

**С. ТОЛАНСКИЙ**

**РЕВОЛЮЦИЯ В ОПТИКЕ**

С. ТОЛАНСКИЙ • РЕВОЛЮЦИЯ В ОПТИКЕ





---

S. TOLANSKY

---

REVOLUTION IN OPTICS

---

PENGUIN BOOKS

1968

---

**С. ТОЛАНСКИЙ**

---

**РЕВОЛЮЦИЯ В ОПТИКЕ**

---

Перевод с английского

**И. С. ЩЕРБИНОЙ-САМОЙЛОВОЙ**

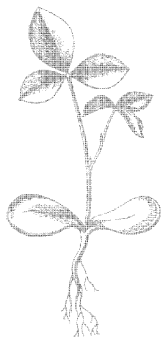
Под редакцией и с предисловием

**В. А. УГАРОВА**

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

МОСКВА

1971



Новая книга проф. Лондонского университета С. Толанского знакомит читателя с теми необычными изменениями, которые претерпела в XX в. «королева наук» — оптика. Эти изменения сыграли решающую роль в создании двух революционных физических теорий — квантовой механики и теории относительности, а кроме того, послужили фундаментом для бурного развития оптической техники — орудия тончайшего физического эксперимента. Первая часть книги посвящена развитию представлений о природе света: волновой и корпускулярной, и теории расширяющейся Вселенной. Вторая часть знакомит читателя с достижениями оптической техники: новая микроскопия и новые оптические материалы, интерферометрия и люминесценция, волоконная оптика и новые системы телескопов. Третья часть — это лазеры и их применения.

Книгу с большим интересом прочтут школьники старших классов и студенты. Она будет полезна и преподавателям школ и вузов, испытывающих большие трудности в поисках материала для обновления традиционных курсов оптики.

*Редакция космических исследований,  
астрономии и геофизики*

## ОТ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Перед нами новая книга профессора Лондонского университета С. Толанского. Первые две — «Оптические иллюзии» и «Удивительные свойства света» — познакомили читателя с миром поразительных иллюзий, свойственных нашему зрению, и необычайными свойствами света, позволяющими человеку проникнуть в глубины космоса и микромира. Новая книга Толанского называется «Революция в оптике» и тоже посвящена миру света и науке о нем. Она является как бы продолжением «Удивительных свойств света». Но если в этой последней автор стремился как бы провести читателя по музею оптических диковинок, то в новой книге упор сделан на приложения достижений оптики.

Автор наглядно демонстрирует читателю, как достижения одной из старейших наук, истоки которой теряются в седой древности, самым решительным образом влияют и на успехи современной науки и на технический прогресс. Современная техника с ее скоростями, микроминиатюризацией и сложностью предъявляет все более жесткие требования к точности измерения и контроля. Обеспечить такую точность, которая еще 20—30 лет назад считалась либо излишней, либо недостижимой, позволяют оптические методы. Поразительна как точность получаемых при этом результатов, так и удивительная простота используемых средств. Недаром автор подчеркивает, что с помощью всего двух зеркал, расположенных определенным образом, можно измерить диаметр звезды, находящейся от нас на расстоянии в триллионы километров, а расположив те же два зеркала по-иному, можно измерить поперечник атома!

В первой части книги автор знакомит читателя с дилеммой корпускулярной и волновой теорий света. Рассказав просто, без формул, доступным для любителя науки языком о двух конкурирующих теориях света, он тут же описывает практическое использование волновых и корпускулярных свойств света.

Вторая часть посвящена успехам оптического приборостроения, опирающимся на достижения оптической науки. Читатель узнает о новых микроскопах и новых приложениях люминесценции, о мире оптических материалов — начиная с давно известного стекла и кончая новейшими прозрачными полимерами,

о поразительных по простоте конструкции разнообразных интерференционных приборах и точности получаемых при их помощи результатов, о хитроумных применениях эффектов дифракции и интерференции — от просветления линз до уничтожения «растра» при репродукции опубликованных в печати фотоснимков.

В третьей части кратко рассказано о возможностях использования лазеров и голографии. Она наиболее фрагментарна и, пожалуй, наименее удачна. Эта область развивается настолько быстро, что примечания здесь не помогут, и читателю, интересующемуся новейшими достижениями когерентной оптики, лучше обратиться к более специальной литературе.

Влюбленный в свою науку автор не устает еще и еще раз подчеркнуть, что оптика — одна из самых важных отраслей знания и, уж во всяком случае, одна из самых интересных. Не будем обвинять автора в преувеличении: приводимый им перечень ученых — Пифагор, Аристотель, Птолемей, Ньютон, Максвелл, Планк, Бор, Эйнштейн, каждый из которых своими работами внес существенный вклад не только в оптику, но и в развитие новых физических концепций, — говорит сам за себя.

Не стоит упускать из виду и еще одну сторону проблемы. Успехи атомной физики, исследований космоса и кибернетики породили у широкой публики представление, что этими направлениями и исчерпывается «вся» наука, а остальное не представляет особого интереса и не имеет серьезного значения. И тем больше заслуга автора, который в общедоступной форме убедительно доказывает, что многие из самых крупных достижений науки и техники сегодняшнего (а вероятно, и завтрашнего) дня опираются на классическую физику, в которой оптике бесспорно принадлежит ведущая роль.

Конечно, надо ясно представлять себе характер предлагаемой книги. Это скорее всего описание того, что достигнуто в оптике за последнее время. Описание выборочное, отражающее вкусы автора, но заведомо интересное и удачное. Об этом хорошо сказано автором во введении и заключении. Но, конечно, читатель хочет получить объяснение описываемых явлений. Автор — специалист по оптике, в его пояснениях нет грубой вульгаризации и прямых ошибок. Но «для глубокого изучения оптики нет простого пути» (стр. 210), а упрощенные объяснения оставляют чувство неудовлетворенности. Эта неудовлетворенность должна вызвать у молодых читателей желание постигнуть красивейший мир оптических явлений, желание заниматься всерьез физикой. В добрый час! Вот за что можно сказать спасибо этой книге. Остается пожалеть, что подобные книги не выходят из-под пера наших авторов.

*В. А. Угаров*

И сказал Бог: «Да будет свет».

*Книга Бытия*

## ВВЕДЕНИЕ

В немногих отраслях физики — как теоретической, так и экспериментальной — за последнее время произошло больше революционных событий, чем в оптике. На протяжении всей истории научной мысли оптика по праву занимала передовые позиции по числу фундаментальных открытий — будь то в прикладных вопросах или в разработке общих оптических теорий. Недаром именно зрение дает нам наибольшую информацию об окружающем нас мире.

Оптика — отнюдь не узкая дисциплина. Она оказала глубокое влияние на многочисленные отрасли знания. С самых истоков наука ставила вопросы о строении космоса и месте человека во Вселенной. Успехи оптики постепенно продвигали вперед решение космологических проблем, пока, наконец, астрономические открытия, сделанные при помощи совершенных оптических инструментов, не привели нас к одной из самых замечательных идей, относящихся к величайшим достижениям человеческой мысли, — концепции расширяющейся Вселенной.

Изобретение телескопа открыло перед человеком бездны Вселенной, полные чудес, и ныне мы пожинаем богатые плоды этого интеллектуального урожая.

С изобретением микроскопа оптика вторглась также в биологию. Фотографам-любителям (а большинство из нас относится именно к этой категории), которые считают, что фотоаппарат — предмет, которому не стоит удивляться, не мешает напомнить, что фотография как одна из отраслей оптики во многом помогла и продолжает помогать чуть ли не всем отраслям науки.

Пожалуй, уместно подчеркнуть, что одним из самых важных элементов научной аппаратуры, которой пользуется человек во всех естественных науках, является линза. Без линзы не было бы микроскопа, а без этого прибора беспомощны и медицина, и металлургия, и кристаллография, а также вся физика и биология. Без линзы не было бы ни фотографического аппарата, ни спектроскопа, ни кино, ни телевидения. Не было бы и телескопа, а без него наши знания о Вселенной едва ли вышли бы за пределы знаний первобытного пастуха. И последнее по счету, но не по значению, — без линзы не было бы очков, и, подобно пребывавшим в отчаянии старым монахам в средневековых монастырях, многие из нас, перевалив за пятьдесят лет, были бы вынуждены отказаться от радостей чтения.

Оптика состоит на службе у сотен различных дисциплин. Вместе с тем она и сама по себе — предмет, весьма интересный для изучения, часто достигающий многого необычайно скромными средствами. Например, можно, расположив два зеркала определенным образом, измерить диаметр звезды, находящейся от нас на расстоянии миллиардов километров, а затем при помощи тех же самых двух зеркал, расположенных по-другому, измерить диаметр ядра атома, столь малый, что для заполнения отрезка длиной 1 см потребовалось бы выстроить сплошной цепочкой ряд из 40 000 000 000 000 атомов.

Более того, почти всеми своими величайшими идеями современная физика обязана открытиям, сделанным оптическими методами. Теории гравитации и расширяющейся Вселенной, квантовая теория, теория строения атома, принцип неопределенности — все это появилось как «продукты» оптических исследований.

В наши дни оптика переживает серьезную революцию, начало которой совпало с началом нашего столетия. Бросив даже беглый взгляд на историю развития научной мысли, можно увидеть, что оптика не один раз оказывалась на переднем крае происходивших в науке переворотов и привлекала к себе самые светлые умы в истории физики: Пифагора, Аристотеля, Птолемея, Ньютона, Максвелла, Планка, Бора, Эйнштейна и других.

Эта книга написана в надежде, что она сможет возбудить в читателе хотя бы частично те волнение и интерес, которые оптика возбуждает у автора. И она адресована скорее любознательному неспециалисту, чем профессионалу. Автор попытался охватить новейшие достижения в оптике, не пользуясь математическими формулами. В той мере, в какой это было можно, он не пользовался специальными терминами, а тем, которые были использованы, дано объяснение.

Содержание книги, естественно, ограничено и отражает личные склонности автора. И все же охват вопросов достаточно широк, чтобы показать, что физика наших дней представляет собой нечто гораздо большее, чем атомная энергия, лунные зонды и вычислительные машины, как стараются нас уверить газеты и телевидение. Область применения оптики настолько обширна, что читатель, возможно, согласится с автором, что оптика не только находится на службе у других наук, но, как это ни парадоксально, одновременно является и их королевой.

## ЧАСТЬ I

---

### ДИЛЕММА ТЕОРИИ СВЕТА

#### ГЛАВА I

#### ПОЯВЛЕНИЕ ВОЛНОВОЙ ТЕОРИИ

##### До волновой теории

Основоположниками современных наук были древние греки, и можно предполагать, что они серьезно интересовались оптикой. Именно их геометры впервые приступили к исследованию оптических явлений, в том числе атмосферной оптики. Не удивительно, что они скоро обнаружили видимую прямолинейность распространения света: подсказкой здесь послужили отбрасываемые предметами тени. Затем учение о свете было включено в систему линейной геометрии; с характерным для древних греков искусством они сумели применить геометрические методы к исследованию образования изображения как от плоского, так и от кривого зеркала — исследованию, которое они называли *катоптрикой*. Эта методика прослеживания луча для нахождения изображения, впервые серьезно изученная во времена Пифагора, широко используется при оптических расчетах и в наши дни.

Примерно с V в. до н. э. греческие философы начали в своих теориях касаться истинного способа распространения света. Пифагор с потрясающей прозорливостью считал, что объекты становятся видимыми благодаря выстреливаемым ими крохотным частицам, которые попадают в глаз человека. (Позднее мы увидим, что эта идея была воскрешена Ньютоном в XVII в. и еще раз — Эйнштейном в XX в.) В 444 г. до н. э. грек Эмпедокл для объяснения механизма видения выдвинул курьезную теорию, которая привела к спору, длившемуся столетия. Согласно его достаточно странной точке зрения, видение включает в себя использование какого-то неуловимого щупальца, которое простирается от глаза и затем захватывает видимый предмет, давая

нам знать, что оно захватило предмет. Эта идея о каком-то «излучении» из глаза, которая стала известной под названием теории «окулярных пучков», получила широкое признание в древности, но встретила сильнейшее сопротивление в 350 г. до н. э. со стороны Аристотеля.

Взгляды Аристотеля на оптику едва ли отличаются по существу от представлений XIX в. Отвергая идею о щупальцеобразных окулярных пучках, Аристотель полагал, что свет по существу является проявлением некоей разреженной среды, называемой «пеллуцид», которая заполняет все пространство. По его мнению, через среду передается определенного рода излучение от объекта к глазу. Мысль эта, безусловно, очень близка к высказанной в XIX в. идее распространения света как некоторого излучения через разреженный эфир.

Ко II в. до н. э. теория построения изображения кривыми зеркалами достаточно продвинулась вперед, оправдывая предание, по которому Архимед поджег римский флот около Сиракуз, сконцентрировав солнечный свет «зажигательными» вогнутыми зеркалами. Достоверен этот факт или нет, но он по крайней мере указывает на то, что теория «зажигательного зеркала» была известна. Древние греки положили также начало отрасли оптики, позднее названной *диоптрикой*, которая имеет дело с изменением направления, испытываемым световыми лучами, когда они падают на воду или на стеклянную поверхность. Это изменение направления света, или, как мы теперь говорим, преломление, подробно изучалось со времен Клеомеда (50 г. н. э.).

В 130 г. н. э. великий Птолемей из Александрии описал первые действительно точные диоптрические исследования. Его интересы были сосредоточены в астрономии, и именно поэтому его внимание привлекли небольшие влияния преломления в атмосфере на астрономические измерения. Он провел несколько превосходных измерений преломления в воде, но не смог обнаружить закономерность, связывающую способность к преломлению с величиной угла, на который отклонялся свет.

Практически на протяжении тысячи лет, до появления арабского ученого Альгазена, который умер в Каире в 1038 г. н. э., оптические исследования принесли мало нового. Альгазену же принадлежит много замечатель-

ных открытий. Он первый предложил разумное объяснение оптической иллюзии — огромных размеров Луны над горизонтом. Он опроверг теорию окулярных пучков, еще не умершую в его дни, и решил задачу построения изображений, относящуюся к выпуклым зеркалам.

Развитие науки в средние века шло медленно и с остановками. Рассказывают, что Роджер Бэкон (умер в 1294 г.) изобрел волшебный фонарь, и уж, конечно, он был знаком с выпуклыми линзами. За изобретение очков он был заключен в тюрьму, так как считали, что это творение самого дьявола. Можно догадаться также, что он был знаком с основными принципами действия телескопа, так как он писал: «Мы можем придать прозрачным телам определенную форму и расположить их так, чтобы лучи оказались преломленными... так что мы увидим объект буквально под рукой... Таким путем мы можем прочесть самые мелкие буквы на невероятно большом расстоянии». Однако, прежде чем оптика начала играть действительно важную роль в науке, миру пришлось подождать до 1608 г., когда очковых дел мастер голландец Липперсгейм объявил о своем открытии телескопа, ибо именно известие об изобретении Липперсгейма побудило Галилея в Падуде через год построить свой телескоп. Так зародилась современная астрономия.

Фундамент современной научной оптики линз заложил выдающийся немецкий астроном Кеплер (родился в 1571 г.). При точном расчете оптимальных линз для любых целей существенно знать правильный закон преломления света в стекле. Этот закон еще не был известен, и, конечно, не знал его и Кеплер. И все же он придумал такие системы линз для телескопов, которые были настолько хороши, что даже в наше время кеплеровский окуляр находит применение в телескопах и микроскопах.

Год 1621 явился поворотным моментом в истории прикладной оптики, так как именно в этом году датчанин Снеллиус обнаружил точный закон, связывающий угол, под которым наклонен свет, падающий на преломляющую поверхность, с углом, на который световой пучок, прошедший через эту поверхность, отклоняется или преломляется. Хотя Снеллиус открыл этот закон, он не был опубликован при его жизни и впервые стал

известен в 1637 г. благодаря французскому философу Декарту. Современная оптика линз родилась в результате использования этого закона, и, так как теперь стало возможным вычислять свойства систем линз, строящих изображение, конструирование приборов быстро продвинулось вперед.

К 1704 г., когда Исаак Ньютон опубликовал свой знаменитый трактат «Оптика», наука о свете стояла уже на прочном фундаменте. В особенности во второй половине XVII в. открытие следовало за открытием. Уже был установлен основной закон, связывающий фокусное расстояние линзы или сферического зеркала с расстояниями предмета и изображения от линзы (или зеркала). Датский астроном Рёмер из наблюдений моментов затмения спутников планеты Юпитер пришел к выводу, что свет проходит  $307\,200$  км/сек—величина, очень близкая к той, которую мы знаем теперь для скорости света ( $300\,000$  км/сек). В 1665 г. в Лондоне выдающийся экспериментатор Роберт Гук опубликовал трактат о микроскопе, озаглавленный «Микрография», в котором он описал конструкцию и применение отличного микроскопа. Здесь же он сообщил о своем открытии: если линзу положить на стеклянную пластинку, то при отражении от нее света появляется система цветных колец. Позднее эти кольца были тщательно изучены Ньютоном, и с тех пор (что несправедливо по отношению к Гуку) их называют кольцами Ньютона. В самом начале XIX в. лондонский физик Томас Юнг объяснил причину появления этих колец, что сыграло важную роль в появлении волновой теории света.

К тому же 1665 г. Ньютон уже изучил и объяснил природу цветов спектра, и проведенные им исследования в этой области привели его к изобретению отражательного телескопа-рефлектора. В том же году итальянский монах-иезуит Гримальди сообщил, что свет, проходя около острого края, слегка загибается. Этот эффект, названный *дифракцией*, навел на мысль, что свет, возможно, существует в форме своего рода волн, так как в это время уже было известно, что волны на воде и звуковые волны создают аналогичные эффекты. В 1669 г. в Дании Бартолинус открыл *двойное преломление*. Он обнаружил, что если луч света пропустить через прозрачный кристалл кальцита (исландского

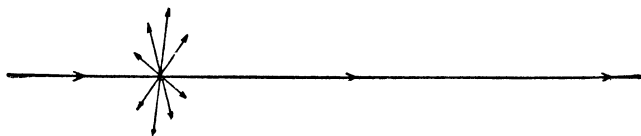
шпата), то на выходе луч расщепляется на два четко разделенных параллельных луча. Это явление было тщательно исследовано в 1678 г. выдающимся голландским ученым Гюйгенсом, который показал, что оба выходящих луча обладают тем особым свойством, которое мы теперь называем *поляризацией*. Гюйгенс нашел, что эти два луча, выходящие из кристалла кальцита, совершенно по-разному вели себя, если их пропускали через второй аналогичный кристалл. Когда оба кристалла были ориентированы одинаково, расстояние между лучами удваивалось — этот эффект можно было ожидать. Но если второй кристалл поворачивали, то каждый из лучей сам расщеплялся еще на два, т. е. в результате получалось четыре изображения. При дальнейшем вращении второго кристалла эти четыре изображения изменяли свою яркость, постепенно переходя в два и, наконец, в одно изображение.

При обсуждении своих наблюдений Гюйгенс высказался в пользу волновой теории распространения света. Он мыслил свет как последовательность импульсов в среде, состоящей из крохотных упругих сфер, находящихся в соприкосновении одна с другой, так что колебания каждой из этих сфер упруго передаются ее ближайшей соседке. При этом и энергия должна распространяться через среду как волновое движение — своего рода возмущение, которое с какого-то данного момента постепенно расходится наружу от фронта волны посредством локального возбуждения всех частей волнового фронта, так что каждая из крохотных сфер испускает свой цуг волн. Распространение волны мыслилось не как непрерывный процесс в современном смысле этого слова, а скорее как непрерывная последовательность импульсов.

Эта теория сделала несколько шагов на пути к объяснению дифракции, но Ньютон был весьма озадачен экспериментами Гюйгенса по двойному преломлению и поляризации. Эффект поляризации указывал, казалось бы, что свет может быть, по выражению Гюйгенса, «односторонним». Уже не один ученый в прошлом высказывал предположение, что свет распространяется в виде волн. Сам Ньютон вполне оценил вдохновенную догадку, высказанную ранее Гуком, и более чем вероятно, что он мог бы принять волновую теорию света.

Ведь Гук не только предположил, что свет распространяется в виде волн, но он также догадался, что колебания волн *поперечные*. Поскольку представление о поперечности волн играет решающую роль в оптической теории, давайте отвлечемся на некоторое время от истории вопроса и выясним смысл этого понятия.

Поперечные волны — это волны, колебания которых происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волн. В качестве грубой аналогии для иллюстрации поперечных волн можно привести

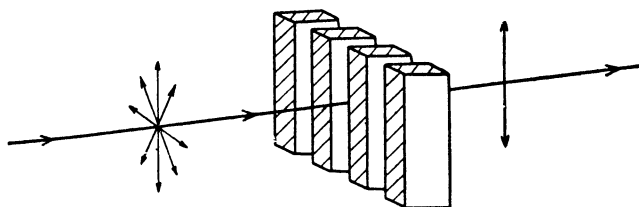


Р и с. 1

пример с движением «дворников» на переднем стекле автомашины, совершающих свои колебательные движения под прямым углом к направлению движения автомобиля. Несколько лучшей аналогией, пожалуй, может служить такой пример: представим себе длинный ряд солдат, стоящих в затылок друг другу, и предположим, что офицер быстро идет вдоль этого ряда. Если каждый солдат будет быстро приветствовать проходящего мимо офицера поднятием руки к козырьку, то по ряду пройдет поперечная волна из движений рук. Скорость распространения волны есть скорость движения офицера. Волновое же движение поднимающихся и опускающихся рук является поперечным, так как движение рук происходит перпендикулярно направлению распространения волны.

В случае обыкновенного света, если мы рассматриваем его как поперечную волну, колебания происходят во всех возможных направлениях, как это показано на рис. 1. Однако очень правильная расстановка атомов, существующая в определенных кристаллах, может воздействовать на световые волны в смысле ограничения возможных колебаний. Она позволяет проходить волнам, совершающим колебания только в одном направ-

лении. В качестве грубой аналогии представим себе в большом масштабе случайную группу крупномасштабных поперечных колебаний, совершающихся во всех направлениях в поперечной плоскости. Пусть на пути этой группы поставлено нечто вроде системы из равноотстоящих полосок, образующих открытый забор. Сквозь этот забор пройдут только вертикальные колебания, как это показано на рис. 2. В отношении поперечных световых волн кристалл ведет себя, как забор.

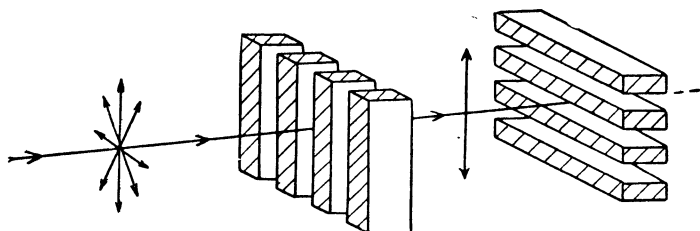


Р и с. 2.

Он позволяет колебаниям проходить только в одном направлении. Тогда говорят, что такой свет *плоско поляризован*. Ясно, что второй забор, поставленный параллельно первому, также пропустит сквозь себя эти колебания, но если заборы скрестить так, как это показано на рис. 3, через них не пройдет ничего.

Некоторые кристаллы обладают способностью к двойному лучепреломлению, которое создает из одного падающего луча два, причем каждый из этих лучей плоско поляризован, но направления их колебаний взаимно перпендикулярны. Приняв такую картину поляризованных волн, можно вполне разумно объяснить наблюдения, сделанные Гюйгенсом на кристаллах кальцита. И тем не менее как раз здесь Ньютон столкнулся с трудностями, хотя с идеей о распространении волн он был согласен. Он уже знал, как вычислять скорость звуковых волн в воздухе. Оказалось, однако, что Ньютон был знаком только с волнами того типа, которые движутся в результате продольного попеременного *сжатия* и *разрежения* в направлении движения, т. е. со звуковыми волнами. Но он не знал

о существовании поперечных волн, проглядев богатую содержанием пророческую догадку Гука. Поэтому Ньютон не мог примирить привычную ему идею о продольных волнах с «односторонним поведением», как он говорил, света. Он был вполне прав, отказываясь признать существование возможных поляризационных эффектов у волн сжатия — разрежения. Именно поэтому Ньютон, правда лишь после тщательного рассмотрения альтернатив, отверг возможность распространения света в виде волн.



Р и с. 3.

Зато он придумал свою «корпускулярную» теорию распространения света и с ее помощью, проявив при этом немалую изобретательность, преуспел в объяснении большинства известных свойств света. Чтобы преодолеть трудность с цветными кольцами между линзой и пластинкой (так называемыми кольцами Ньютона), он предложил следующее объяснение. Свет, как утверждал Ньютон, состоит из корпускул, или частиц, движущихся со скоростью, установленной Рёмером. Вдобавок эти частицы демонстрируют своего рода колебания или свойства периодичности. Эта периодичность начинает действовать, когда частицы встречаются с какой-либо поверхностью и отражаются или проходят сквозь нее. Ньютон предположил, что по достижении поверхности взаимодействия частицы испытывают попеременно «приступы» легкого отражения и легкого прохождения. По диаметрам цветных колец он мог выяснить расстояние, которое корпускула преодолевала между двумя такими «приступами». Он пришел как раз к той самой величине, которую мы теперь называем

*длиной волны*; тот факт, что определенное им расстояние между «приступами» оказалось очень близким к нашим современным длинам волн, делает честь его гению.

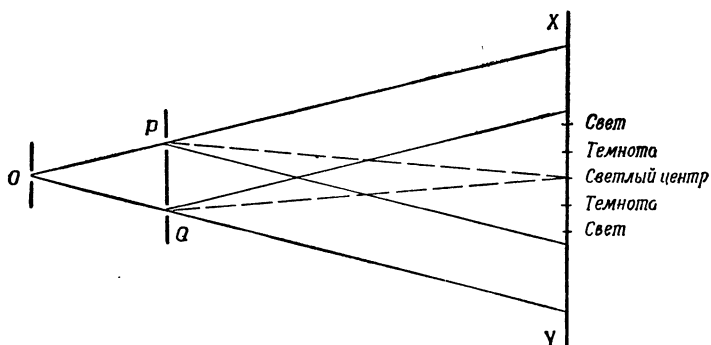
### Волновая теория

На протяжении целого столетия в области оптики господствовал всеми признанный авторитет Ньютона. Лишь в 1801 г. на научной арене появился замечательный ученый Томас Юнг. Это был необыкновенный человек. Он был ученым, врачом и литератором. В физику он внес большой вклад: широкую известность он приобрел своими исследованиями упругих свойств твердых тел (модуль Юнга есть мера упругого напряжения), своей теорией механизма цветного зрения, тем, что он первым записал колебания звучащего камертона и сверх всего этого изложил волновую теорию света. Его любознательность была настолько безграничной, что в 1814 г. он заложил правильные основы для расшифровки египетских иероглифов; его подход к этому вопросу и методика были полностью подтверждены более поздней расшифровкой надписей на знаменитом Розеттском камне Шампольоном. Юнг был тем человеком, который опроверг ньютоновскую корпускулярную теорию распространения света и успешно поставил на ее место волновую теорию.

В 1801 г. Юнг описал очень простой опыт, который убедил ученый мир, что свет распространяется в виде волн. Начав с предположения, что свет — это волны, Юнг утверждал, что две световые волны можно заставить *интерферировать* друг с другом, если только они когерентны. Позднее мы вернемся к понятию когерентности. Здесь же достаточно, если мы будем знать, что все части фронта волны, выходящей из малого отверстия, можно рассматривать как почти *когерентные*. Если волна, исходящая из достаточно малого отверстия, расходится в виде сферы, то в любой данный момент времени все участки волнового фронта, отстоящие на одинаковых расстояниях от малого отверстия (т. е. на поверхности сферы), участвуют в одном и том же колебательном движении. Если мы нарисуем сферическую поверхность с упомянутым выше отверстием в центре сферы, то всякий раз, когда на одной части поверхности

сферы будет гребень волны, он одновременно будет и на всех других ее частях. Такая же согласованность имеет место, когда появляется впадина. Говорят, что каждая часть поверхности сферы находится в *фазе* с любой другой частью ее поверхности.

Простой опыт Юнга показан на рис. 4. Небольшое отверстие  $O$  освещено. Так как отверстие очень мало, свет, выходя из него, загибается (дифрагирует), расходясь под значительным углом в виде конуса. Все колебания волнового фронта происходят в *фазе*. Пусть те-



Р и с. 4.

перь свет падает на два близких друг к другу небольших отверстия — апертуры ( $P$ ,  $Q$ ), и из каждой апертуры также дифрагируют расходящиеся волны, особым свойством которых является теперь их когерентность и то, что они находятся в *фазе* друг с другом просто потому, что колебания, пришедшие в  $P$  и  $Q$ , были в *фазе*. На пути света поставлен экран  $XY$ . Там, где два расходящихся из  $P$  и  $Q$  конуса пересекают экран, возникает интерференция волн. До центра симметрии системы световые лучи, выходящие из  $P$  и  $Q$ , проходят одинаковые расстояния; гребни волн при наложении усиливаются, и появляется яркая область. Немного выше и ниже этой области имеются такие места, для которых разность расстояний от  $P$  и  $Q$  отличается на половину волны. Вследствие этого гребень одной волны совпадает с впадиной другой волны и они взаимно компенсируются: следовательно, никакого света в этих точках

не будет. Таким путем возникают темные интерференционные полосы. Последовательность чередующихся светлых и темных полос создается в тех местах, где следующие разности пройденных светом путей составляют четное или нечетное число полуволн.

Юнг осуществил простой опыт: если закрыть одно из отверстий  $P$  или  $Q$ , интерференционные полосы исчезают. И просто нет никакого иного пути для объяснения этих опытов, если не принять волновую теорию распространения света. Юнг пошел еще дальше: он не только вычислил длину волны световых колебаний по расстоянию между интерференционными полосами, но еще и высказал предположение о том, что различие между спектральными цветами — не что иное, как различие в длинах волн. Развивая свои волновые представления, Юнг объяснил также некоторые особенности ньютоновских колец.

Наступила пора волновой теории света. Под ее натиском рухнула ньютоновская корпускулярная теория, и вскоре она была низведена до роли исторической достопримечательности.

XIX в. дал целый ряд быстро следовавших одно за другим значительных открытий в оптике, и каждое из них получило объяснения в рамках волновой теории света Юнга. В 1817 г. Давид Брюстер описал несколько новых интерференционных эффектов, позднее послуживших основой важных измерений; после его работ появились сообщения о некоторых других интерференционных явлениях. В 1849 г. французский физик Физо осуществил первое лабораторное измерение скорости света, и величина ее не очень отличалась от той, которую нашел за двести лет до этого Рёмер. Согласно существующим теориям распространения волн, скорость волн в среде зависит от упругих свойств и от плотности среды. Очень большая величина скорости света означает, что среда, через которую распространяются волны, обладает очень большой упругостью или крайне низкой плотностью. Здравый смысл говорит в пользу последней точки зрения, откуда и возникло предположение, что все пространство (и вся материя) заполнено очень разреженной средой, которая была названа *эфиром*. Полагали, что световые волны передаются именно через эфир. О нем было известно не слишком-то много,

и, как это заметил один остряк, слово «эфир» являлось всего лишь подлежащим к сказуемому «колебаться».

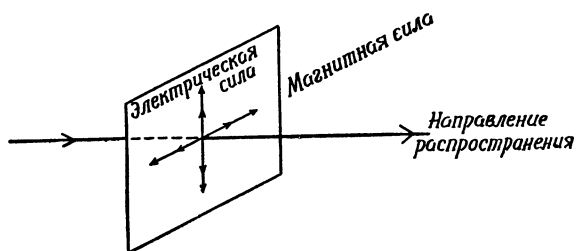
Позднее будет признано, что с концепцией эфира мы откатились назад к пеллуциду Аристотеля с единственной дополнительной информацией: теперь мы знали, что через эту среду — называйте ее, как хотите, — проходят поперечные волны, и, кроме того, мы узнали скорость распространения этих волн.

### **Электромагнитная теория**

Год 1867 можно считать следующей вехой в истории оптики, так как в этом году выдающийся шотландец Джеймс Клерк Максвелл завершил разработку электромагнитной волновой теории света. Эта теория оказала сильное влияние не только на оптику, но и на другие разделы физики. Максвелл принял идею о распространении света в форме поперечных волн, но сам он интересовался главным образом природой или свойствами возмущений колебательного характера в эфире. Он рассматривал волну как совместное возмущение электрической и магнитной сил, проходящее через пространство. Первичные световые колебания в начальный момент по самой их сущности следует рассматривать как поляризованные. Обычный неполяризованный свет — всего лишь случайная смесь света, поляризованного во всевозможных направлениях, перпендикулярных направлению распространения. Тем не менее каждая поляризованная волна имеет свои особые характеристики, так как образовавшее ее поперечное колебание представляет собой два совершенно различных вида колебаний, а именно электрические и магнитные. Электрическая сила рассматривается как последовательно меняющаяся (осциллирующая) в одном направлении, тогда как связанная с ней магнитная сила осциллирует в унисон, но перпендикулярно электрическому колебанию (рис. 5). Оба колебания являются поперечными, т. е. совершаются перпендикулярно направлению распространения, и ни одно из них не может существовать независимо от другого.

Эта теория получила признание в самых различных областях физики. Не говоря уж о бесчисленных предсказаниях оптических явлений, подтвержденных

в лаборатории, эта теория предсказала также существование (и свойства) радиоволн, открытых в Германии Герцем в 1884 г. Вскоре было установлено, что ультрафиолетовый свет, видимый свет, тепловое излучение и радиоволны — все являются одним и тем же электромагнитным излучением и отличаются только своими длинами волн (расстояниями между гребнями волн), заключенными в диапазоне от  $1/100\,000$  см в ультрафиолете до десятков тысяч метров для длинных радиоволн. Трудности, связанные с концепцией всюду проникающего и все пронизывающего разреженного



Р и с. 5.

эфира, способного сверх того к поддержанию и распространению как электрических, так и магнитных колебаний, казалось, не могли быть устранены. Бесчисленные опыты со светом, теплотой, электричеством, магнетизмом, радио и т. п. — все, по-видимому, доказывало правильность основ электромагнитной теории излучения Максвелла. Несомненно, дело выглядело так, как будто электромагнитная волновая теория света получила полное и окончательное признание.

Тем не менее свойства, которые необходимо было приписывать эфиру, вызывали удивление. При распространении волн любого рода существует простое соотношение, связывающее расстояние между гребнями волн (длина волны), число колебаний в 1 сек (частота) и расстояние, которое волна проходит за 1 сек (скорость). Произведение длины волны на частоту равно скорости. Скорость света равна  $300\,000$  км/сек. Из опытов по интерференции нетрудно установить, что длина волны, скажем, зеленого света составляет

~ 0,55 мкм, что дает для частоты колебаний этого света около 600 000 000 000 000 раз в секунду! Но вполне доступны и гораздо более короткие длины волн, чем длина волны зеленого света. Действительно, излучение, испускаемое радиоактивными веществами (гамма-лучи), имеет столь малые длины волн, что частоты колебаний для некоторых из них в миллионы раз больше приведенной выше. Очевидно, гипотетический эфир должен реагировать на очень высокие частоты.

Одновременно с развитием электромагнитной теории света были сделаны значительные открытия в других отраслях оптики, открытия, которые в свое время должны были поставить электромагнитную теорию света в весьма затруднительное положение. Это были открытия в спектроскопии — той отрасли оптики, которая непосредственно имеет дело с различными длинами волн света, испускаемого нагретыми газами и твердыми веществами. Спектроскопия ведет свое начало от Ньютона; он впервые, направив солнечный луч из щели в оконной ставне, собрал этот свет линзой, направил его на стеклянную призму и, наконец, на экран. Ньютон продемонстрировал, что белый свет состоит из лучей, *различно преломляемых* в стекле призмы, так что выходящий из нее свет растягивается в цветные полосы — цвета радуги: красную, оранжевую, желтую, зеленую, голубую, синюю, фиолетовую.

В начале XIX в. физик из Лондона Волластон открыл узкие темные линии в спектре Солнца, позднее немецкий оптик и конструктор телескопов Фраунгофер повторно открыл эти линии и тщательно измерил их длины волн. Почти в то же самое время было обнаружено, что цветные пламена, получающиеся при горении солей металлов, испускают не непрерывно окрашенный спектр в отличие от Солнца. Когда испускаемый ими свет пропустили через установку, разработанную Ньютоном, было найдено, что каждое пламя излучает свет, занимающий ряд узких дискретных цветных областей. Поскольку эти области выглядят в спектре как отдельные линейные изображения щели, их скоро начали называть *спектральными линиями*. Было обнаружено, что каждый металл, если его ввести в пламя, излучает свою собственную особую группу линий, занимающих определенные места в спектре. В видимой области

спектр, как, например, спектр натрия, может состоять только из двух близких линий. В спектрах других металлов видны сотни и даже тысячи линий. Многие спектральные линии занимают лишь очень небольшую долю всего спектрального диапазона, и нет ничего необычного в том, что находятся линии, занимающие менее десятитысячной части видимого спектра. При помощи специальной методики эту величину можно уменьшить еще значительно. Линии, которые занимают в спектре узкую область длин волн, обычно называют *монохроматическими*, а для их характеристики используют определенную длину волны (в «центре» линии). Строго говоря, любая монохроматическая линия имеет конечную, хотя и очень малую, протяженность по спектру. Такие линии, конечно, встречаются не только в видимой области спектра. Как только были развиты методы регистрации ультрафиолетового и инфракрасного излучений, было обнаружено, что узкие спектральные линии в достаточном количестве имеются во всех областях спектра. Ниже мы увидим, что степень монохроматичности для отдельных спектральных линий играет решающую роль во многих современных оптических исследованиях.

Благодаря использованию атомных монохроматических источников излучения волновая оптика в XIX в. достигла больших успехов. Так, например, в 1862 г. Физо придумал простую интерференционную установку, используя почти монохроматические желтые линии, получаемые от пламени, насыщенного обыкновенной солью; эти желтые линии характерны для атомов натрия, входящих в хлористый натрий. Установка Физо позже стала основой оптического контроля качества шлифовки как стеклянных, так и металлических деталей.

Блестящий экспериментатор Альберт Майкельсон между 1887 и 1920 гг. поставил в США ряд замечательных экспериментов на основе интерферометрии определенных спектральных линий. Прибор, в котором для измерительных целей используется интерференция света, называется *интерферометром*. Майкельсон разработал особый подвижный интерферометр — простое устройство, в которое входят всего

три зеркала, но в сочетании с доходящим до гениальности искусством эксперимента он добился с этим устройством необыкновенных результатов. Майкельсон измерил с замечательной точностью число световых волн в международном стандарте длины — металлическом бруске, хранящемся в Париже. В 1892 г. он оценил число волн, содержащихся в эталонном метре, для выбранной им спектральной линии (красной линии, испускаемой металлом кадмием, которая, как установил Майкельсон, была в высшей степени монохроматической). Длины волн в оптике измеряются в единицах, называемых *ангстремами*; один ангстрем ( $1 \text{ \AA}$ ) равен одной стомиллионной доле сантиметра. Видимый спектр простирается приблизительно от  $4000 \text{ \AA}$  (в синей части) до  $7500 \text{ \AA}$  (в красной части). По измерениям Майкельсона, длина волны красной линии кадмия составляет  $6438,4691 \text{ \AA}$ . Спустя 50 лет, после самых тщательных и дорогостоящих измерений, проведенных в физических лабораториях Парижа, Токио, Лондона, Берлина и Москвы, для длины волны этой линии была принята средняя величина  $6438,4696 \pm 0,0010 \text{ \AA}$ . Какой похвалы достойно искусство Майкельсона, результат которого отличается от этой средней величины всего на 0,0005 единицы измерения. Поскольку эта международная величина считается точной лишь в пределах ошибки 0,001 единицы, результат Майкельсона находится в пределах этой ошибки!

В 1887 г. Майкельсон совместно с Морли выполнил в США свой знаменитый интерференционный опыт, пытаясь измерить влияние движения Земли по ее орбите (она перемещается на  $30 \text{ км}$  в  $1 \text{ сек}$ ) на скорость света (которая в  $10\,000$  раз больше). Он пытался измерить так называемый эфирный ветер около Земли. К своему удивлению, Майкельсон обнаружил, что не было никакой разницы, посылался ли свет в направлении движения Земли или в обратном направлении; скорость света оставалась неизменной. Исходил ли свет от источника, находившегося в покое или движущегося, скорость света оставалась той же самой. Интерференционный опыт Майкельсона был поставлен столь точно, что ожидаемый эффект, обусловленный скоростью Земли, должен был бы легко обнаружиться.

Это была мучительная загадка, и пришлось подождать до 1905 г., до прихода в науку немецкого ученого Эйнштейна, построившего на основе этих любопытных отрицательных экспериментальных результатов теорию относительности. Эксперимент продемонстрировал, что скорость света была постоянна независимо от скорости источника или приемника. Эйнштейн просто сказал: «Очень хорошо, давайте постулируем, что скорость света всегда постоянна; посмотрим, к какой геометрии это приведет». Рассуждая строго и тем не менее просто, Эйнштейн показал, что принятие этого постулата приводит к самым неожиданным свойствам материи. Было обнаружено, что масса зависит определенным образом от скорости и с ростом скорости увеличивается. Длина также зависит от скорости и сокращается с увеличением скорости. Измерение времени, измерение скорости и т. п. — все оказалось зависящим от скорости. Формула, связывающая массу со скоростью, такова, что масса тела стремится стать бесконечно большой, когда скорость приближается к скорости света. В то же время с увеличением скорости длины сокращаются, стремясь к нулевому значению по мере приближения скорости к скорости света. Эти предсказания теории относительности были подтверждены неоднократно различными экспериментами в начале XX в.

Одним из самых неожиданных результатов была знаменитая формула Эйнштейна, связывающая массу и энергию. В основе всей научной философии XIX в. лежали два совершенно отдельных представления — сохранение массы и сохранение энергии. Согласно этим представлениям, изменения энергии могут происходить, но полная энергия во Вселенной постоянна, то же самое справедливо для массы. Что же установил Эйнштейн? Он показал, что масса и энергия взаимосвязаны. Эквивалентная данному количеству вещества энергия равна массе, умноженной на квадрат скорости света. Когда скорость света выражается в *см/сек*, то это очень большое число; отсюда следует, что энергия, эквивалентная данному количеству вещества, на самом деле очень велика. Масса в 400 г (любого рода) эквивалентна энергии, выделяемой при сгорании полутора миллионов тонн угля.

Именно это соотношение Эйнштейна, связывающее массу с энергией, объясняет громадную величину энергии, излучаемой Солнцем, ибо при чрезвычайно высоких температурах, существующих в недрах Солнца (где температура может превышать сотни миллионов градусов), происходит постоянное превращение массы в энергию. Каждую секунду Солнце теряет несколько миллионов тонн не в виде выбрасываемого вещества, а в результате излучения, которое выделяется в космическое пространство. Доля, поглощаемая Землей, составляет всего  $1/2\,000\,000\,000$  часть полной энергии, излучаемой Солнцем. Это грандиозное превращение атомной энергии происходит в Солнце все время.

Интересно, что наши знания о превращении атомной энергии первоначально явились следствием академического эксперимента, в котором мыслилось только установить, как действует движение Земли на скорость света. Равным образом любопытен и тот факт, что, когда в конце XIX в. проводились эти эксперименты, казалось, что обоснованность электромагнитной теории распространения света и радиации всех видов установлена прочно. Ничто не предвещало надвигающейся революции. Физика спокойно дожидалась лишь дальнейших усовершенствований и новых подтверждений принятых канонов. Казалось, волновая теория навеки закрепилась в седле.

## КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ

Электромагнитная волновая теория оказалась настолько эффективной как в объяснении известных явлений, так и в предсказании новых, что казалось невозможным даже и думать о каком-либо ином механизме распространения света. Тем не менее как раз в конце XIX в. появились сообщения об одном-двух любопытных наблюдениях, с малозначащими на первый взгляд выводами; однако они предопределили революцию не только в оптике, но и в самых фундаментальных основах физических наук.

Первые трудности выявились в 1897 г., когда в Германии Луммер и Прингсгейм сообщили о своих измерениях инфракрасного (теплового) излучения, испускаемого нагретыми телами. Немного ранее, чем они провели свои эксперименты, двумя английскими учеными, Релеем и Джинсом, была разработана теория теплового излучения, основанная, естественно, на признанной электромагнитной теории.

Если твердое тело нагреть, скажем, до красного каления, оно дает спектр излучения, простирающийся от красного до инфракрасного участков спектра. Очевидно, что кривая распределения инфракрасного излучения по спектру зависит от температуры излучающего тела. Что же сделали Релей и Джинс? Они вычислили непосредственно из электромагнитной теории, как должна быть распределена энергия излучения между различными длинами волн при разных температурах излучателя.

Эти любопытные теоретические результаты схематически даны на рис. 6, где показано, каким образом энергия излучения распределяется по различным длинам волн. Из графика видно, что на долю длинных волн приходится лишь совсем небольшая часть энергии, однако энергия быстро растет с уменьшением

длины волны. А то, что обнаружили Луммер и Прингсгейм, показано кривой 1 на рис. 7. Пунктиром дана кривая, вычисленная Релеем — Джинсом. Экспериментальная кривая имеет горб и только частично совпадает с вычисленной кривой. Луммер и Прингсгейм обнаружили, что при повышении температуры горб поднимается, а также сдвигается влево, как показывает кривая 2. По существу это означает, что распределение излучаемой нагретым телом энергии имеет максимум на некоторой длине волны и чем горячее

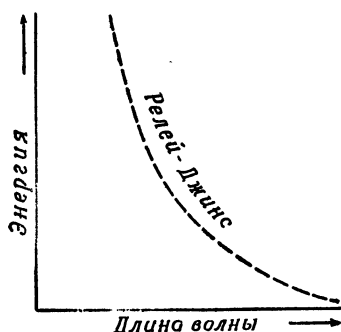


Рис. 6.

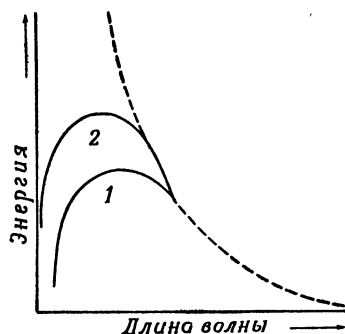


Рис. 7.

тело, тем дальше максимум сдвигается в видимую область к синему концу спектра. Это лишь более научное выражение всем известного явления, состоящего в том, что красное каление при повышении температуры становится белым, т. е. с повышением температуры в излучении появляется все большая и большая часть видимого спектра.

Конечно, самой существенной особенностью кривых Луммера — Прингсгейма является то, что они решительно противоречат однозначному предсказанию электромагнитной теории. Эта теория вступает здесь в явное противоречие с наблюдениями, ибо из нее следует, что по мере уменьшения длины волны испускаемая энергия становится все больше, стремясь к бесконечно большой величине. Может быть, что-то не так в волновой теории?

Как раз в это же самое время был обнаружен особый эффект, относящийся к количеству тепла, необхо-

димого для нагревания твердого тела. Количество теплоты, необходимое для повышения температуры единицы массы какого-либо вещества на один градус, называется *удельной теплоемкостью*, которая различна для разных веществ. Еще в 1818 г. французские ученые Дюлонг и Пти открыли, что количество тепла, необходимое для повышения температуры одного и того же числа молекул на один градус, практически одинаково для всех элементов\*. Во второй половине XIX в. Максвелл и немецкий ученый Больцман заложили прочные основы кинетической теории газов — исследования свойств, возникающих вследствие движения составляющих их частиц. Согласно кинетической теории, молекулы газа находятся в состоянии непрерывного движения, причем интенсивность движения зависит от температуры. Молекулы газа быстро движутся и часто сталкиваются друг с другом. Например, в атмосфере на уровне моря каждая молекула газа испытывает столкновение не реже чем десять тысяч миллионов раз в секунду. В твердых телах молекулы не могут передвигаться свободно, они частично ограничены в своих движениях, и их тепловое движение — это в сущности быстрые колебания в некоторой фиксированной области, с которой они связаны.

Из теории молекулярного движения можно вычислить энергию, необходимую для повышения температуры тела, т. е. удельную теплоемкость, и к величайшему удовлетворению физиков XIX в. полученная из вычислений величина оказалась достаточно близкой к экспериментальным результатам, опубликованным почти на 100 лет раньше Дюлонгом и Пти. Это согласие рассматривалось всеми как достаточное подтверждение правильности кинетической теории молекулярных движений.

Тем не менее в конце столетия на пути этой теории появился камень преткновения. К тому времени была разработана техника получения низких температур. Было обнаружено, что при измерении удельных теплоемкостей при очень низких температурах (а к 1895 г. при температуре  $-252^{\circ}\text{C}$  был получен жидкий

---

\* Конечно, речь идет о грамм-молях любого вещества. — *Прим. ред.*

водород) правило Дюлонга и Пти отказывает для всех веществ. Чем ниже была температура, тем меньше становилась удельная теплоемкость. Когда же после 1908 г. стал доступен жидкий гелий, стало ясно, что чем ближе температура к абсолютному нулю —  $-273^{\circ}\text{C}$ , тем больше удельная теплоемкость приближается к нулевому значению; эти сведения появились позднее, они соответствуют почти современному состоянию науки.

