

Физика

Библиотечка  
физико-математической школы

В. В. МАЙЕР

**ПРОСТЫЕ  
ОПЫТЫ  
ПО КРИВОЛИНЕЙНОМУ  
РАСПРОСТРАНЕНИЮ  
СВЕТА**



В. В. МАЙЕР

# ПРОСТЫЕ ОПЫТЫ ПО КРИВОЛИНЕЙНОМУ РАСПРОСТРАНЕНИЮ СВЕТА



Москва «Наука»  
Главная редакция  
физико-математической литературы  
1984



22.34  
М 14  
УДК 535

Физика

*Библиотечка  
физико-математической школы*

Редактор серии  
Я. А. Смородинский

**МАЙЕР В. В. Простые опыты по криволинейному распространению света.** — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. — 128 с.

Книга содержит описания учебных опытов по криволинейному распространению света, которые рекомендуются для самостоятельной постановки учащимися старших классов. Приведены сведения о методах создания оптически неоднородных сред. Подробно рассмотрены оптические свойства неравномерно нагретого оргстекла — основного материала для экспериментов. Предложены конструкции простых приборов для моделирования миража, зеленого луча, гравитационной линзы, электронно-оптических систем. Все опыты доступны и могут быть поставлены в школьном физическом кабинете или в домашних условиях. Проводя небольшие экспериментальные исследования, читатель познакомится с интересными и практически важными оптическими явлениями, приобретет навыки самостоятельной работы.

Для преподавателей физики средней и высшей школы, руководителей физических и технических кружков, а также для лиц, занимающихся самообразованием.

М  $\frac{1704010000-054}{053(02)-84}$  174-84

© Издательство «Наука»  
Главная редакция  
физико-математической  
литературы, 1984

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	5
§ 1. Загадка нагретого оргстекла . . . . .	7
§ 2. Осветители для получения узких световых пучков . .	9
§ 3. Плоскопараллельная кювета для опытов по криволиней- ному распространению света . . . . .	13
§ 4. Пучок света, искривленный оптически неоднородной жидкостью . . . . .	15
§ 5. Радиус кривизны искривленного пучка . . . . .	19
§ 6. Волнообразный ход светового пучка . . . . .	21
§ 7. Наблюдения наклонной полоски сквозь оптически неод- нородную среду . . . . .	23
§ 8. Почему при наблюдениях через оптически неоднородную среду прямой отрезок выглядит изогнутым? . . . . .	25
§ 9. Оптическая неоднородность и исчезающий предмет . .	32
§ 10. Тень от неравномерно нагретого оргстекла . . . . .	35
§ 11. Самодельная призма из оргстекла . . . . .	38
§ 12. Зависимость показателя преломления оргстекла от тем- пературы . . . . .	41
§ 13. Градиент показателя преломления в неравномерно на- гретом оргстекле . . . . .	45
§ 14. Криволинейное распространение света в неравномерно нагретом оргстекле . . . . .	49
§ 15. Неоднородность на оконном стекле . . . . .	56
§ 16. Собирающая линза из плоскопараллельной пластинки .	59
§ 17. Псевдолинза Роберта Вуда . . . . .	63
§ 18. Псевдолинза из капли желатина . . . . .	66
§ 19. Законы Фика, Фурье и псевдолинза . . . . .	69
§ 20. Псевдолинза из неравномерно нагретого оргстекла . .	71
§ 21. Псевдолинза из оргстекла с электрическим нагревателем	74
§ 22. Рассеивающая псевдолинза из оргстекла . . . . .	78
§ 23. Световой пучок внутри псевдолинзы . . . . .	81
§ 24. Модели миража в воздухе . . . . .	86



§ 25. «Лужи» внутри оргстекла . . . . .	93
§ 26. Зеленый луч . . . . .	98
§ 27. Модель гравитационной линзы . . . . .	106
§ 28. Оптические модели электронно-оптических систем . .	113
§ 29. Несколько слов о терморегуляторах . . . . .	119
§ 30. Дополнительные задания для самостоятельной про- работки . . . . .	122
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>127</b>

*«Школьник понимает физический опыт только тогда хорошо, когда он его делает сам. Но еще лучше он понимает его, если он сам делает прибор для эксперимента.»*

*П. Л. Капица*

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Слова выдающегося экспериментатора П. Л. Капицы, взятые в качестве эпиграфа к книге, которую вы, читатель, держите в своих руках, полностью определяют ее цель и задачи. Поэтому можно было бы обойтись и без предисловия, однако оно нужно автору по двум причинам.

Во-первых, он должен предупредить вас, что книга, хотя и популярна, и посвящена описанию простых опытов, но отнюдь не проста в том смысле, что требует от вас работы. Лучше, наверное, сказать так: автор предлагает совместно провести небольшие исследования ряда интересных и практически важных оптических явлений. Свою часть работы он выполнил несколько раньше, чем вы начнете делать свою. Но он старался сделать все, чтобы вы успешно смогли догнать и опередить его.

Вторая причина — это тоже долг, но приятный. Книга, как уже говорилось, в основном содержит описания опытов. А прежде чем браться за описание опыта, его нужно придумать и поставить. На каждый удачный опыт немало опытов приходится неудачных — просто потому, что плохих идей всегда больше, чем хороших. Всякий удачный опыт в свою очередь требует многократной проверки — лишь тогда его можно рекомендовать для повторения. Существенная часть этой многообразной и зачастую не самой веселой работы была проделана Е. С. Мамаевой,

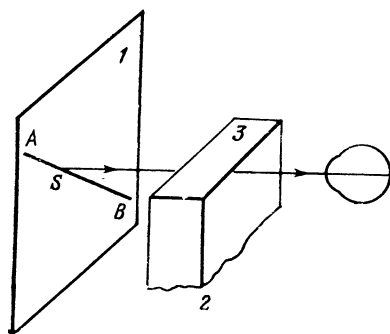
Л. С. Кропачевой, А. Ф. Волковым, О. Г. Батаноговой, А. Н. Тепиным. Идея основной серии опытов возникла в результате обсуждения наблюдения, выполненного в нетривиальных условиях В. С. Коротавым. Автор искренне благодарен всем своим товарищам по работе. Он будет весьма признателен и тем читателям, которые укажут на недостатки книги.

*Автор*

## § 1. ЗАГАДКА НАГРЕТОГО ОРГСТЕКЛА

В обычном куске оргстекла скрываются тайны, о которых вы вряд ли догадываетесь. Тут не нужно много говорить об этом: ищите оргстекло, и мы сразу приступим к делу.

Подойдет любой брусок оргстекла, две противоположные грани которого прозрачны и параллельны между собой. Лучше, если толщина бруска (расстояние между прозрачными гранями) составит 30—40 мм.

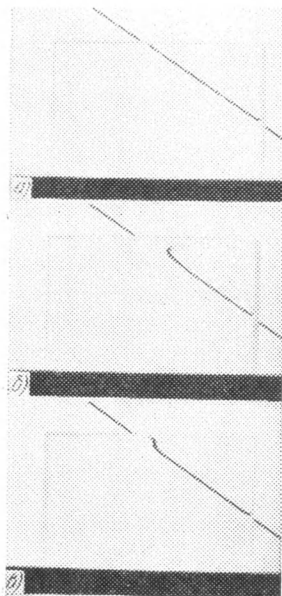


**Рис. 1.** Схема наблюдения отрезка прямой линии  $AB$  через брусок неравномерно нагретого оргстекла.

На листе белой бумаги 1 начертите отрезок прямой линии  $AB$  (рис. 1). Расположите брусок 2 на расстоянии 5—20 см от листа так, чтобы его прозрачные грани были параллельны листу и один из торцов 3 бруска пересекал начерченную линию под произвольным углом. Посмотрите сквозь прозрачные грани бруска на прямую линию.

Вы увидите прямую, как прямую. Правда, может случиться, что вблизи торца бруска она окажется

изломанной: это будет в том случае, если прозрачные грани бруска не совсем параллельны листу, и объясняется преломлением световых лучей, идущих от точек линии через плоскопараллельный брусок оргстекла в глаз. Устранить излом прямой, о котором идет речь, можно, слегка поворачивая брусок и добиваясь при этом параллельности между ним и листом бумаги. Когда это будет достигнуто, линия станет выглядеть совершенно прямой (рис. 2, а).



**Рис. 2.** Так выглядит отрезок прямой линии при наблюдении его сквозь брусок неравномерно нагретого оргстекла: а) брусок находится при комнатной температуре; б) верхний торец бруска нагрет; в) нагретое оргстекло охлаждается.

Теперь включите электроплитку (или иной подходящий нагревательный прибор) и, когда спираль ее раскалится, подержите над ней брусок так, чтобы прогрелся один из его торцов, например торец 3 (рис. 1). Слишком сильно нагревать оргстекло не следует: плохо, если оно уже начнет размягчаться. Достаточно такой температуры торца, при которой он ощущается горячим. Прогрев оргстекло в течение нескольких минут, удалите его от электроплитки и вновь посмотрите на прямую линию так, чтобы луч зрения проходил сквозь брусок вблизи его нагретого торца 3. Прямую линию вы увидите вверху изогнутой (рис. 2, б)! По мере охлаждения бруска эта изогнутая линия будет постепенно распрямляться (рис. 2, в).

Одного наблюдения мало, чтобы в деталях уловить суть явления. Поэтому повторяйте опыт, несколько изменяя его условия, до тех пор, пока не почувствуете, что заметили все, что в нем происходит. Вы должны убедиться, что при наблюдениях сквозь неравномерно нагретое оргстекло прямая линия воспринимается изогнутой во всех случаях, если

только она не перпендикулярна и не параллельна нагретому торцу бруска.

Чем же объясняется этот результат? Почему нагревание оргстекла приводит к такому изменению наблюдаемой сквозь него прямой?

Можно высказать два предположения. Первое заключается в том, что за счет расширения оргстекла при нагревании плоские прозрачные грани бруска слегка деформируются и преломляют свет так, что прямая, наблюдаемая через них, выглядит изогнутой. Второе предположение не столь очевидно, но более интересно. Вам, безусловно, случилось в жаркий летний день смотреть вдоль асфальтового покрытия дороги. Иногда при таких наблюдениях на совершенно сухой дороге видны «лужи» — блестящие участки асфальта, в которых отражаются небо, проезжающие автомобили или прохожие. Вы, конечно, знаете, в чем тут дело: воздух вблизи асфальта прогрет сильнее, чем на некоторой высоте от него, поэтому в прилегающем к асфальту слое воздуха определенной толщины показатель преломления непрерывно увеличивается в вертикальном направлении. В такой неравномерно нагретой и, следовательно, оптически неоднородной воздушной среде свет распространяется криволинейно. Именно этим объясняются «лужи» на сухом асфальте — это ни что иное, как маленький мираж. Правомерен вопрос: не происходит ли нечто похожее в неравномерно нагретом бруске оргстекла?

Выбрать из двух высказанных предположений правильное вы сможете только тогда, когда подробнее исследуете рассмотренное здесь явление.

*Для самостоятельной проработки*

1. Перельман Я. И. Занимательная физика. Книга 1. — М.: Наука, 1982, с. 156—159.

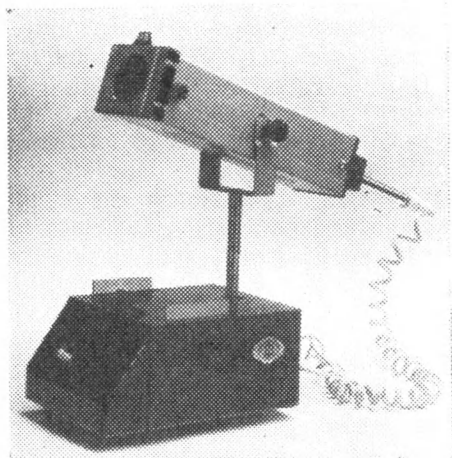
Здесь вы получите первоначальные сведения о миражах и их наблюдениях в экзотических и обычных условиях.

2. Если в неравномерно нагретом оргстекле свет действительно распространяется криволинейно, то не сумеете ли вы получить «лужи» внутри оргстекла? Попробуйте!

## **§ 2. ОСВЕТИТЕЛИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УЗКИХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ**

Можно было бы специально и не рассматривать осветители, но два соображения за то, чтобы уделить им некоторое внимание. Во-первых, осветители,

дающие узкие пучки света, используются во многих опытах по оптике. Во-вторых, наблюдения показывают, что действия работающих с выпускаемым промышленностью школьным осветителем (рис. 3) зачастую настолько малоосмысленны, будто этот простой прибор не признает никаких правил и нужный результат может быть получен лишь случайно.



**Рис. 3.** Этот выпускаемый промышленностью осветитель пригоден для большинства описанных в книге опытов.

Простейший осветитель содержит источник света и непрозрачный экран с небольшим отверстием, выделяющим нужный по ширине и форме сечения пучок света. Чем меньше отверстие в экране и чем дальше экран расположен от источника света, тем уже даваемый осветителем световой пучок, но и тем меньше энергия этого пучка.

На рис. 4 схематически изображен подобный осветитель. Он состоит из алюминиевого или картонного основания 1 с двумя отогнутыми стойками, на одной из которых закреплена лампочка карманного фонаря 2, а в другой — проделано отверстие, например, щель 3. Удобно в последней стойке сделать большое отверстие и затем перекрывать его непрозрачными экранами с необходимыми для тех или иных опытов отверстиями. Чтобы свет от лампочки,

идуший мимо экрана с отверстием, не мешал наблюдениям, осветитель следует обернуть черной бумагой (например, от фотопакета) и закрепить ее на стойках резиновыми колечками.

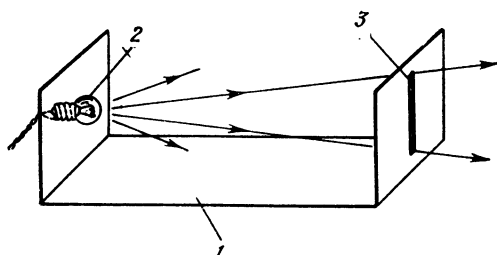


Рис. 4. Схема простейшего осветителя.

Основным недостатком простейшего осветителя является то, что он обеспечивает получение светового пучка лишь небольшой интенсивности. Чтобы избавиться от этого недостатка, можно использовать собирающую линзу. Посмотрите на рис. 5: весь световой поток, падающий от источника света  $S$  на линзу,

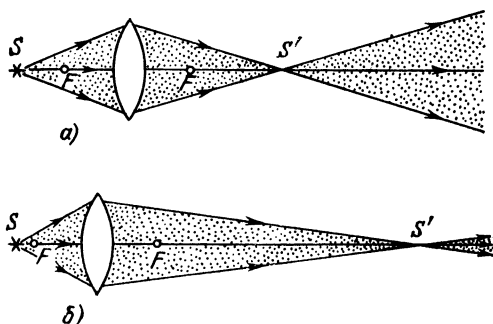


Рис. 5. Собирающая линза позволяет получить узкий пучок света.

преобразуется линзой так, что проходит через изображение  $S'$  источника. Вблизи изображения  $S'$  пучок света может быть достаточно узким и в то же время интенсивным. Действительно, энергия света в пучке определяется площадью отверстия линзы, и интенсивность — энергия, проходящая за единицу времени через единицу площади, — растет с уменьшением ширины пучка. В простейшем осветителе,



показанном на рис. 4, энергия пучка определяется площадью отверстия в непрозрачном экране, и интенсивность пучка с удалением от осветителя уменьшается, поскольку ширина пучка увеличивается. Сравнение рисунков 5, а и 5, б показывает, что чем ближе источник света  $S$  к фокусу  $F$  линзы, тем дальше от линзы получается изображение  $S'$  источника и, следовательно, тем длиннее та узкая часть пучка, которая может быть использована в опытах.

Школьный осветитель (рис. 3) собран по схеме, приведенной на рис. 5. Одна из возможных конструкций самодельного осветителя, аналогичного школьному, показана на рис. 6. На рейке 1 резиновым колечком 2 закреплена часовая лупа 3 с дву- или трехкратным увеличением, используемая в качестве лин-

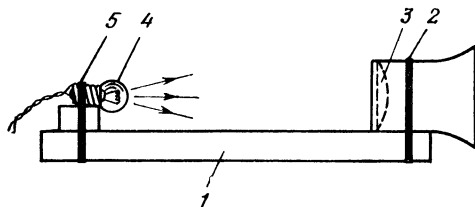


Рис. 6. Схема самодельного осветителя с собирающей линзой.

зы (определите ее фокусное расстояние!). На оси линзы расположена лампочка карманного фонаря 4, прикрепленная к рейке резиновым колечком 5 так, чтобы лампочку можно было перемещать относительно линзы. Осветитель следует снабдить кожухом из черной бумаги, если идущий мимо линзы свет от лампочки мешает наблюдениям.

Поэкспериментируйте с изготовленным вами осветителем. Вы должны уверенно получать от осветителя — будь он самодельным или фабричным — то, что нужно в условиях конкретного опыта. Поэтому попробуйте перемещать лампочку относительно линзы, поворачивать ее (спираль лампы накаливания имеет сложную форму, и от ориентации спирали зависит форма сечения светового пучка), перекрывать линзу экранами с различными отверстиями и т. д.

Последний совет: если в каком-то опыте окажется, что интенсивность светового пучка недостаточна, ее можно повысить, несколько увеличив напряжение

питания лампочки. Например, применяющуюся в школьном осветителе автомобильную лампу, рассчитанную на напряжение 6,3 В, без особого ущерба для нее в течение небольшого времени (до одного часа непрерывного горения) можно питать напряжением 8—9 В. Повышенное напряжение на лампы накаливания нужно подавать от регулируемого источника питания.

*Для самостоятельной проработки*

1. Слюсарев Г. Г. О возможном и невозможном в оптике. — М.: Физматгиз, 1960, с. 40—42.

Вы, конечно, обратили внимание на то, что описанные выше осветители позволяют получать узкие сходящиеся или расходящиеся световые пучки. Наилучшим был бы, однако, осветитель, дающий параллельный пучок света. Но мы даже не рассматривали такой осветитель. Разобраться в том, почему осветитель, который мог бы дать параллельный световой пучок, исключен из рассмотрения, поможет рекомендованная книга.

2. В большинстве изложенных ниже опытов в качестве источника света можно использовать лазер. Для этого нужно уметь получать из «параллельного» пучка лазерного света сходящиеся, расходящиеся и «параллельные» пучки, имеющие различную форму сечения. Если в физическом кабинете вашей школы имеется газовый лазер и учитель доверяет вам работу с ним, научитесь с помощью собирающих и рассеивающих линз преобразовывать нужным образом выходящий из лазера световой пучок.

### **§ 3. ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНАЯ КЮВЕТА ДЛЯ ОПЫТОВ ПО КРИВОЛИНЕЙНОМУ РАСПРОСТРАНЕНИЮ СВЕТА**

Для целого ряда оптических опытов потребуется длинная узкая прозрачная кювета, которую вы сможете сделать, например, из оргстекла. Конечно, можно воспользоваться готовой кюветой или аквариумом подходящего размера. Но в жизни пригодится умение обрабатывать и клеить оргстекло, поэтому, если вы никогда не занимались этим делом, сейчас как раз тот случай, когда вы сможете освоить его.

Было бы неплохо, если бы вы сделали кювету толщиной 50 мм, высотой 100—150 мм и длиной 300—400 мм (чем длиннее кювета, тем лучше). Из листового оргстекла толщиной 4 мм резакон или ножовкой по металлу вырежьте четыре пластинки — будущие стенки кюветы. Стенки, имеющие большие размеры, будем называть передней и задней; стенки с меньшими размерами — боковыми. Торцы боковых

стенок тщательно обработайте напильником так, чтобы они стали плоскими.

В небольшом стеклянном пузырьке с уксусной кислотой растворите такое количество опилок оргстекла, чтобы состав немного загустел — он должен «тянуться» вслед за вынимаемой из него стеклянной палочкой. Получившимся клеем смажьте подлежащие склейке места передней, задней и торцы боковых стенок. Дайте клею некоторое время подсохнуть, затем нанесите его снова и соедините между собой четыре стенки. Кювету без дна поставьте на стол и деревянными брусками подоприте ее переднюю и заднюю стенки так, чтобы она не развалилась (можно обвязать стенки заранее приготовленной тесьмой или скрепить липкой лентой).

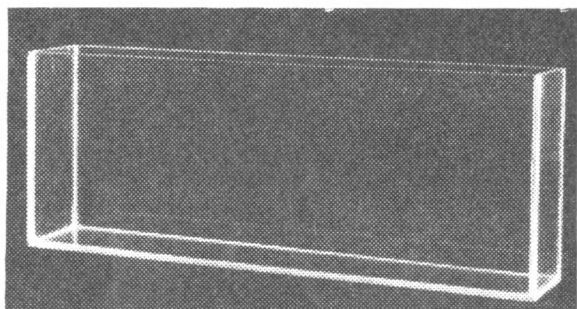


Рис. 7. Плоскопараллельная кювета из оргстекла.

Спустя сутки клей полностью высохнет, и вы получите возможность обработать напильником те торцы стенок, к которым должно приклеиться дно. Нужно добиться, чтобы каждый торец стал плоским, и все они лежали в одной плоскости. Может быть, проще всего это сделать, поставив кювету на большой плоский лист шкурки и, аккуратно двигая ее по шкурке, отшлифовать торцы стенок кюветы. Вслед за этим следует вырезать из оргстекла толщиной 4 мм дно и приклеить к нему стенки. Склеенная кювета вновь должна выстояться в течение суток.

Потом в кювету налейте воду и отметьте все места течи. В оставшемся клее растворите еще опилки оргстекла так, чтобы он приобрел густоту хорошей сметаны, и промажьте им обнаруженные места течи.

Готовую кювету после очередной просушки еще раз проверьте, наполнив ее водой, и, если она не течет, обработайте ребра кюветы напильником и шкуркой, придав им тот вид, который будет вас достоин.

На рис. 7 приведена фотография кюветы, как образец того, к чему нужно стремиться или что следует превзойти.

Обратите внимание, что по приведенному способу кювету придется делать три дня. Это хороший срок, и я не советую его сокращать, даже если вам покажется, что это можно сделать: скорость работы далеко не всегда является гарантией ее качества. Если вы первый раз делаете кювету, то подобрав материалы, тщательно продумайте порядок работы. Не ленитесь написать небольшой план. Попробуйте предусмотреть все мелочи. Особо внимательно выявите возможные препятствия в работе. Все это — не впустую потраченное время, а необходимые составляющие успеха.

*Для самостоятельной проработки*

1. Горячкин Е. Н. Лабораторная техника и ремесленные приемы. — М.: Просвещение, 1969, с. 111—115 и 117—118.

Приведены рецепты различных замазок, в том числе таких, которые позволяют соединить стекло со стеклом или стекло с металлом. Пользуясь подобными замазками, можно изготовить кювету не из оргстекла, а из стекла.

Описан способ склеивания оргстекла.

#### **§ 4. ПУЧОК СВЕТА, ИСКРИВЛЕННЫЙ ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ ЖИДКОСТЬЮ**

Чтобы на опыте пронаблюдать, как свет распространяется в оптически неоднородной среде, нужно совсем немного: создать такую среду и сделать ход светового пучка в ней видимым. Эти две задачи можно решить вполне традиционным путем [1]: взять две смешивающиеся жидкости с разными показателями преломления, окрасить жидкости соответствующим образом и аккуратно расположить одну над другой. Жидкости будут взаимно диффундировать друг в друга, и постепенно между ними образуется переходный слой с плавным изменением показателя преломления в вертикальном направлении. Остается лишь пустить в этот слой узкий световой пучок и пронаблюдать, как он будет распространяться.

В литре прокипяченной или отстоявшейся в течение суток воды (чтобы она не давала газовых пузырьков на стенках кюветы) растворите 350 г поваренной соли (сделайте насыщенный раствор) и залейте этот раствор в стеклянную банку. Во вторую такую же банку налейте литр чистой воды. Поставьте банки рядом и в обеих размешайте по щепотке хвойного концентрата (продается в аптеках). Водный раствор хвойного концентрата обладает способностью флюоресцировать — светиться зеленым светом под действием белого света. Это хорошо видно, если смотреть на раствор сбоку по отношению к падающему на него пучку света: при оптимальном количестве хвойного концентрата в воде раствор имеет приятный зеленоватый цвет. Избыток хвойного концентрата в растворах недопустим, так как он приведет к исчезновению флюоресценции (явление носит название концентрационного тушения). Нужно добиться одинаковой окраски жидкостей в обеих банках, понемногу растворяя хвойный концентрат в той жидкости, которая в падающем на нее рассеянном свете имеет менее насыщенную окраску. После этого нужно обе жидкости по отдельности отфильтровать через сложенную в несколько слоев марлю.

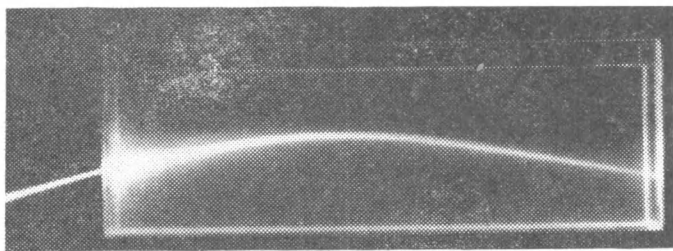
В расположенную горизонтально плоскопараллельную кювету (§ 3) размером  $50 \times 120 \times 350$  мм<sup>3</sup> вначале залейте подкрашенную хвойным концентратом воду. На конец большой воронки наденьте резиновый шланг и закрепите воронку над кюветой в лапке штатива (воронку можно держать рукой, если опыт вы готовите вдвоем). Пальцами пережмите шланг и залейте в воронку подкрашенный раствор поваренной соли. Затем погрузите шланг в воду и направьте его выходное отверстие на стенку кюветы возле ее дна. Постепенно ослабляйте зажим шланга. Вначале из отверстия шланга начнут выходить воздушные пузырьки, а потом станет вытекать раствор соли, который будет растекаться по дну кюветы и вытеснять воду вверх.

Спешить здесь не нужно: следует все сделать так, чтобы жидкости не перемешались. Когда раствор соли полностью перейдет из воронки в нижнюю часть кюветы (если воронка невелика, ее придется заполнять раствором соли несколько раз), вновь пережми-

те шланг и осторожным, но быстрым движением удалите его из жидкостей.

Дальше все сравнительно просто. Установите осветитель (§ 2), сфокусируйте свет в виде узкого пучка и направьте его на боковую стенку кюветы так, чтобы он падал на границу раздела жидкостей снизу. Если жидкости окрашены одинаково и залиты в кювету аккуратно, то граница раздела между ними получится очень четкой, и видна она будет только вблизи. В этом случае в темноте вы увидите красивый зеленый пучок света, который испытывает полное внутреннее отражение на границе раздела жидкостей, если падает на эту границу под углом, большем предельного.

Однако спустя примерно час за счет диффузии граница размывается, и световой пучок в переходном слое между жидкостями распространяется уже не прямолинейно (рис. 8). Никакие фотографии и



**Рис. 8.** Распространение света в оптически неоднородной среде: в кювете сверху находится вода, внизу — насыщенный раствор поваренной соли; падающий на кювету слева световой пучок был сделан видимым благодаря табачному дыму.

описания не заменят вам того впечатления, которое вы можете получить, наблюдая это прекрасное явление собственными глазами. Исследуйте его! Пускайте узкий световой пучок в кювету под разными углами к границе раздела жидкостей; сделайте широкий пучок и посмотрите, как он распространяется в оптически неоднородной среде; проследите, как изменяется ход пучка со временем и т. д. Одним словом, проявите максимум самостоятельности, увидев новое для себя явление, и не обращайтесь на мою сло-

весную скупость: к сожалению, я видел все это много раз, и восторги уже поулеглись.

Попробуем дать качественное объяснение явлению. В нижней части кюветы находится раствор поваренной соли, имеющий большую оптическую плотность, чем расположенная над ним вода. Поэтому показатель преломления жидкости в образовавшемся за счет диффузии переходном слое между раствором соли и водой непрерывно изменяется вдоль вертикальной оси  $y$  (рис. 9), плавно уменьшаясь с ростом

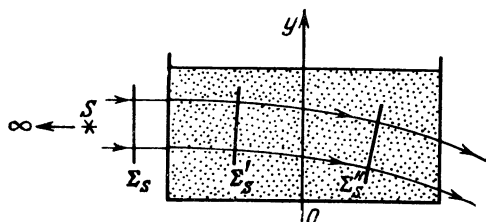


Рис. 9. К объяснению криволинейного распространения света в оптически неоднородной среде.

значений  $y$ . Поскольку абсолютный показатель преломления равен отношению скорости света в вакууме к скорости света в веществе  $n = c/v$ , скорость распространения света в верхних слоях жидкости больше, чем в нижних.

Если на кювету перпендикулярно оси  $y$  падает параллельный пучок света от источника  $S$ , лежащего в бесконечности, то плоская волновая поверхность  $\Sigma_s$  внутри жидкости будет поворачиваться, последовательно занимая положения  $\Sigma'_s$ ,  $\Sigma''_s$  и т. д. Это ясно, так как вверху кюветы свет распространяется быстрее, чем внизу. А световые лучи всегда перпендикулярны волновым поверхностям. Поэтому вместе с поворотом волновой поверхности произойдет и поворот лучей, так что образованный ими световой пучок изогнется в сторону от меньших к большим значениям показателя преломления жидкости. Понятно, что чем резче изменения показателя преломления вдоль оси  $y$ , тем больше и изгиб светового пучка: когда показатель преломления меняется скачком, наблюдаются обычное или полное внутреннее отражение света, и изгиб пучка выражен наиболее сильно.

Для самостоятельной проработки

1. Лекционные демонстрации по физике/Под ред. Ивероной В. И. — М.: Наука, 1972, с. 528—529.

Из этой книги заимствован изложенный выше способ приготовления оптически неоднородной жидкости.

2. Ландсберг Г. С. Оптика. — М.: Наука, 1976, с. 749—768.

Рекомендуемая вам глава книги Г. С. Ландсберга посвящена фотолюминесценции и написана вполне доступным языком. По ней вы сможете подробнее познакомиться, например, с явлением концентрационного тушения флюоресценции.

## § 5. РАДИУС КРИВИЗНЫ ИСКРИВЛЕННОГО ПУЧКА

Давайте немного посчитаем. Пусть параллельный световой пучок шириной  $dy$  распространяется в оптически неоднородной среде перпендикулярно оси  $y$ , вдоль которой изменяется показатель преломления среды (рис. 10). Допустим, что значение показателя преломления в точке  $B$  равно  $n$ , а в точке  $B'$  несколько меньше и равно  $n - dn$ . Пучок света загибается в сторону от меньших к большим значениям показателя преломления (§ 4), и радиус кривизны его  $R = OA = OB = OC$ . Будем считать, что радиус кривизны пучка значительно больше его ширины  $R \gg dy$ .

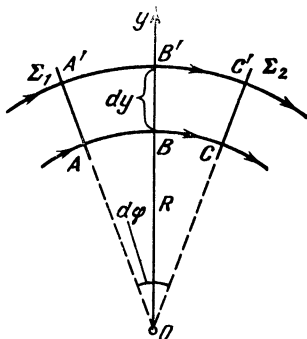


Рис. 10. К выводу формулы для радиуса кривизны светового пучка.

