем случае наша волнообразная линия должна состоять из дуг очень глубоких в одних местах и совершенно исчезающих в других. Это действительно и бывает. Я качаю зеркало камертона *C* на небольшой угол, и вы видите волнообразную линию, состоящую из уширений и утонений, как она изображена на

фиг. 170, при чем уширения соответствуют периодам совпадений, а утонения периодам интерференций¹⁾. Этим мы достаточно разъяснили, каким образом два вибрирующие тела, из которых каждое производит музыкальный звук, могут, действуя друг на друга, уничтожить звук. Отсюда следует, что если два вибрирующие тела нейтрализуют таким образом друг друга, то мы можем снова сделать слышным звук одного, остановив вибрации другого. Весьма часто случается, что когда два камертона в унисоне находятся на одном и том же резонансовом ящике и звучат, то прекращение вибраций одного камертона усиливает звук другого. Я могу это объяснить еще подробнее с помощью употреблявшегося нами в четвертой лекции колокола (фиг. 76). Когда я приближаю его резонансовую трубку к одной из узловых линий колокола, то вы слышите звук; но звук этот далеко не столь силен, как когда я приближаю ту же трубку к одной из пучностей. Причина этому та, что колебания колокола по обеим сторонам узловой линии направлены в противоположные стороны и потому интерферируют друг с другом. Помещая стеклянную пластинку между колоколом и трубкой, я задерживаю колебания по одну сторону узловой линии, вследствие чего звук немедленно усиливается.

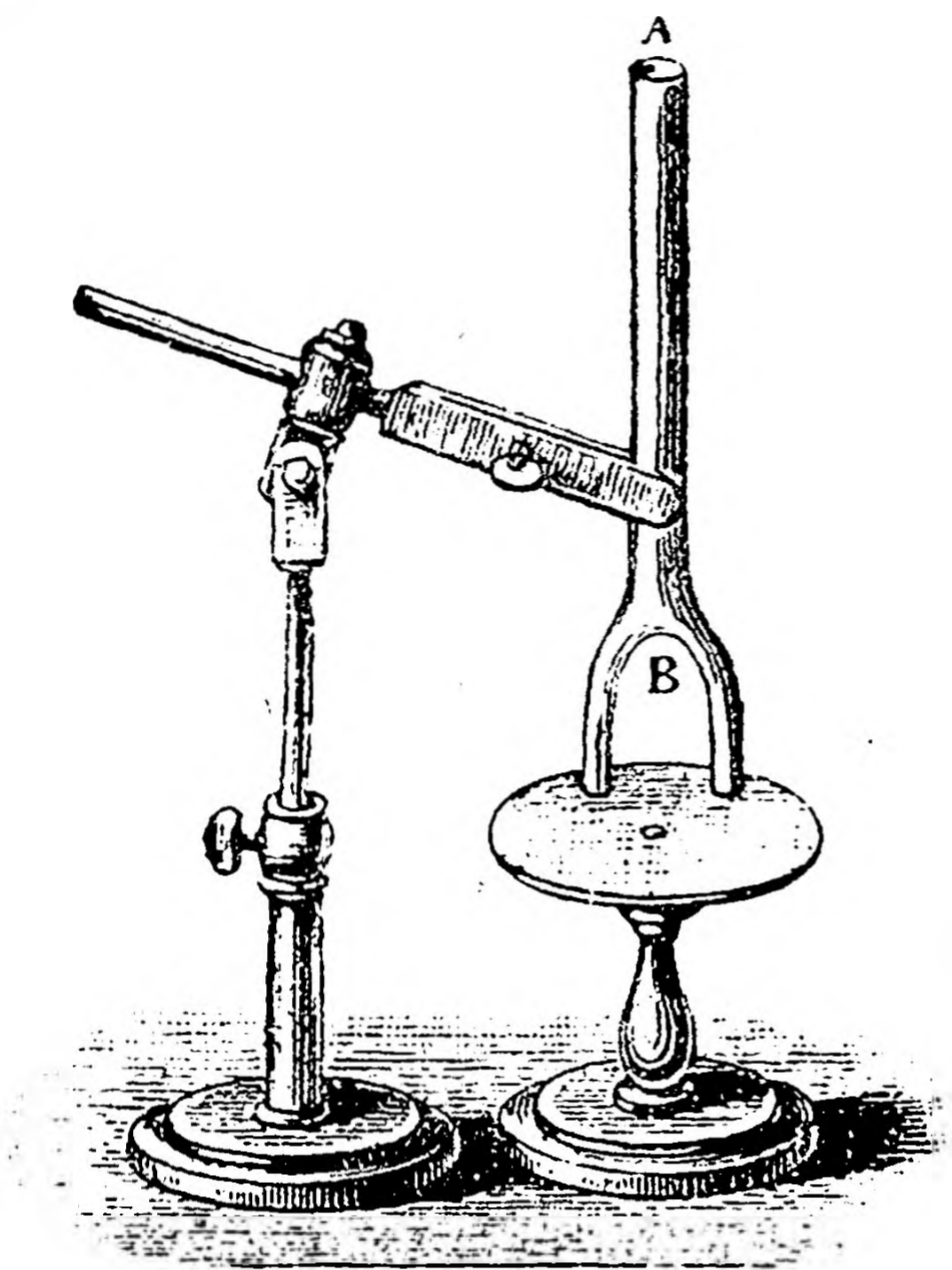
§ 6. Интерференция волн вибрирующего диска. Опыт Гопкинса и Лиссажу.

В вибрирующем кружке в каждом из двух смежных секторов колебания идут по двум противоположным направлениям. Когда один поднимается, то другой опускается, а узловая линия показывает границу между ними. В то время, как один из секторов вызывает сгущение воздуха, над ним находящегося, другой вызывает его разрежение. Следствием этого бывает частное уничтожение или интерференция одного звука сектором другого. Я опишу аппарат, посредством которого Вильям Гопкинс наглядно показал принцип интерференции. Трубка *AB* (фиг. 171) делится в *B* на две части; отверстие *A* затянуто перепонкой. Если насыпать песок на перепонку и держать другой раздвоенный конец трубки над двумя смежными секторами вибрирующего кружка, то в перепонке почти незаметно никакого движения, и песок остается неподвижным. Тут волны обоих секторов друг друга нейтрализуют, так как они производятся двумя противоположными колебаниями. Если же поместить трубку таким образом, чтобы концы ее приходились над двумя несмежными секторами, но разделенными третьим, то песок сбрасывается с перепонки, чем доказывается, что в этом случае является совпадение колебаний в обоих секторах.

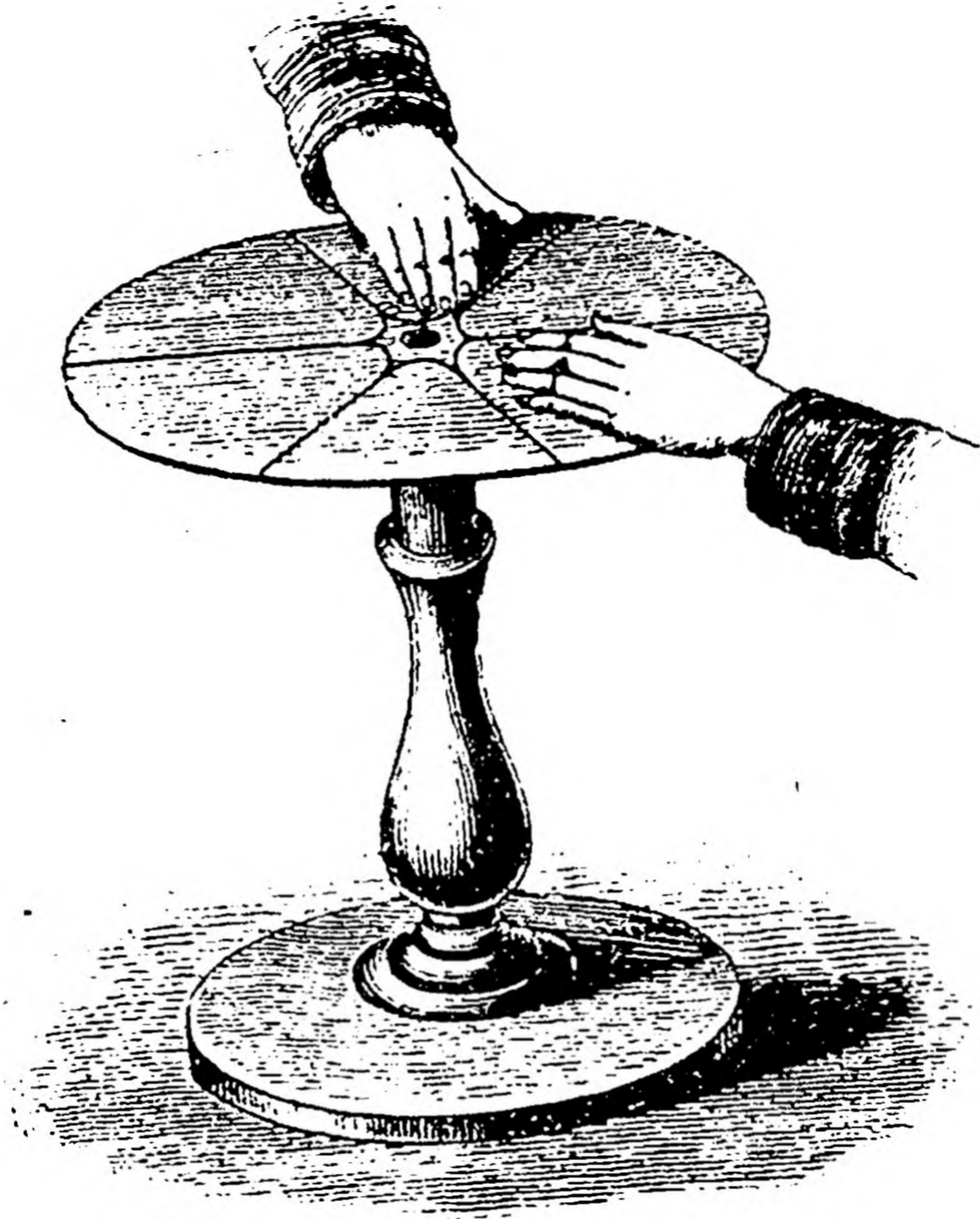
Мы теперь приготовились к весьма поучительному опыту, которым мы обязаны Лиссажу. Проводя смычком по краю медного кружка, я делю этот кружок на шесть вибрирующих секторов. Касаясь рукой

¹⁾ Эта фигура дает нам только слабое представление о самом явлении. Линия света была в 5 см. шириною, а глубина дуг колебалась между 1 метром и 0.

одного из них, я уничтожаю его вибрации, и звук усиливается. Помещая обе руки на два смежные сектора, я не замечаю усиления звука; но, помещая их через сектор, как в фиг. 172, я замечаю ясное усиление звука. Простым поднятием и приближением моих рук я могу производить эти изменения в силе звука. Сближая руки, я уничтожаю колебания двух секторов; они перестают интерферировать направо и налево, вследствие чего звук остальных секторов усиливается. Точно также, когда я двигаю руку на поверхности кружка вправо и влево, то замечаю



Фиг. 171.



Фиг. 172.

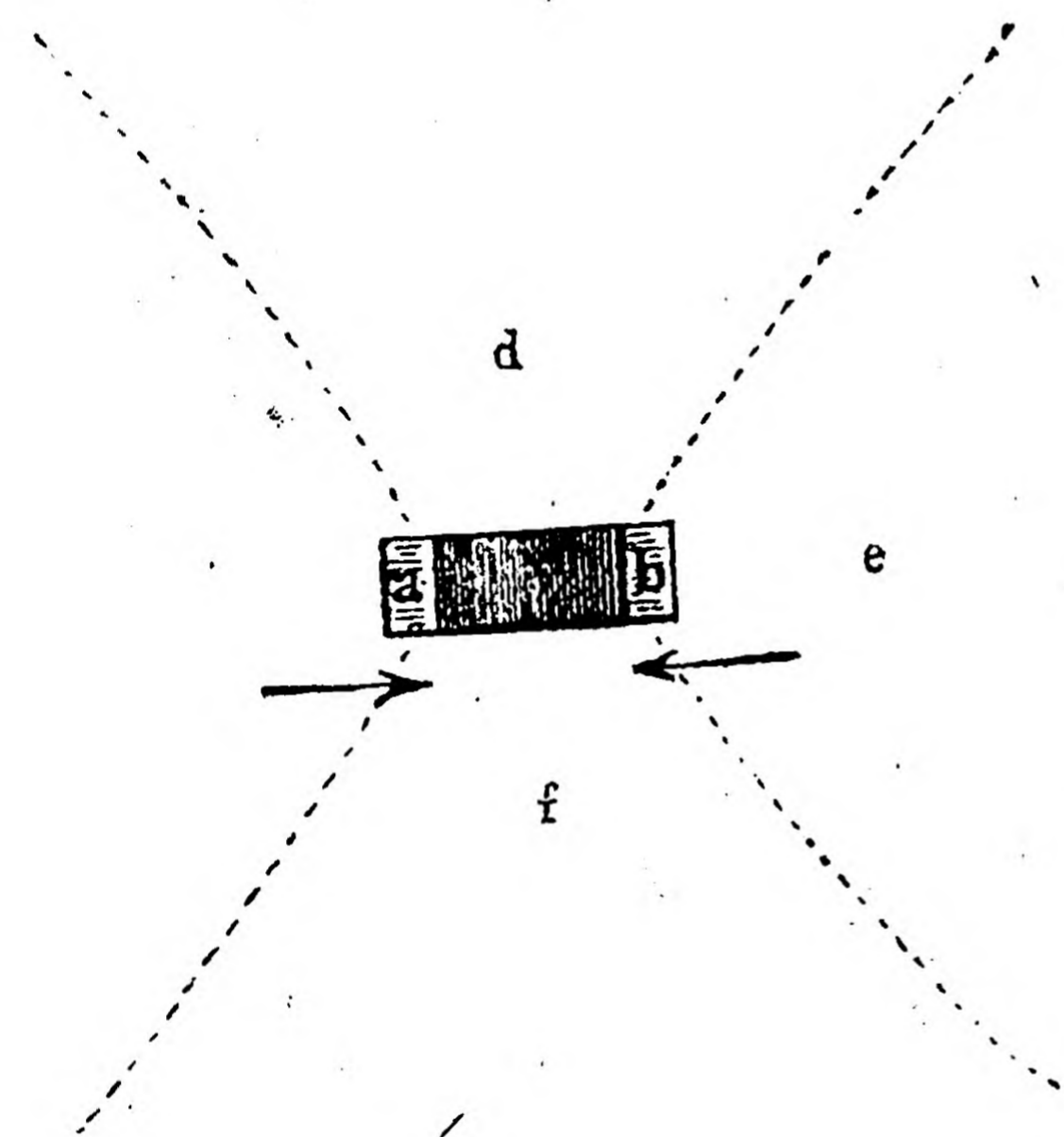
усиление и ослабление звука. Звук усиливается, когда моя рука находится над одним из вибрирующих секторов; он ослабевает, когда она доходит до узловой линии. Итак, жертвуя одной частью колебаний, мы усиливаем действие остальных. Подобные опыты возможны со светом и лучистой теплотой; если из двух интерферирующих лучей закрыть один, то в том месте, где была темнота, появляется свет, а если из двух интерферирующих темных тепловых лучей устранить один, то появляется теплота там, где был холод.

§ 7. Погашение звука одной ножки камертона звуком другой.

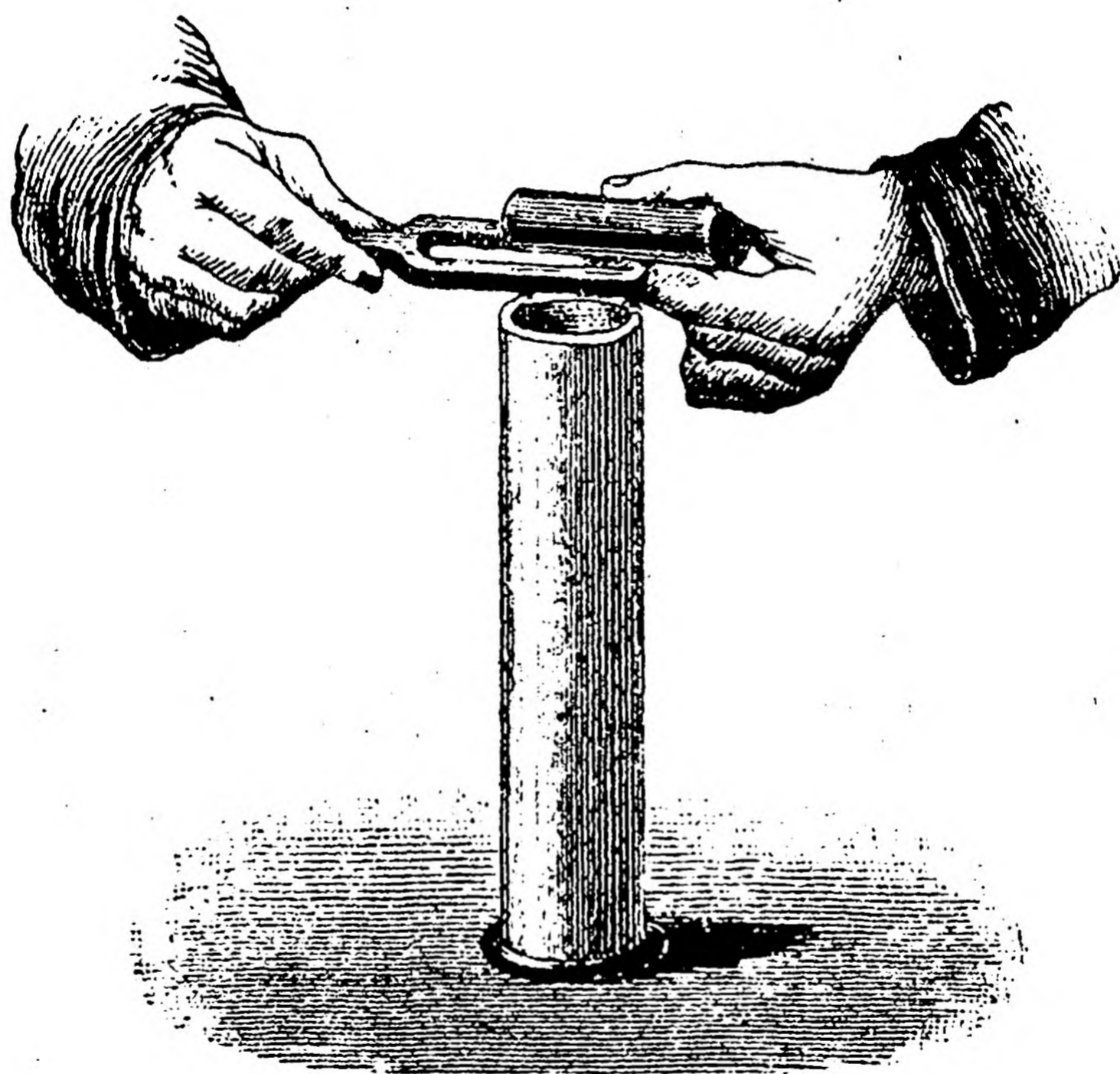
Вы, вероятно, замечали, что звук камертона бывает очень слаб, если его держать в руке. Эта слабость звука зависит также значительною частью от интерференции. Обе ножки вибрируют по двум противоположным направлениям. Одна производит сгущение там, где в то же время другая вызывает разрежение, следствием чего является уничтожение звука. Помещая картонную трубку над одной из ножек и уединяя таким образом часть ее колебаний, я уже заставляю усиливаться звук. Таким образом одна ножка оказывается гораздо действительнее двух. Есть положения, в которых звук одной ножки будет совершенно

уничтожаться звуком другой. Найти эти положения весьма легко, если ударить камертон и затем вращать его возле уха. Пока спинка одной из ножек помещается параллельно уху или бока обеих ножек точно также параллельны уху, до тех пор слышится звук. Но звук почти совершенно уничтожается, когда ребро одной из ножек обращено к уху. Во время полного оборота камертона мы найдем четыре положения, при которых звук уничтожается. Пусть *a* и *b* (фиг. 173) представляют две ножки камертона, если на него смотреть сверху. Когда ухо находится в положении *e* или *c*, *d* или *f*, то звук слышен; но в местах *a* и *b* четырех пунктирных линий звуки уничтожаются. Вебер доказал, что эти линии суть гиперболы, и таковы они должны быть действительно для того, чтобы отвечать принципу интерференции.

Этот замечательный случай интерференции, в первый раз наблюдаемый Томасом Юнгом и точно исследованный братьями Вебер, я покажу сейчас на опыте. Передо мною сосуд созвучный с камертоном. Держа над ним камертон, я медленно поворачиваю его. При четырех положениях вы слышите звук, при четырех других совершенную ти-



Фиг. 173.

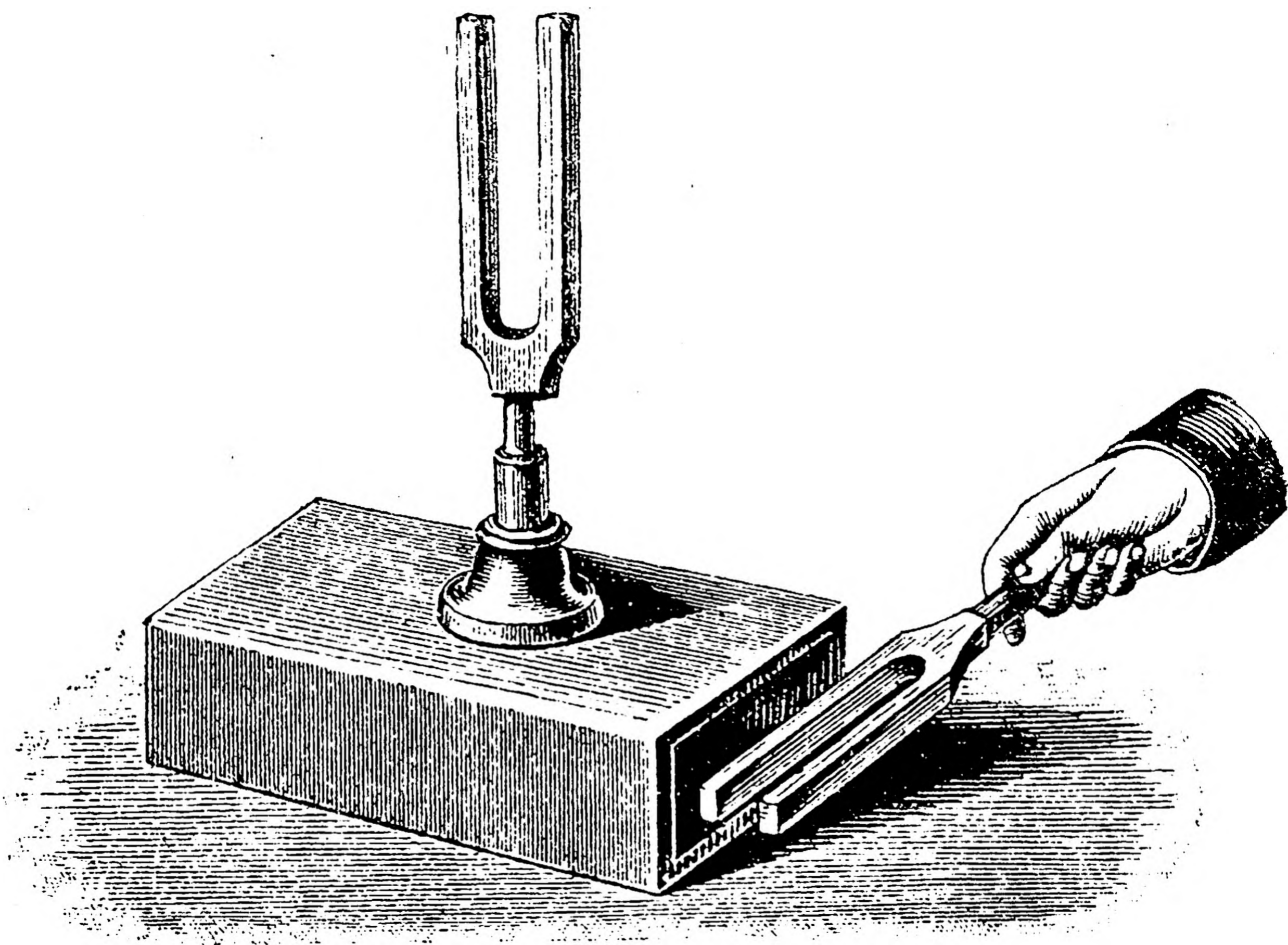


Фиг. 174.

шину, между тем как поворот камертона сопровождается постепенным усилением и ослаблением звука. Я держу камертон над сосудом таким образом, что звук совершенно пропадает. Затем на одну из ножек его надвигаю картонную трубку, как показывает фиг. 174. Немедленно слышится сильный резонанс, показывающий, что колебания одной из ножек были устранены. Чтобы опыт удался, нужно держать камертоны ребром вниз над серединою отверстия сосуда, так, чтобы воздух располагался симметрично по обеим сторонам их. Если двигать камертон от середины к одной из сторон, не изменяя его наклона, то слышится сильный звук. Но интерференция также возможна и вблизи одной из сторон сосуда. Если держать камертон не ребром вниз, но так, чтобы обе ножки находились в одной горизонтальной плоскости, то можно найти вблизи края сосуда такое место, где пропадает всякий звук.

Двигая камертон от одного края к другому над отверстием сосуда, можно найти два таких положения.

Множество различных опытов может быть придумано для иллюстрации явления интерференции. Легко найти, например, сосуд, резонирующий с вибрирующим кружком. Я помещаю такой сосуд на одно из отделений вибрирующего кружка и получаю сильный резонанс; помещаю его на узловую линию, и звук пропадает. Я помещаю кусок картона между сосудом и кружком таким образом, чтобы уничтожить колебания по одну сторону узловой линии, и сосуд немедленно звучит. Далее, если два камертона, вибрирующие с одинаковою скоростью, дер-



Фиг. 175.

жать над двумя резонансовыми сосудами, то они звучат в унисон. Если же прилепить воск к одному из камертонов, то немедленно слышатся биения. Снимаем воск, и снова восстанавливается унисон. Я помещаю один из камертонов в пламя спиртовой лампы; вследствие изменения температуры изменяется его упругость, и вы слышите снова сильные биения с его ненагретым соседом¹⁾. Я ставлю один камертон на резонансовый ящик и заставляю его звучать, а другой тоже звучащий подношу к отверстию резонансового ящика, как показано в фиг. 175. Появляются громкие биения, указывающие на отсутствие унисона. Я разделяю сосуд вертикальной стенкой и держу один камертон над одной половиной, другой—на другой. Оба полуцилиндра воздуха, интерферируя, вызывают биения. Я вынимаю перегородку, но биения

¹⁾ В своих поразительных опытах Шейблер нашел в биениях тона пробный камень для бесконечно малых изменений температуры.

остаются попережнему сильными, так как одна половина воздуха продолжает интерферировать с другой ¹⁾).

Перемежающиеся звуки некоторых колоколов, которые становятся явственнее при ослаблении их звука, суть также следствие интерференции; вследствие недостаточной симметрии колокола вибрируют скорее в одном направлении, чем в другом, и биения суть следствия встречи двух колебаний, имеющих две различные скорости.

§ 8. Беззвучные зоны генерала Дуана.

Для меня составляет особенное удовольствие привести здесь описание некоторых наблюдений генерала Дуана над туманными сигналами на побережьях Мена в Соединенных Штатах. На побережьях Мена, говорит генерал, находится шесть паровых туманных свистков. Часто они бывают слышны на расстоянии 30 кил., но и так же часто они не бывают слышны на расстоянии 3 кил., и это в то время, когда не оказывается никакой заметной разницы в состоянии атмосферы. Это вполне согласуется с наблюдениями в Соус Фореленде.

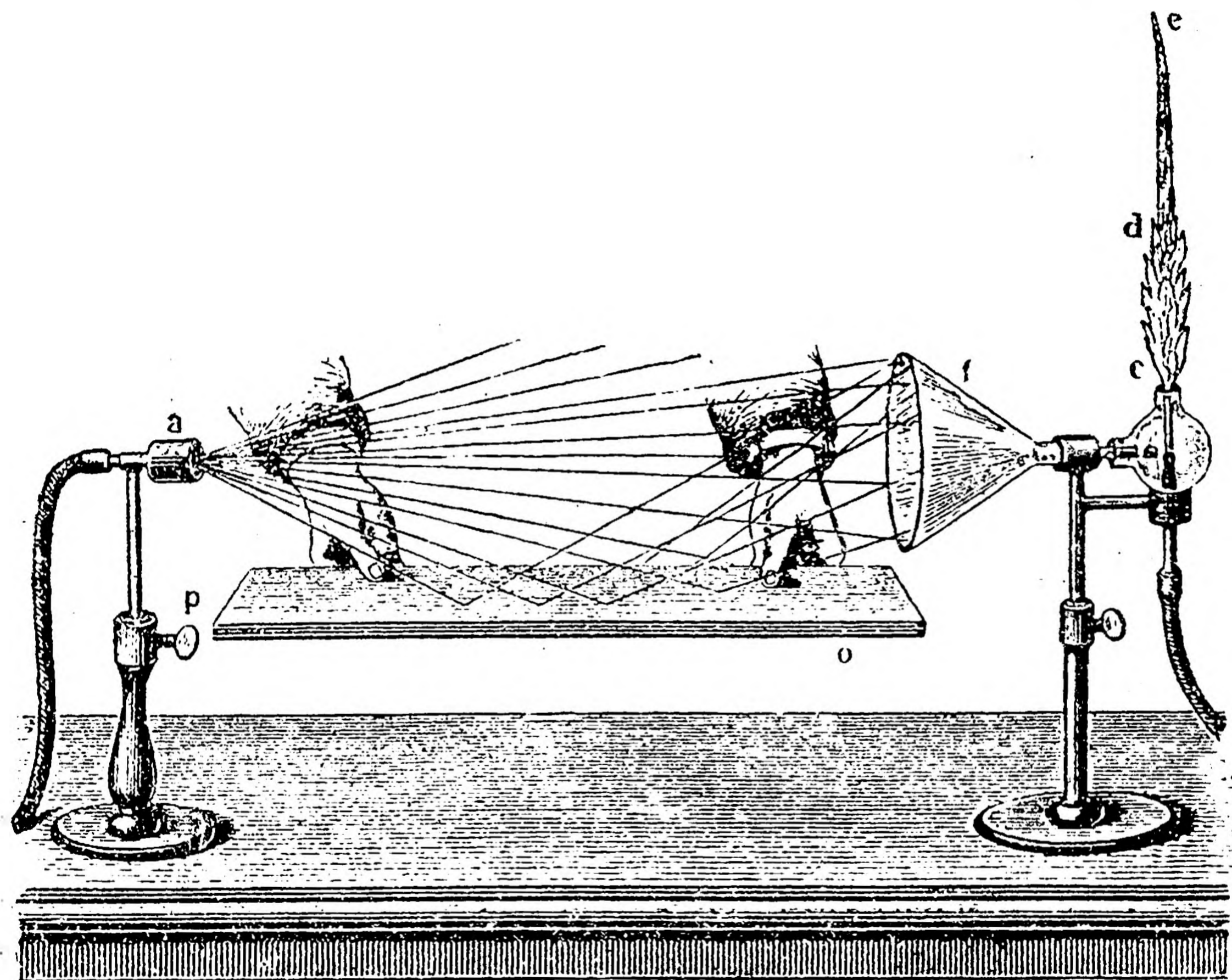
«Сигнал,—продолжает генерал Дуан,—часто слышен на большом расстоянии в одном направлении, между тем как в другом направлении он едва слышен на расстоянии мили. И это происходит не от влияния ветра, так как сигнал часто слышится гораздо дальше против ветра, чем по ветру. Например, свисток на мысе Елизабет всегда может быть слышен явственно в Портланде на расстоянии 15 кил. во время северо-восточного снежного шторма, когда ветер дует прямо от Портланда к свистку». И это также строго согласуется с наблюдениями в Соус Фореленде.

Затем генерал Дуан приводит факт особенно интересный и важный. «Самое сложное затруднение,—говорит он,—представляет факт, что сигнал часто представляется окруженным со всех сторон зоной с радиусом от 1½ до 2 килом. и в этой зоне звук, кажется, совершенно отсутствует. Так, при удалении от станции по прямому направлению звук бывает слышен на расстоянии мили, затем теряется почти на таком же расстоянии, а после этого снова слышится явственно долгое время. Это явление свойственно всем слуховым сигналам и было наблюдаемо на всех станциях, из которых на одной сигнал находился на голой скале в 30 километрах от материка и вокруг нее не было никаких предметов, которые могли бы действовать на звук».