Но в конце XIX в. существовали две противоречивые загадки, связанные с теплотой: одна касалась действия теплового излучения, другая — теплового поглощения. Ни ту, ни другую не удавалось объяснить известными законами и теориями из числа тех, которые теперь в совокупности принято называть *классической физикой*. Необходимо было найти выход из этого тупика; это сделал в 1900 г. немецкий теоретик Планк, выдвинувший революционную *квантовую* теорию, которая привела по существу к атомистической концепции излучения, в том числе и излучения света.

### Квант

Планк намеревался вывести формулу, которая объясняла бы известные факты о тепловом излучении, т. е. наблюдения Луммера и Прингсгейма. Это требование было пробным камнем теории. В электромагнитной теории молчаливо принималось, что если тело излучает, то только непрерывным образом. Даже не вдаваясь в детали, считали само собой разумеющимся, что волна допускает непрерывное изменение, так что всегда возможны бесконечно малые изменения количества излучения.

Совершенно неожиданно Планк отказался от этой идеи, считая ее основной ошибкой. Вместо того чтобы придерживаться концепции непрерывности, он выдвинул революционную мысль о своего рода *атомистичности* излучения. Твердые тела, сказал Планк, состоят из вибраторов (молекул). Если такое тело излучает на некоторой определенной частоте (т. е. излучает некоторую определенную длину волны), то оно излучает лишь в количествах, которые могут изменяться скачкообразно; излучаемая энергия является сум-

мой величин, кратных некоторому определенному количеству, которое он назвал *квантом*. Для такой частоты (длины волны) излучения квант является неизменным. Для любой избранной частоты квант равен этой частоте, умноженной на некоторое постоянное число (одинаковое для всех частот). Это постоянное число очень невелико, но оно точно известно и называется теперь *постоянной Планка*. Фундаментальное значение этой новой идеи состояло в том, что в акте излучения — теплового, светового или радиоволн — энергию уже нельзя было рассматривать как непрерывную величину, ее следовало рассматривать как сумму отдельных дискретных квантов. Важно отметить, что в 1900 г. Планк все еще думал, что кванты представляют собой импульсы непрерывных электромагнитных волн. Не задаваясь вопросом о характере излучения, Планк ввел лишь идею об атомистическом излучении в дискретных количествах.

На основе этого предположения, а также идеи о том, что молекулы являются простыми осцилляторами, Планк сумел вывести новую формулу для излучения, которая с замечательной степенью точности соответствовала наблюдаемым результатам. Несмотря на это, плохо понятное представление о кванте поначалу было слишком революционным, чтобы оказать заметное влияние, ибо признание его подразумевало полный разрыв с принятыми представлениями о непрерывности излучения, которые служили хорошо и долго и безоговорочно господствовали в физике.

Спустя несколько лет, в 1907 г., молодой немецкий служащий из бюро патентов Эйнштейн показал, что те же самые квантовые идеи можно приспособить для объяснения не только излучения энергии, но и поглощения ее. Воспользовавшись идеей Планка о квантах, Эйнштейн вывел новый закон удельной теплоемкости, полагая, что если излучение происходит квантами, то и поглощение тепла телом должно описываться квантовым механизмом. Простыми математическими методами он вывел новую формулу удельной теплоемкости (связывающую повышение температуры с количеством поглощенного тепла), в которую вошла та же самая постоянная Планка. Уравнение удельной теплоемкости Эйнштейна очень хорошо соответствует всем

измерениям удельной теплоемкости, полученным при низких температурах. А при некотором усовершенствовании, введенном несколькими годами позже голландцем Дебаем, квантовая теория удельных теплоемкостей оказалась в исключительно хорошем согласии с результатами наблюдений вплоть до самых низких температур.

## Фотон

Наступила эра квантовой теории. Физика испытала величайшее потрясение в самых своих основах. Но это было еще не все, снова гигантский скачок в науке был сделан Эйнштейном — скачок, проложивший дорогу к так называемому закону фотоэффекта Эйнштейна. Фотоэффект был открыт за 20 лет до этого в Германии Герцем, который заметил, что искра между электродами проскакивает легче, если электроды освещать ультрафиолетовым светом. Скоро было установлено, что свет просто вырывает из металла электроны. Этот отрыв электронов под действием подходящего света называли *фотоэффектом*, а вырываемые частицы получили наименование *фотоэлектронов*. Ничего особенного в этих электронах нет. Они такие же, как и электроны, полученные другими методами. Изучив эксперименты над фотоэлектронами, выполненные в Германии Ленардом, Эйнштейн сформулировал простой закон, связывающий скорость испускаемых электронов, энергию, необходимую, чтобы вырвать их из металла, и частоту падающего света. Многозначительным был тот факт, что в закон Эйнштейна входила совершенно естественным образом та же самая постоянная Планка, которая появилась и в теории излучения и в теории удельной теплоемкости.

Опыты Ленарда, позднее подтвержденные и проведенные более тщательно Милликеном, установили два характерных свойства фотоэффекта. Первое свойство: число фотоэлектронов, испускаемых металлом, пропорционально интенсивности света. Удвойте интенсивность света — и из металла выйдет вдвое больше электронов. Другое, более существенное открытие состояло в том, что скорости (энергии) этих электронов зависят только от длины волны (или частоты) света.

Именно это свойство Эйнштейн ввел в свой закон фотоэффекта. Для света данной частоты электроны имеют вполне определенную скорость. Неважно, насколько ярким был свет, это не оказывает никакого влияния на скорость электронов; яркость сказывалась лишь на числе испускаемых частиц. И наоборот, никакого значения не имело, насколько слабым был свет, — для данной длины волны скорость электронов всегда была одной и той же.

Опуская (с научной точки зрения важные) детали, можно сказать, что закон Эйнштейна по существу связывает количество энергии, падающей на некоторую поверхность, с энергией испускаемых электронов. Количество энергии в световом излучении, сверх той энергии, которая необходима, чтобы вырвать электрон из металла, переходит в энергию движения. Так как энергия движения определяется через скорость, отсюда следует простая связь между частотой света и скоростью электронов.

Пока Эйнштейн показал лишь, что квантовые представления применимы к фотоэффекту, так же как они применимы к излучению и удельной теплоемкости: идея очень содержательная, но сама по себе не слишком революционная. Однако сейчас мы подходим к обсуждению следующего и куда более значительного события; и опять это работа Эйнштейна. Были проведены опыты по измерениям промежутка времени между освещением поверхности и фактическим выбросом фотоэлектронов. Всегда оказывалось, что этот промежуток очень мал — во всяком случае меньше одной миллионной доли секунды. Не имело значения, использовался ли яркий или слабый свет, время эмиссии всегда было одинаковым и всегда очень малым. Вслед за тем появилось сообщение об опытах по измерению как времени эмиссии, так и скоростей эмиссии при использовании чрезвычайно слабых источников света. Как и прежде, время выброса электронов оставалось малым, и, как и прежде, скорость вылета соответствовала частоте света. Эйнштейн произвел небольшие и несложные арифметические действия с данными, опубликованными другими исследователями. Диаметр атома известен. Если слабый источник света находится на определенном расстоянии от

металла и интенсивность источника известна, нетрудно подсчитать, какое количество энергии каждую секунду падает на поверхность одного атома. Это вычисление несложно, поскольку интенсивность волн источника (это справедливо для любой волны) уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния. Удвойте расстояние — и получите одну четверть энергии; утройте его — и получите одну девятую часть и т. д. Из расчета Эйнштейн установил, что количество энергии, падающее на поверхность одного атома, настолько мало, что потребовалось бы затратить часы, чтобы эти малые количества энергии в совокупности достигли величины энергии одного кванта. И все-таки, несмотря на это, фотоэлектрическая эмиссия проявляется немедленно, а энергия вырванных электронов именно такая, которую ожидали получить.

Совершенно невозможно представить себе, что атомы, чтобы обеспечить необходимое количество энергии, высасывают ее со всей поверхности волнового фронта, причем всегда на это затрачивается весьма мало времени. Это неприемлемое объяснение. Объяснение Эйнштейна было предельно ясным. Из проведенных опытов с неизбежностью вытекает, что свет излучается вовсе не в виде волн. Наоборот, он должен излучаться в форме града отдельных квантов, и каждый квант все время несет с собой соответствующую порцию энергии. Закон обратно пропорциональной зависимости интенсивности от квадрата расстояния будет выполняться просто потому, что площадь сферы растет как квадрат ее радиуса, поэтому и число квантов, падающих на данную площадь, будет уменьшаться обратно пропорционально квадрату расстояния. Но каждый квант всегда несет полагающуюся ему полную порцию энергии. Следовательно, как только на какой-нибудь атом попадает квант, из него тотчас же выбрасывается электрон именно с нужной энергией, что и было действительно обнаружено.

Теперь мы и в самом деле сделали огромный шаг вперед в теории излучения света. Уже теория Планка требовала, чтобы излучаемая энергия испускалась или поглощалась в дискретных количествах. Но еще никогда не ставился вопрос, каким образом излучение распространяется в пространстве. Безоговорочно

предполагалось, что излучение движется в пространстве как электромагнитная волна. Эйнштейн сразу далеко шагнул вперед. Он не только потребовал, чтобы испущенный свет поглощался квантами, свет должен был перемещаться в пространстве в виде отдельных пакетов, в виде дискретных порций, — если уж на то пошло — в виде корпускул! Как ни странно, но мы вернулись к чему-то, очень похожему на корпускулы Ньютона. И Эйнштейн приписывает излучению свойства частиц. Эти частицы излучения теперь называются *фотонами*. Абсолютно невозможно объяснить фотоэффект (а также и многие другие эффекты), не приняв идею о фотонах как о некоем виде частиц — носителей определенной энергии, — перемещающихся со скоростью света. Свет приобрел своего рода атомистичность, как впервые гениально догадался Ньютон.

### **Двойственная природа волн и частиц**

Теперь-то уж мы зашли в тупик, представляющий собой подлинную дилемму современной физики. Для объяснения оптической интерференции и дифракционных эффектов мы вынуждены принимать волновую теорию света. Но вместе с тем для объяснения фотоэффекта и других результатов новейших исследований мы не можем обойтись без идеи об отдельных частицах — фотонах.

Как можно разрешить это противоречие? Фактически оно еще не разрешено полностью, и физическая теория в целом еще довольно неубедительна. Однако оптика оказалась в хорошей компании, ибо та же дилемма существует и в физике элементарных частиц, и в физике волновых явлений.

Чтобы ограничиться всего одним примером, рассмотрим некоторые свойства электрона. Электроны можно обнаружить при помощи электрических и магнитных полей. Они могут рассматриваться как любые отдельные образования, и когда они движутся медленно, то имеют вполне определенную массу (хотя массы и скорости электронов определяются электрическими и магнитными полями, через которые они проходят). Действительно, они обладают всеми предсказуемыми свойствами заряженных частиц, которые

имеют определенные заряд, массу и скорость. Известно также, что они вращаются подобно волчкам. В течение первого тридцатилетия после их открытия ни у кого не возникало сомнений в том, что электроны — настоящие частицы. Никто и не рассматривал их как-либо иначе. Затем в 1927 г. появилась неувязка. Томсон открыл, что в определенных экспериментах электроны вели себя так, как будто бы они были волнами. Они испытывали отражение, они дифрагировали, они даже создавали интерференцию. Они обнаруживали вполне измеримые длины волн, которые зависели от скорости, и, что еще более странно, здесь внезапно появилась постоянная излучения Планка. Длина волны, которую эти электроны, по-видимому, несли с собой, была равна постоянной Планка, деленной на произведение массы и скорости электрона. Тем не менее, когда электроны становились объектом других экспериментов, они вели себя в точности так, как если бы они были частицами. Но они никогда не вели себя и как волны, и как частицы одновременно. Это в точности то же самое, что происходит со световым излучением. В некоторых экспериментах свет ведет себя как волны, в других же — как частицы (фотоны).

Чтобы выйти из этого тупика, Бор выдвинул *принцип дополнительности*. В природе нет, сказал он, ни чистых волн, ни чистых частиц, а существует *дуализм*. Существуют то ли *волны-частицы*, то ли *частицы-волны*, и какой из аспектов этого дуализма мы наблюдаем в данный момент времени, зависит от характера проводимого эксперимента.

В таком случае вполне уместно спросить: если световое излучение — это волна или частица и если электрон — тоже частица или волна, может быть, это одно и то же? В действительности между ними есть очень существенные различия; достаточно упомянуть всего лишь одно. Если бы электрон мог достичь скорости света, его масса стала бы бесконечно большой, а его «толщина» уменьшилась бы до нулевой. Совершенно очевидно, что электрон никогда не сможет достичь такой скорости. С другой стороны, фотон действительно обладает как раз такой скоростью, следовательно, электрон и свет должны иметь существенно

разные свойства. Мы приходим также к заключению, что фотон вообще не может обладать массой в обычном смысле слова, потому что, сколь бы малой мы ни приняли массу воображаемого «замедленного» фотона, она стала бы бесконечно большой при нормальной скорости фотона, которая равна скорости света. Очевидно, что фотоны отличаются от электронов, которые в состоянии покоя или медленного движения имеют некоторую конечную массу. Есть и другие отличия, останавливаться на которых нет необходимости.

Теперь мы уже подошли к теории распространения света, которая значительно отличается от взглядов, считавшихся общепризнанными в XIX в. Если свет действительно распространяется в виде фотонов, тогда мы сразу отказываемся от эфира, который был средой, необходимой для переноса электромагнитных волн. Не забудьте, что фотоны все же перемещаются в пространстве со скоростью света. Тем не менее дилемма, конечно, все еще существует, поскольку наши фотоны, несомненно, должны обладать волновыми свойствами, иначе как можно объяснить оптическую интерференцию? Является ли каждый фотон носителем этих свойств, и если это так, то сколь далеко они простираются и в чем выражаются? Пытаясь объяснить определенные эксперименты, не постулируя самого существования протяженных фронтов когерентных волн, мы оказались по-настоящему в очень затруднительном положении. Существует один оптический прибор, называемый звездным интерферометром (изобретен Майкельсоном), который позволяет измерять диаметры звезд. Этот прибор предполагает когерентную интерференцию от двух зеркал, которые могут быть разнесены на 6 и более метров. Мы без труда можем объяснить, что происходит, если мысленно представим себе общий когерентный волновой фронт, идущий от далекой звезды и попадающий на оба зеркала. Но может ли один фотон попасть на оба зеркала? Однако и это еще не все. Аналогичная интерференционная система была разработана для исследования радиоизлучения звезд; в этом случае два зеркала интерферометра отстоят одно от другого на сотни километров, и все же появляется интерференционная картина (для длинных волн). Разумеется, один фотон не может

в одно и то же время подлететь к двум зеркалам, если между ними расстояние измеряется сотнями километров!

Были предприняты теоретические попытки объяснить это явление, основываясь на так называемой когерентности фотонов, но эти теории туманны и пока еще не являются общепризнанными. Для нас с вами проще закрыть глаза на все эти трудности, считая, что их не существует. На практике удобнее и проще всякий раз забывать о фотонах, когда описываются эксперименты со световыми лучами, интерференция или дифракция. В подобных случаях мы будем приставлять наш *квантово-фотонный* телескоп к слепому глазу. И наоборот, при обсуждении эффектов, где существенны фотоны, таких, как фотоэффект, некоторые аспекты зрительного восприятия, и особенно спектроскопии, мы будем приставлять наш обычный *оптический* телескоп к слепому глазу и забудем о волновых явлениях. Все же временами нам придется обращаться то туда, то сюда. С философской точки зрения, возможно, это выглядит неудовлетворительно. Практически же это единственный способ справиться с основной трудностью теории, не получившей должного разрешения.

## Спектр водорода

Фотонная оптика блестящим образом приступила к объяснению происхождения атомных спектров. С одной стороны, спектральные линии образуются благодаря квантовому механизму; с другой стороны, это и есть те самые спектральные линии, которые столь часто используются в интерференционно-волновых оптических экспериментах. Значит, существует нечто вроде моста между обоими аспектами, хотя в каждом данном эксперименте мы всегда встречаемся с той или другой концепцией, но никогда с обеими вместе.

История выяснения происхождения и природы спектральных линий полна случайностей. В самом начале XIX в. Брюстеру уже было известно, что обыкновенная соль, введенная в пламя, дает сильное желтое свечение более или менее определенной длины волны. Воластон и Фраунгофер установили, что солнечный

свет пересечен темными полосами, которые являются, так сказать, «негативными» спектральными линиями. Позднее Бунзен в Германии обнаружил, что каждый из множества химических элементов испускает свой собственный характерный спектр, образуемый группами спектральных линий различной интенсивности. Появилась возможность классифицировать спектры и относить их к соответствующим исходным атомам. Фраунгоферовы линии Солнца также были отождествлены, и таким образом было установлено существование на Солнце и звездах многих химических элементов.

Число линий, видимых в спектроскоп, сильно меняется от атома к атому: у одних химических элементов их мало, у других сотни, даже тысячи. Естественно было предположить, что самый легкий и, очевидно, самый простой из атомов — атом водорода — может иметь и один из самых простых спектров. Так и оказалось; электрический разряд в газообразном водороде показал, что спектр водорода, заключенный между красным и синим концами, состоит из четырех линий, сгруппированных в явной закономерности. Видимый спектр водорода показан на фото Ia. И все-таки, несмотря на видимость закономерности, когда измерили длины волн этих четырех линий, оказалось, что они прочно отказываются подчиняться любым попыткам загнать их в какую-либо разумную теоретическую схему. Предпринималась попытка за попыткой с целью найти какие-то формулы, использовались аналогии с обертонами, которые, как известно, существуют для колеблющихся пластинок и сфер, но все было безуспешно. Наконец в 1886 г. школьный учитель из Швейцарии, по имени Бальмер, наткнулся на формулу, связывающую длины волн линий водорода, которые с тех пор стали известны под названием бальмеровской серии водорода.

Бальмер нашел, что величины, обратные длинам волн этих четырех линий, связаны простой зависимостью с квадратами чисел 2, 3, 4, 5 и 6. Казалось резонным предположить, что и последующие числа — 7, 8 и т. д., если их вставить в формулу, могли бы дать продолжение сериям в других невидимых областях, и быстро было установлено, что так оно и есть. Вскоре выяснилось, что модифицированную формулу

Бальмера можно распространить на другие атомы, а спектры в некоторых случаях оказались наложением членов бальмеровскоподобных серий, поддающихся сортировке и отождествлению.

Теперь, не говоря уже о более сложных атомах, само существование линейчатого спектра любого вида даже для простейшего атома — атома водорода — стало неустранимой трудностью для классической электромагнитной теории, бросающей тень на успехи этой теории в объяснении других явлений. Данные спектроскопии должны были бы звучать для этой теории как сигналы бедствия, но этого не произошло из-за ажиотажа, вызванного отождествлением атомов на Солнце и звездах и обнаружением водородоподобных серий в сложных спектрах других элементов, ибо эти события сами по себе были победами. Когда в конце XIX в. был открыт электрон, сторонники электромагнитной теории надеялись, что движением электрона внутри атома удастся объяснить существование линейчатого спектра и, может быть, бальмеровских серий. Тем не менее эта надежда была обречена на провал даже для простейшего атома водорода. Сначала думали, что длины волн спектральных линий могут появляться как «более высокие гармоники» — обертоны — осциллирующих внутри атома электронов, но этот подход не оправдал себя. Затем были надежды на успех, когда в 1911 г. Резерфорд в Манчестере предложил ядерную модель атома, но первые же попытки объяснить с ее помощью спектры также потерпели неудачу.

До Резерфорда, поскольку было установлено, что масса электрона составляет лишь небольшую долю массы атома водорода, разумно было считать, что атом в основном состоит из положительно заряженного вещества с маленьким электроном (или электронами); погруженным в это основное ядро. Опыты Резерфорда по прохождению радиоактивных «снарядов» сквозь атомы заставили его прийти к иному выводу. Он предложил знаменитую модель строения атома, являющуюся теперь одной из основ физики. По этой модели атом напоминает своего рода солнечную систему с небольшим чрезвычайно плотным электрически заряженным ядром. Ядро окружено планетарными электронами, вращающимися на некотором расстоянии

по орбитам вокруг ядра, как думал Резерфорд. Затем он привел доказательства, из которых следовало, что атом действительно должен быть таким; однако такая модель в целом представляла мучительную трудность для электромагнитной теории.

Согласно модели Резерфорда, водород состоит из одной положительной ядерной частицы — протона и одной отрицательно заряженной частицы — электрона, вращающегося вокруг протона. Можно доказать, что большая часть этого атома составляет пустое пространство, так как «диаметр» протона равен всего  $1/10\,000$  диаметра атома в целом, т. е. по существу диаметром атома является диаметр орбиты, по которой, как предполагали, обращается электрон. Поскольку почти вся масса сконцентрирована в протоне (масса электрона составляет всего  $1/1847$  массы протона) и эта ядерная единица имеет весьма малый диаметр по сравнению с атомом в целом, то оказывается, что плотность вещества в ядре необычайно велика, что-нибудь в сто тысяч миллионов раз больше плотности воды. Если бы можно было собрать в одном кубическом сантиметре сплошную ядерную материю, он весил бы сотни тысяч тонн. Забавно, однако, что трудность электромагнитной теории была не в этом и касалась она вопроса устойчивости и самого существования водорода.

Согласно принятой в XIX в. электромагнитной теории движущихся электронов (уже успешно предсказавшей существование радиоволн), в атоме водорода электрон, движущийся вокруг протона, обязательно должен излучать электромагнитные волны. Однако, излучая, он теряет энергию, и поэтому его круговая орбита должна переходить в спираль, закручивающуюся внутрь. Как следствие этого теория предсказывала, что электрон должен был бы излучать не отдельные линии, а постепенно изменяющийся *непрерывный спектр*. Но еще хуже здесь то, что отрицательно заряженный электрон двигался бы по спирали внутрь до тех пор, пока не встретился бы с положительно заряженным протоном; тогда оба заряда взаимно уничтожили бы друг друга и атом водорода исчез бы. Конечно, мы знаем, что водород все же существует, а не исчезает, и мы знаем также, что он излучает *бальмеровский линейчатый спектр*, а не *сплошной*.

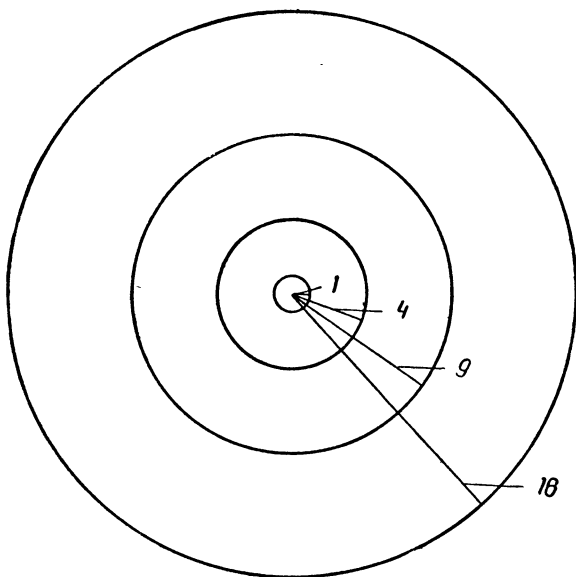
Здесь мы еще раз встретились с привычными уже нам противоречиями в классической электромагнитной теории, и ясно, что для выхода из этих трудностей потребовался квантовый подход. Решение вопроса было найдено в 1913 г. Нильсом Бором, работавшим в то время под руководством Резерфорда в Манчестере.

### Атом Бора

Бор взял за основу атом Резерфорда и подогнал его к квантовым представлениям, создав тем самым современную схему строения атома, хотя с тех пор многое уже изменилось. Бор высказал три новые идеи. Чтобы преодолеть трудность с излучением и движением по спирали, он, во-первых, постулировал, что в атоме существует определенное число электронных орбит, названных им *стационарными состояниями*. В любом стационарном состоянии (их может быть много, но число их ограничено определенными правилами) электрон может вращаться сколь угодно долго, совсем не излучая. Заметим, что это радикальное предположение по существу не имело объяснения. Оно постулировалось произвольно и заведомо противоречило классической электромагнитной теории. Затем, во-вторых, он постулировал, что электрон может быть ударом выбит из нижнего стационарного состояния, являющегося нормальным состоянием, в энергетически более высокое, которое Бор назвал возбужденным. При этом электрон увеличивает свою энергию. Через непродолжительное время электрон возвращается обратно в нормальное состояние, и при этом избыток энергии (разность между энергиями двух стационарных состояний) излучается в виде отдельного фотона. В-третьих, он предположил, что величина, называемая моментом импульса электрона на стационарной орбите, должна быть кратной той самой постоянной Планка, которая появлялась и в тепловом излучении и в фотоэффекте.

Сделав эти предположения, Бор не только получил теоретически формулу Бальмера, но — что гораздо более поразительно — из простой динамики вращения электрона в этих предполагаемых стационарных со-

стояниях, зная массу электрона, он вывел точные значения длин волн бальмеровских линий. Кроме того, он предсказал другие серии, которые вскоре были обнаружены. Затем путем небольшой модификации была построена модель следующего по сложности атома — атома гелия, и вскоре было найдено, что его модель соответствует наблюдениям с самой высокой степенью точности.



Р и с. 8.

Теория Бора была триумфом вдохновения и гениальности. Можно было не только определять энергии вероятных последовательных орбит, которые приводили к формуле Бальмера; теория пошла дальше и позволила построить пространственную геометрическую картину водородного атома. Бор доказал, что возможные последовательные стационарные орбиты расположены в соответствии с моделью, показанной на рис. 8. Эта геометрическая модель имеет неожиданно интересное соотношение диаметров орбит, так как оказалось, что

эти диаметры пропорциональны квадратам чисел натурального ряда. Диаметр первой орбиты является диаметром обычного невозбужденного атома водорода. Поэтому еще одним триумфом Бора было то, что его теория дала для диаметра атома величину, которая была приближенно получена другими методами. Сегодня мы принимаем результат Бора за точную величину, рассматривая другие как приближенные. Оказалось, что диаметр первой орбиты почти точно равен  $1 \text{ \AA}$ . Диаметры последующих орбит равны 4, 9,  $16 \text{ \AA}$  и т. д. ( $2^2$ ,  $3^2$ ,  $4^2$  и т. д.). Именно здесь впервые выявилась пространственная картина внутриатомного строения.

Скоро метод Бора стали широко применять к другим спектрам и другим атомам. Хотя в наши дни уточненная трактовка и модификация в значительной мере заменили первоначальное боровское приближение и увели спектроскопистов далеко от простой боровской модели образца 1913 г., тем не менее идеи Бора очень полезны для объяснения спектров и находят повседневное применение в практической спектроскопии, хотя этим идеям сейчас уже более полувека. Сейчас мы знаем, что в составе всех атомов есть группы электронов, занимающих стационарные состояния. Современные воззрения заменили представления об электроне, как о своего рода «бильярдном шаре», представлениями об электронном «облаке», но идея о переходе электрона с одной орбиты на другую и излучения вслед за тем одного фотона при переходе электрона обратно осталась по-прежнему в силе.

Читателю не следует впадать в ошибку, свойственную учащимся, думающим, что один атом водорода может излучать всю бальмеровскую серию. Это не так. При одном электронном переходе испускается только один фотон, а не весь спектр. Когда мы имеем набор атомов, то некоторые излучают один определенный фотон, иные — другой. Если мы вновь обратимся к рис. 8, то увидим, что при определенных обстоятельствах электрон может переходить на разные орбиты. Вследствие этого в наборе атомов водорода некоторые электроны могут перейти на вторую орбиту. Другие — на третью орбиту и т. д. Набор атомов как целое излучает весь спектр. Некоторые электронные переходы

теоретически более вероятны, чем другие; при этом вероятности находятся в очень точном соотношении. Поэтому от группы атомов исходит набор отдельных линий различных интенсивностей, которые подчинены определенным правилам и могут быть предвычислены.

Каждый вид атомов в природе, согласно расположению и характеристикам орбит их стационарного состояния, излучает свою собственную особую группу спектральных линий. В настоящее время связь между спектром и внутренним строением известна настолько надежно, что по одному только спектру можно полностью разгадать структуру многих сложных атомов.

### **Спектроскопия в промышленности**

Боровская теория атомных спектров широко использовалась для исследования молекулярных соединений, образуемых атомами при химических взаимодействиях. Когда атомы, соединяясь, образуют молекулы, их электронные оболочки взаимодействуют, создавая общие орбиты вокруг групп ядер. Такие химические соединения также можно заставить испускать или поглощать спектральные линии. Из анализа получающихся при этом сложных спектров извлекаются важные сведения о положении ядер, о силах, необходимых для их разделения, и энергетических состояниях, занимаемых общими электронами. Молекулярная спектроскопия стала одним из самых мощных аналитических средств, доступных химикам, при анализе атомных группировок внутри сложных молекул. Спектроскопия во многих случаях оказывается полезной, дополняя известные геометрические модели числовыми значениями, поскольку из детального анализа молекулярных спектров можно получить точные расстояния между атомами.

Многие молекулярные спектры лежат в инфракрасной области, и необходимость их исследования оказала за последние годы заметное влияние на разработку соответствующих приборов. Оптическая промышленность революционизировала инфракрасную спектральную технику и довела ее до такого уровня, что то, что прежде считалось тонким исследованием, ныне стало самым обычным делом даже на заводах.

Вплоть до самого недавнего времени инфракрасная молекулярная спектроскопия была отраслью исследования, доступной лишь энтузиастам с умелыми руками. Требовались совершенно особые инфракрасные источники, применявшиеся спектральные приборы были трудны в обращении, а обнаружение и регистрация спектров требовали такого умения, которым обладали немногие. Теперь все изменилось. Мощные автоматические саморегистрирующие инфракрасные спектрометры стоят, конечно, дорого, но их можно купить. С ними может с успехом работать лаборант без высшего образования. Применения спектроскопии обширны и растут день ото дня. Чтобы ограничиться одним примером, рассмотрим целлюлозу и ее производные. Инфракрасные спектры волокнистых целлюлозных материалов и их использование в производственных процессах стали в настоящее время обычными в промышленности. По спектрам родственных соединений, таких, как многочисленные углеводы и сахара, можно контролировать концентрации и ход реакции. В помощь быстрому отождествлению отдельных молекул опубликованы обширные спектральные атласы.

Параллельно возникновению промышленной инфракрасной спектроскопии развивалась в равной мере важная промышленная ультрафиолетовая спектроскопия. Многие существенные для промышленности соединения, когда они растворены в таких растворителях, как хлороформ или спирт, могут закономерным образом поглощать ультрафиолетовый свет, обнаруживая пики поглощения на различных длинах волн соответственно своему молекулярному составу. Тем самым ультрафиолетовый спектр приобретает диагностическую значимость как аналитический метод довольно быстрого и точного отождествления соединений. В пищевой промышленности, при очистке бензина, в производстве синтетических материалов и резины такая методика недавно нашла многочисленные применения.

Промышленная спектроскопия на металлургических заводах, в литейном и кузнечном производстве существует уже в течение полувека и продолжает оставаться существенным элементом стандартного контроля. Но и здесь автоматика произвела революцию в технике. Если пропустить электрическую искру или дугу

между двумя кусками металла, то спектроскопический анализ света искры дает специалисту ясное представление о концентрациях веществ, входящих в состав сплава. Стало обычным делом подвергать анализу образцы литья для обнаружения вкраплений олова, мышьяка, свинца и других веществ. Этот метод имеет также большое значение для оценки содержания минералов, присутствующих в небольших количествах в образцах горных пород (например, золота или урана).

## РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ

### Эффект Допплера

Естественно было бы ожидать, что следствием новых приложений квантовой и фотонной оптики явятся революционные открытия в оптике, но в действительности это далеко не так. Замечательной особенностью оптики является то, что много фундаментальных открытий в физике совершается благодаря разумному использованию старых классических методов волновой оптики, примененной соответствующим образом. Когда мы завершим обозрение предмета, вы, конечно, согласитесь с тем, что ни в какой области наших знаний нет более волнующей темы, чем теория расширяющейся Вселенной; тем не менее эта теория в самой своей основе базируется на прямых оптических исследованиях явления, открытого в XIX в. и названного *эффектом Допплера*. Этот эффект был описан в 1842 г. немецким физиком Допплером в связи со свойствами звуковых волн.

Каждый, кто стоял у шлагбаума, пережидая скорый поезд, который, проходя мимо, подает сигнал, наверняка заметил, что, когда поезд приближается, его гудок имеет определенную высоту звука, а когда удаляется, высота звука гудка падает, может быть, на целый музыкальный тон и даже больше. Это и есть эффект Допплера. Объяснение его несложно. Предположим, что поезд проходит 72 км в час, а его гудок соответствует частоте 280 колебаний в секунду, т. е. ноте «до диез». Из-за движения поезда сам гудок догоняет звуковую волну, которая была им испущена ранее. Звук проходит 1080 км в час, т. е. примерно в 15 раз быстрее движения поезда. Так как поезд движется со скоростью примерно  $1/15$  скорости звука, звуковые волны догоняются именно на эту долю, и ухо принимает не 280, а около 298 колебаний в секунду, что совсем близко к более высокой ноте «ре», которая на полтона выше фактически звучащей ноты «до

диез». Подобным же образом, когда поезд уже прошел мимо наблюдателя и удаляется, наблюдатель слышит около 263 колебаний в секунду, что близко к более низкой ноте «до», т. е. на полтона ниже фактической ноты. Следовательно, при проходе поезда мимо наблюдателя ему кажется, что высота звука упала на целый тон.

Из приведенного выше расчета следует, что если мы все же знаем, что действительная высота тона «до диез» и можем измерить кажущуюся высоту тона, когда поезд приближается или когда он удаляется, то очень просто вычислить скорость поезда; она просто получается из изменения высоты тона.

Теперь точно такую же идею можно применить к световым волнам, но поскольку свет проходит 300 000 км/сек, можно обнаружить эффект Доплера только для световых волн, испускаемых объектами, движущимися с очень большой скоростью. (Даже скорости космических ракет приближаются всего лишь к 10 км/сек.) Однако оказывается, что астрономические тела действительно имеют большие скорости. Даже Земля несется по своей орбите с заслуживающей уважение скоростью 30 км/сек (свыше 100 000 км/час!). Это составляет около одной десяти тысячной скорости света. Если звезда движется к нам или от нас со скоростью такого порядка, длины волн спектральных линий, доходя до нас, будут меняться соответственно на эту небольшую часть. Астроному совсем нетрудно измерить такое небольшое изменение длины волны. Итак, наведя спектроскоп на звезду и отождествив спектральные линии, принадлежащие различным атомам (простое и доступное каждому наблюдение), затем сравнив найденные длины волн с длинами волн тех же атомов на Земле в лаборатории, совсем уж нетрудно обнаружить и измерить скорости приближения или удаления звезды *по лучу зрения*. Неважно, в частности, далеко ли от нас звезда, ее скорость по лучу зрения всегда дает соответствующий эффект. Если звезда столь далека, что кажется неподвижной даже в самые крупные телескопы, всякое перемещение по лучу зрения будет тотчас же обнаружено индикатором — эффектом Доплера — по изменению длин волн линий в спектре.

## Расстояния галактик

Теперь мы расскажем, как выполненные недавно исследования эффекта Доплера в спектрах небесных тел привели к одной из самых волнующих концепций современной физики — к представлению о расширяющейся Вселенной. Продолжительное изучение неба при помощи гигантских телескопов, особенно в обсерваториях США, приучило нас к мысли о существовании огромного числа громадных островных вселенных, каждая из которых, возможно, состоит из миллионов звезд, сравнимых по размерам с нашим собственным Солнцем (которое по объему превосходит объем Земли более чем в миллион раз). Эти громадные островные вселенные мы называем *галактиками*. Из тщательнейшего исследования этих галактик, число которых огромно, американские астрономы Слайфер и Хаббл сделали поразительные открытия. Солнце с относящимися к нему планетами входит в состав одной из таких галактик, так как в действительности то огромное скопление звезд, которое мы называем Млечным Путем, как раз и является центральной частью нашей Галактики.

Многие галактики находятся от нас на фантастически огромных расстояниях. Расстояния в астрономии, раз уж мы вышли за пределы солнечной системы, настолько необъятны, что на практике принято их выражать в *световых годах*. Световой год — это то расстояние, которое свет может пройти за один год; приблизительно оно равно 9 600 000 000 000 км! Ближайшая к нам звезда находится от нас на расстоянии порядка 4 световых лет. С другой стороны, некоторые галактики, расстояния которых были оценены Хабблом, настолько далеки, что нужно не менее 350 млн. лет, чтобы совершить этот скачок.

Не удивительно ли, что, когда мы смотрим на такую галактику сегодня, мы видим ее не такой, какова она сейчас, но такой, какой она была 350 млн. лет назад! Должно быть, еще больше галактик, гораздо более далеких от нас. Расстояние 350 млн. световых лет равно 3 600 000 000 000 000 000 000 км.

Все это звучит столь невероятно, что может возникнуть вопрос, как можно точно угадать такие рас-

стояния, а тем более измерить их! Как ни странно, но данные измерений таких расстояний, по-видимому, удивительно надежны, как это будет видно из дальнейшего.

Расстояния более близких звезд можно измерять триангуляционным методом, используемым при полевых съемках, когда хотят найти расстояние до какого-то предмета. Геодезист при помощи рулетки измеряет базисную линию. Затем от каждого конца этой линии с помощью теодолита он тщательно измеряет угол между базисом и направлением на объект. По длине базиса и двум углам очень нетрудно вычислить расстояние от предмета до наблюдателя. Если предмет находится далеко, необходимо пользоваться длинным базисом, в противном случае будет очень мала разность между углами, измеряемыми с двух концов базиса, т. е. угловое смещение объекта, или, как его называют, *параллакс*. Если у нас есть очень большая базисная линия, то мы можем точно оценивать расстояния очень далеких объектов, если только их можно видеть.

Что касается астрономических измерений, то в нашем распоряжении действительно имеется довольно внушительный базис, длина которого известна. Это диаметр орбиты Земли при ее движении вокруг Солнца. Он составляет около 290 млн. км. Если мы сегодня измерим видимое направление на довольно близкую звезду, а затем снова измерим его через 6 месяцев, т. е. когда мы перенесемся на противоположную сторону земной орбиты, то при условии достаточной близости к нам звезды мы обнаружим небольшую разницу в ее видимом положении, т. е. небольшой параллакс. По величине параллакса и известной длине базиса нетрудно вычислить расстояние звезды. Этим методом были определены расстояния многих звезд, но в огромном большинстве небесные объекты слишком далеки от нас даже при таком громадном базисе, как диаметр земной орбиты, чтобы выявить хотя бы самый небольшой параллакс. Откуда же тогда мы знаем что-либо о расстояниях этих необозримо далеких галактик, для которых нет даже ни малейшего шанса обнаружить какие-либо параллактические эффекты? Ответ опирается на еще одно любопытное приложение оптики.

Все видимые звездные объекты имеют определенную измеримую яркость, которую астрономы называют *звездной величиной*. Эта яркость, т. е. то, что мы действительно видим, зависит от двух причин: во-первых, от истинной присущей объекту яркости и, во-вторых, от его расстояния от нас, так как, очевидно, чем дальше от нас объект, тем более слабым он кажется. Теперь, если мы измерим звездную величину (*видимую яркость*) и каким-то образом сможем найти метод оценки *истинной* присущей объекту яркости, то сочетание этих двух фактов дает нам возможность оценить, как далеко от нас находится объект. Ибо очевидно, что, если мы будем отодвигать лампу известной яркости все дальше и дальше, она будет постепенно выглядеть все менее яркой, т. е. ее звездная величина убывает. Таким образом, измерение видимой яркости и знание истинной, свойственной объекту яркости совместно дают нам расстояние. Очевидно, мы можем без труда измерить звездную величину далекой галактики, даже если она слаба. Задача состоит в том, чтобы получить ее собственную истинную яркость. Если мы сможем ее найти, мы разрешим задачу оценки расстояния.

Был найден замечательный ключ к решению этой задачи. Он был получен неожиданно из открытия, относящегося к переменным звездам особого рода, называемым *цефеидами*, которые в большом количестве щедро разбросаны по небу и наблюдаются также во многих галактиках. Звезды этого типа, по-видимому, регулярно пульсируют, причем таким образом, что их интенсивность (звездная величина) изменяется регулярно и плавно на протяжении определенного периода времени. Яркость таких переменных звезд возрастает и убывает по совершенно определенному закону. Многие из этих переменных звезд находятся достаточно близко к Земле, что позволяет измерить их расстояния по параллаксу. А раз их истинные расстояния известны, то из наблюдаемых видимых яркостей (звездных величин) можно теперь надежно получить их истинные яркости. Из таких исследований было сделано одно из самых замечательных открытий. Было обнаружено, что период изменения видимой яркости цефеид зависит от истинной присущей данной звезде

яркости. Само небо как бы послало нам явление для измерения расстояний многих небесных объектов.

Предположим (а во многих случаях так оно и есть), в галактике имеется переменная звезда. Она может быть очень слабой из-за большого расстояния, но это не мешает измерять периоды изменений ее яркости, что можно сделать довольно точно. Зная величину периода и уже установленную зависимость между периодом и истинной яркостью, мы немедленно узнаем истинную яркость этой переменной звезды. Но если мы теперь определим ее звездную величину, то, комбинируя истинную и видимую яркости, мы найдем истинное расстояние галактики, содержащей данную переменную. Именно при помощи этого остроумного оптического метода были вычислены баснословные расстояния многих туманностей. Метод этот сложный и трудоемкий, но тем не менее существуют очень веские основания относиться к нему с полным доверием.

### **Красное смещение и расширяющаяся Вселенная**

Теперь мы подходим к замечательным исследованиям, проведенным Хабблом на одном из самых крупных телескопов США. Направляя спектроскоп, соединенный с этим телескопом, на галактики, он обнаружил, что в каждом случае спектр был обычным, но весь он как целое без изменений в деталях был сдвинут к красному концу спектра.

Единственным разумным объяснением было предположить, что это хорошо выраженный эффект Доплера, обусловленный движением галактик от нас с очень большой скоростью. Но это было не все, ибо Хаббл сделал еще два удивительных открытия. Во-первых, он обнаружил, что все галактики удалялись от нас. Ни одна не приближалась к нам, хотя изучались многие. Во-вторых, он открыл, и это было в равной мере удивительно, что скорость удаления росла пропорционально расстоянию. Чем дальше от нас галактики, тем быстрее они движутся. В то время как некоторые из более близких галактик движутся медленно (в единицах скорости световых волн), другие, находящиеся на огромном расстоянии в 10 млн. световых лет, несутся от нас с удивительной скоростью

1600 км/сек. Затем, как будто этого было недостаточно, Хаббл удалось исследовать пространство на огромную глубину в 350 млн. световых лет, где одна из галактик имеет столь большой эффект доплеровского смещения, что она должна уноситься от нас со скоростью не менее 60 000 км/сек, что составляет одну пятую самой скорости света. Действительно, все детали спектра были сдвинуты как целое примерно на пятую часть своих длин волн, так что линия, которая на Земле, скажем, была зеленой, в спектре этой туманности была совсем красной. Спектральные линии появляются в характерных группировках, поэтому их отождествление вполне однозначно. Все групповые детали как целое были смещены к красному концу спектра.

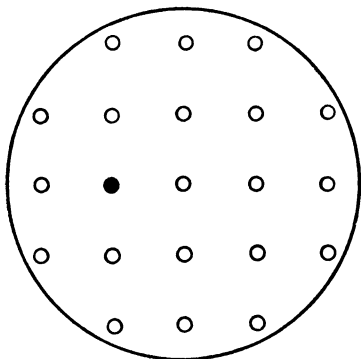
Эти открытия были столь неожиданными, что принималось несколько попыток объяснить красное смещение. По-видимому, однако, единственное удовлетворительное объяснение для красного смещения — доплеровский эффект. В одной теории было высказано предположение, что огромное межзвездное пространство заполнено совсем разреженной материей и, пока свет от звезды доходит до нас, повторные столкновения света с разреженной материей приводят к небольшим потерям энергии света. Свет, теряющий энергию, сдвигается к красному концу спектра. Величина смещения зависит от величины пройденного пути, так что, чем дальше источник света, тем краснее принимаемый от него свет.

Эта теория связана с некоторыми трудностями. Как объяснить, почему эффект должен быть одинаковым для всех длин волн в спектре? Давно известно, что рассеяние света атомами сильно зависит от длины световой волны. Такой эффект рассеяния должен был бы возрасти на синем конце спектра, а этого не наблюдается.

Другое предположение состоит в том, что пространство само постепенно меняет свои свойства. Допускается, что изменение длин волн обусловлено гигантским интервалом времени, в котором разворачиваются события; что вследствие какого-то изменения Вселенной длины волн, скажем, миллион лет назад отличались от сегодняшних длин волн. Поскольку чем дальше находится от нас звезда, тем ранее по времени

было послано ее излучение, этим можно было бы объяснить увеличение эффекта с расстоянием. Может быть, что-то в этом духе и есть, но, конечно, теорию такого рода почти невозможно доказать.

Необычные открытия Хаббла на первый взгляд выглядят абсурдом. Почему все должно уходить от нас? Конечно, никто и не собирается всерьез думать, что спектроскоп д-ра Хаббла находится точно в центре всей Вселенной. И все-таки если это не так, то как



Р и с. 9.

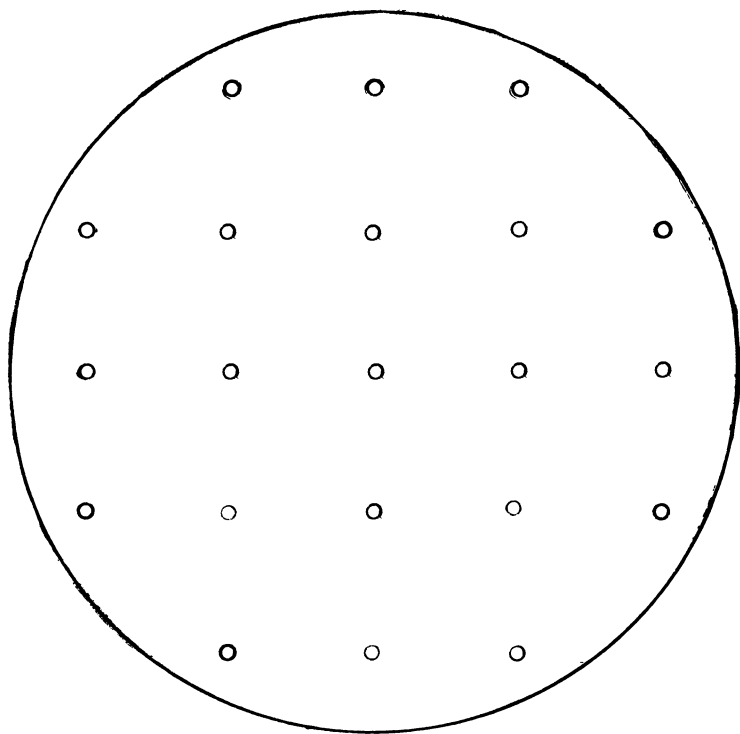
же получается, что все галактики разбегаются от этой точки? И каков этот загадочный механизм, который заставляет галактики разлетаться все быстрее пропорционально увеличению расстояния от нас?

Одно замечательное и глубокое решение было найдено в основном благодаря работе де Ситтера и Эйнштейна. Было высказано предположение, что вся Вселенная стационарно расширяется \*. Давайте посмотрим, как это предположение снимает возникшие трудности. Представим себе, что у нас есть игрушечный воздушный шар, который мы можем надуть, как показано на рис. 9. Пусть на его поверхности будет нарисовано несколько равноотстоящих белых кружков. Будем считать, что они представляют собой галактики. Пусть один из кружков, неважно какой, будет черным, и пусть он изображает Землю. Будем теперь непрерывно

---

\* Впервые этот вывод из теории Эйнштейна был сделан советским ученым А. А. Фридманом. — *Прим. ред.*

надувать шар (рис. 10). И что же мы обнаружим? Расстояния между точками возрастают, и все они кажутся удаляющимися друг от друга. Предположим теперь, что мы находимся на черном кружке, тогда мы увидим, что все белые кружки удаляются от нас и ни один не приближается к нам. Более того, в то



Р и с. 10.

время как самые ближайшие кружки раздвигаются с некоторой определенной скоростью, кружки, находящиеся дальше от нас, расходятся гораздо быстрее. Скорость расхождения пропорциональна расстояниям кружков от черного кружка. Эта модель точно воспроизводит то, что было обнаружено во Вселенной. Если реальная Вселенная расширяется с постоянной скоростью, как наша модель надувного шара, то все объекты должны

двигаться от нас, а скорости удаления должны быть пропорциональны их расстояниям от нас. Эта аналогия очень хорошо объясняет любопытные открытия, сделанные Хабблом.

Тем не менее теперь мы уже оказались вовлеченными в действительно грандиозную и трудную философскую проблему, которая состоит в следующем. Если Вселенная расширяется, то ее размеры день за днем увеличиваются. Но если мы пойдем по времени *назад* — к вчерашнему дню, позавчерашнему и так далее день за днем обратно, то Вселенная должна становиться постепенно все меньше и меньше. Очевидно, что если мы отойдем обратно достаточно далеко, то наступит момент, когда все звезды окажутся объединенными в одно гигантское тело — своего рода сверхзвезду, содержащую всю массу Вселенной. Наша Земля весит 6 000 000 000 000 000 000 тонн. Средняя звезда, подобная Солнцу, примерно в триста тысяч раз тяжелее Земли, а что можно сказать о всей массе миллионов миллионов звезд в просторах космоса!