При распространении света в оптически неоднородной среде плоская волновая поверхность  $\Sigma_1$  переходит в поверхность  $\Sigma_2$ . Вместе с поворотом волновой поверхности на малый угол  $d\varphi$  поворачиваются и световые лучи. Путь  $ABC$ , равный  $Rd\varphi$ , свет проходит со скоростью  $v_1 = c/n$ , а путь  $A'B'C'$ , равный  $(R + dy)d\varphi$ , — с большей скоростью  $v_2 = c/(n - dn)$ , где  $c$  — скорость света в вакууме. Время  $\tau$  прохождения светом обоих путей одинаково, следовательно,

$$\tau = \frac{R d\varphi}{v_1} = \frac{(R + dy) d\varphi}{v_2}.$$

Подставляя в эту формулу значения  $v_1$  и  $v_2$ , имеем

$$\frac{Rn d\varphi}{c} = \frac{(R + dy)(n - dn) d\varphi}{c}.$$



Произведение  $dn/dy$  мало по сравнению с другими величинами, входящими в последнее соотношение, поэтому, отбрасывая его и производя необходимые сокращения, получаем

$$R = n \frac{dy}{dn} = \frac{n}{dn/dy}. \quad (1)$$

Величина  $dn/dy$  — это скорость (или быстрота) изменения показателя преломления вдоль оси  $y$ . Она имеет специальное название: градиент показателя преломления.

Формула (1) показывает, что чем больше градиент показателя преломления, тем меньше радиус кривизны, то есть тем сильнее искривляется световой пучок, проходящий сквозь оптически неоднородную среду. То же самое показывает и эксперимент: например, с течением времени градиент показателя преломления в слое между раствором поваренной соли и водой уменьшается (§ 4), и это приводит к увеличению радиуса кривизны искривленного светового пучка, то есть к уменьшению самого искривления.

Кое-кто считает, что все это следует растолковать вам подробнее. Нужно, например, не спеша объяснить, что такое лучи и волновые поверхности, как они связаны между собой, вспомнить принцип Ферма и т. п. Согласен, такое изложение полезно, но нельзя же писать обо всем! В конце концов, мне это просто не интересно. А с другой стороны, почему автор должен думать о вас хуже, чем вы того заслуживаете: напротив, я уверен, что раз уж вы поставили опыты с искривленным пучком света, то не полнитесь полистать книги или поговорить со знающими людьми, чтобы уяснить то, что вам не совсем понятно. Что же касается направления ваших поисков, то указать его — авторский долг, и это я пытаюсь сделать. Ну, а если опытов вы не поставили и делать их не собираетесь, то и разговаривать нам особо не о чем: извините, но вы ошиблись в выборе собеседника.

*Для самостоятельной проработки*

1. Поль Р. В. Оптика и атомная физика.— М.: Наука, 1966, с. 300—303.

Кратко изложены опыты по распространению света в оптически неоднородных жидкостях и дан вывод формулы для радиуса кривизны светового пучка. Настоятельно рекомендую познакомиться с этим материалом. Книга Р. В. Поля вообще очень

интересна. Особенно она полезна тем, кто начинает всерьез изучать оптику.

2. Калашников С. Г. Электричество. — М.: Наука, 1977, с. 43—45.

Здесь вы можете познакомиться с тем, как в электростатике вводится понятие градиента потенциала. Впереди мы еще будем иметь возможность убедиться, что электростатика имеет прямое отношение к предмету наших интересов. Следующая цитата, возможно, будет здесь уместна.

«Градиентом любой скалярной величины  $u$  в векторном анализе называют вектор, направление которого совпадает с направлением быстрейшего увеличения величины  $u$ . Величина же этого вектора равна изменению  $u$  при перемещении на единицу длины в направлении быстрейшего изменения. Этот вектор обозначается символом  $\text{grad } u$ .»

3. Мякишев Г. Я. Принцип Ферма и законы геометрической оптики. — Квант, 1970, № 11, с. 16—23.

Рассмотрен принцип Ферма и его применение для объяснения основных законов оптики, миража, преломления света на сферической поверхности, образования изображения линзой.

4. Шустер А. Введение в теоретическую оптику. — Л.; М.: ОНТИ, 1935, с. 33—51.

Рассматриваются лучи, волновые поверхности, принцип Ферма.

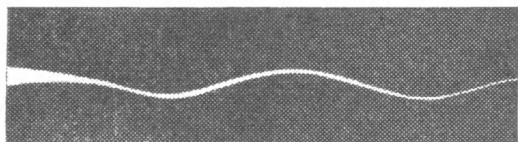
## § 6. ВОЛНООБРАЗНЫЙ ХОД СВЕТОВОГО ПУЧКА

В опытах по распространению света в оптически неоднородной жидкости (§ 4) пучок света изгибается в область с более высоким показателем преломления. Поскольку вы сумели изогнуть световой пучок в одну сторону, то сможете загнуть его и в другую. Очевидно, вы сумеете также заставить световой пучок последовательно изгибаться в разные стороны, то есть распространяться волнообразно. Из предшествующего ясно, что для этого нужно выше и ниже плоского слоя жидкости с определенным показателем преломления расположить жидкости, имеющие меньший показатель преломления и смешивающиеся с перзой. Диффузия на двух границах раздела между тремя жидкостями приведет к образованию среды с таким градиентом показателя преломления, который обеспечит волнообразный ход светового пучка в ней.

Сам я никогда такого опыта не ставил (по соображениям, которые будут понятны ниже). Но его делал Роберт Вуд — замечательный американский физик, автор множества красивых и оригинальных учебных экспериментов по оптике. Вам нелишне будет знать, как он сумел решить стоявшую перед ним

задачу, поэтому имеет смысл привести описание опыта, данное Вудом [1].

«Стеклянный сосуд размером  $50 \times 10 \times 2$  см<sup>3</sup> со стенками из зеркального стекла наполняется на 3 см крепким раствором квасцов. Сверху наливается слой воды, содержащей 10 % спирта; хотя эта жидкость много легче раствора квасцов, обе они имеют примерно равные показатели преломления. Смесь глицерина и 85 % спирта имеет показатель преломления много выше, а плотность — промежуточную между этими двумя жидкостями. Отсюда появляется возможность, пользуясь стеклянным сифоном с небольшим отверстием и горизонтально отогнутым концом, ввести между слоями первых двух жидкостей третью, промежуточную между ними по плотности жидкость... Все три раствора предварительно подкисляются серной кислотой и делаются флюоресцирующими путем прибавления к ним сернокислого хинина; благодаря этому пути лучей в них хорошо видимы. Осторожным помешиванием можно способствовать взаимной диффузии слоев; в результате мы будем иметь среду, в которой показатель преломления будет возрастать от поверхности до средней плоскости, и затем убывать от средней плоскости до дна; таким образом в ней будут условия, подобные атмосферным условиям,



**Рис. 11.** Волнообразный ход светового пучка: рисунок сделан по фотографии Р. Вуда.

обуславливающим появление «фата-моргана», т. е. кажущегося возвышения предметов, находящихся на горизонте, и образования башенок и горных пиков.

Если очень узкий пучок параллельных лучей, взятых от вольтовой дуги и пропущенных через конденсор, направить наклонно на один из концов сосуда, то можно будет видеть его распространение в жидкости в виде очень красивой синей волны, кривизна которой будет изменяться в зависимости от угла па-

дения. Такой луч света, сфотографированный прямо в сосуде, представлен на рис 11.»

Вряд ли вы легко сумеете достать вещества, перечисленные в рецепте Вуда. Но принцип создания оптически неоднородной среды с нужным распределением показателя преломления, надеюсь, вы уяснили. Поэтому вы можете попробовать сделать то же самое, что и Вуд, но пользуясь только водой и насыщенным раствором поваренной соли. Самое сложное в подготовке опыта — это расположить в кювете друг над другом воду, насыщенный раствор поваренной соли и снова воду.

*Для самостоятельной проработки*

1. Вуд Р. Физическая оптика. — Л.; М.: ОНТИ, 1935, с. 104—105.

2. Вуд Р. Искусственные миражи. — Квант, 1971, № 10, с. 29—32.

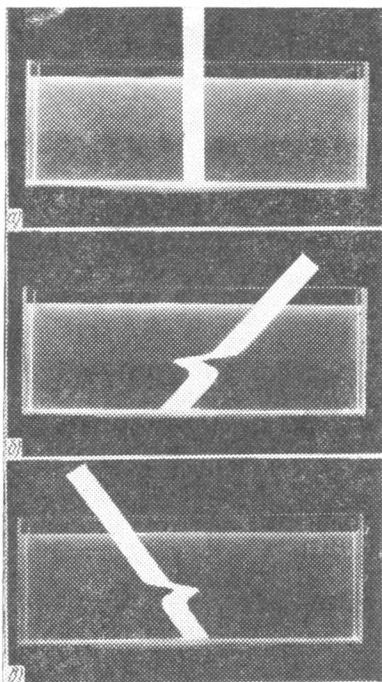
## **§ 7. НАБЛЮДЕНИЯ НАКЛОННОЙ ПОЛОСКИ СКВОЗЬ ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНУЮ СРЕДУ**

Вернитесь к плоскопараллельной кювете, в которой создан слой оптически неоднородной жидкости (§ 4), и проведите наблюдения предметов сквозь этот слой. Явления, которые при этом будут иметь место, весьма разнообразны. Я, однако, поведу речь лишь об одном из них, надеясь, что многое другое вы увидите сами, проявив наблюдательность и изобретательность на деле.

За кюветой в плоскости, расположенной параллельно ее передней и задней стенкам, поместите полоску белой бумаги (или какой-нибудь белый стержень) так, чтобы она была перпендикулярна границе раздела жидкостей, налитых в кювету. Сквозь жидкости вы увидите совершенно прямую полоску (рис. 12, а).

Теперь поворачивайте полоску в том или ином направлении так, чтобы она оставалась в плоскости, параллельной стенкам кюветы. Вы обнаружите, что при наблюдении через кювету, заполненную оптически неоднородной жидкостью, полоска выглядит изогнутой (рис. 12, б, в)! На ней как бы вырастает выпуклость, обращенная в сторону, противоположную направлению поворота полоски.

Фотографию, представленную на рис. 12, в, мысленно перекройте сверху до границы раздела жидкостей. Не правда ли, искривленная полоска очень похожа на искривленную прямую, которую вы наблюдали сквозь неравномерно нагретое оргстекло (§ 1)!



**Рис. 12.** Так искривляется прямая бумажная полоска, если наблюдать ее через оптически неоднородную среду.

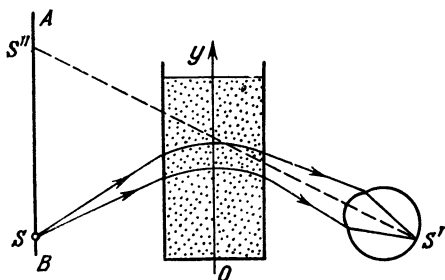
которой уменьшается в положительном направлении оси  $y$ . Вы уже знаете, что при распространении света через такую жидкость световой пучок изгибается, причем изгибается в сторону увеличивающихся значений показателя преломления, то есть вниз. Обозначим проекцию белой полоски на плоскость рисунка буквами  $AB$ . Узкий пучок света, выходящий из точки  $S$  бумажной полоски (ширина этого пучка определяется диаметром зрачка глаза), да-

Сопоставляя результаты указанных опытов, вы можете сделать предварительный вывод, что при неравномерном нагревании оргстекло действительно становится оптически неоднородным, и показатель преломления оргстекла с ростом температуры, скорее всего, уменьшается. Подобные рассуждения по аналогии очень полезны в физике, если, конечно, не забывать, что они ничего не доказывают.

Но оставим подробное рассмотрение затронутых вопросов до лучших времен и займемся выяснением причин, приводящих к видимому изгибу полоски.

На рис. 13 схематически показана кювета с оптически неоднородной жидкостью, показатель преломления

ет на сетчатке глаза изображение  $S'$ . Но глаз видит точку  $S$  не в том месте, где она расположена на самом деле, а в точке  $S''$ , в которой пересекаются мнимые продолжения лучей, непосредственно входящих в зрачок. Следовательно, если смотреть через оптически неоднородную среду, показатель преломления которой уменьшается в вертикальном направле-



**Рис. 13.** К объяснению искажений, возникающих при наблюдениях через оптически неоднородную среду.

нии, то все точки наблюдаемого объекта будут восприниматься приподнятыми. Ясно поэтому, что и наклонная полоска при таких наблюдениях должна выглядеть изогнутой. Но изогнуться она должна в вертикальном направлении, перпендикулярном границе раздела жидкостей в кювете, на самом деле же она изогнута в горизонтальном направлении (рис. 12)! В чем причина этого неожиданного эффекта?

*Для самостоятельной проработки*

1. Хвольсон О. Д. Курс физики. Том 2. — Берлин: Госиздат, 1925, с. 491—495.

Рассматривается элементарная теория миража. Пользуясь изложенными в книге идеями, вы сможете объяснить искривление полоски, наблюдаемой через оптически неоднородную среду.

## **§ 8. ПОЧЕМУ ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ ЧЕРЕЗ ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНУЮ СРЕДУ ПРЯМОЙ ОТРЕЗОК ВЫГЛЯДИТ ИЗОГНУТЫМ!**

Чтобы получить ответ на поставленный вопрос, нужно не спеша сделать опыты, аналогичные ранее описанным (§ 7). Вновь в длинной узкой кювете создайте оптически неоднородную среду, залив в

кювету воду и насыщенный раствор поваренной соли (§ 4).

— Ну и ну! — осуждающе покачает головой иной читатель. — Автор просто смеется надо мной, в третий раз предлагая делать одно и то же!

— Отнюдь, — невозмутимо отвечу я. — Кто же вам мешал, приготовив оптически неоднородную жидкость один раз, сразу провести все интересные наблюдения?! Помнится, был даже совет сделать это. Поэтому обижаться на меня — пустое занятие. Чтобы немножко успокоить вас и одновременно слегка оправдаться, по секрету сознаюсь, что сам я много лет подряд раз или два в год наливал в кювету воду и раствор соли, показывал криволинейное распространение света в оптически неоднородной жидкости, а затем с чистой совестью выливал эту жидкость, так и не удосужившись посмотреть сквозь нее на какую-нибудь полоску или иной предмет. Так продолжалось до тех пор, пока однажды кто-то не обратил мое внимание на искаженное изображение штатива, стоявшего за кюветой. Пришлось объяснять это явление. Сразу, однако, дать верное объяснение не удалось. Трудности, которые встретились при этом, и привели к описанным ниже опытам.

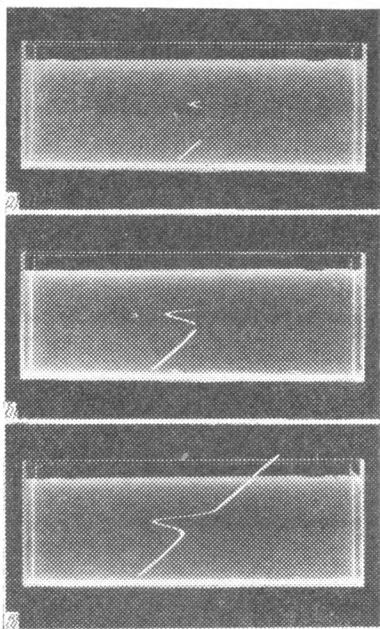
Прямо скажем, не слишком велико удовольствие рассказывать о себе такие вещи: было бы гораздо приятнее, если бы у читателя сложилось впечатление, что автор всегда и все знал обо всем. Но дело есть дело, а для него важно, что многое вошедшее в эту книгу автор увидел случайно. Следовательно, еще больше он не сумел увидеть. Значит, вам, читатель, осталось целое богатство, и только от вас зависит, как вы сумеете им распорядиться.

За кюветой на расстоянии 20—30 см от нее наклонно расположите длинную белую спицу, зажав ее нижний конец в подходящем держателе, например, в лапке штатива. Выберите перед кюветой место наблюдения и смотрите через кювету с оптически неоднородной жидкостью на спицу. Очень важно при постановке опыта сохранить направление наблюдения неизменным. Это можно сделать, если выбрать для своего глаза некоторый ориентир и проводить наблюдения, сообразуясь с ним. В жизни вы смотрите двумя глазами и поэтому часто не отдаете себе отчета в том, что это далеко не то же самое, как зрение

одним глазом. Нужно иметь в виду, что если при наблюдениях второй глаз будет вам несколько мешать (а это нередко случается с начинающими наблюдателями, еще не освоившими искусство «выключения» одного глаза), то лучше всего его не зажимать, а закрыть, например, куском картона или ладонью.

Работа упростится, если в проведении опыта помощь окажет один из ваших товарищей. Спицу нужно опустить вниз, чтобы она совсем не была видна через кювету, а затем постепенно поднимать спицу, сохраняя ее параллельной самой себе. Наблюдая за перемещающейся спицей, отметьте характерные изменения, происходящие с ее изображением (наблюдаемым — напомним это — из фиксированного положения и по фиксированному направлению), и сделайте ряд рисунков, показывающих развитие изгиба на изображении спицы.

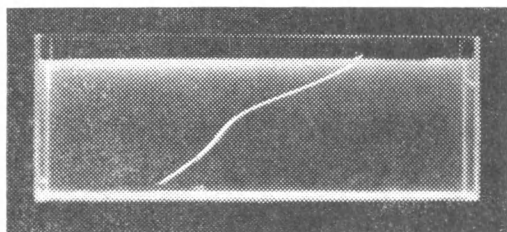
Мы изготовили последовательные фотографии явления, которые приводим здесь, чтобы облегчить вам работу. Когда спица поднята совсем немного, сквозь расположенный в кювете внизу насыщенный раствор поваренной соли видно неискаженное изображение ее конца, а вблизи границы раздела жидкостей наблюдаются два изображения конца спицы: нижнее — перевернутое и верхнее — прямое (рис. 14, а). Перевернутое изображение похоже получается за счет зеркального отражения света от границы раздела жидкостей. Если считать, что эта граница резкая (а это действительно так, если вы проводите наблюдения



**Рис. 14.** За кюветой с оптически неоднородной жидкостью расположена спица, которую поступательно перемещают вверх.



сразу после заливания жидкостей в кювету, когда диффузия еще не успела размазать границу), то появление перевернутого изображения можно объяснить полным внутренним отражением света от границы раздела жидкостей. В самом деле, свет, идущий от конца спицы, попадает на границу раздела снизу, то есть из оптически более плотной среды, и, если он падает под углами, превышающими предельный, полное внутреннее отражение должно иметь место. Но за счет чего получается верхнее прямое изображение конца спицы? Мы ответим на этот вопрос чуть позднее, а пока продолжим наблюдения, поднимая спицу все выше. Оба изображения конца спицы растут по величине (рис. 14, б), что совершенно понятно: через оптически неоднородную среду проходит свет от более длинной части спицы. Наконец, эти изображения сливаются вместе, и на полном изображении спицы получается тот характерный изгиб, который наблюдался и раньше в опытах с бумажной полоской (рис. 14, в). Существенно, что изгиб образуется только в той области, где жидкость оптически неоднородна; вне ее спица выглядит совершенно прямой.



**Рис. 15.** То же, что и на рис. 14, в, но фотография сделана спустя сутки после приготовления в кювете оптически неоднородной жидкости.

Если вы оставите установку без всяких изменений, например, на сутки, и затем повторите наблюдения, то окажется, что по прошествии времени изгиб изображения спицы уменьшился (рис. 15). Более того, спица теперь изогнута не в горизонтальном, а в вертикальном направлении! Ну, а такой изгиб вы уже умеете объяснять (§ 7).

С течением времени граница раздела между жидкостями благодаря диффузии размазывается все

больше, что приводит к уменьшению градиента показателя преломления в переходном слое. Этим, очевидно, объясняется уменьшение искривления прямой (спицы), которое обнаруживается через сутки после начала опыта. Значит — этот вывод вы не можете не сделать — по наблюдениям прямой через оптически неоднородную среду можно судить о величине (и направлении) градиента показателя преломления в среде.

Оставим на время это интересное замечание и разберемся с тем сильным изгибом изображения спицы, который наблюдается, когда градиент показателя преломления значителен (рис. 14). Прежде всего отметим, что зрачок глаза имеет небольшой диаметр (порядка 4 мм), поэтому входящий в него световой пучок узок. Следовательно, для удобства этот узкий световой пучок можно заменить одним лучом, идущим в центр зрачка глаза. Теперь можно брать отдельные точки на спице и пытаться провести световые лучи от них так, чтобы пройдя через оптически неоднородную среду, они попали в центр зрачка глаза. Однако, если вы попробуете сделать это, то быстро убедитесь, как непроста такая работа. Поэтому нужно отыскать прием, облегчающий ее.

Вспомните о законе обратимости хода световых лучей. Он утверждает, что если навстречу лучу, испытывавшему ряд отражений и преломлений, пустить другой луч, то он пойдет по тому же пути, который прошел первый, но в обратном направлении. Не станет ли решение задачи более простым, если мы будем искать не ход лучей, идущих из точек предмета через оптически неоднородную среду в глаз, а наоборот: ход лучей, как бы выходящих из глаза и попадающих в точки предмета?

Итак, пусть из центра зрачка глаза выходит пучок расходящихся лучей. В какие точки линии  $AB$  попадут эти лучи, пройдя через кювету с оптически неоднородной жидкостью?

Луч, вышедший из глаза горизонтально, если он падает как раз на границу раздела жидкостей в кювете, отклонится вниз на самый большой угол, так как градиент показателя преломления вдоль оси  $y$  вблизи границы раздела жидкостей наибольший. Допустим, что этот луч пересекает линию  $AB$  в точке  $S$ . Тогда луч  $I$ , испущенный точкой  $S$  в обратном

направлении, выйдет из кюветы горизонтально, попадет в глаз, и точка  $S$  будет восприниматься в положении  $S'$  (рис. 16, а).

Луч 2, вышедший из глаза и идущий ниже луча 1, отклонится от своего первоначального направления на меньший угол, чем луч 1, потому что он проходит существенно ниже границы раздела жидкостей, через

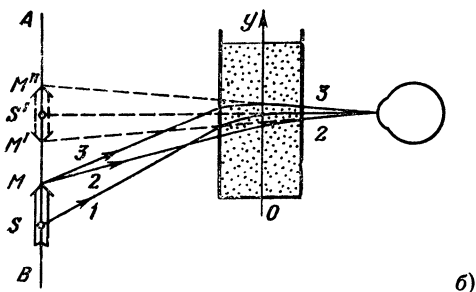
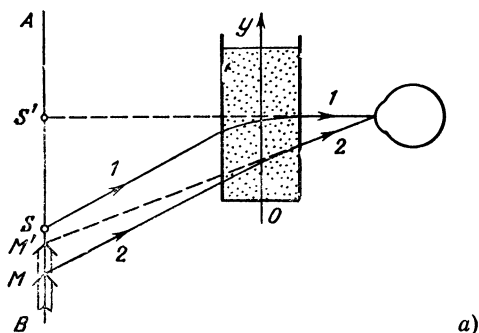


Рис. 16. К объяснению искажений предметов при наблюдении их через оптически неоднородную среду.

ту область, где градиент показателя преломления в жидкости меньше. Допустим, он попадает в точку  $M$  линии  $AB$ . Тогда согласно закону обратимости хода световых лучей точка  $M$ , испускающая луч в направлении 2, будет видна в положении  $M'$ .

Представим теперь, что по линии  $AB$  вверх вдвигается спица до тех пор, пока верхний конец ее не окажется в положении  $M$ . Глаз увидит спицу подня-

той еще выше так, что ее конец будет казаться находящимся в точке  $M'$ .

Чем выше поднимается спица, тем выше будет находиться и ее изображение. Когда верхний конец спицы достигнет точки  $S$ , сразу наряду с поднятым изображением спицы возникнет второе изображение ее конца в точке  $S'$ .

Если спицу поднять еще выше (рис 16, б) то тогда в ее конец  $M$  лучи из центра зрачка глаза могут прийти двумя путями: распространяясь выше и ниже границы раздела жидкостей. Верно и обратное: лучи, испущенные точкой  $M$  в направлениях 2 и 3 (а точка  $M$  испускает множество лучей во все стороны), попадут в глаз и, следовательно, они дадут два мнимых изображения  $M'$  и  $M''$  одной и той же точки  $M$ .

Поскольку точка  $S$  изображается в  $S'$  то отрезку спицы  $SM$  соответствует перевернутое изображение  $S'M'$ , образованное лучами, идущими ниже границы раздела жидкостей, и прямое изображение  $S'M''$ , образованное лучами, распространяющимися выше границы раздела.

Итак, мы полностью объяснили казавшееся поначалу загадочным искривление прямой при наблюдении ее через оптически неоднородную среду. Мы поняли также, почему не наблюдается искривления если прямая перпендикулярна или параллельна границе раздела сред с различной оптической плотностью: в первом случае изображение прямой деформировано в направлении самой прямой, а поскольку все точки прямой одинаковы, эта деформация не обнаруживается; во втором случае изображение прямой просто смещается, оставаясь параллельным самой прямой. Попутно мы узнали, что величина и характер искривления прямой полностью определяются градиентом показателя преломления среды.

Нельзя ли все это как-то использовать на практике?

*Для самостоятельной проработки*

1. Миннарт М. Свет и цвет в природе. — М.: Наука, 1969, с. 60—92.

В этой книге описаны многие интересные оптические явления. Почитайте главу об искривленных световых лучах в атмосфере. Попробуйте сопоставить явление миража с тем искривлением прямой, которое мы только что объяснили.

## § 9. ОПТИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ И ИСЧЕЗАЮЩИЙ ПРЕДМЕТ

Есть любопытный опыт, который вы без особого труда сможете поставить в школьном физическом кабинете. Схема опыта (вид сверху) изображена на рис. 17. Вплотную к конденсору проекционного аппарата 1 поместите плоскопараллельную прозрачную

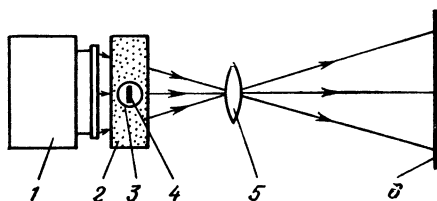


Рис. 17. Оптическая схема демонстрационного варианта опыта с исчезающим предметом.

кювету 2 из стекла или оргстекла. Внутри кюветы разместите стеклянную пробирку 3, а в нее опустите какой-нибудь небольшой непрозрачный предмет 4 (например, изогнутого из проволоки «человечка»). С помощью объектива 5 получите резкое изображение предмета на белом экране 6.

Налейте в кювету воду. Изображение предмета на экране сразу исчезнет, хотя вода вполне прозрачна: будет видна только темная пробирка с узкой светлой полоской по ее оси. Постепенно наливайте воду в пробирку: вы будете наблюдать, как на экране появляется отчетливое изображение предмета! Опыт можно повторять многократно, если опустить в пробирку тонкую стеклянную трубку, и резиновой грушей через трубку опорожнять и заполнять пробирку водой.

Объяснение результата опыта очевидно: когда в кювете находится вода, а в пробирке воздух, среда в кювете является оптически неоднородной; световые лучи преломляются на неоднородности среды (рис. 18) и не могут дать изображения предмета на экране. При заполнении пробирки водой среда становится почти оптически однородной (преломлением на тонкостенной пробирке в условиях этого опыта можно

пренебречь), свет в ней распространяется прямолинейно, и изображение предмета, находящегося в такой среде, может быть получено. Разумеется, расположенная в воде пробирка с воздухом представляет собой очень грубую неоднородность. Тем не менее описанный опыт позволяет уяснить суть дела. Не познакомить вас с ним я не мог еще и по той причине, что опыт очень эффектен и, поставив его, вы можете озадачить своих школьных товарищей.

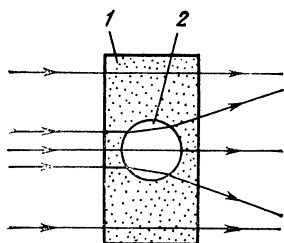


Рис. 18. Ход лучей через кювету 1 с водой, внутри которой находится пустая пробирка 2.

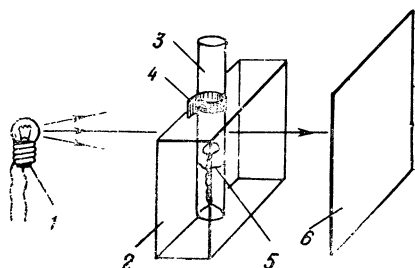
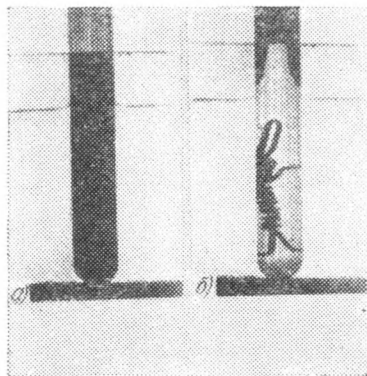


Рис. 19. Оптическая схема теневой проекции предмета, находящегося в среде с грубой оптической неоднородностью.

Более простой вариант рассмотренного опыта может быть осуществлен, если отказаться от получения изображения предмета на экране и ограничиться получением тени от предмета. Схематически эксперимент показан на рис. 19 (1 — лампочка карманного фонаря в качестве точечного источника света, 2 — плоскопараллельная кювета с прозрачными стенками, 3 — пробирка, подвешенная к стенке кюветы изогнутым из жести держателем 4, 5 — непрозрачный предмет, расположенный в пробирке, 6 — экран для наблюдений). Вы, безусловно, сможете не только самостоятельно разобраться в этом опыте, но и подобрать оптимальные условия его постановки. В этом вам помогут фотографии теневых изображений, представленные на рис. 20.

В сущности, предложенные здесь довольно грубые эксперименты нужны лишь для того, чтобы вы могли на практике убедиться в возможностях простейшего теневого метода наблюдения оптических неоднородностей в средах. О физической сути этого метода вы

уже догадались: нужно в расходящемся (параллельном или сходящемся — в зависимости от конкретной задачи) световом пучке расположить прозрачный объект, а за ним разместить белый экран. Если объект оптически однороден (и имеет одинаковую тол-



**Рис. 20.** Исчезающий предмет: а) в кювете находится вода, в пробирке — воздух; б) вода налита не только в кювету, но и в пробирку (часть пробирки между поверхностью воды и краем кюветы выглядит прозрачной потому, что за счет капиллярности вода поднялась по промежуткам между пробиркой и касающимися ее параллельными стенками кюветы).

щины), то экран будет освещен равномерно. При наличии в объекте оптической неоднородности свет будет преломляться на ней, и освещение экрана станет неравномерным: на экране не появится теневое изображение оптической неоднородности. Оно может быть либо светлым на темном фоне, либо темным на светлом фоне — в зависимости от характера неоднородности и конкретных условий эксперимента.

Этот простой метод интересен в первую очередь тем, что при умелом использовании дает совсем неплохие результаты. О чувствительности его можно судить по такому примеру: простейший теневой метод позволяет сделать видимыми на экране потоки нагретого воздуха, оптическая плотность которого крайне незначительно отличается от оптической плотности окружающего воздуха, имеющего комнатную температуру.

#### *Для самостоятельной проработки*

1. Лекционные демонстрации по физике/Под ред. Ивероновой В. И. — М.: Наука, 1972, с. 527—528.

В книге кратко описаны опыты, аналогичные разобранным выше.

2. Хвольсон О. Д. Курс физики. Том 2. — Берлин.: Госиздат, 1925, с. 293—295.

Дано краткое описание простейшего теневого метода.

3. *Васильев А. А.* Теневые методы. — М.: Наука, 1968, с. 12—30.

