

ДЕТГИЗ-1947





У Ч Е Н Ы Е — Ш К О Л Ь Н И К А М

Доктор физико-математических наук
Л. А. ТУМЕРМАН

С В Е Т И ЕГО ИСТОЧНИКИ

*Государственное Издательство Детской Литературы
Министерства Просвещения РСФСР
Москва 1947 Ленинград*



Scan AAW

Доктор физико-математических наук, профессор Тумерман Лев Абрамович — крупный специалист в области изучения явлений «холодного света» — люминесценции.

Работая в течение многих лет в Физическом институте Академии наук СССР, профессор Тумерман посвятил свою деятельность выяснению природы свечения органических веществ и разработке люминесцентных ламп советской конструкции.

Профессор Тумерман написал большое число научно-популярных книг и статей.

ПОЧЕМУ СВЕТЯТ РАЗЛИЧНЫЕ ЛАМПЫ

Тот далекий первобытный наш предок, который впервые догадался внести горящую смолистую ветку в свое жилище, был, несомненно, одним из величайших благодетелей человечества. Действительно, трудно представить себе, как развивалось бы человеческое общество, на каком низком уровне развития остановилась бы человеческая цивилизация, если бы с наступлением темноты мы должны были прекращать всякую деятельность.

На протяжении многих тысячелетий, отделяющих нас от первобытного человека, впервые зажегшего факел для освещения своего жилья, источники искусственного света постоянно видоизменялись и совершенствовались. На смену горящему дереву — факелу или лучине — пришли светильники, в которых горело масло, затем свечи — сальные, восковые или стеариновые, лампы с фитилями — масляные и керосиновые — и, наконец, газовые рожки. При всем разнообразии внешних форм и устройства этих источников света одна общая черта объединяет их: во всех этих осветительных приборах непосредственным источником света служит пламя. Тот или иной вид горючего материала — дерево или воск, масло или стеарин, керосин или газ — сгорает в самой лампе. При этом в пламени освобождается скрытая химическая энергия горючего вещества, которая пе-

реходит в форму тепловой энергии. Некоторая часть тепловой энергии превращается в свет. Мы можем поэтому назвать все эти источники света «пламенными»¹.

Лишь в конце прошлого века у «пламенных» ламп появился сильный и опасный соперник. В 1873 году замечательный русский электротехник-самоучка А. Н. Лодыгин демонстрировал в Петербурге изобретенную им электрическую лампочку, в которой источником света служила угольная нить, накаливавшаяся проходящим по ней электрическим током; нить была помещена в стеклянный баллон, из которого был откачан воздух. Позже эта лампа демонстрировалась на выставке в Париже, а затем попала в Америку, где вызвала к себе большой интерес. Лишенный в царской России необходимой помощи, не опирающийся на развитую промышленность, Лодыгин не мог довести изобретение до технического завершения и сделать свою лампу предметом массового производства. Техническую разработку электрической лампы и доведение ее до промышленного производства осуществил знаменитый американский изобретатель Томас Альва Эдисон (1879—1881).

С этого времени электрическая лампа начала свое триумфальное шествие по миру. Очень скоро она оттеснила на задний план все остальные источники света и в течение нескольких десятилетий завоевала весь мир. Достаточно, например, указать, что перед войной во всей Европе (без СССР) производилось свыше 1,5 миллиарда электрических ламп в год. В СССР выпуск ламп дошел почти до 200 миллионов штук в год.

Мы часто говорим, что электрическая лампа «горит». «Зажгите лампы», просим мы кого-нибудь, когда темнеет. Эти выражения не вполне точны, потому что в электрической лампе ничто не «горит». Напротив, самая суть дела заключается в том, что проходящий по нити ток не сжигает ее, а только разогревает «до белого кале-

¹ О том, что такое горение, можно прочесть в книжке академика Н. Н. Семенова «Горение и взрыв» (Детгиз, 1945). Если вы захотите более подробно познакомиться с тем, что такое пламя и каким образом оно дает свет, то прочитайте превосходную популярную книжку знаменитого физика Майкла Фарадея «История свечи». Эта книжка издавалась на русском языке несколько раз. Последнее издание выпущено Детгизом в 1946 году. (Автор.)

ния». Именно поэтому обычные электрические лампы и называются «лампами накаливания».

Между лампами пламенными и электрическими лампами накаливания есть существенное и важное принципиальное отличие в формах и способах получения той энергии, которая превращается в свет. В пламенных лампах, как мы уже отмечали, превращение скрытой химической энергии горючего в тепло, а затем в свет происходит в самом пламени лампы. К электрической лампе энергия подводится извне в форме электрического тока. Берется ли она за счет энергии топлива, сгорающего под котлами тепловой электростанции, или за счет энергии падающей воды, приводящей во вращение турбины гидроэлектростанции, — это нам в данном случае безразлично. Важно то, что у пламенных ламп освобождение энергии и переход ее в тепло происходит в самой лампе, тогда как потребляемая электрической лампой энергия производится на электростанции централизованным способом. Пользуясь удачным выражением академика С. И. Вавилова, можно сказать, что переход к электрическим лампам дал возможность строить «светоцентрали». Это различие очень существенно и послужило одной из важнейших причин быстрого распространения электрического освещения. Однако, если мы заинтересуемся вопросом о том, как эта энергия превращается в свет, то увидим, что различие между пламенными лампами и лампами накаливания не так уж велико. Действительно, почему и при каких условиях пламя может являться источником света? Почему, например, хорошо очищенный и исправный примус или спиртовка дают почти не светящее синеватое пламя, а пламя того же примуса, когда он засорен, дает довольно яркий желтоватый свет? Всякая хозяйка скажет вам, что несветящее пламя исправного примуса не пачкает дна кастрюли, светящее же пламя сильно коптит. Именно с наличием сажи, то есть не успевших сгореть частиц угля, и связана способность пламени испускать яркий свет. Если вы внесете какой-нибудь холодный предмет, например блюдце, в пламя свечи или керосиновой лампы, то на нем быстро осядет черный слой сажи. В пламени частицы сажи были раскалены до очень высокой температуры — свыше 2000 градусов. Они-то и являлись источником света пламени. Таким образом,