Должны ли мы в таком случае действительно датировать начало существования нашей Вселенной? Бельгийский астроном аббат Леметр, опираясь на свойства решений эйнштейновских уравнений тяготения, примененных ко всей наблюдаемой Вселенной, высказал следующую догадку. Он предположил, что наряду с обычной ньютоновской силой гравитационного *притяжения* материи, существует также дополнительная небольшая сила взаимного *отталкивания* частиц. Он назвал ее космическим отталкиванием. Влияние космического отталкивания начинает сказываться, когда расстояния объектов все более возрастают, так что сила притяжения резко уменьшается. Таким образом, пока расстояния так называемые «обычные» астрономические (из-за недостатка лучшего слова), доминирует притяжение; наоборот, при «сверхрасстояниях» преобладает эффект отталкивания. Эта гипотетическая сила отталкивания является причиной наблюдаемого расширения Вселенной.

Далее Леметр утверждает, что если отступить назад во времени достаточно далеко, то вся громадная масса вещества космоса должна была существовать в *форме* одного-единственного сверхъядра. Время, необходимое

для возврата к такому состоянию, различно при разных предположениях, положенных в основу вычислений, и составляет 60 000—10 000 млн. лет. Подобное ядро должно было быть столь плотным, столь наполненным энергией и столь неимоверно горячим, что оно неизбежно должно было взорваться и распасться. Этот взрыв разбросал вещество на расстояния, достаточные для того, чтобы начало действовать космическое отталкивание так, как оно действует сегодня. Наблюдаемое расширение — «остатки» этого первоначального взрыва.

Если Леметр прав, мы попадаем в совершенно исключительную ситуацию, ибо оказываемся в состоянии указать момент возникновения нашей Вселенной. Безусловно, это звучит несколько самоуверенно. К счастью, существует уже по крайней мере одна поразительная теория, которая вновь возвращает нас, так сказать, с небес на Землю. В этой теории предполагается, что мы живем во Вселенной, которая не просто расширяется, а *пульсирует* (осциллирует) и сейчас находится в фазе расширения. Предполагается, что эта грандиозная пульсирующая система имеет период колебаний порядка 10 000 млн. лет. После завершения нынешней фазы расширения начнется обратный процесс сжатия. И хотя на одно колебание в одном направлении затрачиваются 10 000 млн. лет, вполне возможно, что Вселенная может продолжать пульсировать миллионы раз. В равной степени возможно, что ее пульсации уже совершали бесчисленное число раз, до того как она достигла своего нынешнего состояния. Таким образом, согласно этой концепции, вопрос о времени возникновения Вселенной попросту не возникает. Итак, дата «рождения Вселенной» опять ускользает от нас, и космологи могут жить спокойно — они по-прежнему имеют достойную задачу для многих грядущих поколений. Мы же вернулись к тому, с чего начали, и как это ни удивительно, но мы все еще ничего не знаем о том, как и когда все это началось или когда кончится.

Если теория пульсирующей Вселенной верна, то тогда после замедления расширения наступит сжатие, и забавно подумать, что будущие астрономы (в очень туманном и далеком будущем) будут свидетелями *голубого* доплеровского смещения вместо существующего *красного*. Человечество столкнется тогда с ужасным

зрелищем, как вся Вселенная неумолимо мчится к Земле. Замечательно, и с этим нельзя, не согласиться, что такие поразительные космические концепции появляются из совершенно обычных оптических исследований длин волн и интенсивностей света, испускаемого небесными объектами. Лет десять назад предложена новая модель — странные идеи, называемые *теорией стационарной Вселенной и непрерывного рождения материи*, которые вызвали среди астрономов ожесточенную полемику.

### **Стационарная Вселенная и «непрерывное рождение материи»**

Эта теория, выдвинутая лет двадцать назад тремя английскими астрономами — Хойлом, Бонди и Голдом, базируется на постулате, согласно которому Вселенной в целом присуще равномерное распределение вещества — звезд, галактик и т. д. Поскольку наблюдаемое красное смещение указывает, что все галактики разбегаются, то для поддержания однородности распределения галактик выдвигалась гипотеза, согласно которой для компенсации расширения все время происходит образование новых галактик.

Астрономы уже довольно хорошо представляют ход развития галактик из первичной материи. В небесах достаточно свидетельских показаний самих галактик: они находятся на разных стадиях развития, что дает возможность составить представление о ходе их развития. По-видимому, можно утверждать, что галактики начинают свой жизненный путь в виде очень больших пространственных скоплений водородных атомов — простейших среди атомов. Радионаблюдения и другие данные указывают на то, что в межзвездном пространстве много водорода. Благодаря возникновению местных флуктуаций плотности материи и главным образом благодаря гравитационному притяжению, продолжавшемуся достаточно долго, водород конденсируется в огромные сгустки, а каждый сгусток в результате гравитационного сжатия, постепенно конденсируясь, формируется в звезду. Эти процессы приводят к необычайному повышению температуры — до многих миллионов градусов, а при таких температурах столкнове-

ния атомов водорода ведут к их слиянию, в результате которого образуются атомы гелия. Последние в свою очередь в ходе синтеза рождают все более и более сложные атомы, и таким образом появляется звезда.

Новая теория стационарной Вселенной для поддержания приблизительной пространственной однородности предполагает неизбежность постоянного возникновения новых галактик. Это означает, что в космическом пространстве постоянно образуются новые атомы водорода. В идее рождения вещества в космическом пространстве теоретически нет ничего невозможного. Из лабораторных экспериментов нам давно известно, что лучистая энергия (т. е. свет) при подходящих условиях может превращаться полностью в электроны и протоны, а последние и являются тем самым материалом, из которого построен водород. Громадные количества лучистой энергии испускаются в пространство бесчисленными миллионами горячих звезд, и этого достаточно для рождения заново огромных масс водорода.

Если эта теория правильна, то не расширение Вселенной порождает водородный баланс. Наоборот, естественное непрерывное рождение водорода, который в итоге навязывается галактикам, заставляет их разбегаться для поддержания однородного распределения материи. Как не похоже это на идею космического отталкивания Леметра! Сразу же возникает вопрос, существует ли какой-нибудь способ проверки этих конкурирующих гипотез. Но очевидно, и это никак не связано с данными космологическими теориями, что чем дальше от нас находится галактика в пространстве, тем соответственно к более отдаленному времени относится наше наблюдение, так как свет, который мы видим сейчас, отправился в свое путешествие давным-давно. Поэтому мы видим его не таким, каков он есть, а каким он был возможно, даже тысячи миллионов лет назад. Отсюда следует, что распределение галактик в пространстве, достаточно любопытное само по себе, дает нам также их распределение во времени. Если теория стационарной Вселенной верна, то распределение в далеком прошлом должно было быть столь же однородным, как и в более близкое нам время. Если же распределение неоднородно, теория стационарной Вселенной не может быть правильной.

Именно этим путем можно, по-видимому, найти определенное решение вопроса. К сожалению, как раз наши экспериментальные данные недостаточно надежны, хотя в будущем наблюдения такого рода смогут дать ответ на наш вопрос. Оказывается, что даже при удалении на 5000 млн. лет назад разница между распределением галактик ожидаемым из модели первичного взрыва, и распределением согласно теории стационарной Вселенной все еще слишком мала, чтобы ее можно было заметить. Требуется большая шкала времени, чем та, которой мы располагаем. Вспомним, что Хаббл продвинулся назад во времени на 350 млн. лет, — но для нашей цели это все же не годится. В 1958 г. гигантский телескоп на Маунт Паломар зарегистрировал один объект, удаленный от нас по времени на 850 млн. лет (скорость его удаления составляет не менее 46% скорости света). Но и этого расстояния еще недостаточно. Во всяком случае, чтобы исследовать распределение, нам нужно большее количество объектов. Кое-какой свет на этот спорный вопрос был пролит благодаря открытию радиозвезд.

### **Радиозвезды и квазары**

Благодаря широкому использованию радиолокационной техники, развившейся во время второй мировой войны, астрономия получила радиотелескопы. Это очень большие управляемые отражательные системы, в фокусе которых собирается космическое радиоизлучение. Поворачивая такое «блюдо» к какой-либо звездной области, удастся принимать радиосигналы и затем отождествлять в небе радиоисточники. Правда, вследствие ионизации верхних слоев атмосфера пропускает из космического пространства лишь определенные длины волн. Доступное для нас «радиоокно» дает возможность проходить волнам длиной примерно от 30 м до 1 см — область, для которой разработаны высокочувствительные приемники.

Способность любого телескопа раздельно «увидеть» два далеких объекта определяется как длиной волны, используемой при наблюдениях, т. е. длиной волны излучения, приходящего от объекта, так и диаметром (апертурой) линзы телескопа (или зеркала, если это

телескоп отражательного типа). Угол, под которым еще можно видеть раздельно (разрешить) два далеких объекта, равен примерно отношению длины волны к диаметру линзы (зеркала). Вот в чем одна из причин, почему зеркала астрономических телескопов делают как можно большей апертуры. Самый большой в мире \* телескоп на обсерватории Маунт Паломар имеет диаметр 5 м. Хотя поперечник гигантского зеркала радиотелескопа в Джодрелл Бэнк составляет 75 м (это массивное сооружение весит 2500 т), его разрешающая способность в наилучшей доступной длине волны 1 см все еще меньше тысячной доли разрешающей способности телескопа Маунт Паломар, и это потому, что используемые радиоволны в 20 000 раз длиннее световых волн. Но этого разрешения вполне достаточно, чтобы установить, что радиоизлучение на волне 21 см, идущее от атомов водорода, весьма широко распространено в космическом пространстве. Такие радиоисследования подтверждают, что водорода в межзвездном пространстве действительно очень много. Но, кроме этого, при использовании радиоварианта прославленного *звездного интерферометра* Майкельсона были найдены *радиозвезды*.

Примерно 50 лет назад Майкельсон в США изобрел остроумное устройство для оптических измерений диаметров некоторых ярких и близких звезд. Все звезды без исключения так далеки от нас, что даже при наблюдении с самыми большими телескопами самые близкие звезды остаются световыми точками с ненаблюдаемым диаметром. Тем не менее есть основания думать, что типичная звезда могла бы быть по крайней мере такой же большой, как наше Солнце, поперечник которого равен 1 390 000 км. Майкельсон, следуя предложению, сделанному в 1864 г. Физо, установил, что, поместив пару зеркал на расстоянии 6—9 м друг от друга на мачте над входным отверстием телескопа и объединяя световые волны, приходящие от звезды и отраженные вниз в телескоп от этих двух зеркал, можно создать эффект интерференции волн, исходящих от различных частей поверхности звезды. И как следствие

---

\* В настоящее время в СССР на Северном Кавказе устанавливается самый большой в мире телескоп с диаметром зеркала 6 м. — *Прим. перев.*

можно вычислить со значительной точностью диаметр далекой звезды, несмотря на тот факт, что сам диск звезды увидеть нельзя. Чем меньше угол, под которым «виден» диаметр, и чем больше длина волны, используемая для наблюдений, тем дальше приходится отодвигать друг от друга зеркала. С экспериментальной точки зрения очень трудно удержать устойчивые интерференционные эффекты для расстояний между зеркалами больше 15 м или около этого.

Установка таких больших протяженных зеркал вне телескопа оптически эквивалентна увеличению апертуры телескопа. Эта система, названная Майкельсоном звездным интерферометром, может работать и в радиодиапазоне, если есть два чашеобразных радиотелескопа, отстоящих очень далеко один от другого и связанных между собой так, чтобы объединять свои сигналы или прямо кабелем, или даже при помощи радиосвязи. Тогда система становится точным эквивалентом оптической системы Майкельсона. Многие радиоварианты этой основной идеи уже осуществлены и работают. Одна серия экспериментов была проведена с двумя большими приемными зеркалами, одно из которых находилось в Джодрелл Бэнк близ Манчестера, другое — в Малверне. Около 160 км разделяют эти два зеркала, образующие в совокупности внушительный звездный радиоинтерферометр. Расстояние таково, что для радиоволн длиной 1 см эта установка соответствует по разрешению оптическому интерферометру, зеркала которого разнесены на 45 м. С таким радиоинтерферометром достигается очень высокая точность для небесных радиоисточников, если они достаточно интенсивны. В настоящее время техника настолько продвинулась вперед, что можно отождествлять радиоисточники с особыми звездами. Их называют *радиозвездами*.

Первая особенность, представляющая интерес для космологических теорий и обнаруженная для радиозвезд, это более или менее однородное распределение их. Согласно теории стационарной Вселенной, их распределение должно бы изменяться во времени, ибо в более ранние времена распределение было более компактным (с учетом последующего расширения), а если распределение было однородным в давние времена, оно не может быть таковым в настоящее время. Затем

в 1951 г. Бааде в США отождествил несколько очень сильных радиоисточников со слабыми визуальными объектами. Каждый из этих слабых объектов, по-видимому, имеет большое красное смещение, а выведенные из величины красного смещения расстояния можно было уверенно оценить величиной порядка 700 млн. световых лет. К 1960 г. было четко отождествлено несколько сот аналогичных объектов. Затем в 1960 г. было сделано потрясающее открытие: некоторые из этих радиоисточников — действительно очень сильных объектов — были в каждом случае уверенно отождествлены с голубыми звездами в нашей собственной Галактике. Здесь обнаружилось любопытное противоречие: объект, входящий в состав нашей собственной Галактики, не может быть слишком далеким, и тем не менее для этих объектов обнаружены очень большие красные смещения, какие обычно бывают видны только у очень далеких объектов.

Эти сбившие всех с толку объекты называли квазизвездными радиоисточниками, или, сокращенно, *квазарами*. Некоторые квазары демонстрируют столь феноменально большое красное смещение в своих оптических спектрах, что если это смещение интерпретировать обычным образом как следствие разбегания, то таким квазарам следовало бы приписать скорость разбегания, составляющую 80% скорости света. Но тогда это означало бы, что, вероятно, эти объекты находятся от нас на расстоянии 1500 млн. световых лет. Это даже нелепее, чем кажется, ибо, наблюдая свет в возрасте 1500 млн. лет, мы могли бы утверждать, что действительный объект в настоящее время находится за пределами возможностей быть когда-либо увиденным человеком. Абсурдность еще возрастает, когда мы видим, что такие квазары, возможно, находятся в нашей собственной Галактике.

Едва ли квазары укладываются в обычную схему, а это наводит на подозрение, не действует ли здесь какой-то механизм, отличный от разбегания вследствие расширения. Возможно, атомы, испускающие свет, который мы регистрируем, движутся с колоссальными скоростями в каком-то сильном магнитном поле, и это является причиной красного смещения. Какова бы ни была эта причина, но с нашей современной точки зре-

ния, и особые характеристики квазаров, и распределение радиозвезд, по-видимому, вызывают сомнения в ценности теории стационарной Вселенной.

Поскольку мы уже достигли расстояний, для которых довольно уверенно можно считать, что скорости разбегания превышают половину скорости света, имеет смысл задать вопрос, что ждет нас в дальнейшем по мере сооружения все более и более крупных телескопов в стремлении проникнуть еще дальше. Ведь если объект будет столь далеким от нас, что будет двигаться со скоростью света, то мы никогда не сможем принять от него какие бы то ни было сигналы, не говоря уже о том, что, как оказывается, теория относительности накладывает некоторое ограничение на величину относительной скорости. Согласно этой теории, вместе со скоростью растет масса. Ни один объект не может достичь скорости света, самое большее — может приблизиться к ней, и при этом только с увеличением массы, которая по мере приближения к скорости света стремится стать бесконечно большой. Следовательно, подобная скорость недостижима. В любом случае можно заранее предвидеть, что объекты, перемещающиеся со скоростями, близкими к скорости света, при наблюдениях имели бы размытые очертания. Это значит, что, когда телескопы вырастут настолько, что смогут добираться до еще больших скоростей разбегания, четкость объектов, очевидно, ухудшится, а спектральные линии расширятся, и, как всегда, теория относительности наложит ограничение на наши наблюдения \*.

---

\* Читателя, интересующегося подробностями и более поздними данными, отсылаем к недавно вышедшей популярной книге В. Л. Гинзбурга «Современная астрофизика», изд-во «Наука», 1970. — *Прим. ред.*

## ЧАСТЬ II

---

### УСПЕХИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

#### ГЛАВА 4

#### НОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

##### Левенгук и последующие

В предыдущем разделе мы кратко рассказали о новейшем подходе к фундаментальной оптической теории, основанной главным образом на принятии и разработке квантово-фотонных концепций. Несмотря на революцию в оптическом мышлении, одновременно были достигнуты многочисленные поразительные успехи в конструировании оптических приборов целиком на основе классической волновой теории прошлого века. В этом разделе мы отчасти коснемся этих новых достижений, и прежде всего нового мощного подъема техники микроскопии.

История создания микроскопа в целом заняла немало времени. Весьма вероятно, что примерно в то же время, когда Ганс Липперсгейм изобрел в 1610 г. телескоп, он также изобрел и микроскоп. В 1665 г. Роберт Гук первым построил микроскоп в том виде, каким мы знаем его в наши дни, — с двумя линзами. Первая линза, называемая *объективом*, может давать довольно большое увеличение (часто в сотни раз), а следующая за ней вторая линза — *окуляр* может увеличивать первичное изображение еще раз в 20 или что-нибудь в этом роде, в результате возможно общее увеличение до 2000 раз.

Первые микроскопы XVII в. серьезно страдали от так называемой хроматической аберрации. Линза в каком-то смысле ведет себя как призма и вследствие этого добавляет к белому цвету различные цвета с различными положениями фокуса, что ведет к размытию изображения. Уже в 1665 г. Ньютон отметил эту трудность в связи с конструированием и *линзовых* телескопов и *линзовых* микроскопов. Одним из следствий

хроматической аберрации было то, что конструкторы стали пользоваться линзами малого диаметра. Это снижало их светособирательную способность, а также понижало возможность прибора разделять близкие детали; на оптическом языке — *разрешающая способность* была низкой.

Был, правда, один чудака-индивидуалист, который делал самые лучшие микроскопы, хотя его имя стоит особняком в общем ходе развития микроскопии. Это был голландский торговец мануфактурой Антони ван Левенгук (род. в 1632 г.), проживший всю жизнь в родном городе Дельфте, где он и умер в 1723 г. В отличие от своих современников он не пользовался двухлинзовым (сложным) микроскопом, а работал с одной маленькой линзочкой, которую он делал из небольшого стеклянного шарика, расплавляя стекло в пламени. Затем он придавал соответствующую кривизну поверхностям линзы, используя для этой цели небольшие шлифовальные приспособления, которые он сам сконструировал. Крохотная линзочка (она могла быть поперечником меньше миллиметра) закреплялась между двумя небольшими отверстиями в грубо сделанных металлических пластинках из меди или серебра. Подвергаемый проверке объект устанавливался в фокусе при помощи грубого винтового устройства, тогда как сама линза оставалась неподвижной. Левенгук сделал не менее 400 таких микроскопов с широким диапазоном увеличений, часто создавая отдельный микроскоп для определенного объекта, держа его непрерывно под линзой. После его смерти двадцать микроскопов перешли к Королевскому обществу, членом которого был Левенгук, но они куда-то загадочно исчезли, и следы их так никогда и не были обнаружены.

Левенгук сообщал об открытии таких мельчайших биологических объектов, как простейшие и бактерии, в которые он в то время едва поверил. Но, сообщая о своих безупречных наблюдениях Королевскому обществу, Левенгук письменно заверял результаты своих наблюдений голландскими властями Дельфта, которых он приглашал посмотреть на свои объекты и которые в замешательстве подписывали свидетельства, подтверждающие ценность его отчета. Не однажды Королевское общество посылало своих эмиссаров, чтобы те непосред-

ственно дали отчет об увиденном, и энтузиазм этих «соглядатаев» вынудил Королевское общество относиться с величайшим уважением ко всем сообщениям Левенгука.

Никто не мог делать линзы лучше Левенгука, а он упрямо отказывался открыть свой метод освещения, который, безусловно, играл существенную роль при некоторых наблюдениях и который другие не могли воспроизвести. В письмах он утверждал, что «хранит для себя одного и свои самые лучшие микроскопы, и свой особый способ наблюдения малых созданий». Возможно, Левенгук владел специальными методами освещения, которые позволяли ему отчетливо видеть его объекты. Ибо вновь и вновь в своих письмах он говорит, что не возражает дать микроскоп кому-либо из друзей или коллег, но отказывается раскрыть свой метод, как сделать объект ясно видимым. Возможно, что он открыл для себя так называемое «темнопольное» освещение — способ наблюдений, применяемый в наши дни, в котором используются специальные устройства, делающие слабые объекты ярко освещенными на темном фоне.

Покойный профессор Утрехтского университета ван Ситтерт демонстрировал мне необычные возможности микроскопов, находившихся в распоряжении Левенгука. К счастью, в университетском музее в Утрехте существует один полностью сохранившийся микроскоп Левенгука. (Возможно, что это микроскоп, описанный профессором Хартингом в Утрехте в 1850 г.)

Линза в настоящее время сильно поцарапана, тем не менее ее нынешние эксплуатационные качества все еще удивительны. С помощью этого микроскопа ван Ситтерт сфотографировал небольшой объект — диатомовую водоросль; полученная картина с увеличением в 300 раз показана на фото 1б. Зрелище просто изумительное. Линза может даже в таком состоянии четко разделить два объекта, находящиеся друг от друга на расстоянии всего  $1/7000$  см. Она вполне успешно выдерживает сравнение с современным хорошим 4-миллиметровым объективом микроскопа, который в сочетании с восьмикратно увеличивающим окуляром дает увеличение  $400\times$ . Если вспомнить, что, прежде чем были созданы современные линзы, были потрачены годы на искусные вычисления, нельзя не

признать, каким великолепным мастером был Левенгук. Во всяком случае, если поверить тому, что он писал о сохранении самого лучшего микроскопа для себя (а у нас нет ни малейшего основания сомневаться в этом), то весьма возможно, что современный микроскоп является всего лишь одним из посредственных творений, мимо которых он прошел. Левенгуковский «самый лучший» вполне мог быть гораздо лучше тех, которые мы считаем хорошими.

Своего искусства и мастерства Левенгук нам не передал, так что микроскоп, который развивался исторически, был не однолинзовый, а составной. Большим шагом вперед было открытие ахроматической линзы Джоном Доллондом в Лондоне в 1758 г. Мы коснемся этого вопроса ниже при обсуждении новейших оптических стекол. Здесь же достаточно упомянуть, что Доллонд в конце концов открыл, что сочетание линз, сделанных из различных сортов стекла, в большой мере (хотя и не полностью) исправляет хроматическую аберрацию. Это позволило использовать линзы с большими апертурами, и вскоре шаг за шагом микроскопы стали улучшаться.

К концу XIX в. сложный микроскоп уже достиг высокой степени совершенства. Тогда уже стали понимать, что качество микроскопа определяется четырьмя главными характеристиками: разрешающей способностью, увеличением, контрастом и рабочим расстоянием.

Прежде всего встал самый важный вопрос о разрешении, сводящийся к тому, насколько близко могут быть друг к другу объекты, чтобы их все еще можно было ясно видеть. Эта проблема изучалась итальянцем Амичи, немцем Аббе и англичанином Релеем. Было показано, что для получения наилучшего возможного разрешения пространство между наблюдаемым объектом и первой линзой (объективом) должно быть заполнено специальным маслом. Впервые было выяснено, что разрешение зависит главным образом от угла светового конуса, стягиваемого линзой объектива. На практике, чтобы получить очень широкоугольный конус, целесообразно иметь линзу с очень малым фокусным расстоянием, почти соприкасающуюся с объектом. Если же пространство между объектом и линзой заполнить жидкостью, подобной маслу, то стягиваемый линзой

световой конус заметно возрастает. Именно требование большого стягивающего конуса приводит к тому, что высокое разрешение можно получить только с короткофокусной линзой.

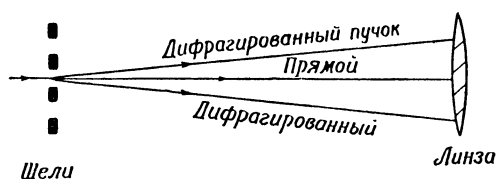
Как вычисления, так и наблюдения доказали, что наименьшее расстояние, на котором еще можно раздельно увидеть два близких объекта, даже с самыми лучшими линзами равно примерно половине длины световой волны, составляющей в зеленой области около  $1/40\,000$  см. Вследствие существования этого оптического ограничения, накладываемого на разрешение близких друг к другу объектов, практически бессмысленно использование микроскопа с увеличением, превышающим  $2000\times$ . Даже и это увеличение порождает так называемое «дугое увеличение» — всего лишь увеличение размера без выигрыша в деталях. К концу XIX в. предсказанные теоретические пределы как для разрешения, так и для реального увеличения были уже достигнуты.

Было установлено как теоретически, так и экспериментально, что разрешение микроскопа очень тесно связано с явлением, называемым *дифракцией*; впервые это явление было открыто Гримальди в XVII в. Когда свет проходит через узкую щель, некоторая доля его расходится в стороны, и чем уже щель, тем больше это растекание света во все стороны; когда ширину щели начинают уменьшать до размеров световой волны, свет растекается, охватывая почти весь полукруг вокруг щели.

Если объект будет состоять из большого числа близких друг к другу линий, то оптически это эквивалентно многим щелям, близким друг к другу. Вследствие этого дифрагированный свет концентрируется в определенных направлениях, зависящих от расстояния между линиями. Направим свет от линзы через полосатый предмет, тогда какая-то доля света пройдет насквозь, а другая отклонится от прямого направления в стороны. Эти внешние лучи пучка называются *дифракционным спектром*. Довольно забавно, и это было установлено Аббе совершенно надежно, что микроскоп обнаруживает детальную структуру такого объекта только в том случае, если апертура линзы микроскопа достаточно велика для того, чтобы перехватить дифрак-

ционные спектры, исходящие конусообразно от объекта. Если же спектры перехватить не удастся, то объект кажется равномерно освещенным, совершенно лишенным структуры. Схематически ход лучей показан на рис. 11.

Посмотрим через линзу умеренной апертуры на объект, состоящий из близких друг к другу параллельных линий (или щелей). Если линии или щели отстоят друг от друга на довольно большие расстояния, угол дифракционного конуса невелик, линза захватывает эти спектры и детали структуры разрешаются. Если же

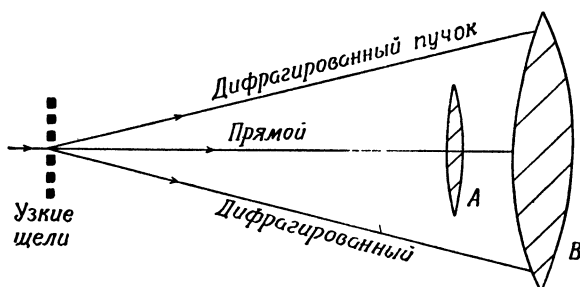


Р и с. 11.

линии наносятся все чаще и чаще, дифракционные спектры распределяются во все более широкоугольном конусе, пока при определенной близости линий спектрам уже не удастся попасть в линзу. Это и есть предел разрешения. Вплоть до этого момента щелевая или линейная природа объекта разрешается. Дальше уже разрешения нет, и линии нельзя видеть по отдельности, они перекрываются, и объект кажется однородным и лишенным структуры. На рис. 12 линза *A* не обнаруживает никаких деталей, для разрешения нужна такая линза, как *B*. Теперь ясно, зачем нужна большая апертура, если необходимо рассмотреть близкие друг к другу компоненты. Именно дифракция — причина того, что для объекта, состоящего из повторяющихся щелей, отстоящих только на полволны друг от друга, достигается предел разрешения. И никакое увеличение здесь не поможет.

Третий важный фактор в микроскопии — это *контраст*. С обычным микроскопом структуру тонких прозрачных объектов можно обнаружить только в тех

случаях, когда между разными областями существует некоторый контраст, возникающий из различий в прозрачности или цвете. Если тонкий объект состоит, например, из чего-то имеющего форму лестницы, т. е. имеет участки различной толщины и тем не менее все одинаково прозрачные, то микроскоп не выявит различий в толщине. Микроскописты XIX в., в особенности занятые биологическими исследованиями, достигли заметных успехов в том, чтобы придавать какой-то контраст объектам и тем самым облегчать распознавание



Р и с. 12.

различных структурных элементов прозрачных биологических объектов. В этом отношении огромное значение имело изобретение пятнистого окрашивания. Были разработаны способы осаждения различного цвета красителей на тонкие срезы образцов или на мелкие объекты. Было открыто, что различные структурные детали биологических объектов воспринимают и фиксируют красители в различных дозах, что объясняется отчасти химическим составом клеток и волокон. Таким образом можно было создавать сложную цветовую контрастную картину для изучения того, что иначе казалось бесцветным прозрачным объектом, лишенным структуры. Правда, пятнистое окрашивание в основном можно применять только лишь к неживому материалу.

Определенные оптические приемы для повышения контраста при помощи специальных способов освещения также были разработаны в XIX в. Это темное поле, наклонное и пятнистое освещение и т. д., но их применение ограничено,

Четвертое практически важное свойство микроскопа — *рабочее расстояние* — создает особую трудность при работе с линзами очень высокого увеличения. Обычно, чем больше увеличение линзы объектива, тем меньше допустимое расстояние между объектом и линзой. Для самых лучших линз XIX в. это рабочее расстояние составляло малую долю миллиметра, может быть,  $1/10$  мм или меньше, что накладывает целый ряд ограничений на наблюдения.

В течение последних тридцати лет среди значительных достижений в микроскопии самыми важными были следующие: улучшение контраста, в особенности для прозрачных живых объектов; разработка специальных дополнительных приспособлений; рождение новой трехразмерной микроскопии со значительным увеличением благодаря использованию интерференции; применение так называемой флуоресцентной микроскопии к диагностике. В свое время мы обсудим каждое из этих направлений, но сперва рассмотрим новую технику, одновременно увеличивающую контраст и в некоторых случаях повышающую разрешение. Речь идет об ультрафиолетовой микроскопии.

### Ультрафиолетовая микроскопия

Поскольку крайний предел разрешения, достижимый с наилучшей линзой, равен половине длины волны применяемого света, единственным возможным путем увеличения разрешения может быть использование света более коротких длин волн, чем видимый. Таким светом является ультрафиолетовое излучение. Длина волны зеленого света составляет 5000 Å. Из соображений, обусловленных источниками света и используемыми для линз материалами, самый коротковолновый реально применимый на практике ультрафиолетовый свет — это мощное излучение ртутной дуги, длина волны которого очень близка к 2500 Å, т. е. как раз к половине длины волны зеленого света. В самом лучшем случае использование этого ультрафиолетового света может только удвоить разрешающую способность; достижение не такое уж значительное, тем не менее достаточно желательное.

Однако существует иное и, может быть, большее основание пользоваться ультрафиолетовым светом в микроскопии, особенно в применении к биологическим объектам. Было найдено, что различные участки образца могут (на самом деле это совсем не редкий случай) поглощать ультрафиолетовый свет по-разному. Вследствие этого прохождение света через объект может выявить совершенно новые контрасты и обнаружить области различной структуры при условии, что существует какое-нибудь устройство, позволяющее наблюдателю «увидеть» ультрафиолетовое изображение.

В наше время ультрафиолетовые микроскопы изготавливаются оптической промышленностью. При этом приходится решать три задачи. Во-первых, необходимо создать безвредные для здоровья интенсивные источники ультрафиолетового излучения, которые не излучали бы видимого света; в противном случае видимый свет будет маскировать искомые эффекты. В настоящее время этой цели служит ртутная дуга в кварцевой оболочке, поскольку кварц прозрачен в требуемой области длин волн (обычное стекло для такого света непрозрачно). Источник помещается в контейнер из специального стекла, которое обладает нужным свойством задерживать видимый свет, но пропускать значительную часть ультрафиолета.

Вторую задачу с технической точки зрения было осуществить труднее. Так как стекло поглощает ультрафиолетовый свет, то на всем оптическом пути от источника через объектив к окуляру или камере стекла не должно было быть. В обыкновенном микроскопе свет сперва выходит из стеклянной лампы, затем он концентрируется на объекте толстым стеклянным конденсором (объект обычно находится на предметном стекле), а затем свет проходит через толстую стеклянную линзу объектива и, наконец, через стеклянный окуляр идет или к глазу, или к регистрирующей камере. В целом путь света в стекле оказывается весьма значительным. В ультрафиолетовой микроскопии такого быть не может. К счастью, проблему можно решить, поскольку кварц, в естественном кристаллическом состоянии или расплавленный в кварцевое стекло, прозрачен для ультрафиолета вплоть до требуемой длины волны (хотя немного ниже этого предела он

также начинает сильно поглощать: в этом одна из причин, почему им все же непрактично пользоваться для более коротких волн). Таким образом, источник должен быть кварцевой лампой, конденсор — кварцевой линзой, предметное стекло — кварцевой пластинкой, и линзы должны быть не из стекла. Не очень-то хорошо иметь объектив микроскопа, сделанный из одного кварца. Хорошие линзы как минимум должны быть сделаны из двух сортов стекла с различными коэффициентами преломления, только таким путем можно преодолеть хроматическую аберрацию и получить хорошую четкость изображения в некотором диапазоне длин волн. Так называемый *ахромат*, а позднее его улучшенный вариант — *апохромат* — состоит из компонент, сделанных из различного стекла: обе компоненты обеспечивают высокую степень коррекции для различных длин волн, эффективно сводя различные цвета в одну фокальную плоскость.

К счастью, кристаллический флюорит оптически очень хорошо сочетается с кварцем, и можно для их комбинации рассчитать составную линзовую систему, которая является приемлемо ахроматической в ультрафиолетовой области. Флюорит прозрачен для ультрафиолетового света и имеет подходящий коэффициент преломления; главная трудность при работе с ним состоит в том, что найти чистые, оптически пригодные образцы нелегко. Но здесь уже вступила в игру оптическая промышленность и предложила способ выращивания довольно больших высококачественных кристаллов различного рода, пригодных для оптики. Между прочим, выращивание кристаллов стало по праву второй отраслью оптической промышленности.

Итак, линза объектива в нашем ультрафиолетовом микроскопе состоит из двух компонент — кварца и флюорита. В конце оптического пути окуляр также должен пропускать ультрафиолет; это подводит нас к третьей проблеме. Возможно, когда-нибудь мы захотим сфотографировать ультрафиолетовый свет через окуляр, но прежде чем сделать это, надо знать, находится ли ультрафиолетовое изображение в фокусе. Помимо того, мы, конечно, хотим «видеть», что там получается. Но по своей природе ультрафиолетовый свет не видим для наших глаз. Правда, он сильно воздействует на

фотографическую пластинку, так что нетрудно в конце концов получить картину, но картину чего? И как сфокусировать? Бесполезно пытаться сфокусировать обычный белый свет, а затем перейти к ультрафиолету, так как всегда существует неизвестная разница в положениях фокуса для белого света и ультрафиолета, обусловленная большим изменением показателя преломления кварца с изменением длины волны.

Эта проблема разрешена, хотя и не полностью, благодаря изобретению *флуоресцентного* окуляра. Ниже мы посвятим целую главу флуоресценции. Но здесь как раз уместно отметить, что определенные кристаллы, если освещать их невидимым ультрафиолетовым светом, испускают видимый голубой или зеленый свет. Флуоресцентные окуляры делают из обычного стекла, причем так, что плоскость объекта находится перед окуляром. В этой плоскости, где возникает ультрафиолетовое изображение, помещена тонкая пластинка, покрытая флуоресцентными кристаллами. Ультрафиолетовое изображение, падая на эту пластинку, заставляет ее светиться видимым светом, хотя и довольно слабо. Тем не менее можно получить видимое изображение и отфокусировать микроскоп. Эта система имеет определенные недостатки. Флуоресценция обычно бывает слабая, неизбежная «зернистость» структуры кристаллов экрана влияет на четкость изображения, и, наконец, изображение появляется только одноцветное. Тем не менее система все же работает, и, обеспечив фокус, можно не спеша получать ультрафиолетовые снимки.

### **Отражательные объективы**

Мы отметили определенные преимущества ультрафиолетовой микроскопии; можно также получать кое-что и от инфракрасной микроскопии, т. е. микроскопии, работающей на инфракрасных лучах. Как ультрафиолетовая, так и инфракрасная микроскопия значительно выиграла от недавнего усовершенствования так называемых *отражательных объективов*. Линза объектива микроскопа заменяется металлическим отражательным зеркалом особой конструкции. С исторической точки зрения интересно отметить, что это изобретение уводит нас на 300 лет назад к Ньютону. Когда Ньютон

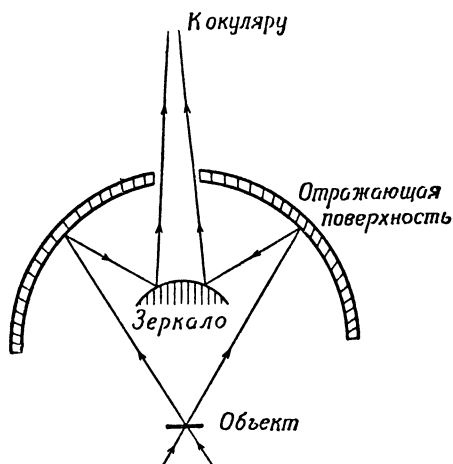
открыл разложение белого света в спектр при помощи стеклянной призмы, он понял, что простая стеклянная линза должна фокусировать различные составляющие спектра в различных точках. Ведь фокусное расстояние линзы зависит от величины показателя преломления стекла, а само существование спектра доказывает, что способность стекла к преломлению зависит от цвета проходящего сквозь него света. Это привело Ньютона к выводу, что телескоп со стеклянной линзой всегда должен давать размытое многоцветное изображение. В то время он еще не знал факта, позднее открытого Доллондом, что стекла с различным химическим составом могут иметь различные оптические характеристики, позволяя осуществлять взаимную компенсацию путем комбинации линз из разного стекла. Именно эта причина побудила Ньютона к изобретению знаменитого *отражательного телескопа* с использованием металлического отражательного зеркала взамен обычного линзового объектива телескопа. Особенностью изображения зеркального устройства является то, что оно вообще не имеет дефектов окрашивания: различные цвета сходятся в одном и том же фокусе. Таким образом, отражательный телескоп Ньютона был первым телескопом, свободным от хроматической аберрации.

Теперь мы хотим обратить внимание на одну замечательную деталь, а именно: в той же публикации «Philosophical Transactions» за 1665 г. Ньютон не только описал отражательный телескоп, который он построил, но он также точно показал (графически), что тот же самый принцип отражения можно с успехом применить и к микроскопу (сложные микроскопы того времени, например Гука, обладали сильнейшей хроматической аберрацией).

В действительности изготовление отражательного зеркала, пригодного для использования в качестве объектива микроскопа, немедленно сталкивается с громадными практическими трудностями при любой попытке получить сильные увеличения и большие апертуры, необходимые для хорошего разрешения. Зеркало телескопа построить куда проще. Вот почему после нескольких нерешительных попыток, предпринимавшихся различными конструкторами, идея объектива микро-

скопа в виде отражательного зеркала была на длительное время оставлена.

Проблема была поставлена вновь примерно 20 лет назад Берчем в Бристоле, который сумел преодолеть оптические и механические трудности и создал — правда, с очень большим трудом — весьма удовлетворительные отражательные объективы. Его идея сводится к следующему: объектив представляет собой тщательно отполированное вогнутое зеркало, но не совсем сферическое — именно в этом и состоит главная



Р и с. 13.

трудность его изготовления. В центре зеркала находится небольшое отверстие, к которому обращено небольшое выпуклое зеркальце. Используемое расположение зеркал показано на рис. 13. При освещении объекта свет проходит к вогнутому зеркалу; затем он попадает на небольшое выпуклое зеркало, расположенное напротив центра отверстия, а далее выходит через отверстие и образует увеличенное изображение, рассматриваемое при помощи окуляра.

Конструкция этого объектива в оптическом отношении далеко ушла вперед от простой схемы, предложенной впервые Ньютоном. Отражательное зеркало имеет особую геометрическую форму, отклоняющуюся на скрупулезно вычисленную величину от сферической,

В качестве объектива микроскопа эта система для определенных целей имеет существенные преимущества перед обычной стеклянной линзой. Начать хотя бы с того, что когда изображение строится металлическим зеркалом, оно не подвержено хроматическим дефектам. Все длины волн сходятся в одном фокусе. Это большое преимущество, так как если зеркало покрыто тонким слоем алюминия, оно становится хорошим отражателем в очень широком диапазоне длин волн — от инфракрасных до ультрафиолетовых включительно. При этом можно обойти трудности с поглощением ультрафиолета стеклом, и — что в равной мере важно — если сфокусировать визуально, используя обычный белый свет, прибор оказывается точно в фокусе также и для всех других длин волн — от инфракрасных до ультрафиолетовых. Напомним, что фокусирующие свойства кривого зеркала совсем не зависят от длины волны используемого света. Мы можем фокусировать в видимой области, а затем уверенно переходить в невидимую, зная, что любое изображение окажется точно в фокусе. К тому же оказывается, что такой отражательный объект имеет гораздо большее рабочее расстояние, чем стеклянная линза той же самой силы. Давайте рассмотрим кратко ограничения, накладываемые рабочими расстояниями линз.

### Рабочее расстояние

Бывают случаи, когда желательно, а иногда и необходимо иметь заметное расстояние между объектом и лицевой поверхностью линзы объектива. Этот промежуток называется *рабочим расстоянием*. В классических линзах XIX в. с большим увеличением и высоким разрешением необходимость обеспечить широкоугольный светособирательный конус заставляла конструктора делать линзы с очень малым фокусным расстоянием и как следствие — рабочим расстоянием, составляющим доли миллиметра. В течение последних нескольких лет большое внимание было уделено улучшению систем линз, зато теперь в нашем распоряжении есть линзы, которые имеют гораздо большие рабочие расстояния, чем те, что были доступны в начале века. За исключением особых случаев, обычно используемая на практи-

ке линза самого высокого увеличения — это линза с первичным увеличением порядка  $100\times$  (т. е. с фокусным расстоянием 2 мм). За ней в арсенале линз обычно следует 4-миллиметровая линза, увеличение которой вдвое меньше, чем первой, и все же с рабочим расстоянием, которое составляет только долю миллиметра. Теперь можно получать специальные 4-миллиметровые линзы с совершенно исключительными рабочими расстояниями 1,5 см.

Такие большие рабочие расстояния привели к появлению многих новых ценных приспособлений и дополнительных устройств. При работе удобно помещать объекты, находящиеся под микроскопом, на тонкие предметные стеклышки, которые закрепляются на металлическом столике, называемом *предметным*. Последний имеет юстировочные винты для точного перемещения объекта в нужное положение. В наше время благодаря большим рабочим расстояниям стали изготавливать специальные предметные столики. Среди них нагреваемые предметные столики, камеры с охлаждением для растущих биологических материалов, микроречи и т. п. В частности, особые достижения получены с металлическими отражательными объективами типа Берча. Этот объектив имеет не только хорошее рабочее расстояние, он выполнен целиком из металла, так что можно с большим увеличением изучать горячие объекты, которые разрушили бы стеклянную линзу. Осуществимы наблюдения расплавленных сплавов и непосредственное изучение эффектов перекристаллизации. Удалось рассмотреть с высоким увеличением и сфотографировать в собственном свете нагреваемую током металлическую нить в состоянии белого каления. Иметь столь горячий объект близ стеклянной линзы сравнимого увеличения немыслимо.

Параллельно с усовершенствованиями, обусловленными доступностью увеличенных рабочих расстояний, шла разработка разнообразных сложных микроманипуляторов. Они представляют собой весьма сложные системы приводных рычагов, оканчивающихся перед объективом тонкими иглами. При помощи этих приспособлений выполнение тонких микроманипуляций требует значительно меньшего искусства, чем это было прежде.

## Телевизионный микроскоп с бегущим лучом

Довольно очевидное приспособление к микроскопу, за которое высказывались многие, сводится к замене глаза наблюдателя чувствительной телевизионной регистрационной камерой. Эта камера улавливает микроскопическое изображение, которое затем появляется (обычно сильно увеличенное) на экране телевизора. Ничего особенно нового в такой методике нет, как нет и никаких особо значительных оптических преимуществ, если не говорить о том, что не один наблюдатель, а громадная аудитория может видеть, что находится на предметном стекле микроскопа.

Однако, используя обычную настройку контраста в телевидении, можно создать искусственный контраст, усилить более яркие области за счет более слабых. Увеличение контраста, создаваемое таким путем, может быть довольно заметным, но в действительности оно достигается только за счет преднамеренной потери деталей для более слабых областей. Выглядеть это может эффектно, но физический выигрыш не очень велик. Повышенное увеличение, создаваемое на экране телевизора, — это все «дудное увеличение».

Гораздо больший интерес, чем это простое приспособление телевидения для наблюдения на большом экране, представляет собой прибор, известный под названием *телевизионного микроскопа с бегущим лучом*. Обычное телевизионное изображение строится на экране при помощи сканирования. Небольшой точечный электронный луч падает на экран, покрытый флуоресцирующим составом, вследствие чего возникает крохотное яркое пятно света. Электрический ток заставляет это пятно (с помощью отклоняющих полей) бегать по экрану, быстро покрывая его тонкой сетью горизонтальных линий, близких друг к другу, — всего их 405 или 625 в зависимости от принятой системы. Это сканирование осуществляется столь быстро, что глаз получает впечатление равномерно освещенного экрана. Образующееся телевизионное изображение возникает благодаря тому, что принимаемый сигнал изменяет интенсивность светового пятна при сканировании им экрана. Ряд параллельных линий, светящихся благодаря электронному возбуждению, и называется *кадром*. Если на

кадр не накладывается никаких модулирующих приемных сигналов, он выглядит однородным.

В телевизионном микроскопе с бегущим лучом используется небольшая яркая телевизионная трубка, на экране которой образуется кадр с однородной яркостью. Это всего лишь бегущее пятно света. Этот яркий кадр помещают над окуляром микроскопа, т. е. в положение, которое обычно занимает глаз наблюдателя. Микроскоп работает в обращении: вместо света, идущего вверх от объекта к глазу, здесь свет идет от кадра вниз через окуляр к объекту. Линза объектива микроскопа теперь строит сильно уменьшенное микроизображение кадра на объекте. Размеры кадра можно уменьшать даже в тысячи раз, а это в сущности означает, что предельно крохотное яркое микропятнышко света, сканируя объект, образует крохотный кадр.

После прохождения через объект, прозрачность которого изменяет интенсивность, это предельно яркое и очень маленькое пятнышко света падает на устройство, называемое фотоэлементом, который помещается ниже объекта (с конденсорной линзой или без нее). Фотоэлемент входит как часть в электронное устройство, которое регистрирует интенсивность падающего на него света, преобразуя его в электрический ток. Многие читатели хорошо с ним знакомы, если пользуются фотоаппаратом с экспонометром. Такой фотоэлемент имеет светочувствительную поверхность: если на эту поверхность направить свет, она испускает электроны. Приборы такого рода имеются для весьма широкого диапазона чувствительности.

По мере того как бегущее пятно проходит через различные участки тонкого, достаточно прозрачного объекта, соответственно меняется количество света, падающего на фотоэлемент. Свет, попадающий на элемент, превращается в быстро флуктуирующий электрический ток, который затем идет на вход обычного телевизионного приемника. Теперь на экране этого приемника появляется сильно увеличенное изображение объекта, поскольку микрообласть, покрываемая очень малым изображением кадра, заполняет теперь весь экран обычного телевизионного приемника. Возникает увеличение в несколько тысяч раз.

Между объектом и детектором света вообще нет никакой линзы, строящей изображения (даже если есть конденсор, он не строит изображение, а лишь собирает свет). Замечательно, что единственная реальная функция объектива микроскопа в данном приборе — создать уменьшенное изображение светового пятна предельно малым и достаточно хорошо сформированным. Чем выше увеличение линзы, тем более совершенным будет это маленькое пятнышко, а чем оно совершеннее, тем лучше будет окончательное разрешение изображения на телевизионном экране.

Этот любопытный микроскоп применялся в ряде особых случаев. Пользуясь им, можно, например, считать кровяные тельца или число пылинок, собираемых для некоторых специальных целей на предметном стекле. По мере того как бегущий луч сканирует отдельные частички, можно заставить электронные устройства считать их. Имеется уже некоторый опыт работы с прибором такого рода, и существует мнение, что с точки зрения четкости изображения и разрешения здесь нет никакого выигрыша по сравнению с обычным микроскопом. Меняя настройку телевизионного контраста, можно улучшить контрастность изображения, но только за счет потерь деталей изображения. Поскольку двойное телевизионное оборудование и специальная электрическая схема требуют больших затрат, можно было бы сказать, что этот прибор — излишняя роскошь. Однако это пока новинка, и, вероятно, он может оказаться полезным в будущем. Любопытно, что очень сходное устройство было удачно применено в *электронном микроскопе*, но подробнее о нем будет рассказано ниже.

### **Фазово-контрастный микроскоп**

Фазово-контрастный микроскоп, изобретенный голландским физиком Цернике в 1934 г., был принят оптической промышленностью только после 1946 г., но с тех пор он уже сыграл существенную роль в самых различных областях, в особенности в биологических исследованиях. Оптический микроскоп с очень высоким увеличением использовался при изучении небольших живых объектов, в частности прозрачных,

едва видимых микрообъектов, живущих в жидких средах.

Трудность применения микроскопов к прозрачным объектам состоит в следующем: хотя тело может обладать структурными особенностями различной толщины, но если количество света, поглощаемое разными деталями, одинаково, т. е. если они не влияют на интенсивность проходящего света, структура так и остается невыявленной.