Генерал Дуан, насколько мне известно, единственный наблюдатель, заметивший это любопытное явление, и та тщательность, с какою он обследовал это явление, доказывает его проницательность и искусство, как наблюдателя. Он не представил никакого объяснения этому явлению, но мы теперь, как мне кажется, в состоянии дать такое объяснение.

¹⁾ Уитстон и сэр Джон Гершель, сколько мне известно, произвели этот опыт независимо друг от друга.

Я давно думал, что эти беззвучные зоны образуются вследствие интерференции прямых волн, идущих от сигнала, с волнами, отраженными от поверхности моря. Наше неоценимое чувствительное пламя дает нам возможность проверить эту теорию. Прежде всего посмотрите, как отражение усиливает действие звука на пламя. Поместивши звучащий язычок в *a* (фиг. 176), а пламя в *c*, мы регулируем давление таким образом, чтобы пламя горело спокойно, но было близко к точке мигания и волнения. Между *a* и *c* я ввожу гладкую деревянную доску *po*. От соединения волн, отраженных от доски, к прямым волнам пламя сильно волнуется (на фигуре спокойное пламя представлено вместе с волнующимся). Когда мы удалим доску, то пламя станет спокойным, а поднесение ее всегда сопровождается миганием и волнением.

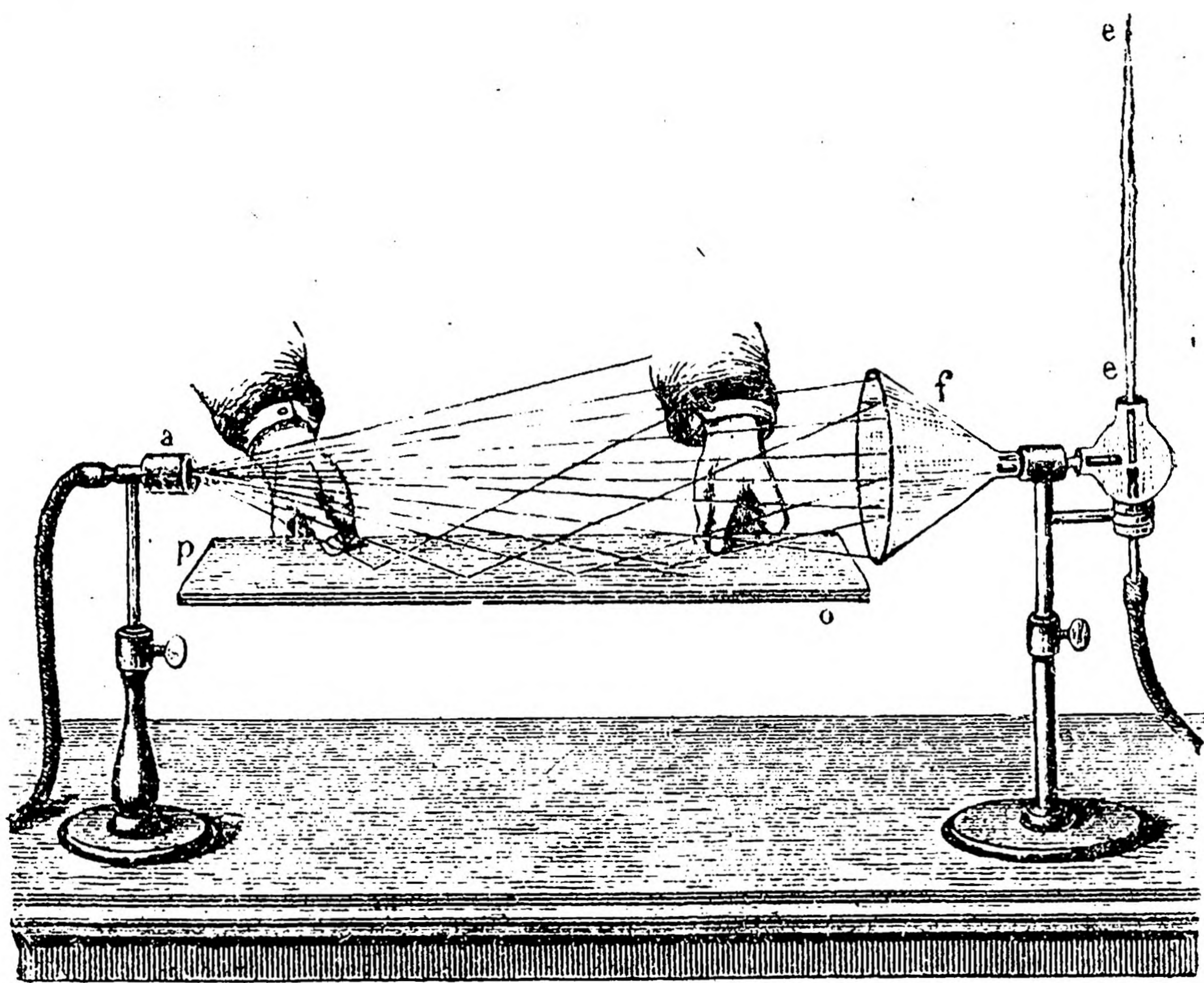


Фиг. 176.

В то время, когда пламя волнуется, я кладу на доску кусок грубой шерстяной материи. Вследствие этого отражение ослабевает до такой степени, что пламя успокаивается. Удаление куска сразу вызывает волнение.

Здесь прямые и отраженные волны усиливают друг друга. Но легко видеть, что доска может быть помещена таким образом, чтобы отраженные волны проходили большее расстояние и отставали от прямых волн на половину длины волны. Если это случится, то можно уже сказать а priori, что прямые и отраженные волны будут взаимно уничтожать друг друга. Опытное подтверждение этого требует большой тщательности; но если производить опыт надлежащим образом, то он всегда удастся. Прежде всего нужно регулировать давление таким образом, чтобы в то время, когда язычок *a* (фиг. 177) звучит, пламя мигало и колебалось. Затем я осторожно поднимаю гладкую деревянную доску между язычком и пламенем; на известной высоте волнение пла-

мени усиливается. Но когда доска поднимается еще выше, пламя с совершенно успокаивается. Таким образом, соединяя отраженные волны с надлежащим отставанием с прямыми волнами, мы заметно ослабляем звук. Вместо нашего язычка вообразим себе туманный свисток на берегу Мена, а вместо нашего пламени—наблюдателя на палубе корабля, а вместо нашей доски—гладкое море. На таком расстоянии от берега, на котором отраженные волны отставали бы от прямых на



Фиг. 177.

половину длины волны, существуют точно такие же условия, как в сейчас произведенном опыте. Таким образом соединение прямых волн с отраженными произвело бы беззвучную зону генерала Дуана.

Комбинационные тоны.

Мы должны теперь от интерференции звука перейти к рассмотрению нового рода музыкальных звуков, причиной которых долгое время считали так называемые биения. Звуки эти требуют для своего образования соединения двух одновременных различных музыкальных звуков. Там, где при надлежащих условиях происходит такое соединение, образуются эти производные звуки, которые совершенно отличны от первичных звуков, их производящих. Их открыл немецкий органист Зорге в 1745 г., но это открытие тогда обратило на себя очень мало внимания. В 1754 г. их открыл самостоятельно известный итальянский скрипач Тартини, вследствие чего они были названы тартиниевыми тонами.

Для их образования оба первичные звука должны быть по возможности интенсивны. Гельмгольц предпочитает сирену всякому дру-

тому инструменту для их производства. И действительно, с помощью сирены их произвести весьма легко. Первоначально требуется некоторое внимание со стороны слушателя для того, чтобы заметить этот комбинационный звук в общей массе других; но с некоторым навыком этого легко достичь, и если это не удастся с первого раза непривычному уху, то во всяком случае характер звука весьма явственно изменяется через присоединение к нему такого производного звука. Передо мною сирена Дове; я привожу ее во вращение и открываю разом два ряда отверстий; при самом напряженном внимании я не могу пока уловить никаких следов производного тона. Заставляю вертеться сирену сильнее и вот слышу в первый раз легкий глухой звук, присоединяющийся к двум основным звукам. Еще усиливаю вращение, и низкий комбинационный звук усиливается так, что все стоящие близко слышат его совершенно отчетливо. Два ряда открытых отверстий имеют один 8, другой 12 их. Производный звук в настоящем случае на одну октаву ниже низшего из двух составляющих звуков. Я открываю теперь два другие ряда отверстий в 12 и 16. Тут производный комбинационный звук слышен совершенно явственно и число его колебаний ($16 - 12 = 4$) равняется следовательно $\frac{1}{3}$ числа колебаний низшего из составляющих тонов. Во всех этих случаях составной тон соответствует числу колебаний, равному разности чисел колебаний составляющих тонов ($12 - 8 = 4$; $16 - 12 = 4$).

Говоря о производном комбинационном тоне, я разумею при этом тот, который действительно слышится; но он не единственный образующийся здесь: посредством более тонких способов можно доказать присутствие в то же время и других производных тонов. Те, на которые мы теперь обратили внимание, суть, однако, самые важные вследствие своей силы. Гельмгольц назвал их тонами разности (разностными тонами, *Differenztöne*), в силу указанного выше закона.

Для того, чтобы сделать слышными эти производные тоны, как мы сказали, нужно, чтобы составляющие тоны имели достаточную силу; если они слабы, то опыт не удастся. Я не знаю лучшего способа для их производства, как поющие пламена. Передо мной две обыкновенные газовые горелки, на которые я наставляю две стеклянные трубки с бумажными подвижными надставками. Оба пламени, раз их заставили петь, уже сами собою и без всякого мышечного усилия со стороны наблюдателя дают теперь сильные звуки. Длина короткой трубки равняется теперь 26 см., другой $28\frac{1}{2}$ см. Я прислушиваюсь, и действительно слышу низкий производный звук. Причина, по которой он так низок, очевидна: обе трубки приблизительно одной длины, разность между числом колебаний незначительна, и звук, происходящий от этой разности, поэтому низок. Но вот я удлиняю одну из трубок посредством ее подвижной надставки; производный звук постепенно повышается и достигает большой силы. Я опускаю надставку, и он снова понижается. Двигая таким образом надставку, я заставляю повышаться и понижаться комбинационный производный звук согласно закону, по ко-

торому число его колебаний равняется разности чисел колебаний звуков, его образующих.

Мы можем легко определить число колебаний, соответствующее любому производному звуку. Звук пламени есть звук окружающей его трубки, и мы знаем, что длина такой трубки равняется полуwave звука, который она производит. Длина волны звука в нашей трубке в 26 см. равняется следовательно 52 см. Скорость звука в воздухе при температуре настоящей комнаты есть 340 м. в секунду. Разделяя 34000 на 52, найдем число колебаний, соответствующее трубке в 26 см. равным 654 в секунду.

Но не следует забывать, что воздух, в котором происходят эти колебания, на самом деле гораздо более упруг, чем воздух этой комнаты. Пламя нагревает воздух, заключающийся в трубке, и потому колебания в ней должны совершаться быстрее, чем в обыкновенной органной трубке такой же длины. Чтобы определить с точностью число совершающихся здесь колебаний, мы должны прибегнуть к сирене. С помощью ее нахожу для трубки длиной в 26 см. 723 колебания в секунду. Разность в 69 колебаний есть следствие нагревания воздушного столба в трубке. Кроме того пламя, сгорая, образует углекислоту и водяные пары, и присутствие этих продуктов горения должно также иметь влияние на скорость вибраций.

Определяя таким же образом число колебаний для трубки в $28\frac{1}{2}$ см. длины, найдем 673 колебаний в секунду. Разность между этим числом 723 есть 50; это и есть число колебаний, которое соответствует первому низкому комбинационному тону.

Но это число еще не соответствует пределу слышимости. Оставляя трубку в $28\frac{1}{2}$ см. без изменения, я удлиняю другую до тех пор, пока производный звук будет близок к пределу слышимости. Когда короткая трубка равняется $27\frac{1}{2}$ см., я слышу производный звук ясно. Я нахожу, что число колебаний в этой последней трубке равно 706. Число колебаний $28\frac{1}{2}$ см. найдено нами выше равным 673; $706 - 673$ равно 33, это и есть число колебаний, соответствующее производному звуку, который я мог слышать при напряженном внимании. Мы теперь близки к пределу, который Гельмгольц определил для музыкальной слышимости. Я беру трубку в $43\frac{1}{2}$ см. и заставляю ее звучать вместе с другой в 26 см.; происходит производный звук значительно более высокий. Точное число колебаний длинной трубки есть 465; 26 -сантиметровой—723; $723 - 465 = 258$. Это и есть число колебаний, соответствующее производному звуку. Этот звук почти одинаков с звуком одного из наших камертонов, дающего 256 колебаний в секунду.

Остановимся на минуту и посмотрим, к чему приводит нас этот результат. Вот камертон, о котором идет речь. Он утвержден на своем резонансовом ящике. Я провожу по нем смычком очень слабо, так, чтобы первичный звук его был едва слышен; но к нему скоро присоединяется звук производного тона, и я слышу биения, происходящие от их соединения. Прикрепляя груз к камертону или выдвигая надставку над трубкой, я могу изменить скорость этих биений, точно так же, как

я это делал для сравнения между собою двух первичных тонов. Легкое изменение в величине пламени дает тот же результат. Нельзя не заметить, как прекрасно гармонируют между собою эти результаты.

Когда я стою между сиреной и поющим пламенем и постепенно возвышаю звук сирены, то вскоре слышится производный звук и достигает иногда значительной силы. Если вблизи пламени звучит закрытая органная трубка, то также слышится производный звук; и при этом кажется, что он происходит в самом ухе или даже в мозгу. Если вытягивать затычку, закрывающую трубку, то высота комбинационного тона изменяется согласно с указанным законом.

Производные звуки, образующиеся при соединении обыкновенных гармонических интервалов ¹⁾, представлены в следующей таблице.

Интервалы.	Отношение числа и колебаний.	Раз- ность.	Производный тон ниже нижнего из составляющих тонов на
Октава	1 : 2	1	0
Квинта	2 : 3	1	1 октаву
Кварта	3 : 4	1	1 двенадцатую
Большая терция . .	4 : 5	1	2 октавы
Малая терция . . .	5 : 6	1	2 октавы и большую терцию
Большая секста . .	3 : 5	2	1 квинту
Малая секста . . .	5 : 8	3	большую сексту.

Знаменитый Томас Юнг полагал, что производные звуки обязаны своим происхождением сочетанию быстрых биений, которые сливаются между собою так же, как и периодические импульсы обыкновенных музыкальных тонов. Это объяснение согласовалось с тем фактом, что число биений, как и число колебаний производного тона, равно разности двух систем колебаний, образующих биения. Это объяснение, однако, недостаточно: биения действуют на слух сильнее, чем всякий другой звук. Их можно ясно слышать даже в том случае, когда оба тона, их образующие, не слышны более. Это зависит частью от свойства нашего уха, частью от того, что когда два звука одинаковой силы производят биения, то амплитуда колебаний воздушных частиц то уничтожается, то удваивается. Удваивая же амплитуду, мы учетверяем силу звука; поэтому если два звука одинаковой силы образуют биения, то звук колеблется непрерывно между беззвучием и звуком, сила которого вчетверо больше силы каждого из интерферирующих тонов.

Если бы производные звуки происходили от биений первичных тонов, то они точно так же должны были бы быть слышны и при слабости этих тонов; но они при этом не слышны. Это обстоятельство заставило Гельмгольца переисследовать этот вопрос. Когда несколько звуков проходят по одной и той же массе воздуха, то каждый отдельный из этих звуков проходит, не смешиваясь с другими, как если бы

¹⁾ Предмет, о котором мы будем говорить в следующей лекции.

он был один, и между смешанными тонами каждый отдельный звук смеси сохраняет свою индивидуальность. Это бывает, однако, только в том случае, когда амплитуда колебаний отдельных частиц бесконечно мала. Математик приходит к этому заключению простым рассуждением. Но закон этот справедлив и на практике, если движение частиц крайне мало; но он перестает быть справедливым, как только движение перешло известный предел. Вибрации, образующие значительное движение воздуха, производят еще вторичные волны, которые достигают уха в качестве производных тонов. Доказав это, Гельмгольц предположил далее, что и сумма первичных тонов, точно так же, как и их разность, может давать производные тоны. Таким образом он открыл эти тоны суммы (суммационные тоны, Summationstöne) прежде, чем он их слышал. Поверяя это предположение опытом, он убедился, что такие тоны действительно существуют. Их нельзя объяснить теорией Юнга, но они объясняются теорией Гельмгольца.

Другое следствие этого отклонения от закона раздельности звуков заключается в том, что даже единичный тон, приводящий воздух в сотрясение, выходящее за предел закона совместного и самостоятельного существования многих волн, образует точно так же вторичные волны, соответствующие гармоническим тонам звучащего тела. Так, напр., число колебаний первого верхнего тона камертона, которым мы занимались в четвертой лекции, в шесть раз более его основного тона. Но Гельмгольц показал, что камертон, который приводится в сотрясение не смычком, а ударом, дает ясно октаву своего основного тона, октаву, образуемую вторичными волнами, когда предел указанного закона перейден.

Эти факты показывают вам, что соединение музыкальных звуков представляет в динамическом смысле более сложное явление, чем мы это до сих пор предполагали. В звуках оркестра мы имеем дело поэтому не только с основными тонами каждого инструмента, но и с верхними тонами каждого, которые доходят иногда до шестнадцатого тона соответствующего ряда. Кроме того мы имеем дело с комбинационными тонами как суммы, так и разности. Все они проходят по той же массе воздуха и все ударяют в ту же барабанную перепонку. Кроме того мы имеем интерферирующие основные тоны, интерферирующие верхние тоны и производные тоны, и кроме того члены каждого из трех названных родов тонов, интерферирующие между собою. Воображение не в силах представить себе физическое состояние той массы воздуха, по которой проходят эти звуки. И как мы увидим в следующей лекции, цель музыки в течение всех столетий, в продолжение которых она услаждала человечество, состояла в том, чтобы эмпирическим путем устранить ухо от тех неприятных впечатлений, которые может производить подобная смесь. Занятые этой работой, музыканты ничего не знали о физических началах, лежавших в основании их задачи, точно так же, как изобретатели пороха ничего не знали об атомных весах. Они пробовали и пробовали, пока не достигали удовлетворительного результата, и только теперь, когда наука овладела этим предметом, из

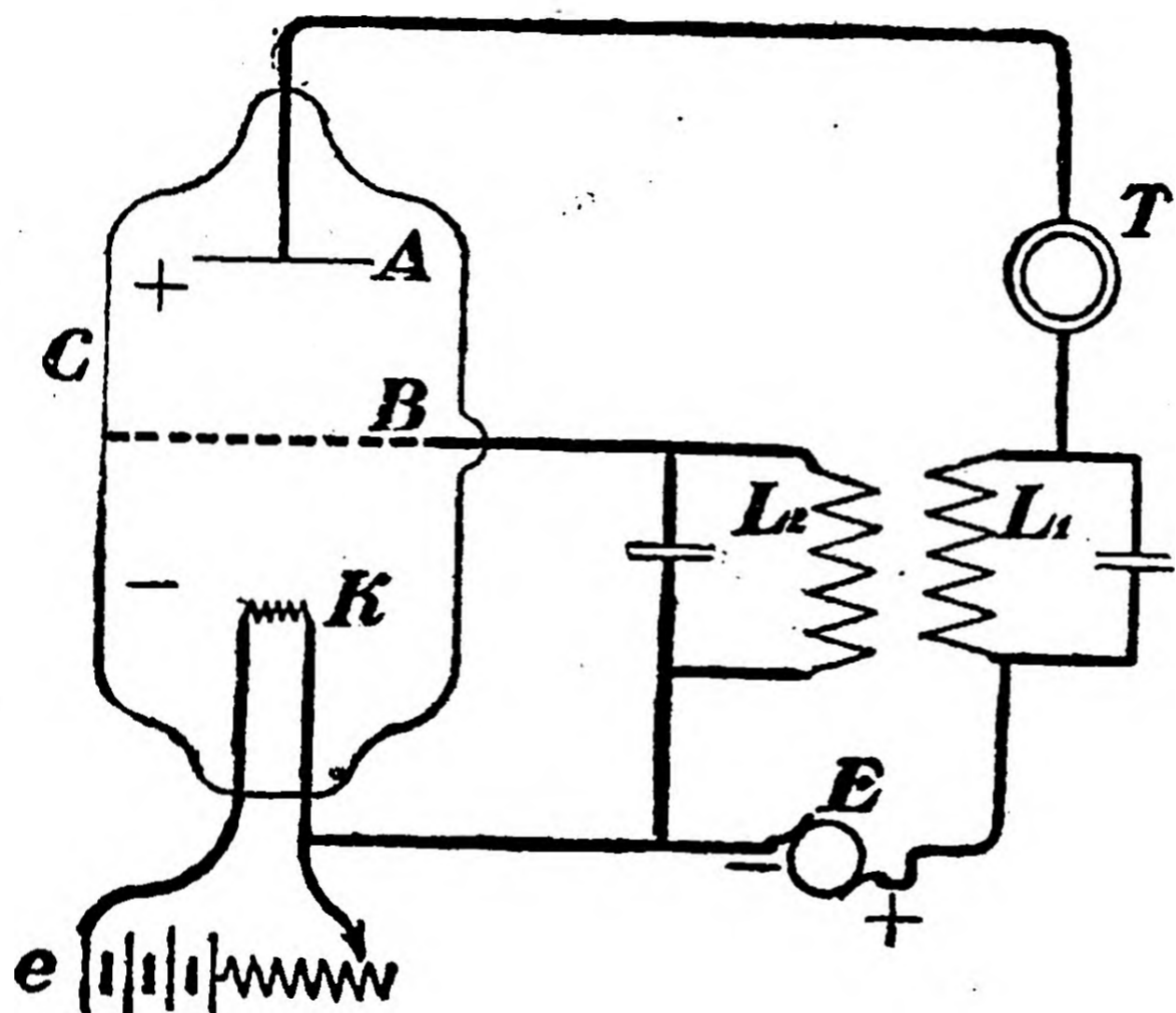
хаоса, здесь царствующего, воздвигается порядок и оказывается, что результаты эмпиризма согласовались с законами природы ¹⁾).

ОБЗОР ВОСЬМОЙ ЛЕКЦИИ.

Когда несколько систем волн, берущих начало в различных точках, распространяются по воде или воздуху, то движение каждой частицы есть алгебраическая сумма различных движений, ей сообщенных.

Когда в воде вершины волн одной системы совпадают с вершинами другой, то получаются более высокие волны; но если вершины

¹⁾ Идеальным вибратором является электрический ток. Тогда как колебания материальных тел всегда оказываются сложными, электрические колебания происходят лишь со строго определенным периодом, задаваемым свойствами электрической цепи, ее емкостью и самоиндукцией, которые можно опять-таки по произволу регулировать. Таким свойством электрических колебаний пользуются для получения вполне чистого звука без верхних гармонических тонов.



Чертеж представляет упрощенную схему, так называемого аудиона или генератора незатухающих колебаний. *C*, представляет из себя электрическую лампочку, волосок которой *K* накаливается током от батареи *e*. *E* — вторая батарея, более сильная. Положительный полюс ее, через катушку самоиндукции L_2 (первичная обмотка трансформатора), соединен с пластинкой *A*, впаянной в трубку *C*; второй отрицательный полюс — с волосками *K*. Кроме того, через середину трубки протянута сетка *B*, соединенная одним концом также с катушкой самоиндукции L (вторичная обмотка трансформатора $L_1 L_2$). Когда батарея *E* начинает работать, то *A* заряжается положительно, *K* отрицательно, и внутри лампочки — трубки *C* — начинает идти ток от *A* к *K*. Однако, оказывается, что ток этот может идти лишь в том случае, если сетка *B* не заряжена отрицательным электричеством, в противном случае ток внутри трубки *C* прекращается. В момент, когда в цепь EL_1A пущен ток от батареи *E* и последний медленно нарастает, в катушке L_2 также находится ток, заряжающий сетку *B* отрицательно (показано стрелками). Когда заряд *B* достигнет некоторой величины, ток внутри трубки, а следовательно и во всей цепи начинает падать и одновременно с тем в катушке L_2 начинает течь ток противоположного направления, заряжающий сетку *B* теперь уже положительно: сетка *B* таким образом перезаряжается. Тогда опять электричество в главной цепи устремляется по прежнему пути $L_1 A B K E$ и т. д. Если в цепь включить телефон *T*, последний будет звучать, воспроизводя колебания электрической цепи. Меняя длину катушек $L_1 L_2$ и вводя в цепь, так называемые, емкости, можно подобрать любой желаемый звук. Эти звуки являются чистыми тонами без примеси обертонов, а потому про них можно сказать, что они не имеют тембра. Подобные аппараты широко распространены в беспроволочной телеграфии, где они выполняют особую роль.

Прим. ред.

встречаются с углублениями, то обе системы волн уничтожают друг друга частью или совершенно.

Эта встреча и взаимное уничтожение двух систем волн называется *интерференцией*.

То же замечание применимо к звуковым волнам. Если при двух системах звуковых волн сгущения совпадают с сгущениями или разрежения с разрежениями, то образующийся тон усиливается в сравнении с тонами образующими; но если сгущения встречаются с разрежениями, то происходит частное или полное уничтожение звука.

Если поместить две органые трубки одного тона на одно и то же поддувало и заставить их звучать, то в то время, как воздух будет выходить из амбушюры одной, он будет переходить в другую. Следовательно, когда одна трубка будет производить сгущение, другая будет производить разрежение. Звуки двух таких трубок должны уничтожать друг друга.

Два музыкальные звука почти одинаковой высоты, раздаваясь одновременно, сопровождаются биениями.

Эти биения суть следствия попеременного совпадения и интерференции двух систем волн. Когда оба звука одинаковой силы, то они образуют вторичный звук вчетверо сильнейший, чем каждый из них. а интерференция их дает абсолютную тишину.

Действие двух таких звуков дает ряд толчков, которые мы называем биениями тона и которые разделены между собою паузами.

Число биений тона в секунду равно разности чисел колебаний образующих тонов.

При звуке колокола или кружка взаимно уничтожаются колебания идущие по обе стороны узловой линии; колебания обеих ножек в камертоне частью взаимно ослабляют себя. Устраняя колебания одной ножки, можно усилить звук.

Луч света, отраженного от ножек двух производящих биения камертонов на экран, дает то удлиняющуюся, то сокращающуюся полосу на экране, выражающую периодические изменения в силе звука.

Беззвучные зоны, наблюдавшиеся генералом Дуаном на берегах Соединенных Штатов, образуются от взаимного уничтожения посредством интерференции прямых звуковых волн с волнами, отраженными от поверхности моря.

Закон раздельного восприятия звуков справедлив только для очень малых амплитуд колебаний; когда последние становятся до того велики, что закон этот перестает действовать, то образуются вторичные волны, соответствующие гармоническим тонам звучащего тела.

Когда два звука до того сильны, что закон этот перестает действовать, то появляющиеся вторичные волны соединяются и образуют производные комбинационные тоны.

Есть два рода таких тонов; число колебаний одних равно разности, число колебаний других равно сумме звуков, их производящих. Первые называются *тонами разности*, вторые—*тонами суммы*.

Лекция девятая.

Соединение музыкальных звуков.—Чем меньше числа, выражающие отношение числа их колебаний, тем совершеннее гармония.—Понятие пифагорейцев о музыкальном консонансе.—Теория консонанса Эйлера.—Физический анализ вопроса.—Теория Гельмгольца.—Диссонанс происходит от биений.—Интерференция основных тонов и верхних тонов.—Механизм слуха.—Слуховой волосок Шульца.—Слуховые камешки.—Кортиевы волокна.—Графическое представление консонанса и диссонанса.—Диатоническая шкала.—Колебания музыкальных интервалов могут быть сделаны видимыми.—Рисунки Лиссажу.—Сложные колебания.—Разные способы, уясняющие соединение вибраций.—Заключение.

§ 1. Музыкальный консонанс (созвучие).

Предмет настоящей лекции обнимает две области: физическую и эстетическую, и нам нужно определить отношение между ними. Мы займемся сначала вопросом о музыкальном консонансе; исследуем музыкальные тоны, состоящие в определенной взаимной связи, и причину, почему одни соединения звуков приятны уху, другие неприятны.

Пифагор сделал первый шаг к объяснению музыкальных интервалов. Этот великий мыслитель натянул струну и разделил ее на три части. На одном из делений он укрепил ее и таким образом получил две струны, из которых одна была вдвое длиннее другой. Заставляя их звучать разом, он нашел, что звук короткий составлял высшую октаву звука длинной струны. Затем он разделил струну на две части, которые относились как 2 : 3, и нашел, что интервал между их тонами составлял квинту. Таким образом Пифагор, разделяя свою струну на различные части, нашел, что музыкальные интервалы находятся в известном отношении к длине струны и что гармония тем совершеннее, чем проще отношение двух частей, на которые разделена струна. Пифагор на этом остановился, и исследователям последующих столетий предстояло разъяснить, что явления, замеченные Пифагором, находятся в зависимости от отношения длины струны к числу колебаний, которые она производит. Оставалось долго загадкой, почему приятность звука связана с простотою отношений в числах колебаний, и объяснение Эйлера, что человеческая душа по природе своей находит удовольствие в простых численных отношениях, оставалось долго единственным.