освобожденная при горении скрытая химическая энергия топлива превращается в пламени в тепло, за счет этого тепла частицы угля раскаляются до очень высокой температуры и становятся источником света. Но не то же ли по существу происходит и в электрической лампочке накаливания? И здесь поглощаемая лампой энергия — на этот раз электрическая — прежде всего превращается в тепло, и за счет этой энергии твердое тело — металлический волосок лампы — раскаляется до высокой температуры и становится источником света.

Общая черта, объединяющая пламенные лампы с лампами накаливания, та, что различные виды энергии — химическая в одном случае или электрическая в другом — не превращаются в них непосредственно в свет, а сначала переходят в форму тепловой энергии. Непосредственным же источником света служит то или иное твердое тело, разогреваемое теплом до очень высокой температуры. Вот почему и лампы пламенные и лампы накаливания физики называют «тепловыми» источниками света.

Достоинства и преимущества электрической лампы, обеспечившие ей быструю победу над всеми другими источниками света — ее удобство в обращении, гигиеничность и пожарная безопасность, — общеизвестны, и мы не будем на этом останавливаться.

Недаром проникновение электрического освещения в деревню по праву рассматривается у нас как одно из самых ярких и наглядных проявлений великого культурного перелома, который принесла с собой Октябрьская Социалистическая революция в нашей стране, и недаром электрическая лампочка названа у нас в связи с дорогим нам именем «лампочкой Ильича». Уже сейчас ежевечерне вспыхивают на Советской земле десятки миллионов электрических ламп, и число их с каждым годом неуклонно растет. Именно поэтому мы должны тщательнейшим образом проверить, так ли уж хороша современная электрическая лампа накаливания, нельзя ли заменить ее каким-нибудь другим, еще более совершенным источником света.

Не следует забывать, что мы расходует в электрических лампах почти пятую часть всей производимой нашими станциями электрической энергии, то есть на

освещение сжигаются сотни миллионов тонн драгоценного топлива. Поэтому вопрос о том, насколько экономно и разумно расходуется этот огромный запас энергии, имеет первостепенное значение для всего народного хозяйства СССР.

Но если с этой точки зрения мы подвергнем допросу электрическую лампочку, то результаты будут очень неутешительными.

Оказывается, что только 7—8 процентов, в редких случаях 10 процентов, электроэнергии превращается в лампе в свет. Остальные 90 процентов, конечно, не пропадают, ибо энергия исчезнуть не может, но они превращаются в другие формы энергии, бесполезные для светотехники. Если вспомнить, что мы расходуем на освещение 20 процентов всей электроэнергии, то оказывается, что из них свыше 18 процентов тратится бесполезно. Такая милая и удобная электрическая лампочка оказывается на поверку бессовестной расточительницей, хищнически истребляющей огромные количества драгоценной энергии.

Мощность излучения, оцениваемая непосредственно по ее действию на глаз, называется световым потоком и измеряется в специальных единицах — люменах. В зависимости от состава излучения оно может при одной и той же мощности, выраженной в ваттах, соответствовать различным количествам света, измеряемым числом люменов. Поэтому экономичность ламп оценивают обычно по их «светоотдаче», то есть по количеству люменов светового потока, который получается в обмен на каждый ватт расходуемой в лампе электрической энергии. Современные лампы накаливания массовых типов дают на каждый ватт расходуемой ими электроэнергии световой поток от 8 до 15 люменов. Между тем идеальный источник света, который превращал бы в белый свет всю расходуемую в нем энергию, имел бы светоотдачу примерно в 250 люменов на ватт. Таким образом, можно сказать, что современная лампа в двадцать-тридцать раз хуже того идеала, к которому мы должны стремиться.

Сначала экономичность ламп накаливания прогрессировала быстро (рис. 1). В первых лампочках Эдисона раскаливаемый током волосок был сделан из специального сорта древесного угля; такая лампочка имела све-

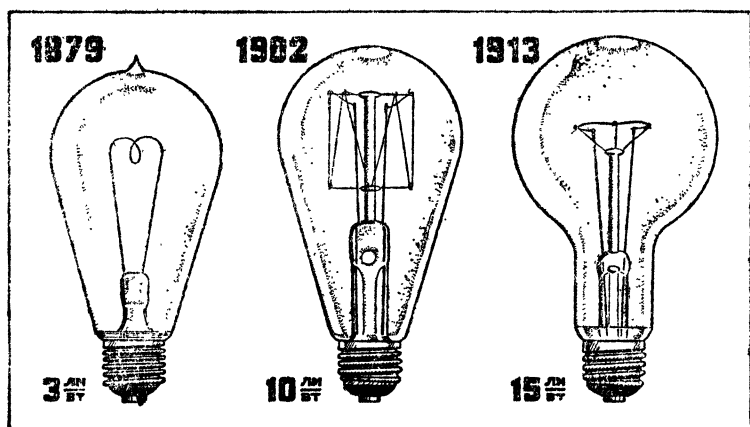


Рис. 1. Основные этапы развития электрической лампы накаливания.