По этой книге вы можете познакомиться с современным применением теневых методов.

4. Недостатком описанных в этом параграфе опытов является то, что используемая в них неоднородность имеет правильную форму. Более впечатляют опыты с оптической неоднородностью, форма которой неправильна. Рекомендую вам попробовать сделать следующее.

Пластинку из оргстекла толщиной около 2 мм разогрейте над электроплиткой до размягчения и затем деревянными брусочками выдавите в ней вмятины так, чтобы пластинка оказалась причудливо деформированной. После остывания пластинки разделите ее плоскопараллельную кювету пополам. В одну половину кюветы поместите какой-нибудь непрозрачный предмет и получите его изображение на экране. Затем наливайте воду сначала в первую, а потом и во вторую половины кюветы, наблюдая за результатом эксперимента на экране.

## **§ 10. ТЕНЬ ОТ НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТОГО ОРГСТЕКЛА**

Неравномерно нагретое оргстекло вполне прозрачно, но оптически неоднородно: показатель преломления его непрерывно изменяется от точки к точке. Сумеете ли вы заметить эту оптическую неоднородность, если попытаете получить от оргстекла тень?

На первый взгляд, казалось бы, нет. В самом деле, тень — это область за непрозрачным предметом, в которую свет от источника не проникает. Но оптическая неоднородность в прозрачном предмете тоже прозрачна и, следовательно, не задерживает световые лучи. Значит, она не может дать и тени.

Рассуждение вроде бы выглядит логичным, но признать его верным — значит слишком поторопиться. Лучше не спеша поставить опыты и посмотреть, что получается на самом деле.

В качестве нагревателя можно использовать проволочный резистор типа ПЭВ-25 сопротивлением 1500—3000 Ом и мощностью 25 Вт. К выводам резистора припаяйте шнур с вилкой. Места спая тщательно изолируйте хлорвиниловыми трубками. Резистор указанных параметров можно включать непосредственно в электроосветительную сеть напряжением 220 В. Но работать с ним нужно осторожно, строго выполняя требования техники безопасности. Если раньше вы никогда не работали с сетевым напряжением, лучше взять резистор с меньшим сопротивлением (например, 510—300 Ом) и подключить его к источнику регулируемого напряжения (в школьном



кабинете физики имеются автотрансформатор типа РНШ и блок питания типа ВС-24м, которые вполне пригодны для ваших опытов). Постепенно повышая напряжение, вы будете увеличивать температуру резистора.

Нагревать резистор до температуры, превышающей  $100^{\circ}\text{C}$ , не нужно, поскольку это приведет к размягчению оргстекла, которого будет касаться резистор. Оценить температуру резистора вы можете несколько варварским, но зато простым и надежным «методом пальца и слюны»: прикоснитесь на мгновение к остеклованному корпусу резистора влажным пальцем, и вы сразу почувствуете, превысили ли вы допустимый предел температуры или нет. К слову сказать, рекомендованный метод оценки температуры нарушает правила техники безопасности в той же мере,

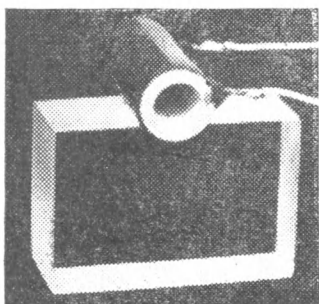


Рис. 21. Брусok из оргстекла с расположенным на нем нагревателем, в качестве которого использован мощный резистор.

в какой их нарушают все, пользующиеся электроутомом, — прибором вряд ли менее опасным, чем наш нагреватель.

Подберите брусок оргстекла толщиной около 30 мм. Две противоположные грани его должны быть прозрачными, плоскими и параллельными между собой. На верхний торец бруска положите резистор (рис. 21). На расстоянии примерно 1 м от бруска с резистором разместите лампочку карманного фонаря,

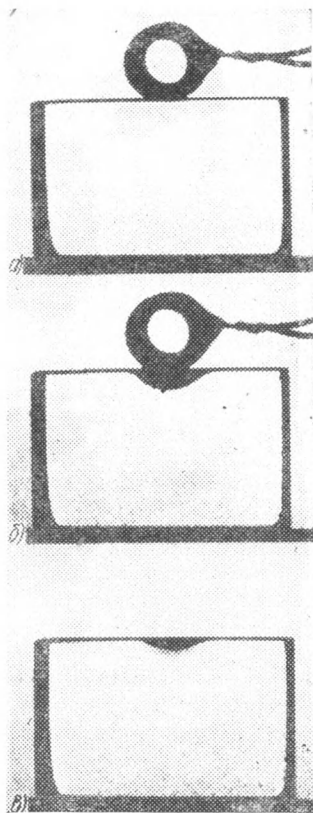
а за бруском на расстоянии около 20 см от него поставьте белый экран — лист плотной белой бумаги.

На экране вы будете наблюдать тень от бруска и резистора (рис. 22, а). Подайте на резистор напряжение, оптимальную величину которого вы определили предварительно. Спустя несколько секунд вы заметите, как тень на экране начинает изменяться: вблизи резистора на изображении бруска возникает темная область, окаймленная светлой полоской (не получившейся, к сожалению, на фотографии, приведенной на рис. 22, б), которая постепенно растет

Если, выключив напряжение, нагретый резистор за проводники снять с бруска, то тень от оптической неоднородности по мере охлаждения оргстекла будет уменьшаться, пока не исчезнет совсем (рис. 22, в).

Не спешите при постановке опыта. Повторите его несколько раз, чтобы не упустить ничего существенного. Явление настолько интересно и неожиданно, что каждый, увидевший его впервые, испытывает чувство изумления. Вы можете воспользоваться этим, скрыв от ваших товарищей резистор и показав им опыт в качестве физического фокуса. Вряд ли секрет его будет сразу разгадан.

Объяснение результата опыта не представляет особых трудностей (§ 9), и вы вполне способны дать его самостоятельно. Важно не упустить следующее. Когда свет распространяется в оптически неоднородной среде, он всегда изгибается в сторону от меньших к большим значениям показателя преломления (§ 5). Проведенный опыт показывает, что свет отклоняется в сторону от нагретого к холодному оргстеклу: на экране вокруг тени от области нагретого оргстекла расположена светлая полоска отклоненных этой областью лучей. Поэтому опыт свидетельствует, в частности, и о том, что при нагревании показатель преломления оргстекла уменьшается.



**Рис. 22.** Теневая картина от неравномерно нагретого оргстекла: а) оргстекло при комнатной температуре; б) резистор нагрет (светлая полоска, окаймляющая область тени от оптической неоднородности, на фотографии не получилась); в) резистор убран с поверхности бруска, и оргстекло охлаждается

1. Некоторые из вас могут подумать, что в описанном выше опыте существенно не столько уменьшение показателя преломления оргстекла при нагревании, сколько расширение оргстекла. Докажите, что это не так. Возможно, в этом вам помогут наблюдения теней от собирающей и рассеивающей линз.

2. *Борисов В. Г.* Юный радиолюбитель.— М.: Энергия, 1972, с. 159—161.

Пользуясь рекомендованной книгой, вы сумеете произвести элементарный расчет и в соответствии с ним изготовить трансформатор мощностью 60—80 Вт, понижающий сетевое напряжение 220 В до 36 В. Напряжение 36 В гораздо менее опасно, чем 220 В, и с ним вы можете работать более уверенно. Все без исключения нагреватели, используемые в опытах по криволинейному распространению света, можно переделать под напряжение 36 В (проверено!). В дальнейшем, однако, нередко будет говорить об использовании в опытах сетевого напряжения. Дело в том, что мне бывает очень неловко, когда выпускник средней школы не умеет обращаться с напряжением 220 В, на которое рассчитаны бытовые электроприборы.

3. Если вы работаете дома, то, наверное, имеет смысл отказаться от электрического нагревателя и сделать что-нибудь другое. Попробуйте, например, поставить на торец бруска из оргстекла тонкостенную алюминиевую баночку с плоским дном и налить в нее кипятка. Не правда ли, опыт становится не только безопасным, но и изящным! Мораль прозрачна: знакомясь с новым экспериментом, старайтесь придумывать более простые, доступные и безопасные его варианты.

## **§ 11. САМОДЕЛЬНАЯ ПРИЗМА ИЗ ОРГСТЕКЛА**

Для некоторых оптических опытов требуется треугольная призма из стекла или оргстекла. Можно найти готовую призму, но нетрудно изготовить ее и самостоятельно. Это тем более имеет смысл, если вам еще не приходилось заниматься шлифовкой и полировкой: вы научитесь простейшим приемам работы и попутно проникнитесь тем почтительным уважением к труду других, которое дается только после осознания собственных усилий.

Чтобы изготовить призму, выберите кусок оргстекла толщиной 25—40 мм и на противоположных поверхностях его друг против друга остро отточенной чертилкой нацарапайте треугольники необходимого размера. Зажмите оргстекло в тисках и ножовкой по металлу выпилите призму, следя за тем, чтобы ножовочное полотно проходило по намеченным линиям треугольников. Работа значительно об-

легчится, если время от времени в пропил вы будете вводить небольшие порции машинного масла.

Три рабочие грани призмы последовательно опилите сначала грубым, а потом мелким напильниками, стараясь сделать эти грани плоскими и выдержать между ними необходимые углы. Избегайте завалов по краям граней. Прямые углы призмы контролируйте угольником.

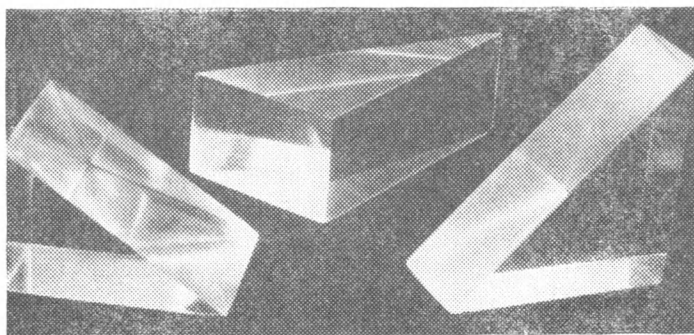
На поверхность стола положите ровный лист грубой шкурки размером примерно  $30 \times 30$  см<sup>2</sup> (чем больше площадь листа, тем легче вести обработку) и, не очень сильно прижимая призму к шкурке, равномерными круговыми движениями отшлифуйте ее грани. Обработку на грубой шкурке можно считать законченной, если с граней исчезнут царапины от напильника. После этого замените грубую шкурку более мелкой и шлифуйте поверхности призмы до тех пор, пока не исчезнут царапины от грубой шкурки. Так последовательно дойдите до самой мелкой шкурки (желательно, «нулевки»), которая имеется в вашем распоряжении.

Практика показывает, что лучшие результаты получаются, если шлифовку производить на стекле толщиной 4—6 мм. На поверхность стекла равномерно насыпьте тонкий слой абразивного порошка (если вы не сможете достать абразивный порошок, его можно получить, намочив шкурку в сосуде с водой). Нанесите на слой абразива несколько капель воды и, двигая по увлажненному абразиву призму, отшлифуйте ее грани. Закончив грубую шлифовку, осуществите тонкую, для чего очистите поверхность стекла от отработанного абразива и нанесите на нее более мелкий абразив. Нужно помнить, что отработанный абразивный порошок нельзя смывать в канализационную систему. О качестве произведенной шлифовки можно судить только после полировки. Впрочем, опыт приобретается довольно быстро, и вскоре вы сможете по внешнему виду поверхности уверенно определять, достаточна ее шлифовка или нет.

Изготовьте полировальник. Для этого на лист фанеры или доски толщиной 15—20 мм и площадью  $30 \times 30$  см<sup>2</sup> туго натяните два-три слоя прочной ткани, прибывая ее по торцу листа гвоздями. Смочите ткань керосином и по ее поверхности разотрите полировальную пасту ГОИ (продается в магазинах

медицинского оборудования и представляет собой похожие на затвердевший пластилин бруски зеленого цвета). Следует остерегаться избытка пасты: вполне достаточно бруском пасты ГОИ «нарисовать» на смоченной керосином ткани сетку со стороной квадрата 15—30 мм.

На полировальник наложите призму одной из отшлифованных граней и отполируйте ее, делая призмой без особого нажима на нее более или менее равномерные круговые движения. По мере срабатывания на полировальник нужно наносить новые порции пасты. Ткань полировальника должна быть натянута настолько сильно, чтобы при полировке на ней не образовывались складки.



**Рис. 23.** Самодельные призмы из оргстекла.

Обычная ошибка начинающих заключается в том, что они слишком торопятся. Им как-то не верится, что в итоге действительно получится «настоящая» призма с совершенно прозрачными гранями. Нужно верить в это, спокойно делать свое дело и тогда все выйдет наилучшим образом.

Отполированную призму тщательно вымойте в теплой мыльной воде (остатки полировальной пасты лучше предварительно удалить чистой тряпочкой, смоченной в керосине), ополосните под краном холодной водой и насухо вытрите. Осмотрите призму. Если вы заметите на ее гранях небольшие царапинки от мелкой шкурки, то вновь повторите полировку. Если остались крупные царапины от грубой шкурки, то при-

дется сначала повторить шлифовку мелкой шкуркой, а затем — полировку.

На рис. 23 представлена фотография самодельных призм из оргстекла, по которой вы можете судить о том, что примерно должно у вас получиться.

Как бы аккуратны вы ни были при изготовлении призмы, все равно ее грани получатся слегка выпуклыми. Этот недостаток самодельной призмы не так существенен в наших опытах и может даже обернуться достоинством в некоторых из них.

*Для самостоятельной проработки*

1. Навашин М. С. Телескоп астронома-любителя. — М.: Наука, 1979, с. 90—144.

В этой книге подробно изложены методы шлифовки и полировки стекла. Стекло отполировать гораздо сложнее, чем оргстекло. Поэтому, владея методами полировки стекла (либо представляя их себе чисто умозрительно), вы успешнее сможете отполировать оргстекло. В книге, помимо прочего, приведены сведения об абразивных порошках и приемах работы с ними.

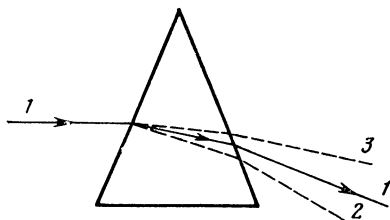
Знакомство с книгой М. С. Навашина полезно во всех отношениях — это увлекательный рассказ о том, как с помощью самых простых средств настойчивый человек может построить один из самых совершенных оптических приборов. Книга учит целеустремленности и мужеству, хотя на первый взгляд речь в ней идет о совсем других вещах.

## **§ 12. ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОРГСТЕКЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Зависимость показателя преломления оргстекла от температуры можно установить, поставив описанный ниже опыт.

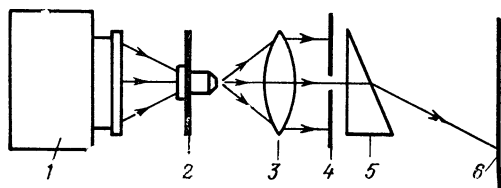
Представьте себе сделанную из оргстекла треугольную призму (рис. 24). Световой пучок 1, падающий на одну из ее боковых граней, отклоняется по выходе из призмы от ее вершины к основанию. Если показатель преломления материала призмы в силу каких-то причин увеличится, то изменятся углы преломления света на обоих гранях призмы, и выходящий из нее пучок 2 отклонится к основанию на больший угол. При уменьшении показателя преломления призмы уменьшится и угол отклонения пучка от первоначального направления так, что свет будет распространяться в некотором направлении 3. Таким образом, угол отклонения светового пучка от первоначального направления однозначно связан

с показателем преломления материала призмы. Нетрудно получить формулу, аналитически выражающую эту связь. Следовательно, измеряя в эксперименте углы отклонения света при разных значениях температуры призмы из оргстекла, можно установить зависимость показателя преломления оргстекла от температуры.



**Рис. 24.** Ход узкого светового пучка через призму: призма отклоняет падающий на нее пучок 1 к своему основанию; при увеличении показателя преломления выходящий из призмы пучок идет по некоторому направлению 2, при уменьшении — по направлению 3.

В точных опытах призму необходимо прогревать равномерно так, чтобы во всех ее точках показатель преломления был одним и тем же. Равномерный нагрев призмы вам почти недоступен — это очень



**Рис. 25.** Оптическая схема опыта по исследованию зависимости показателя преломления оргстекла от температуры.

непросто, равномерно прогреть какое-то тело. Тем не менее, опыт можно поставить, если не стремиться к получению количественных результатов. Качественно эффект будет достаточно хорошо выражен, если призму прогреть равномерно только в одной плоскости. Опыт, о котором сейчас пойдет речь, удобнее ставить в школьном кабинете физики.

На оптической скамье проекционного аппарата 1 (рис. 25; вид сверху) расположите непрозрачный

экран, в круглое отверстие которого вставлен 40× объектив 2 от старого микроскопа, и добейтесь, чтобы выходящий из конденсора проекционного аппарата световой пучок сходил на отверстии объектива. Объектив микроскопа дает сильно уменьшенное изображение проекционной лампы, которое в опытах будет являться точечным источником света. Применение объектива микроскопа обусловлено тем, что он простым способом (не нужно ничего делать!) позволяет получить яркий точечный источник. В принципе вы можете использовать просто небольшое отверстие, но тогда усложнится настройка установки и опыты придется проводить в полной темноте. Объектив микроскопа можно заменить стеклянным шариком диаметром 2—4 мм, полученным оплавлением в пламени спиртовки конца стеклянной нити, вытянутой предварительно из легкоплавкой трубки.

На той же оптической скамье расположите (закрепив в рейтере) объектив 3 с фокусным расстоянием примерно 10 см так, чтобы он давал близкий к параллельному световой пучок. За объективом разместите раздвижную щель 4, поверните ее вертикально и установите ширину щели около 2 мм. За щелью поместите призму 5 с преломляющим углом 30° или 45°, изготовленную из оргстекла, как описано выше (§ 11). Отклоненный призмой световой пучок поймите на белый экран 6. Если экран расположен недалеко от призмы (на расстоянии около полуметра), то на нем вы увидите узкую светлую полосу, по краям слегка окрашенную.

Собрав экспериментальную установку, приступайте к опыту. Призму ее нижней поверхностью поместите на какой-нибудь плоский нагреватель. Можно использовать утюг или электроплитку, если на их поверхности положить асбестовые прокладки и включать эти приборы в сеть через понижающий автотрансформатор или на небольшое время.

Разверните призму так, чтобы на экране получился четкий след вышедшего из нее светового пучка (рис. 26,а; представьте себе, что перед этим рисунком находится призма, ориентированная таким образом, что основание ее расположено справа, а нагреваемая поверхность снизу). Включив нагреватель, уже через несколько минут вы заметите, что часть пучка, прошедшая через нижнюю, ближайшую к на-



ревателю область призмы отклоняется влево, то есть в сторону от основания призмы к ее вершине (рис. 26, б). Это, очевидно, свидетельствует о том, что при нагревании показатель преломления оргстекла уменьшается.

Если вы и дальше будете нагревать призму снизу, то обнаружите, что световой пучок отклоняется не только к вершине призмы в горизонтальном направлении, но и вверх по отношению ко всей установке (рис. 26, в). Этот эффект вы уже умеете объяснять: в вертикальном направлении призма прогрета не-

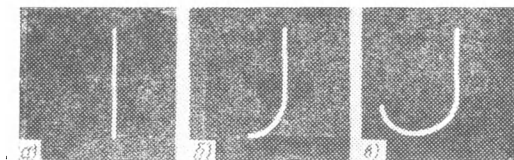


Рис. 26. Так при неравномерном нагреве призмы деформируется светлая полоска, образованная на экране узким пучком, прошедшим через призму.

равномерно, поэтому, как показывают предшествующие опыты (§ 10), свет внутри нее распространяется криволинейно и отклоняется в сторону от меньших к большим значениям показателя преломления.

Строгие количественные исследования показывают, что температурный коэффициент показателя преломления оргстекла (точное название которого полиметилметакрилат) для желтой линии натриевого спектра (обозначается  $D$ -линия) равен [1]

$$\alpha = \frac{dn}{dT} = -1,6 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}.$$

Значит, показатель преломления оргстекла зависит от температуры линейно, уменьшаясь с ее увеличением:

$$n = n_0 + \alpha(T - T_0), \quad (1)$$

где  $\alpha = -1,6 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$ ,  $n_0$  — показатель преломления при температуре  $T = T_0$ .

Ниже приведены экспериментальные результаты измерений показателя преломления оргстекла при различных значениях температуры [2].

Температура, °C	21	45	60
Показатель преломления орг-стекла	1,492	1,488	1,485

Вы можете сопоставить табличные данные с аналитической зависимостью (1) и убедиться, что они соответствуют друг другу.

Поражает, что ничтожные с обыденной точки зрения изменения показателя преломления оргстекла, происходящие при увеличении его температуры, приводят к хорошо наблюдаемым эффектам. Это одна из самых замечательных особенностей оптики: простые по идее и часто по осуществлению эксперименты позволяют глубоко проникнуть в сущность различных физических явлений.

Анализируя опыт, мы опустили возможное влияние вызванной нагреванием деформации призмы на ход светового пучка. Может быть, вы сами сумеете показать, что тепловое расширение оргстекла в условиях рассмотренного опыта не существенно?

*Для самостоятельной проработки*

1. Мальцев М. Д., Каракулина Г. А. Прикладная оптика и оптические измерения. — М.: Машиностроение, 1968, с. 71.

2. Кругер М. Я., Панов В. А., Кулагин В. В. и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов. — Л.: Машиностроение, 1967, с. 715.

3. Найдите способ постановки описанного выше опыта без использования электрического нагревателя.

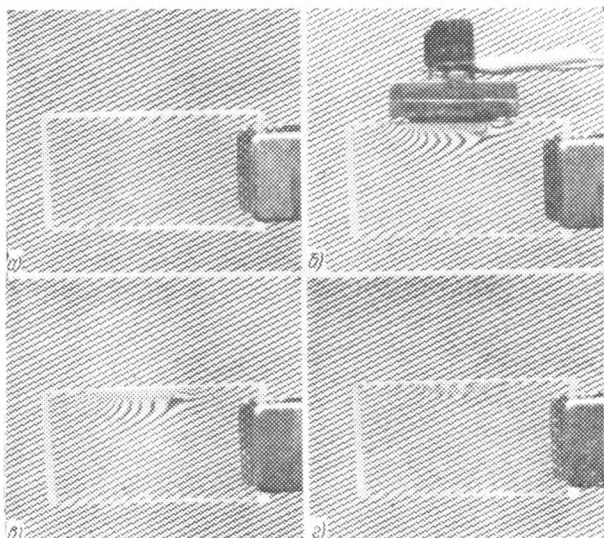
### **§ 13. ГРАДИЕНТ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТОМ ОРГСТЕКЛЕ**

Допустим, в оргстекле в результате неравномерного нагревания его создано сложное распределение температуры и, следовательно, градиента показателя преломления. Можно ли достаточно простым способом сделать видимым характер этого распределения?

Конечно, можно: опыты, которые вы уже поставили (§ 1, 7, 8), показывают, что для этого нужно, например, смотреть через неравномерно нагретое оргстекло на прямой отрезок, на решетку из параллельных и равноотстоящих друг от друга линий (полос)

или, что еще лучше, на сетку, состоящую из одинаковых квадратных ячеек.

На рис. 27, а приведена фотография плоскопараллельного бруска оргстекла, за которым расположена решетка, изготовленная из натянутых на каркас черных нитей (очевидно, можно использовать



**Рис. 27.** Оптическую неоднородность можно сделать видимой, если рассматривать ее на фоне решетки.

решетку, начерченную на листе белой бумаги). Если к одному из торцов бруска прижать нагреватель, то изображение решетки причудливо деформируется (рис. 27, б). Фотография, разумеется, не лучшим образом передает картину, которую видит глаз; вообще глаз видит больше и лучше фотоаппарата, поскольку он разумен. Если нагреватель убрать, оргстекло охлаждается, и за развитием этого процесса можно детально проследить (рис. 27, в, г).

Вы без особых затруднений сумеете повторить этот опыт, даже если у вас под рукой отсутствует специальный нагреватель: можно использовать электроутюг или электроплитку, некоторое время подержав над ними торец бруска из оргстекла; на торец

бруска можно поставить имеющую плоское дно алюминиевую баночку с горячей водой и т. п.

Самое интересное, что в этом простом опыте вы сможете не только качественно, но и количественно оценить градиент показателя преломления в различных точках или участках нагретого оргстекла. Обратимся к рис. 28. Луч света, выходящий из точки  $S$

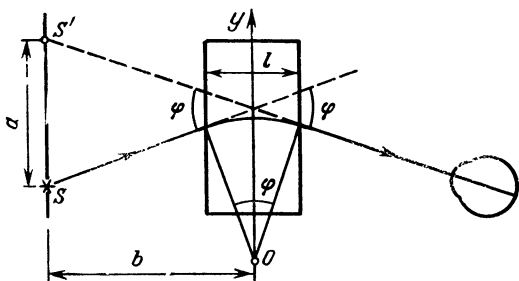


Рис. 28. К вычислению градиента показателя преломления.

какой-то линии решетки, проходя через неравномерно нагретое оргстекло, изгибается и попадает в глаз. Точка  $S$  поэтому воспринимается глазом в положении  $S'$ , отстоящем от  $S$  на некоторое расстояние  $a$ . Световой луч, прошедший в оптически неоднородной среде путь  $l$  (толщина оргстекла), изгибается на небольшой угол  $\varphi$ , который приблизительно равен  $\varphi = l/R$ , где  $R$  — радиус кривизны искривленного луча. С другой стороны этот же угол с той же степенью приближения  $\varphi = a/b$ , где  $b$  — расстояние от решетки до бруска оргстекла. Приравнявая два выражения для одного и того же угла, получаем

$$a/b = l/R \quad \text{или} \quad R = lb/a. \quad (1)$$

Вы знаете, что радиус кривизны выражается через градиент показателя преломления формулой (§ 5)

$R = \frac{n}{dn/dy}$ . Подставив это значение радиуса кривизны в формулу (1), получим, что градиент показателя преломления в направлении оси  $y$

$$\frac{dn}{dy} = n \frac{a}{bl}. \quad (2)$$

Показатель преломления оргстекла известен и примерно равен  $n = 1,5$ . Величины  $b$  и  $l$ , входящие

в формулу (2), нетрудно измерить. Остается только научиться определять значение  $a$ .

Это можно сделать, воспользовавшись, например, таким приемом. Допустим, что линии решетки при наблюдении их через оптически неоднородную среду изогнулись так, как показано на рис. 29. Требуется

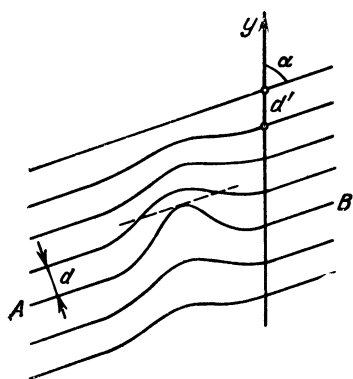


Рис. 29. Схематическое изображение деформации решетки при наблюдении ее через среду с оптической неоднородностью.

определить величину изгиба в направлении оси  $y$ . Поскольку непосредственно сделать это сложно, то величину изгиба можно выразить в целых и долях величины  $d'$  — расстояния между соседними линиями решетки в направлении оси  $y$ . Например, линия  $AB$  изогнулась на величину  $a = 1,5d'$ . В общем случае изгиб произойдет на  $a = kd'$ , где  $k$  — некоторый коэффициент, который для каждой области неравно-

номерно нагретого оргстекла необходимо специально определять из наблюдений. Но  $d' = d/\sin \alpha$ , где  $d$  — расстояние между соседними линиями решетки и  $\alpha$  — угол между решеткой и осью  $y$ . Следовательно, формулу (2) можно переписать в виде

$$\frac{dn}{dy} = n \frac{kd'}{bl} \quad (3)$$

или

$$\frac{dn}{dy} = \frac{knd}{bl \sin \alpha} \quad (4)$$

В полученные формулы входят только такие величины, которые можно определить на опыте.

Рассмотрим простой пример. В одном из наших экспериментов измерения дали следующие результаты:  $l = 30$  мм,  $b = 100$  мм и  $d' = 2$  мм. Градиент показателя преломления определялся в области, где искривление произошло на «одну полосу», то есть там, где  $k = 1$ . Подстановка перечисленных результатов в формулу (3) для градиента показателя преломле-

ния дает значение  $dn/dy = 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$ . Это означает, что на длине отрезка  $dy = 1 \text{ мм}$  в направлении оси  $y$  мы обнаружили изменение показателя преломления величиной  $dn = 0,001$ . Не правда ли, впечатляющий результат для столь простого опыта!

*Для самостоятельной проработки*

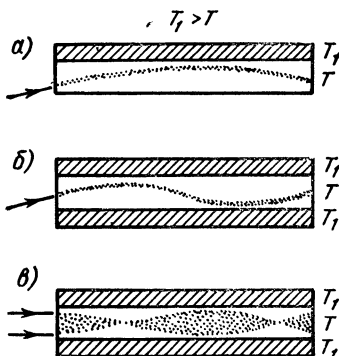
1. Остроумов Г. А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. — М.; Л.: Гостехиздат, 1952, с. 147—170.

Описаны методы наблюдения оптических неоднородностей, в том числе и метод решетки. Почитав эту книгу, вы поймете, что поставленные вами опыты — это не игра, а вариант методов, применяемых в научных исследованиях, который отличается от них лишь простотой и доступностью. Книга позволит вам придумать и поставить новые интересные эксперименты.

#### § 14. КРИВОЛИНЕЙНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТОМ ОРГСТЕКЛЕ

Вы уже немало экспериментировали с неравномерно нагретым оргстеклом, но еще не видели, как распространяется свет внутри оргстекла. То, что при этом должно наблюдаться, представить нетрудно, если вспомнить опыты по распространению света в оптически неоднородной жидкости (§§ 4, 6). На рис. 30 схематически изображены типичные оптические явления, которые будут иметь место в неравномерно нагретой полоске оргстекла.

Если нагревается верхняя грань выполненной из оргстекла полоски (рис. 30, а), то распространяющийся в оргстекле пучок света должен изгибаться вниз в сторону больших значений показателя преломления. Придавая нагревателю различные температуры, можно обеспечить разные градиенты показателя преломления в оргстекле и, следовательно, экспериментально изучить зависимость радиуса кривизны искривленного пучка от градиента



**Рис. 30.** Так может распространяться свет в полоске оптически неоднородного оргстекла.

показателя преломления. Если верхняя и нижняя грани полоски из оргстекла будут нагреты до одинаковой температуры, причем большей, чем температура средней части полоски, то узкий пучок света станет распространяться в оргстекле волнообразно (рис. 30, б), а широкий параллельный пучок — несколько раз сфокусируется (рис. 30, в). И эти эффекты вам уже знакомы и понятны. В самом деле, два параллельных нагревателя создают в оргстекле такой градиент температуры, при котором средний слой оргстекла с некоторым значением показателя преломления граничит с параллельными слоями, имеющими меньший показатель преломления. Свет, вошедший под определенными углами в средний слой, не сможет выйти из него: световые лучи в этом слое будут не прямыми, а волнообразными.

Таким образом, задача заключается в том, чтобы изготовить приемлемые для опытов нагреватели и найти способ сделать ход светового пучка в оргстекле видимым. Этим мы сейчас и займемся.