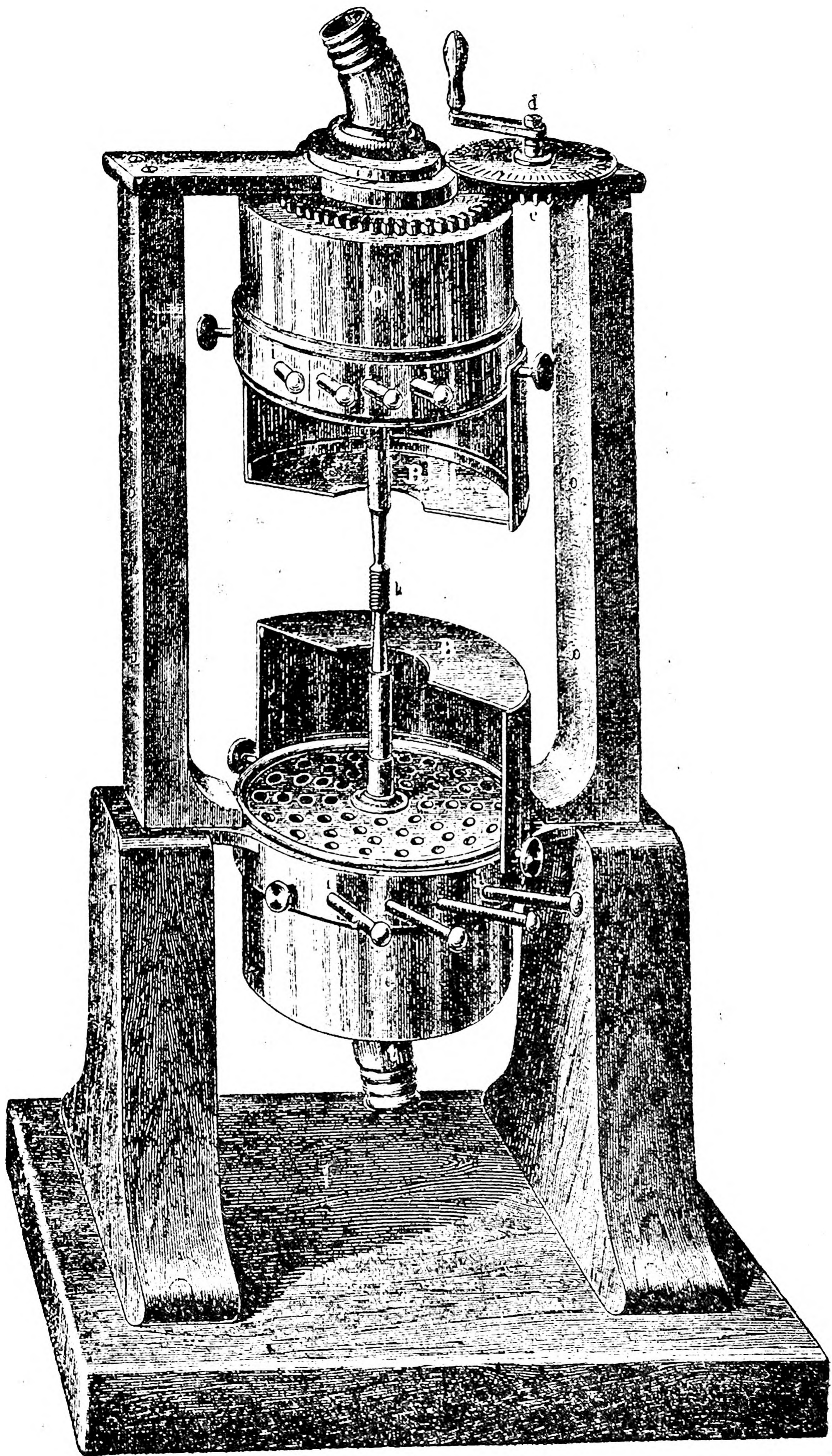
Двойная сирена, изображенная на фиг. 178, дает нам возможность воспроизвести как прежние, так и новые соединения звуков, и этот инструмент представляет то преимущество, что мы сейчас же

можем, сосчитав число отверстий, соответствующих каким угодно двум тонам, определить число колебаний этих тонов. Но прежде чем мы пойдем далее, я хочу вам объяснить действие двойной сирены несколько подробнее. Инструмент, как вам известно, состоит из двух сирен Дове C и C' , расположенных на одной оси; каждая сирена снабжена четырьмя рядами отверстий, числа которых идут в следующем порядке:

	Верхняя сирена: число отверстий.	Нижняя сирена: число отверстий.
1 ряд	16	18
2 »	15	12
3 »	12	10
4 »	9	8

Число двенадцать, как вы замечаете, находится в той и другой сирене; я открываю теперь этот ряд с 12 отверстиями у обеих сирен и вдуваю воздух; оба тона звучат совершенно в унисон, и этот унисон продолжается, сколько бы я ни возвышал звук. Во второй лекции вы видели, что, поворачивая рукоятку верхней сирены, можно заставить отверстия ее воздушного ящика C' или двигаться навстречу отверстиям вращающегося кружка или отставать от них, вследствие чего повышается или понижается высота тона верхней сирены. Это изменение дает себя чувствовать немедленно биениями. Чем быстрее будем вращать рукоятку, тем более звук верхней сирены будет повышаться или понижаться относительно звука нижней и тем чаще будут становиться биения. Вращение рукоятки находится к гращению ящика в следующем отношении: когда рукоятка поворачивается на половину прямого угла, то воздушный ящик поворачивается на $\frac{1}{6}$ этого угла, что составляет $\frac{1}{24}$ часть его полного оборота. В настоящем случае, когда круг содержит 12 отверстий, поворот на $\frac{1}{24}$ окружности производит то, что отверстия верхнего воздушного ящика закрываются в тот самый момент, когда открываются отверстия нижней сирены, и наоборот. Поэтому ясно, что промежутки между воздушными толчками нижней сирены, соответствующие разрежению ее волн, совпадают с сгущениями в воздушных волнах второй сирены, следствием чего является абсолютное уничтожение звука обеих сирен.

Вам может казаться, что я несколько отступаю от истины, потому что хотя рукоятка приведена в положение, соответствующее безусловной тишине, однако вы все-таки слышите известный звук. Если постоянно вращать рукоятку, то является попеременно то усиление, то ослабление звука, но не уничтожение его. Причина этого следующая: звук этой сирены весьма сложен; она силою и внезапностью своих ударов производит волны, не только соответствующие числу ее отверстий, но и вторичные волны, которые присоединяются к первоначальным, точно так, как гармонические верхние тоны струны или органной трубы присоединяются к их основному тону. Сирена дает, кроме основного тона, его октаву, двенадцатую, двойную октаву и т. д., т.-е. она приводит воздух в вибрации двойной, тройной, четверной скорости в сравне-



Фиг. 178.

нии с основными вибрациями. Поворачивая верхнюю сирену на $\frac{1}{24}$ окружности, мы действительно уничтожаем совершенно основной тон, но не уничтожаем его октавы ¹⁾). Поэтому, когда я привожу рукоятку в положение, соответствующее уничтожению основного тона, то я получаю вместо тишины полную первую гармонику инструмента.

Гельмгольц окружил как верхнюю, так и нижнюю сирену круглыми медными ящиками *ВВ*, из которых каждый состоит из двух половин (на рисунке мы представили только половины их). Эти ящики своим резонансом усиливают основной тон инструмента и дают возможность легче следить за его изменениями. Нужна известная скорость оборота для того, чтобы достигнуть максимума резонанса, но раз эта скорость достигнута, основной тон необыкновенно усиливается, и при вращении рукоятки являющиеся биения имеют необыкновенную силу.

Но, как сказано, паузы между ударами основного тона не составляют промежутков безусловной тишины, а состоят из верхней октавы, и поэтому нужна большая осторожность при определении посредством этого инструмента числа колебаний. Я говорю это не без основания. Раз для того, чтобы определить быстроту вибраций небольшого поющего пламени, я поместил сирену на известном расстоянии от пламени. Через некоторое время после вдувания воздуха я мог заметить, как пламя прыгало согласно со слышавшимися биениями. Я полагал, что унисон пламени с сиреной почти достигнут и в этом предположении определил число ударов. Последнее оказалось очень малым. Я имел основание думать даже, что оно едва равнялось половине своего действительного числа. В чем заключалась тут причина ошибки?—Просто в том, что я брал и определял не основной тон, а его октаву. Эта октава и пламя производили биения, и поэтому счетный механизм инструмента, показывающий число колебаний не октавы, а основного тона, дал только половину надлежащего числа. Я привел затем в унисон с пламенем основной тон. Когда оба приблизились к унисону, то слышались также биения, и пламя прыгало сильнее, чем при октаве. Счетный механизм инструмента только теперь показывал действительное число колебаний пламени.

Действительно, первые звуки, слышимые в сирене, суть всегда верхние тоны; они текут как непрерывные музыкальные звуки, между тем как основной тон имеет всегда характер перемежающийся. Инструмент, однако, устроен таким образом, что скоро достигается скорость оборотов, возвышающая основной тон над его спутниками, и если посредством слабого дутья умерить эту скорость, то это происходит на счет силы верхнего тона. Поэтому для исследования верхних тонов требовалось придумать такое приспособление, при котором можно было бы соединить сильный ток воздуха с медленным вращением.

Гельмгольц приделал пружину, которая слегка давила на кружок сирены, отчего число оборотов увеличивалось только постепенно. Бла-

¹⁾ Точно так же не уничтожаем ни одного из тонов, вибрации которых составляют четные кратные основного тона.

Благодаря этому он мог наблюдать перевес верхних тонов над основным тоном в начале вращения и затем окончательный перевес основного тона. Не доверяя непосредственному ощущению высоты тона, он определял звук по числу ударов, соответствующих одному обороту рукоятки в верхней сирене. Положим, что число отверстий верхней и нижней сирены есть двенадцать; поворачивая рукоятку на 45° , получим интерференцию и уничтожение основного тона. Совпадения этого тона происходят в конце каждого поворота на 90° . Поэтому для основного тона должны получиться четыре биения на каждые 360° оборота рукоятки, или на каждый полный оборот. Но вместо четырех Гельмгольц при таком опыте получил двенадцать биений на каждый оборот. Действительно, это были биения, соответствующие не основному тону и даже не первому верхнему тону, но второму верхнему тону, число колебаний которого втрое больше, чем у основного тона. Эти биения продолжались до тех пор, пока число воздушных толчков в секунду не превысило тридцати или сорока. Между сорока и восьмидесятью толчками в секунду число биений, соответствующее каждому обороту рукоятки, понизилось с двенадцати на восемь. В этом промежутке первый верхний тон или октава основного тона были весьма сильны и производили свои биения. И только когда число воздушных толчков превысило восемьдесят в секунду, число биений понизилось до четырех на каждый полный оборот. Другими словами, только когда быстрота вращения перешла за этот предел, основной тон мог взять перевес над своими спутниками. Мы будем соединять теперь звуки в определенном порядке, а знакомые с музыкою из присутствующих пусть определяют их музыкальное отношение. Вы слышали унисон, когда в обеих сиренах были открыты ряды, имеющие по двенадцати отверстий. Я открываю восемь отверстий в верхней и шестнадцать в нижней сирене. Знающий музыку назовет слышащийся теперь интервал октавой. Я открываю теперь один ряд в верхней сирене—девять отверстий, в другой—восемнадцать; интервал все так же получается октава. Это показывает, что интервал не зависит от абсолютного числа колебаний, а только от отношения между числом колебаний двух звуков. Это станет еще нагляднее, если начать с медленного вращения сирены и, постепенно его усиливая, доводить звук до крайней высоты. Пока число отверстий относится как $1 : 2$, интервал остается постоянно октавой. Я открываю один ряд, имеющий 10 отверстий в верхней сирене, и другой в нижней в 15 отверстий; отношение теперь равняется $2 : 3$ и получающийся интервал составляет квинту. Открываю в одной сирене 12, а в другой 18 отверстий, опять получаю тот же интервал. Открываю в одной 9, в другой 12 отверстий, или в одной 12, в другой 16, получаю отношение $3 : 4$ и для интервала кварту. Подобным образом при 8 и 10 отверстиях или 12 и 15, при отношении $4 : 5$, получу большую терцию, а при 10 и 12 или 15 и 18 и отношении $5 : 6$ получу малую терцию.

Эти опыты показывают: 1) что интервал зависит не от абсолютного числа вибраций двух соединяющихся тонов, но от отношений

между числами их вибраций и 2), что особенно важно, что чем меньше числа, которыми выражаются эти отношения, тем совершеннее созвучие. Совершеннейшее созвучие является при отношении 1 : 1; затем следует октава 1 : 2; потом квинта 2 : 3; потом кварта 3 : 4; потом большая терция 4 : 5, и, наконец, малая терция 5 : 6. Я могу также открыть два ряда с 8 и 9 отверстий; этот интервал соответствует целому тону в музыке. Однако, эти два звука дают диссонанс. Я могу открыть ряды с 15 и 16 отверстий; интервал будет равняться полу-тону, и мы получим резкий диссонанс.

§ 2. Теория музыкального консонанса. Пифагор и Эйлер.

Отчего же происходит это? Почему совершеннейшее созвучие выражается отношением в меньших числах? Уже древние пытались разрешить этот вопрос. Пифагорейцы удовлетворялись тем ответом, что «все в мире есть число и гармония». Они полагали, что численное отношение между семью тонами музыкальной гаммы выражает расстояние планет от их центрального огня. Они говорили поэтому о хоровом танце миров, о «музыке сфер», которую из всех смертных слышал один только Пифагор, по мнению его учеников. Не можем ли мы мимоходом сравнить это прекрасное суеверие с теми фантазиями, которые существуют и в наши дни. Если бы характер, какой принимают суеверия в разные времена, мог служить масштабом прогресса или регресса человечества, то, конечно, девятнадцатое столетие могло бы мало чем гордиться перед шестым столетием до Рождества Христова. Другая новейшая попытка объяснения была сделана математиком Эйлером. Объяснение это, если только его можно так назвать, долгое время заставляло исследователей молчать, хотя, может быть, и не удовлетворяло их. Эйлер объясняет, что нам нравится порядок, нравится познание средств, которые ведут к цели. Но труд, который ведет к познанию порядка, не должен быть велик и утомителен. Если отношения, которые мы должны распутывать и которые лежат в основании порядка, слишком сложны, то мы можем, конечно, понять их, но не можем ими любоваться, чем проще выражение закона, тем более он нам нравится. Поэтому мы и даем предпочтение простым музыкальным отношениям перед сложнейшими. Консонанс был бы поэтому, по Эйлеру, удовольствием, причина которого заключается в познании численного закона без скучного труда. При таком объяснении забывается, что большинство наслаждающихся музыкой ничего не знают о числе колебаний; и те, которые имеют самое тонкое ухо для уловления диссонанса, находятся в положении Пифагора и ничего не знают о вибрациях и их отношениях. К этому можно еще прибавить, что даже ученый, вполне освоенный с этим предметом, не чувствует от этого больше наслаждения, чем простой смертный. Объяснение Эйлера поэтому неудовлетворительно. Настоящее объяснение было дано в последнее время немецким ученым, после глубокого анализа установившим физическую причину консонанса.

нанса и диссонанса, и она столь проста, что нужно удивляться, что так долго пришлось ждать ее открытия. Многое из того, что было сказано в предшествовавших лекциях, должно послужить нам к пониманию объяснения консонанса и диссонанса, данного Гельмгольцем. Позвольте мне повторить опыт, который сам собою должен навести вас на это объяснение. Перед вами два газовых пламени, окруженные трубками, при посредстве которых они могут быть превращены в поющие пламена. Теперь трубки одинаковой длины и пламена звучат в унисон. Я слегка удлиняю одну трубку посредством надставки, и вот слышатся биения столь медленные, что их можно сосчитать. С дальнейшим удлинением трубки биения ускоряются до того, что их сосчитать даже невозможно. Совершенно ясно, что биения, которые вы теперь слышите, различаются только по быстроте от тех биений, которые вы сейчас слышали. Здесь нет нарушения непрерывности. Мы начинаем с медленных движений, потом постепенно увеличиваем их быстроту и наконец биения следуют одно за другим столь быстро, что производят то своеобразное дрожание звука, которое всякий музыкант назовет *д и с с о н а н с о м*. Затем пойдем обратным путем и от быстрых биений перейдем к медленным. Замечается та же непрерывность в явлении. Постепенно биения более и более отделяются одно от другого и наконец следуют так медленно, что мы можем считать их. Таким образом эти поющие пламена дают нам возможность с уверенностью следить за биениями, пока они не перестанут быть биениями и не превратятся в диссонанс.

Этот опыт решительно доказывает, что диссонанс *м о ж е т* быть произведен быстро следующими друг за другом биениями; и эта причина диссонанса была бы открыта, вероятно, ранее, если бы умы ученых не были сбиты с настоящей дороги теорией составных тонов Юнга. Он полагал, что биения, быстро следуя друг за другом, образуют составные тоны, что биения соединяются наподобие простых музыкальных воздушных звуков, и в этом утверждало его то обстоятельство, что первый составной тон, тон разности, самый громкий, точно так же, как и биения соответствуют числу колебаний, которое равно разности колебаний первоначальных тонов. Но биения производят совершенно иное действие на ухо, чем правильные импульсы обыкновенного музыкального тона.

§ 3. Созвучащие (симпатические) вибрации.

Чтобы обнять во всей полноте новую теорию музыкального консонанса, мы должны усвоить себе несколько предварительных понятий.

Я прошу вас припомнить опыты третьей лекции, в которой мы производили деление струны на ее гармонические сегменты. Мы употребляли для этого маленькие бумажки, которые клали на струну и которые струна сбрасывала или не сбрасывала, смотря по тому, помещались ли эти бумажки на узлах или на пучностях. Перед вами находится сонометр (монохорд), описанный в третьей лекции. Я натянул

на нем две струны вместо одной на расстоянии трех дюймов одну от другой. Посредством ключа я могу натягивать эти струны и таким образом настраиваю их в унисон. Теперь помещаю бумажку по середине одной струны, а заставляю вибрировать другую. Что происходит? Колебания одной струны сообщаются через подставки другой; отдельные импульсы весьма слабы, но так как струны шаходятся в унисоне, то последовательные импульсы соединяются и накапливаются и усиливают колебания до того, что бумажка наконец сбрасывается с нетронутой струны.

Каждый из опытов, которые произведены с бумажками и одной струной, может быть теперь повторен с двумя унисонными струнами. Прикоснемся к одной вибрирующей струне на четверти ее длины от одного конца и поместим прежние синие и красные бумажки не на вибрирующей струне, но на другой струне, в точках, соответствующих узлам и пучностям первой. Если проведем теперь смычком по короткому отделу первой струны, то пять красных бумажек на пучностях другой струны будут сброшены, в то время как четыре синих останутся в покое.

Спуская одну струну, я уничтожаю между ними унисон и теперь все мои старания—заставить вторую струну сбросить бумажки—напрасны. Того накопления импульсов, которое возможно только при унисоне, здесь не происходит, и потому, как бы ни были сильны движения первой струны, она не оказывает никакого влияния на другую.

Влияние унисона еще заметнее на камертонах. Я ставлю два камертона на резонансовые ящики и провожу смычком по одному из камертонов. Другой камертон остается нетронутым. Я останавливаю звучащий камертон; но и после этого звук хотя и слабо, но все-таки слышится. Через воздух и дерево колебания одного камертона сообщались другому, и звук, который вы теперь слышите, принадлежит другому нетронутому камертону. Я прилепляю теперь воском маленькую монету к одному из камертонов и его влияние на другой камертон прекращается. Как ни мало изменилась скорость вибраций, но это изменение разрушило симпатию между камертонами, и теперь уже один камертон не отвечает другому. Но я удаляю воск, и нетронутый камертон снова отвечает другому.

Эта передача колебаний через воздух и дерево происходит и тогда, когда камертоны, стоящие на резонаторах, отдалены на несколько футов. Она возможна даже только через воздух. Держа ящик громко звучащего камертона в руке, я подношу его к другому камертону так, чтобы они обращены были спинками один к другому и чтобы между их ножками оставался небольшой слой воздуха. И как ни мала среда, через которую должны теперь передаваться движения, но усиление импульсов вследствие унисона достаточно велико, чтобы заставить зазвучать и другой камертон. Я останавливаю теперь первый камертон, но второй все-таки продолжает звучать, воспринявши вибрации своего соседа.

Я снимаю один камертон с ящика и ударяю его. Пока я держу его в руке, звук его не слышен; но я приближаю его к другому камер-

тону незвучающему, помещающемуся на своем ящике, и сейчас же слышится этот мягкий тон, исходящий не от первого, а от этого последнего камертона.

Разные другие примеры влияния унисона, приведенные в прошлых лекциях, должны притти теперь вам на память, и число их может быть увеличено до бесконечности. Когда, например, двое часов с маятниками одинаковой длины помещаются на одной стене, и одни из этих часов идут, а другие стоят, то тиканье первых часов через стену передается другим. Маятник стоящих часов приходит в движение от тиканья первых часов. Одно такое тиканье сообщает ему почти незаметное движение, и он описывает бесконечно малую дугу, но возвращается назад в надлежащее время для получения нового толчка. Через повторение и суммирование таких толчков движение его усиливается, и наконец другие часы начинают идти. Этим же соразмерением импульсов можно посредством голоса заставить звучать стекло, а посредством органной трубы—разбить подходящее оконное стекло.

§ 4. Созвучающие вибрации и их отношение к человеческому уху.

Я останавливаюсь на этом предмете для того, чтобы вам объяснить способ передачи звуковых волн нашему слуховому нерву. Наш слуховой орган состоит прежде всего из наружного слухового прохода, закрытого с внутренней стороны круглой барабанной перепонкой. За ней помещается полость, называемая барабанною, отделенная с другой стороны от следующей полости костеобразною стенкою, в которой имеются два отверстия: одно круглое, другое овальное, затянутые также тонкими перепонками. Поперек барабанной полости расположены в ряд три косточки. Первая, прикрепленная одним концом к середине барабанной перепонки, называется *м о л о т о ч к о м*, вторая, называемая *н а к о в а л ь н е й*, соединена с молоточком посредством подвижного сочленения; третья круглая косточка соединяет наковальню с *о с т р е м е н е м*, овальное основание которого соединяется с перепонкой овального отверстия, о котором сказано выше. Эта овальная перепонка почти вся покрыта стремением, так что остается непокрытой только узкая полоска ее, окружающая кость. За костеобразной стенкой, именно между нею и мозгом, помещается совершенно своеобразный орган, называемый *л а б и р и н т о м*, наполненный водой, и в выстилающей перепонке его распределены конечные волокна слухового нерва. Когда барабанная перепонка получает толчок, то он передается через ряд косточек перепонке овального отверстия, отсюда воде и, наконец, нервам. Эта последняя передача однако совершается не непосредственно. На известном месте лабиринта между нервными волокнами находятся крайне тонкие эластические остроконечные волоски. Эти волоски, открытые Максом Шульцем, необыкновенно способны воспринимать колебания воды, соответствующие периодам их собственных колебаний. Таким образом, восприняв эти колебания, они приводят в возбуждение

нервы, оконечности которых помещаются между их корешками. В другом месте лабиринта помещаются маленькие кристаллические частицы, называемые слуховыми камешками. Они помещаются между нервными волокнами и, будучи приведены в колебание, производят перемежающееся давление на волокна. Эти слуховые камешки служат, по всей вероятности, для другой цели, чем волоски Шульце. Вследствие своего веса они способны делать более продолжительными колебания скоро прекращающихся звуков, которые иначе не были бы заметны для уха. Шульцевы же волоски, вследствие своей легкости при скоропроходящем тоне слишком скоро приходили бы в покой, между тем, как для восприятия продолжительного тона они прекрасно приспособлены.

Наконец, в лабиринте находится еще удивительный, открытый маркизом Корти орган, по всему похожий на музыкальный инструмент, струны которого натянуты так, что они воспринимают колебания различных периодов и передают их нервам. Внутри человеческого уха помещалась таким образом целые тысячелетия арфа из 3000 струн ¹⁾ для восприятия музыки внешнего мира и передачи ее мозгу. Каждый музыкальный звук, падающий на этот орган, выбирает между натянутыми волокнами то, которое соответствует его высоте, и приводит его в колебание. Таким образом эти микроскопические струны могут анализировать воздушные движения, как бы они ни были запутаны, и разлагать их на составные части. Только ум несовершенно организованный может не притти в изумление при виде являющегося здесь чуда.

§ 5. Консонатные интервалы в их отношении к человеческому слуху.

Это мнение о назначении волокон Корти есть чисто теоретическое; но оно представляет для нас все признаки истины. Оно дает нам возможность связать между собою многие вещи, отношение между которыми иначе трудно было бы понять. Когда звучит музыкальный тон, то начинает созвучать с ним соответствующее Кортиево волокно, приводимое в движение точно так же, как приводится в движение нетронутая струна другою струною, звучащею в унисон с нею. А когда два звука сливаются и производят биения, то перемежающееся движение биений сообщается соответствующему волокну в ухе. Но при этом нужно заметить, что для того, чтобы известное волокно могло воспринять одновременно два различных тона, оно не должно сильно разниться по высоте от каждого из обоих тонов. Припомните повторенные нами опыты Мельде (в III лекции). Вы там не раз могли заметить, что еще прежде, чем установится полный унисон между струною и камертоном, к которому она прикреплена, струна уже начинает отвечать камертону. Но вы заметили также, как быстро увеличивается амплитуда вибраций струны, когда она близко подойдет к совершен-

¹⁾ По Кёлликеру таково число волокон Кортиева органа.

ному унисону с вибрирующим камертоном. При приближении к унисону амплитуда струны была, положим, 2 см., и затем малейшее натяжение или спускание, смотря по тому, что требуется в каждом случае, приведет ее в унисон и вдруг заставит ее делать амплитуду около 15 сантиметров.

То же мы видим и в сейчас произведенном нами опыте с сонометром. Вы заметили, что кусочки бумаги, прежде чем соскочить со струны, начинают дрожать; а это показывает, что созвучающий ответ другой струне, хотя и слабый, начался еще до совершенного унисона. Вообразим себе, что вместо двух струн на сонометре натянуты три струны приблизительно одной высоты по тону, и предположим, что период вибраций средней струны лежит в середине между периодами ее двух соседок, будучи несколько выше одной и несколько ниже другой. Каждая из боковых струн, звуча одна, заставила бы отвечать себе среднюю струну. Если зазвучат вместе обе боковые струны, то они произведут биения; соответствующее биениям перемежающееся движение сообщается и средней струне, которая и начинает давать биения одновременно с биениями своих соседок. Вот таким же образом мы можем представить себе, как Кортиево волокно может до некоторой степени воспринимать вибрации тона, находящегося в близком, но не в совершенном унисоне с его собственным тоном и как, когда два тона, близкие к высоте тона волокна, действуют на него вместе, то их биения вызывают соответствующее перемежающееся движение волокна. Эта способность созвучания быстро ослабевает по обе стороны совершенного унисона, так что, если увеличивать интервал между двумя тонами, то скоро наступит момент, когда то же волокно уже будет неспособно воспринимать одновременно действие обоих тонов. Здесь прекращается состояние органа, необходимое для восприятия слышных биений.

В среднем регистре фортепиано при интервале в полутон биения резки и отчетливы и действуют на ухо как грубый диссонанс. Если же интервал увеличивается до целого тона, то биения становятся более быстрыми, но зато менее отчетливыми. При интервале между двумя нотами в малую терцию в среднем регистре биения перестают быть заметными. Но это сглаживание звука должно быть приписано не одной только увеличившейся скорости биений. Оно происходит частью от того обстоятельства, к которому приготовили нас предшествующие соображения, что два звучащие здесь тона по высоте своей слишком далеки от тона промежуточного Кортиева волокна для того, чтобы сильно подействовать на него. Восходя к высшим регистрам, мы можем получить в пределах интервала еще меньшего, чем малая терция, такое же или даже большее число биений, которые явственно заметны вследствие близости тонов, их составляющих. Однако на самых высоких тонах биения, становясь весьма быстрыми, уже перестают производить на ухо впечатление грубого шероховатого звука.

Поэтому при объяснении консонанса нужно иметь в виду как биения, так и величину интервала. Гельмгольц думает, что в средних и высших отделах музыкальной шкалы, когда биения достигают 33 в

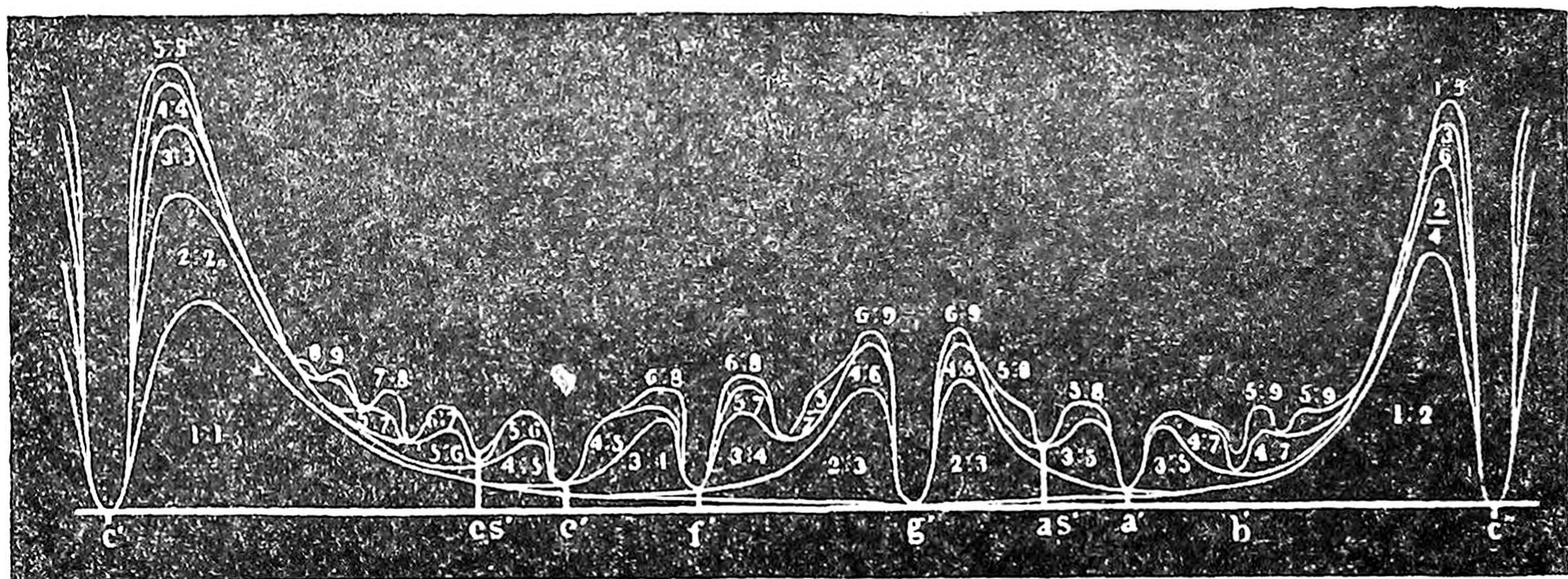
секунду, диссонанс достигает максимума. Как более медленные, так и более быстрые биения действуют менее грубо и шероховато.

Благодаря Гельмгольцу, взгляды которого я старался изложить здесь по возможности короче, мы теперь в состоянии справиться с вопросом о музыкальных интервалах и указать основание, почему некоторые из них консонантны, а другие диссонантны для уха. Таков уже наш удел на земле, что все наши ощущения и чувства от самых низших чувственных до самых высоких эстетических имеют механическую причину, хотя может быть нам никогда не удастся сделать шаг от причины к действию или понять, почему раздражение некоторых нервных масс может давать нам то удовольствие, которое мы получаем от музыки. Возьмем, напр., скрипку. Основной тон каждой струны этого инструмента сопровождается, как это можно доказать, множеством гармонических верхних тонов; так что когда звучат две скрипки, то мы должны принимать в соображение консонанс или диссонанс не только основных тонов, но также и верхних тонов. Положим, звучат две струны, которых основные тоны и все верхние тоны совпадают; тогда получится совершенный унисон, что действительно и бывает, когда отношение вибраций— $1:1$. Так же точно, когда отношение вибраций равно $1:2$, каждый верхний тон основного находится в совершенном совпадении или с основным или с каким-нибудь высшим тоном октавы. Тут нет места для биения или диссонанса. Если мы исследуем интервал квинта с отношением $2:3$, то найдем, что совпадение верхних тонов обеих струн будет если не вполне, то почти совершенное, исключаящее всякий след диссонанса. Переходя к другим интервалам, мы находим совпадение верхних тонов менее совершенным, так как числа, выражающие отношение, становятся большими. Таким образом диссонанс интервалов, скорости вибраций которых могут быть выражены только большими числами, не может быть приписываем какому-то мистическому качеству самих чисел, но происходит оттого, что основные тоны, соответствующие таким числам, неизбежно сопровождаются верхними тонами, сочетание которых производит биения, которые, в свою очередь, производят на ухо неприятное действие, называемое диссонансом.

§ 6. Графическое изображение консонанса и диссонанса.

Гельмгольц изобразил графически этот результат. Я заимствую у него две следующие диаграммы. Он принимает, как уже сказано, что максимум диссонанса происходит при 33 биениях в секунду, и затем выражает различные степени диссонанса линиями различной длины. Горизонтальная линия $c'c''$ (фиг. 179) изображает последовательные ноты музыкальной гаммы, в которой c'' есть наше среднее C с 528 вибрациями, а c' —низшая октава c'' . Расстояние от какой-нибудь точки этой линии до начерченной над нею кривой выражает величину диссонанса, соответствующую этой точке. Тут предполагается, что звук повышается постепенно, а не скачками.

Предположим для примера, что два скрипача начинают с одинаковой ноты c' ; в то время, как один продолжает держать ту же ноту, другой постепенно двигает палец по струне и повышает тон до октавы c'' . Действие на ухо изобразится неправильной кривой, начерченной на фиг. 179. Вскоре после прекращения унисона, выражающегося здесь совпадением обеих линий в c' , кривая быстро поднимается, показывая при этом, что тут диссонанс наибольший; в точке e она приближается к прямой, и эта точка соответствует большой терции; в точке f приближение еще значительнее, а эта точка соответствует кварте. В точке g' кривая почти касается прямой, а это значит, что в этой точке, соответствующей квинте, диссонанс почти исчезает. В точке a' имеем большую сексту, а в точке c'' или в октаве c' диссонанс исчезает опять. Точки es' и as' диаграммы означают малую терцию и малую сексту. Удерживая тот же основной тон при дальнейшем возвышении тонов по октаве выше c'' , получим следующее графическое изображение диссонанса и консонанса (фиг. 180).