тоотдачу всего лишь около 3—3,5 люмена на ватт. В начале текущего века угольная нить лампы была заменена металлической. Сначала применяли нити из осмия, затем из тантала и, наконец, вольфрамовые. Это повысило экономичность лампы примерно в три раза, до 8—10 люменов на ватт. Около 1915 года американский физико-химик Ирвинг Ленгмюр ввел дальнейшие усовершенствования: вместо прямой металлической нити он предложил свивать нить в виде тонкой спирали; он же предложил в ряде случаев не откачивать вовсе воздух из колбы лампы, а заменять его инертным газом — азотом или смесью азота с аргоном. Начиная с 1933 года изготовляют лампы с так называемой «би-спиральной» нитью, то есть нитью, два раза скрученной в спираль (рис. 2). Все эти новшества снизили расход энергии на каждый люмен светового потока еще в полтора-два раза, но на этом успехи в развитии лампочки накаливания по существу остановились. Лампы производятся миллиардами штук в год; весь процесс их изготовления почти полностью автоматизирован. Бесконечно разнообразятся формы и типы ламп, начиная от миниатюрных ламп величиной с мелкую горошину и кончая лампами-гигантами высотой почти в метр. Тысячи инженеров и физиков проверяют и исследуют каждый шаг в

изготовлении лампы, и все же основной показатель их экономичности — светоотдача — растет от года к году чрезвычайно медленно.



Рис. 2. «Биспиральная» нить современной лампы накаливания в сильно увеличенном виде.

Мы говорили уже, что электрическая лампа накаливания, подобно всем прежним пламенным лампам, — «тепловой» источник света. В ней светит твердое тело — металлическая проволока, нагретая током до очень высокой температуры. Именно это ограничивает возможности повышения экономичности существующих ламп. Чтобы выяснить это, мы должны, очевидно, познакомиться с общими физическими законами теплового излучения. Однако предварительно нам нужно уяснить себе вообще, что такое свет, какова его истинная природа¹.

ПРИРОДА СВЕТА. ЛУЧИ ВИДИМЫЕ И НЕВИДИМЫЕ

Когда мы стоим в саду или в поле под яркими лучами летнего солнца, то ощущение чего-то материального, телесного, льющегося на нас от солнца, настолько сильно, что от него трудно отрешиться. В своих воспоминаниях о Чехове Алексей Максимович Горький пишет, что раз как-то, зайдя к Чехову в сад, он увидел, что Чехов ловит шляпой солнечный луч и безуспешно пытается надеть шляпу вместе с лучом на голову. Конечно, Чехов отлично знал, что поймать шляпой солнечный луч невозможно, но ощущение материальности солнечного света было очень сильно, и он невольно поддался соблазну этой детской игры.

В нашем языке, который хранит в себе следы всего пути, пройденного народом, также отразились эти первоначальные представления о материальности света.

¹ Мы можем коснуться здесь этих вопросов лишь самым беглым образом. Для более подробного ознакомления с вопросом о природе света можно рекомендовать две превосходные книжки: С. И. Вавилов — «Глаз и солнце», Издательство Академии наук СССР, и В. Брэгг — «Мир света», Москва, 1938. (Автор.)

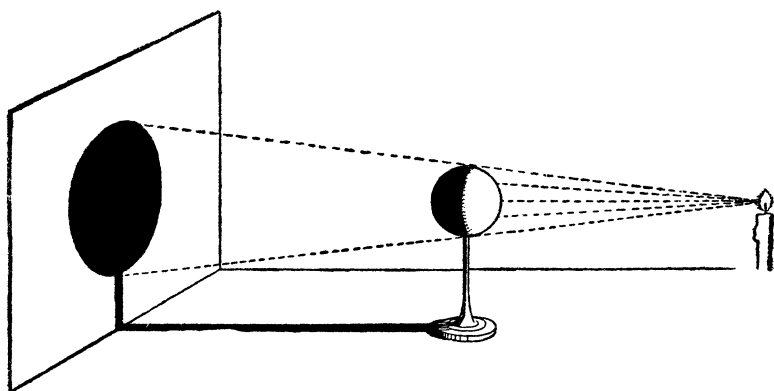


Рис. 3. Образование резких теней свидетельствует о прямолинейном распространении света.

Мы говорим до сих пор, что «свет льется», что «комната залита светом», что свет «пробивается» или «брызжет» через щели в ставне. Неудивительно поэтому, что и первоначальные научные теории о природе света, которые господствовали до начала XIX века, исходили из представления о свете как о потоке мельчайших частиц — корпускул, выбрасываемых во все стороны светящимся телом и создающих ощущение света, когда они попадают в наш глаз.

В своем первоначальном развитии наука о свете — оптика — опиралась в основном на факт прямолинейного распространения света, а также на явления отражения света и преломления его при переходе из одной прозрачной среды в другую, например из воздуха в воду или стекло. Эти явления могли быть удовлетворительно объяснены и с точки зрения корпускулярных представлений о природе света. Но уже с XVII века все чаще физики стали сталкиваться с другими, более сложными явлениями, которые не поддавались объяснению с этой точки зрения.