Простейший электрический нагреватель схематически изображен на рис. 31. Он состоит из асбоцементной рейки 1, на концах которой закреплены две клеммы 2. С клеммами соединен нихромовый провод 3, уложенный в пазы, прорезанные в рейке.

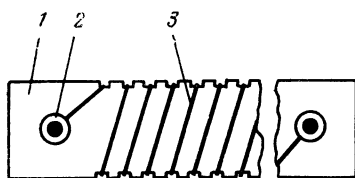


Рис. 31. Один из самых простых электрических нагревателей.

Чтобы исключить непосредственное соприкосновение нагревающегося электрическим током провода с оргстеклом, к нагревателю следует приклеить силикатным клеем асбестовые полоски. В наших опытах мы использовали рейку из асбоцемента сечением  $7 \times 15 \text{ мм}^2$  и длиной 150—300 мм (рейка была вырезана из асбоцементной трубы; такие трубы в настоящее время широко применяются в строительстве); пазы в рейке прорезались ножовкой по металлу так, что расстояние между соседними пазами составляло примерно 5 мм; для обмотки нагревателя применялся нихромовый провод диаметром 0,15—0,2 мм; в качестве термостойких изолирующих асбестовых полосок использовались асбестовые фитили, которые

можно приобрести в магазинах хозяйственных товаров.

Более удобен в работе нагреватель, показанный на рис. 32. Основой его является дюралева трубка 1 (вырезанная из старой лыжной палки) диаметром 15 мм и длиной 300—500 мм, вдоль поверхности

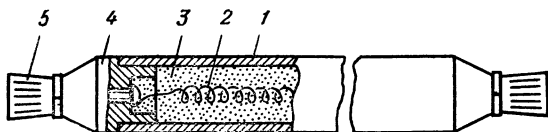


Рис. 32. Нагреватели, изготовленные по этому эскизу, удобны и безопасны в обращении.

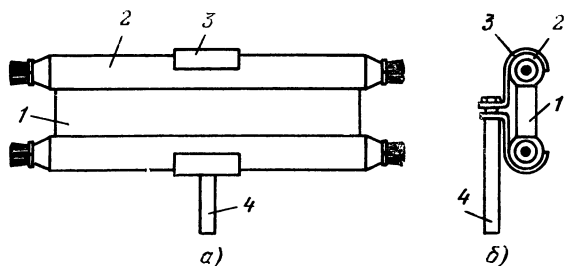
которой напильником сделана плоская площадка шириной 8—10 мм. В трубке находится нихромовая спираль 2 (диаметр спирали 5 мм, диаметр нихромового провода 0,4—0,6 мм; можно использовать спираль от электроплитки, взяв кусок ее подходящей длины). Трубку заполнена чистым речным песком 3, предотвращающим соприкосновение спирали с ее стенкой. Отверстия трубки закрыты изготовленными из текстолита заглушками 4. На заглушках расположены клеммы 5, болты которых соединены с концами спирали.

Для опытов необходимо изготовить два нагревателя той или иной конструкции; желательно, чтобы нагреватели были одинаковыми. Питая нагреватели удобнее всего от источников переменного регулируемого напряжения (например, школьных автотрансформаторов типа РНШ). Нужную величину напряжения следует подобрать экспериментально, имея в виду, что максимальная температура нагревателей не должна превышать 100 °С. Второй из описанных нагревателей довольно инерционен, поэтому при постановке опытов выгодно вначале подавать на него несколько повышенное напряжение, и после предварительного прогрева сбрасывать это напряжение до заранее определенной номинальной величины.

Одна из возможных конструкций прибора для наблюдения и демонстрации распространения света в оптически неоднородной среде изображена на рис. 33. В приборе использована полоска оргстекла 1 толщиной

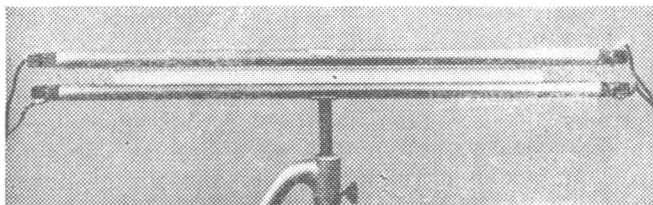


10 мм и длиной 300—500 мм. Ширину полоски выбирают в зависимости от желательных градиентов показателя преломления в пределах от 10 до 30 мм. Полоска оргстекла имеет плоские отполированные торцы (завалы по их краям заметно мешают проведению опытов, поэтому шлифовку и полировку торцов нужно осуществить как можно качественнее).



**Рис. 33.** Схема прибора для наблюдения криволинейного распространения света: а) вид спереди; б) вид сбоку.

Верхняя, нижняя и задняя грани полоски сделаны матовыми путем обработки шкуркой. Чтобы улучшить видимость светового пучка, задняя грань, помимо этого, покрывается слоем белой нитроэмали.



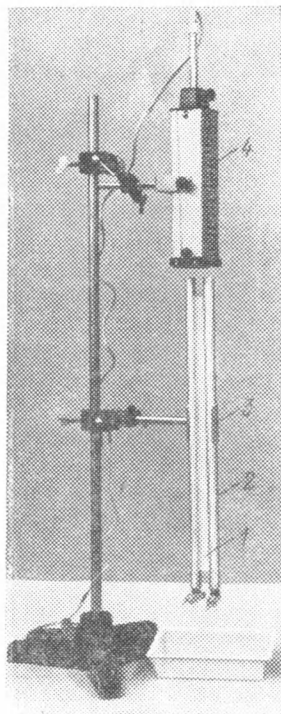
**Рис. 34.** Внешний вид прибора, собранного по схеме, представленной на предыдущем рисунке.

Это покрытие должно быть достаточно равномерным. Проще всего достичь требуемого, если воспользоваться имеющейся в продаже нитроэмалью в аэрозольной упаковке: полоску оргстекла помещают на лист бумаги лицевой гранью вниз и покрывают краской, направив струю белой нитроэмали из аэрозольного баллончика на расположенную сверху заднюю грань полоски. Разумеется, можно покрасить грань, используя обычные краски и кисточку. Электриче-

ские нагреватели 2 прижаты к верхней и нижней граням полоски оргстекла дюралевыми обжимками 3, которые стянуты гайкой, накрученной на резьбовой конец стального держателя 4. Внешний вид подготовленного к опытам прибора показан на рис. 34.

Не каждый из вас решится изготовить электрические нагреватели, а наблюдать криволинейное распространение света в неравномерно нагретом оргстекле вряд ли кто-нибудь откажется. Неужели не существует простейшего варианта прибора для этой цели, в котором вместо электрических использованы более доступные нагреватели? Подобный прибор рассмотрен ниже, но прежде, чем знакомиться с его описанием, попробуйте самостоятельно разработать приемлемую для домашних условий конструкцию.

Внешний вид простейшего прибора для опытов по криволинейному распространению света изображен на рис. 35. Прибор состоит из вертикально расположенной полоски оргстекла 1 и двух нагревателей 2, прижатых к боковым граням полоски обжимками 3. Для получения светового пучка может быть использован самодельный (§ 2) или фабричный осветитель 4. Главной особенностью рассматриваемого прибора является то, что в нем использованы не электрические, а жидкостные (водяные) нагреватели. Сделать их можно из дюралевых трубок диаметром 15 мм и длиной 350—450 мм. Снизу трубки нужно закрыть резиновыми пробками. Работать с прибором будет удобнее, если в пробки

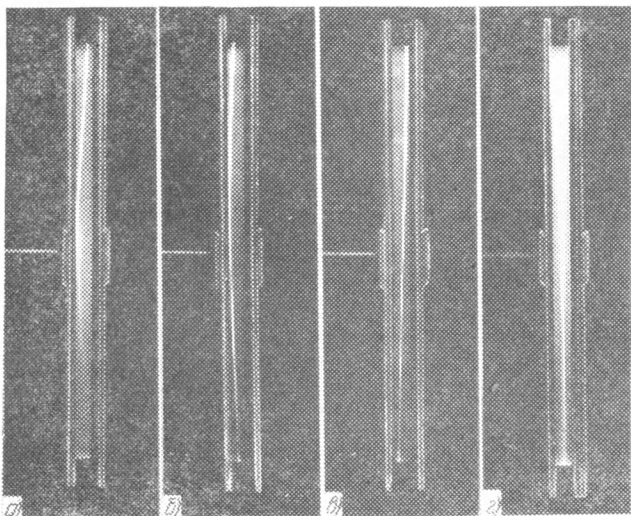


**Рис. 35.** Одна из самых простых установок для опытов по криволинейному распространению света.

вы вставите отрезки стеклянных трубок с кранами. Вместо того, чтобы делать обжимки и держатель (рис. 35 и 33), вы можете прижать нагреватели к боковым граням полоски оргстекла, например, изоленной: несколько витков изоленты вверху и внизу прибора будут иметь ширину не более 15 мм и не помешают наблюдениям светового пучка. Изолентой же можно прикрепить прибор и осветитель к вертикально установленной деревянной рейке; штатив в этом случае вам не понадобится. При проведении опытов в одну или сразу в обе трубки нагревателей заливают только что вскипевшую воду. Наливать ее удобно через небольшую воронку, расположенную наклонно по отношению к трубке так, чтобы не перекрывать светового пучка. После очередного наблюдения остывшую воду сливают в поставленные под прибор стакан или кювету, открыв краны или вынув из нагревателей пробки.

Самое сложное при постановке опытов, схематически показанных на рис. 30,— это получить на матовой грани узкий яркий след пучка света, распространяющегося в длинной полоске оргстекла. (Получение широкого пучка света в оргстекле для наблюдения его фокусирования — более простое дело, поэтому, может быть, лучше начать экспериментировать с широким пучком и, приобретя определенный опыт, затем обратиться к узкому пучку.) Чем короче и толще полоска, тем проще это сделать. В длинной полоске это трудно в основном потому, что по мере распространения в оргстекле интенсивность света заметно уменьшается (что обусловлено не столько поглощением света в оргстекле, сколько рассеянием света на белой грани полоски). Тем не менее самодельный или школьный осветитель (§ 2) позволяют получить то, что требуется. Нужно только расположить лампу в осветителе так, чтобы нить ее была перпендикулярна белой грани полоски и снабдить осветитель щелевой диафрагмой (ширина щели которой составляет 2—3 мм), ориентированной параллельно нити лампы. Полученный таким образом узкий световой пучок направляют на отполированный торец полоски оргстекла так, чтобы он распространялся внутри полоски под небольшим углом к ее граням, к которым прижаты нагреватели. Поворачивая осветитель или полосу с нагревателями, добиваются

того, чтобы на белой грани полоски появился четкий след светового пучка. Необходимо проследить за тем, чтобы этот след был образован пучком, идущим сквозь оргстекло, а не той частью выходящего из осветителя пучка, которая распространяется по воздуху и при неудачной настройке установки может падать на белую грань спереди или сзади полоски. Яркость



**Рис. 36.** Световой пучок в полоске неравномерно нагретого оргстекла: а) оргстекло при комнатной температуре — полное внутреннее отражение света; б) в левый нагреватель налита горячая вода — свет распространяется криволинейно; в) горячая вода в обоих нагревателях — свет распространяется волнообразно; г) горячая вода в обоих нагревателях — широкий световой пучок фокусируется.

следа светового пучка можно увеличить, питая лампу накаливания осветителя повышенным напряжением. Еще лучше отказаться от простейших осветителей и использовать вместо них проекционный аппарат, диапроектор и т. п. Наконец, если в школьном физическом кабинете имеется газовый лазер, можно попробовать применить его: опыты приобретут особую выразительность и красоту.

На рис. 36 представлены фотографии ряда явлений, которые вы можете наблюдать в опытах с описанным выше простейшим прибором. В этих опытах

особенно интересно, слегка поворачивая осветитель, следить за тем, как изменяется ход светового пучка в неравномерно нагретом оргстекле.

*Для самостоятельной проработки*

1. Справочник химика. Том I/Под ред. Никольского Б. П. — Л.: М.: Госхимиздат, 1962, с. 1052.

«Теплочувствительные краски состоят из одной весовой части нодистой меди  $\text{Cu}_2\text{I}_2$  и одной весовой части двуххлористой ртути  $\text{HgCl}_2$ . Эти компоненты растирают в порошок и смешивают с жидким слабоокрашенным неокислотным маслом или спиртовым лаком. Краска наносится кистью на бумагу.

Бумага, пропитанная теплочувствительными красками, меняет цвет при нагревании: ниже  $54,4^\circ\text{C}$  цвет ее ярко-красный; начиная с этой температуры она темнеет, делаясь заметно темнее при  $57,2^\circ\text{C}$ ; при  $62,8^\circ\text{C}$  цвет становится каштановым; при  $68,3^\circ\text{C}$  — светло-шоколадным; при  $71,1^\circ\text{C}$  — темно-шоколадным и при  $100^\circ\text{C}$  — черным. Разложение начинается при  $148,9^\circ\text{C}$ .»

Возможно, вам пригодится этот рецепт. Представьте себе, что на поверхность нагревателя нанесена теплочувствительная краска или к поверхности приклеен кусок пропитанной этой краской бумаги. Тогда при работе с нагревателем вы сможете контролировать его температуру, следя за изменением цвета краски.

Как вы думаете, можно ли доверять десятичным долям, которыми изобилуют числа, указанные в приведенном выше рецепте?

2. Используя простейший прибор для опытов по криволинейному распространению света (рис. 35), вы можете поставить следующий количественный эксперимент. Залив кипятком в один из нагревателей, быстро измерьте максимальную величину прогиба светового пучка и длину, на которой произошел этот прогиб. По данным измерений рассчитайте радиус кривизны светового пучка. Считая, что температура средней части полоски оргстекла равна комнатной, а температура грани, касающейся нагревателя, достигает  $100^\circ\text{C}$ , найдите градиент показателя преломления в оргстекле и вычислите радиус кривизны светового пучка. Сопоставьте результаты эксперимента с теоретической оценкой.

## **§ 15. НЕОДНОРОДНОСТЬ НА ОКОННОМ СТЕКЛЕ**

Задумывались ли вы когда-нибудь над тем, почему прозрачные предметы, которые почти не поглощают света, видимы?

Может быть, некоторым из вас этот вопрос покажется праздным. Но не будем спешить. Давайте понаблюдаем то, что у каждого из нас всегда перед глазами, а уж потом будем делать выводы.

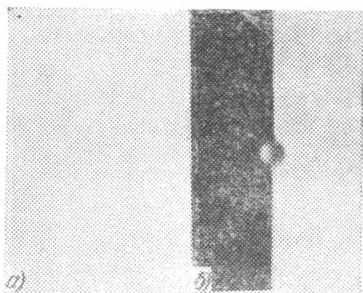
Внимательно рассмотрите стекло вашего окна. Почти наверняка вы обнаружите на нем какую-нибудь неоднородность: чаще всего — в форме полосы, иногда — в виде небольшой круглой области.

Найдя подобную неоднородность, посмотрите сквозь нее на ясное небо или на однородный облачный слой. Неоднородность станет совершенно невидимой, и как бы вы ни пытались увидеть ее в таких условиях, вам это не удастся!

Перед вами две фотографии. На первой из них (рис. 37, а) ничего не видно потому, что при фотографировании за оконным стеклом, имеющим круглую неоднородность, был расположен равномерно освещенный лист белой бумаги. Вторая фотография (рис. 37, б) получена точно в таких же условиях, как и первая, только часть листа белой бумаги была перекрыта листом черной. Неоднородность, сфотографированная на таком фоне, видна вполне отчетливо.

Простое наблюдение неоднородности на оконном стекле показывает, что видимость и невидимость прозрачных тел сильно зависят от условий их освещения. Тело мы видим тогда, когда его изображение получается на сетчатке глаза. Если тело прозрачно, то изображение дают световые лучи, отраженные и преломленные телом. Представим себе, что перед глазом находится прозрачное тело, и освещение его таково, что интенсивность света во всех точках сетчатки совершенно одинакова. Тогда глаз не сможет выделить лучи света, отраженные и преломленные телом, и оно окажется невидимым. Именно это имеет место, когда неоднородность оконного стекла рассматривают на фоне, дающем равномерный рассеянный свет.

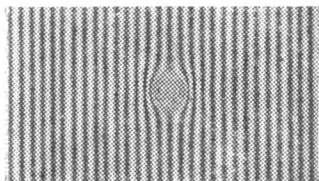
Другое дело, если прозрачное тело освещено рассеянным светом неравномерно, например, неоднородность оконного стекла рассматривают на фоне, имеющем светлые и темные участки. В этом случае преломленные телом лучи изменяют общее изображение



**Рис. 37.** Оптическая неоднородность оконного стекла при рассматривании ее на равномерно освещенном фоне невидима (а) и видима (б), если ее наблюдать на фоне с резкой границей между светлой и темной областями.

фона на сетчатке глаза, и это изменение делает неоднородность видимой.

Полезно рассмотреть неоднородность оконного стекла на фоне решетки, состоящей из черных и белых полос. Аналогичные опыты с неравномерно нагретым оргстеклом вы уже ставили (§ 13) и знаете, что решетка позволяет более определенно судить о структуре неоднородности (рис. 38). Еще раз на-



**Рис. 38.** Оптическая неоднородность оконного стекла на фоне решетки.

помним, что глаз видит гораздо лучше фотоаппарата, поэтому имеет смысл, приняв приведенные фотографии к сведению, провести самостоятельные наблюдения.

Если вернуться к вопросу о возможной праздности всех этих наблюдений, то он будет сразу решен, как только мы оценим величину неоднородности, которую можно обнаружить при

соответствующем освещении. Сделать это можно и теоретически, и экспериментально. Мы выбираем второй путь, на наш взгляд, более убедительный.

На расстоянии около метра от глаза вертикально закрепите кусок оконного стекла. За стеклом расположите лист бумаги, одна половина которого белая, а другая — черная. Глядя сквозь стекло на границу раздела между светлой и темной областями листа, прикоснитесь к стеклу концом разогретого паяльника и держите его в контакте со стеклом 1—2 минуты. Убрав паяльник, вы заметите неоднородность, очень похожую на ту, которая изображена на рисунке 37, б, но в отличие от нее быстро исчезающую.

Образование неоднородности стекла в условиях описанного опыта может быть объяснено изменением показателя преломления и расширением стекла при нагревании. Допустим, что существенно только расширение стекла и оценим изменение его толщины (раньше в опытах с неравномерно нагретым оргстеклом мы убедились, что при нагревании изменяется его показатель преломления; однако, как ведет себя стекло мы не знаем и вправе предполагать все, что угодно). При нагревании паяльником температура стекла изменяется не более, чем на  $\Delta T = 100$  К (про-

верьте это, убрав паяльник, и сразу прикоснувшись к нагретому стеклу пальцем!), толщина оконного стекла  $l = 3$  мм, коэффициент линейного расширения  $\alpha = 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , следовательно, изменение толщины стекла  $\Delta l = \alpha l \Delta T = 2,7 \cdot 10^{-3}$  мм!

Даже эта грубая оценка показывает, как невелики могут быть те изменения толщины (или соответствующие изменения показателя преломления) прозрачного тела, которые при рационально подобранном освещении можно сделать видимыми. Этим пользуются и при проверке качества обработки оптических поверхностей, и при микроскопических наблюдениях, и во многих других случаях. А как важно помнить об этом начинающему экспериментатору, отнюдь не застрахованному от выбора неудачного освещения, делающего прозрачный объект совершенно невидимым!

*Для самостоятельной проработки*

1. Перельман Я. И. Занимательная физика. Книга 2. — М.: Наука, 1982, с. 177—184.

Рассматриваются видимость и невидимость предметов.

## **§ 16. СОБИРАЮЩАЯ ЛИНЗА ИЗ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПЛАСТИНКИ**

Может ли плоскопараллельная прозрачная пластинка давать изображения предметов подобно собирающей линзе?

Давайте рассуждать. Собирающую линзу можно расположить относительно точечного источника света так, что она преобразует расходящийся от источника пучок в сходящийся. Как это происходит? От точечного источника распространяется сферическая световая волна. Через центр линзы волна проходит больший путь, чем через края, поэтому центральный участок сферической волны отстает от периферийных, и расходящаяся волна превращается в сходящуюся. А световые лучи — вы хорошо знаете это — всегда нормальны волновым поверхностям. Значит, вместе с преобразованием линзой световой волны будет преобразован и световой пучок: лучи повернутся так, что после выхода из линзы пройдут через одну точку. Эта точка и является изображением источника света.



Лучи света, нормально падающие на плоскопараллельную пластинку, проходят внутри нее одинаковые пути. Поэтому на первый взгляд кажется, что сделать из такой пластинки собирающую линзу нельзя.

А нельзя ли? Неужели мы не сумеем затормозить центральную область световой волны иным способом, кроме как сделать линзу более толстой в ее центре? Наверное сумеем, если вспомним, что скорость света в веществе зависит от его показателя преломления, и она тем меньше, чем больше показатель преломления вещества. Следовательно, можно надеяться, что из плоскопараллельной пластинки может получиться собирающая линза, если показатель преломления такой пластинки сделать переменным: наибольшим в ее центре и постепенно уменьшающимся к краям.

Эти качественные рассуждения станут гораздо более убедительными, если мы попытаемся перевести их на язык формул, хотя бы и самых элементарных. Вы не обращали внимания на такой феномен? Обратите! Человек менее всего склонен верить простым рассуждениям, которые ему кажутся примитивными. Попробуйте написать несколько формул, даже имеющих к вашим доводам лишь отдаленное отношение, и вы заметите, как эти доводы приобретут особую силу убедительности.

Пусть на плоскопараллельную круглую пластинку толщиной  $l$  нормально падает плоская световая волна  $\Sigma_S$ , испущенная находящимся на оси пластинки  $x$  в бесконечности точечным источником света  $S$  (рис. 39). Допустим, что из пластинки выходит преобразованная ею сферическая волна  $\Sigma_{S'}$ , центр которой  $S'$  является изображением источника  $S$ . Так как точечный источник света  $S$  лежит в бесконечности, его изображение  $S'$  можно назвать фокусом пластинки. Тогда расстояние между пластинкой и точкой  $S'$  логично считать фокусным расстоянием  $F$  пластинки.

Поскольку время распространения света от всех точек волновой поверхности  $\Sigma_S$  до соответствующих точек поверхности  $\Sigma_{S'}$  должно быть одинаковым (определение волновой поверхности! принцип Ферма!), имеем

$$\frac{l}{v_0} = \frac{l}{v} + \frac{\delta}{c}, \quad (1)$$

где  $v_0$  — скорость света в центре пластинки,  $v$  — скорость света на расстоянии  $y$  от центра,  $c$  — скорость света в вакууме или воздухе,  $\delta$  — разность хода между волнами, проходящими через центр пластинки

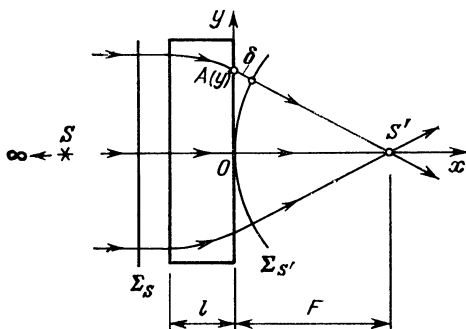


Рис. 39. Плоскопараллельная прозрачная пластинка может фокусировать параллельный световой пучок, если она оптически неоднородна.

и точку  $A$  с координатой  $y$ . Из треугольника  $AOS'$  следует

$$F^2 + y^2 = (F + \delta)^2,$$

где  $F$  — радиус преобразованной пластинкой сферической волновой поверхности  $\Sigma_{S'}$  и одновременно фокусное расстояние пластинки. Отсюда, пренебрегая малой по сравнению с другими величинами, входящими в эту формулу, величиной  $\delta^2$ , имеем

$$\delta = \frac{y^2}{2F}.$$

Подставляя найденное значение разности хода  $\delta$  в формулу (1), получаем

$$\frac{l}{v} = \frac{l}{v_0} - \frac{y^2}{2Fc}. \quad (2)$$

Скорость света в веществе выражается через скорость света в вакууме и показатель преломления вещества формулой  $v = c/n$ . Если показатели преломления пластинки в ее центре  $O$  и точке  $A$  с координатой  $y$  соответственно равны  $n_0$  и  $n(y)$ , то скорости

распространения световой волны через указанные точки составляют

$$v_0 = \frac{c}{n_0} \quad \text{и} \quad v = \frac{c}{n(y)}.$$

Подставляя эти значения скоростей в выражение (2) и производя элементарные преобразования, окончательно получаем

$$n(y) = n_0 - \frac{y^2}{2Fl}. \quad (3)$$

Таким образом, если показатель преломления круглой плоскопараллельной прозрачной пластинки изменяется в радиальном направлении ее по закону (3), то такая пластинка может быть использована в качестве собирающей линзы: чем дальше к периферии пойдут через пластинку световые волны, тем сильнее они обгонят волну, проходящую через центр, и в результате волны, испущенные источником  $S$  в некоторый момент времени, пройдут через изображение  $S'$  источника одновременно.

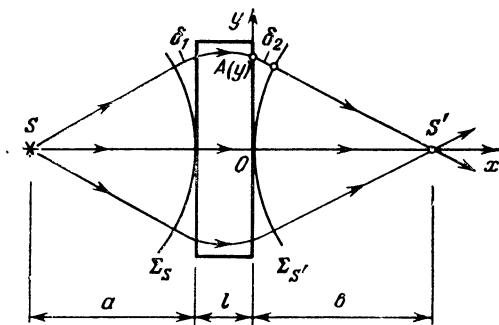


Рис. 40. Оптически неоднородная плоскопараллельная пластинка может давать изображения предметов подобно собирающей линзе.

Будем считать теперь, что точечный источник света  $S$  находится на конечном расстоянии  $a$  от оптически неоднородной пластинки, дающей его изображение  $S'$  на расстоянии  $b$  от себя. Положим, что толщина пластинки  $l$  мала по сравнению с расстояниями  $a$  и  $b$  (рис. 40).

Тогда аналогично формуле (1) имеем

$$\frac{l}{v_0} = \frac{l}{v} + \frac{\delta_1}{c} + \frac{\delta_2}{c}.$$

Поскольку разности хода  $\delta_1 = y^2/2a$  и  $\delta_2 = y^2/2b$ , то  $\frac{l}{v_0} = \frac{l}{v} + \frac{y^2}{2c} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$ , или  $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2lc}{y^2} \left( \frac{1}{v_0} - \frac{1}{v} \right)$ .

Выражая скорости  $v_0$  и  $v$  через соответствующие показатели преломления и скорость света в вакууме, получаем

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2l}{y^2} [n_0 - n(y)]. \quad (4)$$

В этом выражении вы, безусловно, узнали хорошо знакомую вам формулу тонкой линзы. Фокусное расстояние линзы, найденное из формулы (4), совпадает с тем значением, которое можно получить, выразив его из формулы (3):

$$F = \frac{y^2}{2l [n_0 - n(y)]}. \quad (5)$$

Не нужно обольщаться: полученный нами закон распределения показателя преломления (3), разумеется, неточен. Настоящая теория оптически неоднородной пластинки, выполняющей роль собирающей линзы, на самом деле серьезнее, чем те прикидки, которые мы здесь сделали. Но в этих прикидках есть черты, присущие и серьезной теории. Кроме того, оценочный расчет показывает, что идея изготовления из плоскопараллельной пластинки собирающей линзы не так уж бессодержательна. Во всяком случае, мы сейчас не видим причин, почему бы не попробовать осуществить эту идею. Наверное, нет особого смысла стремиться получить в плоскопараллельной пластинке в точности такое распределение показателя преломления, какого требует формула (3). Но что-то похожее на это нужно попытаться сделать.

*Для самостоятельной проработки*

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Оптика. — М.: Наука, 1980, с. 130—132.

Здесь рассмотрена своеобразная оптически неоднородная среда, способная давать изображения предметов, — так называемый «рыбий глаз» Максвелла. Теория, приведенная в книге, сложна, однако, она допускает упрощения. Попробуйте разработать элементарную теорию «рыбьего глаза».

## § 17. ПСЕВДОЛИНЗА РОБЕРТА ВУДА

Линзы с переменным показателем преломления, возможность изготовления которых мы теоретически показали (§ 16), в настоящее время нашли

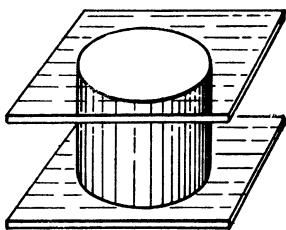
применение в технике сантиметровых радиоволн [1, 2]. Для оптического диапазона электромагнитных волн изготовить подобную линзу, которая могла бы выдержать конкуренцию с обычными, довольно сложно. Однако выдающийся американский физик-экспериментатор Роберт Вуд за много лет до того, как появились первые радиолокационные станции и, следовательно, началось широкое применение сантиметровых радиоволн, предложил простую модель оптической линзы с переменным показателем преломления, которую он назвал псевдолинзой. Это название обладает тем несомненным достоинством, что оно кратко, поэтому в дальнейшем мы будем его использовать.

Лучший способ познакомить вас с псевдолинзой Вуда — это дословно привести рецепт, разработанный Вудом [3]. Так мы и поступим.

...«Псевдолинзы представляют большой интерес, и их совсем не трудно приготовить. Берут горсть фотографического желатина и дают ему набухнуть в воде до полного размягчения. Избыток воды сливают, а остаток подогревают до полного ожигения и затем фильтруют через воронку с кусочком ваты. Если жидкость не течет, то прибавляют немного кипящей воды. Небольшое количество отливают в пробирку и дают отстояться до отвердения. Оставшуюся часть выпаривают на малом пламени, все время помешивая до тех пор, пока она не примет густоты сиропа. Для этого приходится кипятить ее до тех пор, пока не останется одна треть (или меньше) ее первоначального объема. Теперь прибавляют равный объем глицерина и выливают смесь во вторую пробирку. После затвердевания резким ударом отбивают доньшки у пробирок, пробирки быстро нагревают в пламени бунзеновской горелки и выталкивают желатин.

Слегка нагретым перочинным ножом разрезают цилиндры на диски разной толщины. Наилучшая толщина около двух третей диаметра. Монтируют диски между небольшими тонкими квадратными пластинками (годится хорошее оконное стекло), слегка подогревая пластинки для обеспечения посадки студня на оптический контакт (рис. 41). Может оказаться необходимым некоторое время поддерживать верхнюю пластинку, пока ее поверхность не сядет

на контакт. Цилиндры, приготовленные из желатина и воды, погружаются в глицерин, а цилиндры из желатина и глицерина — в холодную воду. Глицерин нужно время от времени помешивать, так как слои, прилегающие к желатину, вбирают в себя вытесненную воду. Через четверть часа процесс достаточно подвинется в своем развитии, глицерин постепенно диффундирует в желатин, вытесняя из него воду, и вода также постепенно вытеснит глицерин. Желатин, содержащий глицерин, имеет больший показатель преломления, чем желатин, содержащий воду; вследствие этого цилиндры, набухшие в глицерине, действуют как вогнутые, а цилиндры, набухшие в воде, — как выпуклые линзы.



Фокусное расстояние получается от 8 до 10 см; пользуясь такими цилиндрами, можно получать очень резкие изображения нитей лампы накаливания и газового пламени.»

Рис. 41. Такую псевдолинзу из желатинового цилиндра придумал и изготовил Р. Вуд.