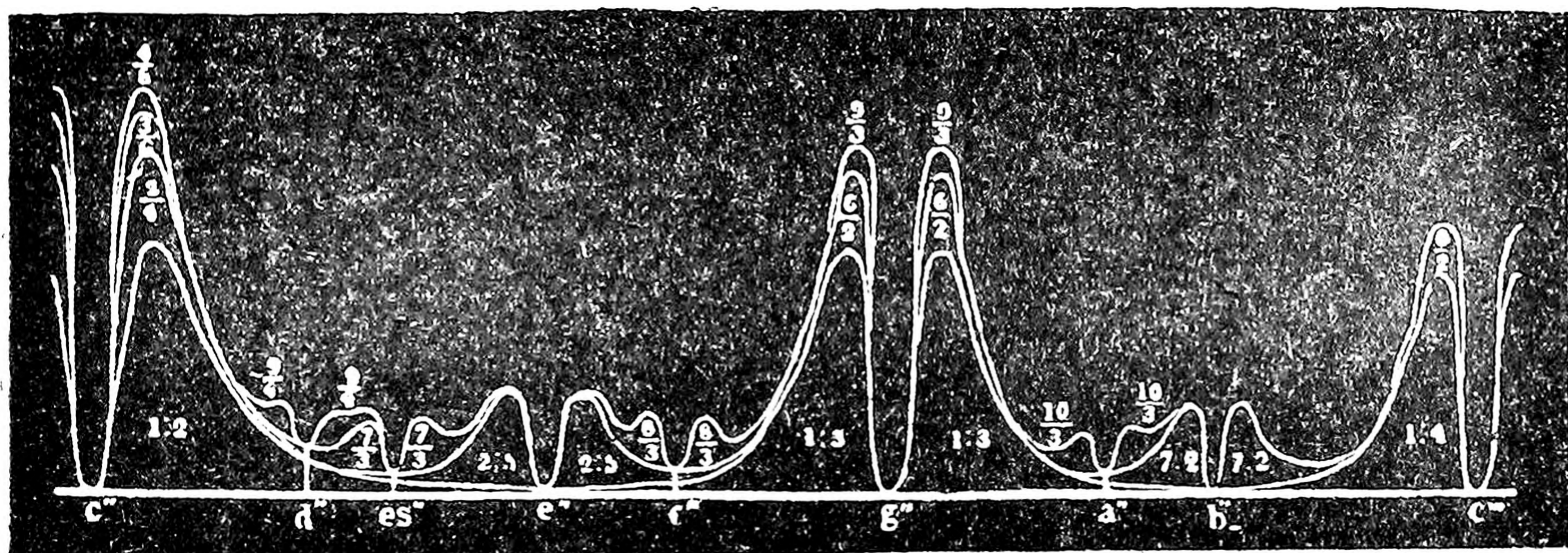
Фиг. 179.

Тут тон начинается с октавы $c'—c''$ и достигает c''' или двойной октавы c' . Из двух этих кривых мы видим, что диссонанс почти постоянно существует и только ослабевает и исчезает в некоторых точках. Эти точки соответствуют местам наименьших чисел для отношений скоростей двух систем колебаний. Нужно помнить, что эти кривые начерчены в том предположении, что причину диссонанса составляют биения, и согласно между опытом и вычислением достаточно оправдывает такое предположение ¹⁾.

Мы достигли теперь границы физической части акустики. Я не имею намерения вводить вас в ее музыкальную часть. Я хочу только прибавить, что если мы будем сравнивать соединение трех тонов, то должны руководиться при этом теми же принципами. Мы должны выбирать такие тоны, которые состоят и с основным тоном и между собою

¹⁾ Седли Тейлор представляет так, что изображенные здесь кривые представляют горную цепь, называет диссонансы пиками, а консонансы—проходами или перевалами.

в гармонических отношениях. При выборе парных соединений тонов должно руководствоваться простейшими отношениями: $1, \frac{5}{4}, \frac{4}{3}, \frac{3}{2}, \frac{5}{3}, 2$; это самые простые отношения, какие мы можем иметь в пределах октавы. Но если брать тоны, выражаемые этими цифрами, один за другим, то окажется, что интервал между 1 и $\frac{5}{4}$ и между $\frac{5}{3}$ и 2 больше, чем остальные, что в том и другом случае потребна вставка промежуточного тона. Подлежащие вставке тоны суть такие, которые дают аккорды не с основным тоном, но с тоном $\frac{3}{2}$, принимаемым за основной. Отношения этих обеих нот к основному тону суть $\frac{8}{6}$ и $\frac{15}{8}$. Вставляя эти ноты, получим 8 тонов натуральной диатонической шкалы, как они выражаются следующими знаками, названиями и цифрами:



Фиг. 180.

Знаки	G	D	E	F	G	H	A	C
Интервалы	Прима	Секунда	Терция	Кварта	Квинта	Секста	Септима	Октава
Числа колебаний.	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

Помножая эти числа на 24 для избежания дробей, получим следующий ряд целых чисел, выражающий отношение числа колебаний тонов шкалы:

24, 27, 30, 32, 36, 40, 45, 48.

Названия терция, кварта, квинта и т. д., которые мы так часто употребляли для обозначения музыкальных интервалов, понятны теперь сами собой. Они выражают последовательное место ноты в шкале.

§ 7. Соединение вибраций.

Уже во второй лекции я познакомил вас с методом, придуманным Лиссажу для изучения звуковых колебаний. С помощью луча, отбрасываемого зеркалом, укрепленным на одной из ножек камертона, последний чертил свои собственные колебания. В последней лекции мы употребили тот же способ для объяснения явления биений. Я предлагаю теперь тот же способ для исследования соединенных колебаний главнейших интервалов музыкальной шкалы; но предварительно мы должны освоиться с

колебаниями обыкновенного маятника. Такой маятник перед вами. Он состоит из прута, который привешен к железной пластине, укрепленной в крыше этого дома, и который имеет на нижнем конце медный шар в 4 килогр. веса. Я отклоняю маятник в сторону и пускаю его; он колеблется взад и вперед приблизительно в одной и той же плоскости.

Я говорю приблизительно, потому что практически невозможно привесить маятник так, чтобы он не производил отчасти вращательного движения около точки своего прикрепления. Вследствие этого рано или поздно нижний конец его уклоняется от прямой и описывает более короткий или более длинный овал. Это обстоятельство представляло большое препятствие для тех, которые хотели повторять знаменитый опыт Фуко, доказывающий вращение земли.

В настоящем случае, однако, маятник повешен так совершенно, что это уклонение незаметно сначала. Допустим, что амплитуда его колебаний выражается прямой ab (фиг. 181), а d есть мертвая точка. Если отклонить его от этой точки к точке b и затем пустить, он возвратится к d и пройдет далее до точки a . Тут он придет на один момент в покой и затем вернется обратно к точке b . Так будет он колебаться взад и вперед известное время и затем придет в покой.

Допустим, что в то время, когда он достигает точки b , он получает удар в направлении перпендикулярном к ab , т.-е. в направлении bc . Допустим, что маятник употребляет секунду для того, чтобы пройти расстояние от a до b . В таком случае для того, чтобы пройти от b до d , он употребит пол-секунды¹⁾.

Допустим далее, что сила, действующая в точке b , в состоянии была бы в течение полу-секунды поднять груз маятника до точки c , если бы груз мог двигаться только в этом направлении, и что расстояние bc равно bd . В таком случае является вопрос, в какой точке будет находиться маятник по истечении полу-секунды. Совершенно ясно, что обе силы должны привести маятник в точку e , прямо лежащую над центром d . Чтобы достигнуть этой точки, маятник должен будет описать дугу bc и таким же образом продолжать свой путь далее по такой же дуге к a и по дуге же возвратиться к b . Мы видим, что его движение вследствие перпендикулярного к нему толчка превратится в круговое и маятник будет описывать круг, как показано на фигуре 182.

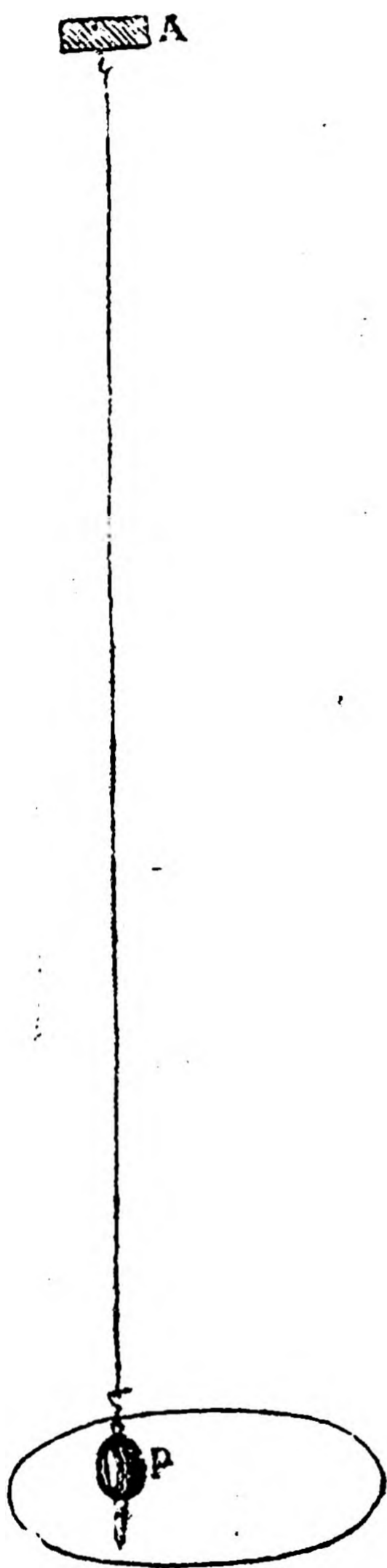
Если сила, действующая в точке b , достаточно велика, чтобы в течение полу-секунды поднять маятник выше, чем bc , то маятник будет описывать эллипсис, у которого линия ab будет малая ось; если, напротив, эта сила будет в состоянии поднять груз на расстояние меньшее, чем bc , то маятник опишет также эллипсис, которого ab будет большою осью.

Пусть теперь боковой удар произойдет в то время, когда маятник, идя от a к b , будет находиться в точке d (фиг. 183). Допустим, что этот

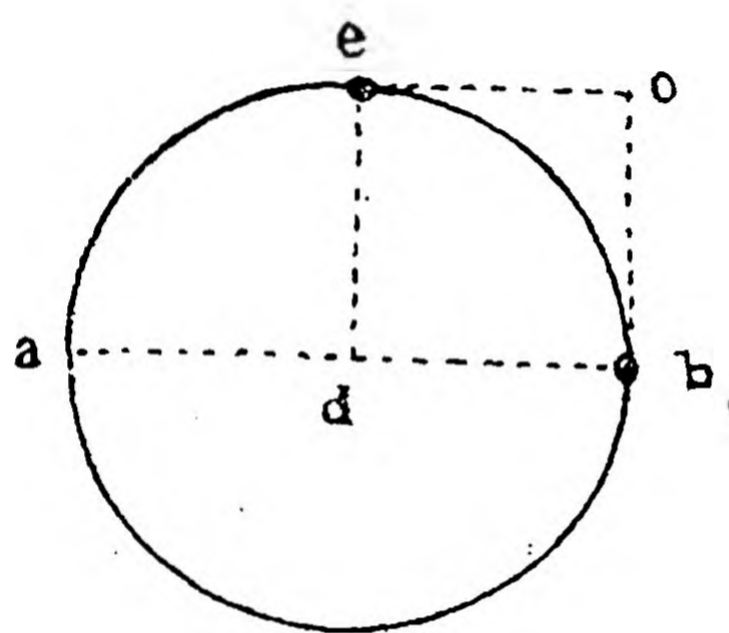
¹⁾ Это предположение допущено только примерно; так как, собственно говоря, маятник в 8 метров длиною употребляет на одно колебание от 2 до 3-х секунд.

удар способен поднять его в течение полу-секунды до точки c ; равнодействующее движение пойдет по линии dg , и движение маятника будет совершаться взад и вперед между точками g и h . Маятник будет описывать прямую, наклонную к первоначальному направлению его колебаний.

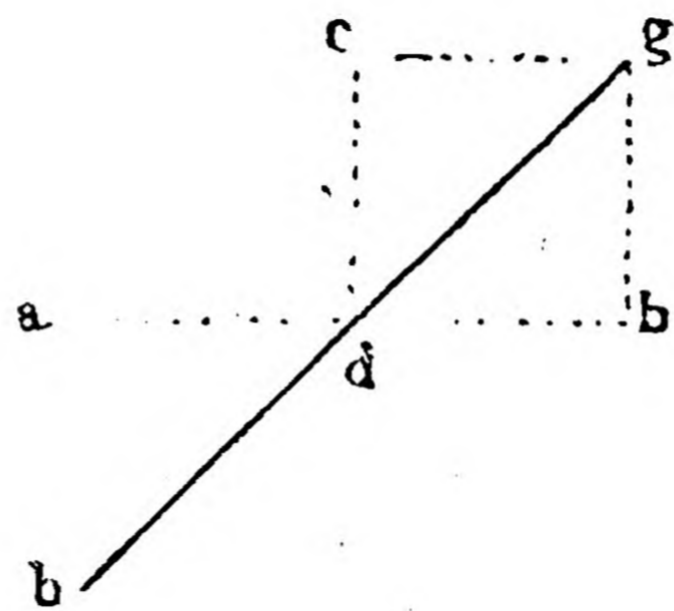
Допустим, что маятник идет не от a к b , а напротив от b к a и в это время получится удар в точке d , само собою понятно, что колебания его будут совершаться также по прямой, но наклонной к ab , как показывает фиг. 184.



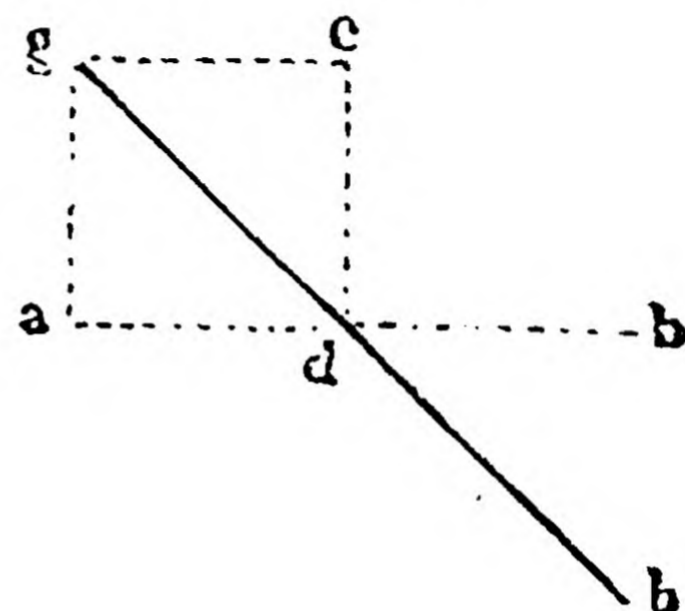
Фиг. 182.



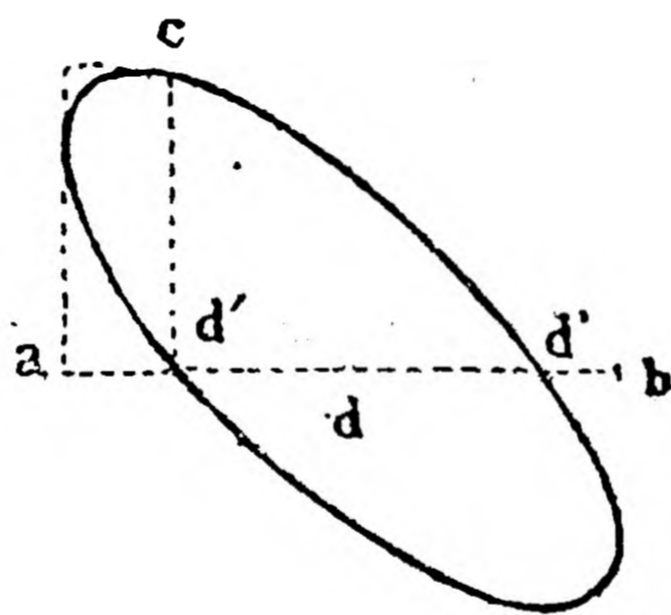
Фиг. 181.



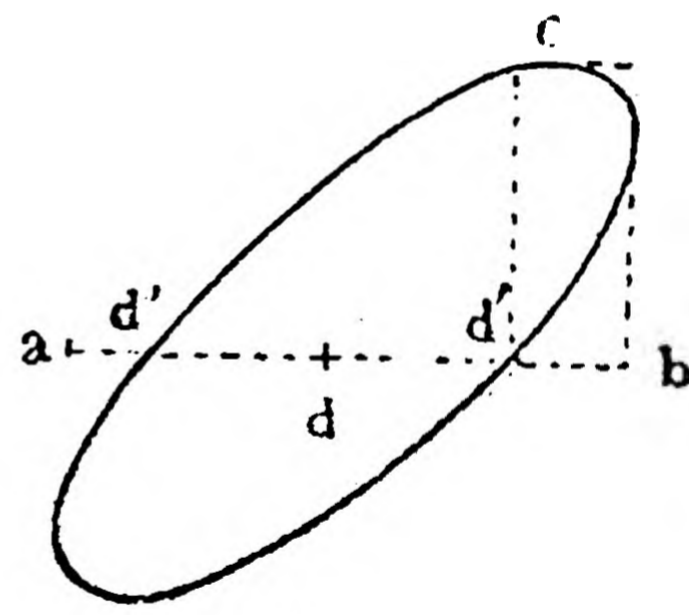
Фиг. 183.



Фиг. 184.



Фиг. 186.

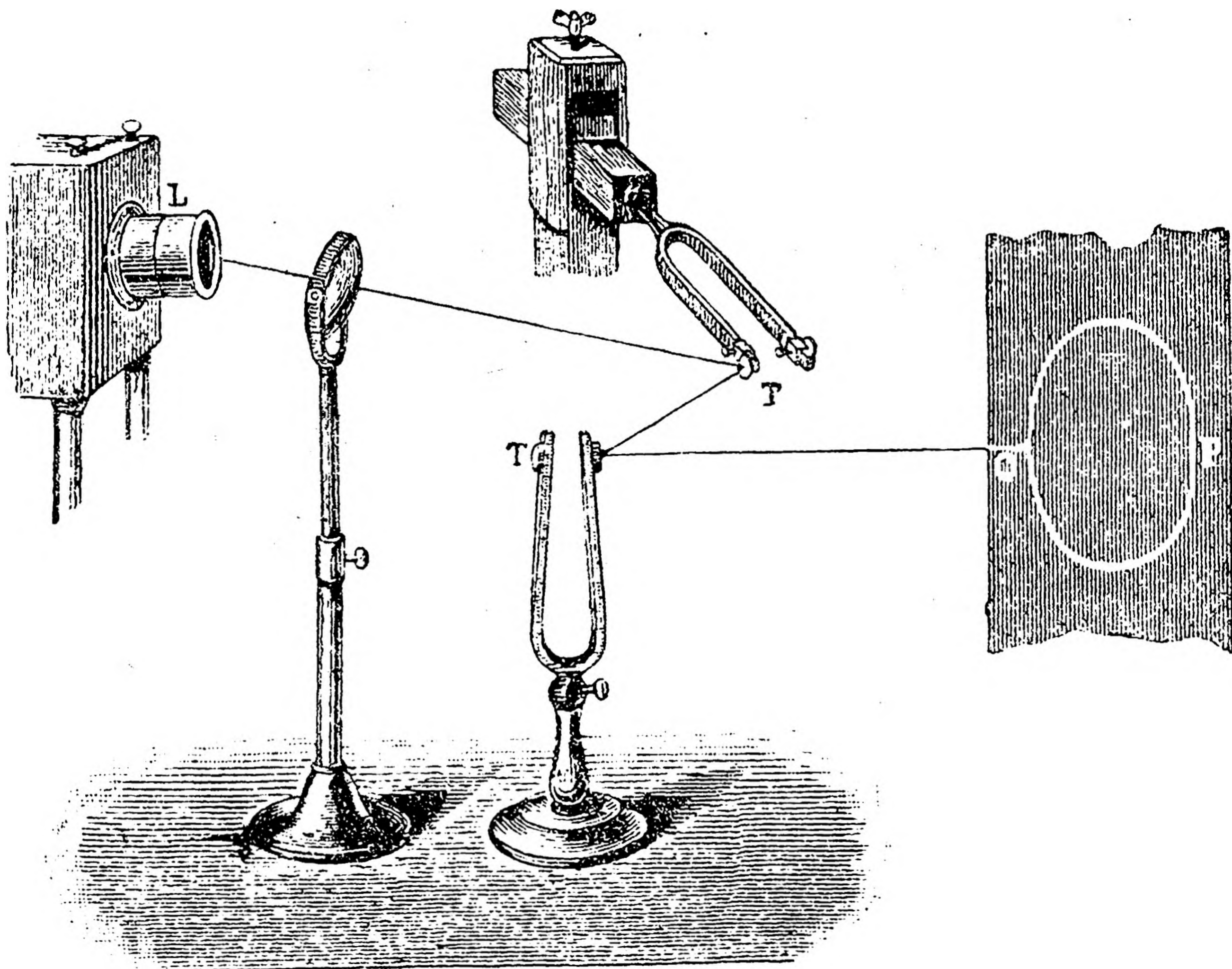


Фиг. 185.

Если удар будет дан маятнику не в точке покоя, не в предельных точках его колебаний, но в какой-либо точке между последними, то он не будет колебаться ни по прямой, ни по кругу, но по направлению, которое составит нечто среднее. Он будет колебаться по эллипсису, ось которого будет наклонна к первоначальному направлению колебаний. Если удар произойдет, например, в точке d' (фиг. 185), в то время как маятник идет по направлению к точке b , то положение эллипсиса будет подобно представленному на фиг. 185. Если же толчок произойдет, когда маятник идет от b к точке a , то положение эллипсиса будет как представлено на фиг. 186.

С помощью метода Лиссажу мы можем соединить движение двух камертонов, колебания которых совершаются под прямым углом, и это я вам покажу теперь.

Перед этой электрической лампой L (фиг. 187) помещается большой камертон T' , снабженный зеркалом, на которое я заставляю падать луч LT' . Камертон этот, как видите, помещен горизонтально. На пути отражаемого им луча я помещаю другой стоящий вертикально камертон T , снабженный также зеркалом. Когда вибрирует горизонтальный камертон, то луч света колеблется из стороны в сторону горизонтально, вер-

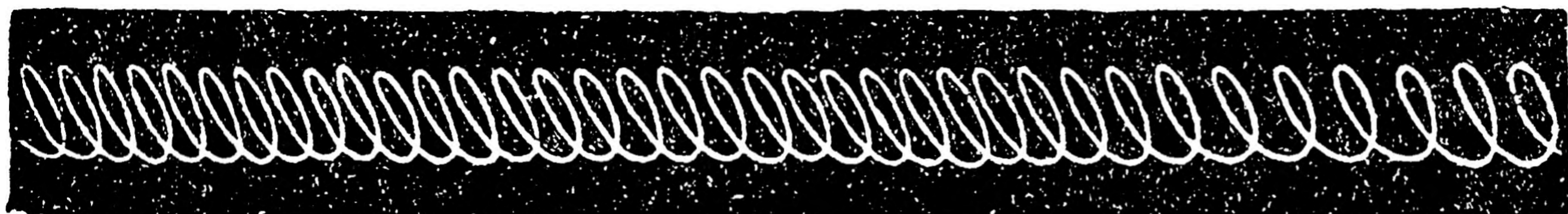


Фиг. 187.

тикальный же камертон колеблет его вертикально. Теперь оба камертона спокойны. Луч отражается от первого камертона ко второму и от этого последнего на экран, где рисуется светлым пятном. Теперь я заставляю звучать камертон, который стоит вертикально. Светлое пятно превращается в полосу в 1 метр длиною. Я заставляю звучать другой камертон, и полоса превращается в прекрасное кольцо *ор.* (фиг. 187), диаметром в 1 метр. Что мы здесь произвели?—То же самое, что происходило в нашем первом опыте с маятником. Мы заставили световой луч колебаться в одно и то же время по двум направлениям; случилось так, что конец колебания одного камертона совпал с наибольшею скоростью другого камертона.

То, что мы получили круг, было чистою случайностью, но это была счастливая случайность, которая убеждает нас, что мы имеем дело с явлением, подобным колебанию маятника. Я останавливаю оба камертона и заставляю снова звучать. Теперь появляется эллипс с наклонной осью. Продолжая повторять опыт, мы получим наконец прямую линию, которая докажет, что оба камертона достигают точки покоя в один и тот же момент. Соединяя этим способом колебания двух камертонов, мы получим все фигуры, которые описывал перед этим маятник.

Когда колебания двух камертонов совершенно одинаковы во всех отношениях, то фигура, которую они производят на экране, остается та же, она только уменьшается, по мере того как камертон приходит в покой. Но малейшее различие в отношении числа колебаний изменяет дело. Я старался перед лекцией привести эти оба камертона в такое согласие между собой, какое только было возможно, и поэтому мы получили такое малое изменение формы фигуры. Но, прибавляя небольшой груз к ножке одного из камертонов, напр., наклеивая немного воску, я нарушаю созвучие, и вы видите, как фигура медленно изменяется из прямой линии в наклонный эллипсис, затем переходит в круг, потом в эллипсис противоположного наклона, а далее превращается в прямую линию, составляющую прямой угол с первоначальной. Наконец в обратном порядке через ту же серию фигур возвращается к первоначальной прямой. Интервал между двумя последовательными тождественными фигурами есть



Фиг. 188.

время, в течение которого один камертон опережает другой на целое колебание. Нагружая камертон сильнее, я произвожу более быструю смену прямых линий эллипсисов и кругов. Часто блестящая кривая представляет кажущуюся стереоскопическую пластичность, так что нам представляется, будто мы видим твердое металлическое кольцо, доведенное до белого каления.



Фиг. 189.

Поворачивая зеркало камертона T на некоторый угол, я превращаю целый круг в светящуюся спираль (фиг. 188). Тот же опыт с изменением фигур, происходящим вследствие нарушения созвучия между камертонами, дает спираль различной ширины (фиг. 189)¹⁾.

Мы должны сравнить теперь колебания двух камертонов, из которых один колеблется вдвое скорее другого, т.-е. найти фигуру, соответствующую соединению тона с его октавой. Чтобы подготовиться к механической части нашей задачи, мы должны снова возвратиться к нашему маятнику, потому что его также можно заставить по одному направле-

¹⁾ Эта фигура соответствует интервалу 15 : 16. Этими фигурами я обязан превосходному парижскому механику Кенигу.

нию колебаться вдвое быстрее, чем по другому. Посредством сложного механического устройства можно было бы осуществить такое колебание в точности. Но я обращусь к более легкому способу, хотя и не столь точному. Я помещаю проволоку нашего маятника между двумя неподвижными горизонтальными стеклянными брусками ab и ab' (фиг. 190), отстоящими друг от друга на $2\frac{1}{2}$ см. Бруски расположены приблизительно на расстоянии 2 метров над грузом маятника. Вся длина маятника равна 8 метрам, так что бруски расположены на расстоянии $\frac{1}{4}$ всей длины маятника. Я отвожу маятник по направлению брусков в сторону и опускаю его. Он колеблется свободно взад и вперед по направлению брусков. Я задерживаю его и отвожу теперь перпендикулярно к прежнему направлению. Теперь может колебаться только длина маятника, равная 2 метрам, а по законам маятника маятник в 2 м. колеблется с двойною скоростью в сравнении с маятником в 8 метров.

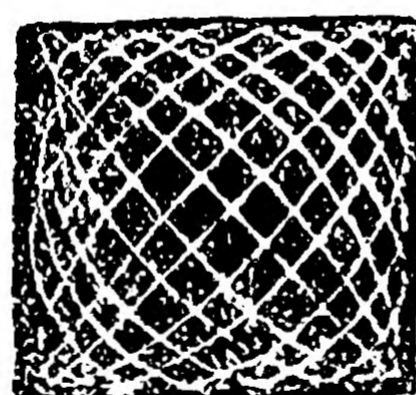
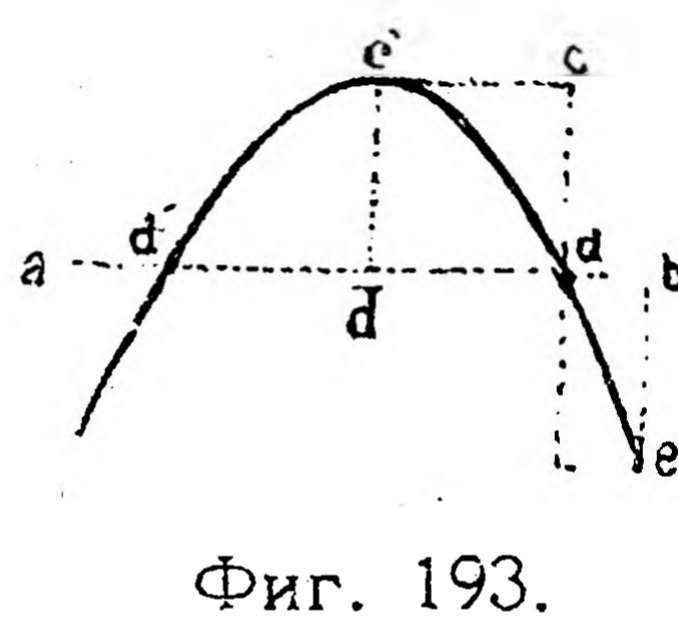
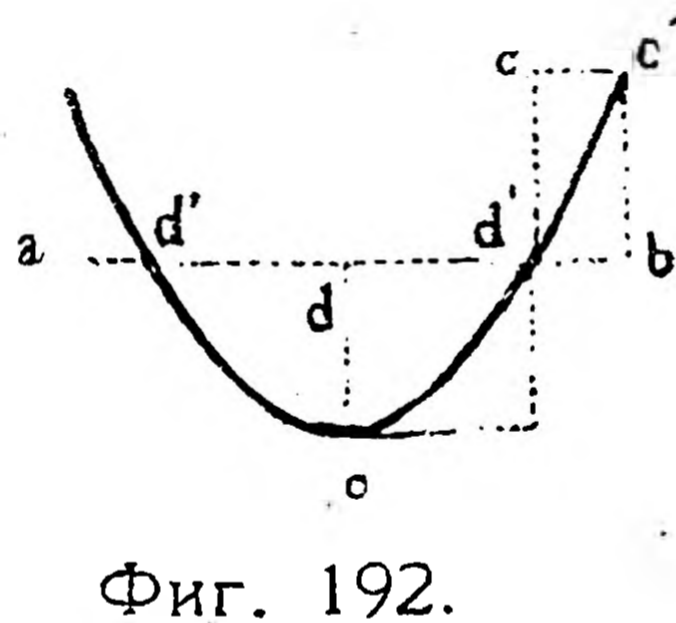
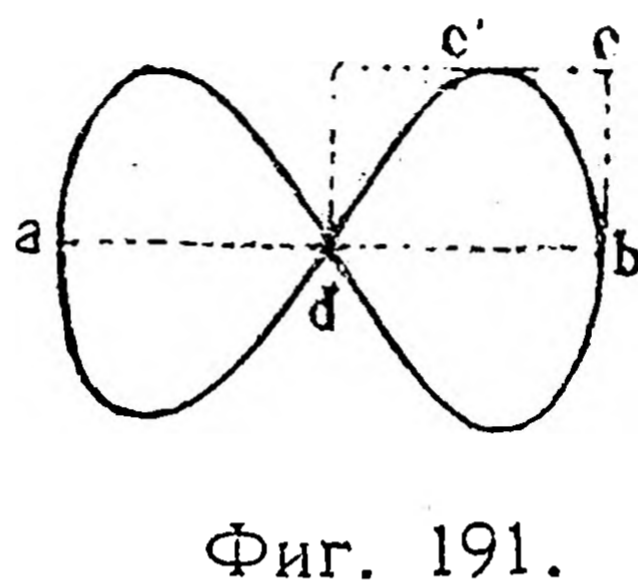
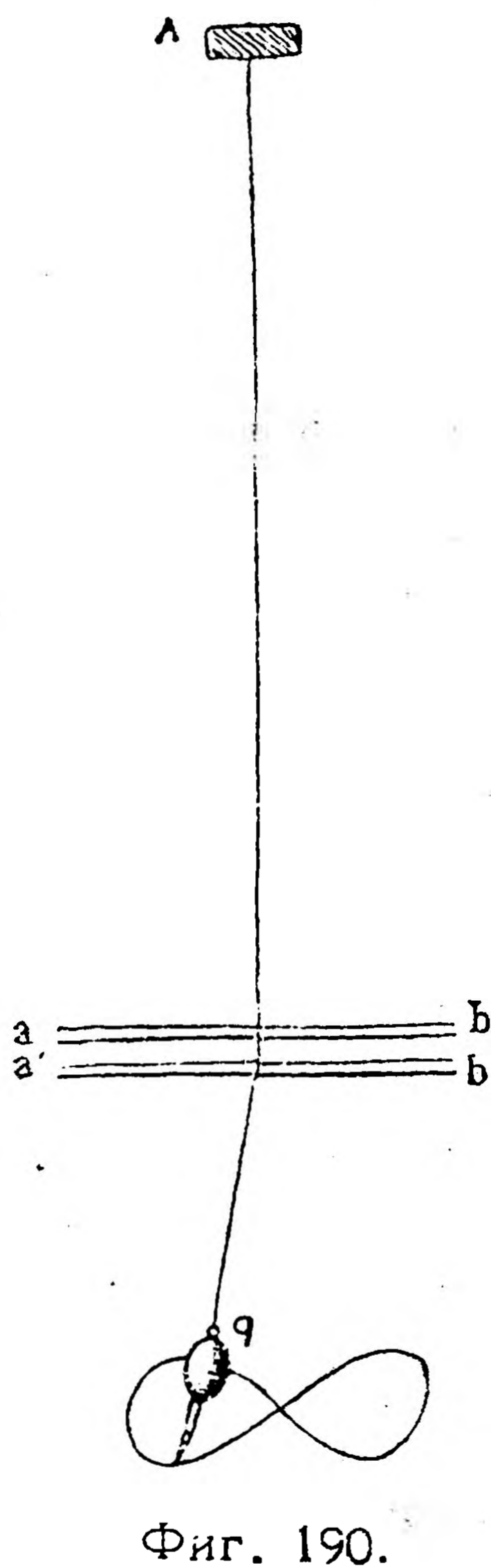
Для того, чтобы показать вам фигуру, которую произведет соединение этих двух колебаний, я прикрепил к грузу кисточку из верблюжьей шерсти, которая слегка трет по стеклу, положенному на черную бумагу. Я насыпаю на стекло немного серебряного песка, и когда маятник колеблется весь как целое, то кисть сметает песок по направлению прямой линии, обозначающей амплитуды колебаний. Пусть ab (фиг. 191) будет эта линия, описываемая в течение секунды. Когда маятник достигает предела колебания в точке b , пусть он получит боковой удар, который переведет его в точку c в течение четверти секунды. Если бы только один этот удар действовал на маятник, то в течение полу-секунды он дошел бы до точки c и вернулся бы обратно к b . Но в настоящих условиях на него действует также сила, движущая его по направлению к точке d , которой он должен достичь в течение полу-секунды. Обе силы производят таким образом то, что маятник описывает кривую $bc'd$. Точно также в течение времени, которое длинный маятник употребляет для того, чтобы пройти от d к a , короткий может пройти взад и вперед половину своего пути. Оба маятника достигают таким образом точки a в один и тот же момент, а для этого маятник должен описать нижнюю кривую между a и d . Ясно, что обе кривые повторяются затем на противоположных сторонах между a и b и что соединение обоих колебаний маятника выразится окончательно фигурой восьмерки, которая представлена на рисунке (фиг. 190) и которую вы видите теперь перед собой на песке.