Мы знаем, например, что если между источником света — свечой или лампой — и белой стеной поместить непрозрачный предмет, то на стене мы увидим резкую тень его (рис. 3). Если иногда контуры тени оказываются и не вполне резкими, то мы объясняем это большими

размерами светящегося тела. Эти опыты приводят к заключению, что свет распространяется от каждой светящейся точки только по прямым линиям, и это легко понять, если считать, что световые частицы, выбрасываемые светящимся телом, всегда летят в окружающее пространство прямолинейно. Однако всегда ли и вполне ли строго соблюдается этот закон прямолинейного распространения света? Не бывает ли случаев, когда он нарушается?

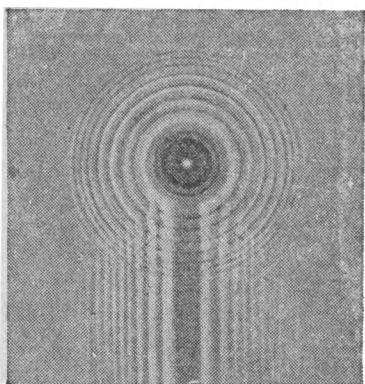


Рис. 4. Такой вид имеет тень, когда расстояния между источником света, предметом и экраном очень велики.

Оказывается, что такие случаи бывают. Попробуем, например, значительно увеличить расстояние между источником света и непрозрачным предметом, с одной стороны, и этим предметом и экраном — с другой. Вместо резкой тени мы увидим совершенно необычайное явление. На рисунке 4 для примера изображена полученная в таких условиях тень от круглого диска, укрепленного на вертикальном стержне. Граница тени, как видите, совершенно не резкая, следовательно, часть света, обогнув края препятствия, проникает в запретную область тени. Более того, в самой середине тени, куда, казалось бы, свет уж никак не может проникнуть, возникает белое пятно. С другой стороны, вне области тени, там, где, по видимому, ничто не мешает распространению света, возникает ряд черных колец, то есть мест, куда свет не попадает. Ни о каком прямолинейном распространении света здесь, очевидно, говорить не приходится. Значит, закон прямолинейного распространения света не является всеобщим законом: в одних случаях он соблюдается более или менее точно, в других — допускает значительные отклонения.

Все явления, в которых наблюдаются отклонения от прямолинейного распространения света, физики называют явлениями дифракции света.

Открытие дифракции света было первым тяжелым ударом по корпускулярной теории, с точки зрения которой объяснить эти явления очень трудно. Однако почти одновременно исследователи обратили внимание еще на одну группу явлений, объяснение которых с корпускулярной точки зрения представляет, пожалуй, еще большие трудности. Это так называемые явления интерференции света, суть которых сводится к следующему. В обычных условиях, если зажечь в комнате две лампы вместо одной, всюду станет светлее. Если произвести точные измерения, то окажется, что общее количество света, попадающего в какое-нибудь место от двух источников, равно простой арифметической сумме тех количеств света, которые посылает в это место каждый из источников в отдельности. Такое простое арифметическое сложение действия двух или нескольких источников представляется вполне понятным и легко объясняется корпускулярной теорией света. Но опять-таки является ли это арифметическое сложение всеобщим законом? Не допускает ли оно исключений? Оказывается, что можно поставить такие опыты, в которых два световых пучка, накладываясь, в одних местах взаимно ослабляют или даже полностью гасят друг друга, а в других местах дают освещенность, значительно большую, чем простая сумма освещенностей от каждого пучка в отдельности. Такого рода явления, в которых нарушается правило простого арифметического сложения действий двух пучков света, и называются явлениями интерференции световых пучков.

Не следует думать, будто явления интерференции можно наблюдать только в лаборатории, при помощи очень сложных приборов. Напротив, в жизни мы сталкиваемся с ними довольно часто, но обычно проходим мимо, не задумываясь об их глубоком смысле и значении. Всякому, например, не раз приходилось видеть радужные полосы и переливы, возникающие на стенке освещенного солнцем мыльного пузыря или на тонкой пленке масла, плавающей на поверхности лужи. Если бы мы рассматривали эти полосы не при белом свете, а при цветном, — скажем, красном или зеленом, — то увидели бы их не радужными, а черными на цветном фоне. Откуда же берутся эти цветные или черные полосы? Ведь мыльная вода или масло сами по себе бес-

цветны. Более внимательное изучение показывает, что мы имеем здесь дело именно с явлениями интерференции света. В наш глаз одновременно попадают два пучка света: один — отраженный от передней поверхности пленки, ее границы с воздухом, другой — отраженный от задней границы, ее. В зависимости от условий эти два пучка либо гасят друг друга — и тогда данное место пленки кажется нам черным, либо они усиливают друг друга — и это место кажется нам ярким. Когда мы освещаем пленку белым светом, в состав которого входят, как известно, лучи разных цветов, то в тех местах, где гасят друг друга, например, красные лучи, мы видим синие полосы, а там, где оказываются погашенными синие лучи, мы видим красные полосы, и т. д.

Интерференция и дифракция света, как и ряд других оптических явлений, показывают, что свет есть во всяком случае нечто более сложное, чем поток мельчайших частиц, движущихся по законам движения обычных тел. Корпускулярная теория света в ее простой форме не может объяснить этих явлений.