Существует два вида объектов, которые можно соответственно назвать *амплитудными* и *фазовыми*. На рис. 14 показан объект, состоящий из прозрачного

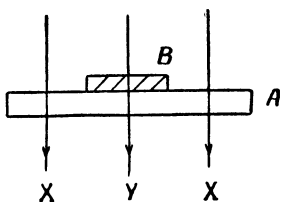


Рис. 14.

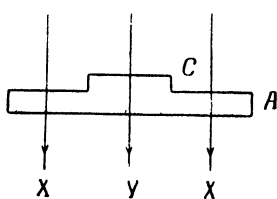


Рис. 15.

бруска *A* и наложенной на него частично поглощающей области *B*. Очевидно, что в направлении *Y* пройдет меньше света, чем в направлениях *X*. Поскольку глаз может легко заметить различия в интенсивности, область *Y* легко отличить от *X*. При математическом описании такого объекта принято говорить: *амплитуда* колебания, прошедшего через *Y*, отличается от амплитуды колебания, прошедшего через *X*, — отсюда использование термина *амплитудный* объект.

Теперь взглянем на рис. 15, где мы заменили область *B* рис. 14 идеально пропускающей областью *C*. Интенсивность (амплитуда), которая проходит через *Y*, теперь такая же, как та, которая проходит через *X*. Глаз, фиксируя обе интенсивности как одинаковые, не может зарегистрировать никакой структуры, так что область *C* в сущности оказывается незаметной, объект кажется однородно светлым. Отметим, однако, что оптическая длина пути через объект для светового луча *Y* больше, чем для луча *X*. Различие в длинах оптического пути описывается как разность фаз,

поскольку световая волна, прошедшая большую толщину, запаздывает. Но глаз вообще не может заметить различия в фазе, он реагирует только на различия в интенсивности, и поэтому, несмотря на фазовые различия, объект на рис. 15 виден как бесструктурный. Нетрудно понять, что частых встреч с фазовыми объектами можно ожидать только в таких отраслях микроскопии, как микробиологические исследования. При встрече с такими объектами трудно выявить какие-либо структурные детали. Именно эта трудность была первопричиной, побудившей биологов развивать способы окрашивания после того, как было открыто, что различные прозрачные области по-разному воспринимают краски. Однако окрашивание почти всегда убивает живое и может быть использовано только на неживых объектах, так что проблема наблюдения прозрачного живого тела еще не была решена.

Цернике изобрел остроумное оптическое устройство, превращающее невидимую фазовую структуру в видимую амплитудную структуру. Это и есть метод фазово-контрастной микроскопии, за который изобретатель был награжден Нобелевской премией. Выше было указано (стр. 71 и рис. 11 и 12), что микроскоп выявляет тонкую структуру только в том случае, если линза объектива перехватывает широкоугольные дифракционные спектры, создаваемые деталями объекта. Цернике первым убедительно показал, что в обоих случаях, имеем ли мы фазовый или амплитудный объект с мелкими деталями, должны быть дифракционные спектры. Затем он установил, что если свет, дифрагировавший от невидимого фазового объекта, оказывается запаздывающим по отношению к прямому недифрагированному пучку или опережающим на четверть длины волны, то такой фазовый спектр приобретает свойства амплитудного спектра. Значит, если бы в микроскоп можно было бы ввести такое устройство, которое вносило бы эту четверть волны каким-то способом только в длину пути дифрагированных лучей, то до тех пор невидимая фазовая структура оказалась бы преобразованной в наблюдаемую амплитудную структуру и, следовательно, стала бы видимой глазом.

Цернике создал подобную ситуацию, напылив на линзу объектива микроскопа очень тонкий осадок

вещества, которое создавало запаздывание на длине оптического пути для зеленого света примерно в четверть длины волны. Когда объект находится в поле зрения, прямой луч проходит через чистую центральную часть линзы. Структурность объекта ведет к появлению расходящегося дифракционного конуса, который проходит через задерживающее вещество, осажденное на линзе в виде кольца. Когда прямой, не подвергавшийся никакому воздействию луч смешивается с запаздывающим по фазе дифракционным спектром, происходит превращение фазовой структуры в амплитудную, и вследствие этого различия в фазовой структуре становятся теперь видимыми как различия в интенсивности. Был создан контраст, и выявились новые структурные детали. Что было прежде скрыто от глаза, теперь стало ясно видимым.

С появлением системы фазового контраста (теперь существует несколько ее разновидностей) было достигнуто несколько поразительных усовершенствований в методике обнаружения изменений толщины деталей, которые обычно совершенно невидимы. Существует, однако, реальная опасность, в которую уже попадали неосторожные и с которой следует считаться; дело в том, что в этой системе некоторая часть линзы, подвергаемая воздействию (она может быть частично экранирована для достижения наилучшего эффекта, в то время как другие части остаются открытыми), не только создает желанный фазовый контраст, но также вносит и нежелательный эффект на внешних границах объектов. Часто объекты выглядят как бы окруженными широкой оболочкой, которая в соответствии с принятой оптической схемой может быть светлой или темной. Но какой бы она ни была, это не реальная физическая структура, а оптический дефект. Увидя без предупреждения такую оболочку, можно впасть в искушение и считать, что метод фазового контраста выявил невидимую естественную физическую оболочку, окаймляющую объект. На самом деле это не так, ибо этот эффект — лишь оптический ореол. Хотя метод фазового контраста чрезвычайно ценен, он требует весьма осмотрительного применения.

## ГЛАВА 5

# ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

### Флуоресценция

Современная теоретическая и экспериментальная оптика за последние несколько десятилетий сделала заметный вклад в эту область. В прошлом большинство источников света было связано с каким-либо нагреванием. Пламя свечи, масляное пламя, электрическая лампа — все это на самом деле весьма горячие объекты (тонкая железная проволока легко плавится в пламени даже небольшой свечи). Однако существует «холодное» свечение; за последнее время оно заняло важное место. Среди множества свечений такого рода есть два родственных типа свечения — *флуоресценция* (много лет назад это свечение было обнаружено у минерала плавикового шпата — флюорита) и *фосфоресценция* (это свечение было известно даже алхимикам как свойство химического элемента фосфора). Оба свечения вместе часто называют *люминесценцией*, хотя это общее название объединяет теперь и несколько других видов холодного свечения.

Люминесценция возбуждала интерес ученых на протяжении свыше трех столетий, но лишь новейшей квантовой теории удалось объяснить эти эффекты. Благодаря новому пониманию их свойств люминесцентные вещества за последнее время оказались чрезвычайно важными для ряда отраслей промышленности и теперь производятся и используются в громадных масштабах, находя самое широкое применение.

Как флуоресценция, так и фосфоресценция — это процессы превращения энергии, при которых приобретенная энергия преобразуется в световое излучение, но без какого-либо заметного увеличения температуры. Поэтому данные процессы крайне экономичны в смысле количества света, излучаемого при данной потребляемой мощности. В электрической лампе или пламени

свет — всего лишь небольшой побочный продукт выделяемого тепла; только малая доля затраченной энергии превращается в полезный свет. В случае флуоресценции накачку энергии можно осуществить за счет электрического тока или излучения или же благодаря химическим процессам; в некоторых довольно любопытных случаях — в результате трения или дробления.

Во всех случаях введенная энергия, пусть окольными путями, превращается в видимый свет почти без повышения температуры. Именно по этой причине флуоресцентный свет часто называют «холодным» светом. (Не следует смешивать примененный здесь термин с эстетической или художественной характеристикой так называемых холодных и теплых цветов. Такие цвета характеризуются художниками, конечно, не по температуре, а с точки зрения ощущений, которые эти цвета вызывают.) «Холодный» же свет — это низкотемпературный свет в его буквальном физическом смысле. Действительно, флуоресцентные вещества могут даже при крайне низких температурах обеспечивать яркое свечение.

В ходе длительной экспериментальной работы было установлено, что флуоресценция представляет собой своего рода возбуждение, при котором определенные вещества при облучении или в результате возбуждения испускают свет в течение очень небольших интервалов времени после возбуждения — интервал времени может составлять миллионную долю секунды. Действующий при этом механизм — квантовый. Для большинства твердых и жидких веществ поглощение излучения или бомбардировка электронами часто приводит к поглощению энергии, которая затем рассеивается в виде тепла. Поглощенная энергия переходит в тепловое движение атомов и молекул.

Люминесцентное вещество содержит очень большое число так называемых *активных центров*. Это или области в кристаллических веществах, в которых имеются атомы примеси, связанные с кристаллом, или же это области внутри обычной правильной атомной кристаллической решетки, структура которой не полностью упорядочена. Такие «ошибки» называются *дислокациями*. В подобных условиях захваченная энергия может перевести электрон из его нормального энергетического

ческого состояния на другой уровень. Электрон стремится сразу же вернуться и при переходе испускает свет, цвет и длина волны которого зависят от данной кристаллической структуры и от примеси, присутствующей в активном центре. Было изготовлено очень много составов, содержащих тщательно проконтролированные крохотные количества избранных примесей, которые могут флуоресцировать различным цветом и обладают разными оптическими свойствами. Есть одно важное правило: энергия флуоресцентного света всегда меньше захваченной энергии. Если флуоресценция создается за счет поглощения света (а это бывает часто), то переизлученный свет имеет большую длину волны, чем первичный возбуждающий свет.

### Фосфоресценция

В обычном механизме флуоресценции стимулирующий агент сначала переводит электрон на более высокий энергетический уровень, и интервал времени, необходимый для возвращения электрона, весьма мал. Однако в некоторых составах можно создать так называемую «электронную ловушку». В этом случае электроны, сдвинутые со своих мест в атомах и молекулах, могут быть удержаны в этих ловушках в течение некоторого времени, пока они не высвободятся. В действительности вследствие столкновений с атомами, которые участвуют в тепловом колебательном движении, электроны возвращаются на подходящее место в исходных атомах или молекулах далеко не сразу. В зависимости от природы захвата время возвращения может исчисляться минутами, часами, сутками и даже месяцами. Может пройти довольно длительное время, прежде чем все электроны найдут «свой дом». В результате на протяжении некоторого периода времени существует регулярное движение электронов в обратном направлении, и в течение всего этого времени (так как в этом процессе участвует очень много электронов) постоянно излучается свет. Это флуоресцентный свет, но с запаздывающим действием; в этом случае он называется *фосфоресценцией*. Если фосфоресцентное тело (*фосфор*) освещать светом источника, который затем убирается, то фосфор все еще продолжает испускать свет, который может быть ярким,

но кратковременным или слабым, но длительным. Единственная существенная разница между флуоресценцией и фосфоресценцией состоит именно во времени возвращения электронов. В одних случаях это происходит почти мгновенно, в других зависит от природы захватывающих электроны сил.

На люминесцентные эффекты может заметно влиять температура вещества. Например, в определенных фосфорах небольшое повышение температуры (и отсюда скорости атомных колебаний) может привести к гашению флуоресценции. Этот факт был использован любопытным образом при биологических исследованиях локальных увеличений температуры живых клеток. Есть основания полагать, что определенные опухолевые области должны иметь температуру, отличную от температуры здоровых областей. В настоящее время в некоторых специальных фосфорах повышение температуры всего лишь на один градус приводит к падению интенсивности флуоресцентного света не меньше чем на 20%. Таким образом, локальная инъекция флуоресцирующего вещества, сопровождаемая соответствующим облучением для создания флуоресценции, может выявить распределение температуры по яркости свечения. Это, конечно, самое неожиданное применение одного из проявлений квантовой оптики.

### **Инфракрасные преобразователи изображения**

Существует множество других любопытных применений флуоресценции. В определенных веществах некоторые электроны, сместившиеся из основного состояния под воздействием возбуждения, не возвращаются обратно на исходные места, а вместо этого попадают на промежуточные уровни. Квантовая теория этого процесса говорит нам, что некоторые из этих промежуточных уровней являются, так сказать, «тупиковыми» уровнями. Электрону определенными квантовыми правилами запрещено переходить из этих промежуточных положений на свои обычные места. Эти промежуточные положения называются *метастабильными состояниями*, и электрон может оставаться в них довольно неопределенное время. Электроны, которые оказались, так сказать, замороженными в метаста-

бильных состояниях, можно довольно легко перевести с этих мест на более высокий энергетический уровень при облучении данного вещества инфракрасным излучением. Многие из этих электронов могут теперь вернуться в нормальные состояния и при этих переходах испускают обычный флуоресцентный свет. Это свойство было использовано во время последней мировой войны для обнаружения ракет, самолетов и орудий; их горячие выхлопы и нагретые стволы постоянно испускают невидимое инфракрасное излучение. Невидимое инфракрасное излучение при помощи линзовых или зеркальных систем можно сфокусировать и построить изображение, но увидеть его, конечно, нельзя. Если же это инфракрасное изображение отбросить на люминесцентный экран, содержащий электроны в метастабильных состояниях, то в тех местах, куда попадет инфракрасное излучение, возникнет флуоресцентное свечение. Следовательно, мы получаем инфракрасный *преобразователь изображений*, который превращает невидимый излучающий тепло объект в видимую картину. Летящая ракета, даже если она совершенно темная, становится отчетливо видимой из-за своего разогретившегося двигателя или области горячего выхлопа.

### Ультрафиолетовое преобразование

В техническом отношении гораздо важнее этих только что описанных диковинок преобразование ультрафиолетового света в видимый с помощью флуоресценции. Практически все флуоресцирующие вещества обладают способностью превращать невидимое ультрафиолетовое излучение в видимый свет. Повсеместно используемая флуоресцентная «холодная» трубка—это длительно светящийся разряд в парах ртути. Пары ртути светятся сильным темно-синим цветом, который, придавая цветным предметам весьма нереальный облик, сам по себе довольно неприятен. Этот свет связан также с очень большим количеством ультрафиолета. Обычно он не причиняет вреда, поскольку светящаяся трубка либо сама сделана из стекла, либо заключена в стеклянный футляр; стекло же задерживает любой вредный ультрафиолет. Но этот ультрафиолетовый свет, который в обычном ртутном свечении полностью

потерян для глаза, интенсивно используется в производимых серийно флуоресцентных трубках. Изнутри стенки трубки покрыты флуоресцирующими кристаллами. Они поглощают невидимый ультрафиолет, который действительно весьма силен, и преобразуют его в очень полезный видимый свет. Больше того, цвет флуоресцирующего слоя можно менять при помощи примесей, добавляемых к фосфору. Если ввести металлическую сурьму, то флуоресцентное свечение будет голубым, если марганец — желтым, а некоторые другие вещества дают красный свет. Существует множество коммерческих секретов в отношении состава этих флуоресцентных покрытий, но общий вывод таков: ртутные трубки не только испускают гораздо больше света, чем до использования флуоресценции, но, кроме того, их излучение может быть доведено до дневного света, если использовать соответствующие фосфоры. Коэффициент полезного действия как ультрафиолета, так и электрического разряда для возбуждения флуоресцентного свечения достаточно велик, причем трубка работает при достаточно низкой температуре и с ней удобно обращаться. Самые важные основные кристаллические фосфоры, используемые для этих ламп, — это сульфид цинка и сульфид кадмия, которые «присаживаются» со сложным набором примесей промышленным способом.

Многочисленные варианты кристаллов этих двух типов используются не только в лампах, но и в телевизионных экранах, экранах радиолокаторов и многих узко специализированных фосфоресцирующих устройствах. Под тщательным контролем находится теперь время между моментами возбуждения и переизлучения. Уже было упомянуто, что некоторые флуоресцентные свечения в «холодных» лампах возникают от бомбардировки потоком электронов. Уже к концу XIX в. было известно, что бомбардировка целого ряда кристаллов электронами вызывает их свечение. Пример — свечение телевизионного экрана, к которому мы все привыкли. Эта особая рода флуоресценция имеет свое наименование — *катодолюминесценция*. В начале нашего столетия было обнаружено, что различные кристаллы, если их бомбардировать пучком электронов, светятся разными цветами. Недавно это свойство стало основой для создания определенных цветных телевизионных устройств.

Телевизионный экран состоит из тонкой мозаики небольших флуоресцентных кристаллов трех типов, которые светятся красным, зеленым и синим цветом соответственно. Возбуждаемые бегущим электронным пучком, строящим телевизионное изображение, три фосфора приводят к появлению цветной картины в соответствии с тем, что передают по телевидению.

Тот факт, что разные вещества могут флуоресцировать разными цветами, привел к появлению одного из важнейших методов в медицинской диагностике — флуоресцентной микроскопии, к которой мы еще вернемся. Аналогичная идея была недавно применена к оптическим исследованиям строения поверхности Луны. При фотографировании Луны с использованием специальных узкополосных цветных фильтров было обнаружено существование окрашенных пятен. Было высказано предположение, что поверхность Луны, совсем не защищенная атмосферой, может сильно флуоресцировать под действием ультрафиолетового света и корпускулярной радиации Солнца. В каждой данной области могут оказаться преобладающими различные минералы, которые соответственно составу будут флуоресцировать. Может быть, удастся воспроизвести правильно эту флуоресценцию в лаборатории с искусственно созданными кристаллами и таким образом подобрать ключи к минеральной структуре лунной поверхности.

### **Флуоресценция и обнаружение трещин**

Новые методы, значение которых быстро возрастает в связи с необходимостью обеспечения безопасности технических сооружений и деталей машин, основаны на флуоресцирующих свойствах некоторых составов. Для обнаружения тончайших (волосных) трещин в поверхностях деталей в настоящее время уже разработаны методы двух типов. Давно уже известно, что тонкие, почти невидимые трещины могут привести к самым серьезным авариям. При наличии таких трещин, когда какой-нибудь из элементов подвергается силовым воздействиям, могут развиваться очень заметные напряжения. Известно, что волосные трещины образуются при шлифовке деталей и весьма усиливаются вследствие так называемой «усталости», которая наступает,

когда детали подвергаются переменным нагрузкам, как это часто случается. Даже тончайшие волосные трещины, о которых на первый взгляд и говорить-то не стоит, могут быть причиной самых серьезных аварий, приводящих иногда к смертельным случаям или наносящим материальный ущерб.

Вот для выявления таких невидимых трещин и были применены флуоресцентные методы. Один метод годится только для стальных и железных деталей, другой можно применять также и к металлам, не содержащим железа. Для сталей используется жидкость, содержащая суспензию крайне мелких намагниченных частиц, которые покрыты флуоресцирующим веществом. Когда предмет после обработки погружают в эту жидкость, мелкие магнитные частички собираются и скапливаются около трещин в поверхности. Количество аккумулируемых трещинами частиц очень мало, и их не видно. Однако, когда поверхность облучают сильным ультрафиолетовым светом, в местах концентрации частиц появляется яркая флуоресценция. При этом тонкие волосные трещины ярко светятся.

Насколько хорош этот метод на практике, показывает фото IIа. Небольшой стальной брусок был подвергнут разнообразной термической обработке. Возникло подозрение, что на его поверхности есть тонкие микротрещины. Была проведена проверка только что описанным методом; ясно видно, что через образец проходит очень тонкая волосная трещина (которую иначе обнаружить было бы невозможно). На фото IIб неожиданно обнаружилась опасная трещинка также и в конце стержня.

Обнаружение флуоресцентным методом трещин и царапин не требует особой тщательности в работе. Нет нужды и в каких-то особых, из ряда вон выходящих минералах, так как для этой цели может подойти множество органических красителей. Например, замечено, что красные чернила из дешевой шариковой ручки ярко флуоресцируют оранжевым светом. Ясно, что этот метод годится для широкого применения.

Для нежелезных деталей часто используется жидкость, близкая по природе к смазочному маслу, в которую вводится флуоресцентное вещество. Очень тонкий слой этой жидкости воспринимается любой тре-

пиной, и при освещении она становится видимой. Найти подходящее для такой цели вещество нетрудно. Некоторые масла и смазки флуоресцируют очень ярко, в частности весьма активен обыкновенный вазелин,

### **Оптические применения**

40 лет назад спектроскопистами были развиты методы, в которых флуоресценция использовалась для того, чтобы фотографировать спектры в коротковолновой ультрафиолетовой области. Неожиданно в начале этого столетия возникла трудность в экспериментальной спектроскопии, обусловленная тем фактом, что желатин, используемый при изготовлении чувствительного слоя фотографической пластинки, так сильно поглощает коротковолновый ультрафиолетовый свет, что ультрафиолетовые спектры невозможно сфотографировать. Чтобы преодолеть эту трудность, изобретались различные рецепты, но они не имели особого успеха, пока не была использована флуоресценция. Сорок лет назад фотографическая спектроскопия была в равной мере искусством и наукой, и, конечно, в начале тридцатых годов мы высоко ценили описанный ниже способ (хотя и не понимали, почему он действует). Рецепт, которому нас обучали и которому мы слепо верили, сводился к следующему. Прежде чем пользоваться фотографической пластинкой, надо погрузить ее в совсем жидкий раствор в бензоле медицинского парафина, называемого „бензольной кашей”. Излишек стряхивается, и, так как бензол быстро испаряется, на пластинках остается очень тонкий слой парафина. Затем пластинка использовалась для съемки коротковолнового ультрафиолетового спектра.

Парафин то ли сам по себе, то ли благодаря каким-то мелким вкраплениям, когда его облучают коротковолновым ультрафиолетовым светом, обладает свойством флуоресцировать довольно сильным синим светом. Вследствие этого в тех спектральных областях, где необработанная пластинка не сработала бы из-за поглощения в желатине, эта коротковолновая радиация, проходя через очень тонкий слой парафина, создает слабое свечение. Фотографическая пластинка, конечно, чувствительна к синему свечению и поэтому запечатле-

вает находящееся на ее поверхности флуоресцирующее изображение. Таким способом получалось изображение, которое иначе нельзя было зарегистрировать. Мы были молодыми научными работниками и совсем не знали, чем была вызвана флуоресценция — самим маслом или же всегда имеющимися в нем примесями; все мы были вполне уверены, что никакой другой сорт парафина не будет столь хорош. Рецепт действовал, так о чем же еще думать?

Некоторые органические жидкости флуоресцируют очень сильно, и одна хорошо известная жидкость, которая много лет служила оптической диковинкой, была столь активна, что ее называли *флуоресцином*. Каплю этой жидкости пускали в чистую воду, и пути световых лучей в воде становились видимыми, так как луч ярко светился, проходя через разбавленную флуоресцином воду. Недавно эта идея получила ценное применение в другом направлении и к тому же в весьма крупном масштабе. Очень небольшое количество флуоресцина в воде можно обнаружить, если осветить воду сильным светом. Было обнаружено, что, заливая в реки большие количества флуоресцина, можно проследить за подземными течениями. Таким путем удалось проследить за приливными течениями и движением сточных вод. Флуоресцин стал оптическим индикатором в промышленном масштабе, и много ценных данных было получено этим способом.

### **Флуоресценция в стирке**

Флуоресцентные методы нашли применение и в стирке белого белья. Все мы подвергаемся бамбардировке рекламными объявлениями о моющих средствах, которые стирают белье добела и даже еще белее. Нам настоятельно рекомендуют провести «оконную проверку». Это значит, если на окно повесить занавески, выстиранные специально рекламируемым сортом порошка, они будут казаться даже «белее белого». И действительно, заверения в отношении сверхбелизны могут быть правдивыми и по очень интересной оптической причине. Чистая белая диффузная матовая поверхность, как, например, свежеприготовленное покрытие из окиси магния, настолько эффективна,

что отражает почти 100% падающего на нее света. Она белая настолько, насколько это возможно, и при дневном свете она отражает почти весь видимый свет в дневном свете.

Естественно поначалу считать, что это идеал белизны, которого только можно желать, так как если мы получаем обратно почти 100%, то чего же еще можно ожидать? Но оказывается в дневном свете, особенно в ясный солнечный день, довольно-таки много невидимого ультрафиолетового света. Специальные новейшие отбеливающие моющие средства не только отбеливают белье, заставляя грязь оседать и всплывать, но, кроме того, они имеют в своем составе сильно флуоресцирующее вещество, часть которого оседает в белье. Выбранное флуоресцирующее вещество обладает способностью поглощать из дневного света весь ультрафиолетовый свет и превращать его в белый видимый свет. Так вот и получается, что объект с такой пропиткой посылает нашему глазу даже больше белого света, чем в действительности существует в самом белом свете. Вследствие этого белье выглядит ослепительно белым. «Оконная проверка» подчеркивает белизну, но стекло пропускает небольшое количество ультрафиолета, следовательно, «оконная проверка» будет более эффективной, если ее провести при открытом окне. Действие ультрафиолета столь заметно, что выстиранная новейшими средствами белая рубашка выглядит совершенно ослепительной, если ее облучить в темноте невидимым ультрафиолетовым светом. Мы уже использовали этот эффект в качестве занимательной иллюстрации к лекции!

### **Флуоресцентные краски и красители**

Флуоресценция недавно стала широко применяться в рекламе для создания бросающихся в глаза ярких цветовых эффектов. Но прежде рассмотрим простую оптику, связанную с обычными пигментами. Цветной красящий пигмент, скажем красная краска, действует благодаря механизму поглощения. Эта краска не потому красная, что она отражает красный цвет, а потому, что она поглощает все цвета, кроме красного. Пигментное вещество может обладать

определенной степени прозрачности. Когда белый свет попадает на чисто красный пигмент, он проникает на некоторое расстояние в вещество, а затем диффузно рассеивается обратно к нашему глазу. На своем пути через пигмент он испытывает некоторое поглощение. Итак, красный пигмент тот, который прозрачен для красного цвета, но поглощает почти все другие цвета спектра. Красный возвращается, а остальные поглощаются. По-настоящему хороший красный пигмент отдает нам при этом из дневного света весь красный свет. Максимум того, что мы можем получить, — это полная доля красного света в спектре дневного света, в состав которого также входят остальные цвета: оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый — все они оказываются потерянными, коль скоро речь идет о красном пигменте.

Теперь же в один из новых современных флуоресцентных красных пигментов введено флуоресцентное вещество, не только отражающее весь красный свет, который содержится в дневном свете, но и превращающее весь остальной видимый свет в флуоресцентный красный. Это вещество действует еще эффективнее, превращая в красный флуоресцентный свет и весь невидимый ультрафиолетовый свет. Чем яснее и солнечнее день, тем эффективнее выделяется красный свет. В конечном итоге поверхность, окрашенная флуоресцентным красным пигментом, просто сверкает красным светом.

Заметим, что постепенно, по мере перехода к желтому, зеленому и затем к голубому цвету в нашем распоряжении остается все меньше и меньше коротковолнового света из последовательности цветов в обычном дневном свете. Это означает, что постепенно от красного к голубому флуоресцентные пигменты становятся все менее и менее броскими. Самые эффективные, конечно, красные, а красные в паре с зелеными создают самые сильные контрастные эффекты. Флуоресцирующими красителями можно пропитывать ткани, и именно потому, что красный цвет так заметно усиливается, столь полезной оказалась защитно-предостерегающая красная форма для дорожных рабочих. К сожалению, флуоресцирующие пигменты и красители разрушаются определенными загрязняющими ат-

мосферу веществами, так что через некоторое время сверкающие рекламы тускнеют и становятся безжизненными.

По-видимому, художники пока не вполне осознали потенциальные возможности флуоресцентных пигментов, если на них воздействовать невидимым, но интенсивным ультрафиолетовым светом. В качестве эксперимента мы сделали несколько зарисовок цветов флуоресцентными пигментами и затем осветили их в темноте сильным ультрафиолетовым излучением. Несмотря на примитивность рисунков, получившийся при этом эффект оказался поразительным. Многие настоящие художники совершенно индифферентно относятся к новым материалам. Один из них как-то заметил автору: «За последние пятьсот лет у нас ни разу не стоял вопрос, какими материалами пользоваться. Проблемы живописи в сущности эстетические, а не материальные».

### **Биолюминесценция**

Появление люминесценции у живых объектов всегда трогало воображение поэта. Эффект, создаваемый светлячками, и мерцание весел, погружаемых в море, всегда возбуждали интерес. Оптические исследования за последнее время достигли заметных успехов в объяснении люминесценции у живых организмов — *биолюминесценции*, как ее теперь часто называют. По-видимому, открытия, сделанные в этой области, едва ли обнаружат техническую значимость биолюминесценции для проблемы освещения; тем не менее было бы опрометчиво думать, что ничего полезного не возникнет из тех исследований в биолюминесценции, которые имеют столь захватывающий интерес для зоологов.

В настоящее время исследованиями доказано, что очень многие морские животные обнаруживают какой-либо вид свечения. Эти эффекты наблюдались в самых разнообразных случаях — от одноклеточных организмов до весьма крупных рыб, даже обитающих на больших глубинах, куда не проникает солнечный свет. В исследованиях, предпринятых по инициативе американского исследователя Биба, при помощи батисферы, опускаемой на глубины ниже 500 м, было

обнаружено, что 90% рыб и животных испускают достаточно сильный флуоресцентный свет.

Известно, что свечение люминесцирующих животных, большая часть которых обитает в соленых водах, может осуществляться тремя различными способами. Либо в их организме имеются светящиеся клетки, либо они могут вырабатывать и распространять светящиеся секреты, или же они служат гостеприимными «хозяевами» для огромных колоний светящихся бактерий. Существует большое разнообразие светящихся организмов. У одних орган свечения снабжен фактически конденсорной линзой, увеличивающей яркость пучка. У других люминесцентный орган вделан в радужные рефлекторы, которые создают поистине радужное сияние. Есть даже такие морские животные, которые обладают специальными жалюзи, опускаемыми в случае необходимости на их светящиеся органы. Некоторые животные волокут на себе мешки, наполненные светящимися бактериями.

У большинства люминесцирующих животных свечение не непрерывное, а импульсное. Обычно это отдельные световые вспышки, которые у насекомых могут длиться только десятые доли секунды, а у других животных даже до полминуты. Непрерывная эмиссия обнаружена главным образом у тех животных, свечение которых обусловлено светящимися бактериями. В большинстве случаев свечением, по-видимому, управляет нервная система (прерывистые излучатели). Привлечение к светящейся рыбе, например, может повести к вспышке. Возможно, что механический удар, испытываемый при погружении весел мельчайшими плавучими люминесцентными организмами, вызывает свечение, которое можно увидеть в воде, стекающей с весел.

Много экспериментальных исследований было посвящено свечению светлячков. Были использованы самые тонкие фотоэлектрические методы для измерения одновременно световой вспышки и сопутствующего нервного импульса. Было установлено, что вспышке летающего светляка всегда предшествует нервный импульс. Хотя биолюминесценция — наука, изобилующая неразрешенными трудностями, представляется довольно определенным, что во многих случаях,

хотя и не всегда, свечение возникает вследствие окисления определенных химических веществ, названных *люциферинами*. Некоторое количество люциферина было выделено из различных животных и определена их сложная химическая структура. Например, анализ люциферина, действующего у летающих светляков, дал такой громоздкий состав: 2-(4'-карбокситиазол)-6-оксibenзотиазол. Окисление люциферина, по-видимому, происходит только в присутствии определенного фермента, называемого *люциферазом*. Если последний образуется с промежутками во времени, то соответственно возникают и световые вспышки.

Биолюминесцентный свет всегда «холодный» и, по-видимому, никогда не содержит в себе ни ультрафиолетовой, ни инфракрасной радиации. Это одно из квантовых свойств люциферина. Как правило, световое излучение голубого или зеленого цвета, но это не обязательно, поскольку в отдельных случаях обнаруживали желтое и даже красное свечение. До сих пор нет сколько-нибудь удовлетворительного объяснения, почему светятся живые организмы, хотя найденные в некоторых случаях причины, по всей вероятности, правильны. Есть все основания полагать, что в некоторых случаях вспышка света означает призывный супружеский сигнал, но это не всегда так. Некоторые обитающие в воде животные живут косяками, и каждый член косяка светится; отсюда можно было бы сделать вывод, что свечение есть какая-то форма опознавательного сигнала, цель которого — сохранить косяк как единицу. Точно так же как некоторые каракатицы по тревоге в маскировочных целях выпускают струю черной жидкости, так другие испускают светящееся облако, чтобы обмануть врага и ускользнуть, пока это облако отвлекает внимание нападающего. Свечения используются и в нападении и в защите, а некоторые животные, которые обитают на больших глубинах, носят на себе светящиеся фонарики, свободно болтающиеся над их челюстями, и очарованный этой диковинкой объект оказывается в зоне захвата.

Яркость свечения большинства биолюминесцентных животных обычно очень мала. И все же, наполнив небольшую банку светляками, можно читать книгу. И кто знает, может быть, в один прекрасный день

люциферины будут производиться в достаточно большом масштабе и подвергаемые медленному и экономичному окислению будут служить в качестве одного из видов холодного освещения. В биолюминесценции мы имеем естественную оптическую активность, известную даже в древности, которую новейшая революция в оптике объясняет с позиций квантовой физики и которую по существу только-только начали изучать.

### **Флуоресцентная микроскопия**

Оставив научные курьезы и обратившись к смертельному врагу человечества — раку, мы, несомненно, должны признать, что самым важным в медицинской диагностике было недавнее развитие той отрасли люминесцентной оптики, которая получила название *флуоресцентной микроскопии*. Эти новые методы освещения в микроскопии за короткое время уже доказали свою ценность и обещают в будущем стать оружием диагностики. Флуоресцентная микроскопия уже доказала, что она имеет реальную ценность при диагностике определенных форм злокачественных опухолей.

Существует множество флуоресцирующих красок, и одна из них, акридин оранжевый, действует как флуоресцирующий индикатор, оказывающий различное окрашивающее действие на различные виды протеина, существующего в клетках тела. Этого можно достичь с разными красителями, но ни один из них не действует так хорошо, как акридин оранжевый. Две важные компоненты клеток обозначаются ДНК и РНК. Когда акридин оранжевый осаждают на ДНК, а затем освещают его ультрафиолетовым светом, то поглощенный краситель флуоресцирует с зеленым или желтым оттенком. С другой стороны, когда тот же краситель осаждают на РНК, ультрафиолетовое облучение создает флуоресценцию, коричневую, оранжевую или ярко-красную в зависимости от концентрации РНК. Если изучаемые образцы содержат и ДНК и РНК, разбросанные порознь, то можно визуально различить эти соединения. Более того, просто при облучении клеток, пропитанных этим красителем, оказывается совсем нетрудно быстро на глаз провести различие между клетками: какие из них богаты ДНК, а какие — РНК.

Было сделано важное клиническое открытие, состоящее в том, что раковые клетки могут содержать гораздо больше РНК, чем нормальные здоровые клетки. Таким образом, наличие в образце оранжевой или красной флуоресценции является серьезным признаком опасности.

Существует мнение, что правильное решение может быть принято даже лаборантом, не имеющим специального медицинского образования, но умеющим работать с микроскопом; весь анализ от начала до конца занимает всего шесть минут.

Техника эксперимента в флуоресцентной микроскопии относительно проста. Объект освещается светом 200-ваттной ртутной лампы высокого давления. Необходимо только между лампой и объектом поместить голубой фильтр, а для защиты наблюдателя перед окуляром микроскопа вставить желтый фильтр. Результаты получаются сразу же при визуальном просмотре.

Флуоресцентная микроскопия имеет и другие применения помимо медицинской диагностики. Многие минералы обладают собственными, характерными для них цветами флуоресценции, благодаря чему они поддаются отождествлению и прослеживанию. Неуловимые выращиваемые структурные слои в кристаллах, которые могут улавливать мельчайшие примеси, были выявлены по их дифференциальным флуоресцентным эффектам. Некоторые живые клетки флуоресцируют в силу естественных причин, другие могут побуждаться к этому введением красителей, как это имеет место с описанными выше ДНК и РНК. Существует естественная *первичная* флуоресценция, обусловленная собственным природным содержимым клеток, и *вторичная* флуоресценция, которая может быть вызвана обработкой клеток красителями. Эта обработка для флуоресцентного исследования иногда называется *флуорохромией*, в ней используются специальные красители (такие, как акридин оранжевый), называемые *флуорохромами*. Некоторые флуорохромы в химическом отношении достаточно слабы, и их можно вводить определенным животным, не нанося им вреда: это позволяет при помощи флуоресцентной микроскопии следить за процессами жизнедеятельности живых клеток. Посредством флуоресценции можно распознавать также определенные бактерии.

В настоящее время в процессе развития находятся совершенно новые способы подкрашивания для использования их во флуоресцентной микроскопии.

Таким образом, в руках современного специалиста-оптика такие издревле известные явления, как фосфоресценция и флуоресценция, получили радикально новые применения как в быту, так и в научной лаборатории. За этим развитием зачастую лежит понимание тонких оптических квантовых процессов. Хотя флуоресцентная методика прошла через большое число неожиданных удач и экспериментальных промахов, мало напоминающих науку, для ее развития было совершенно необходимо глубокое понимание электронной теории как основы физики твердого тела.

## ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

## Стекло в истории

Самым важным из всех оптических материалов является стекло. История стекла насчитывает столько лет, что его изобретение окутано тайнами и мифами. Известно, что уже в 4000 г. до н. э. египтяне делали каменные бусы, покрытые тонкой стеклянной глазурью. К XV в. до н. э. они научились делать стеклянные сосуды, навивая горячие и мягкие стеклянные полоски на глиняные цилиндры. Подлинный переворот в стеклodelии был совершен примерно 2000 лет назад благодаря открытию способа выдувания из расплавленного стекла, и в течение долгого времени это было основным методом изготовления стеклянной посуды. Уже в то время, как это делают и теперь, стекло изготавливали, расплавляя песок вместе с содой или с поташом и добавляя присадки, меняющие оптические и другие свойства стекла. Метод окраски стекла путем добавки специально подобранных окислов металлов в шихту до ее плавления почти так же стар, как и само стекло. Уже в древности знали, что добавка окиси меди дает зеленое стекло, окиси железа — коричневые тона, окиси кобальта — красивые голубые тона, а медь делает стекло красным. Отливка оконного стекла в виде пластин была известна древним римлянам. Уже к VI в. цветные стеклянные мозаики использовались для украшения соборов. На рубеже тысячелетия были созданы великолепные цветные витражи в соборах и церквях.

В древние времена — будь то в Малой Азии, Китае, Греции или Риме — в большом ходу были зеркала, но их делали только из металла. В те времена бронза была стратегическим военным материалом — из нее изготавливались доспехи и оружие. Бронза — это сплав олова и меди, и, может быть, нападение римлян на Англию было вызвано стремлением захватить известные

Корнуэлльские месторождения олова. Если при изготовлении бронзы увеличить содержание олова примерно до 35 %, то получается серебристо-белый сверкающий сплав — спеллум; естественная отражательная способность его свыше 80 %, он твердый, не тускнеет и хорошо полируется. Именно этот «зеркальный» металл, который некоторые неправильно принимали за бронзу, открытый нашими предками, и использовался для изготовления зеркал.

Зеркала, сделанные из плоского стеклянного листа с подложкой из металла, впервые появились в Германии в XII в. К XIV в. алхимики открыли, что жидкая смесь олова и ртути образует амальгаму; ею можно покрыть стекло, а затем она затвердевает. И сегодня зеркала делают по этому же рецепту, лишь добавляя слой защитной краски. И до открытия реакции осаждения серебра в 1840 г. никаких изменений способ изготовления зеркал не претерпел.

Выйдя из тьмы веков, стекольное дело сосредоточилось на изготовлении бокалов, рюмок, кубков и столовой посуды. Открытие, что добавка небольшого количества окиси свинца в стеклянную шихту дает хрусталь — сверкающее тяжелое стекло, похожее на драгоценный камень, было использовано ювелирами начиная с XII в. В XV в. венецианцы завоевали себе мировое первенство в стекоделии, заменив традиционный морской песок белым кварцевым песком. Это сделало стекло более прозрачным и способствовало резкому улучшению качества массовой продукции. В 1688 г. в Нормандии был изобретен способ изготовления листового стекла путем вытягивания довольно больших листов из тигля с расплавленным стеклом. Успешная отливка хорошего листового стекла в Англии заставила себя ждать до 1773 г.

Такие ученые, как Кеплер и Ньютон, могли воспользоваться лишь довольно грубо изготовленными линзами и призмами, которые умели делать к тому времени. Большинству ученых приходилось самим шлифовать себе линзы из кусков стекла. В эпоху Ньютона еще не знали, что разные сорта стекла могут обладать заметно различающимися оптическими свойствами. Лишь около 1750 г. выяснилось, что можно довольно просто изготавливать два различных сорта стекла, называемых теперь кроном и флинтom.

В 1758 г. английский оптик Джон Доллонд впервые попытался сделать линзы телескопа без хроматической aberrации, разобравшись по существу в различии свойств этих двух стекол. К началу XIX в. эти сорта стекла уже были хорошо изучены и широко использовались. Крон — легкое стекло, с малой плотностью; обычно крон содержит около 70 % кварца (в виде песка) и 10 % известняка. Флинт — плотное стекло, содержит всего 45 % кварца, но до 40 % окиси свинца. Крон и флинт существенно различаются по оптическим свойствам: они не только имеют различные показатели преломления, но и по-разному «растягивают» спектр, т. е. имеют разную *дисперсию*. Крон имеет более низкий показатель преломления, но более высокую, чем флинт, дисперсию. Поэтому если сделать из этих стекол две линзы — одну собирающую, а другую рассеивающую, то дисперсии обеих линз скомпенсируют друг друга, и система будет действовать как положительная или отрицательная линза. Именно благодаря наличию подходящих сортов флинта и крона в 1814 г. немецкому оптику Фраунгоферу удалось сделать довольно хорошие *ахроматические* линзы для телескопа. Но хотя цветовая коррекция для линз телескопа оказалась сносной, она была недостаточной для линз микроскопа и фотоаппарата из-за специфической роли линз в этих инструментах.

### Современное оптическое стекло

Подлинное начало создания современных систем линз для микроскопов и фотоаппаратов относится к 1889 г. В этом году Аббе в Германии убедил фабрикантов стекла Шоттов из Иены приступить к производству разнообразных стекол, содержащих специально подобранные количества бора, фосфора, бария и других химических элементов. Было создано множество новых сортов оптического стекла, каждый со своим показателем преломления и дисперсией. Эти стекла, подобранные по сортам, каждый из которых по заказу можно было воспроизводить, дали расчетчику линз новые возможности. Немедленным следствием были быстрые успехи в конструировании линз для самых разнообразных целей. Создавались стекла с такими оптическими

качествами, которые ранее и не снились, — с большими и малыми показателями преломления, с высокой и низкой дисперсией. Другие страны недолго оставались позади. Сейчас во всех крупных индустриально развитых странах выпускаются самые разнообразные сорта оптического стекла. Большие усилия были предприняты для обеспечения предельной однородности стеклянных заготовок, предназначенных для изготовления линз.

При обычной температуре выплавки стекла расплавленная масса представляет собой густую вязкую жидкость. Поэтому осуществить полное перемешивание составляющих отнюдь не легко, хотя до начала нагревания шихта тщательно перемешивается. Если же расплавленная масса не будет перемешиваться, то добиться полной однородности будущей отливки оказывается невозможным. Очень важно с самого начала выбрать чистые компоненты и как можно лучше предварительно перемешать их. Раньше шихта варилась в глиняном тигле, но новейшие исследования показали, что нежелательные примеси могут попасть в горячее стекло из глины тигля. Для самых лучших стекол шихта теперь плавится в платиновых тиглях. Важно непрерывно перемешивать расплавленное стекло. При этом необходимо соблюдать особые предосторожности, чтобы в массу стекла не попали крохотные пузырьки воздуха, которые почти невозможно удалить из вязкой расплавленной смеси.

Когда требуется особенно высокое качество, выплавленное стекло отбраковывают и переплавляют; при этом для повторной плавки выбирают самые лучшие части заготовок. Конечная стадия производства оптического стекла — это тщательный продолжительный отжиг и медленное контролируемое охлаждение. Поспешность вызывает напряжения в стекле, приводящие к оптическим дефектам. Недавно проведенные исследования механизма отжига выявили, что существует узкая область наиболее опасных температур. Можно безопасно довольно быстро охлаждать стекло как до, так и после опасного интервала температур, но охлаждение в этой области требует тщательного контроля. Эти недавние открытия позволили значительно увеличить производство высококачественного оптического стекла и снизить традиционное время отжига с двух недель до двух дней.

Новейшие способы контроля выявляют многочисленные дефекты в том стекле, которое могло бы считаться хорошим. Полагают, что эти дефекты могут появляться вследствие возникновения в печи для отжига небольших областей с незначительными локальными перепадами температуры. Было обнаружено, что локальные изменения температуры всего на  $4^{\circ}\text{C}$  могут создавать заметные изменения показателя преломления в различных частях блока. Вот почему на современных предприятиях особое внимание уделяется поддержанию однородности температуры повсюду внутри печи. Если при плавлении не обеспечивалось полное перемешивание, то могут появиться прожилки, называемые «свилями»; это области, преломление в которых отличается от преломления в основной массе стекла. Блоки и листовое стекло всегда проверяются на свилю до того, как они поступают в окончательную обработку для изготовления линз. Если блок или пластину, качество которых вызывает подозрение, держат между экраном и очень ярким точечным источником света, то все свилю выявляются на экране в виде светлых или темных полос. При плохом отжиге возникшие в стекле напряжения могут привести к растрескиванию линзы или во время, или после ее изготовления.

### Прозрачность

В производстве стекол особой прозрачности используются данные многих новейших исследований. Это относится как к общему снижению поглощения, так и к увеличению прозрачности в тех областях длин волн, где обычные стекла поглощают свет. При особом внимании к чистоте смеси и тигля можно сделать такое прозрачное стекло, что блок толщиной 1 дюйм (2,5 см) будет пропускать 99% видимого света. Много труда было также вложено в создание стекол, способных пропускать известную долю ультрафиолета. В основном это связано с химическим составом. Наши глаза способны видеть излучение с длиной волны до 4000 Å. Яркий солнечный свет охватывает ультрафиолетовую область примерно до 2900 Å. Обычное поступающее в продажу плоское стекло толщиной 2—3 мм обрезает половину ультрафиолетового дневного света на волне 3300 Å. Для

некоторых недавно выпущенных стекол прозрачность значительно улучшилась. Так, пластинка толщиной 2,5 мм фирмы «Корнинг» пропускает 50% света при 2500 Å.

Был также разработан ряд специальных сортов стекла (первый из них был изобретен в США Вудом), которые пропускают близкий ультрафиолет, но почти непрозрачны для видимого света. Некоторые стекла, содержащие кобальт, пропускают много ультрафиолета и немного фиолетового света, но практически непрозрачны для остального видимого спектра. Такие стекла в сочетании с кварцевой ртутной лампой позволяют создать источник света, богатый ультрафиолетом, но почти совершенно темный в видимой области. Именно с такими установками можно проводить исследования флуоресценции под действием ультрафиолета.

Сразу же, как только были разработаны стекла, прозрачные в ультрафиолете, появились и защитные очки, обрезающие ультрафиолетовое или инфракрасное излучение. Стекла первого типа, для защиты от ультрафиолета в сильном солнечном свете, были изобретены в 1914 г. сэром Уильямом Круксом. Он нашел, что при введении окиси церия в стеклянную смесь получается стекло, непрозрачное для ультрафиолета короче 3900 Å, хотя эта примесь почти не влияет на пропускание видимого света. С тех пор описаны бесчисленные модификации таких стекол. Крукс создал также стекла, содержащие железо, которые сильно поглощают близкие инфракрасные и тепловые лучи и позволяют изготавливать темные очки для сварщиков и металлургов.

Были также пересмотрены на научной основе древние традиционные рецепты изготовления цветных стекол; теперь можно получать цветные фильтры, прозрачные в строго выбранных по цвету участках спектра. Такие специальные цветные фильтры находят применение в световых сигнальных устройствах, цветной фотографии, цветной печати и т. д. В современных каталогах сортов стекла обычно приводятся точные данные о спектральной прозрачности цветных стекол. Диапазон фильтров в наши дни простирается от нейтральных оттенков серого через все цвета спектра. Широко известны также сорта «опаловых» стекол.

Особым видом стекла, весьма ценным для научной работы, является плавеный кварц. Кристаллический кварц давно ценится за удивительную прозрачность в ультрафиолете, так как он может пропускать излучение до 2100 Å. К сожалению, хорошие крупные кристаллы кварца редки. При помощи высокотемпературной печи кварц можно переплавить в стекло (плавленный кварц), которое можно обрабатывать в кислородно-ацетиленовом пламени. Техника плавки настолько разработана, что из плавленного кварца можно делать трубки, пластинки и приборы, столь же прозрачные в ультрафиолете, как и кристаллы высшего качества. За последние годы начал выпускаться плавленный кварц, освобожденный от напряжений. Это стекло особенно ценно по трем причинам: во-первых, из-за высокой прозрачности в ультрафиолете, во-вторых, оно необычайно стойко по отношению к резким изменениям температуры, в-третьих, оно очень мало расширяется при нагревании. Если обычное стекло нагреть даже в кипящей воде и потом быстро охладить, то оно, по всей вероятности, лопнет. Но деталь из плавленного кварца можно нагреть до ярко-красного каления и погрузить в холодную воду, не опасаясь, что она треснет. Разумеется, подобный материал широко используется в исследованиях при высоких температурах. Плавленный кварц имеет еще одно достоинство — высокую прочность. Его без особого труда можно вытягивать в тонкие нити, которые так прочны и упруги, что их часто используют в качестве подвесов в чувствительных приборах.

### Плавающее стекло

Недавно создано необычное оптическое листовое стекло нового типа — «плавающее стекло». Его разработка и массовое производство осуществлены фирмой «Пилкинтон», это заняло семь лет и обошлось в несколько миллионов фунтов. Производство высококачественного листового стекла было полностью революционизировано; можно не сомневаться, что в близком будущем новый способ вытеснит все иные способы изготовления листового стекла хорошего качества, которое стало важнейшим строительным материалом в больших современных зданиях.