Та же фигура получится, если боковой удар будет дан маятнику в точке покоя d .

Я выше принимал, что для полного колебания маятник употребляет одну секунду. Допустим, что $\frac{3}{4}$ секунды уже прошло и маятник находится в точке d' (фиг. 192) на своем пути к b . Дадим ему теперь боковой удар, который должен в течение $\frac{1}{4}$ секунды привести его в точку c . Длинный маятник должен в это время пройти от d' к b . Оба требования будут следовательно удовлетворены, если маятник в конце секунды будет находиться в точке c' . Для достижения ее он должен описать кривую $d'c'$. К концу следующей четверти секунды он вернется тем же путем к точке d'' . Для того, чтобы пройти от d' к d , он должен употребить новую

четверть секунды; в этот момент малый маятник должен достичь противоположного конца своего пути. Оба условия будут удовлетворены тем, что маятник окажется в точке e . Таким образом мы получим часть кривой $c'e$, которая повторится и по левую сторону точки e , так что вся кривая будет иметь вид, изображенный на фиг. 192. Эта кривая называется в геометрии параболою, изображенная же на фиг. 161 восьмерка—лемнискатою.

Мы принимали, что движение маятника, в то время как ему сообщается боковой удар, направлено к b . Если бы оно было направлено к a , то парабола имела бы обратный вид, как она изображена на фиг. 193. Если бы, наконец, боковой удар был дан не в то время, когда маятник проходит через точку своего покоя, и не в то, когда он проходит через точку, соответствующую трем четвертям или одной четверти времени его

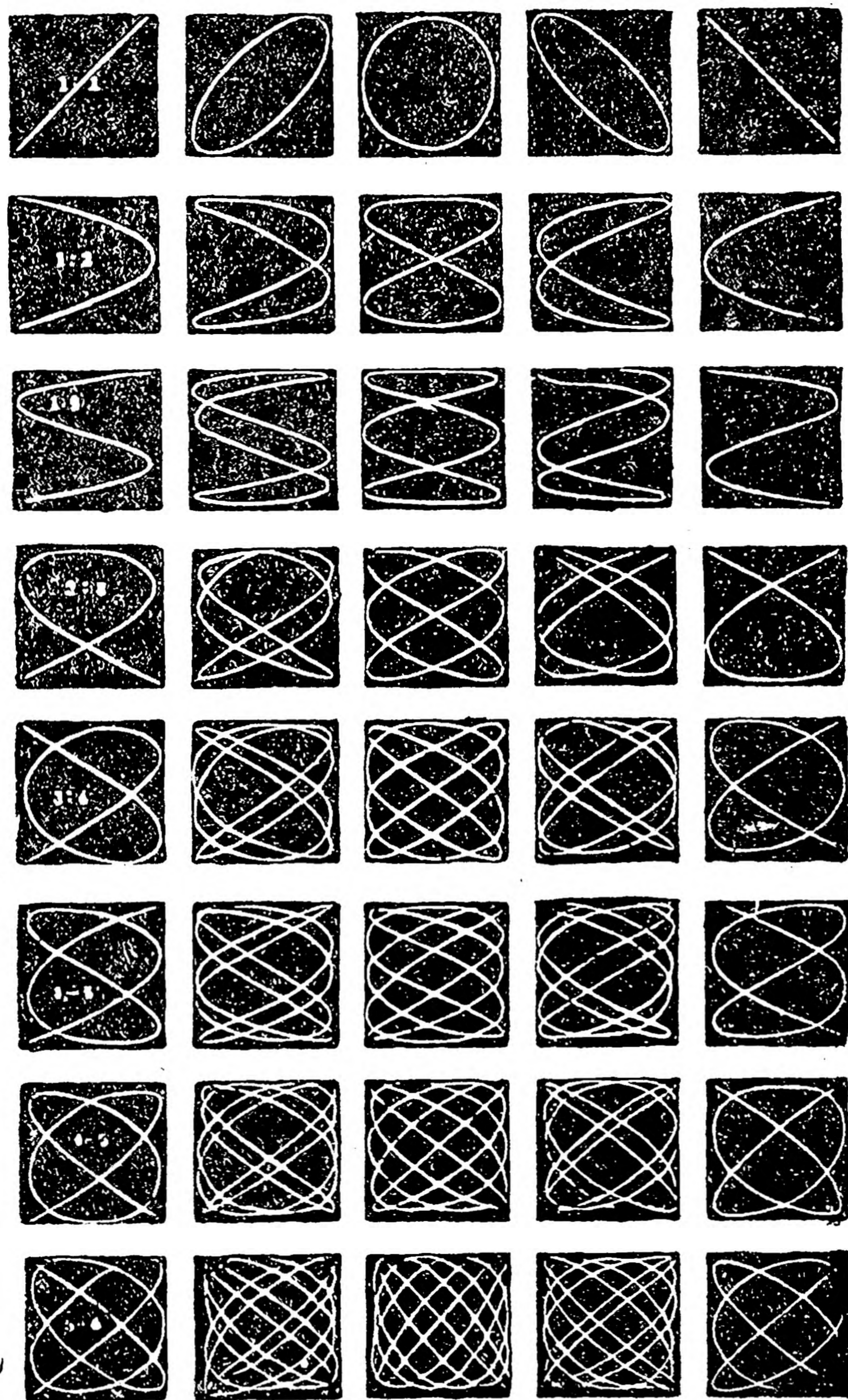


Фиг. 194.

колебания, а в какой-нибудь другой точке линии ab , то мы бы не получили ни параболы, ни лемнискаты, а получили бы искривленную лемнискату, направление которой зависело бы от того направления, в котором дан боковой толчок.

Теперь мы приготовлены к осмысленному наблюдению соединенного колебания двух камертонов, из которых один дает октаву другого. Я оставляю вертикальный камертон T (фиг. 187) в прежнем положении и помещаю против него другой горизонтальный, вибрирующий с удвоенною скоростью. Когда я смычком заставлю их звучать, то они воспроизводят

движение, подобное тому, которое только-что производил перед нами маятник, — получаем на экране правильную лемнискату. Ее правильность доказывает, что перед лекцией камертоны подобраны правильно и что колебания их в точности относятся как 1 : 2. Я останавливаю их и пускаю снова. Теперь вы видите искривленную лемнискату. Я задерживаю снова



Фиг. 195.

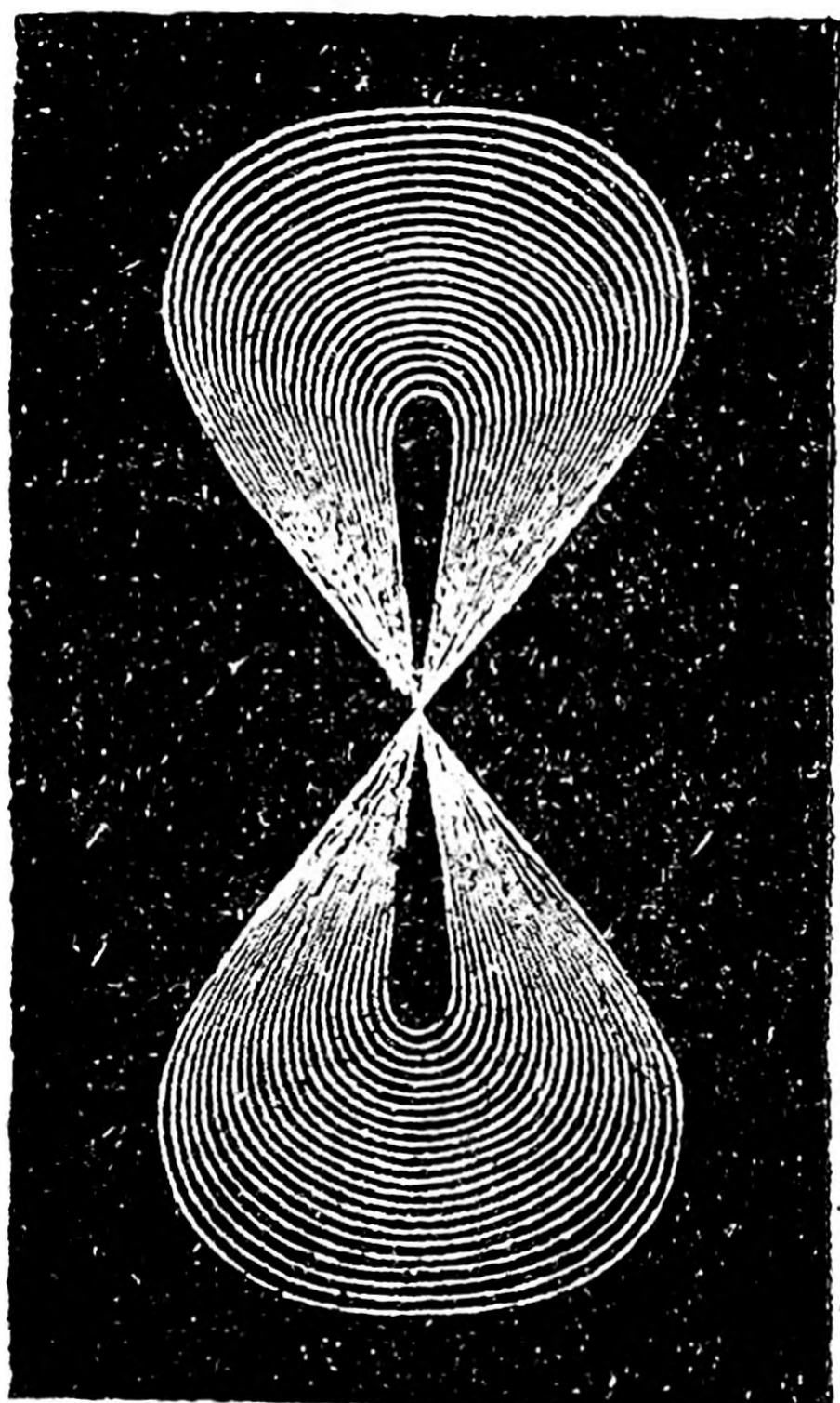
и после нескольких попыток получаю параболу. Каждый раз получающаяся кривая остается неизменною. Но вот я прилепляю немного воска к одному из камертонов, и кривая не остается постоянною, а изменяется из правильной лемнискаты в искривленную и потом в параболу, из которой снова переходит в лемнискату. Увеличивая разницу между камертонами, я могу как угодно увеличить скорость этих переходов.

Я беру теперь два камертона, колебания которых относятся как 2 : 3. Обратите прежде всего внимание на поразительное постоянство фигуры, при этом получающейся. Но я прилепляю воском эту небольшую монету к одному из камертонов; постоянство фигуры нарушается и она колеблется туда и сюда. При интервалах 3 : 4, 4 : 5 и 5 : 6, фигуры ста-

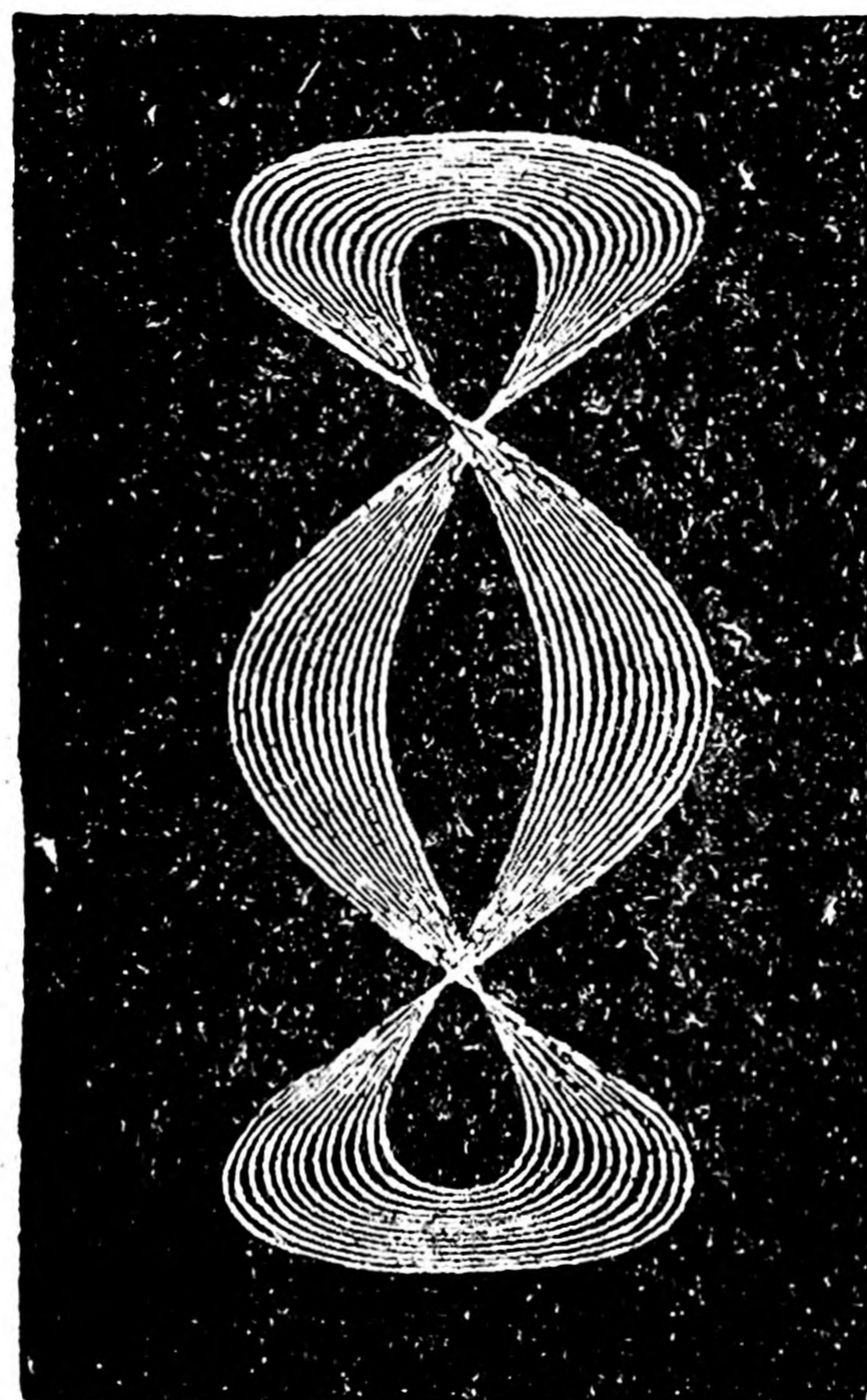
новятся все запутаннее. Фигура последнего соединения 5 : 6 столь запутана, что нужно употребить весьма узкий луч света для того, чтобы она была ясна. Если мы увеличим расстояние между камертоном и экраном, то это поможет нам разобраться в запутанности фигур.

Когда фигура вполне образовалась, то числа загибов или петель по вертикальной и по горизонтальной сторонам выражают отношение соединенных вибраций. При октаве, напр., мы имеем две петли в одном направлении и одну в другом; в квинте две петли в одном направлении и три в другом. Когда соединенные вибрации относятся как 1 : 3, то и светлые петли также относятся как 1 : 3. Изменения, каким подвергаются некоторые из этих фигур, когда камертоны настроены неточно, очень интересны. Так, напр., при отношении 1 : 3 по временам трудно бывает освободиться от представления, что перед вами фигура из прутьев раскаленного добела металла. Кажется, как будто это—выпуклая фигура, имеющая глубину, а между тем она получена на плоской поверхности.

Фиг. 195 есть диаграмма этих прекрасных фигур, содержащая соединения от 1 : 1 до 5 : 6. Во всех случаях показаны характеристические



Фиг. 196.



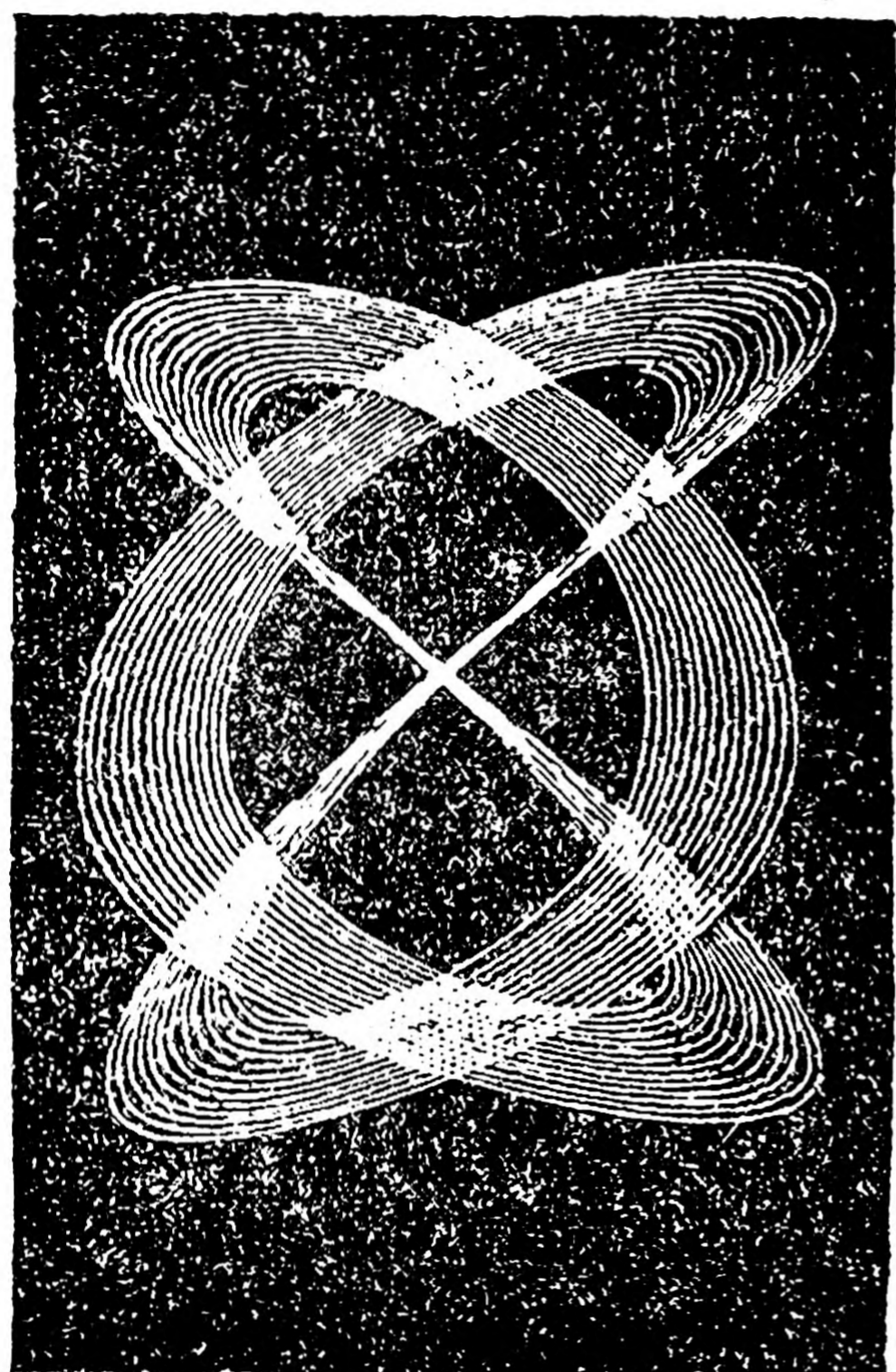
Фиг. 197.

фазы вибрации, через которые проходит каждая фигура, когда интервал между двумя камертонами не вполне точен. Я здесь привожу еще (фиг. 194) две фазы соединения 8 : 9.

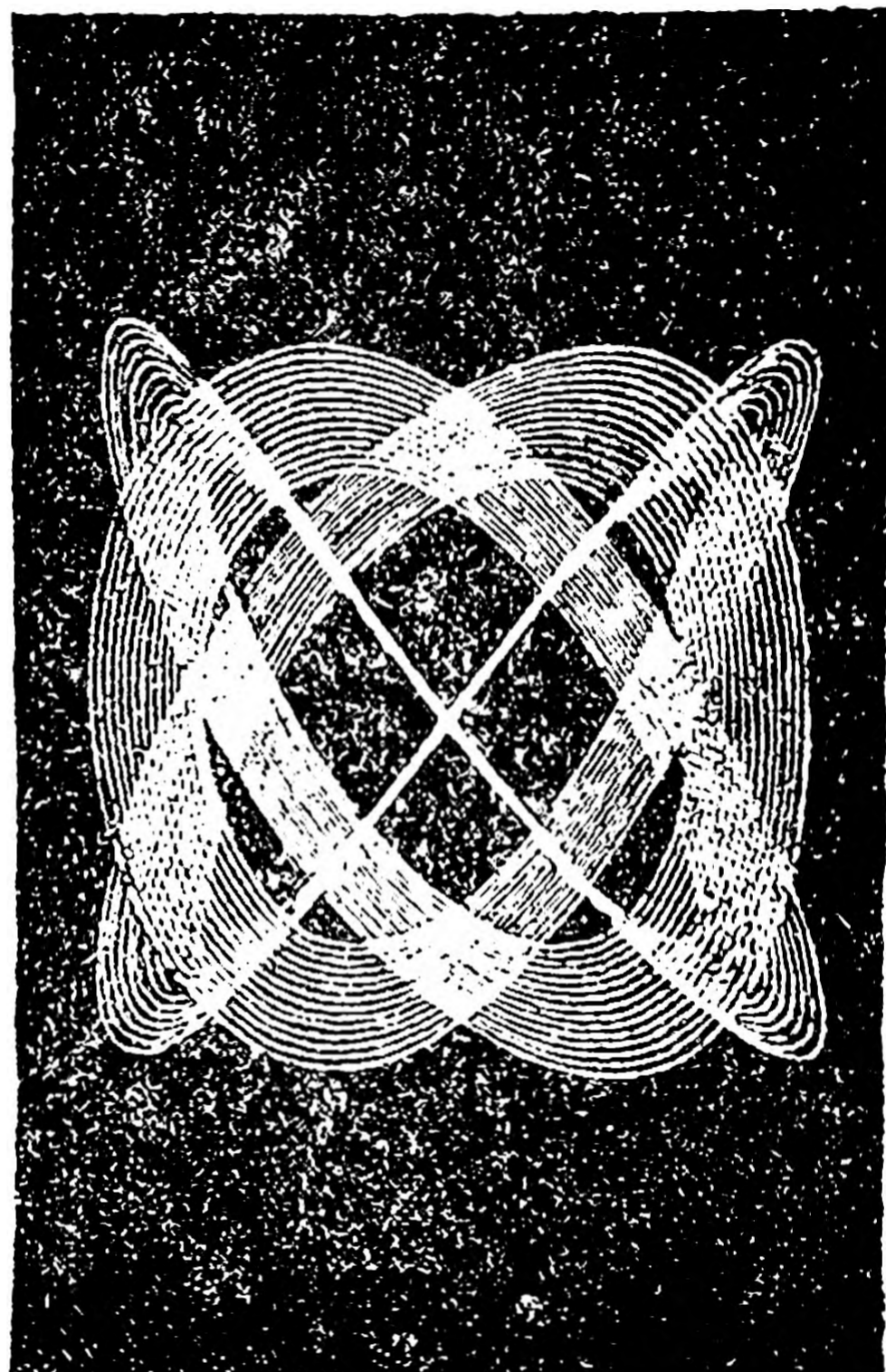
К этим изображениям перпендикулярных между собою вибраций я прибавляю еще два другие (фиг. 196 и 197) из прекрасной серии, полученной Губертом Айри при помощи сложного маятника. Его опыты были описаны в «Nature» 17 августа и 7 сентября 1871 г. Как показывают их петли, фигуры соответствуют октаве и двенадцатой.

Но самый поучительный аппарат для соединения перпендикулярных вибраций устроен Тисли. Фиг. 198 и 199 представляют копии фигур, по-

лученных им путем соединенного действия двух отдельных маятников; скорости вибраций, соответствующие этим фигурам, выражаются отношением 2 : 3 для одной и 3 : 4 для другой. Штифт, который чертит эти фигуры, приводится в движение одновременно двумя прутами, которые соединены с маятниками в местах их привеса. Эти прутья лежат в двух плоскостях вибрации, перпендикулярных к маятнику и одна к другой. В том месте, где они пересекаются, находится штифт. Посредством осе-



Фиг. 198.



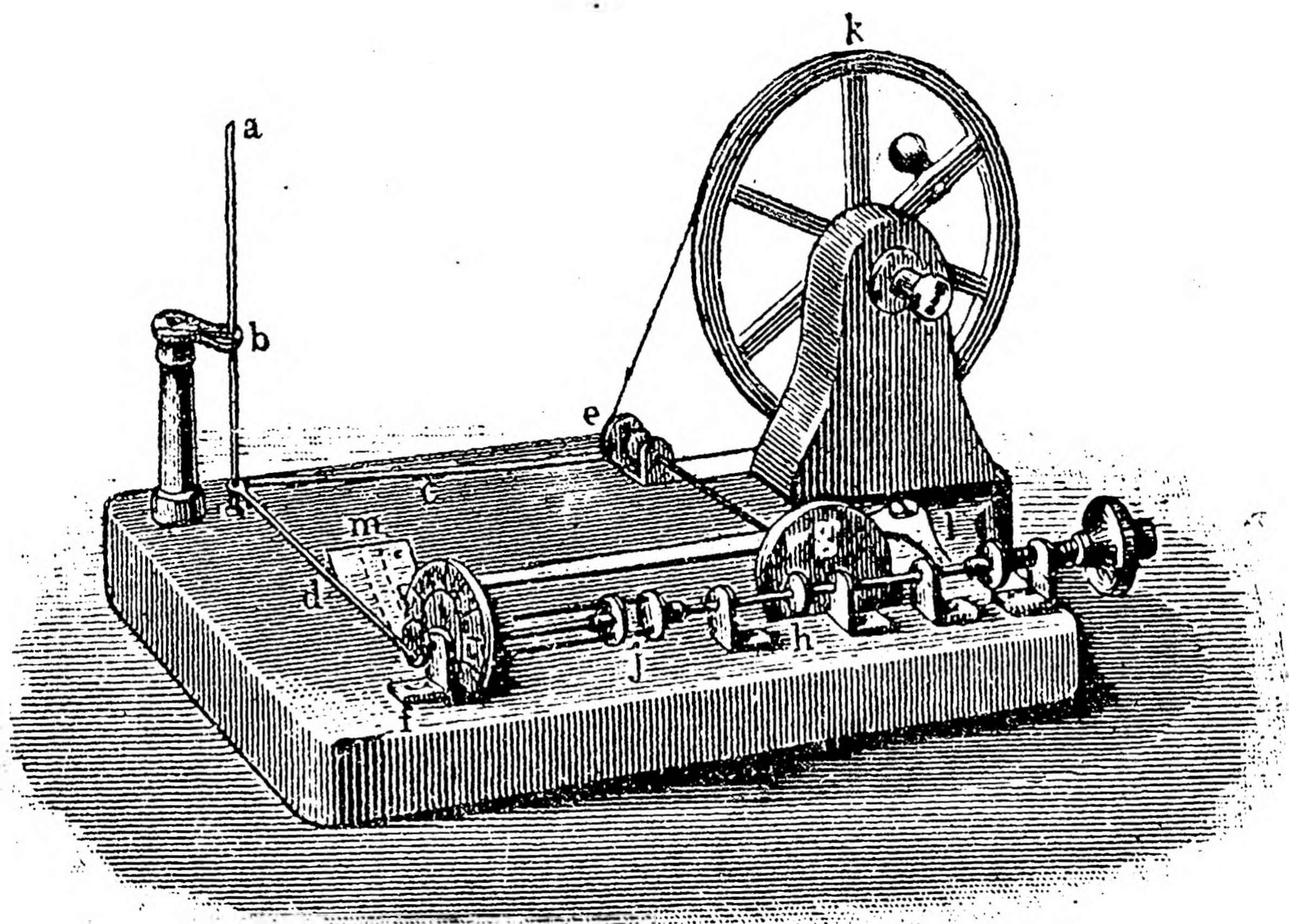
Фиг. 199.

бого рода шарового сочленения прутья могут двигаться с минимальным трением во всех направлениях, а скорость их качаний может быть изменяема передвиганием подвижного груза. Фигуры рисуются или чернилами на бумаге или, если имеется в виду проектирование на экране, острием штифта на закопченном стекле. Когда маятники, начертивши всю фигуру, возвращаются к своей исходной точке, то амплитуда становится несколько меньше. Вторая экскурсия их будет поэтому меньше, чем первая, а третья меньше, чем вторая, и т. д. Отсюда и получается ряд тех тонких линий, обнимающих постепенно уменьшающиеся площади, которые представлены на этих прекрасных фигурах¹⁾. Аппарат Тисли делает большую честь его искусному конструктору.

Сэр Чарльз Уитстон устроил небольшой, но очень целесообразный аппарат для соединения перпендикулярных вибраций. Я представляю здесь (фиг. 200) рисунок и описание этого прекрасного маленького инструмента, доставленное мне его знаменитым изобретателем. На этой фигуре *a* есть стальной прут, отполированный на верхнем конце, так чтобы он отражал светлую точку; этот прут движется в шаровом сочленении при *b* таким образом, что может принять какое угодно положение.

¹⁾ Несколько из красивых фигур этого рода я обязан Линаму, профессору Yale College.