Что же представляет собой свет, если он не есть поток частиц? Как передается в таком случае действие светящихся тел в окружающее их пространство? Какие иные способы передачи действия от одного тела другому мы знаем, кроме непосредственного удара?

Представьте себе ясное утро на реке; в тихой заводи недвижно стоит у берега лодка. Но вот подул легкий ветерок, подхватил лодку, и она медленно поплыла, повинуясь его давлению. Все здесь кажется нам простым и понятным. Ветер — это поток быстро летящих частиц воздуха. Ударяясь о лодку, каждая из этих частиц толкает ее, и совокупность этих толчков создает давление, действующее на лодку.

Но вот другой случай. Вдали по реке прошел пароход, и спустя некоторое время наша лодка начинает раскачиваться. Почему? Как здесь передалось действие парохода лодке? Вы скажете, что лодка раскачивается под действием волны, поднятой пароходом. Верно. Но что такое волна? В чем отличие этого способа передачи действия от одного тела другому от прежнего — струи ветра или струи воды?

В струе воды или воздуха каждая частица движется поступательно, в направлении от источника к окружаю-

щим его телам. Энергия передается вместе с каждой летящей частицей. Напротив, в волне нет поступательного движения частиц среды. Каждая частица лишь слегка колеблется вверх и вниз или вперед и назад, но в среднем не удаляется от своего положения равновесия.

Таким образом, когда мы говорим, например, что «скорость ветра равна 10 метрам в секунду» или что «скорость волны равна 10 метрам в секунду», то мы, по существу, говорим о разных вещах. Скорость ветра — это скорость движения каждой отдельной частицы воздуха; напротив, скорость волны — это скорость передачи колебательного движения от одной точки к другой; каждая же частица может иметь при этом совсем другую скорость. Это различие очень хорошо выразил Ломоносов, который в своем «Слове о происхождении света» писал: «Если бы от струн так скоро двигался проходным движением воздух, как голос, то бы от такой музыки и горы с мест своих сдвинуты были».

Еще в XVII веке, когда только стали намечаться трудности, связанные с корпускулярной теорией света, англичанин Роберт Гук и голландец Христиан Гюйгенс высказали предположение, что свет есть не поток частиц, а волна, исходящая от светящегося тела. Однако потребовалось еще больше столетия напряженной работы, прежде чем эта волновая точка зрения одержала полную победу. Главные трудности, возникавшие перед волновой теорией света, были связаны с вопросом о том, в какой среде распространяются световые волны. Для корпускулярной теории вопрос о промежуточной среде между источником света и телом, воспринимающим его, не имеет особого значения. Световые корпускулы могут лететь и через пустоту и через те или иные «прозрачные» тела. Напротив, для волновой теории этот вопрос является важнейшим, ибо когда мы говорим: «волна», то прежде всего возникает вопрос: «А в какой среде эта волна распространяется?» Для световых волн такой средой не может быть, очевидно, какое-либо из известных нам твердых, жидких или газообразных тел. Это ясно хотя бы потому, что свет солнца и звезд доходит к нам через невообразимо большие межзвездные пространства, лишенные сколько-нибудь заметных количеств обычной материи. Поэтому те исследователи, ко-

торые поддерживали волновую точку зрения на свет, должны были предположить, что все мировое пространство заполнено особой, весьма тонкой материей, в которой распространяются волны, воспринимаемые нами как свет. Эта особая «светопроводная» материя получила название эфира.

Нежелание вводить специальное предположение о существовании «мирового эфира» заставило величайшего физика Исаака Ньютона воздержаться от решительного признания волновой теории и сделать попытки «спасти» с помощью различных предположений старые корпускулярные представления о природе света. Авторитет Ньютона был настолько велик, что в течение всего XVIII века в науке в основном еще господствовали старые взгляды, и лишь немногие ученые склонялись в пользу волновой теории света.

Победа волновой теории света в начале XIX века связана в первую очередь с работами англичанина Томаса Юнга и особенно француза Огюстена Френеля. Главное, что удалось сделать этим исследователям, заключается в том, что на основе волновых представлений о сущности света они сумели полностью объяснить сложные явления интерференции и дифракции света. Действительно, легко видеть, что эти явления заложены в самой сути процесса распространения волны и обязательно должны наблюдаться при распространении любой волны. Представим себе, например, плоский сосуд с водой, по которой ритмически, через постоянные промежутки времени, бьет молоточек. По поверхности воды от этой точки будут разбегаться во все стороны кольцевые волны. Если мы заставим два молоточка ударять по поверхности воды в одном и том же такте, то по воде будут распространяться две системы таких кольцевых волн (рис. 5).