При традиционных способах изготовления плоского стекла листы или отливались в металлические формы, или получались путем разрезания цилиндров, вытягиваемых из ванны с расплавленным стеклом, или же из ванны со стеклом вытягивался вверх лист стекла в виде тонкого застывающего слоя. Во всех случаях после изготовления и отжига лист обязательно приходилось полировать, что обходилось дорого и требовало много времени. Для этого использовались станки с вращающимися кругами, полирующими стекло сразу с обеих сторон. Но этот процесс шел медленно, требовал больших затрат, а также специального помещения. Полировка постепенно превращалась в главный «камень на шее». Производство плавающего стекла позволило непрерывно выпускать высокосортное оптическое листовое стекло, совершенно не нуждающееся в полировке.

Из большой стекольной печи непрерывно и медленно в горизонтальном направлении выдавливается лист стекла требуемой толщины и, пока он еще горячий и не затвердел, направляется при помощи катков в «плавучую» печь. Это длинный подогреваемый снизу пламенем газа резервуар, представляющий собой огромный бассейн, наполненный многими тоннами чистого расплавленного олова. Стекланный лист протягивается так, что он плавает по поверхности расплавленного олова, которое достаточно горячо, чтобы находящаяся с ним в контакте поверхность стекла снова расплавилась. По существу поверхность расплавленного олова представляет собой идеально плоскую зеркальную поверхность, если устранены все источники вибраций. (Строго говоря, поверхность расплавленного олова обладает кривизной поверхности Земли, но, так как радиус Земли 6400 км, нет необходимости беспокоиться об этом.) Нижняя размягченная поверхность стекла, скользя по гладкой поверхности жидкого олова, принимает ту же форму. Единственные дефекты, которые могут при этом случайно появиться, — это крохотные пузырьки газа, могущие попасть между стеклом и металлом. Если не считать этого, то поверхность с оптической точки зрения почти идеальна.

Верхняя поверхность стекланный листа, который медленно протягивается через ванну с оловом, нагревается газовыми горелками, отрегулированными так,

чтобы создаваемое их нагревом плавление верхней поверхности обеспечивало так называемую «огневую» полировку, поэтому верхняя поверхность стекла также приобретает характер расплавленной зеркально гладкой жидкости. После обработки лист медленно протягивается через длинную отжигающую печь. После выхода из печи и охлаждения воздухом лист разрезается алмазной режущей машиной, затем отдельные листы складываются пачками и упаковываются. Весь процесс от начала до конца идет непрерывно и автоматически.

Изготовленные таким способом листы не нуждаются ни в какой дополнительной механической полировке, а качество их поверхности намного лучше, чем у самых дорогих полированных листов стекла.

### **Другие оптические материалы**

За последние годы был получен ряд новых синтетических оптических материалов. С конца прошлого века кристаллы некоторых минералов — каменной соли, сильвинита, флюорита, кварца и другие — с успехом применяются в оптических приборах. Например, в течение полувека уже известно, что включение флюоритовой линзы в качестве компоненты сложного объектива микроскопа значительно уменьшает его хроматическую аберрацию. Объективы такого рода — *апохроматы* заведомо лучше объективов, сделанных лишь из стекла. Линзы и призмы из каменной соли и сильвинита в инфракрасных приборах могут пропускать более широкий диапазон длин волн, чем линзы и призмы из других материалов. Особенно широко в оптике используются кристаллы кварца; но сверх того они нашли полезное применение в качестве элементов контроля частоты в радиоаппаратуре.

Среди природных минералов редко можно найти нужные кристаллы достаточно высокого качества; если же качество хорошее, то обычно кристаллы оказываются слишком малы по размерам. Ввиду этого, а также в связи с массовым распространением в промышленности инфракрасных и ультрафиолетовых спектрографов много усилий было потрачено на совершенствование методов искусственного выращивания больших хороших кристаллов, необходимых оптической

промышленности. Эти усилия увенчались успехом, и теперь мы умеем выращивать различные исключительно чистые кристаллы, в некоторых случаях до 25 см в поперечнике. Выращивание высококачественных кристаллов стало новой отраслью промышленности, поставляющей кристаллы для оптических и полупроводниковых предприятий.

## Пластмассы

Как только появились достаточно прозрачные пластмассы, такие, как плексиглас, стало ясно, что они найдут себе применение в оптике. Исследования показали, что ряд пластмасс обладает хорошей оптической однородностью — в особенности постоянством показателя преломления. Поскольку многие из хороших оптических пластмасс размягчаются при температурах, близких к 120°С, их легко прессовать в линзы. Более того, полиметилакрилаты (к числу которых относится и плексиглас) имеют относительно низкие показатели преломления и сравнимы в этом отношении с кроновым стеклом. С другой стороны, полистирены (в частности, дистрен) имеют более высокие показатели преломления и в какой-то мере сравнимы с флинтovým стеклом. Поэтому на первых порах специалисты надеялись, что точная прессовка компонент линзы позволит при наличии точно выполненных форм производить в массовом масштабе дешевые ахроматические дублеты хорошего качества.

Однако на пути к реализации этого замысла встретились две большие трудности. Во-первых, прессованные пластмассы подвержены эффекту *текучести*; их форма, точная сразу же после прессовки, с течением времени медленно искажается. Во-вторых, довольно быстро выяснилось, что пластмассы недостаточно сопротивляются истиранию и легко царапаются. И хотя впоследствии эти недостатки до некоторой степени удалось уменьшить, полностью избавиться от них не удалось. Компоненты линз из пластмасс теперь делают тремя различными способами.

В первом способе изготавливают матрицу из нержавеющей стали и тщательно ее отполировывают. Затем путем формовки по шаблону, т. е. путем вдавли-

вания формы в нагретый блок пластмассы, получается требуемая линза. Этот процесс годится лишь для получения неточных дешевых линз — для игрушек и т. п.

Во втором способе используется тот факт, что некоторые твердые пластмассы образуются путем полимеризации жидкости. В этом случае первичный химикат для изготовления твердой пластмассы является жидким, так что молекулы его, можно сказать, независимы и существуют сами по себе. Химики называют это жидким мономером. Такую жидкость можно заставить различными способами (например, облучением ультрафиолетом) затвердеть в полимер, т. е. заставить молекулы объединиться и тем самым образовать твердое тело. Раз произошла полимеризация, пластмасса стала неизменяемым прозрачным твердым телом. Линзы можно делать, изготовив матрицу желаемой формы в стекле, а затем налив туда жидкий мономер. После полимеризации жидкость превращается в прозрачное твердое тело, принимающее точную форму матрицы. Поскольку пластмасса при этом не подвергалась нагреванию и давлению, здесь отсутствует и последующая текучесть.

Третий способ — простая механическая обработка на станке, при которой линза обтачивается или вырезается из блока твердой пластмассы. Этот метод используется в настоящее время для изготовления контактных линз, заменяющих привычные очки.

### **Пластмассовые контактные линзы**

Очень многие достижения современной оптики обязаны изобретениям, сделанным в давние времена очковых дел мастерами. Поэтому стоит немного остановиться на истории очков. Об изобретении очков точно ничего не известно, хотя есть много свидетельств об их использовании. Плиний в своей 37-томной «Естественной истории», которая появилась в 77 г. н. э., утверждает, что Нерон обычно смотрел бои гладиаторов через «изумруд». Римские ювелиры того времени часто придавали драгоценным камням чечевицеобразную форму. Такие камни обычно назывались кабошонами; они могли быть как выпуклыми, так и вогнутыми. Вполне возможно, что Плиний описывает выпуклый

монокль, помогавший близорукому Нерону. Но можно также допустить, что «изумруд» — это всего лишь «солнечные очки», смягчавшие блеск итальянского солнца. Чем бы ни служил этот «изумруд», это, по-видимому, был очень крупный и прозрачный кристалл.

Во II в. н. э. Птолемей Александрийский описывал преломляющие свойства линз, но определенно не дошел до мысли об очках. В начале XIII в. была переведена на латынь рукопись 200-летней давности арабского ученого Альгазена; ее широкое распространение оказало значительное влияние на европейцев. Уже на протяжении столетий в монастырях, которые одновременно были и хранилищами рукописных книг, слышались жалобы пожилых монахов на то, что вследствие постигшей их дальнозоркости они уже не могли заниматься делом всей своей жизни — перепиской книг.

Именно ученый монах Роджер Бэкон, без сомнения знакомый с трудом Альгазена, во второй половине XIII в. впервые обратил внимание в своих сочинениях на действие вогнутой линзы, помогавшей лучше видеть дальнозорким. Тот факт, что этот «колдун» мог исправлять зрение таким простым способом, считался дьявольским наваждением. В результате сочинения Бэкона были прокляты церковью, а сам он был брошен в тюрьму, где томился в течение десяти лет.

Вероятно, Бэкон описывал ручную лупу фактически той самой формы, которая используется в наши дни, скажем, для чтения карт; в литературе той эпохи встречаются описания ручной линзы для чтения.

Относящиеся примерно к 1350 г. картины европейских мастеров изображают монахов, носящих очки на носу. Отчетливо видно, что это просто две ручные линзы, концы оснований рукояток которых были соединены подобно ножницам. Их можно было повертывать вокруг заклепки и сгибать так, чтобы они охватывали нос.

В сущности это и означало появление современных очков, а вскоре и появились очки, прикрепляемые тесемкой к ушам или даже к шапке. В течение нескольких столетий использовались только выпуклые линзы, но затем — неизвестно кем — было сделано открытие, что вогнутыми линзами можно исправлять близору-

кость. Так обстояли дела до начала XIX в., когда английский ученый Волластон изготовил для себя цилиндрические линзы, исправляющие астигматизм (иногда первенство в их изобретении отдают Томасу Юнгу).

На протяжении веков очки делали, разумеется, из стекла, в особенности когда стало доступным прозрачное венецианское стекло. В 1888 г. впервые была выдвинута мысль об использовании глазных контактных линз, удерживаемых на радужной оболочке глаза благодаря поверхностному натяжению жидкости, постоянно смачивающей глаз. Контактные линзы постепенно были признаны, но использовались лишь немногими. Однако за последние годы число людей, носящих контактные линзы, необычайно возросло. Полагают, что только в США ими теперь пользуются свыше шести миллионов человек. Это обусловлено прежде всего усовершенствованием методов изготовления небьющихся пластмассовых контактных линз очень малого размера. Каждая линза вытачивается из куска пластмассы согласно предписаниям врача-окулиста. Но при их производстве возникли неожиданные трудности. Оказалось, что безвредные для организма пластические материалы оказывают сильное абразивное действие на резцы. Даже такой твердый материал, как карбид вольфрама, который легко справляется с твердыми сталями, теряет режущую кромку всего через несколько часов работы! Проблема была в конце концов решена благодаря использованию резцов, изготовленных из алмазов высокого качества. Тем не менее, хотя алмаз, несомненно, является самым твердым веществом, даже эти резцы требуют повторной полировки и заточки примерно раз в месяц.

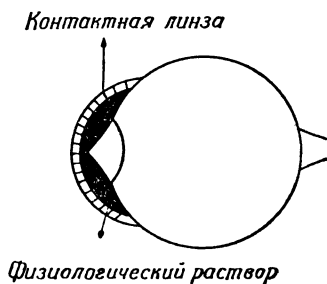
Пластмассовые контактные линзы обладают двумя основными достоинствами: они легки и не бьются, а потому безопасны. Теперешние линзы имеют диаметр всего около 8 мм, и вес их составляет две трети веса одного ячменного зернышка. На фото IV показана современная пластмассовая контактная линза, лежащая на кончике пальца. Контактные линзы позволяют носящим их заниматься многими видами спорта, недоступными для носящих обычные очки; кроме того,

существуют такие дефекты глаза, при которых зрению могут помочь только контактные линзы.

Целый ряд серьезных дефектов глаза, почти полностью препятствующих нормальному зрению, связан с тем, что передняя поверхность глаза — роговица — имеет неправильную форму. Например, в некоторых случаях вместо правильной округлости она оказывается слегка конической, что приводит к сильному ухудшению зрения. Скорректировать этот недостаток обычными линзами невозможно; контактные же линзы здесь могут помочь, и вот почему.



Р и с. 16.



Р и с. 17.

Предположим, что роговица глаза, как показано на рис. 16, завершается конусом. Зрение сильно искажено, и совершенно очевидно, что применение очков обычного типа не принесет никакой пользы. Но если мы теперь подберем гладкую контактную линзу сферического типа, как показанная на рис. 17, и заполним пространство между конической роговицей и линзой жидкостью, имеющей тот же показатель преломления, что и роговица (этому требованию отвечает подходящий раствор обычной соли), то коническая форма роговицы уже не будет препятствовать нормальному зрению. Такому же исправлению успешно поддаются и другие неправильности формы роговицы.

На внутреннем ободке новейших контактных линз имеется ряд мельчайших желобков, нанесенных машинным способом; это позволяет слезной жидкости протекать между роговицей и линзой.

## Поляроид в оптике

Изобретение *поляроида*, сделанное Лэндом в США около 25 лет назад, ввело в широкий обиход новый ценный оптический материал. До его появления поляризованный свет создавался или относительно небольшими по размеру двоякопреломляющими кристаллами, или же путем отражения света от стекла под определенным углом (угол Брюстера). Новый же материал может быть изготовлен в виде листов или кусков достаточно большой площади — до  $1/3$  кв. метра. В поляроиде используется свойство, именуемое *дихроизмом*. Существуют кристаллы, например турмалин, которые, как и полевой шпат, являются двоякопреломляющими, но, кроме того, сильно поглощают один из двух поляризованных лучей, которые создают двоякопреломляющим кристаллом. В итоге даже через очень тонкий кристалл проходит только один поляризованный луч. Такой дихроичный кристалл пропускает свет, поляризованный в одном направлении, и поглощает практически весь свет с любыми другими направлениями поляризации.

Лэнд обнаружил, что если растянуть тонкий лист из поливинила, то молекулы этого полимера сами выстроятся в длинные параллельные цепочки. Вследствие этой псевдокристалличности вещество становится двоякопреломляющим. Если затем этот лист подвергнуть действию иода, то поливинил поглощает иод и лист вдобавок приобретает свойство дихроичности. Пластмасса закрепляется, и образуется лист поляроида. Существует несколько разновидностей поляроида, употребляемых для разных целей. Коэффициент полезного действия поляроида как поляризатора света весьма высок. Теоретически идеальный поляризатор 50% падающего света поглощает, а 50% пропускает. Хороший поляроид пропускает 42%. Если требуется полное поглощение света при установке двух поляризаторов с перпендикулярными друг к другу направлениями поляризации — случай, часто встречающийся в микроскопии, — и если мы готовы ограничиться пропусканием в 15% при параллельных поляризаторах, то возможно использование специального типа поляроида с сильным поглощением, пропускающего при скрещенных поля-

ризаторах лишь 0,0005% падающего света, чего более чем достаточно для любой цели.

Листы поляроида, поступающие в продажу, монтируются или на пластмассовом, или на стеклянном основании. В случае необходимости они изготавливаются в виде точно проградуированных оптических плоскостей для точных оптических приборов. Они хорошо противостоят воздействию как высоких, так и низких температур, но портятся при длительном облучении интенсивным ультрафиолетом. Существуют также поляроиды, успешно работающие в близком ультрафиолетовом или в близком инфракрасном свете.

Применения обычных поляроидов как в быту, так и в науке удивительно разнообразны. Так, при косом отражении (в особенности от неметаллов) свет обычно частично поляризуется, а под некоторыми углами поляризуется почти полностью. Слепящие блики отраженного света можно существенно ослабить при помощи поляроидных солнечных очков или экранов, которые служат самой эффективной защитой на море или на мокрых дорогах. На контрольных вышках аэропортов и на капитанских мостиках лайнеров в качестве стекол с большим успехом используются листы поляроида.

Одна специальная модификация поляроида, называемая круговым поляризатором, обладает необычным свойством — пропуская 40% обычного прямого света, она полностью подавляет отраженный свет. Если такой лист установить перед экраном телевизора, то до зрителя дойдет 40% света от экрана, но любой даже очень яркий свет в комнате не будет отражаться от передней поверхности экрана, что обеспечивает четкое, не замытое посторонним светом яркое изображение. Никакого чуда здесь нет. Яркий комнатный свет по пути к экрану телевизора проходит через поляроид и поляризуется. Свет, отраженный от экрана по пути к нашим глазам, проходит через поляроид и поглощается в нем. Изображение на телевизионном экране образовано неполяризованными лучами, поэтому 40% света пройдет через поляроид и изображение будет видно четко, без замыывания отраженным светом. Это приспособление особенно ценно для радиолокационных экранов и приборных панелей в ярко освещенных кабинах самолета.

Дальнейшим развитием этой идеи является прикрытие всех осветительных лампочек колпаками с линейными поляризаторами, так что кабина самолета или другое помещение освещается поляризованным светом. Глаз этого не замечает. Экраны же радиолокаторов прикрыты экранами с круговыми поляризаторами. Подавление отраженного света в этих условиях особенно эффективно, и изображение на экране видно на очень темном фоне, несмотря на интенсивное освещение кабины.

Одно из самых последних усовершенствований — поляроид, отбирающий из белого света отдельные цвета. При скрещивании и поворотах двух листов из такого материала можно управлять изменениями окраски проходящего света. Такие фильтры нашли применение в цветной фотографии.

### **Оптический анализ упругих напряжений**

Получение больших пластин поляроида резко расширило возможности исследования различных технических сооружений путем использования так называемого фотоанализа упругих напряжений. Вообще говоря, этой методике уже свыше 40 лет, но по-настоящему широкое распространение она получила лишь сейчас. Теоретические расчеты, которые позволяют судить о напряжениях, возникающих в сложных по форме технических объектах, подвергаемых различным силовым воздействиям (это может быть, например, поршень или пластинка с прорезями или отверстиями), часто оказываются невероятно трудными. Вместо проведения расчетов делают модель объекта из прозрачной пластмассы. Материал для модели подбирают таким образом, что, когда его подвергают деформациям, он становится двоякопреломляющим. Если такую находящуюся под действием деформирующих сил модель поместить между скрещенными поляроидами (которые задерживают весь пропускаемый свет), то свет будет проходить только в областях двойного лучепреломления. В результате возникают цветные полосы, число и форма которых зависят от напряжений в соответствующих местах модели. Так можно изучать распределение на-

пряжений в случаях, слишком трудных для теоретического анализа.

В последней модификации этого метода сама исследуемая деталь покрывается подсыхающей пластмассовой пленкой. При появлении напряжений пленка становится двоякопреломляющей, и если на эту деталь посмотреть через лист поляроида, то можно оценить напряжения.

Картина напряжений, возникающих в объектах даже очень простой формы при приложении сил, настолько сложна, что не может быть рассчитана теоретически. Именно поэтому так ценен фотоанализ упругих напряжений. Опыт показывает, что опасные концентрации напряжений возникают прежде всего на острых углах и неправильностях формы; именно там чаще всего происходят повреждения. Прекрасный пример виден на фото V. Вверху показана прямоугольная пластинка, в которой выпилено треугольное отверстие. Пластика зажата в небольших ручных тисках. Фотография воспроизводит вид области вокруг отверстия в обычном (неполяризованном) свете.

На среднем снимке видна поразительная картина, полученная при введении скрещенных поляроидов. В треугольном отверстии света не видно, так как материал находится между скрещенными поляризаторами, но вокруг отверстия появилась система интерференционных полос, обусловленных напряжением. Они и служат мерой напряжений в каждом месте, и нетрудно видеть, что они сосредоточены в острых углах треугольника. Если напряжение уменьшить (но полностью не снимать), появляется картина напряжений, показанная на фото внизу.

Этот метод представляет особую ценность для визуального контроля, когда можно наблюдать постепенное развитие напряжений при непрерывном увеличении давления.

Любопытное применение поляроида — астрокомпас. Когда самолет летит в высоких широтах, магнитный компас плохо помогает определить направление. Но уже давно известно, что свет неба частично поляризован, причем этот эффект зависит от положения Солнца и наблюдается, даже если Солнце закрыто облаками. Благодаря этому можно постоянно фиксировать на-

правление на Солнце, установив направление поляризации света неба. Это направление определяется не очень точно, но все же удовлетворительно, и во всяком случае это гораздо лучше, чем вообще ничего.

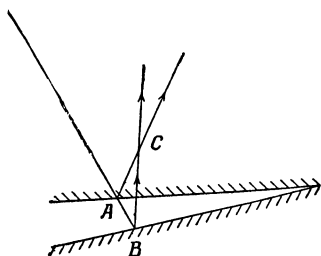
С описанным эффектом тесно связаны новейшие исследования механизмов определения направлений у пчел и других насекомых. По-видимому, глаза у этих насекомых устроены так, что они способны воспринимать поляризованный свет и использовать поляризацию света неба для навигации в полете.

Существует и еще одно возможное применение поляризации. Если бы все автомобильные фары были покрыты слоем поляроида, чтобы свет фар был поляризован под углом  $45^\circ$  к поверхности дороги, а каждый водитель имел на ветровом стекле козырек из поляроида с той же ориентацией, опасность ослепления светом фар встречной машины была бы устранена. В самом деле, водителю был бы виден неполяризованный свет подфарников встречной машины, а свет ее фар был бы погашен поляроидом на ветровом стекле. В то же время, поскольку поляроиды на ветровых стеклах всех машин параллельны фильтрам на фарах, каждый водитель видел бы встречную машину, освещенную его собственными фарами. Правда, такая схема была бы эффективной лишь в том случае, если бы поляроиды были установлены должным образом на всех машинах, в противном случае возможность путаницы создала бы еще большую опасность.

# НОВАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

## Интерференционные полосы

В одной из предыдущих глав мы описали, как Томас Юнг очень простым способом обнаружил интерференцию световых волн при помощи трех небольших отверстий. Юнг понял также, что давно известные *кольца Ньютона* — это еще один пример интерференции световых волн, как и цветные пятна, получающиеся,



Р и с. 18.

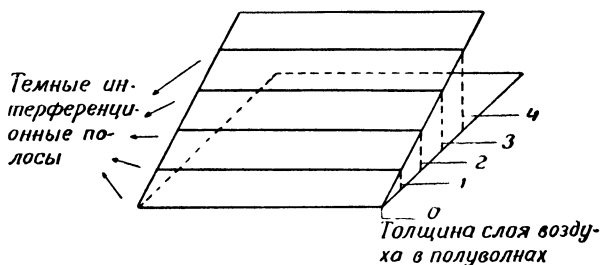
когда тонкая пленка масла расплывается по поверхности воды. Вслед за Юнгом в первой половине XIX в. другие ученые изобрели иные способы осуществления интерференции света. Один из методов, которому мы уделили внимание, был впервые описан Физо. Этот эксперимент очень похож на опыт с кольцами Ньютона,

поскольку интерференция у Физо получалась благодаря последовательному отражению света от двух почти соприкасающихся поверхностей стекла.

Возьмем две небольшие стеклянные пластинки и сложим их так, чтобы на одном конце они касались друг друга, а на другом немного расходились (рис. 18); между ними образуется воздушный клин с очень малым углом. Если на эти пластинки наклонно падает пучок света, то в точке *A* первой пластинки отражается примерно 4% света. Пучок проходит через стекло и воздух, и в точке *B* от второго стекла отражается еще 4%. Оба эти пучка имеют почти одинаковую интенсивность и к тому же являются когерентными (см. стр. 17). Когда они встречаются в *C*, происходит их интерференция. Будет ли в *C* свет усиливаться или

гаситься, зависит исключительно от разности длин двух путей  $AC$  и  $ABC$ .

Если мы посмотрим опять на рис. 18, то увидим, что отражение в  $A$  отличается от отражения в  $B$ ; в первом случае свет отражается от границы раздела стекло — воздух, а во втором в о з д у х — стекло. Юнг доказал, что между этими лучами действительно существует различие; именно различие в характере отражения порождает разность хода в половину длины световой волны. Это означает, что, когда фактическая

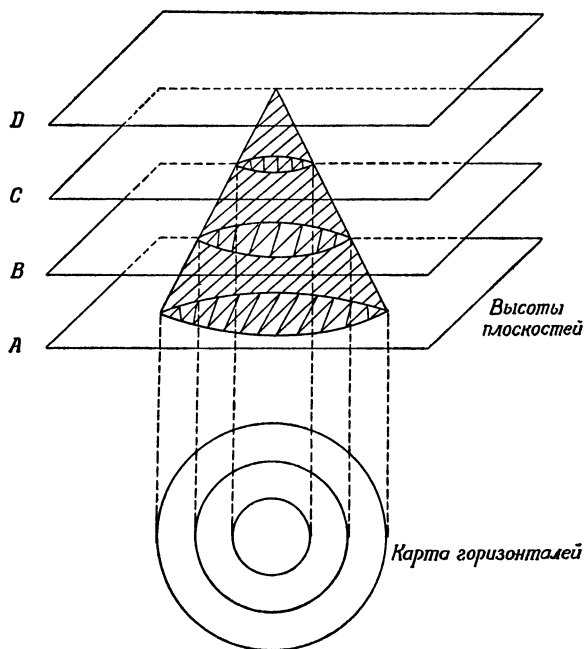


Р и с. 19.

линейная разность хода между этими двумя пучками составляет целое число световых волн, в этом месте пучки не усиливают, а гасят друг друга, т. е. если разность хода равна целому числу волн, то наблюдается темная интерференционная полоса, а не светлая. Это противоположно тому, что происходит в простом опыте Юнга, который был описан выше.

Теперь рассмотрим более подробно общую картину интерференционных полос от нашего воздушного клина, ограничившись пока одним лучом. Общее расположение показано на рис. 19. Продвигаясь постепенно от вершины клина (место соприкосновения пластинок), мы одно за другим проходим положения, в которых толщина слоя воздуха равна полуволне, двум полуволнам, трем полуволнам и т. д. В каждом из этих положений появляются темные интерференционные полосы. Поскольку половина световой волны составляет примерно  $1/40\,000$  см, то очевидно, что полосы указывают на ничтожные изменения толщины воздушного клина. Чтобы избежать путаницы, следует воспользоваться

светом только одной длины волны; в противном случае интерференционные полосы для разных длин волн (различных цветов) будут накладываться друг на друга. Таким образом, полосы превращаются в микрометрическую шкалу для измерения толщины воздушного промежутка. Если на одной из этих двух поверхностей



Р и с. 20.

есть выпуклости или впадины, то воздушные промежутки в этих точках будут отличаться от соседних. Из-за этого, интерференционные полосы будут менять форму при пересечении таких областей и тем самым выявлять микротопографию поверхности. Иными словами, наши полосы превращаются в горизонтали рельефа на топографических картах. Давайте теперь посмотрим, какого рода топографическую карту будет давать коническая «сахарная голова» (рис. 20). Топографические карты строятся путем воображаемого сечения ландшафта последовательностью параллельных

плоскостей, скажем, на расстоянии 50 м одна от другой. Если  $A$  — уровень моря, а  $B$ ,  $C$ ,  $D$  — три такие плоскости, то они пересекут конический холм по окружностям. На карте рельефа, как показано внизу, будут видны окружности, и при переходе от одной горизонтали к соседней высота ландшафта меняется на 50 м.

В сущности ситуация с оптическими интерференционными полосами у нас такая же, с той только разницей, что мы производим сечения поверхности воображаемыми плоскостями, которые отстоят одна от другой на половину длины световой волны. Следовательно, при переходе от одной световой горизонтали к соседней (т. е. от одной интерференционной полосы к следующей) высота поверхности будет изменяться на 1/40 000 см. Как конический холм, так и коническая впадина дают одинаковые картины горизонталей, но можно привлечь другие оптические устройства и отличить их друг от друга. Таким образом, интерференционные полосы являются хорошим индикатором микрорельефа и позволяют выявить все подробности микроструктуры поверхности.

Интересно, что, хотя Ньютон еще в 1704 г. в своей знаменитой «Оптике» подробно описал свойства этих интерференционных полос (ньютоновы кольца), лишь в 1886 г. французский приборостроитель Лоран догадался, что подобные интерференционные узоры представляют собой по существу контурную карту микроструктуры поверхности. С тех пор этот метод начали использовать в оптическом производстве для проверки качества обработки оптических деталей.

Поскольку описанные выше интерференционные полосы возникают при отражении света от двух поверхностей и в образовании их принимают участие всего два луча, этот метод называется *двухлучевой интерферометрией*.

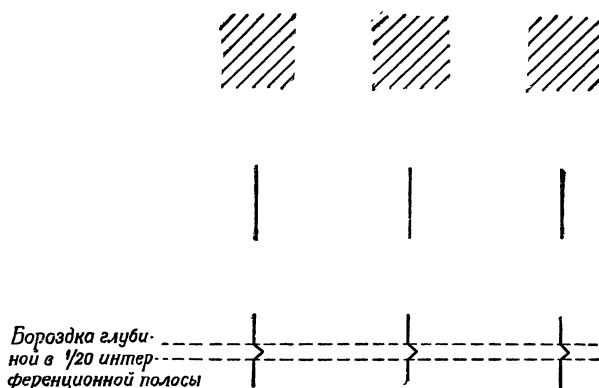
### **Многолучевая интерферометрия**

Крупный шаг вперед в улучшении интерференционного метода был сделан автором в 1945 г. благодаря разработке способа *многолучевой интерферометрии*, который с тех пор был усовершенствован и упрощен. Чувствительность этой методики была увеличена во сто

крат за счет использования простых, но принципиально иных оптических средств. До сих пор мы рассматривали интерференционные эффекты, возникающие при сложении двух лучей примерно одной и той же интенсивности. Они приводили к созданию оптических горизонталей, соответствующих изменениям высоты на  $1/40\,000$  см. Однако при двухлучевой интерференции возникают широкие полосы, потому что светлые и темные полосы имеют равную ширину. В результате интерференционная полоса растянута на половину интервала интерференции. Однако если вместо двух лучей складывается большое число близких друг к другу лучей, то образуется интерференционная картина в виде очень узких резких линий, далеко отстоящих одна от другой. Именно это обстоятельство и повышает чувствительность этого метода выявления микроструктуры поверхности. Чем больше складывается лучей, тем уже интерференционные полосы и тем четче они обрисовывают контуры мелкой детали. Соответственно возрастает и точность измерений.

Многолучевой эффект создается благодаря покрытию двух поверхностей, между которыми происходит интерференция, очень тонким и исключительно равномерным слоем серебра. Толщина слоя подбирается такой, чтобы слой отражал больше 95 % света, но все же был достаточно прозрачным, чтобы пропускать не менее 1 % света. Благодаря этому хорошо отражающему и все же отчасти прозрачному слою свет как бы перепрыгивает туда и обратно между этими посеребренными поверхностями. В результате примерно сотни таких «скачков» число интерференционных лучей резко увеличивается, и ширина интерференционных полос в наилучших случаях составляет не более  $1/100$  расстояния между парой соседних полос. Поскольку при переходе от одной полосы к другой высота поверхности меняется на  $1/40\,000$  см, изменение высоты при перемещении поперек многолучевой интерференционной полосы составляет всего  $1/1\,000\,000$  см. Практика показала, что можно измерить деформацию интерференционной полосы, составляющую всего  $1/5$  ее ширины. Мы приходим к замечательному выводу, что самые малые из поддающихся измерению деформации полос соответствуют изменениям высоты всего на  $5\text{Å}$ , т. е. на размер

некрупной молекулы! Таким образом, наш способ позволяет выявлять изменение высоты на размер молекулы, а все, что для этого нужно, — кусок посеребренного стекла да ртутная лампа. На рис. 21 схематически показаны двухлучевые интерференционные полосы, многолучевые интерференционные полосы, многолучевые полосы, пересекающие бороздку.



Р и с. 21.

Тем не менее существует любопытное жесткое ограничение возможностей этого метода, ибо эта огромная чувствительность проявляется только в направлении: вверх — вниз. В поперечном направлении в лучшем случае можно достичь увеличения в диапазоне от 1 до 500. Это обстоятельство требует особого внимания при интерпретации картин интерференционных полос (мы называем их *интерферограммами*). Например, часто не составляет трудности получить интерферограммы, полосы на которых путем увеличения снимков можно разнести сантиметров на 25. Поскольку истинное изменение высоты для двух соседних полос на исследуемой поверхности составляет всего  $\frac{1}{40\,000}$  см, то отсюда следует, что увеличение высоты детали поверхности в направлении вверх — вниз происходит не меньше чем в миллион раз! Тем не менее надо всегда иметь в виду, что увеличение поперек

интерференционной картины не может быть больше примерно 100. Поэтому масштаб в направлении вверх — вниз не менее чем в 10 000 раз больше масштаба в направлении поперек объекта, и, что могло показаться огромным отверстием, на самом деле всего лишь очень мелкое углубление поверхности.

### **Многолучевые интерференционные картины**

Мы выбрали несколько примеров, чтобы показать, как очень простые физические принципы дают большой вклад во многие научно-исследовательские работы. Ряд ученых разработали методику изучения микроструктуры поверхностей кристаллов, металлов, пластмасс, стекла и т. д. Прежде всего необходимо аккуратно посеребрить как исследуемый объект, так и эталонную поверхность. Толщина покрытия должна быть  $\sim 1/1000000$  см. Результат исследования методом многолучевой интерферометрии поверхностей, кажущихся на глаз совершенно гладкими и лишенными структуры, часто оказывается совершенно неожиданным. Мы многое узнали о росте кристаллов, влиянии химических воздействий на поверхность, о разрушениях, порождаемых трением, износом и ударами, о характеристиках жесткости поверхностей и т. д.

Совместное использование многолучевой интерферометрии и микроскопа по существу создает трехмерную микроскопию, дающую возможность исследователю измерять объект в трех измерениях.

### **Дождевая эрозия самолетов**

Уже давно известно, что когда самолет, летящий со сверхзвуковой скоростью, попадает в сильный дождь, то обшивка машины и даже ряд деталей конструкции могут претерпеть весьма серьезные повреждения от ударов дождевых капель. Поэтому мы решили исследовать методом многолучевой интерферометрии, какое повреждение наносит столкновение с одной дождевой каплей.

Небольшая капля воды была подвешена на паутинке. В эту каплю стреляли из духового ружья кусочком металла, который изображал самолет. Скорость полета измеряли по промежутку времени, за который пуля

пересекала два луча света. С простым духовым ружьем, меняя давление воздуха, можно было получать скорости от 800 до 1600 км/час. После удара пули о дождевую каплю она продолжала полет и заканчивала свой путь в большой кипе ваты. Затем пуля серебрилась, результат столкновения пули и дождевой капли изучался методом многолучевой интерферометрии.

На фото IIIa показана картина интерференционных полос. Увеличение поперек среза составляет всего 80. Можно видеть, что в пуле образовалась небольшая ямка. Она возникла при соударении со скоростью ~ 1300 км/час (немного больше скорости звука). Поскольку от полосы к полосе высота поверхности изменяется на  $1/40\,000$  см, можно сделать вывод, что глубина образовавшегося круглого кратера составляет около  $1/6000$  см.

Из опытов, сделанных при различных скоростях соударения, можно вывести закон, связывающий объем созданной ямки со скоростью соударения. Было найдено, что объем поврежденной области удивительным образом пропорционален восьмой степени скорости. Практически это означает, что эффект повреждения при скорости 1600 км/час примерно в 250 раз больше, чем при скорости 800 км/час, а при скорости 3200 км/час повреждение было бы не менее чем в 65 000 раз больше, чем при 800 км/час (если закон еще выполняется). Теперь становится понятным, почему так опасна дождевая эрозия при высоких скоростях.

К счастью, самолеты и ракеты, летящие с очень высокими скоростями, обычно находятся выше области дождей, в противном случае они просто не смогли бы уцелеть.

### **Направленная твердость алмаза**

Алмаз — самый твердый из всех известных людям материалов, и вполне естествен вопрос, как же обрабатывать алмазы. Алмаз не только сверкающий драгоценный камень — это важный промышленный материал. Алмазные резцы широко используются в промышленности, и алмазные инструменты играют все более важную роль в массовом производстве.

Для всех этих технических применений нужны алмазы определенных форм. Не забудьте, что красивым драгоценным камням также должна быть придана соответствующая форма! Так мы возвращаемся к вопросу, чем же можно шлифовать, резать и полировать самый твердый на свете материал.

Ответ содержится в старинной поговорке: «Клином вышибают», потому что — и это было известно с древнейших времен — кристаллы алмаза, подобно большинству других кристаллов, в различных направлениях имеют разную твердость. В алмазе есть «более твердые» и «более мягкие» направления, хотя «более мягкие» все-таки еще очень твердые. Еще в эпоху древнего Рима было известно, что, хотя алмаз и тверд, он тем не менее хрупок, и ударами молотка его можно раздробить на мелкие осколки. (Твердость и хрупкость — совершенно разные качества: стекло гораздо тверже, чем мягкий алюминий, но ударьте по окну алюминиевым прутком, и хрупкое стекло треснет.) Если алмазный порошок смешать с маслом и полученную пасту намазать на быстро вращающийся металлический диск, то среди множества алмазных частиц на диске окажется много с «твердыми» направлениями. Если теперь мы возьмем алмаз, требующий огранки, и подставим его под намазанный пастой диск в «мягком» направлении кристалла, то многочисленные частицы на диске, соответствующие твердым направлениям, медленно, но верно обточат прижимающееся к ним «мягкое направление» кристалла. Так путем большой затраты времени и труда можно в конце концов придать алмазу необходимую форму.

Какие же направления твердые и какие мягкие — это была тайна, тщательно охраняемая членами старинной гильдии гранильщиков-ювелиров. Даже сегодня трудно заставить гранильщика алмазов раскрыть секреты его ремесла. До сих пор среди специалистов нет единого мнения, какие направления в алмазе более мягкие, и суждение, насколько одно направление может быть тверже или мягче другого, не имеет под собой сколько-нибудь прочного основания. Все здесь «пробуется на зуб», как делали в течение веков. Ученый, если он человек здравомыслящий, не может не относиться с величайшим уважением к накопленным

издревле традициям, но обнаружит, что даже среди старых, опытных ремесленников оценки степени твердости разные.

Вот почему мы попытались получить кое-какие количественные данные, не полагаясь на суждения ремесленников. В качестве объективного критерия было выбрано сопротивление абразии в разных направлениях на разных гранях алмаза. С помощью знакомого с техникой обработки алмаза механика был разработан следующий метод исследования. Небольшое чугунное колесико с острым ободом вращалось с большой скоростью; на обод наносилась алмазная паста. Этим колесом на грани алмаза наносились небольшие мелкие бороздки, причем число оборотов колеса и приложенное усилие строго фиксировались. При неизменных условиях бороздки нарезались в различных направлениях и на разных гранях кристалла. Измеряя объем различных борозд, можно было получить некую меру сопротивления абразии в различных выбранных направлениях.

Именно здесь на сцену вышла многолучевая интерферометрия. На фото IIIб показана интерферограмма одной такой бороздки. Бороздка имеет в длину всего 2,5 мм и очень мелкая; все же из вызванных ею интерференционных полос (6 на одной стороне и 7 на другой) следует, что глубина бороздки в центре около  $1/80\,000$  см. Эти снимки впервые за многие века позволили получить некоторую *числовую* оценку сопротивления алмаза к абразии в разных направлениях. Тем не менее первое, с чем нам придется смириться, — это то, что такие данные очень мало повлияют на недоверчивых к новому и все же весьма умелых старых мастеров, которые будут продолжать изготавливать прекрасно ограненные красивые драгоценности, пользуясь только тайнами своего ремесла, как они это делали столетиями. В лучшем случае этими находками специалистов, может быть, воспользуется мастер, делающий алмазные резцы для промышленности.

### Тригоны

Как появились алмазы на Земле, мы еще не знаем полностью, хотя объем изысканий в этой области весьма велик. Одна из загадочных особенностей многих

природных алмазов состоит в том, что очень часто на некоторых гранях кристаллов видно множество крохотных треугольных углублений, которые обычно называют *тригонами*. Их происхождение пока не выяснено, поскольку одна научная школа утверждает, что это явление роста, а другая — что это следствие протравки или растворения. Но какова бы ни была причина, породившая тригоны, их форма и другие особенности интересны сами по себе и заслуживают изучения. Методом многолучевой интерферометрии мы подвергли исследованию значительное число граней с тригонами (одна из полученных интерферограмм показана на фото VI). Много полезной информации скрывается в подобных картах микрорельефа. Глубины тригонов можно оценить на глаз, поскольку каждая интерференционная полоса означает изменение глубины на  $1/40\,000$  см. Хорошо выявляются формы тригонов: у некоторых основания плоские, у других заостренные. Наклоны сторон, наложение друг на друга и многие другие подробности можно извлечь из одной такой интерферограммы. Интересен уже качественный характер этой картины, не говоря уж о том, что при небольшой затрате усилий все эти сведения можно преобразовать в числовые данные.

### Применения в промышленности

Многолучевые интерферограммы, только что приведенные в качестве иллюстраций, были выбраны нами потому, что исследуемые объекты дали особенно привлекательные картины интерференции. Но та же методика была с успехом использована и для многих более житейских объектов. Особенно наглядно проявилась польза этого метода в тех отраслях промышленности, где требуется так называемая сверхчистая обработка поверхностей. Эта обработка производится или на токарных станках при помощи очень острых алмазных резцов, или на специальных мелкозернистых шлифовальных кругах, или хонингованием и полированием. Во всех случаях изделие имеет обычно или «шелковую», или зеркальную поверхность, что очень удобно для проверки, испытания и контроля методом многолучевой интерферометрии. Например, при производ-

стве двигателей легковых автомобилей необходима сверхчистая обработка цилиндров и поршней, причем точность отделки должна достигать  $1/400\,000$  см. Многолучевые интерферограммы таких поверхностей являются идеальным средством, поскольку расстояние между интерференционными полосами соответствует  $1/40\,000$  см и они настолько узки, что ошибки поверхности свыше  $1/400\,000$  см легко различимы на глаз. Сверх того, этот метод не портит деталь, быстр и надежен.

Другое полезное промышленное применение — контроль за окончанием процесса электролитической полировки поверхностей кристаллов, необходимых, например, для элементов транзисторов. В этом методе все шероховатости удаляются с поверхности электролитическим способом. Однако необходим очень тщательный контроль, так как, если процесс полировки длится немного дольше, чем нужно, на гладко отполированной поверхности возникают мелкие ямки. Это явление называется электролитической гравировкой. Обычно для контроля этого процесса с успехом применяются многолучевые интерферограммы, позволяющие вовремя заметить критическую стадию процесса.

Еще одно полезное применение связано с оценкой площади и степени нерегулярности поверхностей металлов, используемых в промышленных процессах реакций химического катализа. Если металлическая поверхность применяется как катализатор для ускорения нужной химической реакции, то весьма желательно узнать действительную площадь поверхности металла, участвующую в реакции. Эта площадь очень сильно зависит от микротопографии поверхности; поэтому, использование многолучевой интерферометрии наверняка дает самый лучший подход к выяснению различных характеристик поверхности катализатора.

Важной отраслью промышленности является производство жести, широко используемой для изготовления консервных банок, особенно для консервирования пищевых продуктов. Если оловянное покрытие консервной банки в отдельных местах разрушается, то продукты портятся (особенно мясо или кислые фрукты). При покрытии листового железа оловом иногда

возникают дефекты, сводящиеся к тому, что крохотные участки металла не покрываются оловом или же там слой олова оказывается слишком тонким; такие дефекты по существу представляют собой очень мелкие ямки на поверхности жести. Интерферограмма идеально выявляет такие ямки в виде четко очерченных интерференционных колец. Этот способ позволяет довольно быстро отобрать подозрительные листы жести и принять необходимые меры.

Особенно широко применяется многолучевая интерферометрия для измерения с высокой точностью толщины тонких слоев. Эта задача часто встречается как в научных исследованиях, так и на производстве. Во многих случаях необходимо точно знать толщину тонкого слоя или пленки. Такие слои требуются для электронной микроскопии. Оптическая промышленность широко использует тонкие слои в производстве фильтров, для «просветления оптики», изготовления отражающих покрытий и т. п. Тонкие слои используются в новейших быстродействующих вычислительных машинах в качестве элементов памяти. Это всего лишь несколько примеров использования тонких слоев. Практически тонкие слои изготавливаются путем осаждения вещества в высоком вакууме: нужное вещество испаряется и оседает на приемную поверхность. Чтобы измерить толщину слоя, рядом с рабочей поверхностью кладут кусок чистого стекла, половина которого прикрыта. На открытую половину осаждается слой вещества, и когда стекло снимают, на нем оказывается ступенька, равная по толщине осажденной пленке. Высота этой ступеньки измеряется стандартным методом многолучевой интерферометрии. Оптическая промышленность уже выпускает многолучевые интерференционные микроскопы, специально предназначенные для измерения толщины тонких слоев. Метод многолучевой интерферометрии стал теперь стандартным методом для оценки толщины тонких слоев или пленок. Он вполне надежен, и им можно пользоваться в широком диапазоне толщин — от многих световых волн до  $1/400$  длины волны ( $\sim 50\text{\AA}$ ).

Упомянем еще одно применение многолучевой интерферометрии. Если из кристалла кварца вырезать определенным образом небольшой блок и подвергнуть

его. действию переменного электрического поля, то в нем возбуждятся механические колебания, частота которых точно соответствует частоте возбуждающего поля. Наоборот, если надлежащим образом вырезанный кристалл включить в колебательный контур, то при соответствующих условиях частота его собственных механических колебаний будет накладываться на колебания в контуре и осуществлять жесткий контроль за частотой колебаний. Кварцевый генератор частоты играет важнейшую роль в радиотехнике, включая радиотелефонию, телевидение, радиолокацию, управление на расстоянии и т. п. Мы поместили рядом с посеребренным осциллирующим кристаллом кварца посеребренную стеклянную пластинку и обнаружили, что колебания кристалла вызывают интерференционную картину, которая дает возможность наблюдать колебания во всех подробностях. Хорошо видно, какие части кристалла смещаются и насколько, а какие остаются в покое. Вся эта тонкая картина поддается числовой обработке, так как амплитуды местных колебаний могут быть определены по распределению интерференционных полос.

### **Интерференционные микроскопы**

В течение последних двадцати лет оптическая промышленность выпускает так называемые «интерференционные микроскопы». Эти устройства, в которых сочетается двухлучевая интерференция с обычным микроскопом, широко используются для измерения прозрачных биологических объектов. Описанная выше многолучевая интерферометрия мало полезна для большинства биологических объектов по той простой причине, что их приходится покрывать слоем серебра, а это можно сделать лишь в вакууме, что исключает исследование живых объектов и обычно повреждает биологический материал. Предлагали заключить биологические объекты в тонкий слой жидкости, зажимая их между двумя кусками посеребренного стекла, и таким образом пользоваться многолучевой интерференцией. Однако на этом пути встретились неожиданные трудности, которые, как правило, исключают такой подход.

Оптическая промышленность производит интерференционные микроскопы не менее сорока различных типов, а конструкторы описали по крайней мере еще сотню. Эти приборы очень разнообразны по своему устройству и еще разнообразнее по цене. Однако все это разнообразие сводится к небольшому числу основных типов. В микроскопах одного из наиболее распространенных типов луч света расщепляется на два пучка или зеркалом, или кристаллом. Один пучок проходит через объект, который изменяет ход луча в соответствии с толщиной; другой пучок проходит свободно. Затем оба луча вновь объединяются, и в результате мы видим прозрачный объект с наложенной на изображение интерференционной картиной. Если перепады толщины велики, то рассматриваемый объект пересечен полосами двухлучевой интерференции, что дает сведения о локальных изменениях толщины. Для очень многих важных биологических объектов — тонкие срезы, одноклеточные организмы, бактерии и т. д. — изменение длины пути луча при прохождении через объект вызывает сдвиг интерференционной картины меньше чем на одну полосу. Для таких случаев применяется освещение объекта белым светом, тогда интерференция приводит к появлению красивых цветных полос. Очень небольшие изменения в толщине объекта, всего  $1/10$  длины световой волны, уже дают сильное изменение цвета.

Интересен интерференционный микроскоп, в котором прямой луч, проходящий через объект, интерферирует с дифракционным спектром объекта. Этот прибор выявляет особенности строения живых объектов в виде сверкающей цветной картины. Получается то же впечатление, которое дают окрашенные неживые препараты, но описанным методом можно пользоваться и для живых объектов (хотя окрашивание в этом случае невозможно).

Интерференционные микроскопы можно использовать для оценки толщины или массы объекта, но их основная ценность для биолога состоит в том, что они значительно повышают контраст, а также цветовые различия исследуемого объекта. И хотя применение интерференционной микроскопии расширяется, все же

она никоим образом не оценена по достоинству ни биологами, ни инженерами.

Интерференционная микроскопия как прозрачных, так и непрозрачных объектов заслуживает гораздо более широкого применения, чем в настоящее время. Может быть, приборостроительные фирмы втайне рассчитывают на это, и поэтому за последние 20 лет было сконструировано не менее 140 типов таких микроскопов, которые можно с успехом использовать как в научных исследованиях, так и на производстве.

## ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

**Электронный микроскоп**

Самое крупное усовершенствование методов микроскопического изучения мельчайших структур относится уже не к области оптической микроскопии, а к *электронной микроскопии*. Да и сам электронный микроскоп едва ли можно рассматривать как оптический прибор; его скорее следует считать электронно-оптическим устройством. Тем не менее электронные микроскопы по своим свойствам напоминают обычные световые микроскопы: они создают микроскопические изображения, хотя и превосходят оптические микроскопы в увеличении и возможностях применения. Правда, в микроскопии не всегда необходимо или желательно пользоваться предельно высокими увеличениями. Лучшие современные электронные микроскопы могут разрешать детали поперечником всего  $5 \text{ \AA}$ , т. е.  $1/20\,000\,000 \text{ см}$ , — величина столь малая, что в подходящих условиях можно различить даже отдельные молекулы. Несмотря на это поразительное достижение, не следует забывать, что многолучевая интерферометрия может обеспечить такое же разрешение при помощи простейших средств (правда, только в направлении вверх — вниз).

В одной из предыдущих глав было упомянуто, что предел разрешения микроскопа устанавливается длиной световой волны. Ни при каких обстоятельствах нельзя разделить детали, находящиеся ближе друг к другу, чем половина длины волны используемого света. Это была одна из причин, вызвавших разработку ультрафиолетового микроскопа, так как длина волны ультрафиолетового света вдвое меньше, чем у зеленого, а это значит, что по крайней мере теоретически ультрафиолетовые микроскопы могут иметь вдвое лучшее разрешение, чем визуальные микроскопы. Но

существует излучение с гораздо меньшей длиной волны. Рентгеновские лучи могут иметь длину волны всего  $1 \text{ \AA}$ , что составляет  $1/5000$  длины волны видимого света. Микроскоп, в котором вместо видимого света использовались бы рентгеновские лучи, мог бы иметь разрешение в 5000 раз лучшее, чем обычный, и позволял бы разрешить отдельные атомы. К сожалению, такой прибор неосуществим по той простой причине, что невозможно сделать линзы или зеркала, преломляющие или отражающие рентгеновские лучи так, чтобы их можно было сфокусировать и построить изображение. Тем не менее существует любопытный выход из этого затруднительного положения, позволяющий сконструировать микроскоп, в котором используются очень короткие длины волн. Это *электронный микроскоп*, в котором используются эффективные длины волн меньше  $1/20 \text{ \AA}$ , что в 100 000 раз меньше, чем у видимого света.

Действие электронного микроскопа основано на открытии, сделанном практически одновременно сэром Джорджем Томсоном в Великобритании и Дейвиссоном и Джермером в США. Эти исследователи совершенно различными методами нашли, что движущиеся электроны обладают определенными *волновыми* свойствами. Ранее возможность этого была предсказана чисто теоретически французским физиком де Бройлем. Вспомним, что при обсуждении свойств фотонов мы отметили, что в некоторых экспериментах волны ведут себя как частицы, тогда как частицы, напротив, имеют волновые свойства.

Де Бройль указал, как вычислить длину волны, которая связана с движущимся электроном. Эта волна — не дополнительное постороннее свойство электрона, она неотъемлемая часть его самого, и ее длина зависит только от скорости электрона.

Скорости электронов в свою очередь определяются двумя различными факторами. Электроны могут освобождаться из вещества при его нагревании, при столкновениях частиц или благодаря фотоэффекту, но каким бы способом это ни произошло, они всегда имеют некоторую начальную скорость. Кроме того, электрон может приобрести дополнительную скорость при ускорении, скажем, в электрическом поле. Отсюда следует,

что, меняя скорости электронов, можно изменить по желанию и длины соответствующих им волн.

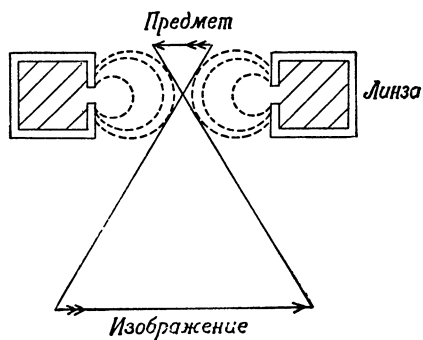
Если электроны проходят в вакууме разность потенциалов в 100 000 в (это нетрудно осуществить при помощи трансформатора), то соответствующие длины электронных волн составляют  $1/25 \text{ \AA}$  — величину, которая в 125 000 раз меньше длины волны видимого света.

Электроны легко отклоняются электрическими или магнитными полями. К 1926 г. уже было установлено, что при соответствующей конфигурации поле может воздействовать на электроны точно так же, как линза действует на свет. Любопытно, что рождение «электронной оптики» предшествовало открытию волновых свойств электрона. Как раз в 20-х годах было открыто, что кольцевой магнит — тороид (напоминающий надутую велосипедную или автомобильную камеру), помещенный в поток электронов, может свести все электроны с данной скоростью в одну точку — фокус, так что можно построить электронное изображение.

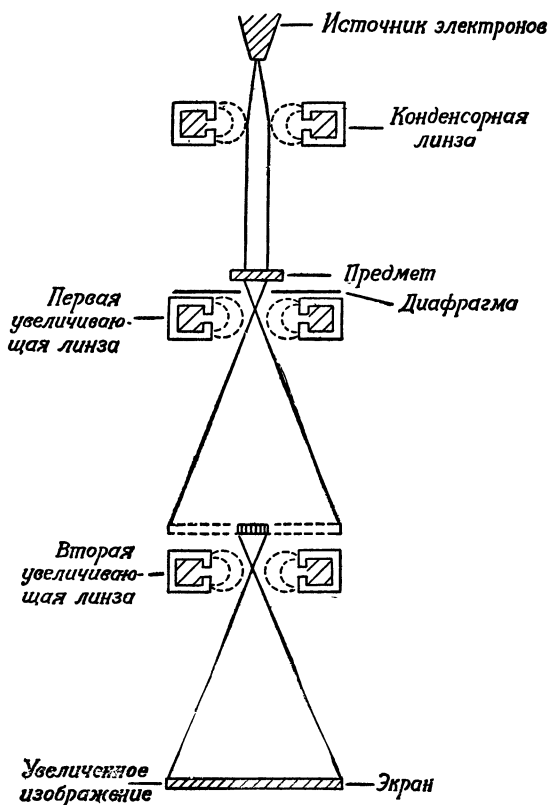
Предположим, что объект на рис. 22 может испускать электроны. Когда последние проходят через кольцевой магнит (показанный в разрезе), магнитное поле (пунктирные линии) действует так, что образуется увеличенное изображение предмета. Поле кольцевого магнита действует так же, как объектив светового микроскопа.

Составляя ряд магнитных линз, можно получить последовательно все более сильное увеличение. Из рис. 23 наглядно видно, что существует тесная аналогия между путями световых лучей в обычном микроскопе и траекториями электронов в электронном микроскопе.

Электроны, вылетающие из источника, например раскаленной нити, ускоряются разностью потенциалов порядка 100 000 в. Магнитная линза превращает поток электронов в параллельный пучок. Последний падает на исследуемый объект, который должен быть предельно тонким. При прохождении через объект на них оказывают влияние локальные изменения толщины и плотности объекта, т. е. столкновения с большим числом атомов или с более тяжелыми атомами. В результате некоторые электроны поглощаются, а



Р и с. 22.



Р и с. 23.

некоторые рассеиваются в стороны. Рассеянные электроны задерживаются небольшой диафрагмой, помещенной перед следующей линзой, и в результате строится электронное изображение предмета; например, области, которые пропускают больше электронов, будут выглядеть ярче. Построенное изображение увеличивается еще раз, а возможно, еще и в третий раз. В конце концов электроны попадают или на флуоресцентный экран, или на фотографическую пластинку. Поскольку весьма существенно предохранить пучок электронов от всяких посторонних воздействий, весь путь электронов от источника до фотографической пластинки должен проходить в высоком вакууме, иначе электроны будут сталкиваться с молекулами газа, что приведет к разрушению изображения.

Увеличение можно непрерывно изменять путем изменения силы тока, проходящего через катушки магнитных линз. Исследуемые объекты должны быть очень тонкими, иначе рассеяние электронов в объекте будет слишком сильным и никакого изображения не получится.

Поскольку длины волн электронов в микроскопе очень малы, можно ожидать, что электронный микроскоп должен обладать очень высокой разрешающей способностью. Если бы можно было использовать с электронными линзами такие же апертуры, как и у оптических линз, то разрешение нашего электронного микроскопа составляло бы  $1/50 \text{ \AA}$  и позволяло бы без труда «видеть» отдельные атомы, которые имеют в перечнике примерно  $1 \text{ \AA}$ .

На практике по ряду причин достичь такого разрешения не удастся. Апертуры, которыми можно пользоваться при работе с электронными линзами, составляют всего  $1/100$  апертуры световых линз, и тем не менее линзы даже столь малой апертуры имеют значительные aberrации. Даже сам принцип, в силу которого необходимо, чтобы рассеянные электроны «обрезались» для получения хорошего контрастного изображения, уже определяет малую апертуру первой же линзы, строящей изображение. В итоге самые лучшие и самые дорогие инструменты позволяют достичь разрешения  $5 \text{ \AA}$ . Это примерно в 250 раз хуже, чем предел, устанавливаемый только длиной волны электро-

нов, но все-таки в 500 раз больше, чем для наилучших оптических микроскопов. Существует один прибор, работающий при разности потенциалов  $10^6$  в и, как утверждают, дающий разрешение 1 Å. Однако электронный луч столь высокой энергии, вероятно, сильно повреждает изучаемые объекты.

Вообще говоря, существует определенное различие в рассеянии на малые углы более тонких и менее плотных участков объекта по сравнению с более толстыми и более плотными. Это различие можно специально усилить, введя тяжелые атомы (например, платины) в отдельные участки объекта. Возросшее рассеяние за счет тяжелых атомов действует аналогично поглощению, обусловленному красителем в обычном методе окрашивания объектов, применяемом в оптической микроскопии.

Возможность использования электронов для предельно высокого разрешения и увеличения микрообъектов определяется прежде всего тем, что поток электронов должен фокусироваться на объекте в виде пятна очень малого размера. Диаметр пятна в любой микроскопической системе зависит от длины волны и апертуры линзы. Даже электронная линза с малой апертурой может создать пятно диаметром меньше 200 Å. Большинство электронных микроскопов работает при напряжениях самое большее 100 000 в, хотя, увеличивая напряжение, можно уменьшать длину волны электронов. Для этого имеется ряд причин. Во-первых, с увеличением напряжения становится труднее решать проблемы изоляции и утечки. Во-вторых, когда энергия электронов в пучке становится слишком высокой, они нагревают и изменяют или даже разрушают исследуемый объект. В-третьих, с увеличением напряжения поднимается и цена.

### **Реплики**

Следующий принципиальный факт, на который опирается электронная микроскопия, состоит в том, что электроны в слое вещества частично поглощаются, частично рассеиваются, а частично проходят через него, если только слой достаточно тонок. Совершенно бесполезно пытаться пропускать электроны через объекты,

которые обычно применяются в оптической микроскопии, будь то тонкий срез, микроскопический организм и т. п.: электроны или будут полностью поглощены, или слишком сильно рассеются. В любом случае объекты окажутся в высоком вакууме, а ряд интересных объектов в вакууме разрушается или деформируется. Наконец, если увеличение достаточно велико, то для исследования подходят лишь объекты очень малых размеров. Для удовлетворения всем этим требованиям на практике обычно делают оттиск исследуемой поверхности на очень тонком слое пластмассы. Эта процедура называется *репликацией*, и анализу подвергается тонкая пластмассовая копия объекта — *реплика*.

Если налить на исследуемый объект слабый раствор некоторых пластмасс, то после высыхания пластмасса образует прочный тонкий слой, с удивительной точностью копирующий микроструктуру поверхности объекта. Замечательно, что повторные реплики в точности похожи друг на друга, в чем можно убедиться, исследовав их в хороший оптический микроскоп. Имеются и другие данные, в частности следующие из предсказуемых особенностей роста кристаллов с известной симметрией, которые подтверждают поразительную идентичность реплик. Любопытно, что, по-видимому, этот факт был известен уже лет пятьдесят. Свыше пятидесяти лет назад Торп из Манчестера изобрел метод копирования оптических дифракционных решеток, представляющих собой кусок стекла, на каждом сантиметре которого процарапано примерно 8000 линий. Такая решетка образует превосходный спектр, причем дисперсия определяется близостью штрихов друг к другу. Но для этих спектров характерны изменения интенсивности и ложные максимумы — «духи», вызываемые неправильностью формы отдельных штрихов и их расположения. Спектры, полученные при помощи реплик, всегда были очень похожи на спектры оригинала по распределению интенсивности и «духам». Следовательно, реплики воспроизводят не только число штрихов и расстояния между ними, но и точно копируют форму и глубину штрихов, хотя такие подробности лежат за пределами разрешения микроскопа. Эти факты косвенно доказывают чрезвычайную точ-

ность простой репликации. Существуют и другие способы репликации, описывать которые здесь нет необходимости.

Тончайший слой реплики снимают с копируемой поверхности, подобно корке. Это может быть стеклянная поверхность с находящимися на ней бактериями или поверхность кристалла, волокна и т. д. В любом случае мелкомасштабные детали поверхности отпечатываются на реплике, причем углубления на первоначальной поверхности станут на реплике утолщениями, а возвышения — углублениями. Реплику укрепляют на мелкоячеистой медной сетке, которую и помещают на предметный столик электронного микроскопа. Инструмент откачивается до высокого вакуума, и через реплику пропускается хорошо сфокусированный интенсивный электронный луч. Электроны рассеиваются в реплике, линзы строят и увеличивают электронное изображение, и, наконец, очень сильно увеличенное изображение появляется на флуоресцентном экране.

Хотя электронные микроскопы дали поразительные результаты во многих областях, необходимость репликации ограничивает область их применения. Недавно были сконструированы специальные *ультрамикротомы*, представляющие собой приборы со специальными стеклянными или алмазными режущими ножами, которые позволяют делать настолько тонкие срезы, что их можно прямо вводить в луч электронного микроскопа без репликации. Эти ультрамикротомы делают срезы биологических материалов толщиной  $1/50$  длины световой волны, т. е. около  $50 \text{ \AA}$ . Удалось получить столь же тонкие срезы с кристаллов металла, но использование таких образцов затруднено возможным искажением микроструктуры при самом изготовлении среза.

Значительным шагом вперед в использовании этого прибора было изобретение метода «теней». Объект (обычно реплика) помещается в вакуумной камере. Затем исходящий от раскаленной нити пучок атомов тяжелого металла, например золота, направляется под острым углом на поверхность объекта. При этом на реплике образуется тончайший слой золота, но любая возвышающаяся деталь микроструктуры отбрасывает «тень». Подобно тому как низко стоящее Солнце

порождает длинные тени, так и возвышающаяся деталь отбрасывает длинную «тень» на слой золота. Зная длину тени и угол падения пучка атомов, можно определить высоту детали.

### Отражательный электронный микроскоп

Описанный выше электронный микроскоп требует обязательно ультратонких объектов, так как он работает в результате прохождения электронов сквозь объект. Однако возможен электронный микроскоп, работающий благодаря отражению пучка электронов от поверхности самого объекта. Этого можно достичь, направляя пучок электронов на металлический образец почти касательно к поверхности и затем фокусируя пучок электронов, рассеиваемых поверхностью объекта. Этот метод имеет несколько неудобств. Во-первых, при работе с электронным микроскопом желательно, чтобы все электроны имели одну и ту же начальную энергию; при отражении же электронов от металла происходит перераспределение их энергий, и они покидают объект с различными скоростями. Это неизбежно ведет к размыванию изображения, и в лучшем случае разрешение получается около  $200 \text{ \AA}$  по сравнению с  $5 \text{ \AA}$  для хороших инструментов, работающих в режиме «прохождения». Более того, так как мы рассматриваем пучок при почти скользящем падении, происходит значительное перспективное сокращение (в 50 раз и более) вдоль луча зрения. Поскольку в направлении, перпендикулярном лучу зрения, сокращения нет, то изображение сильно искажается.

Недавно предложена модификация, позволяющая непосредственно наблюдать поверхность объекта, так называемая *иммерсионно-линзовая электронная микроскопия* (название, возможно, неудачное). В этом устройстве используются электроны, испускаемые с поверхности объекта, когда ее нагревают или бомбардируют пучком электронов. Например, раскаленная нить является источником электронов, необходимых для построения изображения линзой электронного микроскопа. Так как число испускаемых электронов в данном месте нити зависит от ее микрокристаллической

структуры, то границы между мельчайшими зернами металла нити сами образуют электронное изображение. В другом устройстве поверхность металла бомбардируется электронным лучом. Изображения образуют *вторичные* электроны, по-разному выбиваемые из разных мест кристаллической структуры. Таким образом, получается изображение реакции поверхности на бомбардировку электронами, и, поскольку это связано с ориентацией поверхностных микрокристаллов, получается картина микрокристаллической структуры поверхности объекта.

### **Сканирующий электронный микроскоп**

Одна из новинок техники, являющаяся развитием конструкции уже описанного оптического микроскопа с бегущим лучом, — это *сканирующий* электронный микроскоп. Особенно ценен он для изучения очень грубых поверхностей и дает изображение поразительной глубины. Принцип его работы в каком-то смысле обратен обычному электронному микроскопу. Посредством трех магнитных линз, следующих одна за другой, пучок электронов, вместо того чтобы образовать увеличенное изображение источника электронов, напротив, создает уменьшенное изображение источника в виде очень маленького пятна. В результате образуется нечто вроде электронного зонда, диаметр которого составляет всего 200 Å, или 1/25 видимой световой волны. Это крохотное пятнышко фокусируют на объект — твердый предмет (не реплику), который устанавливают примерно под 45° к падающему электронному лучу. По пути к объекту электронный луч проходит через специальные «сканирующие» катушки, которые заставляют электронное пятно сканировать объект точно таким же образом, как электронный луч строит изображение на телевизионной трубке, но в предельно уменьшенном масштабе. Этот принцип весьма сходен с принципом работы оптического микроскопа с бегущим лучом; различие состоит в том, что кадр теперь образуется тонким электронным лучом.

Электрические колебания, обеспечивающие сканирование объекта электронным лучом, одновременно

подаются на отклоняющую систему обычной телевизионной трубки. Когда тонкий электронный луч сканирует поверхность предмета, эта поверхность испускает вторичные электроны. Последние попадают на специальную мишень и используются для управления яркостью изображения на телевизионном экране (опять точно так же, как в оптическом микроскопе с бегущим лучом, за исключением того, что там собирался на коллекторе и подавался на светочувствительный фотоумножитель пучок света). Поскольку телевизионная трубка точно синхронизирована с микрокадром, вторичные электроны дают точное изображение.

Задача электронно-оптической системы в этом микроскопе состоит в создании зондирующего пучка электронов достаточно малых размеров, который фокусируется на объекте. В итоге прибор может разрешать детали, отстоящие друг от друга на  $500 \text{ \AA}$ . Это, конечно, гораздо меньше, чем дает обычный электронный микроскоп, но зато новый прибор обладает рядом достоинств. В нем достижимо увеличение до 200 000 раз. Увеличение изображения на экране телевизионной трубки есть просто отношение размера кадра на экране трубки к размеру микрокадра на объекте. Пусть кадр на телевизионной трубке имеет поперечник  $50 \text{ см}$ . Если нам удастся уменьшить размер микрокадра на объекте до  $1/1000 \text{ см}$  в поперечнике — а достичь этого можно без труда, — тогда изображение на экране в этом частном случае будет увеличено в 50 000 раз.

Гораздо большее значение имеет вопрос о *глубине фокуса*. В любой оптической системе наиболее резкое изображение теоретически получается на плоскости, но, однако, допустимо смещение фокуса на определенное расстояние выше и ниже этой плоскости без заметного ухудшения изображения. Это расстояние называется *глубиной фокуса*, и все предметы в пределах глубины фокуса на оптической оси системы можно считать находящимися в фокусе. Глубина фокуса зависит только от апертуры линз системы. При большой апертуре глубина фокуса очень мала. В оптическом микроскопе система линз с большим увеличением обычно имеет глубину фокуса меньше  $1/1000 \text{ мм}$ , но эта величина может быть и вдвое меньше. Поэтому совер-

шенно невозможно видеть одновременно в фокусе все части толстого или шероховатого предмета: большая его часть всегда оказывается вне фокуса. (Следует подчеркнуть, что такими узкими границами обладает лишь глубина фокуса *объекта*; с глубиной фокуса изображения дело обстоит гораздо лучше: она может составлять 1—2 мм, и в этих пределах допустимо отклонение положения, скажем, фотографической пластинки.)

Так как апертуры линз в электронном микроскопе очень малы, то глубина фокуса оказывается относительно очень большой. У сканирующего электронного микроскопа она примерно в 300 раз больше, чем у хорошего оптического микроскопа. Поэтому возможно получать необычайно живые изображения, хорошо обрисовывающие трехмерные предметы и поразительно четкие. Два интересных примера снимков, сделанных микроскопом «Стереоскан» фирмы «Кембридж инструмент», показаны на фото VII и VIII. На фото VII видна диатомовая водоросль с увеличением в 6000 раз, а на фото VIII — край разорванной проволоки с увеличением в 100 раз.

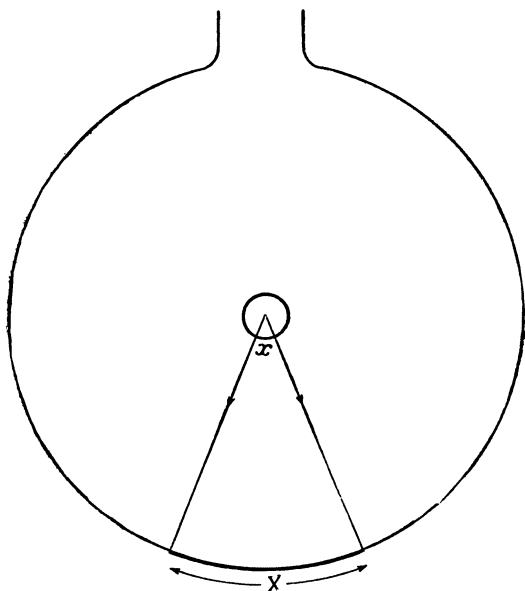
Недавно выяснилось, что некоторые жуки способны выжить в вакууме, и они были сфотографированы с помощью сканирующего электронного микроскопа с увеличением в 700 раз.

Описанный прибор может быть также использован как стереоскоп. Один из способов оценки расстояний ведет начало от стереозффекта, создаваемого нашими глазами, потому что два наших глаза видят два изображения, каждое с несколько иной точки зрения. Объединение этих изображений в одно, осуществляемое в мозге, позволяет нам правильно судить о трехмерном мире. Хорошо известные стереоскопические картинки получаются путем фотографирования двумя аппаратами, объективы которых раздвинуты, подобно глазам. Если два подобных снимка рассматривать одновременно при помощи двухлинзового стереоскопа, то четко выявляется эффект объемности.

Посредством сканирующего электронного микроскопа очень легко получить микростереограммы, сделав последовательно два снимка объекта, но слегка изменив наклон объекта после первого снимка.

## Ионный микроскоп

Электронный микроскоп с его трансформаторами высокого напряжения, вакуумными насосами, линзовыми системами и вспомогательной аппаратурой представляет собой достаточно внушительный образец электронного машиностроения (его вес может превышать



Р и с. 24.

тонну). Э. Мюллер (ФРГ) предложил остроумную конструкцию электронного микроскопа нового типа, замечательного своей простотой. Он назвал его *ионным микроскопом*. Принцип действия этого прибора основан на следующих соображениях. Предположим, у нас имеется маленький металлический шарик, находящийся в центре большого стеклянного баллона сферической формы (рис. 24). Изнутри стеклянная сфера покрыта тончайшим слоем металла, что делает поверхность проводящей, а также слоем флуоресцирующего вещества. Если из баллона выкачать воздух, а между ним и шариком создать электрическое поле, то

оно будет вырывать электроны из центрального шарика, которые, падая на стенки баллона, будут вызывать свечение.

С маленького внутреннего шарика электроны летят по радиусам стеклянного баллона. Предположим, что по какой-либо причине на металлическом шарике имеется небольшая область, испускающая электроны легче, чем соседние участки поверхности. Тогда более сильный поток электронов из этой области создаст на сфере яркое пятно. Пусть теперь на шарике будут две такие области, разделенные расстоянием  $x$ . Из рис. 24 ясно, что на стенке баллона мы получим два ярких пятна, расстояние между которыми будет равно  $X$ . Очевидно, это увеличение равно отношению радиуса стеклянного баллона к радиусу маленького металлического шарика.

Мюллер попробовал заменить шарик острием иглы. Путем химического травления у тонкой вольфрамовой проволоки можно создать предельно тонкое острие, которое можно приближенно считать полушарием с очень малым радиусом кривизны; тогда радиус стеклянной сферы может в миллион и даже более раз превышать радиус острия иглы. Это означает, что два отдельных луча, исходящих из острия, вызовут появление на стенке баллона двух светящихся точек с увеличением расстояния между ними в миллионы раз. Затем Мюллер пропитал кончик иглы некоторыми органическими соединениями. Он обнаружил, что когда между острием и баллоном создавалось электрическое поле, то молекулы соединения ионизовались! Этот процесс состоял в отрыве отдельных электронов от молекул, входящих в соединение; какие именно электроны отрываются, зависит от их положений в молекулах и сил связи между молекулами. Следовательно, электроны из одной части молекулы отрываются легче, чем из другой. Но это в точности повторяет рассмотренный ранее случай, когда отдельные области острия испускают больше электронов, чем соседние.

Поскольку коэффициент увеличения огромен, то на экране регистрируется эмиссия электронов, вырванных из молекул, находящихся на острие иглы. При этом разрешение и увеличение настолько велики, что выявляется истинное расположение электронов в отдельных

молекулах. Они обрисовывают истинную структуру молекул, которую химики зачастую могут предсказывать из теоретических соображений. Описанная же система заставляет отдельные молекулы делать свои собственные фотографии и при этом с огромным увеличением.

Следовательно, этот простой и вместе с тем изящный прибор представляет собой электронный микроскоп, правда весьма специализированного типа. Применение его довольно ограничено, и все-таки поразительно высокое разрешение и увеличение, которые он дает, не могут не вызывать восхищения, особенно если еще учесть крайнюю простоту устройства.

## НОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФРАКЦИИ И ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

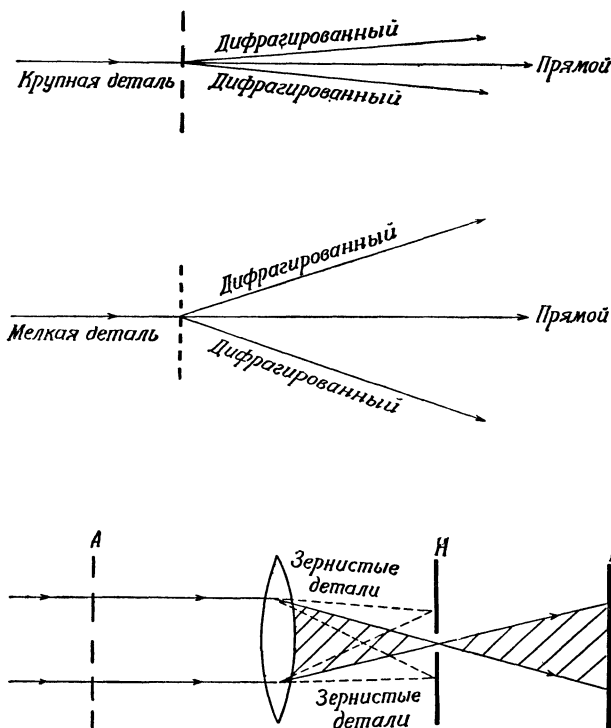
### **Фильтрация фотографического «зерна»**

Большинство фотографов знают, что при сильном увеличении снимков зернистая структура светочувствительных кристаллов весьма заметно проявляется на негативе, что ухудшает четкость изображений на фотографии. Очень часто зернистая структура снимков крайне нежелательна. Например, нередко бывает, что фоторепортер обнаруживает интереснейшую композицию или деталь на крохотном кусочке негатива. Когда эту мелкую деталь увеличивают до размера, годного для репродуцирования в журнале, зерно может стать сильной помехой. Согласно основному правилу, чувствительность фотографических материалов можно увеличить только за счет роста размеров зерен. Но очень часто появляется необходимость в пластинках или пленках высокой чувствительности, когда приходится снимать при очень слабой освещенности или очень кратковременные события. В этом случае крупнозернистость почти неизбежна, и если первоначальный негатив предполагается сильно увеличить, то фотография получается очень зернистой.

Недавно французский физик Марешаль разработал метод, при помощи которого можно уменьшить эффект зернистости на негативе, практически не влияя на четкость. Метод состоит в отфильтровывании зернистости посредством оптической дифракции. «Исюминка» метода заключается в уже не раз упоминавшемся свойстве дифракции: чем ближе друг к другу и мельче детали объекта, тем шире конус дифрагирующего света. Если объект состоит из смеси крупных и мелких деталей, то при освещении крупных деталей дифракция будет возникать в очень узком конусе. С дру-

гой стороны, дифрагированный свет от мелких деталей заполнит широкий конус, как показано на рис. 25.

Основная идея метода фильтрации состоит в том, что зерна меньше деталей снимка. Это значит, что



Р и с. 25.

если мы возьмем негатив, на котором есть и изображение и зерно, и затем осветим этот негатив *А* параллельным пучком света, то из негатива выйдут два отдельных конуса дифрагированного света: узкий конус, в котором содержится информация о снимке, и широкий, содержащий информацию о размере и форме зерна. Все, что затем надо сделать, — это получить изображение негатива на экране при помощи линзы, причем предварительно свет ограничивается диафраг-

мой с небольшим отверстием *H*. Размеры диафрагмы подбираются так, чтобы она пропускала узкий конус лучей, несущий информацию об изображении, и отсекала свет в широком конусе, содержащем информацию о зернистости. Это простое устройство позволяет проецировать на экран *P* свободное от зернистости изображение, с которого можно отпечатать позитив.

Естественно, при этом происходит некоторая потеря четкости, так как резкость изображения несколько смягчается из-за отсеки части дифрагированного света. Мелкие детали такого же размера, как и зерно, также будут утрачены, но такие детали обычно всегда путают с зерном. Есть и одно неожиданное преимущество, состоящее в том, что исключаются ложные детали, которые возникают за счет дифракции от границ зерен, и получается изображение, более близкое к оригиналу.

Метод оптической фильтрации оказался полезным в ряде важных случаев. В настоящее время возможна аэрофотосъемка с весьма значительных высот. При этом используются такие большие широкоугольные объективы, что на фотографиях выходит много мелких деталей. Это оправдывает последующие большие увеличения снимков, но начинает сказываться зерно. Для улучшения четкости таких аэрофотоснимков весьма полезна описанная выше фильтрация. Другое применение — копирование уже опубликованных в печати иллюстраций. Такие иллюстрации, изготовленные посредством полутонного процесса, состоят из множества маленьких точек (читатель может без труда убедиться в этом на примере любой фотографии из газеты). С помощью метода оптической фильтрации можно без труда скопировать такую иллюстрацию, убрав уже ненужный растр (см. фото IX).

### **Разрешение объективов для аэрофотосъемки**

Познакомимся теперь с успехами, достигнутыми в изготовлении камер для аэрофотографии с последующим обнаружением военных объектов. Мы уже не раз говорили о пределе разрешения микроскопа и указывали, что вытекающее из теории разрешение в полувину длины световой волны было достигнуто уже

в прошлом столетии. Разрешение аэрофотокамеры — родственный вопрос, но все же несколько иной и скорее напоминает вопрос о разрешении, достигаемом с большими телескопами. Как в телескопах, так и в камерах нас интересует свет от очень далеких объектов, и по существу речь идет о разрешении не линейных, а угловых расстояний, т. е. углов между двумя лучами, исходящими от двух далеких объектов. Оказывается, чем больше диаметр линзы (зеркала) телескопа или камеры, тем меньший угол можно разрешить с их помощью.

Именно поэтому астрономы строят все большие и большие телескопы. Гигантское зеркало диаметром 200 дюймов (5 м) отражательного телескопа на горе Паломар (США) было создано и для того, чтобы собрать как можно больше света, и для лучшего разрешения близко расположенных друг к другу объектов.

Фотокамеры, используемые для съемки далеких объектов, по сути дела, являются телескопами, только изображение в них попадает не в глаз, а на фотографическую пластинку. Чтобы разделить два близких друг к другу объекта, нужна камера с линзой (объективом) большого диаметра и большим фокусным расстоянием — своего рода телескоп. Современные самолеты могут брать на борт очень большие аэрофотосъемочные камеры с линзами диаметром в полметра и с соответствующим фокусным расстоянием. Такие камеры обеспечивают великолепную четкость снимков. В камерах для скоростных самолетов особое внимание уделено компенсированию движения камеры, чтобы сохранить наводку на объект. Это достигается поворотом камеры в направлении, противоположном полету.

Новейшие аэрофотокамеры с большими объективами столь совершенны, что они способны разрешить в качестве отдельных предметов два теннисных мяча, касающихся друг друга, которые находятся на земле на 15 км ниже самолета. Современная аэрофотосъемка достигла такой степени совершенства, которая обеспечивает сбор военной информации с искусственных спутников с расстояния в сотни километров. Некоторые линзы в этих камерах улучшены благодаря специальному способу обработки поверхности линз, называемому «просветлением оптики». Этот процесс помо-

гает значительно увеличивать количество света, проходящего через оптическую систему, в особенности через систему с несколькими оптическими компонентами. Даже дешевые фотоаппараты и бинокли в наше время, как правило, делают просветленными.

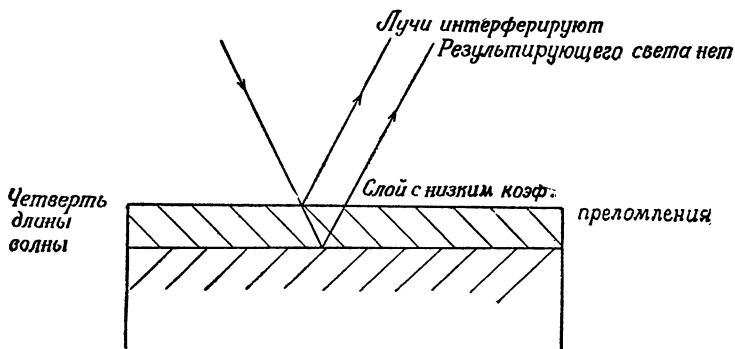
### **«Просветление» линз**

Когда в 1892 г. английский оптик Тейлор столкнулся с любопытным фактом, что старые потускневшие стеклянные линзы пропускают больше света, чем чистые, только что изготовленные, никто не ожидал, что это случайное открытие через полвека разовьется в способ, который найдет широкое применение в оптическом приборостроении. Мы уже упоминали, что когда свет падает на стеклянную поверхность (более или менее перпендикулярно ей), то примерно 4% поверхность стекла отражает, а 96% света проходит дальше. На следующей поверхности опять отражается около 4%. В современных дорогих объективах имеется несколько линз со многими поверхностями. От 20 поверхностей линз в объективе отражается и таким образом теряется более 50% света. А для тех областей поверхности линз, на которые свет падает наклонно, этот эффект гораздо сильнее, так как коэффициент отражения стекла растет с увеличением угла падения света.

Просветление — это способ, при помощи которого успешно достигается значительное снижение потерь света на каждой свободной границе раздела воздух — стекло. Одновременно благодаря любопытным особенностям волновой оптики, просветление увеличивает количество света, проходящего через сложную линзовую систему. Просветление заключается в нанесении на поверхность линзы тонкого слоя прозрачного вещества, имеющего меньший показатель преломления, чем стекло. Этот тонкий слой должен иметь толщину  $\frac{1}{4}$  световой волны. Если эти условия выполнены, то световые лучи, которые отражаются от верхней и нижней поверхностей слоя, имеют разность хода точно в полволны (рис. 26). Эти лучи интерферируют друг с другом, и если показатель преломления слоя определенным образом связан с показателем преломления стекла (для слоя он должен быть равен корню квадратному из показателя преломления стекла), то оба луча, отражен-

ных от верхней и от нижней поверхностей слоя, имеют в точности одинаковую интенсивность. Результатом интерференции между лучами равной интенсивности с разностью хода в полволны будет полное взаимное гашение, так что отраженный свет будет полностью отсутствовать.

Следует иметь в виду, что при интерференции никакого действительного уничтожения света нет;



Р и с. 26.

происходит лишь его перераспределение. Например, отсутствие света в темных полосах интерференционной картины сопровождается усилением яркости в светлых полосах. То же самое происходит при просветлении: отсутствие отраженного света сопровождается ростом интенсивности проходящего света. Отсюда следует как курьезный физический факт, что идеально просветленный кусок стекла пропускает 100 % света.

Поскольку этот «противоотражательный» механизм требует, чтобы толщина нанесенного на стекло слоя была точно равна четверти длины волны, то просветление не может быть одинаково эффективным для всех длин волн белого света. Если мы решили, чтобы слой исправлял пропускание средней части спектра, скажем зеленой, то зеленый свет будет полностью пропускаться, но для других цветов система будет работать неидеально. Значит, какое-то количество света крайних областей спектра — какая-то часть красного и какая-то синего — будут частично отражаться. Это придает просветленному стеклу слегка пурпурный оттенок,

Просветление линзы или стеклянной поверхности можно осуществить двумя способами. Один состоит в химическом осаждении на поверхность мономолекулярных слоев специально выбранных веществ. Другой, более простой способ сводится к осаждению на стекло в вакууме паров вещества в виде слоя нужной толщины по всей поверхности стекла. Таких веществ немало: фтористый магний, криолит и т. д. Эти стекловидные субстанции могут испаряться с нагретой нити и оседать на стекло в виде прозрачного слоя контролируемой толщины. Как правило, просветляющий слой непрочен; отсюда постоянные напоминания о недопустимости протирки или полировки просветленных линз в приборах.

Одна из областей использования просветления — это уменьшение отблесков от стекол, прикрывающих шкалы различных регистрирующих и измерительных приборов. Блики от таких приборов в узких помещениях с сильным освещением (в рубке управления подводной лодки или в кабине самолета) можно значительно ослабить путем просветления наружной стороны стекла, прикрывающего шкалу. Это было одно из самых ранних применений просветленной оптики.

### **Многослойные сильные отражатели**

Не только в древности, но и до самого последнего времени ученые молчаливо принимали, что для получения высокой отражательной способности необходимы металлические поверхности или покрытия. Тот факт, что высокую отражательную способность может иметь стопка тонких пластинок, на протяжении последнего столетия часто использовался при изложении курса оптики, но значение этого факта явно недооценивалось. Если стопку тонких предметных стекол, применяемых в микроскопии, — дюжины две — положить на стол, то свет отразится от этой стопки почти так же, как от хорошего зеркала. Причина ясна. От двух поверхностей каждого кусочка стекла отражается 4% света. Эти проценты складываются, и если число пластинок достаточно велико (и если они достаточно тонки, чтобы не сказывалось поглощение), то отражается удивительно большое количество света — почти такое же, как в случае металлических поверхностей.

Этот эффект, с добавлением «просветляющих» покрытий, сделал возможным создать эффективные отражатели, которые лучше самых лучших металлических рефлекторов (серебро отражает 97 %). В то же время эти особые отражатели совершенно не поглощают света, т. е. полностью пропускают то небольшое количество света, которое они не отражают. Этот факт приобрел очень большую ценность в связи с созданием некоторых приборов, как мы вскоре увидим.

Вспомним, что просветляющий антиотражательный слой, осаждаемый на стекло, должен иметь показатель преломления меньше, чем у стекла. Если же на стекло нанести слой толщиной в четверть длины волны из вещества с более высоким, чем у стекла, показателем преломления, то имеет место противоположный эффект. Подходящим веществом является сернистый цинк, и если нанести слой этого вещества нужной толщины, то при отражении света от верхней и нижней поверхностей этого слоя вместо взаимного уничтожения противоположных по фазе лучей произойдет их усиление. Известно, что у прозрачных материалов существует закономерность: чем выше показатель преломления, тем выше и коэффициент отражения. Например, отражательная способность у такого сильно преломляющего вещества, как алмаз, действительно составляет 18 % (а у менее преломляющего стекла — всего 4 %). Сернистому цинку благодаря высокому показателю преломления свойственна и высокая отражательная способность. В результате осаждение тонкого слоя повышает отражательную способность стекла с 4 до 30 %. Этот факт сам по себе получил полезное применение в оптической промышленности.

Если на поверхность стекла нанести такой сильно отражающий слой, затем поверх этого слоя — слабо отражающий слой типа тех, которые используются для просветления, затем поверх этого слоя — второй сильно отражающий слой и т. д., соорудив «бутерброд» из попеременно то сильно, то слабо отражающих слоев, каждый толщиной в четверть длины волны, то отражательная способность при этом возрастает. «Бутерброд» из пяти слоев имеет полную отражательную способность 87 %, а для девяти слоев она достигает поразительно высокого значения 97 %. Так как девять слоев —

это тонкая стопочка прозрачного вещества, то падающий на них свет практически не поглощается, а остаток просто проходит насквозь. В случае металлических слоев, используемых в многолучевой интерферометрии, можно было бы добиться отражения 97 %, но насквозь пройдет лишь небольшая доля процента света, весь же остальной свет будет поглощен. Некоторые делали «бутерброды» из 21 слоя, но в таких случаях трудно соблюдать необходимую точность в толщине каждого слоя; и все же «бутерброды», отражающие 99 %, уже не редкость.

Строго говоря, высокая отражательная способность имеет место лишь в той длине волны, для которой толщина слоев равна четверти ее длины. Поэтому отражение сконцентрировано в узкой полосе спектра и довольно быстро ослабевает для соседних длин волн.

Многослойные сильные отражатели имеют много любопытных применений в современной оптике, число которых постоянно расширяется. Во многих случаях используется их высокая селективность; ведь они не только сильные отражатели в той области волн, на которую были рассчитаны, но одновременно они совершенно прозрачны и имеют весьма слабую отражательную способность для соседних длин волн. Одним из необычных приложений этого свойства было создание рефлектора, который отражает только яркий видимый свет, но теряет тепловое излучение яркого и горячего источника. Источник теплового излучения помещают перед стеклянным отражательным зеркалом с многослойным покрытием, имеющим широкий максимум отражения, охватывающий всю видимую область (за счет некоторого уменьшения отражательной способности этот максимум можно растянуть на более широкую область длин волн). В то же время выбранный многослойный отражатель почти полностью прозрачен для более длинноволнового инфракрасного (теплового) излучения. Поэтому зеркало отражает вперед в требуемом направлении весь видимый свет, а нежелательные тепловые лучи выводятся назад через рефлектор. Обычный металлический рефлектор или стеклянная линзовая система не могли бы изолировать тепловое излучение от видимого света.

Та же идея была предложена для защиты искусственных спутников. Большая часть солнечной энергии в космическом пространстве, вне защиты атмосферы, приходится на тепловое излучение. Спутник можно было бы покрыть многослойной пленкой так, чтобы он отражал интенсивный солнечный свет. В то же время, поскольку этот слой прозрачен для тепловых лучей, внутреннее тепло спутника может излучаться наружу через прозрачное к тепловым лучам покрытие. Если же спутник покрыть металлическим отражающим слоем, то большая часть солнечного света, падающего на спутник, будет отражаться, но это же покрытие не будет пропускать тепло, генерируемое внутри спутника. Хотя появились сообщения о реализации этой идеи, каких-либо цифровых данных о ее эффективности не публиковалось. Одной из трудноразрешимых проблем оказалось обеспечение пужной толщины слоя на столь большом объекте.

Многослойные отражатели широко применяются в специальных оптических приборах. В некоторых оптических устройствах увеличение коэффициента отражения даже менее чем на 1% может привести к важным качественным изменениям, в особенности когда отражательная способность становится близкой к 100%. При помощи многочисленных отражателей были созданы очень узкополосные фильтры, способные выделить из белого света очень узкие участки длин волн. Например, в некоторых серийных интерференционных микроскопах для цветовой контрастной интерферометрии используется яркий источник белого света. Если же желательно переключиться на монохроматический источник света, то достаточно поставить на пути луча многослойный монохроматический интерференционный фильтр, и он выделит из источника белого света пужную полосу длин волн.

## ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

## Основы волоконной оптики

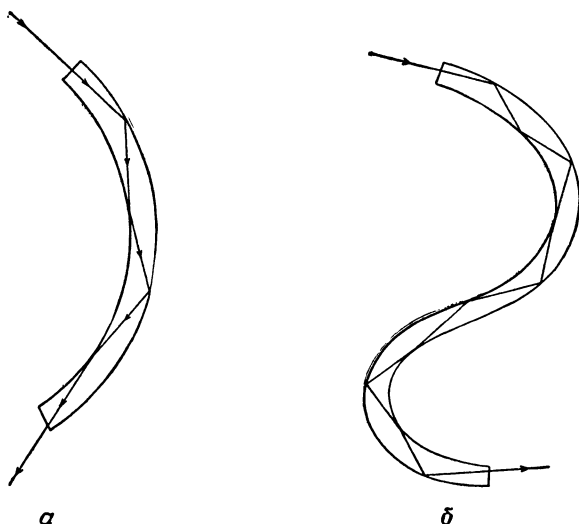
Хотя подобные приборы появились лишь в самое последнее время, мысль о передаче изображения по связке тонких волокон, которые можно изгибать и скручивать, не очень нова. Первые практические шаги в волоконной оптике были сделаны лет 20 назад Гопкинсом в Лондоне и ван Хеелом в Голландии. С тех пор оптическая промышленность вплотную занималась этой проблемой, и в настоящее время *волоконные оптические системы* появились в продаже.

Давно было известно, что свет можно пропускать через изогнутый стеклянный стержень, используя явление *полного внутреннего отражения*. Когда луч света выходит из стекла в воздух под углом к поверхности стекла, то угол преломления оказывается больше угла падения луча внутри стекла. По мере увеличения угла падения луча на границу раздела стекло — воздух наступает момент, когда угол преломления будет настолько велик, что выходящий луч будет касаться поверхности стекла. Если угол падения луча в стекле увеличить еще, то луч вообще не выйдет из стекла: поверхность стекла будет вести себя как идеальное зеркало, и поэтому луч возвращается обратно в стекло. Это явление и называется *полным внутренним отражением*. Угол, при котором наступает полное отражение, определяется показателем преломления стекла.

Реальная отражательная способность поверхности очень сильно зависит от ее чистоты, в особенности от того, насколько она свободна от пленки жира. Если поверхность чистая, то отражательная способность удивительно высока и достигает почти 100%. На протяжении многих лет этот факт используется в оптических приборах. Прямоугольные стеклянные призмы являются

идеальным средством для поворота пучка света на  $90^\circ$ , потери света происходят только при входе и выходе луча, а на внутренней отражающей поверхности они равны нулю.

Если взять длинный тонкий стеклянный стержень (рис. 27) и отполировать его концы, чтобы свет сво-



Р и с. 27.

можно мог входить и выходить, и если стержень достаточно тонок, то при его сгибании мы обнаружим, что свет, вошедший в один конец стержня, упадет на изогнутую внутреннюю поверхность под таким углом, что он испытает полное внутреннее отражение. Продвигаясь дальше внутри стержня, свет опять упадет на противоположную сторону под углом, опять-таки соответствующим полному внутреннему отражению. Таким образом луч будет описывать зигзагообразную траекторию, пока не выйдет через другой отполированный конец стержня. При всех отражениях на стенках никакой потери света не происходит; свет ослабляется лишь из-за поглощения в стекле.

Чем тоньше стержень, тем чаще будет луч «перескакивать» из стороны в сторону, как это показано на

рис. 27, б. Если стержень достаточно тонок, то несущественно, как мы сгибаем и скручиваем его: вошедший в него свет обязательно выйдет из другого конца, как вода из брандспойта. Все происходит так, как если бы этот пучок световых лучей шел по трубопроводу, образуемому скрученным или изогнутым стержнем. Очевидно, этот принцип должен быть верным и для стержня, настолько тонкого, чтобы его можно было с полным правом называть стеклянным волокном.

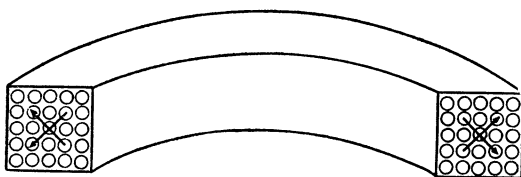
Вычисления показывают, что в изогнутом стеклянном волокне толщиной  $1/200$  см и длиной около 30 см будет происходить 4000 последовательных отражений. И тем не менее внутреннее отражение в по-настоящему чистом стекле настолько хорошо, что, несмотря на значительное число отражений, через такой «световод» пройдет около 97% всего света. Конечно, поверхность не может быть идеально чистой и всегда будет некоторое поглощение, поэтому нельзя надеяться на достижение этого теоретического идеала. Тем не менее вычисления показывают, что при подходящих условиях количество прошедшего через волокно света удивительно велико.

### Структура волокон

«Световодность» отдельного волокна может быть нарушена, если два волокна будут соприкасаться друг с другом на протяжении какого-то расстояния. Свет будет «просачиваться» из одного волокна в другое через границу соприкосновения. Это явно нежелательно, но, к счастью, утечку света можно очень сильно уменьшить. Один из способов состоит в том, что стеклянное волокно покрывают оболочкой из стекла с меньшим показателем преломления, чем у самого волокна. Условия полного отражения при этом сохраняются, а утечка ликвидируется. Технически это достигается путем вытягивания в тонкие нити стеклянных стержней, покрытых стеклом с меньшим показателем преломления. Практически можно изготавливать удовлетворительные волокна толщиной до  $1/400$  см. Ниже мы увидим, что, чем тоньше волокно, тем больше четкость изображения. Такие тонкие волокна очень гибки и вместе с тем достаточно прочны, чтобы

выдержать изгибы скручивания без механических повреждений, а это очень важно в ряде практических применений.