Его нижний конец соединен с двумя стержнями c и d , перпендикулярными один к другому; другой конец одного стержня соединен с окружностью диска e , а другого—с окружностью диска f . Ось диска e несет на противоположном конце другой большой диск g , сообщающий движение маленькому диску h , помещенному на оси, которая несет диск j ; и, смотря по тому, помещен ли этот маленький диск h ближе или дальше от центра диска g , он сообщает различное относительное движение диску f . При помощи гайки и винта i можно привести диск h в любое положение между центром и окружностью большого диска g . При таком устройстве, если равномерно вращать колесо k , прут a движется взад и вперед диском e в одном направлении, а диском f в другом, перпендикулярном направлении и притом с различной относительной скоростью. Таким образом конец прута можно заставить описывать и представлять



Фиг. 200.

оптически все прекрасные акустические фигуры, производимые соединением вибраций разных периодов и в перпендикулярных направлениях. Рычаг l , упирающийся в гайку i , указывает на шкале j числовое отношение двух систем вибраций¹⁾.

Я заключаю эти замечания о комбинации перпендикулярных вибраций кратким указанием на аппарат, устроенный Донкином в Экзетер Колледж в Оксфорде и описанный в «Proceedings of the Royal Society», v. XXII, p. 196. В его конструкции видно соединение механиче-

¹⁾ Санг в Эдинбурге, насколько мне известно, первый разработал этот предмет аналитически.

ского остроумия с большим искусством. Я видел аппарат только в виде деревянной модели, прежде чем он вышел из рук изобретателя, и пришел в восторг от его действия. Его делают теперь Тисли и Спиллер¹⁾.

ОБЗОР ДЕВЯТОЙ ЛЕКЦИИ.

Разделяя струну, Пифагор определил консонантные интервалы в музыке и доказал, что чем проще отношение между двумя частями, на которые разделяется струна, тем совершеннее гармония звуков, издаваемых этими двумя частями струны. Последующие исследователи показали, что струны действуют таким образом вследствие отношения их длины к скорости их вибраций.

Двойная сирена наглядно представляет этот закон консонанса. Самая совершенная гармония есть унисон, при котором отношение числа вибрации есть 1 : 1. Затем следует октава, где вибрации относятся как 1 : 2. Потом идут последовательно квинта с отношением 2 : 3, кварта с отношением 3 : 4, большая терция с отношением 4 : 5 и малая терция с отношением 5 : 6. Интервал тона, выражающийся отношением 8 : 9, есть диссонанс, а интервал в полутон есть шероховатый режущий диссонанс.

Музыкальный интервал не зависит от абсолютного числа вибраций двух тонов, а определяется только отношением двух чисел вибраций.

Пифагорейцы приписывали приятное действие консонантных интервалов числу и гармонии и связывали его с «музыкой сфер». Эйлер объяснял консонантные интервалы свойством человеческого ума, которому, по его мнению, приятны простые числовые отношения. Ум любит порядок, но только такой порядок, который нетрудно было бы заметить и разобрать. Вот это удовольствие и доставляют ему простые отношения в музыке.

Исследования Гельмгольца доказали, что настоящею причиною диссонанса в музыке является быстрое следование биений.

При помощи двух поющих пламен, из которых высоту одного можно изменять передвижением подвижной трубки, можно произвести биения любой степени медленности или быстроты. Начиная биениями столь ме-

¹⁾ Фигуры, получаемые от наложения друг на друга различных звуковых колебаний (аккорды, шумы, импульсы), просто и наглядно демонстрируются при помощи прибора Фрелиха. Последний состоит из колеблющейся перепонки (мембраны), снабженный легким зеркальцем. Свет от фонаря направляется на зеркальце, отражается и падает далее на зеркальный барабан, отбрасывающий на экран светлое пятно. При вращении барабана пятно растягивается в светлую полосу. Если вблизи мембраны производить звуки, то вся сумма отдельных волн одновременно передается зеркальцу и вместо полосы на экране появляется светлая зигзагообразная линия; характер ее зависит от высоты тона и силы слагаемых колебаний. Особенно поучительно также наблюдать здесь влияние различных тембров и гласных звуков.

дленными, что мы можем даже считать их, и, постепенно увеличивая их быстроту, мы достигаем без нарушения непрерывности до явного диссонанса.

Но, чтобы вполне понять эту теорию, мы должны были обратиться к устройству человеческого уха. Прежде всего мы встречаем барабанную перепонку, которая представляет наружную границу ушного барабана. Через барабан идет ряд маленьких косточек, называемых *м о л о т о к*, *н а к о в а л ь н я*, *с т р е м я*; последняя примыкает ко второй перепонке, составляющей внутреннюю границу барабана. За этой перепонкой находится лабиринт, наполненный водою и выстланный перепонкой, покрытой волокнами слухового нерва.

Каждый толчок, получаемый барабанной перепонкой, передается через ряд косточек противоположащей перепонке, а от нее лабиринту и далее слуховому нерву.

Но передача совершается не прямо. Вибрации прежде всего воспринимаются известными телами, которые могут совибрировать с ними. Эти тела тройкого рода: отолиты—небольшие кристаллические частички, волоски Макса Шульце и волокна Кортиева органа. Последние суть во всех отношениях и по всем своим действиям струнный инструмент необыкновенной сложности и совершенства, помещенный в ухе.

Относительно настоящего нашего предмета струны органа Корти играют особенно важную роль. Чтобы одна струна отвечала на другую струну, для этого необходим совершенный унисон; по известная степень ответа является и в непосредственной близости к унисону.

Поэтому каждая из двух струн, немного разнящихся между собою в высоте тона, может заставить совибрировать с собою третью струну промежуточной высоты тона. И если обе струны звучат вместе, то биения, производимые ими, сообщаются посредствующей струне.

Таким же образом и в органе Корти, когда отдельные звуки различной высоты, или лучше, когда вибрации различной скорости касаются его волокон, то этим вибрациям отвечают, т.-е. совибрируют с ними те отдельные волокна, периоды вибраций которых совпадают с их периодами. И когда два звука, близкие между собою по высоте, производят биения, то они оба действуют на промежуточное волокно Корти, которое и отвечает на эти биения.

В средней и высших частях музыкальной шкалы биения бывают самые резкие и неприятные, когда они следуют одно за другим со скоростью 33 в секунду. Когда же скорость возрастает до 132 в секунду, то они перестают быть заметными.

Совершенный консонанс известных музыкальных интервалов получается вследствие отсутствия биений. Несовершенный же консонанс других интервалов происходит от их присутствия. И при этом верхние гармонические тоны играют чрезвычайно важную роль. Потому что хотя основные тоны и могут звучать вместе без заметной шероховатости, но их верхние тоны могут относиться между собою таким образом, что произведут резкие и неприятные биения. Строгий анализ предмета доказывает, что интервалы, для выражения которых требуются большие числа,

всегда сопровождаются такими верхними тонами, которые производят бнения, между тем как при интервалах, выражаемых малыми числами, бнения почти отсутствуют.

Сделанное Гельмгольцем графическое изображение консонансов и диссонансов музыкальной шкалы дает поразительное доказательство такого объяснения.

Лиссажу придумал очень красивую оптическую иллюстрацию музыкальных интервалов. Соответственно каждому интервалу получается определенная фигура, производимая соединением его вибраций.

Соединение вибраций также прекрасно иллюстрируется аппаратом, устроенным Уитстоном, Гербертом Айри и Дошкином, и наконец изящным аппаратом—маятником Тисли.

ПРИЛОЖЕНИЯ

О ВЛИЯНИИ МУЗЫКАЛЬНЫХ ЗВУКОВ НА ПЛАМЯ СТРУИ СВЕТИЛЬНОГО ГАЗА.

Джона Леконта¹⁾.

После того как я прочитал прекрасную статью Джона Тиндаля О звуках, производимых горением газов в трубках, мне случилось быть в обществе из восьми человек, собравшихся после чаю послушать музыку. Несколько больших трио Бетховена исполнялись на трех инструментах, рояли, скрипке и виолончели. Из кирпичной стены близ рояля выступали две газовых горелки в форме рыбьего хвоста. Обе они горели замечательно спокойно, при чем окна были закрыты и воздух в комнате был тоже спокоен. Тем не менее было очевидно, что одна из них находилась под давлением, достаточным для того, чтобы заставить ее двигаться и шуметь.

Вскоре после того как началась музыка, я заметил, что пламя второй горелки обнаруживало пульсации в высоту, которые были совершенно одновременны с слышавшимися биениями.

Это явление заметили все находившиеся в комнате и особенно тогда, когда раздавались сильные тоны виолончели. Особенно интересно было наблюдать, как даже трели этого инструмента в совершенстве отражались на плоскости пламени. Глухой мог бы видеть здесь гармонию. К концу вечера, когда потребление газа в городе уменьшилось, а потому давление его увеличилось, явление стало еще явственнее. Прыгание пламени постепенно возрастало, стало несколько неправильным и наконец пламя начало непрерывно шуметь и двигаться, издавая характерный звук, указывавший на то, что газ выходит в большем количестве, чем какое может быть потреблено горением. Я затем убедился опытом, что явление происходило только тогда, когда приток газа регулировался таким образом, чтобы пламя приближалось к состоянию шума и движения. Я также посредством опыта убедился, что это явление не может быть вызвано сотрясениями пола и стен от нескольких ударов в них. Поэтому очевидно, что пульсации пламени происходили не от прямых вибраций, доходивших через посредство стен комнаты до горелок, но были произведены прямым влиянием воздушных звуковых волн на горящую струю газа.

¹⁾ Эта превосходная статья была исходным пунктом для приведенных в лекциях VI и VII опытов с чувствительными пламенами; исследования же Томаса Юнга и Савара послужили исходным пунктом для моих опытов с дымовыми и водяными струями.

В опытах Шафгоча и проф. Тиндаля очевидно, что дрожание поющего пламени внутри стеклянной трубки, производимое голосом или сиреной, было явлением аналогичным тому, которое происходило при моих наблюдениях без содействия трубки. В моих опытах приток газа регулировался таким образом, чтобы в пламени была тенденция двигаться и шуметь или издавать поющий звук. При этих обстоятельствах сильные воздушные пульсации, совершающиеся в правильные промежутки, были достаточны для того, чтобы вызвать одновременные с ними колебания в высоте пламени. Вероятно, действие было бы еще явственнее, если бы тоны музыкального инструмента были близки к унисону с теми звуками, которые произвело бы пламя при небольшом увеличении той быстроты притока газа, какая требуется для произведения явления шума и движения пламени. Этот пункт можно было бы проверить опытом.

Подобно тому как в опытах Тиндаля над струею газа, горящего в трубке, хлопанье руками, крик и т. п. были достаточны для того, чтобы «молчащее пламя» обратить в «поющее», и в нашем случае неправильные звуки не оказывали заметного влияния. Кажется необходимо, чтобы импульсы суммировались, накоплялись, для того чтобы произвести заметное действие.

Что касается того, каким образом горение газа внутри трубок производит звуки, то все согласны, что объяснение, данное проф. Фарэдем в 1818 г., в сущности верно. Известно, что он приписывал эти звуки последовательным взрывам, происходящим от периодического соединения атмосферного кислорода с вытекающей струей газа. Когда я читал удивительные исследования проф. Плато (3-я серия) по «Теории изменений претерпеваемых струями жидкостей, вытекающими из круглых отверстий и находящимися под влиянием вибрационных движений»¹⁾, у меня блеснула мысль, что явления, которые мне удалось наблюдать, суть не что иное, как частный случай действий звука на всякого рода жидкие струи. Последующие размышления только укрепили во мне это первое впечатление.

Прекрасные исследования Феликса Савара о влиянии звуков на водяные струи представляют результаты столь аналогичные во многих пунктах с действиями звуков на струю горящего газа, что невольно является вопрос, не могут ли они быть отнесены к общей причине. Чтобы осветить этот вопрос надлежащим образом, я приведу некоторые результаты экспериментов Савара.

Отвесно вытекающие водяные струи претерпевают следующие изменения под влиянием вибраций:

1. Непрерывная часть струи укорачивается; сама струя разбивается на отдельные капли ближе к отверстию, чем в том случае, когда она находится под влиянием вибраций.

2. Все капли воды, когда они отделяются от конца непрерывной части, делаются плоские или сплюсциваются попеременно, то в вертикальном, то

¹⁾ „Phil. Mag.“ S. 4, vol. XIV. p. et seq. July 1857.

в горизонтальном направлении и вследствие их поступательного движения кажутся глазу правильно расположенными рядами максимальной и минимальной толщины или пучностями и узлами.

3. Указанные изменения становятся более резко выраженными и правильными, когда по близости звучит тон, составляющий унисон с тем тоном, который был бы произведен ударом прерывистой части струи о натянутую перепонку. Непрерывная часть укорачивается и пучности становятся больше.

4. Если тон влияющего инструмента очень близок к унисону, то непрерывная часть струи попеременно то удлиняется, то укорачивается, и биения, которые совпадают с этими изменениями, слышны для уха.

5. Другие тоны действуют на струю менее сильно, а некоторые не производят никакого заметного действия.

Когда струя вытекает наклонно, так что прерывистая часть является в виде снопа в одной вертикальной плоскости, тогда Савар нашел:

а) Что под влиянием вибраций определенного периода этот сноп разделяется на две отдельные струи, и каждая из них имеет правильно расположенные пучности и узлы; иногда же при другом периоде сноп дает три струи.

б) Тон, который производит наибольшее укорачивание непрерывной части, всегда сводит сноп в одну струю, представляющую собою совершенно правильную систему пучностей и узлов.

В последнем мемуаре Савара, посмертном и представленном парижской академии наук в 1853 г. Араго ¹⁾, указаны замечательные акустические явления, относящиеся к музыкальным тонам, получающимся при истечении жидкостей через короткие трубки. При соблюдении известных условий и предосторожностей (которые подробно описаны этим искусным экспериментатором) истечение жидкости дает ряд последовательных музыкальных тонов большой силы и своеобразного качества, отчасти похожего на человеческий голос. Что эти тоны производятся не падающими каплями жидкой струи, было доказано тем, что струя падала в сосуд с водою, и отверстие, из которого вытекала струя, находилось ниже поверхности воды в этом сосуде. В этом случае жидкая струя должна была быть непрерывною; но тем не менее тоны получались. Эти неожиданные результаты были вполне подтверждены новыми опытами проф. Тиндаля ²⁾.

По исследованиям Плато все явления влияния вибраций на струи жидкости могут быть сведены на столкновения между вибрациями и «формообразующими силами» (*forces figuratrices*). Если признать тот физический факт—а он кажется неоспорим—что жидкий цилиндр достигает границы устойчивости тогда, когда отношение между

¹⁾ „Comptes Rendus.“ August 1853. Также „Phil. Mag.“ S. 4, vol. VII p 186, 1854.

²⁾ „Phil. Mag.“ S. 4 vol. VIII. p. 74, 1854.

его длиною и диаметром есть отношение 22 к 7, то становится почти физической необходимостью, чтобы струя принимала строение, указанное в наблюдениях Савара. Точно также кажется в высшей степени вероятным, что жидкая струя, на переходе от непрерывности к отдельным каплям, должна быть необыкновенно чувствительна ко всякого рода вибрациям. Нужно, однако, сознаться, что изящная и последовательная теория Плато не обнимает последнего опыта Савара, в котором музыкальные тоны производились струей воды, вытекавшей под поверхностью той же жидкости. Трудно себе представить, каким образом при данных условиях формообразующие силы могли бы произвести указанное явление. Этот интересный опыт скорее подтверждает первоначальную идею Савара, что вибрации, производящие звук, должны происходить в самом резервуаре и что причину их нужно искать в явлении истечения.

Чтобы применить принципы теории Плато к газообразным струям, мы должны отказаться от идеи несуществования молекулярного сцепления в газах. Разве у нас мало фактов, доказывающих, что между частицами газообразных масс существует сцепление? Разве отклонения от строгой точности как в законе Мариотта, так и в законе Гей-Люссака, в особенности в сжимающихся газах, как это показали удивительные опыты Реньо, не доказывают ясно, что гипотеза несуществования сцепления в газообразных телах ошибочна? Разве расширяющиеся кольца, поднимающиеся в то время, когда загораются в воздухе пузыри фосфористого водорода, не указывают на существование некоторой силы сцепления в газообразных продуктах горения (водяной пар), очертания которых обозначаются непрозрачной фосфорной кислотой. Кратко сказать, разве самая форма пламени в плоской горелке в виде «рыбьего хвоста» не доказывает, что между частичками выходящего газа должно существовать сцепление? Известно, что в этой горелке вытекающая единичная струя образовалась от соединения двух наклонных струй тотчас перед выходом газа? В результате этого и получается перпендикулярное плоское пламя. Как мог бы быть произведен такой результат взаимным действием двух струй, если бы здесь не играла роли сила сцепления? Не очевидно ли, что такое веерообразное пламя должно быть произведено теми же самыми причинами, какие производят те разнообразные и красивые формы водяных плоскостей, образующихся от взаимного действия водяных струй, которые получались в экспериментах Савара и Магнуса?

Если признать, что газы обладают молекулярным сцеплением, то кажется физически несомненным, что струи газа должны подчиняться тем же законам, как и струи жидкости. Вибрационные движения, возбужденные вблизи их, должны бы производить в них изменения, аналогичные с теми, какие указаны Саваром относительно водяных струй. Пламя или раскаленный газ представляют газообразное вещество в видимой форме, удивительно приспособленной для экспериментального исследования; и если она произведена струей, то должна быть сведена к принципам теории Плато. По этому взгляду пульсации или биения, которые я наблюдал в газовом пламени под влиянием музы-

кальных звуков, производятся столкновением между воздушными вибрациями и «формообразовательными силами» (как их называет Плато), которое вызывает периодические колебания плотности, зависящие от звуковых импульсов.

Если этот взгляд справедлив, то не следует ли нам изменить наши понятия о том, что в произведении музыкальных звуков посредством горящих струй газа принимают участие трубки? И не должны ли мы признать, что все горящие струи, точно так же как и водяные струи, расположены или склонны к звучанию, и что трубки просто только ставят их в положение благоприятное для образования звуков? Известно, что горящие струи, даже совершенно свободные, издают поющие звуки. Не производятся ли эти звуки последовательными взрывами, аналогичными тем, которые происходят в стеклянных трубках? Несомненно, что под влиянием молекулярных сил каждая причина, стремящаяся удлинить пламя, не ускоряя вытекания газа, должна сделать его прерывистым и таким образом произвести смешение газа с воздухом, необходимое для образования взрывов. Достаточно очевидно, что влияние труб так же, как и воздушных вибраций, составляет только благоприятное условие для этих явлений. Жемчужная линия «с ее рядом блестящих звезд», которую наблюдал проф. Тиндаль, исследуя при помощи движущегося зеркала пламя светильного газа, горящее в трубке, показывает, что пламя стало прерывистым, совершенно так же, как непрерывная часть водяной струи становится укороченною и разбивается на отдельные капли под влиянием звуковых пульсаций. Но я не стану подробнее разрабатывать этот очень интересный предмет, так как названный мною искусный физик обещал заняться подробным исследованием его. От такого остроумного естествоиспытателя мы можем ожидать самого основательного исследования этого явления во всех его отношениях. Но пока я желал бы обратить внимание ученых на взгляд, высказанный в настоящей статье, так как он объединяет несколько групп явлений и на него можно смотреть как на некоторое обобщение.

(Из «Silliman's American Journal for January», 1858).

ОБ АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАТИМОСТИ.

В 1822 г. 21-го и 22-го июня комиссия, назначенная Bureau des Longitudes, произвела знаменитый ряд опытов над скоростью звука. Были избраны две станции, одна в Вильжюифе, а другая в Монлери, обе к югу от Парижа и в расстоянии $18\frac{1}{2}$ килом. одна от другой. Прони, Матье и Араго были наблюдателями в Вильжюифе, а Гумбольдт, Бувар и Гей-Люссак в Монлери. На обеих станциях производились пушечные выстрелы зарядами иногда в 2, а иногда в 3 фунта пороху и скорость звука определялась по промежутку между появлением вспышки выстрела и тем моментом, когда донесется звук его.

При этом замечательном случае было замечено, что всякий выстрел, произведенный в Монлери, был очень явственно слышен в Вильжюифе, но гораздо большее число выстрелов в Вильжюифе не достигали Монлери. Если бы в это время был ветер и дул по направлению от Монлери к Вильжюифу, то ему и приписали бы причину замеченной разницы; но воздух был спокоен и, напротив, слабое течение воздуха направлялось от Вильжюифа к Монлери, т.-е. противоположно тому направлению, в котором звук был слышен лучше всего.

Разница в передаче звука по двум направлениям была так сильна, что 22 июня, когда каждый выстрел в Монлери был великолепно (à merveille) слышен в Вильжюифе, только один из двенадцати выстрелов, произведенных в Вильжюифе, был слышен, да и то слабо, в Монлери.

Араго в своем отчете ¹⁾ не пытался объяснить эту аномалию. Он выражается так: «Что касается столь резких различий в силе звука выстрела, смотря по тому, распространялся ли этот звук с севера на юг между Вильжюифом и Монлери, или с юга между этой последней станцией и первой, то мы в настоящее время не будем заниматься объяснением их, потому что не могли бы представить читателю ничего другого кроме догадок, ничем не доказанных» ²⁾.

Несколько лет тому назад я попытался поставить этот предмет на почву опыта. Первым моим делом было убедиться, может ли чувствительное пламя, описанное в моем мемуаре в «Philosophical Transactions», быть употреблено с пользою в опытах над взаимной обратимостью пути звука и предмета, на который падает звук. Чувствительное пламя, обыкновенно употреблявшееся мною, имело от 45 до 60 см. вы-

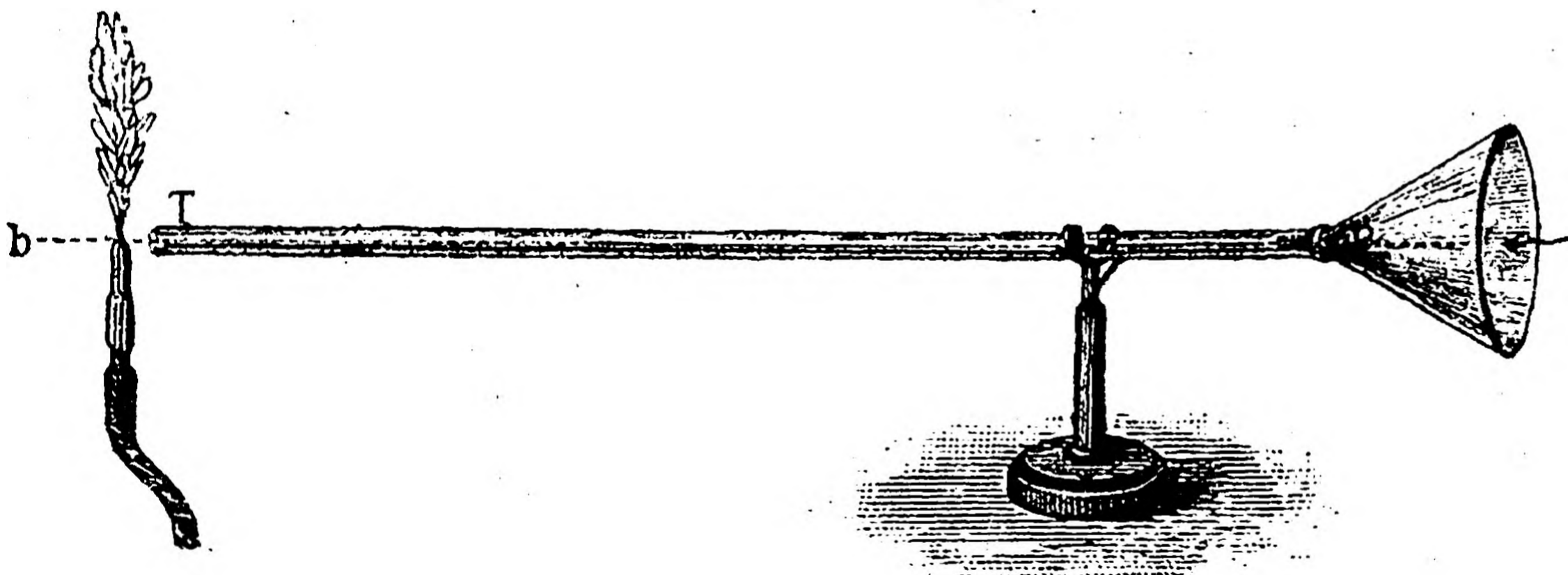
¹⁾ „Researches in Chemistry and Physics,“ p. 484.

²⁾ „Connaissance des Temps“, 1825, p. 370.

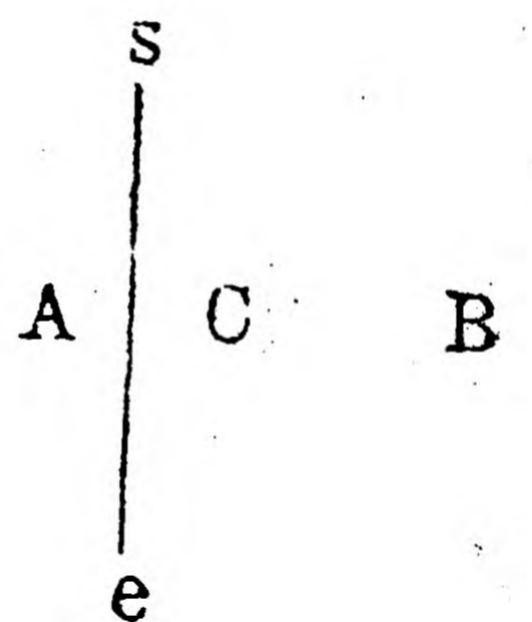
соты, а употреблявшийся как источник звука язычок имел поверхность меньше, чем четверть квадратного дюйма. Поэтому, если бы в с е пламя или трубка, питающая его, были чувствительны к звуковым вибрациям, то точные опыты над обратимостью с язычком и пламенем были бы трудны, а даже, пожалуй, и невозможны. Вследствие этого я желал предварительно узнать, не локализовано ли место чувствительности в пламени таким образом, чтобы возможно было обратно переставлять пламя и язычок, так чтобы они обменивались местами.

Пламя было помещено сзади картонного экрана и трубка воронки проходила через отверстие в картоне и направлена была на середину пламени. Звуковые волны, исходящие из вибрирующего язычка, помещенного внутри воронки, не производили заметного действия. Но, подвинув воронку так, чтобы трубка ее приходилась как раз против самого низшего пункта пламени, мы получали очень сильное действие.

Для увеличения точности опыта воронка была соединена с стеклянной трубкой в 1 метр длины и 1 см. в диаметре с тою целью, чтобы посредством увеличения расстояния ослабить действие волн, вышедших из воронки наружу путем диффракции вокруг ее верхнего края, так чтобы на пламя действовали только те волны, которые прошли через стеклянную трубку.



Фиг. 1.



Фиг. 2.

Когда мы приблизим конец трубки к отверстию горелки *b* (фиг. 1), или же отверстие к концу трубки, то пламя приходит в сильное волнение от действия звучащего язычка *R*. Если мы передвинем трубку или горелку так, чтобы звук сконцентрировался на части пламени около пол-дюйма выше отверстия, то не получится никакого действия. Если сконцентрировать звук на самой горелке около пол-дюйма ниже ее отверстия, то также не будет никакого действия.

Эти опыты доказывают локализацию места чувствительности, а также и то, что пламя есть пригодный инструмент для задуманных нами опытов над обратимостью.

Самые опыты производились таким образом. Чувствительное пламя было помещено сзади картонного экрана в 45 см. высоты при 30 см. ширины, а вибрирующий язычок находился на одинаковой высоте с нижним концом пламени и на расстоянии 2 метра по другую сторону экрана. При таком положении язычка звук его вызывает сильное волнение пламени.

Вся верхняя половина пламени была видна с того места, где находился язычок; поэтому-то и необходимы были предшествующие опыты, чтобы доказать, что звук нисколько не действует на верхнюю часть пламени и что волны действительно загибаются вокруг края экрана и достигают места чувствительности вблизи горелки.

Затем пламя и язычок были поставлены в обратные положения, поменялись местами так, что язычок находился за экраном и близко к нему, а пламя с другой стороны экрана на расстоянии 2 метров от него. Звуковые волны не производили заметного действия на пламя.

Опыт повторялся несколько раз и различным образом. Были употребляемы экраны разных величин и вместо того, чтобы ставить в обратные положения пламя и язычок, мы передвигали экран так, чтобы приходились как раз сзади его в некоторых экспериментах пламя, а в других—язычок. Были также приняты меры к тому, чтобы звуки, отраженные от стен и потолка лаборатории или даже от тела экспериментатора, не могли оказать влияние на результат. Оказывалось во всех случаях, что звук действовал только тогда, когда язычок находился на известном расстоянии от экрана, а пламя близко к нему; когда же были обратные положения их, не обнаруживалось никакого заметного действия.

Так, положим, напр., что *se* представляет вертикальный разрез экрана (фиг. 2). Когда язычок находился в *A*, пламя в *B*—не было никакого действия; когда же обратно язычок находился в *B*, а пламя в *A*, то обнаруживалось сильное действие. Следует прибавить, что вибрации сообщавшиеся самому экрану, а от него воздуху, сзади его не производили никакого действия; потому что, когда язычок, сильно действовавший в *B*, переставлялся в *C*, где действие его на экран должно было быть очень сильно, то он не оказывал никакого действия на пламя, находившееся в *A*.

Мы теперь достаточно подготовлены к тому, чтобы приступить к объяснению отсутствия обратимости в обширных опытах 1822 г. К счастью, здесь приходит к нам на помощь случайное наблюдение, имеющее, однако, большое значение. Было замечено и записано, что в то время как выстрелы в Вильжюифе были без эхо, каждый выстрел в Монлери сопровождался раскатом эхо, длившимся от 20 до 25 секунд. Араго, составлявший отчет, приписывал эти эхо отражению от облаков,—объяснение, которое теперь может считаться сомнительным. В отчете говорится, что все выстрелы, произведенные в Монлери, сопровождались там раскатом, подобным раскату грома. Я подчеркнул здесь весьма знаменательное слово, которое вполне применяется к нашим опытам над выстрелами в Соус Фореленде, где не замечалось заметного промежутка между выстрелом и эхо; но эхо никак не могло быть приписано отражению от облаков, потому что если предположить, что облака находились только на расстоянии одного километра, то звук и его эхо были бы отделены промежутком по крайней мере в 6 секунд. Но о таком промежутке не говорится в отчете, и если бы он существовал, то было бы сказано, что эхо «следовали» за выстрелом, а не «сопровождали» его. Кроме того эхо, кажется, были непрерывны, между

тем наблюдавшиеся облака были разрозненными. «Эти явления,— говорит Араго,— происходили только в момент появления нескольких облаков». Но от разрозненных облаков едва ли мог бы получиться непрерывный раскат эхо. Если к этому прибавить тот экспериментальный факт, что облака гораздо более густые, чем какие образуются в атмосфере, неспособны отражать звук, между тем безоблачный воздух, который Араго считает не дающим отражения, оказался на деле сильно отражающим звук, то получится солидное основание усомниться в верности гипотезы знаменитого французского естествоиспытателя.

И на основании того, что при сотне выстрелов, произведенных в Соус-Фореленде—при чем особенное внимание было обращено на воздушные эхо—не было ни одного случая, чтобы выстрел не сопровождался эхом измеримой продолжительности.—я полагаю, что утверждение Араго, будто в Вильжюифе не было слышно эхо при ясном небе, нужно понимать в том смысле, что эхо исчезали очень быстро. Если нет особенного внимания, обращенного на этот пункт, то небольшое увеличение продолжительности звука выстрела легко может ускользнуть от наблюдения; и это могло случиться тем легче, если эхо были столь громки и быстры, что могли показаться частью прямого звука.

Мне было бы неприятно выйти здесь за пределы добросовестной критики или без достаточных оснований подвергать сомнению записанные наблюдения знаменитых людей. Однако, принимая в соображение только что сказанное и имея в виду, что умы Араго и его товарищей были заняты совершенно другим вопросом—эхо были для них только побочным обстоятельством, а не предметом наблюдения—я думаю, что можно безошибочно считать звук, который он называет «мгновенным», просто воздушным эхо, которое не отличалось заметно от прямого звука меньшей силою и быстро исчезало.

Если мы обратимся теперь к наблюдениям в Монлери, то нас поразит необыкновенная продолжительность эхо, слышанных на этой станции. В Соус-Фореленде употреблялись заряды, равные наибольшим зарядам французских естествоиспытателей; но ни в одном случае выстрел не производил эхо с продолжительностью, приближавшеюся к 20 или 25 секундам. Редко получалась даже половина этого количества. Даже эхо сирены, которые были гораздо заметнее и гораздо продолжительнее, чем эхо от выстрелов, никогда не достигали продолжительности эхо в Монлери. Наибольшее приближение к ней было 17 октября 1873 г., когда эхо продолжалось 15 секунд.