В тех местах, где направления движения, сообщаемого частицам воды обеими волнами, противоположны, то есть в тех местах, где одна волна создает углубление как раз в тот момент, когда другая создает там возвышенность, эти волны будут друг друга гасить: там частицы воды будут в покое. Напротив, там, где в каждый момент направления колебаний в обеих волнах совпадают, то есть в тот момент, когда первая волна создает возвышенность — и вторая создает возвышенность,

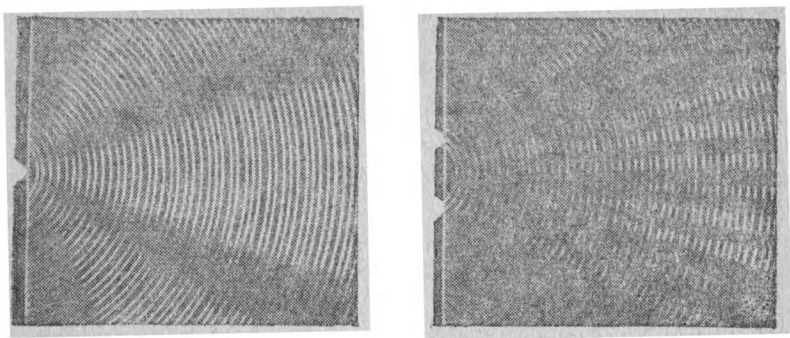


Рис. 5. Слева — кольцевая волна на поверхности воды; справа — результат наложения двух таких волн.

а когда первая создает углубление, то то же делает и вторая — в этих местах волны будут друг друга усиливать. Мы будем таким образом наблюдать интерференцию волн на поверхности воды, подобно тому как раньше мы наблюдали интерференцию световых пучков. Точно так же из рисунка 6 и подписи к нему ясно, как можно наблюдать дифракционные явления при распространении водяных волн вблизи препятствий.

После работ Юнга, Френеля и ряда других исследователей ни у кого уже не могло оставаться сомнений в правильности волновой теории света. Становилось все более и более ясным, что свет, несомненно, есть волна, но что эта волна — не механическая, то есть что свет нельзя представлять себе как процесс передачи от точки к точке простого колебательного движения частиц какой-то среды, подобной обычным газам, жидкостям или твердым телам.

Этот кризис в развитии учения о природе света совпал с общим переломом во всем научном мировоззрении, с кризисом, как говорят, механистического материализма. В своем повседневном опыте люди на протяжении многих тысячелетий чаще всего сталкивались с явлениями механического движения, то есть перемещения окружающих их тел. Эти явления были наиболее знакомы и изучены лучше других. Естественно, возникало стремление все остальные явления, в частности световые, свести к явлениям механическим. Но это

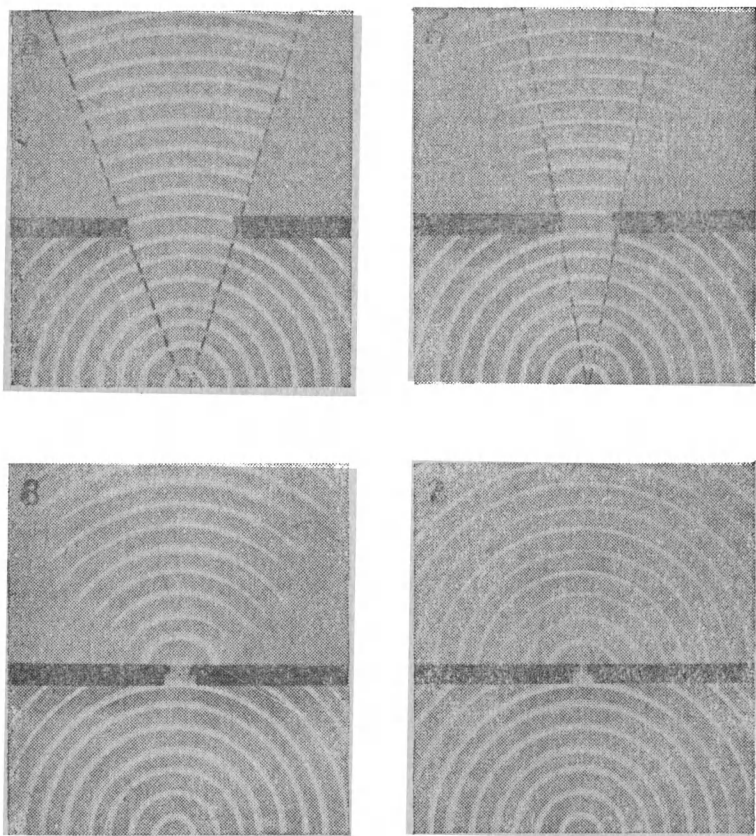


Рис. 6. Дифракция волн, распространяющихся по поверхности воды при прохождении через отверстие. На рис. *а* — отверстие велико, и волна распространяется внутри отмеченного пунктиром кснуса. На рис. *б* и *в* — размеры отверстия последовательно уменьшаются, волна начинает огибать края препятствий. На рис. *г* — отверстие очень мало, оно становится центром кольцевой волны, распространяющейся по всей поверхности.

оказалось невозможным, и не только для света, но и для ряда других явлений, прежде всего явлений электрических.

В шестидесятих годах прошлого века была признана теория английского физика Джемса Максвелла.

Максвелл показал, что когда в каком-либо месте происходит, как говорят, электрическое возмущение, то есть изменяется электрическое состояние пространства, то это изменение не ограничивается данным местом, а постепенно, с определенной скоростью передается и в окружающее пространство. Представим себе, например, провод (антенну), по которому проходит переменный ток, много раз в секунду меняющий свое направление. В пространстве вблизи этого провода электромагнитное поле также будет много раз в секунду меняться: сначала напряженность поля будет расти от нуля до некоторого наибольшего значения, затем снова спадать до нуля, менять свой знак и нарастать до наибольшего значения в обратном направлении, снова спадать до нуля и т. д. Мы можем сказать, что в данной точке происходит электромагнитное колебание. Как показал Максвелл, такое колебание, возникшее в какой-нибудь одной точке, вызывает аналогичное колебание в соседних с ней точках пространства, затем в колебание вовлекаются точки еще более удаленные. Иными словами, подобно тому как от бьющего по воде молоточка разбегается во все стороны механическая волна, то есть передается от точки к точке механическое колебательное движение частиц воды, так и от нашего провода разбегается во все стороны электромагнитная волна, то есть от точки к точке распространяется периодическое изменение электромагнитного состояния пространства. Это и есть электромагнитная волна.