Если вы запутались в рецепте Вуда, то вот вам совет: возьмите большой лист бумаги, распишите на нем по пунктам способы изготовления отдельно собирающей и рассеивающей псевдолинз, а затем снабдите каждый пункт схематическим рисунком, поясняющим, что нужно делать. При этом вам не только все станет ясно (рецепт Вуда точен), но и попутно вы познакомитесь с одним из способов чтения научных материалов. Научные статьи и книги всегда отличаются краткостью, а их авторы обычно мало обеспокоены возможными неудобствами своей продукции для читателя. Это вполне объяснимо: предполагается, что читатель не менее трудолюбив, чем автор, поэтому он сможет разобраться в написанном.

#### *Для самостоятельной проработки*

1. Лавров А. С., Резников Г. Б. Антенно-фидерные устройства. — М.: Советское радио, 1974, с. 228—230.

Здесь кратко описаны несколько линз с переменным показателем преломления, применяющихся для фокусировки радиоволн, и приведены формулы, выражающие законы распределения показателя преломления в таких линзах.

2. *Зелкин Е. Г., Петрова Р. А.* Линзовые антенны. — М.: Советское радио, 1974, с. 104—167.

Дана теория линз из оптически неоднородного диэлектрика, применяющихся для преобразования пучков радиоволн.

3. *Вуд Р.* Физическая оптика. — Л.; М.: ОНТИ, 1936, с. 103—104.

## § 18. ПСЕВДОЛИНЗА ИЗ КАПЛИ ЖЕЛАТИНА

Псевдолинза Роберта Вуда — очень интересный прибор, но иметь дело с большим количеством желатина при изготовлении его не совсем приятно. Поэтому здесь описан несколько иной способ изготовления псевдолинзы, требующий небольшого количества желатина и приводящий, на наш взгляд, к лучшим результатам.

В пробирку насыпьте фотографический или пищевой желатин так, чтобы образовался слой толщиной около 2 см. Налейте в пробирку до половины ее высоты воду, и оставьте желатин на два — три часа набухать в воде. Слейте из пробирки избыток воды и, нагревая пробирку на пламени сухого горючего или спиртовки, полностью расплавьте набухший желатин. Нагревание нужно производить достаточно осторожно, чтобы приготовляемый состав не подгорел. После этого влейте в расплавленный желатин равное по объему количество глицерина.

Пока состав охлаждается, приготовьте две чистые пластинки размером примерно  $20 \times 20$  мм<sup>2</sup> и  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup> из тонкого стекла (можно использовать стекло тщательно отмытой от эмульсии фотопластинки, хорошее оконное стекло или в крайнем случае оргстекло). Заготовьте также две полоски размером  $4 \times 25$  мм<sup>2</sup>, вырезанные из картона толщиной около 0,5 мм.

В охладившийся состав, приобретший густоту хорошей сметаны, опустите стеклянную трубку и перенесите ее на расположенную горизонтально большую стеклянную пластинку некоторое количество состава. При этом на поверхности пластинки образуется капля. Необходимо добиться, чтобы капля получилась совершенно круглой и диаметр ее был в пределах 6—10 мм. Если с первого раза вам не удастся получить того, что нужно, быстро вымойте в проточной воде стеклянную пластинку, насухо вытрите ее и вновь попытайтесь получить на поверхности плас-

тинки круглую каплю указанных размеров. Как только вы сумеете сделать это, положите рядом с каплей на пластинку картонные полоски и быстро покройте каплю второй стеклянной пластинкой. Если вы действовали достаточно аккуратно, между стеклянными пластинками у вас образуется небольшой цилиндр, боковая стенка которого перпендикулярна основаниям. Оставьте его на 10—20 мин до тех пор, пока состав почти полностью не загустеет.

Посмотрите через плоскопараллельные основания приготовленного вами цилиндрика на прямую границу между темной и светлой областями или просто на какой-либо удаленный предмет. Никакого преломления вы не обнаружите (рис. 42).

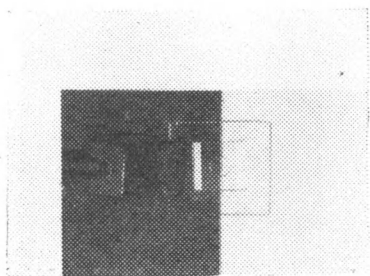


Рис. 42. Оптически однородная капля из желатина и глицерина.

Удалив прокладки, опустите стеклянные пластинки с цилиндром между ними на дно блюда, в которое налита холодная прокипяченная или дистиллированная вода. При этом вода должна зайти в промежуток между пластинками. Воздушный пузырек, который почти неизбежно остается вблизи цилиндрика, нужно аккуратно удалить узкой полоской бумаги. Спустя 3—4 мин достаньте пластинки из воды, осторожно протрите их тряпочкой и удалите фильтровальной бумагой воду из промежутка между ними. На стеклянных пластинках не должно оставаться капель воды, так как они, фокусируя свет, будут сильно мешать наблюдениям. Вновь посмотрев сквозь цилиндр на границу между светлой и темной областями, вы обнаружите, что цилиндр своим внешним ободком начал преломлять свет (рис. 43, а)!

Фотографии рис. 43 ясно показывают, что вы должны наблюдать. При рассматривании фотографий (рис. 43, б) ощущение таково, будто цилиндр принял форму кратера. На самом деле его основания остались плоскопараллельными, просто описанный способ наблюдения позволяет свести изменение



оптической плотности состава к изменению интенсивности проходящего через цилиндрик света. С подобным явлением вы уже встречались, изучая оптическую неоднородность на оконном стекле (§ 15).

Опустив цилиндрик в воду еще на 5—15 мин, добейтесь того, чтобы вода проникла вплоть до оси цилиндрика. Это нетрудно проконтролировать, производя время от времени наблюдения изложенным выше методом.

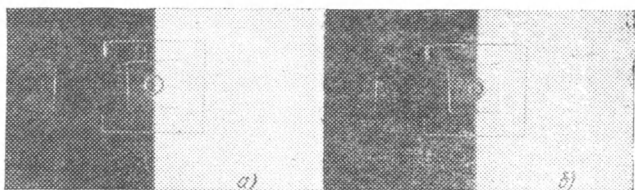


Рис. 43. Диффузия воды в застывшую желатиново-глицериновую каплю приводит к тому, что капля становится оптически неоднородной.

Псевдолинза готова. Достав ее из воды и высушив стеклянные пластинки тряпочкой и фильтровальной бумагой, вы сможете получить с ее помощью удиви-

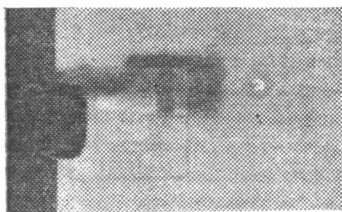


Рис. 44. Изображение спирали лампы, созданное желатиновой псевдолинзой.

тельно четкое изображение спирали настольной лампы (рис. 44). Последняя фотография получена в следующих условиях: расстояние от лампы до псевдолинзы (которая имела диаметр 9 мм)  $a = 75$  см, расстояние от псевдолинзы до изображения  $b = 26$  см. Отсюда согласно формуле тонкой лин-

зы  $1/a + 1/b = 1/F$ , фокусное расстояние псевдолинзы  $F = 19,5$  см. Изготовленные описанным способом псевдолинзы диаметром около 6 мм имеют фокусное расстояние порядка 5—10 см.

Принцип действия псевдолинзы должен быть вам совершенно ясен. Показатель преломления глицерина  $n_r = 1,47$ , а показатель преломления воды  $n_v = 1,33$ .

Вода, диффундируя в однородный цилиндр, состоящий из желатина и глицерина, вытесняет из него глицерин. Цилиндр при этом становится оптически неоднородным, причем показатель преломления его постепенно уменьшается от центра к краям. Выше показано, что такой цилиндр действует, как собирающая линза (§ 16).

Спустя примерно сутки после изготовления псевдолинзы, ее состав вновь становится оптически однородным, и псевдолинза теряет свои удивительные свойства.

Однако вы можете сохранить псевдолинзу в течение длительного времени. Так, одна из наших псевдолинз пролежала в ящике стола два года. Однажды она все же попала на глаза. Выбрасывать сразу эту старую добрую псевдолинзу было почему-то жалко, и прежде чем сделать это, мы положили ее на несколько минут в воду. Высохшая, как египетская мумия, псевдолинза «оживла» и вновь стала давать изображения! Стойкость всегда достойна уважения, поэтому псевдолинза была почтительно помещена на свое место в стол до следующего случая.

## § 19. ЗАКОНЫ ФИКА, ФУРЬЕ И ПСЕВДОЛИНЗА

В псевдолинзе Роберта Вуда необходимый для ее работы радиальный градиент показателя преломления материала цилиндра создается за счет диффузии. Можно ли получить нечто подобное псевдолинзе, если воспользоваться неравномерным нагреванием прозрачного цилиндра?

Один из основных законов диффузии, который, кстати, установлен Фиком, показывает, что диффузионный поток вещества через некоторую поверхность пропорционален градиенту концентрации этого вещества в направлении, перпендикулярном поверхности

$$J = -D \frac{dn}{dy}, \quad (1)$$

где  $J$  — диффузионный поток в направлении оси  $y$ ,  $D$  — коэффициент диффузии,  $n$  — концентрация вещества и  $dn/dy$  — градиент концентрации по направлению оси  $y$ .

А один из основных законов теплопроводности — закон Фурье — утверждает, что поток тепла пропорционален градиенту температуры

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dy}, \quad (2)$$

где  $Q$  — поток тепла через поверхность,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $dT/dy$  — градиент температуры в направлении оси  $y$ , вдоль которой осуществляется поток тепла.

Сравнение формул (1) и (2) показывает, что они совершенно одинаковы. Даже знак перед соответствующими коэффициентами один и тот же (что, к слову сказать, означает, что перенос вещества при диффузии происходит от областей с большей концентрацией к областям с меньшей концентрацией, а перенос тепла — от более нагретых частей тела к менее нагретым). Следовательно, процессы диффузии и теплопроводности описываются одним и тем же законом, хотя физическая сущность этих процессов различна.

Таким образом, рассуждая по аналогии, можно сделать вывод, что если обусловленный диффузией поток вещества с меньшим показателем преломления через боковую поверхность прозрачного цилиндра может превратить этот цилиндр в собирающую псевдолинзу, то, скорее всего, и поток тепла через боковую поверхность цилиндра позволит получить то же самое (разумеется при условии, что нагревание приводит к уменьшению показателя преломления материала, из которого изготовлен цилиндр).

Может быть, не стоило здесь особо останавливаться на этом, но рассмотренное — яркий пример того, как знание одной области физики способствует развитию интуиции в другой области.

*Для самостоятельной проработки*

1. Кикоин А. К., Кикоин И. К. Молекулярная физика. — М.: Наука, 1976, с. 145—147 и 160—162.

Эта книга отличается ясностью изложения, и вы, безусловно, сумеете по ней разобраться в той общности законов, которая присуща явлениям диффузии и теплопроводности.

2. Физический практикум. Электричество и оптика/Под ред. Ивероновой В. И. — М.: Наука, 1968, с. 733—739.

Здесь рассмотрена лабораторная работа (университетская!) по определению коэффициента диффузии оптическим методом. Приведенная теория, возможно, покажется вам сложной. Попро-

буйте уловить основную идею работы. Может быть, вам удастся придумать простой оптический опыт, позволяющий оценить коэффициент диффузии.

## **§ 20. ПСЕВДОЛИНЗА ИЗ НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТОГО ОРГСТЕКЛА**

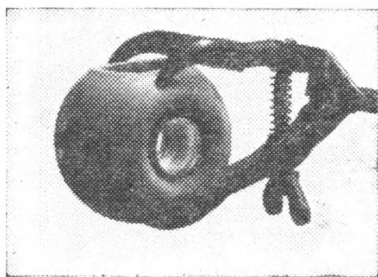
Опыты с псевдолинзой настолько эффектны, что даже многократное воспроизведение их не может сгладить ощущения необычности наблюдаемого. Словами трудно передать прелесть того, что можно увидеть собственными глазами. Попробуйте! Вы не пожалеете о затраченных усилиях.

Прежде всего нужно изготовить из оргстекла цилиндр диаметром около 20 мм и длиной 40—60 мм. Торцы цилиндра должны быть плоскопараллельными и прозрачными. Проще всего такой цилиндр сделать вручную, выпилив из листа оргстекла толщиной 40—60 мм (листы оргстекла указанной толщины изготавливаются на современном производстве и имеют отполированные поверхности) параллелепипед сечением  $20 \times 20$  мм<sup>2</sup>, и затем обработав его напильником до цилиндра. В принципе подходящий цилиндр можно сделать из любого куса оргстекла вручную или на токарном станке. Но в этом случае вам придется отшлифовать на мелкозернистой шкурке и затем отполировать нанесенной на ткань пастой ГОИ его торцы (§ 11). Следует стремиться к тому, чтобы при шлифовке и полировке торцы получились плоскими, так как завалы по их краям превратят цилиндр в собирающую линзу. Это не всегда сразу получается у начинающих, поэтому для первых опытов, наверное, лучше попытаться найти толстое оргстекло, уже имеющее отполированные фабричным способом поверхности, и из него сделать цилиндр, как описано выше. Выбор нужного куса оргстекла не слишком затруднителен, поскольку небольшие царапины на торцах цилиндра не повредят опыту (старайтесь не нанести на торцы новые царапины при обработке напильником боковой поверхности цилиндра).

Подберите резиновую грушу диаметром 50—60 мм. Острым ножом срежьте у груши наконечник так, чтобы получилось круглое отверстие диаметром 25—30 мм. В это отверстие вы будете наливать

горячую воду. Чтобы закрепить в груше цилиндр из оргстекла, в ней нужно сделать еще два диаметрально противоположных отверстия так, чтобы ось их была перпендикулярна оси первого отверстия. С этой целью найдите пробковое сверло, внешний диаметр которого на 3—4 мм меньше диаметра цилиндра из оргстекла. Если подходящего сверла подобрать не удастся, его без труда можно изготовить из отрезка латунной или дюралевой трубки: достаточно край трубки заострить на абразивном круге электроточила или вручную напильником. Теперь прижмите грушу острым краем сверла к поверхности дощечки и, поворачивая сверло или ударяя по нему, проделайте в груше требуемые отверстия.

В прорезанные сверлом отверстия вставьте цилиндр из оргстекла. Проверьте герметичность полу-



**Рис. 45.** Простейшая псевдолинза из оргстекла.

соединения резины с оргстеклом, залив в грушу воду. Изготовленную псевдолинзу разместите на подходящей подставке или закрепите в лапке штатива так, чтобы отверстие в груше оказалось сверху (рис. 45).

Расположите на расстоянии 1—2 м от псевдолинзы настольную лампу, а за псевдолин-

зой поместите белый экран, изготовленный из листа плотной бумаги. Вскипятите воду и залейте кипятком в отверстие груши. Вы будете наблюдать, как на экране постепенно появляется изображение лампы!

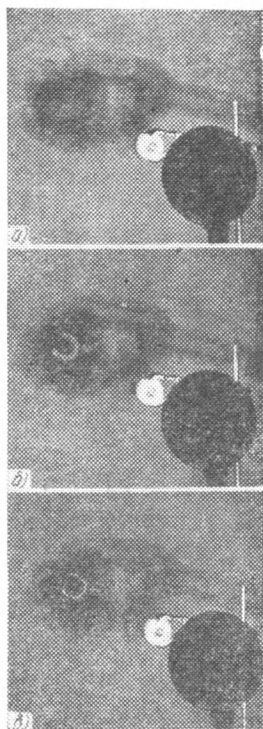
На рис. 46 приведены фотографии описанного опыта. Они получены в таких условиях: расстояние от лампы до псевдолинзы составляло 1 м, а от псевдолинзы до экрана — 3 м. Из этих данных вы можете определить фокусное расстояние получившейся в опыте псевдолинзы. Ясно, что псевдолинза, как и обычная собирающая линза, может давать не только увеличенное, но и уменьшенное изображение предмета. Для получения такого изображения достаточно уда-

лить предмет от псевдолинзы на расстояние, превышающее двойное фокусное расстояние псевдолинзы.

Объяснение результата опыта для вас уже не должно составить особого труда. Показатель преломления оргстекла при увеличении его температуры уменьшается, и эта зависимость, как вы знаете, выражена достаточно ощутимо (§ 12). При наливании в грушу горячей воды, температура которой составляет  $90\text{--}100^\circ\text{C}$ , цилиндр из оргстекла начинает нагреваться, причем поток тепла распространяется от боковой поверхности цилиндра к его оси. В результате неравномерного нагрева цилиндр становится оптически неоднородным: в радиальном направлении цилиндра возникает градиент показателя преломления. Распределение показателя преломления оргстекла в радиальном направлении достаточно прогретого цилиндра таково, что он непрерывно уменьшается от оси цилиндра к его боковой поверхности. Такой цилиндр, как это уже показано раньше (§ 16), представляет собой эквивалент собирающей линзы.

По истечении определенного времени после начала опыта цилиндр прогревается более или менее равномерно и уже не фокусирует свет. Очень полезно, перемещая белый экран, пронаблюдать за изменением фокусного расстояния псевдолинзы при нагревании и охлаждении оргстекла.

Нередко посторонние наблюдатели, увидев опыт, высказывают предположение, что нагревание



**Рис. 46.** Получение изображения спирали лампы с помощью псевдолинзы: а) цилиндр из оргстекла при комнатной температуре; б) в резиновую грушу налита горячая вода; в) наилучшее изображение, созданное псевдолинзой.

оргстекла приводит к его неравномерному расширению, и за счет этого цилиндр с плоскопараллельными торцами превращается в подобие собирающей линзы. Нетрудно, однако, сообразить, что если бы вызванное нагреванием расширение оргстекла было бы существенно в рассматриваемом опыте, то цилиндр превратился бы не в собирающую, а в рассеивающую линзу. Впрочем, ниже предложен эксперимент, самым убедительным образом показывающий, что фокусировка света псевдолинзой обусловлена именно изменением показателя преломления оргстекла при нагревании (§ 23).

*Для самостоятельной проработки*

1. Ангерер Э. Техника физического эксперимента. — М.: Физматгиз, 1962, с. 47 и 61.

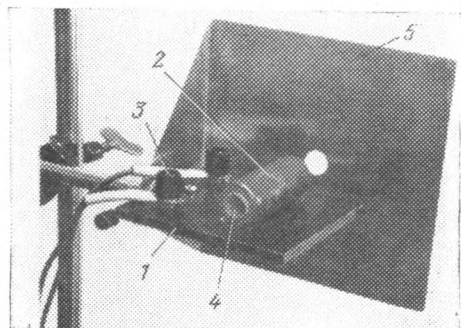
Здесь приведены некоторые физические характеристики оргстекла и, в частности, значение коэффициента линейного расширения при нагревании. Не попробуйте ли вы, воспользовавшись этим значением, оценить вклад теплового расширения оргстекла в фокусирующее действие неравномерно нагретого цилиндра?

## **§ 21. ПСЕВДОЛИНЗА ИЗ ОРГСТЕКЛА С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ НАГРЕВАТЕЛЕМ**

Всем хорош опыт с псевдолинзой из оргстекла (§ 20): он прост, получается всегда, любой может повторить его даже у себя дома. Но вот вы захотели показать этот опыт в школе своим товарищам, и вам сразу становятся очевидными недостатки прибора, обеспечивающего постановку опыта: нужно кипятить воду, заливать горячую воду в резиновую грушу, протирать запотевшие торцы цилиндра из оргстекла и т. д. Нельзя ли придумать нечто более удобное? Такое, чтобы прибор был всегда готов к работе и оставалось лишь включить его? Вы рассуждаете верно: поскольку горячая вода в качестве нагревателя неудобна, нужно использовать электрический нагреватель.

Электрический нагреватель для псевдолинзы должен представлять собой трубку (цилиндр с осевым отверстием), внутрь которой может вставляться цилиндр из оргстекла. В качестве такого нагревателя можно использовать мощный резистор, который вы уже применяли в некоторых опытах (§ 10).

Одна из возможных конструкций прибора изображена на рис. 47. На выполненном из текстолита основании 1 закреплен резистор 2 типа ПЭВ-25 мощностью 25 Вт и сопротивлением 510 Ом. Выводы резистора соединены с размещенными на основании клеммами 3. Резистор имеет отверстие диаметром



**Рис. 47.** Псевдолинза из оргстекла с электрическим нагревателем.

примерно 11 мм, внутрь которого вставлен цилиндр 4 из оргстекла. Диаметр цилиндрика 10—11 мм и длина его 45—50 мм. Чтобы проходящий мимо резистора свет не мешал наблюдениям, прибор снабжен непрозрачным экраном 5 из дюраля, имеющим отверстие, расположенное напротив отверстия резистора.

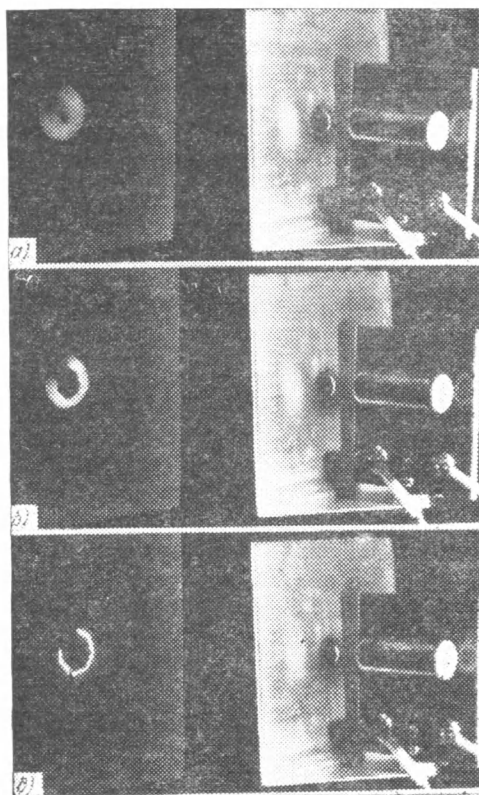
На резистор, служащий нагревателем в этом опыте, следует подавать напряжение около 100 В. Лучше всего подключить резистор к регулируемому по напряжению источнику тока (в школьном кабинете физики имеется подходящий для этих целей автотрансформатор типа РНШ).

При включении нагревателя на экране постепенно появляется изображение предмета, в качестве которого удобно использовать лампу накаливания. Последовательность появления изображения показана на рис. 48. Рассматривая этот рисунок, вы сразу обратите внимание на основной недостаток описанного прибора: диаметр псевдолинзы мал, поскольку ограничен диаметром отверстия в резисторе, а небольшое отверстие само без всякой линзы дает пусть



несовершенное, но все же на что-то похожее изображение предмета.

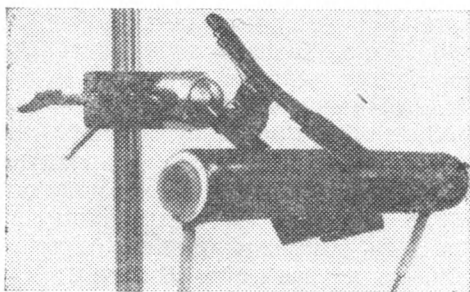
Более красивые результаты вы получите, если в качестве нагревателя используете резистор типа



**Рис. 48.** При включении нагревателя цилиндр из оргстекла становится собирающей псевдолинзой и на экране постепенно появляется изображение спирали лампы.

ПЭВ-100 сопротивлением 620—1500 Ом. Этот резистор имеет отверстие диаметром 20 мм и поэтому не требует дополнительного экрана (резистор можно зажать непосредственно в лапке штатива, как показано на рис. 49). Внутри резистора можно вставить один или несколько цилиндров оргстекла диаметром 20 мм и длиной 40—60 мм. Очевидно, что чем толще

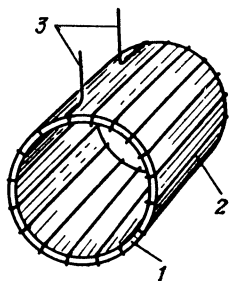
псевдолинза (больше длина цилиндра или совокупности цилиндров из оргстекла), тем сильнее она будет фокусировать свет при том же градиенте показателя преломления внутри нее. Резистор сопротивлением



**Рис. 49.** Если вы найдете мощный резистор с отверстием большого диаметра, то сможете сделать очень простую и удобную псевдолинзу.

620 Ом можно кратковременно включать непосредственно в электроосветительную сеть напряжением 220 В; ясно, что резисторы, имеющие более высокие значения сопротивлений, можно включать в сеть на более длительное время. Напомним, что температура внутренней поверхности нагревателя не должна превышать  $100^{\circ}\text{C}$ : перегрев цилиндра из оргстекла сделает его непригодным для последующих опытов.

Наконец, цилиндрический нагреватель для псевдолинзы можно изготовить и самостоятельно. Мы делали так. Из асбестовой ленты, используя силикатный клей, склеивали цилиндр нужного диаметра, толщина стенки которого составляла около 2 мм. Нихромовым проводом диаметром 0,2 мм наматывали на цилиндр обмотку так, чтобы расстояния между соседними ее витками были одинаковы и составляли 3—5 мм (рис. 50; 1 — термостойкий цилиндр с отверстием, 2 — обмотка нагревателя, 3 — выводы обмотки). Концы нихромового провода скручивали с отрезками



**Рис. 50.** Эскиз самодельного электрического нагревателя для псевдолинзы.

медного проводника диаметром 1—1,5 мм и этими отрезками делали выводы обмотки, закрепляя их на цилиндре из асбеста. Затем цилиндр с обмоткой со всех сторон покрывали слоем алебаstra толщиной 2—3 мм. Осевое отверстие цилиндра формовали деревянным стержнем или металлической трубкой подходящего диаметра. Готовый нагреватель высушивали в течение одного — двух дней.

Самодельный нагреватель перед включением обязательно должен быть проверен на предмет отсутствия короткого замыкания обмотки. Сделать это нужно авометром. Этим же прибором можно измерить сопротивление обмотки и по полученному результату примерно оценить напряжение, необходимое для нормальной работы нагревателя. Впрочем, проще подсоединить выводы обмотки к автотрансформатору (удобно использовать блок питания типа ВС-24м) и, осторожно повышая напряжение, контролировать температуру нагревателя. Так следует найти оптимальное значение напряжения и при этом напряжении в дальнейшем работать с самодельным нагревателем.

Понятно, что опыты с электрическими нагревателями можно ставить в том и только том случае, если вы знаете и неукоснительно выполняете требования техники безопасности. Лучше всего работать в школьном физическом кабинете под руководством учителя физики. Если такой возможности нет и пользоваться сетевым напряжением вас никто не научил, то домашние эксперименты проводите с нагревателями, в которых применяется горячая вода.

## **§ 22. РАССЕИВАЮЩАЯ ПСЕВДОЛИНЗА ИЗ ОРГСТЕКЛА**

Если при нагревании боковой поверхности цилиндра из оргстекла получается собирающая псевдолинза, то логично предположить, что охлаждение боковой поверхности цилиндра приведет к образованию рассеивающей псевдолинзы. Проще всего проверить это предположение, используя псевдолинзу, нагревателем которой является резиновая груша с горячей водой (§ 20). Но сумеете ли вы охлаждением получить такой перепад температур, который позволит обнаружить рассеивающие свойства псевдолинзы?

В «Справочнике химика» [1] имеется рецепт одной из наиболее простых, доступных и эффективных охлаждающих смесей: при смешивании 42,2 г безводного хлористого кальция ( $\text{CaCl}_2$ ) со 100 г снега или льда температура смеси понижается до  $-55^\circ\text{C}$ . А в «Справочнике физика-экспериментатора» [2] написано, что при смешивании 3 весовых частей снега или льда с 4 весовыми частями хлористого кальция температура смеси становится равной  $-48^\circ\text{C}$ . Рецепты несколько отличаются друг от друга и дают разные результаты, но в принципе оба они должны обеспечить успех опыта. Действительно, комнатная температура, а следовательно, и температура ненагретого оргстекла примерно равны  $20^\circ\text{C}$ . Нагревая цилиндр из оргстекла кипящей водой, вы повышали температуру боковой поверхности цилиндра максимум на  $80^\circ\text{C}$ . А охлаждая хотя бы до  $-40^\circ\text{C}$ , вы будете иметь перепад температур между боковой поверхностью цилиндра и его осевой областью, составляющий  $60^\circ\text{C}$ . Если в первом случае получается собирающая псевдолинза, то почему бы во втором не получиться рассеивающей?

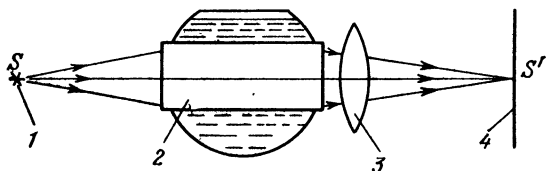


Рис. 51. Оптическая схема установки для опытов с рассеивающей псевдолинзой.

Соберите экспериментальную установку (рис. 51). Она должна состоять из источника света 1 (настойной лампы), псевдолинзы 2, обычной собирающей линзы 3 (в качестве которой можно использовать очковое стекло оптической силой в  $+2$  диоптрии) и белого экрана 4 для наблюдений. Расположите лампу так, чтобы собирающая линза давала ее изображение на расстоянии около метра от себя.

Теперь нужно изготовить охлаждающую смесь. Хлористый кальций можно приобрести в аптеке или достать в школьном химическом кабинете. Принести снег или лед зимой — не проблема. Летом можно использовать лед из холодильника. Хлористый кальций

и лед по отдельности раздробите в мелкие порошки и быстро смешайте их в нужной пропорции в стакане. Получившуюся охлаждающую смесь залейте в резиновую грушу псевдолинзы.

Вы заметите, что по мере охлаждения боковой поверхности цилиндра из оргстекла изображение лампы на экране ухудшается. Передвиньте экран, увеличивая расстояние между ним и псевдолинзой: при определенном его положении вы вновь получите резкое изображение лампы. Следовательно, охлаждае-

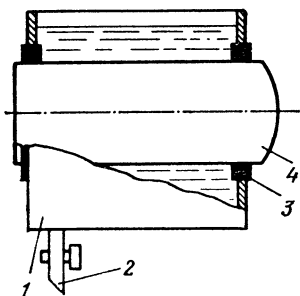


Рис. 52. Прибор для демонстрации собирающей и рассеивающей псевдолинз.

мый с боковой поверхности цилиндра из оргстекла в самом деле работает как рассеивающая линза: совместно с собирающей он образует оптическую систему, фокусное расстояние которой больше, чем фокусное расстояние входящей в систему собирающей линзы.

Нетрудно сделать и более удобный прибор для опытов (рис. 52). Он должен состоять из камеры 1, снабженной сливной трубкой

с краном 2. В стенках камеры посредством уплотнительных колец 3 из резины закреплен цилиндр 4 из оргстекла. Один из торцов цилиндра плоский, а второй выполнен в виде выпуклой сферической поверхности (можно оба торца цилиндра обработать так, чтобы они были слегка выпуклыми).

Последнее сделано с той целью, чтобы исключить из установки отдельную собирающую линзу — роль ее будет выполнять выпуклый торец цилиндра. Для изготовления такого цилиндра нужно, ни о чем не думая и не стараясь специально сделать сферическую поверхность, отшлифовать и отполировать его торец. Работая, вы неизбежно будете немного наклонять цилиндр так, что его торец помимо вашей воли получится выпуклым (разумеется, при шлифовке и полировке нужно поворачивать цилиндр вокруг его оси).