Кроме того в этот же самый день (и это обстоятельство имеет особенное значение) звук достигал максимального предела своего распространения и выстрелы слышались у буя Кенокс в 26½ километрах от Соус-Фореленда. Я утверждал в другом месте, что продолжительность воздушных эхо показывает атмосферную глубину, из которой они выходят¹⁾. Здесь может помочь нам оптическая аналогия. Если свет падает на твердый мел, то он вполне рассеивается поверхностными частичками;

¹⁾ См. выше, стр. 170.

но если мел истолочь и смешать с водою, то свет доходит до наблюдателя из гораздо большей глубины мутной жидкости. Твердый мел действует здесь подобно тому, как действуют чрезвычайно густые облака, а мел с водою действует аналогично с облаками умеренной густоты. В одном случае мы имеем короткие эхо, а в другом продолжительные. Из этих соображений мы можем сделать тот вывод, что Моплери во время указанных опытов было окружено в высшей степени прозрачной атмосферой, между тем как краткость эта в Вильжюифе показывает, что атмосфера, окружавшая эту станцию, была акустически непрозрачна в высшей степени.

Имеем ли мы какое-нибудь указание на причину такой непрозрачности? Мне кажется, что да. Вильжюиф находится близко от Парижа и над ним при слабом ветре было течение воздуха из этого города. Тысячи труб пускали по ветру к Вильжюифу токи нагретого ими воздуха, так что, вероятно, станцию окружала крайне неоднородная атмосфера ¹⁾. На небольшой высоте над Вильжюифом нарушенное равновесие температуры в атмосфере снова устанавливалось. Этому неоднородному воздуху, окружавшему Вильжюиф, соответствовал в наших опытах экран с источником воздуха близко сзади него, верхний же край экрана представлял собою место в атмосфере над станцией, в котором восстановилось равновесие температуры. Эхо от нашего звучащего язычка вследствие близости его к экрану так сливалось с прямым звуком, что было почти неотличимо от него. Подобным же образом эхо в Вильжюифе следовало за прямым звуком столь быстро и исчезало столь скоро, что ускользали от наблюдения. Подобно тому как наше чувствительное пламя, находясь на известном расстоянии от экрана, не испытывало на себе действия звучащего тела близко сзади экрана, и наблюдатели в Моплери не слышали выстрелов в Вильжюифе.

Этот предмет может быть еще более разъяснен посредством опытов. Была уже показана легкость, с какою звук проходит через ткани ²⁾, так что слой полотна, коленкора и даже толстой фланели или бумагой только в незначительной степени задерживали звук вибрирующего язычка. Таковой силой коленкора представляет собою слой воздуха, отличающийся от соседнего слоя температурой или влажностью, а ряд таких слоев коленкора подобен последовательным слоям в неоднородном воздухе.

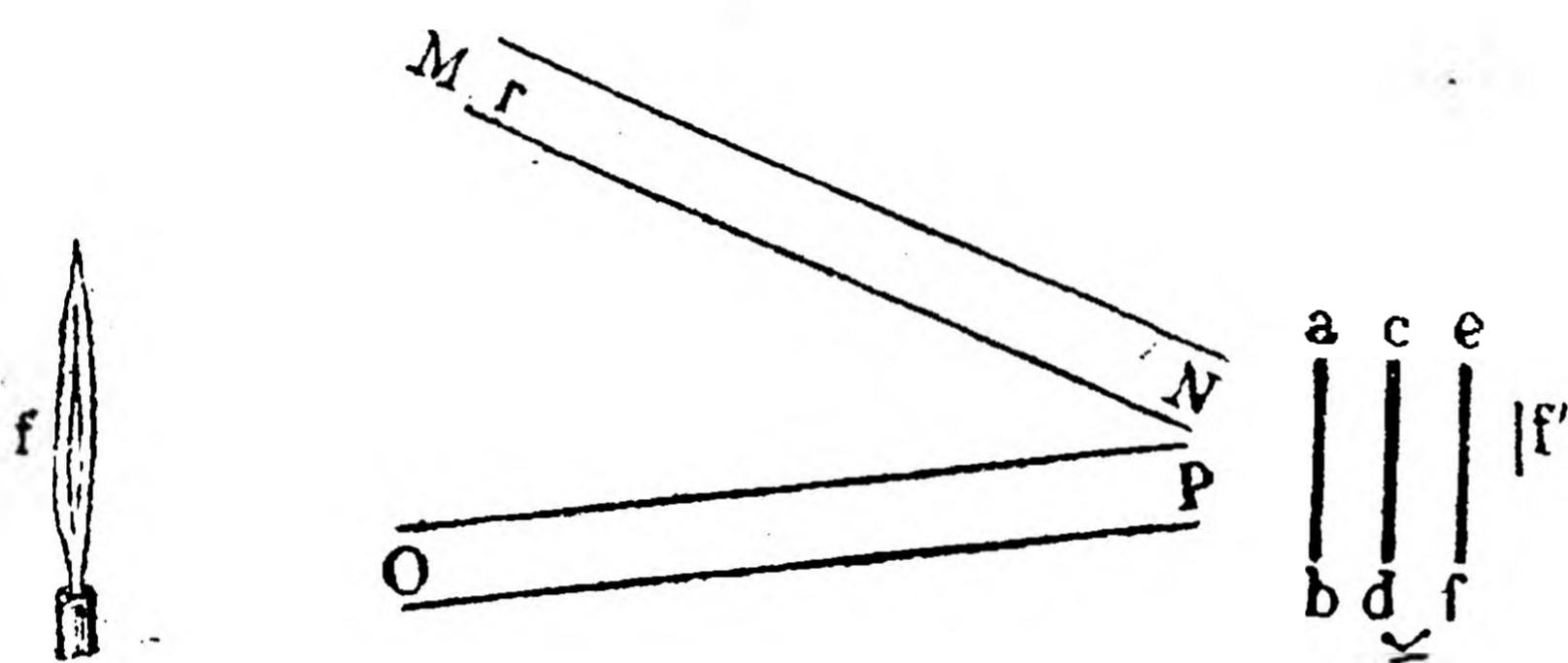
Две оловянных трубки MN и OP (фиг. 3) с открытыми концами были расположены так, что составляли между собою острый угол. На конце одной из них находился вибрирующий язычок r ; а против конца другой и на продолжении PO находилось чувствительное пламя f ; на продолжении же оси MN помещалось другое чувствительное пламя f' . Когда звучал язычок, прямой звук через MN приводил в движение пламя f' . Если поставить под надлежащим углом квадратный кусок коленкора ab , то замечается небольшое ослабление действия на пламя f' , и

¹⁾ Действие Лондонского воздуха иногда бывает до поразительности очевидно.

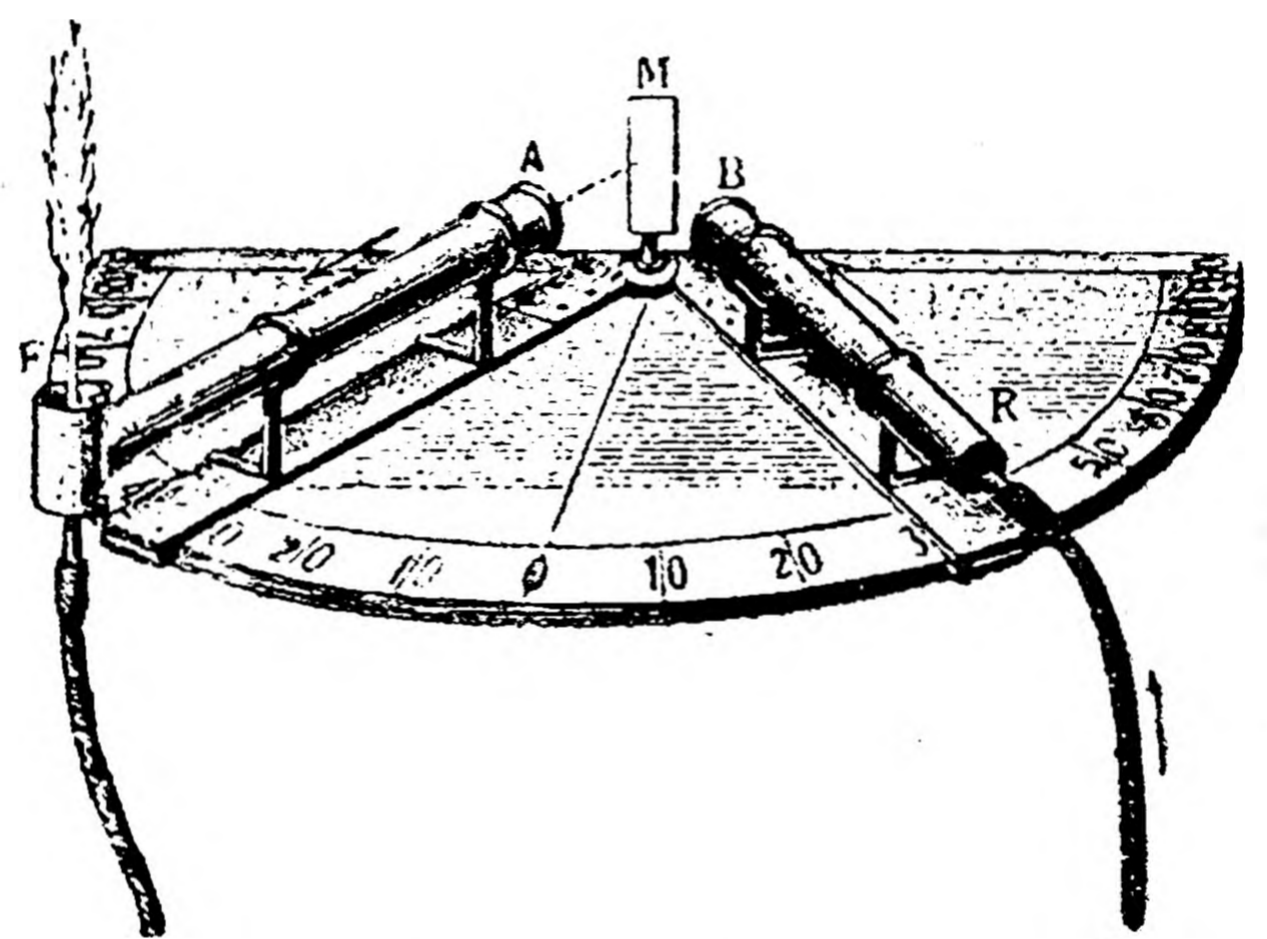
²⁾ „Philos. Trans.“ 1874, pt. I p. 208 и наша VII лекция.

в то же время слабое эхо от ab производило едва заметное волнение пламени f . Когда был поставлен другой кусок cd , то звук, прошедший через ab , ударялся в cd ; частью он отражался, возвращаясь через ab , проходил вдоль PO и еще больше волновал пламя f . Когда приставлен был еще третий кусок ef , то отраженный звук еще больше усилился и каждое усиление эхо сопровождалось соответствующим уменьшением вибраций, доходивших до пламени f , так что оно наконец перестало волноваться и совершенно успокоилось.

Если бы коленкор или кембрик был тоньше, то потребовалось бы большее число слоев, чтобы задержать весь звук, и при таком числе их эхо возвратилось бы с большего расстояния и поэтому продолжалось бы дольше. Восемь слоев коленкора, в нашем опыте натянутых на проволочную рамку и помещенных так близко друг к другу, что они образовали как бы подушку, представляют собою подобие густого акустического облака. Такая подушка, поставленная под надлежащим углом за N , за-



Фиг. 3.



Фиг. 4.

держивает звук, который, когда ее не было, доходил до f' , и задерживает до такой степени, что пламя f' , если оно не слишком чувствительно, совершенно успокаивается, тогда как пламя f волнуется гораздо сильнее, чем при отражении от одного слоя. Если бы источник звука был очень близок, то эхо от этой подушки имело бы незаметную продолжительность. Вот так же, по моему мнению, были близки акустические облака, окружавшие Вильжюиф, и следствием была такая же короткость эхо.

Аналогия между светом и звуком может быть продолжена еще дальше. Наша подушка действует главным образом внутренним отражением. Звук язычка есть сложный звук, состоящий из частых звуков различной высоты. Если бы эти звуки выходили из подушки в своих первоначальных отношениях, то подушка была бы акустически белой; если бы они возвращались в измененных взаимных отношениях, то подушка была бы акустически окрашеною.

В этих опытах мой ассистент Котрель оказывал мне существенную помощь¹⁾.

¹⁾ После того, как это было написано, я пропускал звук через 15 слоев коленкора и он отражался через эти же слои с силою, достаточною для того, чтобы волновать пламя. Звук проходил даже через 30 слоев. Впоследствии ока-

Примечание. 3 июня.—Я приведу здесь описание аппарата, придуманного моим ассистентом и устроенного Тисли и Спаллером для доказательства закона отражения звука. Он состоит из двух трубок *AF*, *BR*, с источником звука на конце одной из них *R* и с чувствительным пламенем на конце другой *F*. Оси трубы сходятся на зеркале *M* и они могут перемещаться, так что могут быть поставлены под каким угодно углом. Углы падения и преломления отсчитываются на разделенном на градусы полукруге. Зеркало также может двигаться на своей вертикальной оси (см. фиг. 4).

Замечательные примеры акустической непрозрачности.

Я обязан ректору университета в Виргинии следующим сообщением о сражении при Гаинс-Ферм.

«Линчбург, Виргиния. Марта 19, 1874. Сэр, я только-что прочитал с большим интересом вашу лекцию 16 января об акустической прозрачности и непрозрачности атмосферы. Замечательные наблюдения, о которых вы говорили, дают мне повод сообщить вам факт, о котором я иногда рассказывал, и если слушатели не были моими близкими знакомыми, то я всегда боялся, что моим словам не поверят. Этот факт произвел на меня сильное впечатление, но оставался для меня неразрешимой тайной, пока ваша лекция не навела меня на возможное объяснение его.

В полдень 28 июня 1862 г. я шел в сопровождении генерала Рандольфа, тогдашнего военного министра северных штатов, к дому Прайса, около 15 кил. от Ричмонда. Вечером накануне генерал Ли начал свое наступление на армию Мак-Клеллана, перейдя Чикагомини около 7 кил. выше дома Прайса, с целью напасть на правое крыло Мак-Клеллана. Сражение при Гаинс-Ферм и происходило в полдень указанного числа. Ширина долины между ограничивающими ее высотами составляет около полуторы мили. Дом Прайса находится на высоте с одной стороны долины, ближайшей к Ричмонду, а Гаинс-Ферм как раз напротив с другой стороны, простираясь до плато, идущего к Кольд-Гарбур.

Смотря поперек долины, я видел большую часть сражения. Правое крыло Ли стояло в долине и левое крыло южан там же. Линия моего зрения почти совпадала с боевой линией сражения. Я видел, как наступали северяне и два или три раза были отбиты, и как уже в сумерки войска южан окончателью отступили.

Я видел явственно ружейный огонь обеих сторон, дым, отдельные выстрелы, огни пушечных выстрелов. Я видел, как выезжали на позиции артиллерийские батареи и быстро стреляли. Несколько полевых

залось, что звук может проникать даже через 200 слоев тюля; между тем как один слой мокрого коленкора задерживал звук.

Лорд Рейлей, суждения которого я очень ценю, сомневается в верности приведенного объяснения явлений, описанных Араго. Однако, каково бы ни было это объяснение, но изложенные в настоящей статье факты верны и из-за них я привел ее здесь.

батарей обеих армий были мне видны ясно. А еще многие другие были закрыты лесом, ограничивавшим поле моего зрения.

Мы смотрели около двух часов, от 5 до 7 часов вечера, на сражение, в котором участвовало не менее 50,000 войска и действовало не менее 100 орудий; однако же, несмотря на то, что атмосфера была оптически необыкновенно прозрачна, ни генерал Рандольф, ни я из всего грома и шума сражения не слышали ни единого звука. Я тогда же выразил ему мое удивление по этому поводу.

Между мною и полем сражения лежала глубокая и широкая долина Чикагомини, с болотом, защищенная от заходящего солнца холмом и лесом на западе (в той стороне, где находился я). Часть долины по обеим сторонам болота была очищена от леса и отчасти обработана. Здесь таким образом были условия благоприятные для образования нескольких поясов воздуха, различных по содержанию в них влажности (и, вероятно, по температуре), и располагавшихся слоями перпендикулярно к акустическим волнам, шедшим ко мне с поля сражения.—С почтением ваш покорный слуга Р. Г. Кин».

Я приведу здесь еще выдержку из «Воспоминаний о французско-немецкой войне» Арчибальда Форбса.

«До 10 часов утра 5-го числа воздух при густом тумане был переполнен звуками, для которых трудно было найти подходящее название... Утро 6-го числа представляло замечательный контраст во всех отношениях с утром вчерашнего дня. Вчера был холод, проникавший до мозга костей, и туман был такой густой, что ничего нельзя было видеть на расстоянии полумили. А 6-го числа было ясно и светло, и так тепло, как бывает по утрам в конце марта. Вчера воздух был переполнен звуками, а сегодня царствовала тишина Аркадии, не знающей войн. Все смотрели с изумлением друг на друга. Уже ли исчезли бесследно Париж, его форты, большие орудия, бомбардировка и небомбардировка на восточной стороне?.. Решившись лично собрать сведения, которые любезно обещали доставить мне другие, я поехал к Монморанси, откуда перед моими глазами открылась обширная панорама северной стороны Парижа. Однако и здесь была мертвая тишина... Здесь я встретил трех конных солдат, и мы начали разговаривать о положении вещей. Они склонялись в пользу теории переговоров о перемирии, так как с самого утра они не слышали ни одного выстрела. В то время как мы разговаривали, показалась белая струя дыма из серой стены Ля-Биша. Ни малейшего звука—и, судя по тому, что не слышалось ни малейшего удара или гула, можно было подумать, что это просто струя пара... Я один отправился дальше в Гонесс. К моему удивлению, я нашел, что немецкие батареи от Гонесса до Севрана стреляли очень энергично. Они действовали с 8 часов утра. В Гонессе я узнал, что пальба на южной стороне, по всей вероятности, началась около того же часа и затем еще продолжается. Однако же в Маржанси и Монморанси мы не слышали ни единого звука. Все это зависело от воздуха; сегодня он проводил звук так дурно, как хорошо проводил его вчера. Даже в Гонессе мы не могли слышать пу-

шечных выстрелов, хотя они раздавались, так сказать, под нашими ушами».

Герцог Аргайль почтил меня следующим весьма интересным сообщением о его наблюдениях над проницаемостью тумана для звука. «Этот факт,—пишет он,—мне давно известен, потому что я большую часть моей жизни провел в четырех милях от города Гринока, по ту сторону Ферса. Там строятся корабли, и стук, и удары молотов мастеровых я обыкновенно слышал с разными степенями силы и отчетливости, или даже совсем не слышал, смотря по состоянию атмосферы. И я всегда замечал, что в те дни, когда воздух был весьма чист и ясен, так что можно было различать мачты и шесты, почти не бывало слышно никаких звуков; между тем в туманные дни, когда туман был так густ, что ничего нельзя было видеть, был слышен каждый звук каждого молота и иногда казалось, как будто он раздается совсем по близости».

Джордж Гельтлинг из Фульгема пишет мне с подробностями, но допускающими никаких сомнений, что он во время густого тумана слышал пушечные выстрелы в Портленде на расстоянии 70 кил.

ЗВУКИ, ИЗДАВАЕМЫЕ ВОЛЬТОВОЙ ДУГОЮ.

(Проф. А. А. Эйхенвальда)¹⁾.

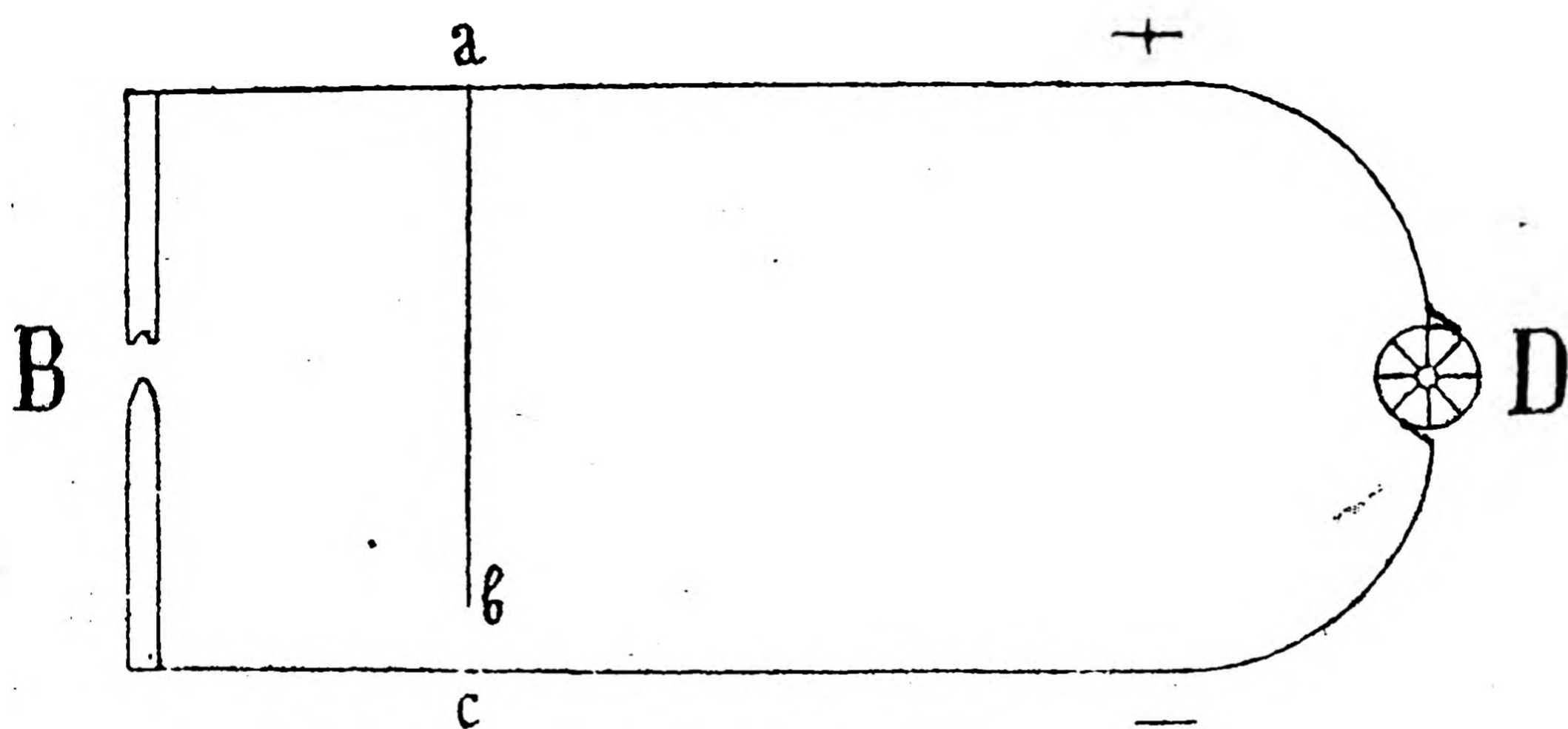
Вольтова дуга обладает не только способностью давать сильный жар и сильный свет, но оказывается способной издавать и звуки, и даже весьма разнообразные. Это неожиданное открытие сделано было не так давно совершенно случайно Дудделем в Англии. Каким же образом объяснить себе вообще возможность возникновения звуков в вольтовой дуге? Объясняется это следующим образом. Вольтова дуга образована из раскаленных газов и паров угля, по которым идет электрический ток. Эти газы образуют между углями небольшой комочек, который оказывается в высшей степени чувствительным ко всяким изменениям в силе тока, проходящего по вольтовой дуге. Каждое усиление этого тока увеличивает и температуру и объем этих газов; ослабление тока, наоборот, имеет противоположное действие. Если эти ослабления и усиления делаются быстро и ритмично, то происходящие от этого пульсации вольтовой дуги передаются воздуху и, доходя до нашего уха, ощущаются нами в виде звука. Впрочем, человеческое ухо может слышать только такие колебания воздуха, которые происходят не реже 10 и не чаще 10000 раз в секунду; поэтому только такие частые изменения в силе тока, которые лежат между этими пределами, и произведут звучание вольтовой дуги. Наша центральная Московская электрическая станция дает переменный ток, меняющий 100 раз в секунду свое направление; если пустить этот ток в вольтову дугу, то мы услышим довольно низкий звук или гудение, число колебаний которого соответствует числу колебаний переменного тока в секунду.

На это вы можете мне заметить, что гудение вольтовой дуги переменного тока было уже давно известно и объяснение этого гудения дано было тоже давно, но оно, повидимому, не объясняет опыта Дудделя, у которого дуга была постоянного тока, а не переменного. Однако, как сейчас увидим, это не совсем так. Действительно, ток, питающий дугу Дудделя, был постоянный, но благодаря особому расположению приборов он частью превращался в переменный и заставлял вольтову дугу звучать.

Рассмотрим подробнее следующую схему (фиг. 1). Пусть от динамомашинны D идет постоянный ток через дугу B и пусть где-нибудь на пути мы прикрепили кусок проволоки ab . Если по DaB идет вполне

¹⁾ Из статьи «Вольтова дуга».

постоянный ток, то проволока ab зарядится электричеством и так останется заряженной во все время прохода тока. Но представьте себе, что по какой-либо причине (а таких причин может быть очень много) горение дуги изменилось, и ток, ее питающий, внезапно усилился; тогда сейчас же равновесие электричества на проволоке ab изменится; новое количество его устремится по ab , дойдет до конца b , отразится от него и новою волною потечет по ba в дугу. Итак, каждый толчок, возникший в горении вольтовой дуги, повлечет за собою второй толчок, отраженный от конца b . Однако, и этим дело еще не кончится; второй толчок вызовет таким же образом третий, четвертый и т. д., пока эти электрические колебания не успокоятся. Впрочем, совершенного прекращения колебаний опасаться нечего, потому что, как уже сказано, вольтова дуга не может гореть абсолютно ровно, и всегда найдется достаточно причин для возникновения новых колебаний.

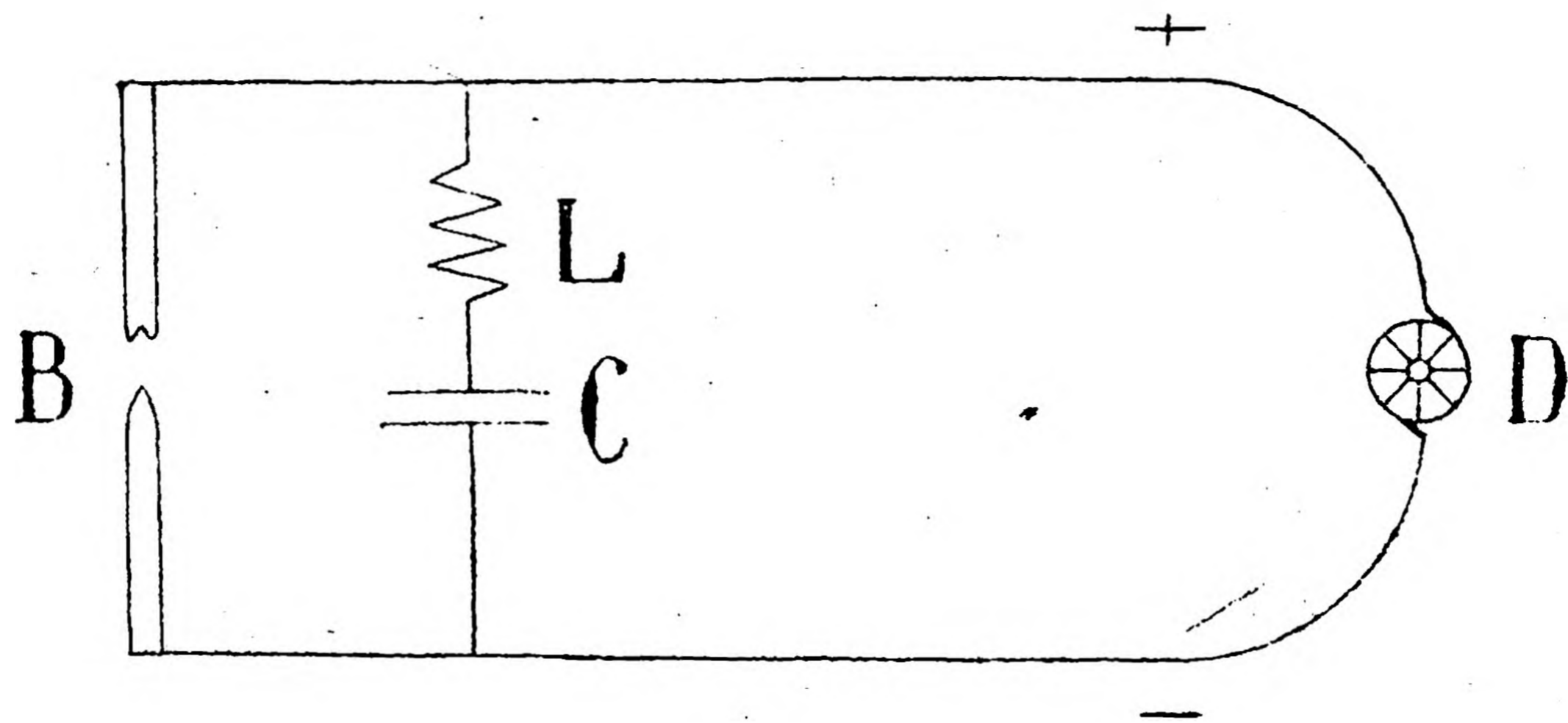


Фиг. 1.

Теперь зададимся вопросом, какой длины пужно взять проволоку ab , чтобы электрические колебания в дуге происходили, например, 300 раз в секунду, т.-е. чтобы вольтова дуга издавала звук, близко подходящий к ми-бемоль (который пишется при скрипичном ключе на нижней строчке). Для этого необходимо, как это видно из только-что приведенных нами рассуждений, чтобы электричество успевало пройти путь Vab и обратно 300 раз в секунду; а так как скорость распространения электричества при таких условиях равна 300000 километров в секунду, то длина Vab (строже говоря, длина $cVab$) должна быть $300000 : 2300 = 5000$ километров. Такая громадная длина прямой проволоки, конечно, невозможна на опыте и получилась у нас потому, что скорость движения электричества громадна. Однако, мы можем замедлить возврат электричества обратно на проводнике ba , если на его конце поместим конденсатор; тогда на заряд этого конденсатора электричеством потребуется некоторое время, и проволоку ab можно будет взять короче. Можно применить еще и другой способ; если проволоку ab свить спиралью, то внутри такой спирали, обтекаемой током, возникает, как известно, магнитное поле; на это тоже требуется некоторое время. Если величину, характеризующую магнитное поле спирали, или так называемую ее самоиндукцию обозначить через L , а

емкость конденсатора—через C , то теория показывает, что время колебания электричества будет $T=2\pi\sqrt{LC}$. Комбинируя емкость с самоиндукцией, мы легко получим желаемый результат с весьма скромными размерами проводов.

Такая система проводников, как L и C (фиг. 12), носит название электрического резонатора, ибо она вполне аналогична резонаторам, встречающимся в акустике ¹⁾. Мы можем даже сделать акустический опыт, вполне аналогичный Дудделевскому. Вы знаете, вероятно, что такое поющее газовое пламя или, так называемая «химическая гармоника». Вот, я зажигаю обыкновенную газовую горелку и надеваю на нее стеклянную трубку; вы слышите громкий звук, объяснение кото-



Фиг 2.

рому можно дать вполне аналогичное тому, как и в случае вольтовой дуги; только здесь мы непосредственно получаем воздушные колебания, тогда как в вольтовой дуге причиной воздушных колебаний являются колебания электрические; но и здесь, в химической гармонике, всякая неравномерность в горении газа влечет за собою местное сжатие воздуха, которое распространяется волною до конца трубы, отражается от него, возвращается обратно и т. д., и дает начало звукам, высота которых зависит от длины стеклянной трубы и от скорости распространения звуковых волн в трубах. Если скорость звука 300 метров в секунду, а длина трубы $\frac{1}{2}$ метра, то мы услышим звук ми-бемоль; если труба длиннее, звук будет ниже; с укорочением трубы звук будет повышаться.