Самое поразительное заключается в следующем. Максвелл сумел вычислить из данных, относящихся к электромагнитным явлениям, какова должна быть скорость распространения этих предсказанных им электромагнитных волн, и оказалось, что она совершенно точно равна скорости распространения света и составляет 300 тысяч километров в секунду. Отсюда уже легко было сделать смелый и совершенно неожиданный вывод: свет действительно есть волна, но волна не механическая, а электромагнитная.

Заслуга экспериментального получения и исследования электромагнитных волн, как и дальнейшего развития и углубления их теории, принадлежит замечательному физическому Генриху Герцу, а вслед за ним и ряду других исследователей, среди которых одно из первых

мест принадлежит нашему соотечественнику Петру Николаевичу Лебедеву. Детально исследовав эти волны, исследователи обнаружили, что они проявляют многие свойства, присущие свету. Удалось наблюдать их отражение, преломление, дифракцию, интерференцию и ряд других оптических явлений. После всех этих замечательных работ волновая теория света уже окончательно утвердилась в науке как теория электромагнитных волн. «Свет есть электромагнитная волна» — это положение стало одним из наиболее несомненных и твердо установленных фундаментов научного познания мира.

Электромагнитная теория света утверждает, что по своей природе световые волны не отличаются от тех радиоволн, с помощью которых осуществляется, например, широко вещание. Но ведь все же радиоволны мы не видим, а обнаруживаем их только с помощью наших приемников, и наоборот, световые волны действуют на наш глаз и не действуют на радиоприемники. Значит, есть все же между ними какая-то разница. В чем она?

Помимо скорости распространения, волны одной и той же природы могут отличаться друг от друга по частоте тех колебаний, передача которых от точки к точке и составляет процесс распространения волны. Звуковые волны, например, представляют собой процесс распространения в воздухе или в ином теле механических колебаний, то есть попросту колебательных движений частиц среды. Те волны, которые наше ухо воспринимает как звук, имеют частоту от нескольких десятков колебаний в секунду до примерно десяти или двадцати тысяч колебаний в секунду. Но мы можем создать в воздухе или иной среде и волны, в которых каждая частица будет колебаться с иной частотой, например с частотой в несколько сот тысяч или даже несколько миллионов колебаний в секунду. Такие, как их называют, ультразвуковые волны ощущения звука в нашем ухе не создают. Мы можем их обнаружить и исследовать лишь при помощи особых приборов.

Между электромагнитными волнами, применяемыми в радиотехнике, и световыми волнами существует такое же соотношение, как между механическими волнами звуковыми и ультразвуковыми: они отличаются по частоте передаваемых в них колебаний. В обычно применяемых радиоволнах частота составляет от нескольких

сот тысяч до нескольких десятков миллионов колебаний в секунду. С такой частотой меняется состояние электромагнитного поля в каждой точке волны. В световых волнах эта частота еще в десятки и сотни миллионов раз больше. Она выражается числами с 14 нулями после первой значащей цифры. Когда на ваш глаз действует, например, зеленый свет, то в каждой точке светового луча поле колеблется шестьсот триллионов раз в секунду.

Расстояние между двумя возвышениями или двумя углублениями волны называется длиной волны. Зная частоту колебаний в волне и скорость ее распространения, мы легко можем вычислить и длину волны, которая равна скорости распространения волны, деленной на ее частоту.

То же имеет место и в случае электромагнитных волн. Если бы в какой-нибудь момент времени мы могли объять взором все пространство, в котором распространяется волна, то на равных расстояниях друг от друга мы нашли бы точки, в которых состояние поля одно и то же. Это расстояние мы называем длиной электромагнитной волны.

Соотношения между длиной электромагнитной волны, ее частотой и скоростью распространения те же, что и для механических волн.

Пользуясь этими соотношениями и значениями частоты и скорости радиоволн, легко вычислить, что длины волн, применяемых для радиовещания, имеют значения от полутора-двух десятков метров до одной-двух тысяч метров. Для других целей, в частности для телевидения и особенно для радиолокации, применяют электромагнитные волны значительно меньшей длины — до нескольких миллиметров. Но длины тех электромагнитных волн, которые действуют на наш глаз и воспринимаются им как свет, еще во много тысяч раз меньше: они составляют от восьми до четырех сотых долей сантиметра. Производить всякого рода вычисления с такими мелкими дробями неудобно, и поэтому обычно для изменения длины световых волн принимают в качестве единицы не сантиметр, а длину гораздо меньшую — тысячную долю миллиметра. Эта единица называется «микрон». Физики часто не довольствуются и столь малой единицей длины, как микрон, а применяют

две другие единицы, которые еще в тысячу или десять тысяч раз меньше микрона. Первая из этих единиц, равная одной десятиллионной доле сантиметра, называется «миллимикрон», а вторая — еще в десять раз меньше и называется «ангстрем» (по имени известного физика и астронома Ангстрема). Мы можем, следовательно, сказать, что световые волны имеют длину от 0,8 до 0,4 микрона, или от 800 до 400 миллимикронов, или от 8000 до 4000 ангстремов.