Ставить опыты с описанным прибором следует так. При комнатной температуре с помощью цилиндра, выполняющего роль собирающей линзы, получают на экране изображение лампы накаливания. Затем

заливают в камеру охлаждающую смесь. При этом фокусное расстояние цилиндра увеличивается и, чтобы опять получить изображение, экран приходится отодвигать от псевдолинзы. После этого подставляют под кран камеры стакан и, открыв кран, заливают в камеру горячую воду. Когда охлаждающая смесь сольется в стакан, кран закрывают, и камеру заполняют горячей водой. Это приводит к уменьшению фокусного расстояния цилиндра, в чем убеждаются, передвигая экран ближе к псевдолинзе.

*Для самостоятельной проработки*

1. Справочник химика. Том I/Под ред. Никольского Б. П. — Л.; М.: Госхимиздат, 1962, с. 1054.

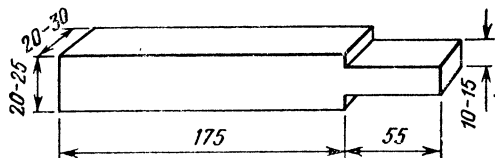
2. Кэй Д., Лэби Т. Справочник физика-экспериментатора. — М.: ИЛ, 1949, с. 291.

В этих справочниках приведены различные рецепты охлаждающих смесей, из которых вы сможете выбрать наиболее приемлемый для себя.

3. Будет очень смешно, если вы поставите описанные в параграфе опыты и не догадаетесь просто посмотреть через рассеивающую псевдолинзу. Сделайте это в первую очередь! Рассеивающая псевдолинза должна давать уменьшенные изображения предметов, и в этом нужно убедиться.

### § 23. СВЕТОВОЙ ПУЧОК ВНУТРИ ПСЕВДОЛИНЗЫ

В сущности вы уже хорошо представляете себе, как распространяется свет внутри собирающей псевдолинзы из оргстекла. Но описание еще одного опыта, наверное, не повредит, тем более, что опыт достаточно прост, а результат его красив и убедителен.

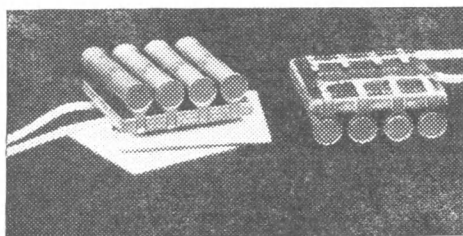


**Рис. 53.** Такой брусок из оргстекла удобен в опытах по наблюдению светового пучка внутри собирающей псевдолинзы.

Из оргстекла толщиной 30 мм выпилите брусок оргстекла по размерам, указанным на рис. 53. Торцы бруска отшлифуйте и отполируйте. Сечение бруска в наиболее узкой его части, которая будет выполнять роль цилиндрической псевдолинзы, значительно

больше поперечного сечения полосок из оргстекла, применявшихся в опытах по криволинейному распространению света (§ 14). Это позволяет проще получить красивый световой пучок внутри оргстекла. Заднюю поверхность бруска надо сделать матовой и покрасить белой краской, с тем, чтобы на ней был виден след светового пучка.

Нагреватели можно сделать из резисторов типа ВС мощностью 2 Вт и сопротивлением 16 кОм. Каждый из двух нагревателей должен содержать по четыре резистора (рис. 54). Резисторы нужно укрепить



**Рис. 54.** Нагреватели из радиотехнических резисторов: под левым нагревателем расположены изолирующие гетинаксовые пластинки.

на текстолитовой пластинке размером  $5 \times 50 \times 50$  мм<sup>3</sup> и соединить между собой параллельно. Выводы резисторов можно изолировать тонкой пластинкой гетинакса размером  $2 \times 50 \times 50$  мм<sup>3</sup>. Нагреватели такой конструкции вы можете включать непосредственно в электроосветительную сеть напряжением 220 В. Чтобы нагреватели можно было питать от напряжения 36 В, их нужно изготовить из четырех параллельно соединенных резисторов того же типа ВС мощностью 2 Вт, но сопротивлением 620—1000 Ом каждый.

Электрические нагреватели описанной конструкции подойдут для многих опытов по криволинейному распространению света. Поэтому, если вы испытывали затруднения с нагревателями в предложенных ранее экспериментах, попробуйте приспособить эти. Не забывайте о необходимости соблюдения требований техники безопасности!

Внешний вид подготовленного к работе прибора показан на рис. 55. Вы видите, что нагреватели при-

жаты к оргстеклу струбиной, которая зажата в лапке универсального штатива. Можно использовать и другое крепление, изготовленное из подручных средств. Проявите изобретательность!

В полностью подготовленном приборе создайте параллельный или близкий к нему пучок света и включите нагреватели. Вы будете наблюдать, что по

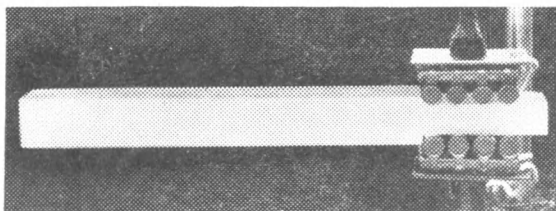


Рис. 55. Прибор для опытов по фокусировке света псевдолинзой.

мере возникновения в оргстекле градиента температуры и, следовательно, градиента показателя преломления свет начинает фокусироваться. Спустя некоторое время фокусное расстояние получившейся цилиндрической псевдолинзы станет минимальным. Если вы и дальше оставите нагреватели включенными, то фокусное расстояние псевдолинзы начнет увеличиваться. Объяснить последний результат можно только уменьшением градиента показателя преломления: оргстекло с течением времени прогревается более или менее равномерно. Фотографии, иллюстрирующие опыт, приведены на рис. 56.

В условиях описанного эксперимента нетрудно оценить градиент показателя преломления в оргстекле. Для простоты будем считать, что искомый градиент постоянен вдоль оси  $x$  на всем протяжении сфокусированного пучка (рис. 57). Тогда согласно теореме Пифагора из треугольника  $AOF$

$$F^2 + \left(R - \frac{d}{2}\right)^2 = R^2,$$

где  $F$  — фокус и одновременно фокусное расстояние псевдолинзы (напомним, что на нее падает параллельный пучок света),  $R$  — радиус кривизны крайнего луча светового пучка,  $d$  — ширина падающего параллельного пучка света. После элементарных преоб-



разований, пренебрегая малой по сравнению с другими величиной  $(d/2)^2$ , из предшествующей формулы

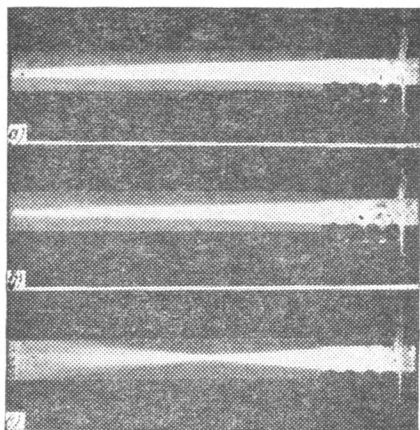


Рис. 56. На правый торец бруска (рис. 53) был пущен параллельный пучок света; фотографии показывают, как при включении нагревателей пучок постепенно фокусируется.

получаем  $R = F^2/d$ . Поскольку радиус кривизны светового пучка, распространяющегося в оптически не-

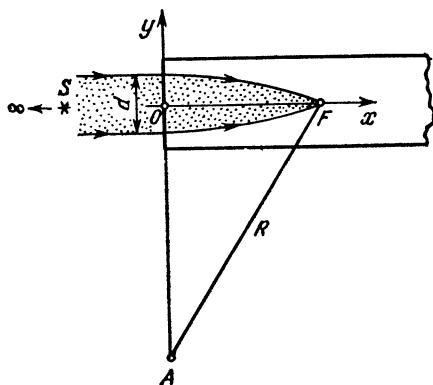


Рис. 57. К вычислению градиента показателя преломления в псевдолинзе.

однородной среде, выражается через показатель преломления среды и градиент показателя преломления;

$R = \frac{n}{dn/dy}$  (§ 5), то искомый градиент показателя преломления в направлении оси  $y$

$$\frac{dn}{dy} = \frac{nd}{F^2}. \quad (1)$$

Вычислим величину градиента показателя преломления по данным одного из наших опытов. Они таковы:  $d = 15$  мм,  $F = 100$  мм (минимальное фокусное расстояние), показатель преломления оргстекла приблизительно  $n = 1,5$ . Подстановка этих значений в формулу (1) дает  $dn/dy = 2,2 \cdot 10^{-3}$  мм $^{-1}$ .

Проверим себя. Если считать градиент показателя преломления во всех точках оси  $y$  от середины до верхнего края псевдолинзы одинаковым, то изменение показателя преломления на указанном промежутке составляет

$$\Delta n = \Delta y \frac{dn}{dy} = \frac{d}{2} \frac{dn}{dy} = 1,6 \cdot 10^{-2}. \quad (2)$$

С другой стороны, вам хорошо известно, что температурный коэффициент показателя преломления оргстекла по абсолютной величине  $|dn/dT| = 1,6 \cdot 10^{-4}$  К $^{-1}$  (§ 12). Принимая разницу температур осевой линии и края псевдолинзы в  $\Delta T = 80$  К, получим, что изменение показателя преломления

$$\Delta n = \left| \frac{dn}{dT} \right| \Delta T = 1,3 \cdot 10^{-2}. \quad (3)$$

Вы видите, что результаты оценок (2) и (3) по порядку величины неплохо согласуются между собой. Совпадение было бы, конечно, более точным, если бы мы тщательнее просчитали и провели эксперимент. Думаю, нет необходимости подробно рассказывать, как это сделать: при желании вы сможете поставить перед собой соответствующую задачу и решить ее самостоятельно.

*Для самостоятельной проработки*

1. Ландсберг Г. С. Оптика. — М.: Наука, 1976, с. 820—824.
2. Печара А. Новый облик оптики. — М.: Советское радио, 1973, с. 138—160.

В книгах изложены основы нелинейной оптики — современного раздела физики, который бурно развивается и в наши дни. Рекомендую вам разобраться в явлении самофокусировки света. Суть его, если говорить кратко, заключается в том, что достаточно интенсивный световой пучок (от мощного лазера),

проходя через среду, делает ее оптически неоднородной, причем возникающий градиент показателя преломления таков, что приводит к самофокусировке пучка света. Только что описанные опыты по фокусировке света оптически неоднородной средой можно рассматривать в качестве модельных экспериментов для явления самофокусировки света.

## § 24. МОДЕЛИ МИРАЖА В ВОЗДУХЕ

Мираж — грандиозное явление природы, которое во все времена поражало воображение людей. Понятно поэтому желание построить модель этого явления, позволяющую проверить теорию миража. Одним из первых, кто смоделировал мираж в лабораторных условиях, был Роберт Вуд. Свою экспериментальную установку он описал следующим образом [1].

«Три стальные полосы, каждая длиной в 1 м, шириной в 20 см и толщиной в 3 или 4 мм, устанавливаются на железных треногах и тщательно выверяются в одной плоскости так, чтобы их верхние поверхности казались одной плоской поверхностью, в чем можно убедиться, смотря с одного из концов (рис. 58). Чтобы предупредить отражение, которое



Рис. 58. Предложенная Р. Вудом модель миража, в которой для нагревания использованы газовые горелки.

может получиться при скользящем падении, полосы посыпают сверху песком. Кусок матового стекла, освещенный сзади дуговой лампой, представляет небо; вместо стекла можно взять зеркало, которое нужно расположить так, чтобы при наблюдении с противоположного конца «пустыни» в нем отражалось небо. Искусственное небо должно доходить до уровня посыпанной песком поверхности; на его фоне располагается цепь гор, вырезанная из картона с вершинами от 1 до 2 см, долины должны опускаться до самого песка. «Пустыня» нагревается длинной газовой горелкой, сделанной из газовой трубы, в которой просверлен ряд небольших отверстий. Газ подводится с обоих концов трубы, высота пламен должна быть

около 5 см. Если смотреть вдоль поверхности, посыпанной песком, держа глаз от 3 до 5 см выше этой поверхности, то при нагревании «пустыни» можно увидеть появление на песке блестящего пруда с водой, в котором видны перевернутые изображения гор и неба. Фотографии этого искусственного миража представлены на рис. 59.



**Рис. 59.** Такие фотографии миража получил на своей установке Р. Вуд.

Установка Вуда действительно позволяет смоделировать явление миража, но делать ее в том виде, в каком в свое время (еще в 1899 году!) сделал Вуд, сейчас неразумно. Главный недостаток этой установки заключается в том, что каждый раз перед проведением опытов ее пришлось бы собирать и настраивать заново. С этим вполне можно было бы мириться, если бы сборка и наладивание установки требовали небольшого времени, а это не так. Вторым существенным недостатком установки состоит в том, что в ней использованы газовые горелки. Я не могу представить себе учителя, который был бы спокоен, зная, что его ученики самостоятельно работают с газом. Это слишком опасно, да и совсем не нужно — мы сумеем предложить иные способы нагрева, обеспечивающие получение миража.

Критикуя известный прибор, мы одновременно вырабатываем требования к новому прибору, свободному от недостатков известного. Вот некоторые из таких требований: прибор должен быть совершенно безопасен; он должен быть всегда готов к работе; если прибор предполагается собирать перед работой с ним, то конструкция его должна быть такой, чтобы сборка прибора не отнимала слишком много времени (полчаса — максимальный срок), а сам прибор не требовал наладивания. В этом случае можно с достаточной уверенностью утверждать, что прибор будет применяться на практике; в иных условиях даже

очень хороший прибор или экспериментальную установку никто использовать не станет. слишком велика плата временем за желание посмотреть физическое явление. Правда, меня никогда не останавливали временные затраты в попытках удовлетворить потребность увидеть новое явление. Думаю, и вы не должны слишком беспокоиться о своем времени: человек теряет его зря только тогда, когда ничего не делает. Но заботиться о времени своих товарищей нужно: делать приборы необходимо так, чтобы их применение требовало минимального времени — тогда вы высвободите время других для того, чтобы они могли использовать его с большей пользой, ну хотя бы на разработку таких приборов и опытов, которые не удалось сделать вам.

Пути совершенствования модели миража, предложенной Вудом, почти очевидны: в качестве нагревателя необходимо использовать нихромовую спираль, раскаляемую электрическим током; спираль нужно

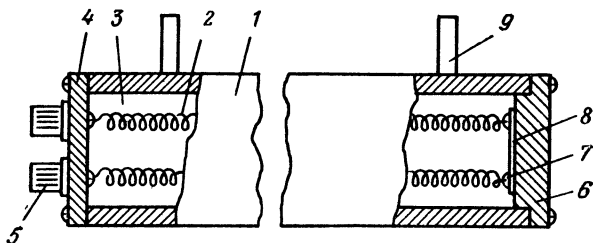


Рис. 60. Эскиз электрического нагревателя для моделирования миража в воздухе: это самый мощный нагреватель из всех, рассмотренных в книге.

«спрятать» в кожух так, чтобы была исключена возможность соприкосновения с ней и поражения электрическим током; кожух должен быть таким, чтобы при скользящем падении световых лучей на его поверхности не наблюдалось зеркальное отражение света и т. д. Продумайте остальное самостоятельно и сопоставьте свой проект с моделью, которая описана ниже.

Электрический нагреватель (рис. 60), используемый для моделирования миража, представляет собой дюралевою трубу 1 прямоугольного сечения размером  $50 \times 100 \text{ мм}^2$ , длина которой составляет 1—2 м (мы опробовали трубы длиной 1 и 2 м; обе они да-

вали вполне удовлетворительный мираж, но с более длинной трубой результаты эффектнее, хотя работа с ней менее приятна). В трубе расположен электрический нагреватель 2, выполненный из нихромовой спирали от электроплитки (диаметр спирали 5 мм, диаметр нихромового провода 0,5 мм, сопротивление ненагретой спирали 30 Ом). Труба заполнена чистым речным песком 3, выполняющим роль изолятора и наполнителя, фиксирующего в трубе спираль. Одно из отверстий трубы закрыто текстолитовой заглушкой 4, на которой расположены клеммы 5, соединенные с концами спирали. Второе отверстие также закрыто текстолитовой заглушкой 6, в которую вкручены болты 7, соединенные между собой медной шинкой 8. На одной из стенок трубы расположены держатели 9, позволяющие закреплять прибор в штативах.

Сборку и налаживание прибора проведите в такой последовательности. К клеммам 5 подсоедините концы спирали 2 выбранной длины. Найдите середину спирали, привяжите к ней прочную нить, пропустите нить через трубу и, приставив заглушку 4 с клеммами 5 к одному отверстию трубы, за нить растяните спираль так, чтобы середина ее вышла из второго отверстия трубы. Далее спираль можно посередине разрезать; образовавшиеся концы ее нужно зажать под болты 7, соединенные медной шинкой 8. Заглушку с этими болтами прикрепите к трубе, трубу расположите вертикально и, оттянув заглушку 4 с клеммами, через образовавшееся отверстие понемногу засыпайте в трубу песок. Время от времени постукивайте по стенкам трубы, с тем чтобы песок уплотнялся; засыпку производите до тех пор, пока вся труба не заполнится песком. После этого заглушку 4 закрепите на трубе. На всякий случай авометром проверьте, не замыкает ли спираль на стенку трубы (этого, конечно, не должно получиться — песок надежно фиксирует спираль, но для собственного успокоения проверить нужно; более того, если вы при постановке опытов соедините трубу с заземлением, то получите совершенно безопасный прибор и полностью исключите возможность поражения электрическим током). Три грани трубы последовательно смажьте клеем БФ-2 и равномерно посыпьте тонким слоем песка. После высыхания клея прибор закрепите в

двух штативах и подключите к автотрансформатору. Постепенно повышайте напряжение, подаваемое на нагреватель, и контролируйте температуру поверхностей трубы. Спешить здесь не следует: прибор обладает значительной тепловой инерцией и нужно давать ему определенное время для прогрева. Подберите такое напряжение, при котором поверхность трубы прогревается до  $100^{\circ}\text{C}$  за 15—20 мин (в нашей конструкции это напряжение составило 220 В).

Мне не хотелось бы здесь подробно описывать опыты с моделью — надеюсь, вы сможете поставить их вполне самостоятельно. Но чтобы облегчить вам работу, следует кратко напомнить основные сведения о миражах.

Различают три вида миражей: нижний, верхний и боковой. С нижним миражом каждый из вас многократно встречался, наблюдая его над разогретым асфальтовым или бетонным покрытием дороги. Нижний мираж чаще всего описывают в популярной литературе, рассказывая, как путешественники, томимые в пустыне жаждой, вдруг перед собой замечают озеро воды; они торопятся к озеру, а оно удаляется от них с тем большей скоростью, чем быстрее движение вперед, пока не исчезает совсем. Нижний мираж обусловлен искривлением световых лучей в слое более теплого воздуха, расположенном внизу, то есть вблизи земной поверхности.

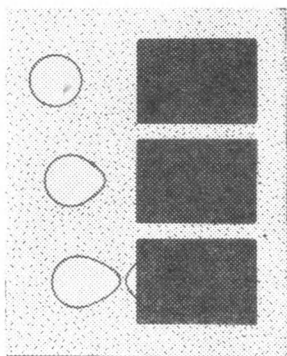
Верхний мираж наблюдается тогда, когда слой более теплого воздуха расположен сверху, а к поверхности земли прилегает холодный воздух. Чаще всего такие условия имеют место в полярных областях: солнце прогревает воздух на некоторой высоте, а снизу он оказывается охлажденным, например, тающими льдами.

Боковой мираж встречается в случаях, когда граница между теплым и холодным воздухом вертикальна. Представьте себе озеро с высокими гористыми берегами. Восходящее солнце прогревает один берег озера, в то время как противоположный остается холодным. Так образуются области теплого и холодного воздуха, соприкасающиеся по вертикальной границе.

Из сказанного ясно, что физическая суть нижнего, верхнего и бокового миражей одина и наблюдаемые результаты в общем тоже одинаковы: за счет криволинейного распространения света в воздухе с изме-

нящейся оптической плотностью наблюдатель видит не только сами предметы, но и их прямые или перевернутые (часто и деформированные) изображения. Поэтому для наблюдения в лабораторных условиях всех трех видов миражей достаточно создать в воздухе такой перепад температур, при котором границы между теплым и холодным воздухом были бы горизонтальны и вертикальны. Лучше сказать так: нужно создать такие распределения температуры в воздухе, при которых градиенты показателя преломления были бы направлены вниз, вверх и вбок. Именно это позволяет сделать описанный выше прибор, и вы легко убедитесь в сказанном, приступив к опытам.

А делать их нужно так. Возле одного из концов трубы расположите небольшой предмет (если труба короткая, то предмет лучше поместить на расстоянии около метра от ее конца). В качестве предмета в простейшем случае можно использовать лампочку накаливания, рассчитанную на напряжение 6,5 В и снабженную матовым колпаком диаметром 25—40 мм. Включите нагреватель и подождите до тех пор, пока температура поверхностей трубы не станет близка к 100°C. После этого нагреватель можно выключить — прибор будет охлаждаться очень медленно, и вы успеете провести все наблюдения. Смотрите со второго конца трубы вдоль верхней, нижней или боковой ее поверхностей на предмет и попросите своего товарища медленно перемещать этот предмет в направлении, перпендикулярном лучу зрения, приближая и удаляя предмет от соответствующей поверхности трубы. Вы будете наблюдать соответственно нижний, верхний и боковой миражи. Последовательность искажений изображения круглого предмета при приближении его к модели, имеющей более высокую температуру, чем окружающий воздух, схематически показана на рис. 61.

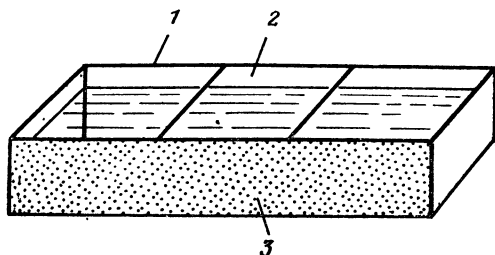


**Рис. 61.** Так искажается изображение круглого предмета при приближении предмета к достаточно длинному электрическому нагревателю.



Мы рассмотрели так сказать «основательную» модель миража — прибор, не требующий настройки, всегда готовый к использованию, простой в обращении и безопасный. Сделав такой прибор для школы, вы можете быть уверены, что он будет применяться. Но не каждый из вас решится изготовить прибор, подобный описанному, да и далеко не во всех школах условия таковы, что благоприятствуют этому. Видимо, имеет смысл кратко рассказать здесь и о такой модели миража, которую вы сможете сделать даже у себя дома.

Прибор представляет собой длинную узкую кювету из тонкого металла, в которую можно наливать



**Рис. 62.** Кювета из тонкой алюминиевой фольги, наполненная горячей водой, позволяет смоделировать мираж даже в домашних условиях.

кипятка (рис. 62). Из тонкого дюралевого уголка соберите каркас *1* размером, например,  $70 \times 80 \times 1000$  мм<sup>3</sup>. Из листа алюминиевой фольги *2* толщиной 0,1—0,2 мм по размерам каркаса выгните кювету (посмотрите как делаются бумажные или картонные коробки для упаковок и сделайте нечто подобное из фольги, только значительно больших размеров). Каркас введите внутрь кюветы, и края фольги оберните вокруг него для придания кювете необходимой прочности. Проверьте качество вашей работы, залив в кювету воду,— боковые стенки кюветы при этом не должны выгибаться слишком сильно. Одну из стенок кюветы *3* снаружи покройте клеем БФ-2 и посыпьте песком.

Наблюдения миража проводите вдоль этой стенки (очевидно, это будет боковой мираж). Если в кювету вы зальете только что вскипевшую воду, то мираж можно будет наблюдать в течение по крайней мере

получаса, что вполне достаточно для первоначально-го ознакомления с явлением.

Возможны и другие конструкции прибора для моделирования миража в воздухе. Вы сейчас владеете всеми основными идеями, поэтому мне достаточно сделать небольшой намек. Видели ли вы когда-нибудь гибкие электрогрелки? Уверяю вас, что это почти готовая модель миража. Попробуйте! Не забывайте, однако, что электрогрелки работают от сетевого напряжения 220 В, поэтому экспериментировать с ними нужно, соблюдая осторожность.

*Для самостоятельной проработки*

1. Вуд Р. Физическая оптика. — Л.; М.: ОНТИ, 1936, с. 102—103.

2. Бовин И. Т., Головкин Н. В. Использование электрической лампы в качестве самодельного прибора по физике. — В кн.: Сборник по методике и технике физического эксперимента. — М.: Учпедгиз, 1960, с. 69—75.

Предложен способ изготовления термопары из электродов вышедшей из строя лампы накаливания.

3. Гринбаум М. И. Универсальный усилитель к школьному гальванометру. — В кн.: Приборы по физике и астрономии. — М.: Просвещение, 1968, с. 40—45.

В статье описан простой усилитель на транзисторах. Пользуясь этим усилителем и самодельной термопарой, вы сможете сделать простейший электротермометр, позволяющий быстро определять температуру поверхности любого нагревателя. Разумеется, перед использованием самодельный электротермометр нужно отградуировать по ртутному или спиртовому термометру. Показания вашего электротермометра будут зависеть от температуры окружающей среды, если вы не примете специальных мер. Объясните этот эффект и не забывайте о нем при работе с прибором.

## **§ 25. «ЛУЖИ» ВНУТРИ ОРГСТЕКЛА**

Вернемся к самому началу (§ 1), когда говорилось о «лужах» внутри оргстекла, и обсудим возможность построения модели миража из неравномерно нагретого оргстекла. Прежде чем описывать экспериментальную установку, мне хотелось бы еще раз напомнить суть происходящих явлений.

Пусть брусок из оргстекла, температура которого равна температуре окружающего воздуха  $T_1$ , в некоторый момент времени ставится своей нижней гранью на нагреватель, имеющий температуру  $T_2 > T_1$  (рис. 63). От нагревателя по оргстеклу в направле-

нии оси  $y$  будет распространяться поток тепла. Спустя определенное время прогреется слой оргстекла толщиной  $OO'$ , в котором температура будет изменяться от точки к точке, уменьшаясь в положительном направлении оси  $y$ . В соответствии с распределением температуры в переходном слое  $OO'$  непрерывно будет изменяться показатель преломления оргстекла в пределах от некоторого минимального значения  $n_2$  вблизи нагревателя до максимального значения  $n_1$  вблизи верхней границы переходного слоя.

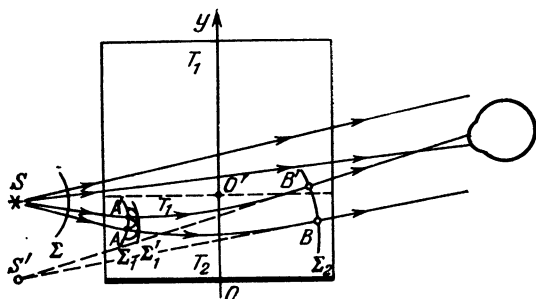


Рис. 63. Ход лучей в модели миража из неравномерно нагретого оргстекла.

Поскольку скорость света в веществе определяется отношением скорости света в вакууме к показателю преломления вещества  $v = c/n$ , то скорость света в более нагретых (нижних) слоях оргстекла будет больше, чем в менее нагретых (верхних).

Если брусок из оргстекла имеет плоскопараллельные прозрачные торцы, то наблюдение источника света  $S$  сквозь них даст следующее. Во-первых, глаз увидит источник света в том месте, где он находится на самом деле, поскольку лучи света, распространяющиеся выше переходного слоя  $OO'$ , идут через оптически однородное оргстекло и, следовательно, прямолинейны. Во-вторых, глаз увидит мнимое изображение  $S'$  источника. Это изображение дают лучи, проходящие сквозь оптически неоднородный слой  $OO'$  оргстекла, которые криволинейны.

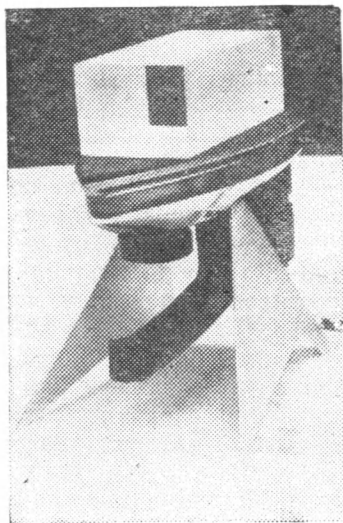
В самом деле, точечный источник света  $S$  испускает сферическую волну  $\Sigma$ . Пусть, войдя в оргстекло, волновая поверхность занимает положение  $\Sigma_1$ . По принципу Гюйгенса положение волновой поверх-

ности в следующий момент времени можно найти, построив для этого момента вторичные световые волны с центрами в точках поверхности  $\Sigma_1$ . Для простоты будем считать вторичные световые волны сферическими, хотя в оптически неоднородной среде они, очевидно, таковыми не являются. Поскольку свет в нижней (более нагретой) части бруска распространяется быстрее, чем в верхней (менее нагретой), то вторичная сферическая волна с центром в точке  $A$  будет иметь больший радиус, чем вторичная волна, испущенная точкой  $A'$ . В итоге волновая поверхность  $\Sigma_1$ , которая огибает все вторичные волны, окажется несколько повернутой по отношению к волновой поверхности  $\Sigma_1$ . Вместе с поворотом волновой поверхности произойдет и поворот световых лучей, которые всегда нормальны фронту волны. Применяя принцип Гюйгенса шаг за шагом, мы приходим к выводу, что по выходе из неравномерно нагретого оргстекла волновая поверхность должна занять положение  $\Sigma_2$ . Этот же результат можно получить, используя принцип Ферма: время распространения света от точек волновой поверхности  $\Sigma_1$  до соответствующих точек поверхности  $\Sigma_2$  должно быть одинаковым (обращаем внимание читателя на связь между принципами Гюйгенса и Ферма!), поэтому волновые поверхности в оптически неоднородной среде деформируются и поворачиваются, а световые лучи криволинейны. Важно еще раз подчеркнуть, что изгиб светового пучка происходит в сторону от меньших к большим значениям показателя преломления и выражен тем сильнее, чем быстрее изменяется показатель преломления в направлении оси  $y$  (чем больше градиент показателя преломления).

Ясно, что если перед брусом неравномерно нагретого оргстекла находится не точечный источник света, а предмет конечных размеров, то сквозь оргстекло будут наблюдаться сам предмет и его мнимое перевернутое изображение. Именно это явление и процесс развития его в динамике вы должны увидеть в опытах с моделью миража.

Внешний вид одной из возможных конструкций предлагаемой модели миража изображен на рис. 64. В ней использован брусок оргстекла сечением  $45 \times 60$  мм<sup>2</sup> и длиной 100—150 мм, все грани которого обработкой шкуркой сделаны матовыми, а торцы

отполированы пастой ГОИ на туго натянутой и смоченной керосином грубой ткани так, что совершенно прозрачны. Разумеется, приведенные размеры бруска могут быть изменены в широких пределах в зависимости от конкретных возможностей изготовителя.