Возьмем теперь несколько волокон, с большой тщательностью уложим их сторона к стороне и запакуюем в связку. Представим себе, что мы расположили волокна в связке в виде прямого (нескрученного) троса с квадратным поперечным сечением размером  $2,5 \times 2,5$  см. Если каждое волокно имеет в поперечнике  $1/400$  см, то нам потребуется миллион волокон. Если нужное нам сечение должно составлять в поперечнике всего 0,25 см, нам все же понадобится 10 000 волокон.



Р и с. 28.

Обмотаем теперь нашу связку клейкой лентой; тогда у нас будет гибкий стеклянный трос. Пусть оба конца связки имеют квадратное сечение и будут гладко отполированы. Теперь при помощи линзы направим на одну из лицевых поверхностей нашего световода светящийся знак  $\times$  (рис. 28). В те волокна, на концы которых упадет яркое изображение, войдет свет. Каждое волокно независимо от своего соседа и безотносительно к тому, как согнут или скручен трос, передает, как по трубке, упавшее на нее количество света. Ясно, что на другом конце также появится яркий знак  $\times$ . Не важно, как мы скручивали или сгибали (или даже завязывали узлом) трос: на дальнем конце появляется то же самое, хотя и зеркально перевернутое изображение.

Четкость деталей изображения зависит от размера волокон, плотности их упаковки, отсутствия «утечки» света и, наконец, корреляции волокон на обоих концах. Ясно, что волокна не должны перекрещиваться друг с другом до их связывания в пучок, и если волокно находится в какой-то клетке «шахматной доски» на одном конце световода, оно должно оказаться в том же

самом месте «шахматной доски» поверхности другого конца. Пучок, в котором волокна на одном конце точно согласованы с волокнами на другом конце, называется *когерентным*. Это довольно свободное толкование слова «когерентный», но смысл понятия достаточно ясен.

Связку стеклянных волокон можно использовать не для передачи изображения, а только для передачи света. Тогда нет необходимости обращать внимание на точнейшую геометрическую выверку расположения волокон. Такие связки волокон называют *некогерентными*, их легче сделать и гораздо дешевле, чем когерентные.

Хотя это направление еще молодо, уже появился ряд сообщений о применениях оптических волокон в технике и в медицине. В продаже появились гибкие световоды длиной в несколько метров. В более длинных волокнах становятся заметными потери света на поглощение, если не уделяется особого внимания отбору очень чистого стекла. Тем не менее возможно пропускание в 50% в световодах длиной в полметра, и даже через 1,5-метровую волоконную систему проходит 25% света. Прозрачность связки волокон не так хороша, как у отдельного волокна, так как возникают три дополнительных источника потерь света: во-первых, не используется площадь между волокнами; во-вторых, из-за загрязнения волокон и частичной утечки света; в-третьих, из-за оборванных волокон или обломанных концов. Если учесть все перечисленные трудности, то следует признать, что пропускание световодов оказывается вполне удовлетворительным. Сечение конца световода фирмы «Бауш энд Ломб» показано на фото X а.

### **Некоторые приложения волоконной оптики**

Упомянем некоторые применения, о которых сообщалось в печати. Гибкий световод вводили в самые недоступные места машин и двигателей, и с его помощью были обнаружены дефекты и износ частей. Изготавливая волокна, толщина которых меняется строго определенным образом, так что при сохранении когерентности один конец световода оказывается толще

другого, можно передавать увеличенные изображения, но «зерно», обусловленное конечным размером волокна, при этом соответственно увеличивается. Сообщалось о наблюдениях внутри человеческого тела, и не только крупных органов, но при использовании очень тонких световодов также и в очень небольших областях тела. На фото Хб показано, как выглядит в волоконоскоп, который стоит рядом, напечатанное на машинке слово после прохождения через перекрученную связку волокон.

Применение волоконной оптики для дистанционного освещения не требует хороших когерентных световодов. Предлагалось, например (возможно, что это ненужная роскошь), от одной лампы отвести несколько светопроводных линий в различные места — например, к ряду микроскопов в лаборатории. Указывалось также, что, перегруппировывая и меняя местами волокна на том конце светопровода, где появляется изображение, можно достигать необычных оптических превращений. Можно, например, имея на одном конце квадратную связку волокон, уплотнить ее на другом конце и превратить в линейную структуру. Следовательно, в принципе можно было бы преобразовать площадной сигнал в линейный. Это, конечно, так, но сторонники описанной идеи проглядели тот элементарный факт, что наш 2,5-сантиметровый световод со стороной в 1000 волокон при развертке в прямую линию будет иметь ширину метров 25! Даже совсем малый световод поперечником 0,25 см растянется в ширину на 25 см.

Предполагалось также, что когерентную волоконную систему можно использовать для кодирования секретных посланий по телевидению. На один конец прямоугольного световода можно подать изображение машинописного текста, а другой конец запутывается так, чтобы посланный сигнал было невозможно прочесть. Расшифровать его можно только при помощи световода, в котором волокна запутаны точно так же, но в обратном порядке. Иным способом прочесть зашифрованный таким образом текст совершенно невозможно.

Сейчас волоконная оптика еще молода и вызывает очень большой интерес, но ее потенциальные возможности еще далеко не выяснены. Возможно, она станет

важным орудием в научных и практических исследованиях, в терапии и хирургии. Небольшие световоды уже вставлялись в иглы, которые вводились под кожу в вену и другие сосуды, и это в известной степени позволяет вести микроскопические исследования внутренних органов непосредственно у пациентов, что является значительным достижением. Будущее покажет, сколь значителен будет переворот, совершенный волоконной оптикой.

## ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

### Телескопы Шмидта

Несколько лет назад печать уделяла много внимания сообщениям об успешном завершении самого большого в мире телескопа на горе Паломар в США. Этот гигантский инструмент имеет зеркало диаметром 200 дюймов (509 см). Несомненно, что это было действительно большим достижением, которым справедливо гордились его конструкторы. И тем не менее этот инструмент — всего лишь увеличенная и улучшенная оптическая система, менее внушительные образцы которой уже давно находятся в работе.

Еще в 1665 г. Исаак Ньютон сконструировал отражательный телескоп-рефлектор, а в 1789 г. в Слоу близ Виндзора (Англия) сэр Вильям Гершель, используя только собственные силы и средства, сам сконструировал и построил отражательный телескоп с зеркалом из спекулума диаметром около 125 см и фокусным расстоянием 12 м. Паломарский инструмент, конечно, во всех отношениях намного превосходит любительский телескоп Гершеля, и все же не стоит забывать этот телескоп, так как Гершель сделал с ним важные открытия, которые стали фундаментом современной звездной астрономии.

Однако с 1930 г. телескопостроение сделало большой шаг вперед благодаря изобретению телескопа системы Шмидта. Поскольку большинство крупных астрономических телескопов используется главным образом для фотографирования небесных объектов, а не для визуальной работы, принято говорить о *камере*, а не о *телескопе* Шмидта. Практически же это термины — синонимы.

Шмидт, родившийся в 1879 г. в Эстонии, с 1905 г. начал мастерить самодельные телескопы при помощи

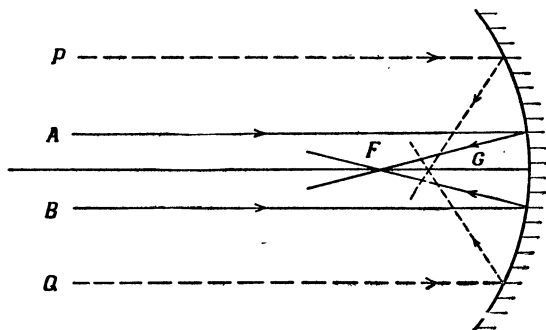
самых простых инструментов. Фактически он работал только одной левой рукой, потеряв правую в результате несчастного случая в ранней молодости. Он придумал остроумный способ исправления оптических дефектов, свойственных зеркальным телескопам, и тем самым обеспечил великолепную четкость при работе на его инструментах.

При обработке вогнутого сферического зеркала для телескопа техника шлифовки такова, что легче всего придать зеркалу точную сферическую форму. К сожалению, вогнутое сферическое зеркало сильно страдает от сферической аберрации, которую иллюстрирует рис. 29. Если изобразить ход лучей графически, то видно, что для параллельных лучей (а таковы лучи от всякого далекого объекта), идущих близ оси (например,  $A$  и  $B$ ), и для лучей, падающих на края зеркала (скажем,  $P$  и  $Q$ ), фокус не один и тот же. Фокус аксиальных лучей находится в  $F$ , а краевых — в  $G$ . Это различие приводит к размыванию изображения; чтобы ослабить эту аберрацию, приходится уменьшать апертуру зеркала, а это влечет за собой потери в светосиле и разрешении.

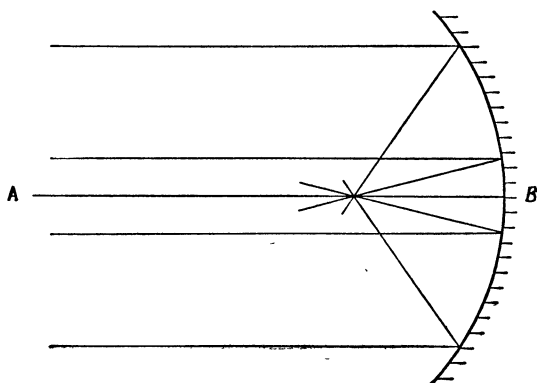
Этот дефект был известен даже во времена Ньютона. Общепринятый способ его исправления состоит в использовании вместо сферического зеркала параболического. Простой расчет показывает, что для превращения сравнительно длиннофокусного сферического зеркала в параболоид нужно снять поразительно малое количество вещества — близ края удаляется слой толщиной всего в несколько десятитысячных долей сантиметра! Получение правильной «фигуры» (этот термин используется профессионалами для характеристики формы зеркала) — медленный кропотливый процесс, требующий непрерывной оптической проверки, обычно осуществляемой интерферометрическими методами.

Свойство параболического зеркала иллюстрируется рис. 30. В силу геометрических свойств параболоида он сводит в один фокус все лучи, параллельные оси, будь они аксиальными или краевыми. Именно из-за этого важного преимущества в телескопах используются параболические зеркала. Но и параболоид страдает серьезным недостатком. Когда лучи, приходящие от

протяженного объекта, оказываются наклонными к оси параболоида, то независимо от того, насколько точно зеркалу придана параболическая форма, изображение окажется неправильным. Изображения, близкие



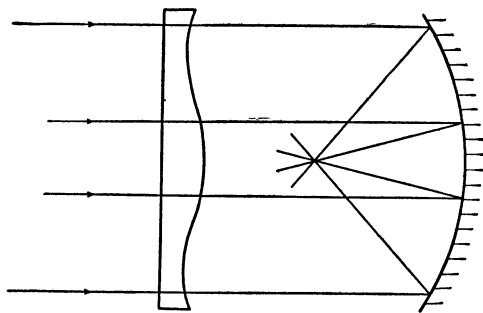
Р и с. 29.



Р и с. 30.

к оси, получаются четкими и резкими, а изображения на некотором расстоянии от оси искажены так называемой *комой*: точечный объект приобретает размытый в одну сторону хвост, похожий на хвост комет. Кома заметна, даже если лучи наклонены к оси лишь слегка, и быстро возрастает с увеличением угла наклона лучей.

Положение можно улучшить путем расчета и шлифовки так называемых «асферических» поверхностей, которые занимают некое промежуточное положение между параболоидами и эллипсоидами. Эти расчеты довольно трудоемки, а практические трудности шлифовки поверхностей подобных форм настолько велики, что в большинстве случаев почти непреодолимы. Даже зеркало обсерватории Маунт Паломар, которое имеет фокусное расстояние около 15 м, — параболоид,



Р и с. 31.

и изображение хорошего качества получается только близ оси.

Шмидт ввел перед зеркалом отражательного телескопа стекло особой формы — пластинку Шмидта, — которое заранее, прежде чем пучок света попадет на зеркало, исправляет его. Основное зеркало телескопа делается сферическим, что уже обеспечивает значительное преимущество, так как можно обойтись без шлифовки параболоида. Затем перед зеркалом помещается пластинка из стекла высокого качества (рис. 31), ее форма и толщина тщательно рассчитываются. Форма ее такова, что она вносит в путь луча, падающего на зеркало, отрицательную разность хода, за счет чего и исправляется положительная разность, вводимая геометрией сферического зеркала. В результате все лучи, в том числе и внеосевые (даже со значительным углом наклона), сводятся в одну и ту же фокальную область. Образуются четкие и свободные от комы изображения.

Вычисления наилучшей формы для пластинки — дело довольно хлопотливое. Кроме того, эта система имеет два небольших недостатка. Один состоит в том, что стеклянная пластинка вносит *хроматическую* аберрацию, проявляющуюся в том, что форма и толщина, которые исправляют положение одного цвета, не совсем подходят для другого цвета. Второй дефект — трудности, касающиеся фокального поля. Наилучший фокус создается не в плоскости, а на сферической поверхности. Если не исправлять этого дефекта, то приходится придавать фотографической пленке почти сферическую форму, кроме того, уменьшается поле зрения. В настоящее время этот дефект в значительной мере нейтрализуется путем введения в систему специальной линзы или небольшого искривленного зеркала, которые делают поле изображения плоским. Такие линзы или зеркала обычно помещают между пластинкой Шмидта и главным сферическим зеркалом.

Коррекционную пластинку Шмидта необходимо устанавливать в центре кривизны главного рефлектора, что приводит к увеличению длины телескопа вдвое по сравнению с ньютоновскими инструментами. Это обстоятельство может быть реальным недостатком, заметно увеличивающим стоимость телескопа.

Системы Шмидта по своим качествам намного превосходят прежние инструменты с параболическими зеркалами. Схема Шмидта недавно была применена в лабораторных спектрографах и камерах других типов с большими апертурами. Но действительно выдающийся вклад был сделан Шмидтом в конструирование больших астрономических телескопов.

В Англии самая большая действующая камера Шмидта (37-дюймовая) находится в обсерватории университета Сент-Эндрюс (фото XI). Шмидтовские камеры широко используются в астрономических обсерваториях по двум причинам. Они дают великолепные по четкости изображения протяженных объектов, имеющих сложную структуру, — туманностей, комет и планет. Отчасти это обусловлено совершенством оптики, но частично также уменьшением времени экспозиций. Бедой астрономии являются флуктуации атмосферы, которые всегда сильно ухудшают качество изображения; следовательно, чем короче время экспози-

пии, тем лучше четкость фотографического изображения. Большое относительное отверстие камеры Шмидта позволяет значительно сократить экспозиции. Фото XII — прекрасный пример туманностей, сфотографированных камерой Шмидта в Сент-Эндрюс.

Еще одна причина — удобство сочетания системы Шмидта со спектрографом, что позволяет получать точечные спектры отдельных звезд. Принцип камеры с успехом применен в некоторых лабораторных спектрографах, которые предназначены для исследования очень слабых источников света. Например, много ценных данных о процессах окисления можно получить при спектральных исследованиях горячих пламен. Свет, испускаемый струей горящего газа из форсунки, скажем метана или этилена, очень слаб и распределяется между спектральными линиями, многие из которых имеют ничтожно малую интенсивность. Именно здесь помогает большая светосила камер Шмидта.

### Приемники света

Обычно свет регистрируется по его фотоэлектрическому эффекту, который может проявляться в двух видах. Падая на объект и поглощаясь, фотон света может или выбить электрон, или перевести его на более высокий энергетический уровень. Полный отрыв электрона называется *внешним* фотоэлектрическим эффектом. Переход электрона на более высокий энергетический уровень приводит к *внутреннему* фотоэффекту. Внутренний фотоэффект может проявиться путем изменения проводимости вещества или возникновения электрического тока. Восприятие света глазом есть физиологическая реакция на фотоэффект в сетчатке, может быть, в форме создания ощутимого электрического потенциала. Чувствительность глаза к весьма слабым источникам света гораздо выше, чем полагает большинство людей. В нашем глазу работают два различных светочувствительных механизма. По форме этих фоторецепторов они называются *палочками* и *колбочками*. Количество колбочек и палочек в глазу неодинаково, и они распределены неравномерно. Палочки воспринимают слабый свет, колбочки — сильный. В палочках выделяется зрительный пурпур, или *родопсин*,

который может поглощать свет, что и определяет чувствительность палочек к свету. Под влиянием света родопсин обесцвечивается; обесцвеченный родопсин уже не чувствителен к свету. Если глаз будет находиться в темноте, скажем, в течение получаса, то происходит так называемая «адаптация к темноте», чувствительность глаза к восприятию слабых источников света резко возрастает. Это происходит благодаря накоплению родопсина. Установлено, что после длительного пребывания в темноте можно уверенно ощутить импульс света, насчитывающий несколько десятков фотонов!

То, что чувствительность глаза при адаптации к темноте очень велика, можно установить из следующего простого сравнения. Опыт показывает, что очень чувствительная фотографическая пластинка за два часа зарегистрировала слабый источник света, который хорошо адаптированный глаз замечает сразу. Фотопластинке нужно два часа, чтобы зафиксировать источник, который невооруженный глаз увидел в сущности мгновенно! Таким образом, глаз куда «проворнее» даже самой быстродействующей пластинки. Было обнаружено, что при точных измерениях глаз немного уступает в чувствительности самым лучшим усовершенствованным электронным приборам. Правда, глаз субъективен и не может регистрировать непрерывно, в то время как электронное устройство объективно и часто может вести непрерывную запись. И все-таки невооруженный глаз не один раз оказывался прибором, с которым были сделаны фундаментальные открытия. Все ранние опыты Резерфорда, с помощью которых он установил строение атома, были выполнены путем пристального рассматривания слабых вспышек, возбуждаемых альфа-частицами, падающими на флуоресцентный экран; вспышки были столь слабы, что только хорошо адаптировавшийся к темноте глаз мог их зарегистрировать\*. И в астрономии хорошая визуальная регистрация деталей часто превосходит фотографию, так как флуктуации атмосферы за время экспозиции приводят к тому, что четкость фотографического изображения оказывается ниже, чем при визуальных наблюдениях.

---

\* Эффект Вавилова—Черенкова также был обнаружен визуально. -- *Прим. ред.*

В настоящее время изобретен целый ряд различных приемников света. Требования военной техники к обнаружению нагретых объектов, например выхлопов двигателей, горячих оружейных стволов и т. п., привели к значительному развитию инфракрасных детекторов. В основном они бывают двух видов. В одних инфракрасное излучение создает фотоны видимого света, которые и регистрируются; в других излучение поглощается как чисто тепловое, и уже последнее регистрируется некоторыми специальными устройствами. Для ультрафиолетовой, видимой и близкой инфракрасной областей спектра чаще всего применяется детектор фотонов, называемый *фотоумножителем*.

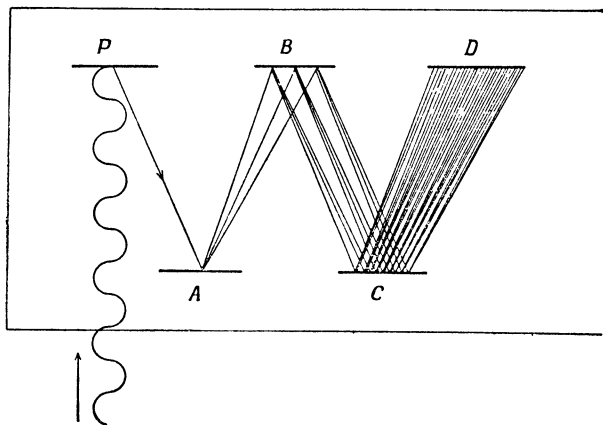
### Фотоумножитель

Современный компактный и надежный детектор и усилитель света реагирует на очень слабые источники света и может при особых обстоятельствах регистрировать импульсы, состоящие из нескольких отдельных фотонов. Его действие основано на внешнем фотоэффекте и умножении появившихся фотоэлектронов. Свет падает на светочувствительную поверхность (обычно из цезия), и каждый поглощенный фотон выбивает один фотоэлектрон. Выбитый электрон ускоряется за счет разности потенциалов 100 в и попадает на металлическую пластинку. Ускоренный электрон при столкновении с металлом освобождает несколько вторичных электронов. Так происходит *умножение* электронов.

На рис. 32 показана схема фотоумножителя. Фотон ударяется о светочувствительное вещество *P* и освобождает один фотоэлектрон. Последний ускоряется напряжением 100 в и падает на электрод *A*, из которого выбивается несколько электронов. Для простоты возьмем лишь трехкратное умножение. Далее электроны попадают на второй электрод *B*, напряжение на котором на 100 в выше, чем на *A*. Каждый электрон выбивает из этого электрода три новых, и общее число их доходит до 9. Следующий электрод *C*, напряжение на котором снова на 100 в выше, чем на *B*, даст 27 электронов и т. д.

Система электродов, расположенных по окружности, при компактном размещении занимает небольшой стеклянный цилиндр, содержащий 20 умножающих

элементов, и требует 1200 в. Электроды размещаются таким образом, что при каждом соударении происходит умножение до 10 раз. Это означает, что один-единственный попавший в прибор фотон может создать в конце цепи не меньше 1 000 000 000 000 электронов, а это уже неплохой ток. Помимо этого, так как процесс происходит в вакууме и благодаря компактному расположению длина пробега электронов невелика, вся последовательность усиления завершается меньше чем за



Р и с. 32.

1/50 000 000 сек. Это предельно малое время регистрации позволяет применять прибор при очень кратковременных эффектах или при очень быстрых колебаниях интенсивности света.

Фотоумножитель гораздо чувствительнее, чем самая чувствительная фотопластинка, и вдобавок его отсчеты хорошо воспроизводимы. Поскольку падающий свет непосредственно превращается в электрический ток, такие устройства можно с большим успехом использовать в телеметрических системах, в частности на ракетах, спутниках и т. п. Предел чувствительности фотоумножителей обусловлен так называемой термоионной эмиссией. Даже в полной темноте фотоэлектрическая поверхность испускает некоторое количество электронов, определяемое ее фактической температурой. Их количество невелико по сравнению с фотоэлектро-

нами, но они существуют всегда — даже при комнатной температуре, составляющей около  $300^{\circ}\text{C}$  от абсолютного нуля. Эти электроны также умножаются и усиливаются, создавая «темновой ток», иногда именуемый «шумом». Если фототок, порождаемый каким-либо слабым источником света, не превышает заметно темнового тока, то такой свет бесполезно пытаться зарегистрировать.

При комнатной температуре тепловой шум может быть сведен до уровня, эквивалентного току, создаваемому примерно 250 фотонами в секунду. Очевидно, это самый низкий уровень светового сигнала, поддающийся сколько-нибудь точной регистрации. Даже этот уровень фактически не достигается из-за статистических флуктуаций темнового тока. Стоит упомянуть, что уровень шумов для человеческого глаза приближается к 100 фотонам в секунду или чуть меньше. Отсюда следует, что если необходимо регистрировать предельно слабые источники, то при комнатных температурах глаз в три раза надежнее самого лучшего фотоумножителя.

Однако электронное устройство имеет то важное преимущество, что фотоумножитель можно сильно охладить. При температуре жидкого гелия (достать его нетрудно, а он обеспечивает температуру  $269^{\circ}\text{C}$  ниже точки замерзания воды) темновой ток значительно снижается. При этой температуре «шумовой» уровень столь низок, что фотоумножитель может воспринимать единичные фотоны.

### **Усилитель изображения**

Последняя по времени важная модификация фотоумножителя — это так называемый *усилитель изображения*. Он напоминает немного телевизионную передающую камеру. Обычный фотоумножитель увеличивает количество падающего света, превращая его в усиленный ток; усилитель изображения преобразует путем фотоумножения слабое световое изображение в такое же изображение, но более яркое.

Слабое световое изображение падает на очень тонкую светочувствительную поверхность. При этом, как обычно, освобождаются фотоэлектроны, но так как вся система трубки помещена в фокусирующее магнитное

поле, то выбитые электроны движутся вперед по прямолинейным траекториям. Они ускоряются разностью потенциалов около 4000 в и падают на тонкую пленку, из которой выбиваются вторичные электроны, что умножает их число. Фокусирующее поле заставляет эти вторичные электроны двигаться строго в первоначальных направлениях, так что распределение электронов точно соответствует первичному слабому изображению, попавшему на светочувствительную поверхность. Процесс умножения повторяется несколько раз, и, наконец, значительно усиленный электронный пучок падает на светящийся экран, создавая значительно усиленное изображение.

При общей эффективной разности потенциалов 40 000 в было достигнуто увеличение интенсивности изображения в миллион раз.

Усилитель изображения появился совсем недавно, но обещает очень много. Например, при некоторых исследованиях живых организмов очень желательно освещать их светом очень малой интенсивности, чтобы уменьшить до предела воздействие света на организм. Именно здесь может помочь усилитель изображения. Когда нужны очень малые экспозиции объектов и нельзя воспользоваться светом ярче определенного уровня, усилитель изображения вновь демонстрирует свое преимущество. Особенно ценно это устройство для изучения слабых источников, столь часто встречающихся в астрономии.

Фотоумножители и усилители изображения теперь широко применяются в самых различных областях наблюдения. Типичный пример — сцинтилляционный счетчик в атомной физике. В героические дни исследований атомного ядра пятьдесят лет назад существовал бесценный метод изучения частиц, выделяемых радиоактивными телами, при помощи простого сцинтилляционного экрана. Было открыто, что каждая отдельная частица, «выстреленная» при распаде радиоактивного вещества, при ударе об экран, покрытый тонким слоем сернистого цинка, может создавать слабую вспышку света. Тем самым вспышки позволяли вести наблюдения за отдельными атомами — это было по тому времени замечательным достижением. Однако вспышка, порождаемая одним атомом, так слаба, что ее может

заметить только наблюдатель, который сначала побудет в совершенно темной комнате по крайней мере полчаса. Тем не менее подобные наблюдения очень утомительны, и если наблюдателю приходится включать свет или выходить на дневной свет, он должен заново долго адаптироваться к темноте, прежде чем он сможет возобновить наблюдения.

Современный сцинтилляционный счетчик позволил преодолеть все эти трудности. Он тоже работает в темноте. Как и прежде, частица дает слабую мерцающую вспышку, но этот слабый свет теперь попадает в фотумножитель. Импульс фототока, созданного вспышкой, многократно усиливается, и создается ток, вполне достаточный для регистрации посредством счетчика, так что вспышка от частицы регистрируется автоматически. Быстрота реакции сцинтилляционного счетчика исключительно велика: тогда как человеческий глаз может осилить подсчет двух-трех вспышек в секунду, счетчик может справиться с тысячами. При этом одновременно может измеряться интенсивность каждой вспышки.

Чтобы уменьшить вредное облучение, при работе с рентгеновскими лучами всегда желательно использовать по возможности меньшие интенсивности. Однако при этом изображение на экране при диагностике с помощью рентгена становится слишком слабым. Но хотя его трудно рассмотреть в деталях, оно вполне достаточно для усилителя изображения, с помощью которого может быть доведено до интенсивности, доступной визуальным наблюдениям или автоматической регистрации.

В одном устройстве для экспериментальных исследований рака усилитель изображения объединен с электронным микроскопом. Предел увеличения в электронном микроскопе устанавливается из соображений интенсивности электронного пучка. Слабое изображение, полученное в этих условиях в микроскопе, усиливается при помощи усилителя изображения, проецируется прямо на передающую телевизионную камеру. Окончательное изображение можно подать на телевизионный экран или непрерывно записывать на видеомангитофонную ленту. Таким путем можно достичь увеличения в миллионы раз, хотя, конечно, рост увеличения не влечет за собой увеличения разрешения.

Другое недавнее применение усилителя изображения — это сочетание его с ультрафиолетовой микроскопией. Имеющиеся источники ультрафиолетовых лучей обычно мало интенсивны. Кроме того, изображение может регистрироваться только фотографическим путем или на флуоресцентном экране. Препятствием к получению больших увеличений является низкий уровень интенсивности ультрафиолетовых лучей. Здесь на помощь снова приходит усилитель изображения в сочетании с ультрафиолетовым микроскопом. Очень слабое изображение на экране, вызванное ультрафиолетом, превращается в яркое видимое; правда, подобная установка обходится недешево.

### Фотопроводники

Между проводниками электричества (металлами) и непроводниками (изоляторами, например резиной или фарфором) существует класс твердых веществ, называемых *полупроводниками*, которые немного проводят электричество и вдобавок имеют любопытные электрические и оптические свойства. Металл проводит электричество потому, что в нем много совершенно свободных и слабо связанных друг с другом электронов, которые могут легко перемещаться в металле при приложении разности потенциалов. Движение таких электронов и образует электрический ток.

Изоляторы — это твердые вещества, в которых электроны прочно занимают различные энергетические уровни, так что наложение внешнего электрического поля не может привести к перемещению электронов в веществе. В полупроводниках число электронов, способных к перемещению, ограничено. В них может существовать некоторое количество свободных, несвязанных электронов, но могут также существовать и области, в которых электроны отсутствуют, хотя они должны были бы там быть на основании химической или кристаллической структуры данного вещества. Такие области с отсутствующими электронами называются «дырками»; они ведут себя как электроны с положительным зарядом.

В полупроводниках и электроны и «дырки» могут служить переносчиками электрического заряда, и потому их называют «носителями». Когда на некоторые

полупроводники падает свет, то атомы поглощают его, и за счет этого электроны переходят на более высокие уровни, где они могут двигаться более свободно. Таким образом, поглощение света увеличивает проводимость за счет освобожденных электронов. Одновременно переход электрона оставляет «дырку», которая тоже служит носителем заряда. Таким образом, каждый поглощаемый фотон рождает «пару» носителей заряда. Этот механизм в настоящее время широко применяется для регистрации света.

Было обнаружено, что путем ввода в полупроводник специально подобранных примесей можно добавить в него дополнительные носители заряда. В промышленности этот метод называется *легированием* полупроводников. В соответствии с использованной примесью могут быть добавлены или электроны, или «дырки». Если примешиваемая присадка рождает электроны, получается полупроводник «*n*-типа» (*n* — negative — обозначает отрицательно заряженные электроны). Если же выбранная присадка создает положительные дырки, то мы имеем полупроводник «*p*-типа» (*p* — positive — заряд положительного знака). Если полупроводник *n*-типа наложить на полупроводник *p*-типа, то получающееся в результате вещество с так называемым «*p* — *n*-переходом» проявляет ценные оптические и электрические свойства. Если на такую комбинацию падает свет, то по обе стороны от перехода возникает разность потенциалов и появляется электрический ток. Солнечные батареи, которые теперь используются для преобразования солнечного света непосредственно в электрический ток, основаны именно на этом свойстве. Последние конструкции этих батарей обеспечивают получение до 100 вт с каждого квадратного метра поверхности, освещенной солнечным светом.

Фотопроводниковые элементы широко применяются в качестве экспонометров, хорошо знакомых фотолюбителям. В первых фотопроводниках в качестве основы использовался сернистый кадмий, теперь же разработан целый ряд других материалов. Особенно эффективным оказались фотопроводники из теллурида свинца. Большинство фотопроводников может регистрировать флуктуации света порядка  $1/40\,000$  сек, чего вполне достаточно для многих целей.

Для регистрации инфракрасного (теплого) излучения в наши дни широко используется простое, но очень чувствительное устройство, называемое ячейкой Голея. Это небольшой сосуд с газом, закрытый окошком — тонкой посеребренной гибкой мембраной. Поглощение ячейкой даже очень небольшого количества тепла заставляет находящийся внутри ячейки газ немного расшириться. Воздух выгибает наружу тонкую мембрану, которая в свою очередь отклоняет луч света, отражающийся от мембраны. Смещение светового луча фиксируется специальным устройством. Ячейки Голея могут быть чувствительны к самым незначительным количествам тепла.

### **Сверхскоростная фотография**

Снимки процесса разбивания электрической лампочки, брошенной на цементный пол, или пролета ружейной пули через лист картона, сделанные с очень короткими выдержками, привлекают всеобщее внимание. Однако сверхскоростная фотография — это и ценное оружие научного исследования. Сюда относятся фотографирование быстрых перемещений при взрывах и горении, съемка быстро движущегося объекта, явлений в электрических разрядах и т. д. Фотография в наши дни стала настолько скоростной, что размеры снимаемого объекта в настоящее время ограничиваются разностью времен пролета световых лучей от частей объекта, находящихся на разных расстояниях от фотоаппарата. Во всем мире широким фронтом идут исследования, направленные на получение энергии за счет термоядерного синтеза при сжатии электрических разрядов высоких энергий в магнитных полях специальной формы. Цель экспериментов — добиться очень высоких температур, достигающих до десятков миллионов градусов, которые необходимы для начала ядерного синтеза. Есть надежда, что, раз начавшись, процесс будет поддерживаться долго и обеспечит выделение достаточного количества энергии. Эти исследования встречаются с колоссальными трудностями, так как все до сих пор полученные формы разрядов крайне неустойчивы и подвержены очень быстрым колебаниям. Крайне

желательно уметь сфотографировать такие неустойчивые разряды, но продолжительность выдержек при этом составляет в лучшем случае  $1/5\,000\,000$  сек, если не меньше. Более того, от одного снимка обычно мало пользы; необходима последовательность — по сути, ряд «кинокадров», чтобы эти кадры следовали один за другим через крайне малые интервалы времени.

Столь высокие скорости съемки привели к ряду совершенно специфических проблем, для решения которых было придумано немало различных устройств. Объект, подлежащий регистрации, должен или сам быть очень ярким источником света, или должен освещаться интенсивным пучком света. Так как время выдержки очень мало, приходится концентрировать значительные количества энергии в короткой вспышке; скорость смены кадров должна быть как можно выше, а апертура камеры как можно больше. Само собой разумеется, что механическая смена кадров, как в обычной кинокамере, помочь делу не может и приходится прибегать к специальным приемам.

Скорость при таких съемках характеризуется числом кадров, которые можно снять в 1 сек. Для новейших установок миллион кадров в секунду считается обычным делом. Методы, используемые для достижения такой скорости, весьма различны. В одном пленка располагается за десятью отдельными линзами, размещенными в ряд, причем каждая строит свое собственное изображение. Очень быстро вращающееся зеркало отбрасывает изображение объекта последовательно на каждую линзу с интервалом времени порядка миллионной доли секунды. В результате на пленке появляются 10 последовательных кадров объекта.

В другом устройстве пленка наматывается на барабан, и на нее через щель проецируется изображение объекта. Барабан приводится в быстрое вращение или же на неподвижный барабан отбрасывается изображение щели при помощи небольшого быстро вращающегося зеркала. Используя совсем небольшую и недорогую камеру, можно при помощи такого простого устройства получить кадры с поразительно коротким временем экспозиций в  $1/1\,000\,000\,000$  сек. При столь малых экспозициях существенно очень сильное освещение (если только сам объект не является очень

ярким источником света). Достаточно яркий свет дает разряд сильного тока от большой батареи конденсаторов через лампу-вспышку, наполненную ксеноном. Импульс света такой лампы длится около  $1/100\,000$  сек, чего вполне достаточно для экспозиций, необходимых для сверхскоростной съемки.

Если же нужен всего один снимок с очень короткой экспозицией, то существует более простой способ. Можно держать камеру открытой все время и при помощи одной вспышки высокой мощности осветить объект и зафиксировать его. При наилучших условиях продолжительность вспышки можно сократить до миллионной доли секунды, и этот интервал становится эффективным временем экспозиции. Если же необходимо зафиксировать последовательность событий, то приходится обращаться к кинокамере.

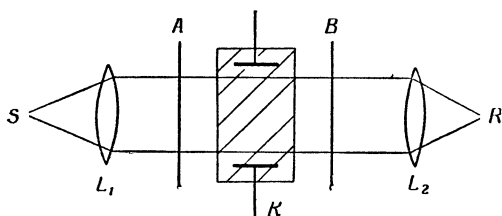
Для получения очень коротких экспозиций было изготовлено несколько необычных затворов. Обычные механические затворы здесь непригодны, поскольку они слишком медленно действуют. В одном остроумном устройстве, которое может довести экспозицию до  $1/30\,000$  сек, близ окошка помещают кусочек проволоки. Чтобы затвор сработал, через проволоку пропускают сильный электрический ток; проволока «взрывается» и покрывает окошко непрозрачным металлом, тем самым «закрывая затвор».

### Затворы Керра

В электронном затворе, обеспечивающем предельно высокие скорости, используется так называемая *ячейка Керра*. Шотландский физик Керр открыл в 1876 г., что ряд веществ (как твердых, так и жидких) под действием электрического поля становится двоякопреломляющим. Эффект Керра не зависит от направления электрического поля. Это свойство используется в ячейке Керра; ее схема приведена на рис. 33. Луч света от источника  $S$  при помощи линз  $L_1$  и  $L_2$  попадает на приемник света  $R$ ;  $A$  и  $B$  — листы поляроида, скрещенные так, что в  $R$  свет не проникает. Ячейка Керра  $K$  — это сосуд с плоскими стенками, куда наливается выбранная жидкость (нитробензол или ундециловый спирт). В жидкость помещены два плоских

металлических электрода. При создании между ними мгновенной разности потенциалов жидкость становится двоякопреломляющей. Это влечет за собой поворот плоскости поляризации света, проходящего через поляроид *A*; поэтому теперь некоторое количество света проходит через поляроид *B* к приемнику. Каждый раз при подаче соответствующего напряжения «затвор» открывается и пропускает свет.

Существенным моментом здесь является то, что скорость реакции жидкости, т. е. время между приложением поля и появлением двойного преломления, настолько мало, что его почти невозможно измерить



Р и с. 33.

каким-либо доступным способом. Для некоторых жидкостей оно меньше  $1/100\,000\,000\,000$  сек — величина необычайно малая.

Предположим теперь, что вместо постоянного электрического поля мы подаем на электроды переменное поле, которое периодически меняется от нуля до максимума. Тогда ячейка Керра превращается в предельно быстродействующий световой затвор, который работает с частотой, равной частоте изменения поля. При помощи простой по конструкции ячейки Керра можно производить прерывание света до  $10\,000\,000\,000$  раз в секунду.

Ячейки Керра уже нашли применение в ряде важных областей. В частности, такая ячейка была использована для измерения скорости света с очень высокой точностью в лабораторных условиях. Луч света прерывается ячейкой Керра и затем посылается на зеркало, от которого он отражается. Скорость прерывания подбирается путем изменения частоты так, чтобы оптический затвор опять оказался открытым точно через

то время, которое нужно свету на путь до зеркала и обратно. Время срабатывания затвора задается подаваемой частотой, которую можно точно определить. Так как теперь известно время, затраченное на прохождение точно измеренного расстояния между ячейкой Керра и зеркалом, то скорость света вычисляется из этих данных непосредственно и притом с большой точностью.

Ячейки Керра используются и в сверхскоростных камерах. В частности, в одной камере была целая последовательность ячеек Керра вокруг линзы, а частота подаваемого напряжения подбиралась так, чтобы получить шесть кадров через  $1/100\,000\,000$  сек. За столь короткий интервал времени свет проходит всего около трех метров. Эта величина ограничивает ту пространственную область, которую можно охватить при помощи фотографии.

В следующем разделе мы увидим, что затворы Керра получили новую область применения с появлением лазеров. Высокоскоростные камеры широко используются в технике. При помощи их исследовались взрывы, распространение пламен по трубам и развитие химических реакций. Благоприятный объект для подобных исследований — различные неустойчивости в электрических разрядах, в частности связанные с изучением плазмы и управляемыми термоядерными реакциями. Теми же методами изучались взрывные эффекты, вызываемые импульсами мощных лазеров, а также исследовались явления колебаний, порождаемых прохождением ударных волн через препятствия. Устройства типа ячеек Керра имеют большое будущее также в связи с изучением процессов разрушения деталей машин,

## ЧАСТЬ III

---

### ЛАЗЕР

#### ГЛАВА 12

### НОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОПТИКА

#### Теория лазеров

Хотя оптический прибор, именуемый *лазером* или *оптическим квантовым генератором*, был изобретен только в 1960 г. \*, к настоящему времени уже опубликованы тысячи работ, посвященных теории, практическим приложениям и возможным применениям в будущем. Число исследователей, занимающихся этим вопросом, очень велико, особенно в США, и на исследования уже израсходованы значительные суммы, часть из которых пошла на разработку неосуществимых проектов.

Лазер представляет собой новый вид источника света с совершенно особыми свойствами. Свет, который он излучает, отличается необычайной яркостью, сосредоточен в очень резко ограниченном интервале длин волн и в очень высокой мере когерентен; кроме того, он может быть сжат в очень узкий параллельный пучок. Когда мы говорили об интерференции, мы упомянули, что волновой фронт бывает приблизительно когерентным, когда волна исходит из малого отверстия. Хотя излучение такого источника более или менее когерентно, но интенсивность его очень мала. Большая яркость лазера в сочетании с высокой когерентностью и параллельностью испускаемого луча открыла совершенно новые перспективы, и можно сказать, что лазеры — это путь к осуществлению подлинной революции в использовании света.

---

\* В 1964 г. Нобелевская премия по физике была присуждена И. Г. Басову и А. М. Прохорову (СССР) и Ч. Таунсу (США) за работы, развитие которых привело к созданию лазеров. — *Прим. ред.*

Слово лазер — LASER — образовано из первых букв слов полного английского наименования **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** (усиление света путем вынужденной эмиссии излучения). Действие лазера основано на квантовых процессах, называемых *инверсией населенности* и *оптической накачкой*. Познакомимся сначала с инверсией населенности, описывающей состояние атомов газа или твердого тела в определенных условиях возбуждения.

### Инверсия населенности

Мы уже знаем, что атом состоит из ядра, вокруг которого по стационарным орбитам движутся электроны, не излучая при этом энергии. В обычном невозбужденном атоме внешний электрон обращается вокруг ядра, находясь на самом низком энергетическом уровне. Если атом каким-либо путем приобретает энергию — либо при соударении, либо от излучения, — то внешний электрон может перейти в возбужденное состояние с более высокой энергией, из которого он обычно через очень небольшой промежуток времени переходит обратно в стационарное состояние, излучая при этом в виде фотона тот избыток энергии, который у него был. Среди множества способов возбуждения электрона есть один, который нам уже встречался раньше, а именно флуоресценция. Свет подходящей длины волны возбуждает электрон, который быстро возвращается на исходный уровень, излучая при этом свет.

Теперь обратим внимание на то, что при обычном возбуждении флуоресценции только у ничтожной доли атомов электроны переходят на возбужденные уровни; у подавляющего большинства атомов электроны по-прежнему занимают стационарные уровни. Однако если флуоресценция вызывается очень яркой вспышкой света, то в течение непродолжительного времени электронов на верхних уровнях будет больше, чем на нижних. Эта кратковременная ситуация называется *инверсией населенности*.

Когда в условиях инверсии населенности уровней электрон переходит на нижний уровень, испуская фотон, то последний, проходя через вещество, по сути дела, проходит через множество окружающих его воз-

бужденных атомов и способен вызвать излучение фотона у какого-либо из них. Теория показывает, что оба фотона перемещаются в одном и том же направлении и к тому же они практически когерентны.

Каждый из этой пары фотонов может повторить тот же процесс, и через очень непродолжительное время благодаря своего рода цепной реакции образуется фотонная лавина, в которой все фотоны имеют одну и ту же частоту, все движутся в одном направлении и все оптически когерентны. Эта лавина фотонов может быть значительно усилена с помощью одного оптического трюка. Если всю систему поместить между двумя не полностью отражающими зеркалами (типа используемых в многолучевых интерферометрах), то в высокой степени когерентный и направленный свет будет многократно проходить внутри области с инверсией населенности. Поскольку скорость света очень велика, весь процесс многократного отражения света с постоянно нарастающей интенсивностью происходит за весьма малый промежуток времени, и при соблюдении необходимых условий возникает очень интенсивный и очень кратковременный световой импульс, обладающий совершенно особыми свойствами.

### **Рубиновый лазер**

Эта идея впервые была реализована в рубиновом лазере, основной деталью которого является стержень из искусственного рубина, в который специально введено небольшое количество атомов хрома. Сам рубин — это не что иное, как кристалл окиси алюминия (корунд) с определенной примесью, придающей ему знаменитую окраску. Тот же основной состав имеет и сапфир, но примесь у него другая. Эти кристаллы теперь можно изготавливать искусственным путем в виде длинных стержней. Кристалл чистой окиси алюминия прозрачен и бесцветен. Если во время выращивания кристалла к нему добавить небольшое количество титана, то кристалл приобретет восхитительный голубой цвет, и в результате получится сапфир. Если добавить металл хром, то кристалл становится огненно-красным и получается рубин. Если же содержание хрома уменьшить, то получается розовый рубин.

Наиболее распространенным материалом для лазера является стержень из искусственного рубина, содержащего 1/20% хрома — вполне достаточно, чтобы он имел розовый цвет. Именно атомы хрома, распределенные в кристалле подобно «металлическому пару», обуславливают лазерную эмиссию. Оба конца стержня тщательно полируются, и в первых экспериментах их покрывали полупрозрачным слоем серебра, чтобы усилить эффект многократного отражения внутри кристалла. Лазер приводится в действие *оптической накачкой*.

### **Оптическая накачка**

Именно оптическая накачка создает инверсию населенности в кристалле, позволяющую системе действовать как лазер. Рубиновый стержень окружен спиральной кварцевой трубкой, наполненной ксеноном. Последняя в свою очередь окружена отполированным цилиндрическим отражателем. В результате разряда батареи конденсаторов через ксеноновую лампу пропускается очень мощный и короткий импульс тока. В результате на рубиновом стержне, окруженном отражателем, концентрируется очень мощная и кратковременная вспышка света. Этот свет создает инверсию населенности уровней в атомах хрома, распределенных в рубине. В лучшем случае в лазерное излучение превращается лишь около 1/1000 энергии световой вспышки. Чтобы лазер действовал, ксеноновая лампа должна иметь мощность в несколько миллионов ватт (конечно, в течение очень короткого промежутка времени), а продолжительность вспышки должна быть меньше 1/1000 сек. Энергия лазера может составлять 10 квт, но она имеет поразительно высокую концентрацию.

Выходящий из рубина свет соответствует одному точно определенному переходу электрона в атоме хрома, и, следовательно, весь он имеет одну длину волны, приходящуюся на красную область спектра. Рассмотрим теперь некоторые оптические свойства и приложения лазера.

### **Фокусировка луча лазера**

Лазерный луч выходит из кристалла рубина в виде весьма параллельного пучка света, поскольку при лавинном эффекте все фотоны испускаются вдоль оси

рубина. На практике мощность испускаемого излучения может составлять до 20 *квт* на 1 *см*<sup>2</sup> излучающей поверхности рубина. Так как свет выходит параллельным пучком, то его можно собрать линзой в крохотное пятнышко поперечником не больше 0,1 *мм*. Это дает 20 *квт* на площадь 0,01 *мм*<sup>2</sup>. Такое пятно в 30 тысяч раз ярче, чем Солнце; это соответствует концентрации энергии электростанции мощностью 2 млн. *квт* на площади 10 *см*<sup>2</sup>. При этом надо иметь в виду, что солнечное излучение распределено по всему спектру белого света; лазерный луч сконцентрирован в пределах практически одной длины волны. Но существуют специальные методы, посредством которых интенсивность лазерного луча может быть значительно увеличена.

### Гигантские импульсы

Механизм квантового усиления начинает развиваться еще до того, как «накачивающей вспышке» удалось перевести все электроны на возбужденные уровни. Вследствие этого лазерный эффект размывается на некоторый небольшой интервал времени, который, однако, снижает максимум интенсивности вспышки света.

Для ускорения развития «фотонной лавины» между концом рубинового стержня и зеркалом помещалась ячейка Керра. Она открывала доступ к зеркалу лишь на короткое время, обеспечивая очень быстрое нарастание лавины. Это сокращение времени приводит к концентрации лазерного эффекта в *гигантский импульс*, называемый так потому, что интенсивность такого импульса в 100 000 раз больше, чем интенсивность обычного лазерного луча. Следует подчеркнуть, что в гигантском импульсе не больше энергии, чем в обычном, но она сильнее сжата во времени. Действительно, эффективная вспышка гигантского импульса длится не более 1/100 000 000 *сек* по сравнению с 1/1000 *сек* у обычного импульса лазера. Выигрыш в интенсивности в 100 000 раз определяется сокращением во столько же раз продолжительности вспышки. Это сокращение времени не препятствует многим применениям лазера, в которых главное — это максимальная яркость,

## Газовый лазер

Немалые усилия были приложены для разработки газового лазера. Оказывается, смесь газов гелия и неона может давать лазерный эффект. Газовая смесь находится в трубке, играющей роль рубинового стержня, а зеркала на концах образуют резонансную систему. Инверсия населенности образуется путем пропускания через газ электрического разряда. Смесь из десяти частей гелия и одной части неона может работать как лазер и дает свет в красной области. Для возбуждения газового лазера требуется лишь весьма умеренное количество энергии. Поскольку он излучает в непрерывном режиме, то энергия на выходе этого лазера гораздо ниже, чем у рубинового. Тем не менее у него есть свои преимущества. До смешного дешево стоят его изготовление и работа. Свет газового лазера монохроматичен и когерентен, и это сделало его ценным инструментом для некоторых оптических исследований. Газовые лазеры могут быть совсем небольшими по размеру; настолько небольшими, что их можно держать в руке.