Про вольтову дугу мы можем сказать, что при ее помощи постоянный ток превращается в переменный, при чем число колебаний этого тока зависит от выбранной нами комбинации емкости и самоиндукции. Про химическую гармонику можно также сказать, что мы—при помощи газового пламени—превращаем постоянный ток горячих газов вверх

¹⁾ Кому случится видеть схему Герца для получения частых электрических колебаний, тот заметит сходство ее с этою схемою Дудделя; разница только в том, что там, где у Герца искра, здесь—вольтова дуга, а индукционная катушка заменена здесь динамомашиною; кроме того, у Герца емкость и самоиндукция очень малы и колебания в высшей степени часты (сотни миллионов раз в секунду), тогда как здесь колебания считаются лишь сотнями раз в секунду.

по стеклянной трубке в волнообразное движение, при чем быстрота перемен зависит от длины выбранной нами трубки. Другими словами: комбинация проводов с одной стороны и стеклянная трубка—с другой служат резонаторами, и из всех неправильных колебаний вольтовой дуги или газового пламени усиливаются лишь те, которые соответствуют данным резонаторам.

Я приведу еще один хорошо знакомый вам пример. Когда играют на скрипке и ведут смычком в одну какую-либо сторону, то струна издает звук, т.-е. колеблется в ту и другую сторону; высота звука и здесь зависит от длины струны и от скорости распространения по ней колебаний; струна тоже служит резонатором и здесь также поступательное движение смычка превращается в колебательное—струны.

Теперь опыт Дудделя нам совершенно понятен; это тоже своего рода скрипка, где смычком служит вольтова дуга, а струною—система проводников с емкостью и с самоиндукцией.

Посмотрим теперь, как можно играть на такой скрипке. Я зажигаю вольтову дугу, и вы слышите звук, по тембру похожий на звук гобоя; я уменьшаю емкость конденсатора, вынимая штепсель, и тотчас же звук повышается на квинту; вынимая другие штепселя, я получаю другие звуки и другие интервалы, так что можно было бы вместо штепселей устроить клавиши и играть на конденсаторе, как на рояли.

Оставим теперь емкость без изменений и будем менять самоиндукцию. Здесь у меня 4 катушки, намотанные попарно на два картонных цилиндра. Выключив одну из катушек, я получаю звук тоном выше; теперь я быстро включаю и выключаю эту катушку, и вы слышите трель; делая то же самое с другими катушками, я могу получить тремоло на терции и на квинте. И здесь можно устроить клавиши и играть, как на рояли.

Но есть еще третий способ менять звуки вольтовой дуги. Я вставляю одну катушку в другую; тогда магнитное поле их взаимно усиливается, самоиндукция увеличивается, и звук понижается тем более, чем глубже помещена одна катушка в другой. Вставив опять первую катушку во вторую, только с другого конца так, чтобы магнитное поле одной катушки отчасти парализовало поле другой, я достигаю сильного повышения звука, потому что в этом случае самоиндукция уменьшается. Таким образом, вдвигая одну катушку в другую на большую или меньшую глубину, я могу играть на них, как на гармонии ¹⁾.

Во всех этих опытах с звучащею вольтовой дугой мы имели дело с постоянным током, часть которого превращалась резонирующею системою в переменный ток. Чтобы доказать вам, что по катушкам дей-

¹⁾ Высота звука, как показывает более точная теория, зависит и от сопротивления и от других потерь энергии в резонаторе. С увеличением сопротивления, например с удлинением вольтовой дуги, звуки понижаются. Введение в катушку железа понижает звуки от увеличения самоиндукции и от потери на гистерезис. Введение в выше описанные катушки железной проволоки толщиной в 3 мм. достаточно, чтобы сперва понизить, а затем и прекратить звук; колебания делаются периодическими.

ствительно проходит переменный ток, я покажу несколько опытов, которые обыкновенно делаются с переменными токами.

Вставим в нашу катушку другую, соединенную с телефоном, тогда в этой последней возникнут наведенные токи, которые приведут телефон в звучание и притом такое сильное, что он перекрикивает даже вольтову дугу. Теперь я вместо прежней катушки включаю другую, составленную только из 20 оборотов толстой проволоки и надетую на пучок тонких железных прутиков; на тот же пучок я надеваю большую катушку тонкой проволоки с большим числом оборотов; образуется, таким образом, миниатюрный трансформатор, в котором по первой катушке проходят сильные переменные токи слабого напряжения, тогда как во второй возникают более слабые наведенные, но зато более высокого напряжения. Я подобрал эти катушки так, чтобы вторичною катушкою можно было питать обыкновенную калильную лампочку в 16 свечей и 110 вольт; при надевании второй катушки на первую, лампочка засвечивается.

С этим же прибором можно сделать опыт Томсона. Если вместо вторичной катушки с лампочкою, надеть широкое кольцо из меди или алюминия, то в нем возникнут тоже переменные токи; по закону Ленца эти токи будут всегда противоположного направления, чем индуцирующие, и потому медное кольцо будет первичною катушкою отталкиваться кверху и взлетит на воздух.

Все это доказывает, что мы имеем здесь дело с переменным током. Что касается до числа перемен, то описанным способом мы можем достигнуть токов очень большой повторяемости. Если выключить все катушки и оставить один конденсатор, то получим очень высокий звук, который можно еще повысить, уменьшая емкость конденсатора, и таким путем дойти до пределов наших слуховых ощущений.

Во всех этих опытах сила получаемого переменного тока довольно большая в несколько ампер; однако, для того, чтобы получить звуки, достаточно и очень слабых токов; даже те переменные токи, которые получаются в обыкновенной телефонной линии с микрофоном, уже дают ясно различаемые звуки в вольтовой дуге. На эту чувствительность вольтовой дуги еще раньше Дудделя указал Симон во Франкфурте на Майне.

Свое открытие Симон сделал тоже совершенно случайно. Работая однажды с румкорфовым индуктором и вольтовой дугою и желая избавиться от надоедливого трещанья прерывателя, он перенес индуктор в другую комнату. Каково же было его удивление, когда, возвратясь снова в свою комнату, он опять услышал прежнее трещанье, только исходящее из вольтовой дуги. Исследуя причины этого явления, он нашел, что проволоки, идущие к индуктору и к вольтовой дуге, расположены были на некотором протяжении очень близко друг к другу, и прерывистый ток индуктора наведением передавался проволокам вольтовой дуги и производил в этой последней соответствующие звуки. Тогда Симон попробовал этот случайный опыт повторить уже нарочно, но вместо прерывателя поставил микрофон, в который говорил его

помощник. Опыт оказался удачным, и дуга совершенно отчетливо повторяла все звуки и слова, которые говорились в микрофон. Для того, чтобы речь воспроизводилась вольтовой дугой как можно сильнее, Симоном и Румером были придуманы различные комбинации при соединении вольтовой дуги с микрофоном; мы здесь воспользуемся самою простою.

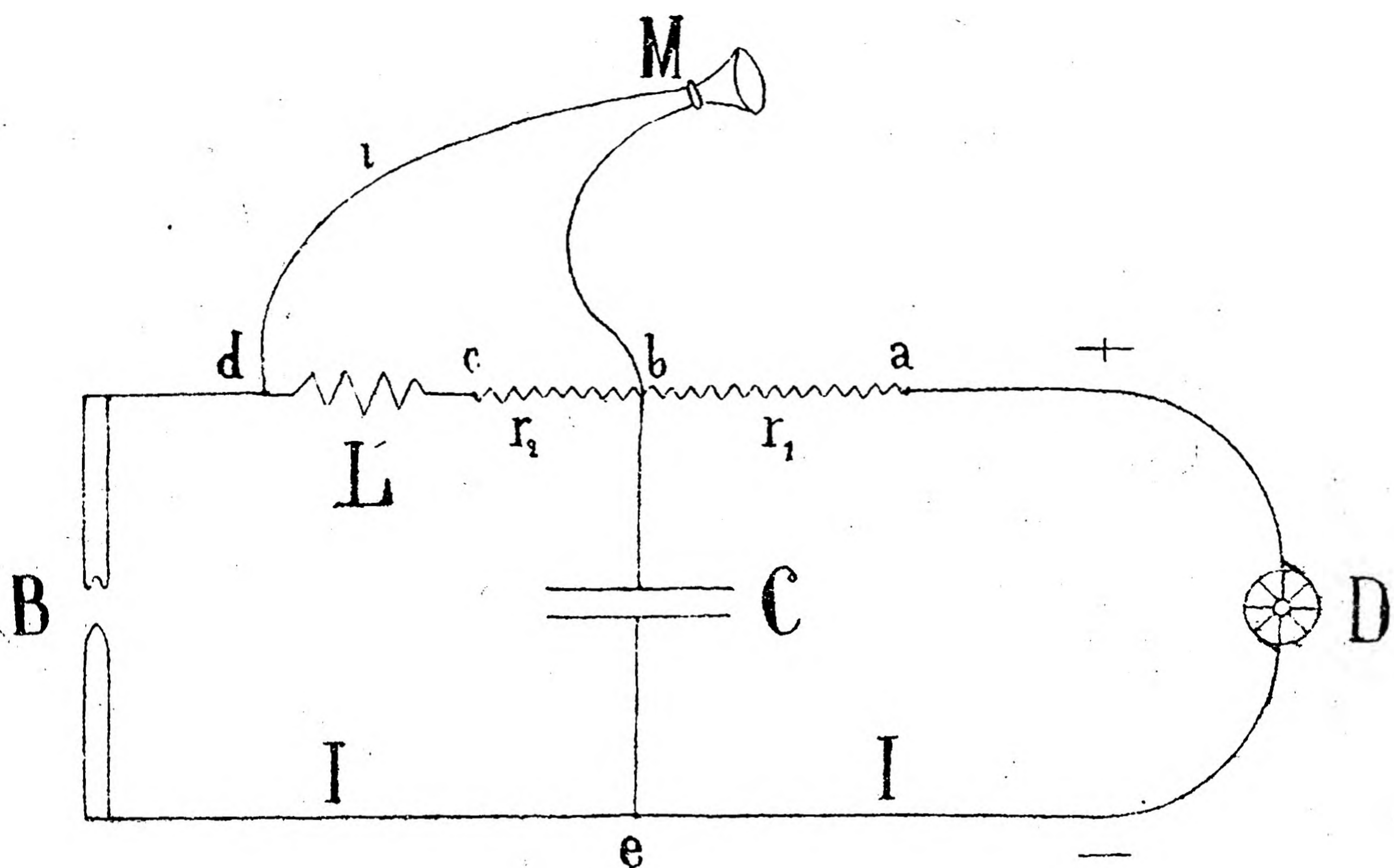
Постоянный электрический ток J динамомшины D (фиг. 3) питает через сопротивление $r_1 + r_2$ вольтову дугу B ; часть этого тока i ответвлена от сопротивления к микрофону M . Если говорить в микрофон M , то сопротивление его угольного порошка периодически меняется; ток i становится переменным; этот переменный ток i налагается на постоянный ток, и дуга B начинает воспроизводить все звуки и даже слова, говоримые в микрофон M . Однако, при такой схеме главная часть переменного тока i шла бы по кратчайшему пути od и не попадала в дугу, вследствие чего речь передавалась бы очень слабо; чтобы воспрепятствовать этому, я ставлю катушку с железом L , т.-е. самоиндукцию. Через самоиндукцию переменный ток проходит с трудом, тогда как на постоянный ток самоиндукция влиять не может. Но и этого мало; чтобы пройти через дугу B , ток i должен пройти и через динамомашину по пути $MdBeDaom$; этот путь слишком длинен; я могу укоротить его, поставив конденсатор C ; через конденсатор постоянный ток пройти не может, потому что обе обкладки его изолированы друг от друга, но переменный ток через него проходит. Чтобы убедиться в том, что это действительно так, предположим, что положительное электричество течет от b к C и заряжает верхнюю обкладку конденсатора; одновременно с этим потечет отрицательное электричество от e к C , так как нижняя обкладка конденсатора должна через влияние зарядиться отрицательным электричеством; когда в части bC ток потечет в другую сторону, то нижняя обкладка должна будет перезарядиться, т.-е. в eC , электрический ток тоже переменит свое направление; другими словами переменный ток в bC повлечет за собою переменный же ток в Ce , и я могу сказать, что переменный ток как бы проходит сквозь конденсатор. Итак, в нашей схеме постоянный ток, питающий вольтову дугу, пойдет по пути $DabcdBe$, тогда как переменный пойдет главным образом по $MdBeCbM$. По этой схеме у меня и приготовлен опыт, который я намерен показать вам. Микрофон установлен в одной из отдаленных комнат, откуда звуки непосредственно сюда достигать не могут; теперь я удалюсь к микрофону, а здесь предоставлю слово самой вольтовой дуге.

В о л ь т о в а д у г а: «Слушайте. Я, вольтова дуга, расскажу вам свою историю. Я родилась 100 лет тому назад в лаборатории профессора Петрова, 25 лет тому назад Яблочков применил меня к освещению, 10 лет тому назад Муассан при моей помощи получил искусственный алмаз, но только теперь, благодаря Симону во Франкфурте, я в первый раз заговорила. Так медленно шло мое развитие».

Еще лучше, чем человеческая речь, передается пение и звуки музыкальных инструментов (опыт с пением, с корнет-а-пистоном и с

флейтою); все оттенки и тембр голоса и инструментов передаются очень хорошо.

Как только появилось первое известие о говорящей вольтовой дуге, сейчас же люди с легко воспламеняющимся воображением стали пророчить ей блестящую будущность. Говорили, что отныне профессора не будут больше ходить на лекции, а будут сидеть у себя в кабинете и читать лекции в микрофон; в аудиториях же будут везде повешены говорящие вольтовы дуги и таким образом можно будет читать лекции одновременно в нескольких аудиториях. Говорили, что на улицах и бульварах электрические фонари будут выкрикивать газетные новости, объявления и рекламы или услаждать гуляющих вечерними концертами и т. д., и т. д. С другой стороны, нашлись люди, которые скепти-



Фиг. 3.

чески отнеслись к говорящей дуге, они называли ее игрушкой, которая не может иметь серьезного значения.

Ни то, ни другое отношение не может считаться научным. Мы должны радоваться каждому вновь народившемуся детищу науки, и если первые шаги жизни этого детища забавны, то это должно вызывать не скептицизм, не предположение о легкомысленности всей его будущей жизни, а скорее любовь и желание развить его способности и направить на полезное дело. Так именно думали и поступали изобретатели звучащей вольтовой дуги.

В опытах Симона, которые вы только что видели, вольтова дуга служит телефоном, т.-е. аппаратом, воспроизводящим звуки; не может ли она служить и микрофоном? Симон показал, что и это возможно, так что стоит только повесить в двух комнатах дуговые лампы, соединенные в общую цепь, и говорить в одну из них, чтобы другая воспроизводила эту речь. Но до сих пор не удалось достигнуть в этом отношении никаких практических результатов; действия эти оказались

слишком слабыми. Не останавливаясь на других более или менее интересных опытах Симона, я скажу только еще об изобретенном им беспроводном телефоне.

Симон рассуждал так. Если слабые переменные токи микрофона настолько сильно влияют на объем раскаленных паров вольтовой дуги, то причиной этому может быть только быстрое изменение ее температуры, а так как в связи с температурой находится и сила испускаемого ею света, то в говорящей вольтовой дуге сила света должна также быстро изменяться. Нельзя ли этот быстро изменчивый свет опять превратить в звуки? Тогда имелась бы надежда переговариваться на расстоянии без проволок, при помощи лучей света.

Для того, чтобы решить эту задачу, Симон воспользовался свойствами селена. Селен—это химический элемент, который сплавляется в стекловидную массу и обладает замечательным свойством изменять свое электрическое сопротивление под действием света. Вот, в этой коробочке у меня имеется небольшая селеновая пластинка, которая включена в цепь нескольких аккумуляторов. Пока селен находится в темноте, ток в этой цепи чрезвычайно слабый, потому что селен плохо проводит электричество, но стоит только, открыв коробочку, осветить селен, и мгновенно сопротивление его делается втрое меньше, а ток в цепи втрое сильнее. Чтобы сделать эти изменения тока видимыми, я помещаю, по примеру Симона, в одну цепь с селеном Z (фиг. 4) небольшой электромагнит (релэ) E , который при усилении тока притягивает якорь F , включающий камильную лампочку K в городскую электрическую сеть. Как только я освещаю селен лучами вольтовой дуги, сопротивление его падает, ток усиливается и при посредстве релэ зажигает лампочку. Прекращение освещения селена влечет за собою мгновенное затухание лампочки K .

Поставим теперь телефон вместо релэ E ; тогда при каждом освещении селена мы услышим в телефоне стук; всякое колебание силы света вызовет колебания в сопротивлении селена, т.-е. колебания в силе проходящего по селену тока, а эти, в свою очередь, дадут колебания телефонной пластинки. Осветим селен звучащею или говорящею вольтовою дугою, и мы услышим в телефоне те же звуки и те же слова.

После этого уже нетрудно устроить телефон без проволок. Для этого нужно на одной станции установить микрофон, соединенный с говорящею вольтовою дугою B ; свет этой вольтовой дуги можно сконцентрировать зеркалами или линзами L и передать на более или менее значительное расстояние на вторую приемную станцию. Здесь свет падает на пластинку из селена Z , включенную в цепь гальванической батареи с телефоном. Все, что говорится в микрофон первой станции, слышно в телефон второй станции, хотя между ними нет проводочного сообщения; в данном случае вместо проволоки передатчиком человеческой речи служит луч света.

Конечно, телефон без проволок будет иметь большое значение как

О Г Л А В Л Е Н И Е.

	Стр.
Предисловие к третьему русскому изданию	1
Предисловие ко второму русскому изданию	1
Предисловие к пятому английскому изданию	4
Извлечение из предисловия к первому изданию	4
Извлечение из предисловия к третьему изданию	5
Предисловие к четвертому изданию	6

Лекция первая.

§ 1. Характер звукового движения. Наглядные изображения его	7
§ 2. Опыты в безвоздушном пространстве, в водороде и на горах	10
§ 3. Сила звука. Закон обратных квадратов	13
§ 4. Ограничение звуковых волн трубками	14
§ 5. Отражение звука. Сходство со светом	15
§ 6. Преломление звука	11
§ 7. Диффракция звука; примеры, представляемые большими взрывами	12
§ 8. Скорость звука: значение плотности и упругости воздуха	13
§ 9. Теоретическая скорость, вычисленная Ньютоном. Поправка Лапласа	15
§ 10. Отношение между удельными теплотами воздуха, выведенное из скорости звука	18
§ 11. Механический эквивалент теплоты, выведенный из скорости звука	19
§ 12. Отсутствие лучеиспускающей способности воздуха, выведенное из скорости звука	20
§ 13. Скорость звука в газах, жидкостях и твердых телах	21
§ 14. Предупреждения Гука о стетоскопе	23
Обзор первой лекции	24

Лекция вторая.

§ 1. Музыкальные звуки	25
§ 2. Музыкальные звуки, производимые ударами	27
§ 3. Музыкальные звуки, производимые дуновениями	31
§ 4. Музыкальные звуки, производимые камертоном	32
§ 5. Волны звука	33
§ 6. Определение высоты тона и быстроты вибраций	35
§ 7. Сирена, описание ее	35
§ 8. Определение длины волн: время вибрации	38
§ 9. Определение октавы	39
§ 10. Границы слуха и музыкальных звуков	40
§ 11. Барабан уха. Евстахиева труба	41
§ 12. Двойная система Гельмгольца	42
§ 13. Распространение музыкальных звуков в жидкостях и твердых телах	43
Обзор второй лекции	45

Лекция третья.

1.	Вибрации струн: влияние резонансовых поверхностей . . .	48
2.	Законы вибрирующих струн	68
3.	Механические иллюстрации вибраций. Поступательные и стоячие волны. Пучности и узлы	69
4.	Механические иллюстрации задерживания вибрирующей струны	72
5.	Стоячие водяные волны	74
6.	Применение механических иллюстраций к музыкальным струнам	75
7.	Опыты Мельде	77
8.	Новый способ определения законов вибраций	82

Гармонические верхние тоны (обертоны).

9.	Тембр; звуковой оттенок	85
10.	Слитие верхних тонов с основным. Эолова арфа	87
11.	Оптические иллюстрации Юнга	89
	Обзор третьей лекции	90

Лекция четвертая.

1.	Поперечные вибрации прута, укрепленного на обоих концах	93
2.	Поперечные вибрации прута, укрепленного на одном конце	94
3.	Тонометр Хладни, железная скрипка, музыкальный ящик и калейдоскоп	95
4.	Поперечные вибрации прута, свободного на обоих концах, Clarinet-vois и стеклянная гармоника	98
5.	Вибрации камертона	99
6.	Хладниевы фигуры	101
7.	Вибрации квадратных пластинок; узловые линии	103
8.	Уитстонов анализ вибраций квадратных пластинок	105
9.	Вибрации круглых пластинок	107
10.	Опыты Стрелке и Фаредея; перенос легких порошков	108
11.	Вибрации колоколов; способ сделать их видимыми	109
	Обзор четвертой лекции	112

Лекция пятая.

1.	Продольные вибрации проволок и прутьев; превращение продольных вибраций в поперечные	115
2.	Продольные волны в железе и латуни; определение их скорости	116
3.	Продольные вибрации прутьев, укрепленных с одного конца. Музыкальные инструменты, основанные на этом принципе	117
4.	Вибрации прутьев, свободных на обоих концах	119
5.	Разбивание стеклянной трубки звуковыми вибрациями	119
6.	Действие звуковых вибраций на поляризованный свет	120
7.	Вибрации деревянных прутьев; определение относительных скоростей в дереве разных родов	122

Резонанс.

8.	Опыты с стеклянными сосудами-резонаторами. Объяснение их	123
9.	Усиление резонансом звука колокола	126
10.	Затрата движения при резонансе	126
11.	Резонаторы Гельмгольца	127

Органн ые трубки.

§ 12.	Принципы резонанса, примененные к органн ым трубкам	127
§ 13.	Вибрации закрытых трубок: деление их; верхние тоны	128
§ 14.	Вибрации открытых трубок; деление их и верхние тоны	130
§ 15.	Скорость звука в газах, жидкостях и твердых телах определяемая при помощи музыкальных вибраций	135

Язычки и трубки с язычками.

§ 16.	Голос	139
§ 17.	Гласные звуки	140
§ 18.	Телефон Беля	142
§ 19.	Телефон Эдиссона	144
§ 20.	Микрофон	146
§ 21.	Фонограф	147
§ 22.	Опыты Кундта; новые способы определения скорости звука	149
§ 23.	Объяснение затруднения	153
§ 24.	Превращение лучистой теплоты в звук	154
§	Обзор пятой лекции	161

Лекция шестая.

§ 1.	Ритм трения. Музыкальное вытекание жидкости из узкого отверстия	166
§ 2.	Музыкальное пламя	167
§ 3.	Экспериментальный анализ музыкального пламени	168
§ 4.	Скорость вибрации пламени. Опыт Теплера	171
§ 5.	Гармонические звуки пламени	172
§ 6.	Действие посторонних звуков на пламя. Опыты Шавгоча и Тиндалля	173

Открытые чувствительные пламена.

§ 8.	Опыты с пламенами, имеющими форму рыбьего хвоста и крыла летучей мыши	176
§ 9.	Опыты с пламенами из круглых отверстий	178
§ 10.	Место чувствительности	180
§ 11.	Влияние высоты звука	180
§ 12.	Действие гласных на пламя	182
§ 13.	Чувствительное пламя Филиппа Барри	183
§ 14.	Чувствительное пламя лорда Рейлея	184
§ 15.	Собирающие и рассеивающие звук чечевицы	184
§ 16.	Чувствительные струи дыма	186
§ 17.	Строение жидких струн. Чувствительные водяные струи	188
§	Обзор шестой лекции	195

Лекция седьмая.

Ч А С Т Ь I.

Исследования об акустической прозрачности атмосферы в применении к вопросу о сигнализации при туманах.

§ 1.	Введение	197
§ 2.	Положение вопроса	199
§ 3.	Приборы и наблюдения	201
§ 4.	Влияние звуковой тени	206
§ 5.	Противоречивые результаты	208

§ 6.	Разрешение противоречий	209
§ 7.	Эхо от невидимых акустических облаков	212
§ 8.	Экспериментальное доказательство отражения звука от газов	215
§ 9.	Отражение от паров	217

Ч А С Т Ь II.

Исследование причин, которые до сих пор считались препятствующими распространению звука по воздуху.

§ 1.	Влияние града и дождя	222
§ 2.	Действие снега	224
§ 3.	Прохождение звука через тгани и искусственный дождь	226
§ 4.	Действие тумана. Наблюдение в Лондоне	226
§ 5.	Наблюдение в Соус Фореленде	230
§ 6.	Опыты с искусственными туманами	232
§ 7.	Действие ветра	234
§ 8.	Атмосферный подбор	237
§ 9.	Заключительные замечания	238
Обзор	седьмой лекции	242

Л е к ц и я в о с ь м а я.

§ 1.	Закон колебаний в воде и воздухе. Встречи колебаний	244
§ 2.	Интерференция звука	246
§ 3.	Экспериментальные доказательства	248
§ 4.	Интерференция волн органных трубок	249
§ 5.	Придуманное Лиссажу оптическое изображение биений двух камертонов	252
§ 6.	Интерференция волн вибрирующего диска. Опыт Гопкинса и Лиссажу	254
§ 7.	Погашение звука одной ножки камертона звуком другой	255
§ 8.	Беззвучные зоны генерала Дуана	258
§ 9.	Комбинационные тоны.	260
Обзор	восьмой лекции	265

Л е к ц и я д е в я т а я.

§ 1.	Музыкальный консонанс (созвучие)	267
§ 2.	Теория музыкального консонанса. Пифагор и Эйлер	272
§ 3.	Созвучающие (симпатические вибрации)	273
§ 4.	Созвучающие вибрации в их отношении к человеческому уху	275
§ 5.	Консонантные интервалы в их отношениях к человеческому слуху	276
§ 6.	Графическое изображение консонанса и диссонанса	278
§ 7.	Соединение вибраций	280
Обзор	девятой лекции	291

П Р И Л О Ж Е Н И Е I.

О влиянии музыкальных звуков на пламя струи светильного газа	297
--	-----

П Р И Л О Ж Е Н И Е II.

Об акустической обратимости	302
Замечательные примеры акустической непрозрачности	308

П Р И Л О Ж Е Н И Е III.

А. Эйхенвальд.—О звуках, издаваемых вольтовой дугой	311
---	-----

Издания научно-популярной секции Государственного издательства.

(Звездочкой помечены впервые издаваемые книжки, остальные вновь проредактированы).

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ:

Астрономия и математика.

- *) Михайлов А. А.—О солнечных затмениях.
- *) Фишер.—Исчисление бесконечно малых.
- Ройтман.—Форма и движение земли.

Б и о л о г и я.

- *) Алексеев А.—О происхождении животных и человека.
- *) Каммерер П.—Омоложение и продление личной жизни.
- *) Аркин Е. А.—Мозг и душа.
- Костычев С.—О появлении жизни на земле.
- Вагнер Ю. Н.—Рассказы о животных.
- » Рассказы о том, как устроены и как живут растения.
- » Рассказы о том, как устроено человеческое тело.
- Воронков Н. В.—По пресным водам.
- *) Шеффер А.—Жизнь, ее природа, происхождение и сохранение.
- Порецкий С. А.—Зеленый мир.

География и геология.

- Берен М.—Рассказы о борьбе человека с природой.
- Вагнер В. Н.—Рассказы о воде.
- » Рассказы о земле.
- Вальтер.—Первые шаги в науке о земле.
- Гербертсон.—Земля и труд человека.
- Гейки.—Физическая география.
- *) Павлов А. П.—Очерк истории геологических знаний.
- » Морское дно.

Физика и химия.

- Вагнер Ю. Н.—Рассказы о воздухе.
- *) Конобеевский С. Т.—Как плавают в воде, воздухе и как летают.
- *) » Что такое радий.
- Роско.—Химия.
- *) Тимирязев А. Н.—Что такое физика и чему она учит.
- *) Эйнштейн.—Теория относительности.

П л а к а т ы.

Солнечное затмение.

П Е Ч А Т А Ю Т С Я:

Астрономия и математика.

- *) Ньюком и Эггельман.—Популярная астрономия.
- Фламарион К.—Общедоступная астрономия.
- Чижов, С.—Звездные вечера.
- *) Эпик Э.—Солнце по новейшим исследованиям.
- *) Франц.—Луна.

Б и о л о г и я.

- *) Анучин Д. Н.—Происхождение человека.
- Богданов М.—Из жизни русской природы.
- Грич.—Начатки ботаники.
- Гессе Г.—Происхождение видов и дарвинизм.
- Елачич Е.—О вымерших животных. Пресмыкающиеся.
- *) Тимирязев К. А.—Солнце, жизнь и хлорофилл.
- *) Завадовский Б. М.—Отчего происходят болезни и как с ними бороться.
- *) Миэ Г.—О бактериях.
- *) Никитинский Я. Я. (младш.)—Стакан воды.
- Покровский С. В.—Среди природы.
- Морозов.—Лес, как растительное сообщество.
- Елачич Е.—О душевной деятельности животных.
- *) Берковз К. Н.—Сущность жизни, ее происхождение и развитие.
- Богданов М.—Мирские захребетники.
- Кайгородов Д. Н.—Черная семья.
- Тимирязев К. А.—Луи Пастер.
- „ Борьба растений с засухой.
- Порецкий С. А.—Как растения защищаются от своих врагов.
- „ Как растения защищаются от засухи и сырости.
- „ Хищные растения.
- „ Растения и свет.
- „ Растения дармоеды.
- „ Друзья растений.
- Синицын Д. Ф.—Лекции по биологии.

История культуры.

- *) Анучин Д. Н.—Открытие огня и способы его добывания.

География и геология.

- Брэм.—Жизнь на севере и юге.
- *) Жадовский Б. Э.—Русская Сахара.
- Львов Вл.—Каменный уголь.
- „ Соль и ее добывание.
- „ В нефтяном царстве.
- Гейки Г.—Геология.
- *) Михельсон В. А.—О погоде и как можно ее предвидеть.
- Нечаев А. П.—В царстве воды и ветра.
- Нансен Ф.—На крайнем севере.
- *) Павлова М. В.—Ископаемые слоны.
- *) Швецов М. И.—Железо, его родина и история.
- *) Шульга-Нестеренко М. И.—Снег и лед в жизни земли.

Ф и з и к а.

- Гильом.—Начатки механики.
*) Грец.—Краткий курс электричества.
*) Конобеевский С. Т.—О строении вещества.
*) Гюнтер.—Электротехник-строитель, т. 1-й и II-й.
Лермантов В.—Как машины работают.
Тиндаль.—Звук.
*) Шмидт Г.—Проблемы современной химии.
*) Вагель.—Романтика химии.
*) Классен.—12 лекций о природе света.

ПОДГОТОВЛЯЮТСЯ К ПЕЧАТИ.

Астрономия и математика.

- *) Борель. Случай.
Клейн.—Астрономические вечера.
*) Серебряков.—Земля.

Б и о л о г и я.

- Мольденгауер.—В хвойном лесу.
" В лиственном лесу.
Сеченов.—Физиологические очерки.
Фабр.—Жизнь насекомых.
*) Сборник классических статей по биологии и психологии для выработки материалистического мировоззрения.
*) Молиш.—Сборник статей.
Вольногорский.—Растения—друзья человека.
" Сборник статей.

География и геология.

- Арнольди.—По островам Малайского архипелага.
Пименова.—Горы и их победители.
" Море и его обитатели.
Елачич Евг.—О происхождении птиц.
Нииольский А. Н.—Летние поездки натуралиста.
*) Нечаев А. П.—Земной портрет.
*) " Металлы и руды.
" Между огнем и льдом.
*) Павлова М. В.—Мамонт.
Реклю Э.—Ручей.

История культуры.

- Берлин Я. А.—Великая семья человечества. 4 выпуска.
Коропчевский Д.—Прежде и теперь.
Вейлз.—От бирки до алфавита.
*) Мюллер-Лэр.—Фазы культуры.

Физика и химия.

- *) Гюнтер Г.—Радиотехника.
*) Сборник классических статей по физике для выработки материалистического мировоззрения.
Фарадей.—История свечи.



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
Главное Управление :: Москва :: 1922