**Рис. 64.** Модель миража из бруска оргстекла, установленного на утюге.

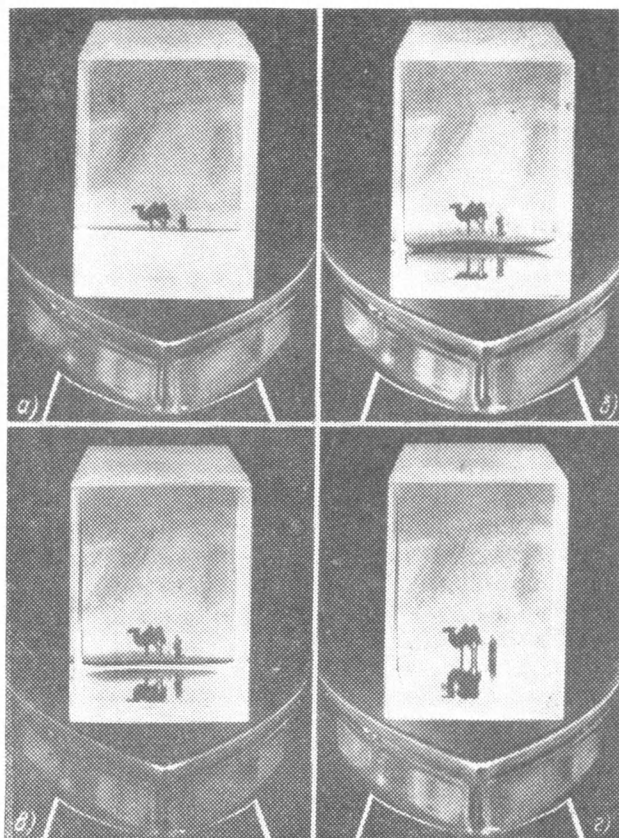
В качестве нагревателя в модели применен электроутюг, установленный на подставке так, что его плоская поверхность расположена сверху. На эту поверхность помещен лист черной бумаги. Вместо утюга можно использовать электроплитку, положив на нее слой асбеста, а поверх него — черную бумагу.

Перед проведением опыта определяют напряжение, при котором нагреватель дает температуру порядка  $100^{\circ}\text{C}$ . Для этого нагреватель подключают к автотрансформатору типа РНШ и, постепенно повышая напряжение, тем или иным способом оценивают полу-

чающуюся температуру поверхности нагревателя. Можно питать электроплитку или утюг непосредственно от электроосветительной сети, определив предварительно время, необходимое для прогрева их поверхностей до  $100^{\circ}\text{C}$ . Поскольку тепловая инерция этих приборов значительна, при постановке опытов их можно вначале нагреть, а затем выключить и дальше работать с обесточенными нагревателями.

На поверхность разогретого нагревателя помещают брусок оргстекла, перед одним из торцов его располагают какой-нибудь предмет (для бруска указанных выше размеров высота предмета не должна превышать 10—15 мм), освещают его и наблюдают предмет через второй торец. По мере прогрева оргстекла его нижняя матовая грань постепенно становится

«зеркальной» и появляется мираж. На рис. 65 представлены фотографии, иллюстрирующие последовательность появления мнимого изображения предмета при постепенном нагревании оргстекла.



**Рис. 65.** «Лужи» внутри оргстекла: на первой фотографии оргстекло имеет комнатную температуру; остальные получены при постепенном росте температуры нижней грани бруска.

С одним бруском оргстекла описанный опыт может быть повторен неограниченное число раз, если оргстекло не перегревать: размягчение оргстекла при нагреве приведет к деформации торцов бруска и, что самое неприятное, к изменению структуры оргстекла,

в результате которого после охлаждения оргстекло сохранит оптическую неоднородность. Впрочем, брусок имеет четыре грани, каждая из которых может быть рабочей, поэтому случайный перегрев одной из них еще не приводит к необходимости изготовления нового бруска.

*Для самостоятельной проработки*

1. Броунов П. И. Атмосферная оптика. — М.: Гостехиздат, 1924, с. 26—51.

В этой книге подробно рассмотрено явление миража.

## **§ 26. ЗЕЛЕНЫЙ ЛУЧ**

Глядя на заходящее Солнце, когда оно уже почти полностью скроется за горизонтом так, что видимым останется лишь небольшой сегмент солнечного диска, в момент исчезновения этого сегмента при благоприятных условиях вы можете заметить так называемый «зеленый луч» — вспышку зеленого света, длящуюся обычно в течение нескольких секунд. Принято считать, что зеленый луч — чрезвычайно редкое явление атмосферной оптики, наблюдать которое удастся лишь немногим счастливым. М. Миннарт начинает рассказ о зеленом луче даже так: «По старинной шотландской легенде, всякий, кто хоть однажды видел зеленый луч, никогда не совершит ошибки в сердечных делах» [1]. Ниже описана установка, позволяющая наблюдать зеленый луч тогда, когда этого захочется. Очевидно, те из вас, кто соберет эту установку, в соответствии с легендой будут обладать определенными преимуществами перед остальными живущими. Если же говорить всерьез, то мне, например, довелось наблюдать настоящий зеленый луч уже после того, как я много раз видел его в модельных опытах. Думаю, произошло это только благодаря тому, что я знал, что и как должен видеть. Поэтому можно надеяться, что модельные эксперименты и вам облегчат наблюдения взаправдашнего зеленого луча и, во всяком случае, вы не упустите благоприятной возможности увидеть зеленый луч в природе.

Зеленый луч, с которым связано немало легенд и мистических историй, имеет вполне прозаическое объяснение, которое можно дать даже в рамках эле-

менгарной физики. При закате Солнца свет распространяется через атмосферу вдоль земной поверхности. Плотность воздуха убывает с высотой, поэтому атмосфера представляет собой оптически неоднородную среду, в которой свет распространяется криволинейно. Многие наблюдатели отмечают, что для появления зеленого луча необходимо такое состояние атмосферы, при котором возможно возникновение верхнего миража,— это еще раз говорит о том, что существенным является прохождение света через оптически неоднородную среду.

От Солнца идет белый свет, состоящий, как мы знаем, из целого набора цветов (в наше время принято «разлагать» белый свет на семь цветов радуги: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый — перечисленные здесь в порядке убывания соответствующих им длин волн). От длины световой волны зависит показатель преломления вещества — это явление называется дисперсией света. При нормальной дисперсии с увеличением длины волны света показатель преломления уменьшается. Мы имеем дело именно с нормальной дисперсией, поэтому можем заключить, что при распространении света через оптически неоднородную атмосферу сильнее всего отклоняются от своего первоначального направления коротковолновые компоненты белого света: фиолетовые, синие, голубые и зеленые лучи. Слабее отклоняются длинноволновые составляющие белого света: красные, оранжевые и желтые лучи. Если бы свет шел от находящейся невысоко над горизонтом яркой светящейся точки, то наблюдая ее, вы обнаружили бы спектр. Но видимые размеры Солнца достаточно велики, а дисперсионные отклонения света различных длин волн малы, поэтому глядя на солнечный диск, мы в лучшем случае можем рассчитывать увидеть не спектр, а цветовую окраску краев этого диска: верхний край должен иметь фиолетовый оттенок, а нижний — красный. На самом деле мы не видим и этой окраски. Дело в том, что интенсивности указанных оттенков несравненно меньше интенсивности белого света, испускаемого солнечным диском.

При закате Солнца, когда значительная часть диска скроется за горизонтом, видимым остается лишь небольшой верхний сегмент солнечного диска,



окрашенный, как мы знаем, в коротковолновые составляющие белого света (рис. 66). Из этой коротковолновой части спектра наблюдается только зеленый свет потому, что свет меньших длин волн — голубой, синий и фиолетовый — сильно рассеивается атмосферой (напомним, что голубой цвет неба обусловлен именно этим рассеянием).

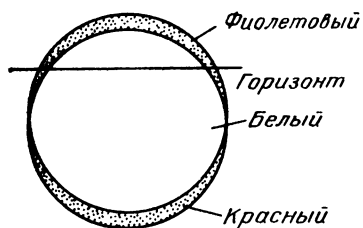


Рис. 66. Схематическое изображение заходящего Солнца.

Попробуем теперь перевести наши словесные рассуждения на язык простых формул. Пусть параллельный пучок белого света шириной  $d$  распространяется в оптически

неоднородной среде так, как показано на рис. 67. Найдем зависимость угла отклонения  $\varphi$  этого пучка

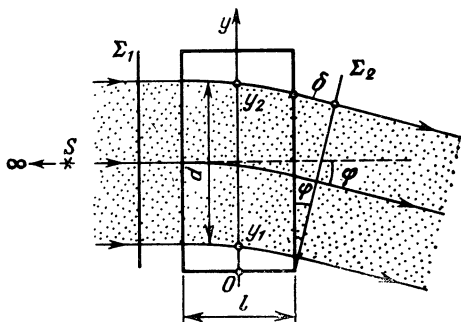


Рис. 67. К объяснению зеленого луча.

от длины световой волны. Будем считать, что в оптически неоднородной среде свет проходит путь длиной  $l$ , а показатель преломления среды  $n$  линейно зависит от координаты  $y$ :

$$n = n_0 - \frac{dn}{dy} y, \quad (1)$$

где  $n_0$  — значение показателя преломления в точке с координатой  $y = 0$ ,  $dn/dy$  — постоянный градиент показателя преломления.

Обозначим через  $\Sigma_1$  и  $\Sigma_2$  положения фронта световой волны до вхождения в оптически неоднород-

ную среду и после выхода из нее. Время распространения света от точек волновой поверхности  $\Sigma_1$  до соответствующих точек волновой поверхности  $\Sigma_2$

$$\tau = \frac{l \cdot n(y_1)}{c} = \frac{l \cdot n(y_2)}{c} + \frac{\delta}{c},$$

где  $n(y_1)$  и  $n(y_2)$  — значения показателей преломления соответственно в точках с координатами  $y_1$  и  $y_2$ ,  $c$  — скорость света в вакууме. Из этого равенства выражаем величину  $\delta$ :

$$\delta = l [n(y_1) - n(y_2)].$$

Подставляя в последнюю формулу значения  $n(y_1)$  и  $n(y_2)$ , выраженные из формулы (1), получаем

$$\delta = l(y_2 - y_1) \frac{dn}{dy} = ld \frac{dn}{dy}.$$

Считая угол отклонения  $\varphi$  светового пучка малым, можем написать

$$\varphi = \frac{\delta}{d} = l \frac{dn}{dy}. \quad (2)$$

Таким образом, при отсутствии дисперсии (или для монохроматического света) угол отклонения светового пучка от первоначального направления при распространении его в оптически неоднородной среде пропорционален градиенту показателя преломления среды (ср. § 13). Однако мы имеем дело с белым светом, и среда обладает дисперсией, которую необходимо учитывать.

Зависимость показателя преломления среды от длины световой волны  $\lambda$  во многих практически важных случаях можно определить по эмпирической формуле Коши

$$n = n' + \frac{a}{\lambda^2}, \quad (3)$$

где  $n'$  и  $a$  — постоянные, которые для каждой среды нужно специально определять на опыте. Подставляя выражение (3) в формулу (2) и учитывая, что длина световой волны  $\lambda$  падающего пучка не может зависеть от координаты  $y$ , получаем

$$\varphi = l \left( \frac{dn'}{dy} + \frac{1}{\lambda^2} \frac{da}{dy} \right). \quad (4)$$

Итак, мы приходим к выводу, что угол отклонения светового пучка зависит не только от градиента показателя преломления среды, но и от длины световой волны: с увеличением длины волны угол отклонения уменьшается. Отсюда следует, что прохождение пучка белого света через оптически неоднородную среду приводит к разложению его в спектр. Этим и подтверждаются приведенные выше качественные рассуждения о механизме образования зеленого луча.

Создать нужный для моделирования зеленого луча градиент показателя преломления вы сможете неравномерным нагревом бруска оргстекла примерно так, как это делалось при моделировании миража (§ 25). Лучше, однако, изготовить такой образец оргстекла, который навсегда сохранит необходимую в опытах оптическую неоднородность.

Выпилите брусок оргстекла размером  $50 \times 60 \times 110$  мм<sup>3</sup>. Все грани его, обработав шкуркой, сделайте матовыми. На электроплитку или перевернутый электроутюг поместите тонкую асбестовую прокладку, а на нее поставьте брусок оргстекла гранью, размер которой составляет  $50 \times 110$  мм<sup>2</sup>. Включите нагреватель и производите нагрев оргстекла до тех пор, пока оно не начнет размягчаться. Не увлекайтесь слишком сильно: плохо, если поверхность оргстекла, соприкасающаяся с нагревателем, будет пузыриться; нужно добиться лишь размягчения оргстекла, о чем вы можете судить по начинающейся деформации торцов бруска. После этого выключите нагреватель и оставьте брусок на нем до полного охлаждения (вы можете, разумеется, опробовать и другие способы термообработки, например, снять образец оргстекла с размягченным слоем с поверхности нагревателя и охладить его на воздухе при комнатной температуре или опустить размягченное оргстекло в холодную воду и т. п.).

От торцов прошедшего термообработку образца оргстекла ножовкой по металлу отпилите две пластинки толщиной по 5 мм (это необходимо сделать, чтобы исключить преломление света на деформированных в результате нагрева поверхностях торцов). Торцы получившегося бруска отшлифуйте и отполируйте так, чтобы они стали плоскими и совершенно прозрачными. В итоге вы получите брусок с «застывшей» в нем оптической неоднородностью. Интересно

исследовать распределение показателя преломления в этой неоднородности (например, методом, изложенным в § 13). Обратив ваше внимание на возможность такого исследования, мы вернемся к той проблеме, которой непосредственно занимаемся.

Подберите пластмассовую или металлическую коробочку такой величины, чтобы в ней можно было закрепить лампочку карманного фонаря. В крышке коробочки сделайте круглое отверстие диаметром около 20 мм и перекройте его куском матового стекла или не слишком плотной белой бумаги. Собрав предлагаемый источник света, вы получите модель Солнца.

Земную атмосферу будет моделировать приготовленный вами брусок оргстекла с оптической неоднородностью. Расположите его на небольшой подставочке (рис. 68), высоту которой можно регулировать. Источник света разместите на расстоянии около метра перед бруском, сами сядьте на расстоянии 0,5—1 м от бруска и смотрите сквозь него на источник. Не выпуская диск источника из поля зрения, наклоняйте голову, а при необходимости и перемещайте брусок в вертикальном направлении. Вы будете наблюдать неискаженное изображение «Солнца», когда свет проходит через оптически однородное оргстекло, и искажения «солнечного диска», если свет проходит через область оптической неоднородности. Сказанного вполне достаточно, чтобы при тщательном проведении наблюдений увидеть зеленый луч.

На рис. 69 представлены последовательные фотографии «Солнца, опускающегося за горизонт», полученные в условиях описанного эксперимента (линия горизонта на фотографиях не обозначена, поскольку вы самостоятельно сможете определить ее на опыте). Зеленый луч виден, когда изображение модели Солнца имеет вид, показанный на рис. 69, в.

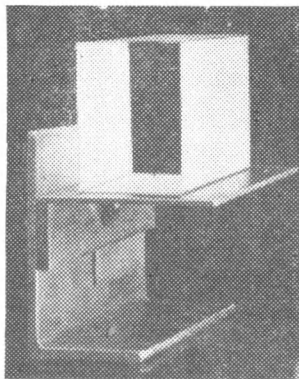
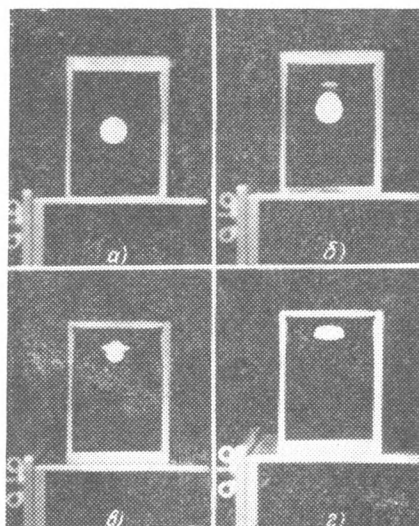


Рис. 68. Модель земной атмосферы.

В модельных экспериментах наблюдается не столько зеленый, сколько фиолетово-синий луч, и это вполне объяснимо: фиолетовый свет в условиях модели не рассеивается, а попадает в глаз. Впрочем, окраска «зеленого луча» сильно зависит от конкретных условий наблюдения и изменяя их, вы можете увидеть «зеленый луч» действительно зеленоватого цвета. Заметим также, что наряду с зеленым лучом в

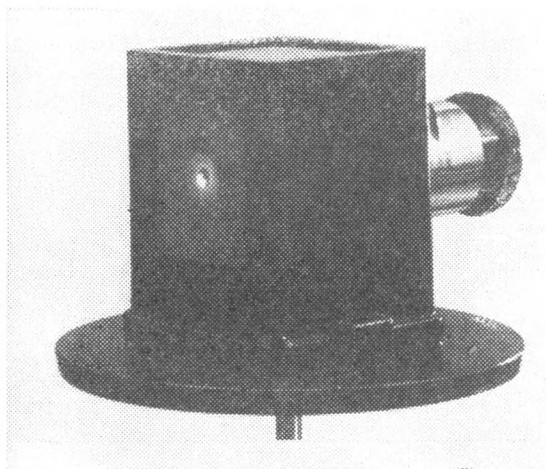


**Рис. 69.** Искажения диска при наблюдении его через оргстекло с «застывшей» оптической неоднородностью: если бы эти снимки были цветными, то на третьем из них вы увидели бы зеленый луч; наблюдения удобно проводить в той последовательности, в которой приведены фотографии; если по фотографиям вы хотите проследить за «заходящим Солнцем», то рассматривайте их в обратной последовательности.

модельных опытах вы столь же успешно сможете наблюдать и красный луч, который в природных условиях встречается крайне редко: нужно, чтобы возле горизонта оказалось облако с резкой нижней границей и из-под него выглянул нижний сегмент заходящего Солнца. В описанной модели ничто не мешает последовательно увидеть зеленый и красный лучи.

Возможно, некоторым из вас будет трудно сразу обнаружить то, что нужно. Несравненно более зна-

чительные трудности испытают ваши товарищи, которым вы захотите показать явление. К примеру, я нередко бывал обескуражен тем, что хотя сам видел зеленый луч, другие, проводя наблюдения в тех же условиях непосредственно за мной, либо упорно не замечали его, либо таким тоном объявляли об увиденном зеленом луче, что сразу становилось очевидным их желание поскорее отойти от установки. Поэтому пришлось пойти на хитрость, которую советую взять на всоружение и вам.



**Рис. 70.** Модель глаза.

Как это ни странно, но далеко не все умеют управлять собственным глазом или даже просто отдавать себе отчет в том, что наблюдают. Значит, надо заменить индивидуальный глаз каждого единой для всех моделью глаза. А такую модель легко сделать из непрозрачной коробки, в отверстии одной из стенок которой в качестве зрачка укреплена собирающая линза с фокусным расстоянием 5—10 см, а отверстие противоположной стенки затянуто папиросной бумагой или перекрыто матовым стеклом, выполняющим роль сетчатки глаза. Нужно предусмотреть возможность перемещения линзы относительно матового стекла — это позволит настраивать на резкость («аккомодировать») модель глаза. На рис. 70

приведена фотография простейшей модели глаза, изготовленной из пластмассовой коробки размером  $80 \times 90 \times 110$  мм<sup>3</sup>; в качестве линзы в модели применен объектив старого фильмоскопа; на фотографии вы видите изображение лампы, которое объектив дает на «сетчатке глаза».

Расположив должным образом модель глаза относительно моделей Солнца и земной атмосферы, вы получите на «сетчатке глаза» изображение «Солнца». Опуская или поднимая модель Солнца, вы сможете показать своим товарищам характерные искажения изображения, зеленый и красный лучи. После этого можно провести наблюдения непосредственно глазом — явления, которые при этом можно заметить, гораздо богаче тех, которые обнаруживаются при работе с моделью глаза.

*Для самостоятельной проработки*

1. Миннарт М. Свет и цвет в природе. — М.: Наука, 1969, с. 79—84.

Подробно рассмотрены явления зеленого и красного лучей. Сравните рис. 66 рекомендованной книги с пояснением к нему, имеющемуся в тексте на с. 81. Не находите ли вы противоречия?

2. Броунов П. И. Атмосферная оптика. — М.: Гостехиздат, 1924, с. 207—212.

Описаны очень интересные наблюдения зеленого луча в природе.

3. Калитеевский Н. И. Волновая оптика. — М.: Наука, 1971, с. 303—306.

Изложены основные сведения о дисперсии света.

## **§ 27. МОДЕЛЬ ГРАВИТАЦИОННОЙ ЛИНЗЫ**

В 1979 году научный мир был взбудоражен сообщением о наблюдении астрономического объекта, состоящего из двух одинаковых квазаров. Необычный объект получил наименование QSO 0957+561 A, B, а астрофизики — новую загадку, которую до конца еще предстоит разгадать [1]. Удивительность этого открытия станет совершенно очевидной, если мы вспомним, что на каждом объекте природы лежит печать индивидуальности: нет вокруг нас двух совершенно одинаковых вещей, нет и во Вселенной одинаковых планет, звезд или квазаров. О космических объектах судят в первую очередь по спектрам испускаемого ими излучения, поэтому слово «одинаковость» двух разных объектов означает лишь иден-

тичность спектров этих объектов. Кроме того, «одинаковость» всегда относительна и об одинаковости обнаруженных в 1979 году квазаров можно говорить лишь с известной степенью точности. Тем не менее одинаковость компонент  $A$  и  $B$  квазара QSO 0957+561  $A, B$  настолько поразительна, что сразу



Рис. 71. Гравитационное поле галактики может искривлять световые лучи.

возникло предположение о том, что на самом деле объекты  $A$  и  $B$  являются изображениями  $S'$  и  $S''$  одного и того же квазара  $S$  (рис. 71), созданными гравитационной линзой — гравитационным полем галактики, находящейся между квазаром и земным наблюдателем!

Эффект искривления световых лучей в гравитационном поле является следствием общей теории относительности. Возможность существования гравитационных линз показал основоположник этой теории А. Эйнштейн в работе «Линзоподобное действие звезды при отклонении света в гравитационном поле» [2], опубликованной еще в 1936 году. Вряд ли мы с вами сможем сейчас разобраться в теории Эйнштейна, но на интуитивном уровне, наверное, в состоянии представить себе, что может происходить со светом, идущим мимо галактики или иного объекта, создающего мощное гравитационное поле. Свет обладает двойственной корпускулярно-волновой природой. В рамках фотонных представлений о природе света упрощенно можно рассуждать так: если испущенные квазаром фотоны летят мимо галактики, то на них действует сила притяжения (фотоны обладают массой!), искривляющая траекторию движения в сторону галактики (это искривление, конечно, чрезвычайно мало). С точки зрения волновой теории света гравитационное поле галактики несколько увеличивает показатель преломления вакуума, создавая оптически неоднородную среду, в которой свет распространяется



криволинейно, отклоняясь в сторону более высоких значений показателя преломления, то есть к галактике.

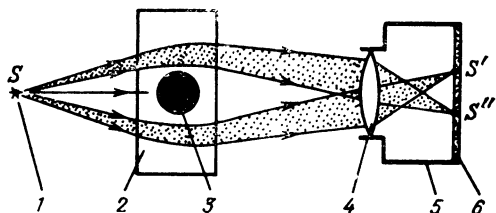
Серьезный читатель, конечно, сознает несерьезность приведенных выше рассуждений. Но он простит автора, которому не терпится рассказать о модели галактики, уместающейся на ладони, и которого вовсе не прельщает задача популяризации теории, сколь бы интересной и важной эта теория ни была. Поэтому я настоятельно рекомендую серьезному читателю познакомиться хотя бы с той литературой, на которую даны ссылки в конце этого параграфа, и поработать самостоятельно над теорией гравитационной линзы — это захватывающе интересно и действительно очень важно. Я же перейду к описанию приборов, моделирующих гравитационную линзу, в надежде на то, что опыты, скорее чем призывы, привлекут внимание читателя и к гравитационным линзам, и к проблемам гравитации вообще.

Итак, мы исходим из того, что гравитационные линзы, в принципе, могут существовать, искривляя идущие сквозь них световые пучки и давая изображения расположенных за ними объектов. Каков бы ни был механизм действия гравитационных линз мы можем моделировать их оптическими «линзами», а именно созданием оптически неоднородных сред с нужным градиентом показателя преломления. Представим себе кусок оргстекла, внутри которого создана область пониженной температуры. Такое оргстекло является оптически неоднородным, причем показатель преломления его возрастает в направлении к области пониженной температуры. Очевидно, как раз это и необходимо для моделирования гравитационной линзы.

Схема экспериментальной установки, которую мы использовали, показана на рис. 72. Точечный источник света 1 является моделью квазара. Свет от него проходит через брусок оргстекла 2, в отверстие которого помещен цилиндрический сосуд 3, охлаждаемый тем или иным способом. Этот сосуд выполняет роль модели галактики. За бруском оргстекла расположена модель глаза (§ 26), состоящая из объектива 4, непрозрачной камеры 5 и матового стекла 6.

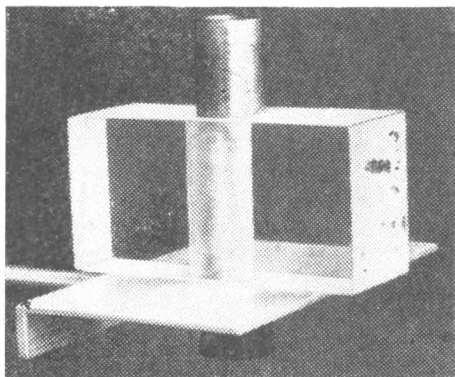
В качестве источника света вы можете использовать лампочку накаливания автомобильного типа,

рассчитанную на напряжение 6,3 В. Брусек оргстекла может иметь примерные размеры  $60 \times 60 \times 120$  мм<sup>3</sup>. Цилиндрический сосуд диаметром 25 мм и длиной около 100 мм удобно изготовить из медной или дюралевой трубки, закрыв нижнее отверстие ее



**Рис. 72.** Оптическая схема опыта, в котором моделируется гравитационная линза.

резиновой пробкой. Важно сделать сосуд так, чтобы в отверстие бруска из оргстекла он входил с небольшим усилием. Внешний вид модели галактики представлен на рис. 73. Модель глаза может иметь про-



**Рис. 73.** Кусок оргстекла, отрезок водопроводной трубы, резиновая пробка и немного жидкого азота или охлаждающей смеси — вот и все необходимое для изготовления модели галактики.

извольные размеры, но при изготовлении ее вы должны обеспечить возможность регулировки положения объектива относительно матового стекла для соответствующей «аккомодации» глаза при постановке опытов.

Опыт мы проводили следующим образом. Включали источник света и на расстоянии 4 м от него располагали брусок оргстекла с цилиндрическим сосудом. На расстоянии порядка 4 м от бруска помещали модель глаза так, чтобы тень от сосуда полностью перекрывала ее объектив. На «сетчатке глаза» при этом ничего не было видно. Далее мы наливали в сосуд жидкий азот и наблюдали, как постепенно на «сетчатке глаза» появлялись два изображения  $S'$  и  $S''$  одного и того же «квара»  $S$  (рис. 72)!

Опыт производит неизгладимое впечатление. Чтобы показать его большой аудитории, мы вместо модели глаза использовали передающую телекамеру замкнутой телевизионной установки. В этом случае оказалось возможным поставить опыт без затемнения: регулировкой яркостью «квара» с помощью автотрансформатора можно добиться контрастной картины явления на экране телевизора при обычном дневном освещении.

Вы можете упрекнуть автора за то, что он осмеливается описывать опыт, в котором для охлаждения применяется жидкий азот. Но жидкий азот действительно очень удобен в обращении и его нетрудно достать. Можно обойтись и без жидкого азота, применяя вместо него твердую углекислоту (если она более доступна) или подходящую охлаждающую смесь. В этом случае целесообразно изменить конструкцию модели галактики, сделав ее такой, как показано на рис. 74 (1 — брусок из оргстекла, 2 — охлаждаемая полость в бруске). Чем длиннее охлаждаемая полость в бруске оргстекла, тем меньший градиент температуры нужно создать для получения заметного эффекта. Кроме того, с увеличением продольного размера полости снижаются общие размеры экспериментальной установки (нетрудно довести их до 1—2 м).

В одном из наших опытов мы использовали брусок оргстекла с полостью, наибольшая ширина которой составляла 20 мм, а длина — 70 мм; радиус кривизны боковых стенок полости был выбран равным 200 мм. При изготовлении полости проще всего сделать вначале в бруске оргстекла соответствующее отверстие, а затем к нижней грани бруска пластилином приклеить пластинку из оргстекла, которая будет выполнять роль дна. В такую полость можно спокойно

наливать жидкий азот или заполнять ее охлаждающей смесью.

Закончим этот параграф описанием опыта, который на начинающих производит даже большее впечатление, чем опыт по моделированию гравитационной линзы.

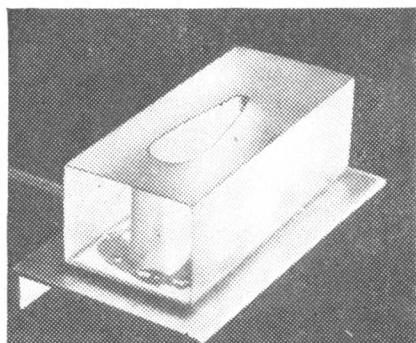
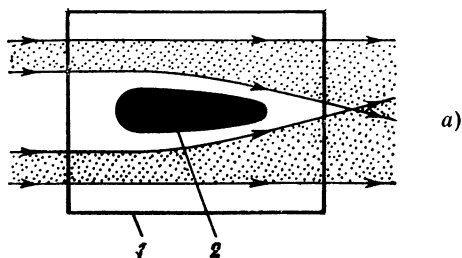
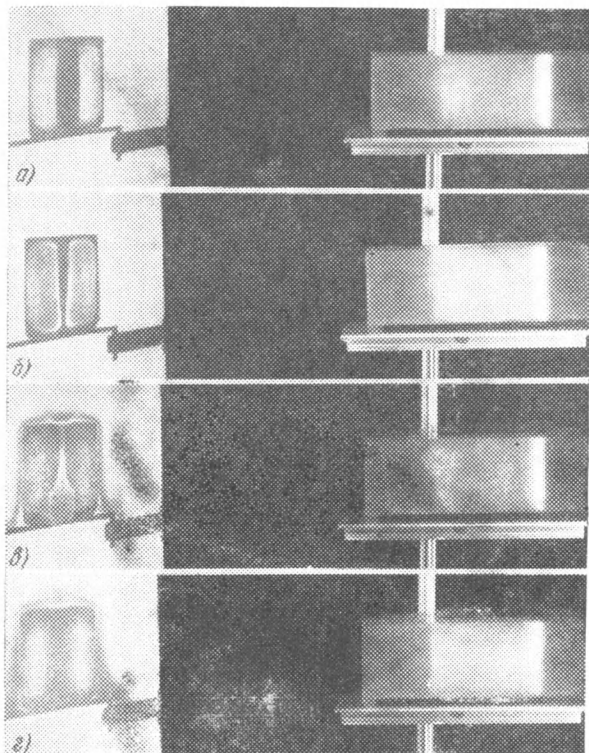


Рис. 74. Схема и внешний вид модели галактики.

За бруском оргстекла с полостью расположите не модель глаза, а белый экран так, чтобы на нем получилась тень от полости (рис. 75, а). Быстро заполните полость охлаждающей смесью, и вы будете наблюдать, что тень на экране начинает сужаться, причем наиболее быстро в нижней части бруска (рис. 75, б). Сужение это происходит до тех пор, пока тень не исчезает совсем так, что экран оказывается освещенным практически равномерно (рис. 75, в)! Предоставляем вам возможность объяснить явление самостоятельно. Напомним только, что вы уже имели дело с такими явлениями, при которых прозрачный объект

давал на экране четкую тень от имеющейся в нем оптической неоднородности (§ 10). В последнем опыте наблюдалось обратное явление исчезновения



**Рис. 75.** Исчезающая тень: а) полость в бруске из оргстекла дает на экране четкую тень; б) охлаждение полости приводит к тому, что тень сужается; в) тень исчезает совсем (обратите внимание на пары жидкого азота над полостью); г) из-за неравномерного охлаждения возможно появление оптических неоднородностей в оргстекле.