Помимо газового, в настоящее время созданы лазеры на полупроводниках, в частности на арсениде галлия.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ

## Связь

Несмотря на новизну лазеров, уже опубликованы многочисленные сообщения о практических применениях лазеров. Некоторые предложения явно чересчур оптимистичны и даже фантастичны — вроде использования лазера в качестве «лучей смерти». Осуществление любой подобной установки обошлось бы очень недешево, а лазерный луч в любом случае был бы не смертоноснее обычного оружия. Однако есть одна область применения лазеров, которая привлекла к себе серьезное внимание, — это применение их в связи.

Применение лазеров для связи идет по двум различным направлениям: одно связано с достигаемой при помощи лазеров интенсивностью, другое — с частотой. Лазер, работающий в режиме гигантского импульса, дает настолько интенсивное излучение, что с ним оказалось возможным осуществить эффектный опыт, поразивший воображение широкой публики. Луч от лазера, работающего в режиме гигантских импульсов, может быть достаточно интенсивным и достаточно мощным, чтобы обеспечить отражение сигналов от Луны, находящейся от нас на расстоянии 380 000 км.

Когда гигантский импульс был послан на Луну, обратно вернулось достаточно света (не слишком много), чтобы его можно было зарегистрировать чувствительными приемниками света. Если интенсивность шаг за шагом увеличивать, то вполне возможно будет исследовать поверхность Луны световым лучом, а также измерить с высокой точностью расстояние до нашего спутника и его возможные изменения.

Гораздо больший интерес представляет вопрос об использовании лазерного луча для передачи информации. Толчком к исследованиям в этом направлении служит тот факт, что радиоволновый диапазон в

настоящее время невероятно переполнен, а будущее — и в частности развитие цветного телевидения — сулит новые трудности. Суть дела в том, что телевизионное изображение строится из множества отдельных элементов, которые должны излучаться все одновременно, чтобы приемник мог правильно восстановить передаваемое изображение. В итоге, чем больше объем передаваемой в единицу времени информации, тем больший диапазон частот занимает передаваемый сигнал. Поэтому передающая телевизионная станция занимает не одну частоту, а прибавляет к ней так называемые «боковые полосы», расположенные по обе стороны от основной частоты. Для чистоты передачи боковые частоты соседних станций не должны перекрываться, иначе будут возникать помехи.

Телевизионные станции ведут передачу на частоте порядка 100 000 000 *гц*. Необходимые боковые полосы могут занимать 5% этой величины, или 5 *Мгц*. Теперь вспомним, что частоты световых волн гораздо выше, чем частоты тех радиоволн, которые в настоящее время закреплены за телевизионными станциями. Частота видимого света в миллион раз выше частоты радиоволн и составляет примерно 100 000 000 000 000 *гц*. Ясно, что в полосу световых частот можно вместить гораздо больше информации, чем в полосу радиочастот. Поэтому изменение частоты лазерного света (его *модуляция*) на 1% предоставляет частотный диапазон, достаточный для передачи не менее 1 000 000 000 отдельных телефонных разговоров, не мешающих друг другу.

### **Модуляция лазерного луча**

Можно ли модулировать световой луч так, чтобы он переносил полезный сигнал, и, в частности, можно ли модулировать луч лазера? При обычной передаче речи звуковые волны, падающие на микрофон, порождают слабый электрический ток, который после соответствующего усиления управляет интенсивностью (или частотой) посланного сигнала. В телевидении изображение предмета попадает на светочувствительную поверхность, испускающую электроны; затем получившееся «электронное изображение» снимается электронным лучом, который в свою очередь управляет

передаваемым радиосигналом. Иными словами, передаваемый сигнал модулируется или голосом, или изображением соответственно. Лазерный свет также можно модулировать, изменяя его интенсивность. С этой целью было изобретено довольно много различных устройств. В одном из них луч лазера проходит через оптический затвор, степень пропускания которого контролируется приложенным напряжением. Сигнал от микрофона заставляет этот затвор пропускать некоторое количество света в соответствии с наложенной модуляцией. Поэтому лазерный свет, проходящий через такой затвор, модулируется по интенсивности. Когда этот сигнал принимается, он преобразуется в звук. В лазерной телефонии мы сталкиваемся с двумя основными трудностями. Во-первых, поскольку сигнал посылается в виде светового луча, он подвержен всем обычным воздействиям атмосферы на свет: дымки, тумана, пыли и облаков. Поэтому лазерная связь будет наименее надежна в атмосфере с ее загрязнениями, рассеянием на дождевых каплях, пылинках, льдинках и т. д. Однако все эти ограничения отпадают в космическом пространстве или в высоких слоях атмосферы. Единственный надежный выход для использования лазерного излучения в земных системах связи — это посылка света по откачаным трубам, но это вряд ли реально. Однако лазерная связь между самолетами на больших высотах представляется вполне возможной.

Вторая серьезная трудность использования сигналов лазерного луча на уровне Земли (в отличие от связи в космическом пространстве) состоит в кривизне нашей планеты. Длинные радиоволны огибают Землю вследствие дифракции; короткие радиоволны прокладывают свой путь вокруг Земли, отражаясь от верхних проводящих слоев атмосферы, так что в обоих случаях сигналы обходят Землю. Но лазерный луч — это луч света, и он будет распространяться лишь строго прямолинейно. Он может дойти только до видимого горизонта и затем потеряться в пространстве. Даже если бы сообщения передавались от одной вышки к другой, область охвата оставалась бы очень небольшой.

Сейчас слишком рано выносить окончательное суждение. Экспериментальной лазерной технике предстоит еще пройти длинный путь, прежде чем будут

созданы такие надежные системы передачи сигналов, которые оправдают затраченные на них усилия и средства.

### **Лазер в роли радиолокатора**

Общеизвестно, что радиолокатор засекает положение объекта с помощью отражения импульсов радиоволн. Измеряя интервал времени между моментом послышки радиоволны и моментом прихода отраженного сигнала с помощью электронных устройств, радиолокационная система определяет расстояние до объекта, так как радиоволны распространяются с известной скоростью, а именно со скоростью света. Получая отражения от объекта, можно определить его форму и положение даже сквозь облачность или густой туман.

Лазер также может применяться для целей локации — иногда с большим, иногда с меньшим успехом, чем обычный радиолокатор. Преимущество лазера заключается в следующем. Во-первых, лазер дает очень узкий пучок лучей. Во-вторых, так как в радиолокации применяются волны длиной в несколько сантиметров, то волновые свойства используемого излучения (которые действительно для волн всех видов) требуют достаточно больших антенн для обеспечения точной локации объекта. Мы уже отмечали, что разрешающая сила любой оптической системы такого рода зависит от отношения длины волны к диаметру главной «линзы» или «зеркала».

Так как длина волны света лазера гораздо меньше длины радиоволн, то указанное отношение для луча от рубинового лазера гораздо меньше, чем то же отношение для сантиметрового радиолокатора с антенной диаметром в несколько десятков метров. Это обеспечивает гораздо лучшую «прицельность» светолокатора по сравнению с радиолокатором. Однако не следует упускать из вида, что на радиоволны не влияют ни дым, ни облака, ни туман, в то время как луч лазера будет рассеиваться этими препятствиями, и, следовательно, им нельзя пользоваться при таких условиях.

Тот же самый недостаток можно превратить в достоинство. Например, лазерный луч был послан на едва заметный шлейф дыма из высокой трубы. По мере удаления от трубы интенсивность света лазера, рас-

сеянного дымом и отраженного обратно, непрерывно падала. Но лазерный луч настолько интенсивен, что можно проследить за шлейфом дыма еще долго после того, как он стал совершенно невидим для невооруженного глаза. Таким путем были проведены исследования загрязнения от промышленных дымов.

### **Использование лазера, работающего в режиме гигантских импульсов**

Давайте сначала рассмотрим, какой концентрации энергии здесь можно добиться. По некоторым сообщениям, очень мощный импульс, сфокусированный высококачественной линзой, дает плотность энергии до 1000 млн. *квт* на 1 *см*<sup>2</sup>. Фактически это достигается для крошечной области площадью меньше 1/10 000 *см*<sup>2</sup>. Эти сообщения, по-видимому, несколько оптимистичны, но у нас нет оснований сомневаться в том, что с помощью обычных лазеров достигается локальная концентрация энергии, равная по крайней мере 100 000 *квт* на 1 *см*<sup>2</sup>. Вполне возможно, что хорошая генерация импульсов приведет к достижению указанного оптимистичного прогноза. Длительность импульса может составлять самое большее несколько миллионных долей секунды; тем не менее при этом могут достигаться неожиданные результаты.

Когда луч лазера, работающего в режиме гигантского импульса, фокусируется на металле даже с высокой точкой плавления, возникает облачко ярко освещенного пара и летят брызги расплавленного металла. Скоростные фотографии эффектов, наблюдаемых вслед за очень кратковременным лазерным импульсом (он длится лишь стомиллионную долю секунды), показывают, что сначала сталь переходит в жидкое состояние — примерно через 1/10 000 *сек* после попадания на нее импульса. Затем жидкий металл разбрызгивается на капельки благодаря возникающей ударной волне. Можно без труда прожечь отверстие в стальном листе толщиной 1 *мм*. Напомним, что в лазерном луче совсем нет длинноволнового теплового излучения — это чисто видимый свет.

В общем явления, происходящие при попадании лазерного луча на объект, зависят от прозрачности этого объекта, а также от его теплопроводности.

Эти факторы порождают много трудностей, когда необходима резкая фокусировка интенсивного лазерного луча. Чтобы свести параллельный пучок света в крошечное пятно и тем самым добиться наивысшей концентрации энергии, необходимо воспользоваться высококачественным объективом микроскопа. Однако хороший объектив всегда состоит из нескольких линз, которые склеены «на оптический контакт». Но такой системой нельзя пользоваться для фокусировки лазерного луча высокой мощности, потому что склеивающее вещество поглотит некоторую долю энергии, и даже, если поглощение очень невелико, уже этой небольшой доли достаточно, чтобы разогреть и разрушить линзу или в лучшем случае расплавить скрепляющий ее слой. Поэтому при работе с лазером нельзя пользоваться ничем, кроме простой одиночной линзы, и это является основной причиной, почему лазерный луч пока еще не удалось сфокусировать в очень малом пятне и добиться концентрации энергии, которую теория считает возможной. Дело в том, что обычные простые линзы не обладают достаточно хорошими качествами.

Эффективным примером использования лазера служит прожигание отверстий в алмазе. При обычной технологии изготовления алмазных фильер для протягивания проволоки отверстия в них просверливаются иглой с нанесенной на нее алмазной пастой. Эта работа требует многих часов и даже дней. А лазерным лучом можно пробить маленькое отверстие всего за одну вспышку. Правда, пока еще невозможно ни заранее устанавливать размер отверстия, ни определять точно, в какой мере повреждена окружающая отверстие область. Поэтому в США был предложен комбинированный метод: слабым лазерным лучом в алмазе сначала пробивают малое отверстие неправильной формы, а затем его обрабатывают иглой с алмазной пастой. Сообщалось, что такое сочетание обеспечивает значительную экономию времени.

Существует множество удачных и неудачных попыток использования лазеров. Если линза, используемая для концентрации луча, слегка поглощает свет, то на ее выходной поверхности появляются трещины. Локальный нагрев с помощью лазеров средней интенсивности используется для микроточечной сварки.

Таким образом были сварены тонкие пластинки, сложенные встык, хотя с точки зрения потребления мощности и стоимости оборудования этот метод безнадежно неэкономичен. С помощью лазеров удалось выполнить сварку очень тонких проволок для деталей микроэлектронной аппаратуры.

### **Лазер в медицине**

Луч лазера настолько интенсивен, что попадание его в глаз может привести к весьма опасным последствиям. Если узкий пучок света, гораздо более яркий, чем свет Солнца, сфокусировать на сетчатке глаза, то это приведет к пагубному ожогу в данном месте. Этим фактом воспользовались хирурги-окулисты. Сообщалось о попытке использования импульсов лазера для удаления опухолей, а также для «приварки» отделившейся от дна глаза сетчатки — опасного повреждения, нередко ведущего к потере зрения. Раньше для этого применялась миниатюрная вольтова дуга, создающая местный ожог и последующую термокоагуляцию ткани, но в настоящее время благодаря лазерам эта операция значительно усовершенствована. Начать с того, что время, в течение которого глаз подвергается воздействию света, так мало, что боль вообще отсутствует. Далее, возможна очень точная направленность главным образом потому, что лазерный «выстрел» заканчивается задолго до того, как глаз начинает рефлекторно смещаться в сторону. В настоящее время этот метод настолько продвинулся вперед, что лазер, связанный с офтальмоскопом, дает возможность хирургу точно видеть, куда пришелся «выстрел» его лазера. Будущее покажет, не создает ли лазерный луч неожиданные побочные неприятности, обусловленные ударными волнами.

Сторонники лазера настолько преисполнены энтузиазма, что уже были попытки применить облучение лазерным светом для выжигания полости в испорченном зубе. Было даже сделано предложение плавить лазером пломбу, помещенную в дупло больного зуба. Некоторые из этих предложений очень похожи на предложение стрелять из пушек по воробьям. Есть более простые способы делать многие вещи, не прибегая к помощи лазера.

## ГОЛОГРАФИЯ

## Оптика голограммы

Теперь мы подходим к последнему, совершенно необычному применению лазеров, причем главное в этом случае не интенсивность и не монохроматичность света лазера, а его когерентность. Рождение фотографии нового типа самым неожиданным образом определяется тем, что газовый лазер может обеспечить нас ярким непрерывным (т. е. не импульсным) источником весьма когерентного света. В этом методе вся оптическая информация, исходящая от объекта, реализуется в виде трехмерного изображения, вследствие чего ему присвоено наименование *голография* от греческого *holos*, что просто означает «все целиком». Голография — это способ воссоздания изображения, опирающийся на дифракцию когерентного света, отраженного объектом.

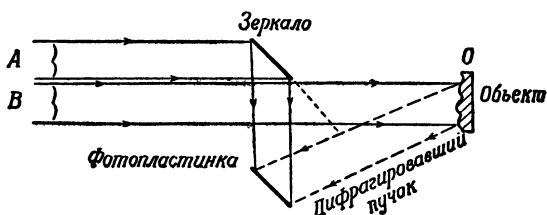
Основная идея голографии была высказана в 1949 г. Габором в Лондоне, но только появление лазера, дающего когерентный свет, позволило применить этот метод на практике, хотя теоретические представления уже давно были развиты Габором. Первые удачные голограммы были получены только в 1963 г. Голография замечательна тем, что изображение объектов строится вообще без помощи линз.

Когда мы видим освещенный предмет, мы по существу видим свет, дифрагировавший от деталей предмета. Если мы выберем для освещения предмета когерентный свет, то все дифрагировавшие лучи будут когерентными. Эти лучи содержат всю информацию о внешнем облике предмета. В качестве источника когерентного света можно использовать лазер. Если дифрагированный от предмета когерентный свет упадет на фотопластинку, то дифрагированные лучи будут интерферировать между собой, образуя странную смесь

из точек, черточек и полосок, которые не имеют ничего общего с оригиналом, но эта весьма сложная интерференционная картина на самом деле содержит всю оптическую информацию о внешнем облике предмета.

Согласно теории, удобнее, чтобы на фотопластинку падал не просто дифрагировавший от предмета когерентный свет, а его смесь с прямым когерентным светом от того же источника. Тогда на пластинке происходит интерференция прямого когерентного света с дифрагировавшим когерентным светом.

Имеются разные способы создания голограмм; один из них показан на рис. 34. Пучок когерентного света

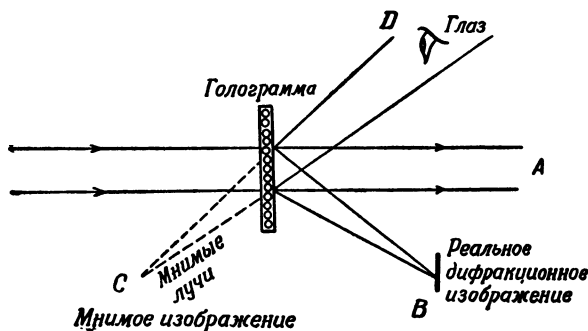


Р и с. 34.

*АВ* исходит из газового лазера. Часть света, исходящая из *В*, идет прямо к предмету *О* (например, вазе с цветами). Набор дифрагировавших от предмета волн падает на фотопластинку. Сюда же падает прямой свет *А* от лазера. На поверхности пластинки происходит интерференция двух когерентных пучков — дифрагированного и отраженного. Результат интерференции запечатлевается на пластинке. Полученное изображение, называемое *голограммой*, выглядит как бессмысленный набор близких друг к другу интерференционных полос и пятен неправильной формы. Важно осознать, что полная информация, скрытая в этой интерференционной картине, гораздо обширнее тех сведений, которые может дать обычная фотография. Ибо обычная фотография регистрирует только интенсивность лучей света, дифрагированных объектом, тогда как голограмма несет в себе также сведения и о фазах, т. е. о пространственном расположении деталей объекта. Таким образом, голограмма позволяет воссоздать пространственное изображение первоначального объекта.

## Реконструкция изображения

Это изображение может быть воссоздано путем обращения системы, а именно освещения самой голограммы когерентным светом лазера. Расположение приборов при этой процедуре показано на рис. 35. Все, что необходимо, — это осветить негатив голограммы параллельным пучком света газового лазера, падающим перпендикулярно к негативу. Большая часть



Р и с. 35.

света проходит через негатив, образуя очень яркий, но ненужный центральный пучок. Рассеяние когерентного света на деталях голограммы приводит к образованию дифракционной картины, воспроизводящей картину светового поля, которая создала голограмму. Теперь уже распределение пятен и полос на голограмме создает дифракционную картину. Эта картина содержит всю информацию о первоначальном предмете.

По одну сторону от голограммы дифрагированные лучи сходятся, образуя действительное изображение в *B*. По другую сторону дифрагированные лучи расходятся, образуя мнимое изображение объекта в *C*. Изображение *B* можно сфотографировать, помещая там фотопластинку параллельно голограмме. Глаз, находящийся в точке *D*, увидит мнимое изображение *C*. Фактически мы смотрим сквозь негатив голограммы и видим изображение предмета за негативом,

Замечательное свойство этого изображения состоит в том, что глаз видит его объемным и сохраняющим первоначальную фактуру предмета: изображение кажется «материализовавшимся».

### **Безлинзовый характер голографии**

Отметим, что при получении и воспроизведении голограмм мы нигде не пользовались линзами. Все, что нам требовалось, — это яркий источник когерентного света.

Возможности использования голографии весьма многочисленны. Вряд ли можно ожидать, что голограмма небольшого объекта будет давать столь же хорошее изображение, как и обычная микрофотография. И все же появились сообщения о неожиданно хороших результатах при голографии мелких деталей, сравнимых по качеству с полученными при помощи обычного микроскопа.

Важное преимущество голографии состоит в том, что трехмерное изображение создается одной голограммой. Если объект прозрачный и имеет достаточное протяжение в глубину, то, рассматривая голограмму и фокусируя изображение для разных уровней, мы как бы прозондируем объект в глубину по одной голограмме. Например, была получена голограмма света, рассеиваемого частицами тумана в прозрачном контейнере. Одна голограмма дала возможность исследователю не спеша сосчитать частицы тумана на различной глубине.

Совсем недавно голография была применена для исследования колеблющихся пластинок. Обычно важным условием возможности получать голограммы является полная неподвижность предмета. Это требование объясняется тем, что интерференционная картина должна быть зафиксирована на фотопластинке, а если объект и пластинка могут перемещаться за пределы, допустимые условиями интерференции, то вся интерференционная картина распадается. Именно это обстоятельство используется для изучения колеблющихся пластин. Если пластина колеблется с небольшой амплитудой, то поверхность разделяется на области, которые перемещаются, и области, находящиеся в покое. Если мы

сделаем голограмму этого распределения, то те части пластины, которые покоятся, будут зарегистрированы, тогда как движущиеся части, даже если амплитуды колебаний будут составлять лишь долю световой волны, разрушат голографический эффект. Поэтому на голограмме будет непосредственно видно распределение движущихся и неподвижных областей пластины, даже если смещения будут микроскопическими.

Сказанного достаточно, чтобы наглядно показать возможности практических приложений голографии. Недавно было сообщено о получении голограмм при помощи лишь частично когерентного света без лазеров, но пока еще этот метод находится в стадии разработки. Первоначально идея голографии была выдвинута Габором как способ усовершенствования электронограмм, получаемых на электронном микроскопе. Его идея состояла в том, чтобы получить голограмму, созданную рассеянными электронами, а затем воссоздать изображение при помощи обычного видимого света. Трудности возникли при попытке создать электронный эквивалент когерентного света. Пока «когерентный» электронный пучок не получен, электронную голограмму не удастся получить на практике.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С 1900 г. оптика прошла удивительно длинный путь. В то время появление квантовой теории произвело переворот, который только теперь начинает приносить обильные практические плоды. Квантовая теория уже привела к громадному расширению не только оптики, но и всей современной физики. Тем не менее классическая волновая теория в руках талантливых специалистов по-прежнему продолжает пополнять наши знания и наши экспериментальные методы. Можно не сомневаться, что новые приложения квантовых методов, из которых мы выбрали лишь один важный пример — лазер, будут давать все более и более существенные вклады в оптику будущего. Тем не менее многие из самых крупных успехов науки и техники сегодняшнего (а вероятно, и завтрашнего) дня основаны на классической физике.

В этой книге мы были вынуждены опустить гораздо больше того, что мы в нее включили. Многие новые достижения оптики, которые на первый взгляд кажутся простыми, часто базируются на сложнейших математических выкладках, и в силу самого характера этой книги их пришлось опустить. Перечень опущенного очень велик, и некоторым оправданием может служить лишь тот факт, что для беспристрастного и сколько-нибудь полного описания революции в оптике потребовалась бы не одна книга, а целая энциклопедия.

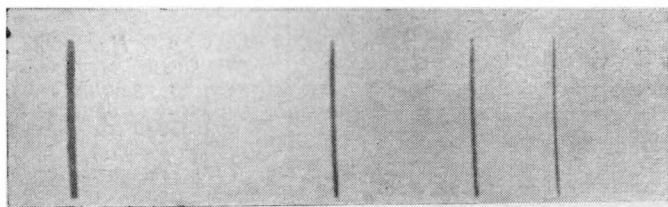
Для примера можно указать, что мы ничего не сказали о достижениях фотографии. А ведь следовало хотя бы кратко упомянуть о новых конструкциях объективов с большими апертурами, широкоугольных объективах, разнообразных телефотграфических системах, линзах с непрерывно изменяющимся увеличением и т. п. Нужно было напомнить о новых затворах

и автоматических экспонометрах. Следовало бы рассказать о новых фотоматериалах, цветных обратимых пленках, мелкозернистых пластинках и пленках, повышении чувствительности, расширении чувствительности пленок в инфракрасную сторону спектра и т. д.

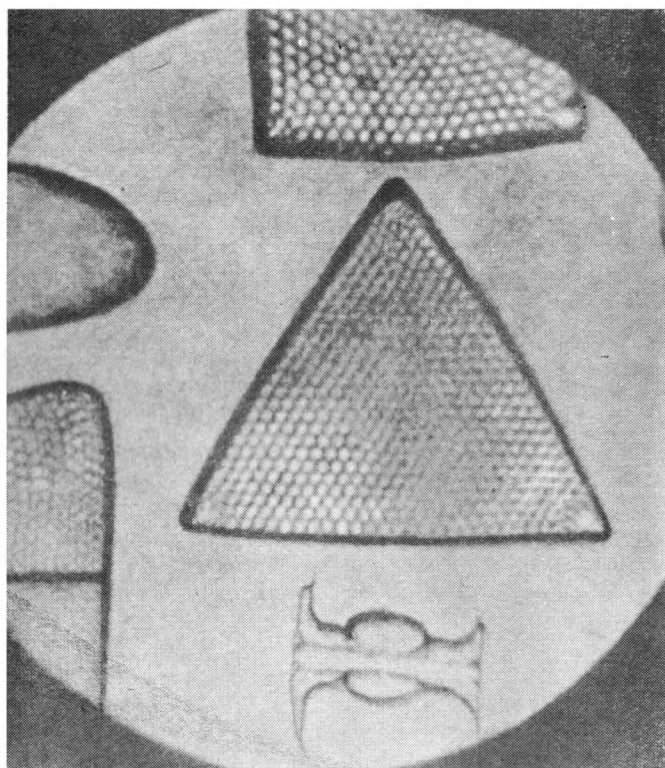
Нам не удалось ни отвести места новым военным оптическим системам, новым биноклям, перископам и дальномерам, ни даже упомянуть об обширной области применения интерференционных методов для изучения условий обтекания самолетов.

Широкая публика то и дело узнает о новинках уличного освещения — газосветных лампах, кварцевых лампах и разнообразных газоразрядных светильниках высокого давления. Этот предмет сам по себе заслуживает отдельной книги. Вновь открываемые оптические явления в той или иной форме вторгаются в нашу жизнь самым неожиданным образом. Как и в прошлом, оптика сегодня играет ведущую роль в новых изобретениях и новых теоретических концепциях. Пока еще очень часто последней линзой оптической системы является глаз человека, и не удивительно, что физиологическая оптика в последнее время получила новый толчок. Много любопытного ежегодно узнают о человеческом глазе, а ведь глаз человека — всего лишь один из видов глаз живых существ в природе.

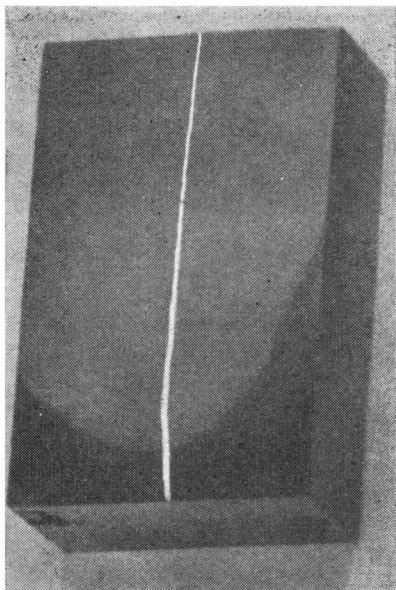
Если эта скромная книга возбудила интерес читателя, то автор достиг своей цели. К сожалению, для более глубокого изучения оптики нет простого пути. Методически предмет весьма труден и изобилует еще не решенными проблемами. И даже обычные оптические задачи столь сложны, что во многих случаях можно надеяться найти их решение лишь при помощи сложнейших вычислительных машин.



**Фото 1а.** Четыре линии в видимой части спектра водорода, входящие в серию Бальмера.

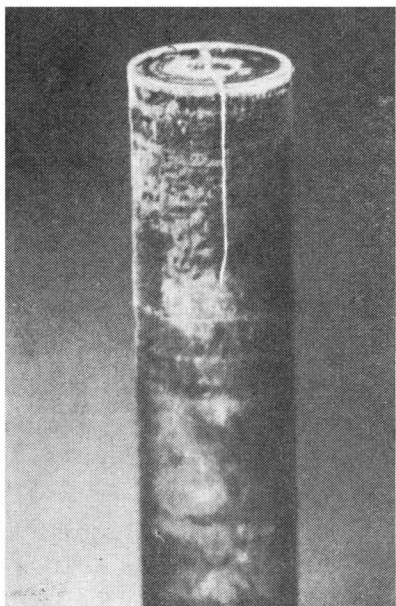


**Фото 1б.** Фотография диатомовых водорослей ( $300\times$ ), полученная недавно с однолинзовым микроскопом, сделанным Левенгуком в конце XVII в.



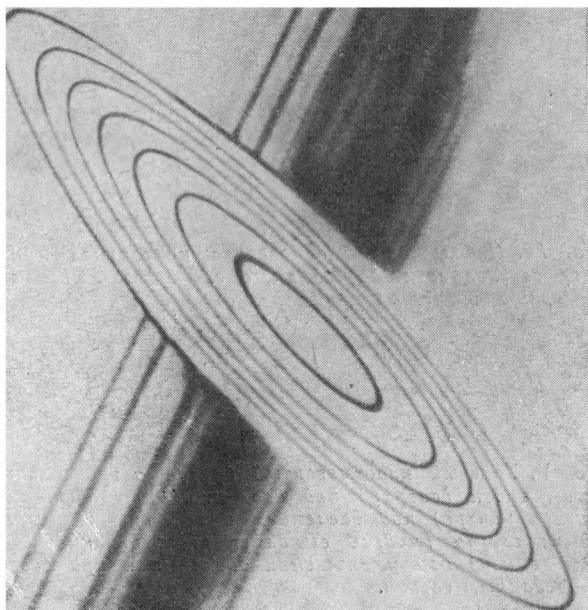
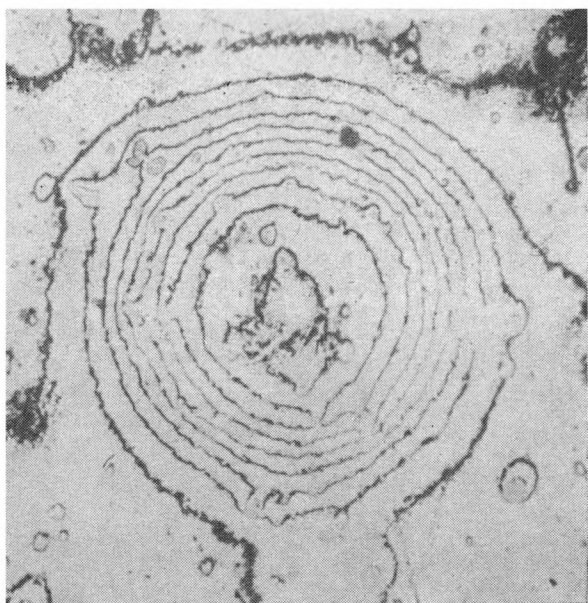
◀ **Фото IIa.** Флуоресцентный метод обнаружения трещин в металлическом бруске с использованием флуоресценции ультрафиолетового света.

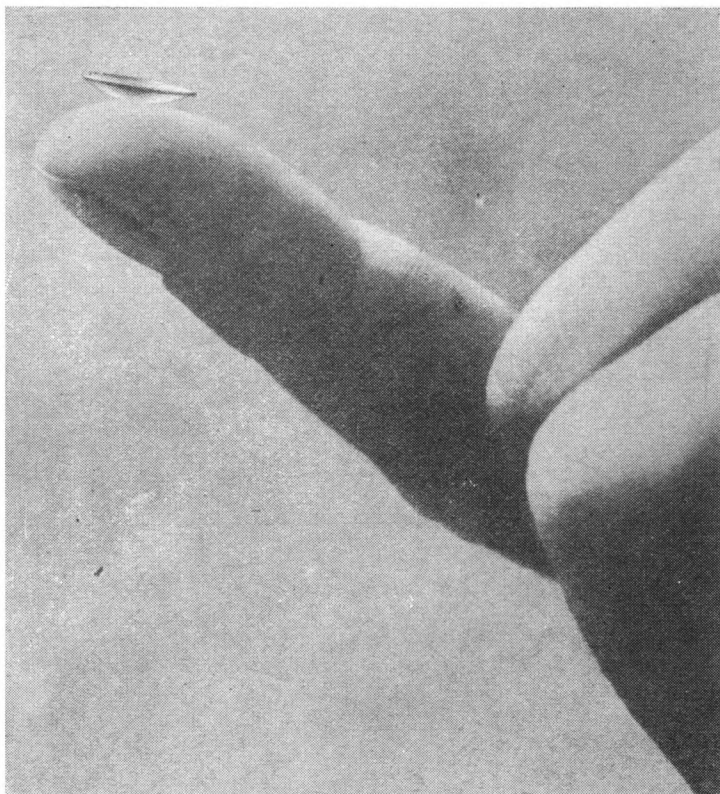
**Фото IIб.** Неожиданная и опасная тонкая волосная трещина в стальной детали машины, обнаруженная методом ультрафиолетовой флуоресценции.



▶ **Фото IIIa.** Картина оптических контуров (интерференционные кольца) небольшого кратера, образовавшегося при ударе металлического снаряда, двигавшегося со скоростью 1280 км/час, о небольшую подвешенную каплю воды. Каждая оптическая контурная линия соответствует изменению высоты на  $1/40\,000$  см.

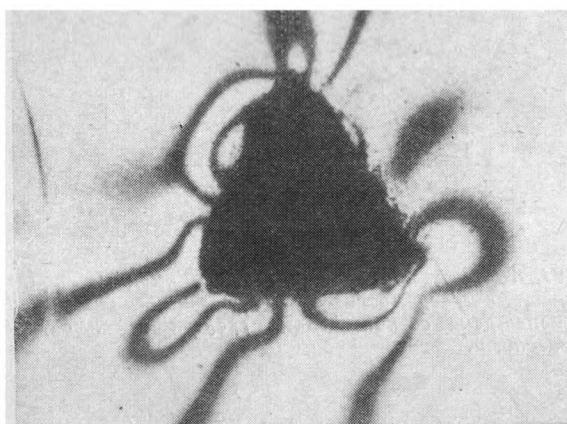
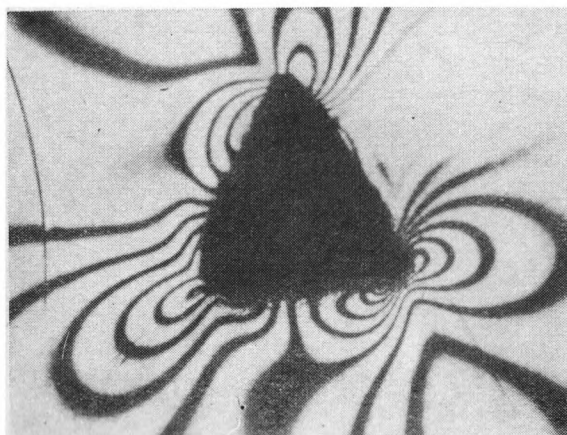
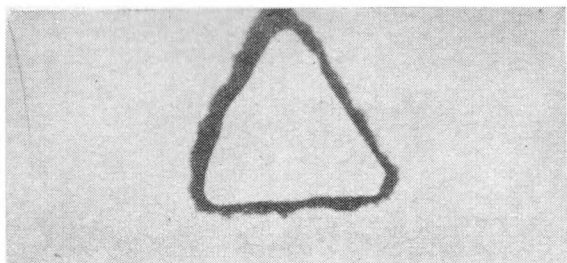
▶ **Фото IIIб.** Картина оптических контуров (интерференционные кольца) небольшого углубления длиной  $1/4$  см, прочерченного на поверхности алмаза. Глубина бороздки, как показывают кольца, составляет около  $1/6400$  см.

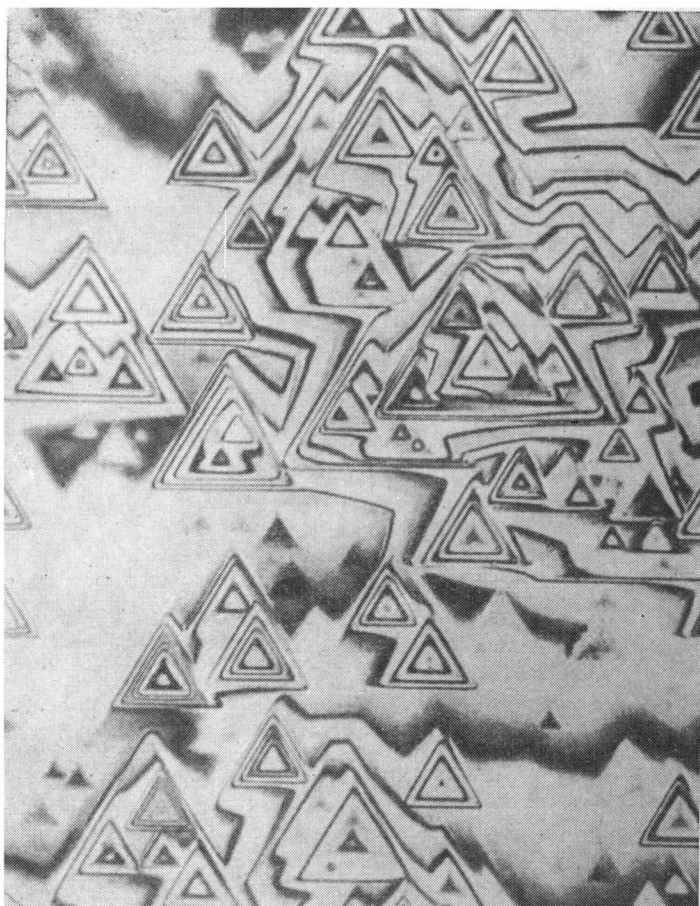




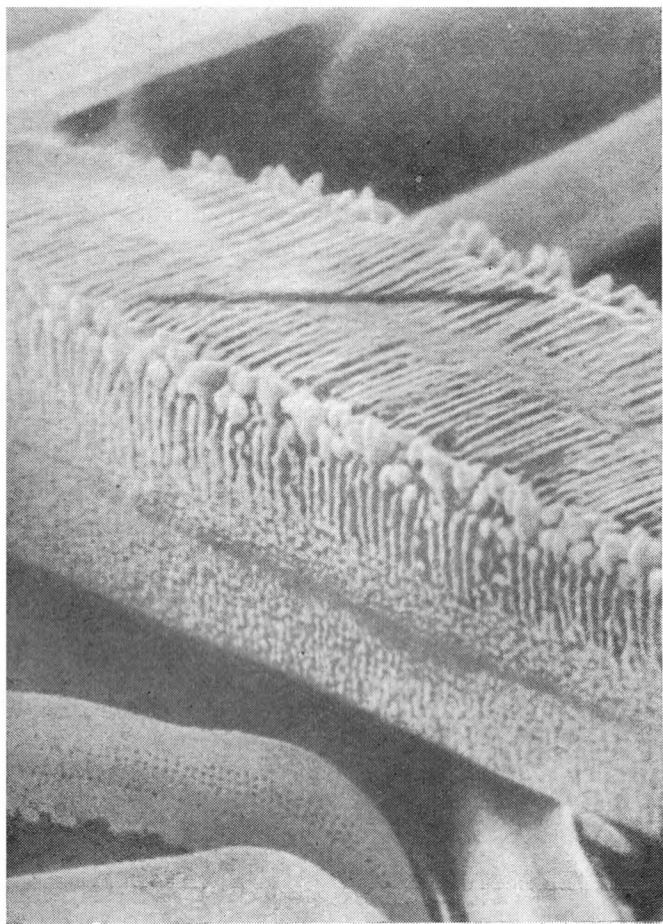
▲  
**Фото IV.** Небольшая пластмассовая контактная линза. Ее диаметр составляет всего  $\frac{4}{5}$  см, а вес  $\frac{1}{3}$  г. Линза вытачивается вращающимся алмазным резцом.

►  
**Фото V.** Толстый пластмассовый брусок с треугольным отверстием виден (вверху) под давлением при обычном освещении, (в центре) под давлением и при освещении поляризованным светом (модель выявляет распределение напряжений) и (внизу) при уменьшении давления и при освещении поляризованным светом.

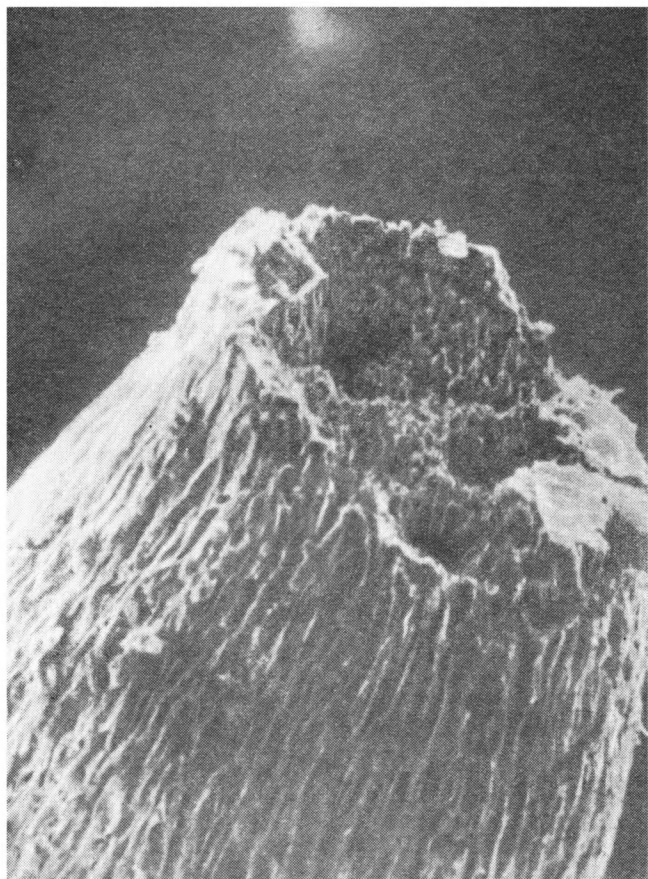




*Фото VI. Картина контуров интерференционных полос, соответствующая поверхности алмазного кристалла. Вся поверхность испещрена сеткой мелких треугольных ямок, называемых тригонами.*



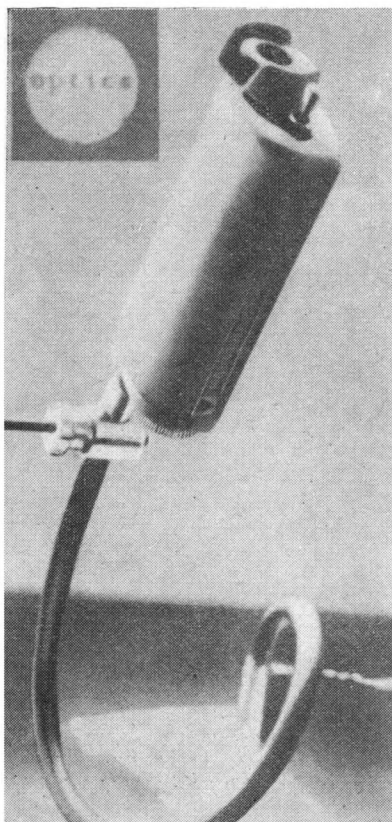
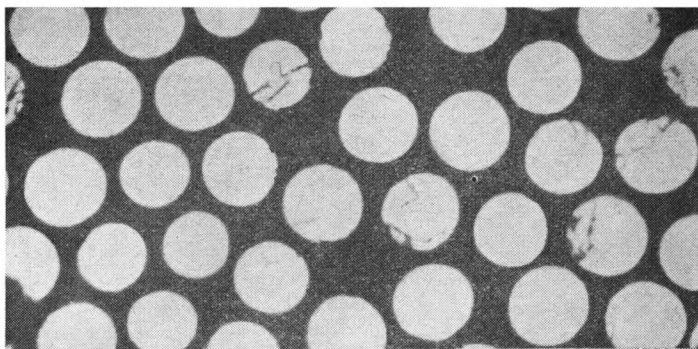
*Фото VII. Часть диатомовой водоросли, сфотографированной с увеличением 600 X при помощи стереосканирующего микроскопа. Главная особенность — большая глубина фокуса.*



*Фото VIII. Картина с малым увеличением ( $100\times$ ) конца оборванной проволоки, сделанная при помощи стереосканирующего электронного микроскопа. Глубина фокуса в несколько сот раз больше, чем у оптического микроскопа при соответствующем увеличении; получается трехмерное изображение.*



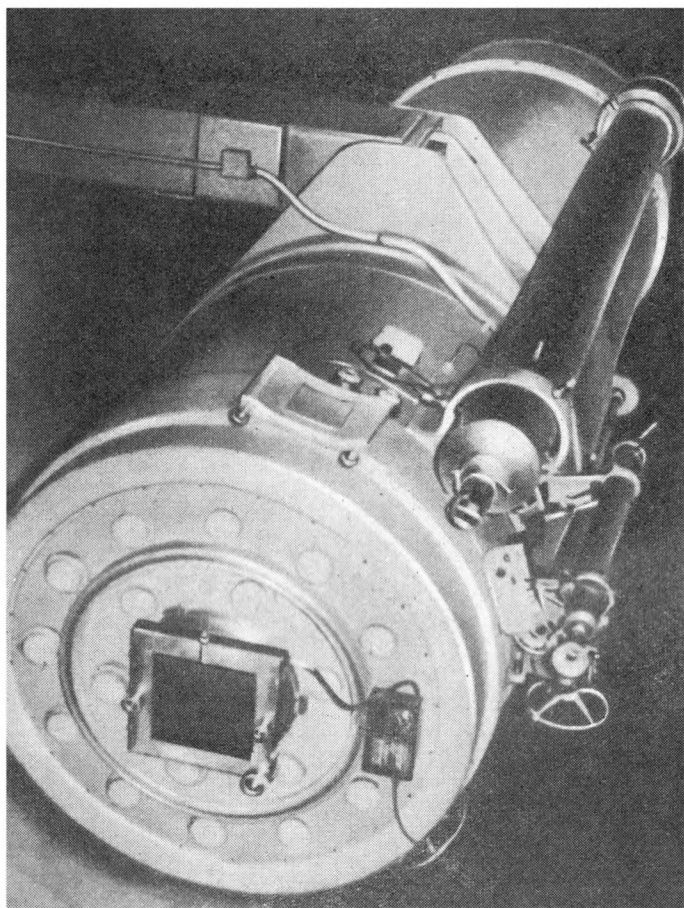
**Фото IX.** Полутоновый отпечаток (увеличенный), на котором видны точки, обусловленные растром (верхний снимок). Внизу та же картина, но точки исключены посредством оптического дифракционного контроля.



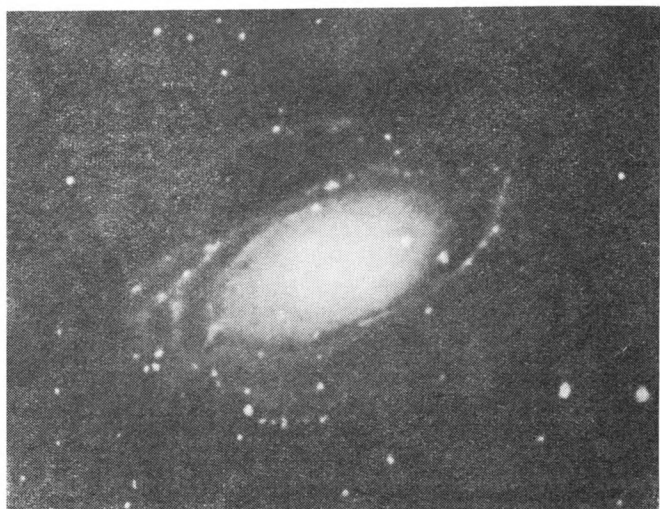
*Фото Ха. Сечение конца связки, на котором видны волокна в волоконнооптической зрительной трубке. Здесь потеря света между волокнами довольно заметная.*



*Фото Хб. Волоконнооптический зрительный прибор с изогнутой световой трубкой. Вверху вид напечатанного на машинке слова «optics», как оно видно в камере, если смотреть через окуляр в верхней части прибора.*



**Фото XI.** Большая 37-дюймовая телескопическая камера Шмидта кассегреновского телескопа в университетской обсерватории Сент-Эндрюс.



*Фото XII. Две галактики на небе, сфотографированные камерой Шмидта обсерватории Сент-Эндрюс.*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| От редактора перевода . . . . . | 5 |
| Введение . . . . .              | 7 |

### ЧАСТЬ I

#### Дилемма теории света

|  |    |
|--|----|
| Глава 1. Появление волновой теории . . . . . | 9  |
| Глава 2. Квантовая теория . . . . .          | 27 |
| Глава 3. Расширяющаяся Вселенная . . . . .   | 48 |

### ЧАСТЬ II

#### Успехи приборостроения

|   |     |
|---|-----|
| Глава 4. Новая микроскопия . . . . .                                  | 66  |
| Глава 5. Люминесценция . . . . .                                      | 87  |
| Глава 6. Оптические материалы . . . . .                               | 105 |
| Глава 7. Новая интерферометрия . . . . .                              | 124 |
| Глава 8. Электронно-оптические приборы . . . . .                      | 140 |
| Глава 9. Новые применения дифракции и интерференции . . . . .         | 155 |
| Глава 10. Волоконная оптика . . . . .                                 | 165 |
| Глава 11. Последние достижения в оптическом приборостроении . . . . . | 172 |

### ЧАСТЬ III

#### Лазер

|   |     |
|---|-----|
| Глава 12. Новая лазерная оптика . . . . . | 191 |
| Глава 13. Применение лазеров . . . . .    | 197 |
| Глава 14. Голография . . . . .            | 204 |
| Глава 15. Заключение . . . . .            | 209 |

С. ТОЛАНСКИЙ

#### РЕВОЛЮЦИЯ В ОПТИКЕ

|  |                         |
|--|-------------------------|
| Редактор Э. А. Медушевская             | Художник В. А. Медников |
| Художественный редактор В. М. Варлашин |                         |
| Технический редактор И. К. Дерга       | Корректор М. А. Смирнов |

Сдано в набор 2/IV 1971 г. Подписано к печати 18/VII 1971 г. Бумага кн. журн. 84×108 $\frac{1}{2}$ , = 3,50 бум. л., 11,76 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 10,67  
 Изд. № 27/5953. Цена 51 к. Зак. 1044.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 2  
 им. Евг. Соколовой Главполиграфпрома Комитета по печати при  
 Совете Министров СССР. Измайловский проспект, 29

***УВАЖАЕМЫЙ ТОВАРИЩ ЧИТАТЕЛЬ!***

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и др. просим присылать по адресу:

129 820, Москва, И-110, ГСП,

1-й Рижский пер., д. 2,

изд-во «Мир»

51 к.