тени за счет криволинейного распространения света в оптически неоднородной среде.

*Для самостоятельной проработки*

1. Муханов В. Ф. Двойной квазар QSO 0957 + 561 A, B — гравитационная линза? — Успехи физических наук, 1981, т. 133, вып. 4, с. 729—732.

2. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов. Том 2. — М.: Наука, 1966, с. 436—437.

3. *Королев Ф. А.* Теоретическая оптика. — М.: Высшая школа, 1966, с. 356—359.

На доступном уровне рассмотрено искривление световых лучей в гравитационном поле.

4. Придумайте и поставьте опыт, в котором можно непосредственно наблюдать искривление светового пучка, проходящего вблизи модели галактики.

5. Построив приближенный ход световых лучей на различных расстояниях от центра гравитационной линзы и выполнив аналогичное построение для обычной оптической линзы, сравните между собой действия обеих линз. Выясните, есть ли у гравитационной линзы фокус и способна ли она давать изображение точечного источника в виде точки. Уточните, что следует понимать под «изображением», которое создает гравитационная линза. Оцените сам термин «гравитационная линза» с точки зрения соответствия его реальному явлению.

6. *Блюх П. В., Минаков А. А.* Гравитационные линзы. — Природа, 1982, № 11, с. 59—69

Популярная статья, которая более подробно познакомит вас с гравитационными линзами и поможет получить ответы на поставленные выше вопросы.

7. *Егоров Г. С., Степанов Н. С.* Моделирование «гравитационной линзы» в лекционной демонстрации. — Успехи физических наук, 1982, т. 138, вып. 1, с. 147—149.

В предлагаемой вашему вниманию работе описана модель гравитационной линзы, выполненная из оптически однородного диэлектрика. Полезно сравнить ее с моделью из оптически неоднородного диэлектрика, которая рассмотрена в этом параграфе.

## **§ 28. ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Вы еще не забыли о законах Фика и Фурье (§ 19)? Теперь перед вами формула из совсем другой области физики, которая тем не менее очень похожа на аналитическое выражение упомянутых законов:

$$j = -\lambda \frac{dU}{dy}, \quad (1)$$

где  $j$  — плотность электрического тока в направлении оси  $y$  (плотность потока заряда через поперечное сечение проводника),  $\lambda$  — удельная проводимость,  $dU/dy$  — градиент разности потенциалов в направлении оси  $y$  [1]. Это наводит на мысль, что электрическое поле в проводнике (а значит, и в вакууме, и в диэлектрике) может быть смоделировано... соответствующими распределением температуры или диффузионным распределением вещества!

Сама по себе такая возможность очень интересна. Ее реализация становится особенно заманчивой, если вспомнить, как движется заряженная частица в электрическом поле.

Рассмотрим несложный пример. Пусть в однородное электрическое поле плоского конденсатора со скоростью  $v$  влетает электрон, как показано на

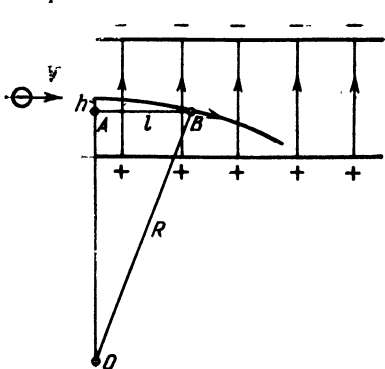


Рис. 76. К вычислению радиуса кривизны траектории движения электрона в однородном электрическом поле.

рис. 76. Электрон под действием поля будет отклоняться к положительному электроду конденсатора, двигаясь, как нетрудно показать, по параболе. Найдем радиус кривизны траектории движения электрона.

За небольшое время  $\tau$  электрон пройдет в горизонтальном направлении путь  $l = v\tau$ . В электрическом поле конденсатора напряженностью  $E$  на электрон, заряд которого  $e$ , действует сила  $f = eE$ . Под действием этой силы электрон, имеющий массу  $m$ , движется с ускорением  $a = f/m = eE/m$ . За то же время  $\tau$  электрон приблизится к положительной обкладке конденсатора на расстоянии  $h = \frac{a\tau^2}{2} = \frac{eE}{2m} \tau^2$ .

Из треугольника  $ABO$  по теореме Пифагора:

$$R^2 = (R - h)^2 + l^2,$$

где  $R$  — искомый радиус кривизны траектории движения электрона. Пренебрегая малой величиной  $h^2$ , из этой формулы получаем

$$R = \frac{l^2}{2h}.$$

Подставляя в последнюю формулу вместо  $l$  и  $h$  их значения, имеем

$$R = \frac{m}{e} \frac{v^2}{E}. \quad (2)$$

Мы нашли значение радиуса кривизны траектории движения электрона в однородном электрическом

поле. Теперь попробуем придать формуле (2) вид, похожий на формулу радиуса кривизны искривленного светового пучка (§ 5):

$$R = \frac{n}{dn/dy}. \quad (3)$$

Прежде всего напомним, что напряженность электрического поля  $E$  в направлении некоторой оси  $y$  есть градиент потенциала  $\varphi$ :

$$E = \frac{d\varphi}{dy}. \quad (4)$$

Кинетическая энергия электрона, движущегося в электрическом поле от точки с нулевым потенциалом до точки с потенциалом  $\varphi$ , изменяется на величину

$$\frac{mv^2}{2} = e\varphi. \quad (5)$$

Из формул (4) и (5) имеем

$$E = \frac{m}{2e} \frac{d}{dy} (v^2) = \frac{m}{e} v \frac{dv}{dy}.$$

Подставляя последнее выражение для напряженности в формулу (2), получаем

$$R = \frac{v}{dv/dy}. \quad (6)$$

Эта формула совпадает с формулой (3), и мы должны сделать вывод, что электрон в электрическом поле движется так же, как свет в оптически неоднородной среде! Формула (6) кроме того показывает, что показателю преломления среды соответствует скорость электрона. Ничего необычного в этом нет: показатель преломления среды определяется скоростью света в ней. Однако все же хотелось бы сопоставить показатель преломления среды не со скоростью электрона, а с какой-нибудь характеристикой электрического поля. Сделать это можно так.

Из формул (2), (4) и (5) следует, что радиус кривизны траектории движения электрона

$$R = \frac{2\varphi}{E} = \frac{2\varphi}{d\varphi/dy}$$

Чтобы в этой формуле избавиться от портящей все дело двойки в числителе, воспользуемся тем, что



$$\frac{d}{dy}(\sqrt{\varphi}) = \frac{1}{2\sqrt{\varphi}} \frac{d\varphi}{dy}. \text{ Тогда получаем}$$

$$R = \frac{\sqrt{\varphi}}{d\sqrt{\varphi}/dy} \quad (7)$$

Сравнивая формулы (7) и (3), делаем вывод, что показателю преломления среды для света соответствует корень квадратный из потенциала электрического поля для электрона.

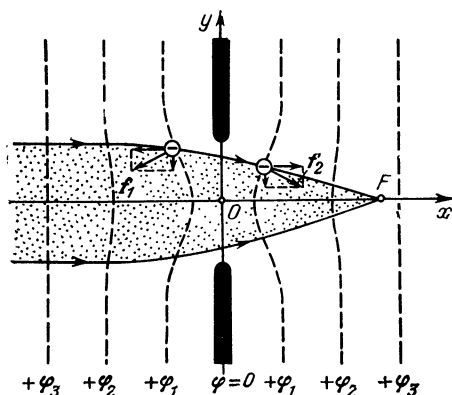
Таким образом, во всех опытах по криволинейному распространению света в оптически неоднородных средах вы, сами не подозревая о том, одновременно наблюдали, как двигался бы электронный пучок в соответствующем электрическом поле!

Значит, используя оргстекло и нагреватели, можно построить оптические модели электронно-оптических систем. Вы сумеете смоделировать, например, отклоняющую и фокусирующую системы электронно-лучевой трубки осциллографа, различные электронные линзы и т. д. В этих оптических моделях, как нетрудно сообразить, нагреватель будет соответствовать отрицательному, а охладитель — положительному электроду электронно-оптической системы (от нагревателя «отталкивается» свет, от отрицательного электрода отталкиваются электроны).

Кратко рассмотрим простейшую электронную линзу — диафрагму с круглым отверстием [2]. С обеих сторон к такой линзе примыкают однородные электрические поля так, что система эквипотенциальных линий имеет вид, показанный на рис. 77. Пусть потенциал диафрагмы меньше, чем потенциалы удаленных от нее точек однородных электрических полей.

Такая диафрагма фокусирует поток электронов. Действительно, на движущиеся параллельно оси диафрагмы электроны действуют силы (две из них  $f_1$  и  $f_2$  показаны на рисунке), которые имеют составляющие, направленные к оси. Иными словами, отрицательно заряженные электроны отталкиваются от отрицательно заряженной диафрагмы. Это приводит к тому, что после прохождения через отверстие диафрагмы параллельный пучок электронов собирается в одной точке  $F$ . Следовательно, диафрагма работает как собирающая электронная линза с фокусом в точке  $F$ .

Теперь представьте себе, что изображенная на рис. 77 диафрагма находится не в вакууме, а в оргстекле, и она не заряжена, а нагрета до определенной температуры. Нагретая диафрагма вызовет нагревание расположенного вокруг нее оргстекла. Спустя определенное время установится стационарный



**Рис. 77.** Простейшая из электронных линз: штриховыми линиями обозначены эквипотенциальные линии.

режим процесса, то есть каждая точка оргстекла будет иметь свою неизменную во времени температуру. Можно сказать, что нагретая диафрагма создает в оргстекле поле температуры.

Линии равных температур («эквитемпературные» линии) будут в точности такими же, как эквипотенциальные линии. Значит, такими же будут и линии равных показателей преломления оргстекла. Поэтому нагретая диафрагма будет действовать на распространяющийся в оргстекле световой пучок точно так же, как отрицательно заряженная диафрагма действует на пучок электронов в вакууме.

На рис. 78 показан прибор, моделирующий действие системы из двух электронных линз-диафрагм. Его вы сможете сделать из полоски оргстекла сечением  $10 \times 30$  мм<sup>2</sup> и длиной 300 мм. В качестве нагревателей можно использовать две пары одинаковых резисторов типа МЛТ-2 мощностью 2 Вт и сопротивлением 10—16 кОм. Подавая на резисторы различные напряжения, вы будете нагревать их до разной

температуры и сможете пронаблюдать за соответствующими изменениями светового пучка.

Надеюсь, что суть метода вы уловили и при необходимости построите те модели электронно-оптических систем, которые представят для вас интерес.

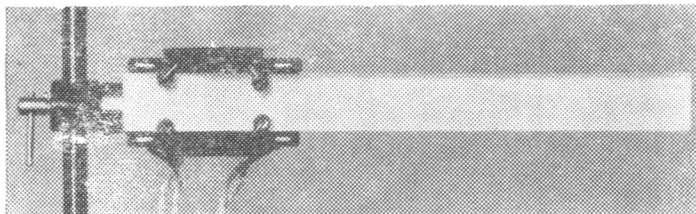


Рис. 78. Прибор, моделирующий систему двух электронных линз.

#### *Для самостоятельной проработки*

1. Калашиников С. Г. Электричество. — М.: Наука, 1977, с. 118—119 и 121—122.

Рассмотрены закон Ома в дифференциальной форме и метод моделирования электростатических полей стационарными электрическими полями.

2. Кельман В. М. Электронная оптика. — М.: Наука, 1968, с. 31—79.

По этой научно-популярной книге вы сможете получить первоначальные сведения об электронно-оптических системах.

3. Арцимович Л. А., Лукьянов С. Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. — М.: Наука, 1978, с. 7—54.

Рассмотрены простейшие электронно-оптические приборы. Настоятельно рекомендую почитать эту прекрасно написанную и оформленную книгу.

4. Кельман В. М., Явор С. Я. Электронная оптика. — М.: Л.: Изд-во АН СССР, 1963, с. 52—57.

Это серьезная книга, которая будет вам полезна, если вы решите основательно вникнуть в проблемы электронной оптики. Хотелось бы обратить ваше внимание на следующее.

Мы занимались только оптическими экспериментами, но все же были вынуждены коснуться и молекулярной физики, и электростатики, и теории гравитации. Это совсем не случайно потому, что физика едина. Мы нередко забываем об этом, поскольку фактически изучаем не физику, а разделы курса физики. Поэтому, познакомясь с новым для себя физическим явлением, отыскивайте для него место в той совокупности явлений, которой вы уже владеете, так чтобы постепенно формировалась единая картина физического восприятия природы. Вот и в рекомендованной книге, в частности, рассматривается метод моделирования электростатического поля гравитационным, для которого нужно найти подобающее место в своей системе знаний.

## § 29. НЕСКОЛЬКО СЛОВ О ТЕРМОРЕГУЛЯТОРАХ

Одним из основных недостатков всех экспериментальных установок, с которыми мы имели дело, является примитивный метод регулирования температуры. Этот недостаток может быть устранен, если использовать простейшие терморегуляторы.

На рис. 79 приведена принципиальная схема терморегулятора, выполненного на тринисторе  $V3$ , с питанием от понижающего трансформатора, дающего

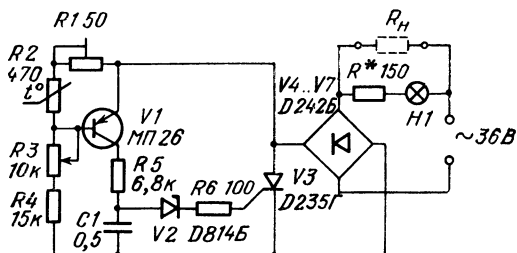


Рис. 79. Принципиальная схема терморегулятора.

напряжение 36 В. Датчиком прибора является терморезистор  $R2$  типа КМТ-12, имеющий при комнатной температуре сопротивление около 470 Ом. Напомним, что при увеличении температуры сопротивление терморезистора уменьшается. Подробное рассмотрение принципа действия схемы увело бы нас слишком далеко, поэтому сославшись на приведенный в конце параграфа список литературы, я расскажу лишь о налаживании готового терморегулятора.

В самом деле, схема прибора очень проста, и вы вполне можете изготовить терморегулятор без дополнительных комментариев с моей стороны. Может быть, следует только сказать, что при использовании мощных нагревателей тринистор  $V3$  и диоды  $V4...V7$  необходимо снабдить соответствующими радиаторами (впрочем, мощность большинства нагревателей в описанных выше опытах невелика и поэтому радиаторы не нужны). Кроме того, отметим, что в качестве сигнальной лампочки  $H1$  вы можете применить коммутаторную лампу, рассчитанную на напряжение 24 В и ток 90 мА, или любую другую маломощную лампу с напряжением питания от 6,5 до 36 В

(в последнем случае необходимо рассчитать или подобрать резистор  $R^*$ ).

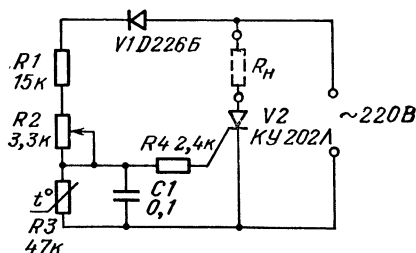
Итак, вы собрали терморегулятор. Подключите к нему в качестве нагрузки  $R_n$  любой из нагревателей, рассчитанных на напряжение 36 В (например, изготовленный из нескольких резисторов, как описано в § 23). Положите на нагреватель терморезистор  $R_2$ . Поставьте движок переменного резистора  $R_3$  в одно из крайних положений и включите прибор. При этом сигнальная лампочка  $H_1$  должна загореться и температура нагревателя  $R_n$  начнет повышаться. Спустя небольшое время лампочка должна погаснуть, а нагреватель обесточиться. Если этого не происходит, поверните движок переменного резистора  $R_3$  в другое крайнее положение и вновь включите терморегулятор. Скорее всего, чтобы добиться нужного эффекта, вам придется тщательно подобрать сопротивление подстроечного резистора  $R_1$ . Все это не так сложно, и я уверен, что начав работу, вы быстро почувствуете, что именно требуется, и сумеете получить нужный результат. Он должен быть таким: если движок резистора  $R_3$  находится в правильно найденном крайнем положении, то при включении терморегулятора сигнальная лампочка должна загореться, потом быстро погаснуть, затем вновь загореться и вновь погаснуть и т. д. Каждое загорание лампочки свидетельствует о поступлении энергии в нагреватель, погасание — об охлаждении нагревателя. Чем чаще вспыхивает и гаснет лампочка, тем менее инерционен нагреватель и тем точнее поддерживает терморегулятор постоянство его температуры.

Вы, должно быть, уже догадались, что величина сопротивления переменного резистора  $R_3$  определяет ту температуру нагревателя (и следовательно, прикасающегося с ним терморезистора), которая поддерживается неизменной терморегулятором. Найденное вами крайнее положение движка этого резистора соответствует минимальной температуре. Чтобы с терморегулятором было удобно работать, его необходимо отградуировать.

Для этого на движок резистора  $R_3$  наденьте ручку с указателем. Нагреватель поместите в сосуд с маслом (лучше, трансформаторным), над нагревателем расположите терморезистор и ртутный термометр; последний нужно закрепить в таком положении, что-

бы его баллончик с ртутью касался терморезистора. Включите терморегулятор, за ручку поверните движок резистора  $R3$  в произвольное положение и подождите, пока терморегулятор не станет поддерживать температуру масла постоянной. Это значение температуры, определенное по термометру, нужно записать рядом с меткой, поставленной против указателя ручки резистора. Так, последовательно поворачивая на равные углы движок резистора  $R3$ , вы можете отградуировать терморегулятор. Лучше, впрочем, подбирать необходимые положения движка резистора под целые числа градусов, которые показывает термометр (например, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 °C).

Изготовленный и отградуированный терморегулятор позволяет не только поддерживать постоянной температуру нагревателя, но и показывает значение этой температуры. Ясно, что успешное использование терморегулятора возможно лишь при правильном подборе взаимного расположения нагревателя, терморезистора и образца оргстекла. Можно закрепить терморезистор в удобном месте непосредственно на нагревателе и, если при постановке различных опытов вы не будете менять это крепление, то можете быть уверены в однозначности условий терморегулирования.



**Рис. 80.** Принципиальная схема терморегулятора для модели миража.

На рис. 80 приведена принципиальная схема еще одного терморегулятора. Он предназначен для работы с мощным нагревателем  $R_n$ , рассчитанным на напряжение 220 В, поэтому транзистор  $V2$  должен быть установлен на радиаторе. В приборе применен терморезистор  $R3$  типа М47КВ. Эту схему вы можете переработать под напряжение 36 В. Мы, однако, использовали ее в том виде, в каком она приведена на

рис. 80, для моделирования миража в неравномерно нагретом оргстекле.

Описанная выше (§ 25) модель миража из оргстекла обладает тем недостатком, что ее нагреватель слишком инерционен и не позволяет быстро пронаблюдать появление и исчезновение миража. Чтобы устранить указанный недостаток, мы в качестве нагревателя использовали укороченную спираль электроплитки. Над ней на высоте 15 мм был расположен брусок из оргстекла, и вплотную к нижней грани бруска закреплялся терморезистор  $R_3$ . При включении терморегулятора спираль очень быстро разогревалась до красного свечения и вслед за ней почти столь же быстро нагревалась нижняя грань бруска так, что появлялся мираж. Перегрев этой грани предотвращал терморезистор  $R_3$ , поскольку терморегулятор был настроен на поддержание его температуры порядка  $90^\circ\text{C}$ . После выключения прибора охлаждение нижней грани бруска из оргстекла происходило тоже быстро, так как непосредственно с нагревателем она не соприкасалась.

*Для самостоятельной проработки*

1. Алексеев Н. Г., Прохоров В. А., Чмутов К. В. Применение электронных приборов и схем в физико-химическом исследовании. — М.: Госхимиздат, 1961, с. 447—494.

2. Красунцев Е. Транзисторный электротермометр. — Радио, 1965, № 4, с. 47—48.

3. Терских А. Градусники без ртути. — Моделист-конструктор, 1974, № 8, с. 36—37.

4. Стоянов А. Терморегулятор на тиристоре. — Радио, 1975, № 3, с. 36.

5. Гуревич В. Будем знакомы, тиристор! — Моделист-конструктор, 1978, № 1, с. 35—36.

6. Сазыкин В. Комбинированный регулятор температуры. — Радио, 1978, № 10, с. 28—30.

7. Крылов В. Что такое тринистор. — Радио, 1978, № 12, с. 52—54.

## **§ 30. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПРОРАБОТКИ**

1. Оптически неоднородная среда, в которой равные значения показателя преломления образуют слои, получила название слоисто-неоднородной. Если показатель преломления слоисто-неоднородной среды зависит только от одной координаты декартовой системы,

то среду называют плоскослоистой: в ней поверхности равных значений показателя преломления образуют параллельные между собой плоскости. Именно с такими средами вам чаще всего и приходилось экспериментировать. Докажите, что при распространении света в плоскослоистой среде во всех точках траектории луча произведение показателя преломления на синус угла между касательной к траектории и указанной выше координатной осью остается неизменным

2. Попробуйте найти общее уравнение траектории светового луча в плоскослоистой среде. Исследуйте полученное уравнение. Вычислите радиус кривизны траектории в произвольной точке. При выполнении этого и предшествующего заданий вам может оказаться полезной книга: *Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П.* Теория волн. — М.: Наука, 1979, с. 225—233.

3. Считая, что показатель преломления плоскослоистой среды является линейной функцией координаты, найдите уравнение траектории светового луча в такой среде.

4. Докажите, что при обеспечении определенного теплового режима из плоскопараллельного образца оргстекла можно получить плоскослоистую среду с линейной зависимостью показателя преломления от координаты. Оцените возможность создания соответствующей экспериментальной установки.

5. Подберите тонкую цепочку длиной около метра (удобно использовать цепочку дешевого женского украшения, наибольший размер отдельного звена которой не превышает 2 мм). Концы цепочки возьмите в руки и разведите их так, чтобы расстояние между концами оказалось меньше длины цепочки. При этом цепочка провиснет. Докажите, что линия, по которой провисает цепочка, описывается тем же уравнением, что и траектория светового луча в плоскослоистой среде с линейной зависимостью показателя преломления от координаты.

6. Пользуясь результатом предыдущего задания, смоделируйте пучок лучей, выходящих из одной точки, расположенной в плоскослоистой среде с линейной зависимостью показателя преломления от координаты.

7. Совместите концы цепочки в одной точке: цепочка провиснет по вертикальной прямой. Выясните, в каком случае луч света будет распространяться в пло-



скосистой среде аналогичным образом, то есть выйдя из источника, углубится в среду по прямой, затем развернется и возвратится обратно к источнику.

8. Известно, что показатель преломления ионизованного газа сильно зависит от частоты электромагнитной волны и при некотором значении частоты может обратиться в нуль. В земной атмосфере плотность воздуха с ростом высоты уменьшается, и это приводит к непрерывному уменьшению показателя преломления. Если бы атмосфера просто переходила в вакуум, то показатель преломления уменьшался бы до единицы. На самом деле в верхних слоях атмосфера ионизована, причем концентрация свободных электронов в ней с увеличением высоты растет, достигает максимума и затем уменьшается. Поэтому для электромагнитной волны определенной частоты земная атмосфера представляет собой слоисто-неоднородную среду, показатель преломления которой непрерывно уменьшается от значения, несколько большего единицы, до нуля. Используя цепочки разных длин, смоделируйте траектории распространения электромагнитных волн в атмосфере, выходящих из одной точки на поверхности Земли.

9. Пусть на плоскую границу раздела двух оптически однородных сред с разными значениями показателей преломления из оптически более плотной среды (будем называть ее первой) падает луч света. Тот угол падения света, при котором угол преломления равен  $90^\circ$ , называется предельным. Если угол падения меньше предельного, то свет частично отражается от границы раздела и частично преломляется во вторую среду. Если угол падения превышает предельный, то на границе раздела сред свет испытывает полное внутреннее отражение и не проникает во вторую среду. Представьте теперь, что оптически однородные среды разделены плоскопараллельным слоем оптически неоднородной среды, причем показатель преломления этого слоя непрерывно и монотонно изменяется в направлении, перпендикулярном его границам, от значения в первой среде до значения во второй. Выясните, при каких углах падения из первой среды на этот слой свет не сможет проникнуть во вторую среду.

10. Для демонстрации полного внутреннего отражения света в школе часто используют полуцилиндр из стекла или оргстекла. Узкий пучок света направляют на цилиндрическую поверхность по ее радиусу с

тем, чтобы точка падения света на плоскую грань совпала с центром полуцилиндра. В опыте свет преломляется только на плоской грани полуцилиндра, переходя при этом из оргстекла в воздух. Ясно, что если в этом эксперименте плоскую грань нагревать, то вблизи нее оргстекло будет представлять собой плоско-слоистую среду. Разработайте и изготовьте прибор, позволяющий продемонстрировать полное внутреннее отражение света от плоской границы раздела оптически однородных сред и от плоскослоистой оптически неоднородной среды. Пользуясь изготовленным прибором, подтвердите результат выполнения предыдущего задания экспериментально.

11. Оптимальные условия наблюдения миража в модели из неравномерно нагретого оргстекла (§ 25) вам приходилось подбирать экспериментально. Однако их нетрудно и рассчитать. Представьте, что брусок из оргстекла, имеющий комнатную температуру, нижней гранью поместили на плоский нагреватель, температура которого превышает комнатную. Пусть на переднем торце бруска нарисован предмет, высота которого, измеренная от нижней грани, известна. Выясните, какова должна быть длина бруска, чтобы при наблюдении через второй торец в направлении середины его нижней грани был виден мираж всего предмета полностью.

12. Докажите, что при использовании одинаковых по размерам предметов и одинаковых перепадов температур модель миража в воздухе должна иметь на порядок большую длину, чем модель миража в оргстекле.

13. В природе иногда наблюдается сложный мираж предмета, находящегося вблизи горизонта или за ним: видны два прямых изображения предмета, а между ними — одно перевернутое. На качественном уровне выясните, в каких условиях может наблюдаться такой мираж. Разработайте и поставьте опыт с неравномерно нагретым оргстеклом, в котором моделируется описанный сложный мираж.

14. Выше уже отмечалось, что одним из основных недостатков простых нагревателей является их значительная инерционность (§ 29). Электрические нагреватели должны позволять при их включении быстро разогревать оргстекло до требуемой температуры и при выключении не должны препятствовать естественному охлаждению оргстекла. Эти требования обуслов-

лены тем, что явления криволинейного распространения света лучше всего наблюдать в динамике, следя за их появлением, развитием и исчезновением. Практика показывает, что любой из доступных нагревателей, который касается поверхности оргстекла, не может удовлетворять изложенным требованиям. Однако, если теплопередача к образцу оргстекла будет обеспечена в основном за счет излучения, то приемлемый для опытов малоинерционный нагреватель может быть изготовлен без особого труда. Для этого на плоскую слюдяную подложку толщиной около 1 мм нужно намотать с шагом 5—10 мм нихромовый провод диаметром примерно 0,3 мм и разогреть этот провод электрическим током до темно-красного свечения. Если такой нагреватель расположить в вертикальной плоскости параллельно поверхности оргстекла на расстоянии 10—15 мм от нее, то время разогрева не превысит 1 мин. Пользуясь изложенной идеей, разработайте конкретную конструкцию нагревателя. Изготовьте прибор так, чтобы он удовлетворял требованиям техники безопасности.

15. Подробно описанные выше модели миража (§§ 24, 25) предназначены для визуальных наблюдений. Это не всегда удобно, поскольку далеко не все ваши товарищи умеют наблюдать должным образом. Поэтому для школьного физического кабинета имеет смысл изготовить такую модель, которая позволяла бы получать мираж предмета на экране так, чтобы его одновременно могли видеть многие наблюдатели. В этой модели в качестве оптически неоднородной среды целесообразно использовать брусок неравномерно нагретого оргстекла, а в качестве предмета — лампочку карманного фонаря. Лампочку нужно расположить около прозрачного торца бруска вблизи его матовой грани. Далее объективом сквозь второй прозрачный торец бруска следует получить на экране изображение его матовой грани и одновременно лампочки. Если теперь включить электрический нагреватель, расположенный параллельно этой грани, то на экране можно будет наблюдать появление миража: постепенно рядом с прямым возникнет перевернутое изображение лампочки. Для успеха опыта важно правильно подобрать длину бруска оргстекла, фокусное расстояние объектива, диаметр его диафрагмы и положение лампочки. Попробуйте сделать все это самостоятельно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многочисленную армию читателей можно условно разбить на две категории: к первой мы относим тех, кто начинает книгу с начала, ко второй — тех, кто предпочитает знакомиться с ней с конца. Поэтому автор немного sluкавил, разделив предисловие на две части и вторую поместив здесь.

Распределение содержания книги по параграфам достаточно произвольно и отражает личные вкусы автора. Существенно, однако, то, что такое распределение позволяет поставить перед вами задачу по систематизации экспериментальных результатов. Выполнив опыты, попробуйте привести их в систему, выявив по возможности все связи между ними. Почти наверняка в вашей системе окажутся и такие эксперименты, которым не нашлось места в этой книге; поставьте их, если они доступны. Это — последнее для первой и первое задание для второй категории читателей.

В книге имеется немало и других заданий для самостоятельной проработки. Некоторые из них предельно просты. Другие потребуют определенных усилий для их выполнения. Третьи могут оказаться вообще не под силу некоторым из вас. Все это нужно для того, чтобы у читателя сложилось верное представление о том, что уже сделано, и что еще предстоит впереди. В юности важно выработать правильную самооценку, а для этого нужно иметь перед глазами масштаб, позволяющий самому оценить себя. Грубый масштаб, который образуют задания этой книги, все же лучше, чем полное его отсутствие.

Наконец, пожелание, в равной степени пригодное для той и другой категории читателей: от всей души автор желает вам успехов в работе и той же радости, какую она доставляла ему самому!

*Валерий Вильгельмович Майер*

ПРОСТЫЕ ОПЫТЫ ПО КРИВОЛИНЕЙНОМУ  
РАСПРОСТРАНЕНИЮ СВЕТА

(Серия: «Библиотечка физико-математической школы»)

Редактор *Д. А. Миртова*

Техн. редактор *Е. В. Морозова*

Корректоры *Л. И. Назарова, И. Я. Кришталь*

ИБ № 12387

Сдано в набор 15.07.83. Подписано к печати 29.02.84.  
Т-07269. Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага книжно-журнальная.  
Литературная гарнитура. Высокая печать. Условн. печ.  
л. 6,72. Условн. кр.-отт. 7,14. Уч.-изд. л. 6,48. Тираж  
54 000 экз. Заказ № 835. Цена 25 коп.

Издательство «Наука»

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

Ленинградская типография № 2 головное предприятие  
ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского  
объединения «Техническая книга» им. Евгении Соко-  
ловой Союзполиграфпрома при Государственном ко-  
митете СССР по делам издательств, полиграфии и  
книжной торговли. 193052, г. Ленинград, Л-52, Измай-  
ловский проспект, 29.

25 коп.