В этих пределах все электромагнитные волны воспринимаются нашим глазом как свет. Волны различной длины или частоты воспринимаются глазом как свет различных цветов. Например, волны с длиной, большей 600 миллимикронов, создают в глазу ощущение красного цвета; волны с длиной около 500—550 миллимикронов воспринимаются как зеленый цвет; волны с длиной от 400 до 450 миллимикронов вызывают ощущение фиолетового или синего цвета. Когда на глаз действует излучение, которое можно представить в виде суммы волн с различными частотами, то возникает сложное ощущение того или иного цветового оттенка. Все великолепие оттенков вечерней или утренней зари, все бесконечное разнообразие окраски цветов и плодов, птиц и животных, — одним словом, все неисчерпаемое богатство красок мира связано с разнообразием частотного состава сложных видов электромагнитного излучения, которое исходит от этих предметов и действует на наше зрение.

Длина световых волн находится в пределах от 0,4 до 0,8 микрона. Естественно спросить себя: не существует ли в природе и других видов электромагнитного излучения, заполняющих пробел между самыми длинными видимыми волнами и самыми короткими радиоволнами? Не существует ли и излучений с длинами волн, меньшими, чем у видимого света?

Еще до того, как окончательно восторжествовала в науке электромагнитная волновая теория света, было известно, что большинство существующих источников света, помимо световых лучей, испускает еще и другие виды излучения — невидимого, то есть не создающего в глазу ощущения света, но производящего ряд других весьма замечательных действий, по которым эти излучения можно обнаружить. Если, например, мы соберем силь-

ный пучок лучей света от электрической лампы на шарике термометра, то столбик ртути в термометре сейчас же начнет ползти вверх, потому что ртуть будет поглощать падающие на нее лучи и нагреваться. Повторим теперь этот опыт, поместив перед линзой кусок черной бумаги или тонкий листок эбонита. Видимых лучей эти вещества не пропускают, шарик термометра не будет освещен, и все же ртуть в термометре будет нагреваться и ползти вверх по трубке. Значит, кроме видимых лучей, лампа испускает и другие, невидимые лучи, которые способны вызывать нагревание ртути в термометре. Эти лучи получили название инфракрасных. Более детальное их исследование показало, что по природе своей они не отличаются от световых лучей и также представляют собой электромагнитные волны, но только длины этих волн значительно больше, чем длины волн видимого света. Инфракрасные лучи соответствуют длинам волн от 0,8 микрона до нескольких десятых долей миллиметра и заполняют пробел между областью радиоволн и световых волн.

В излучении лампы есть невидимые лучи и другого рода — так называемые ультрафиолетовые. Правда, лучей этих в излучении лампы накаливания немного, и чувствительности нашего термометра уже нехватит на то, чтобы их обнаружить, но это можно сделать с помощью других, более чувствительных приборов. Ультрафиолетовые лучи обладают рядом весьма интересных и важных свойств. Например, многие вещества под их действием сами начинают светиться ярким, видимым светом. В других веществах эти лучи вызывают сложные химические реакции, в частности ультрафиолетовые лучи очень сильно действуют на фотографическую пластинку. Интересна и способность ультрафиолетовых лучей действовать на живые ткани и организмы. Ультрафиолетовые лучи — это тоже электромагнитные волны, но с длиной волны, меньшей, чем у световых. Их длины волн имеют значения от 0,4 до сотой доли микрона.

Позже были открыты и другие виды электромагнитного излучения, с длинами волн еще меньшими и свойствами еще более поразительными. Таковы рентгеновские лучи, обладающие способностью проникать через многие непрозрачные тела, в частности через ткани че-

ловеческого тела, и гамма-лучи, испускаемые радиом и обладающие еще большей проникающей способностью.

В мире есть множество видов излучения, различных по своим действиям и внешним проявлениям. Но все они — от радиоволн до рентгеновских и гамма-лучей — имеют одну и ту же природу, и только различие в частоте колебаний обуславливает все различия в их свойствах и действиях. Световые волны — это только очень узкий, очень маленький участок всей огромной области электромагнитных волн. Но для нас это участок необычайно важный, ибо только эти волны воспринимаются нашим зрением и дают нам возможность видеть окружающий мир.

БАЛАНС ЭНЕРГИИ В ЛАМПЕ НАКАЛИВАНИЯ И ЗАКОНЫ «ТЕПЛОВОГО» ИЗЛУЧЕНИЯ

Теперь, вооружившись сведениями о природе света и других невидимых излучений, мы можем снова вернуться к нашей электрической лампочке и разобраться в том, почему так низок ее коэффициент полезного действия и почему так трудно его повысить. Мы убедились в том, что, кроме видимых лучей, лампа накаливания испускает лучи инфракрасные и ультрафиолетовые. Это невидимое и потому светотехнически бесполезное излучение уносит с собой определенный запас энергии; на создание этого излучения должна, следовательно, тратиться часть электрической энергии, которую потребляет наша лампа. Эта часть — потеря энергии на невидимое излучение. Кроме того, нагретая нить лампы неизбежно должна отдавать часть энергии в виде тепла, непосредственно отводимого через газ, наполняющий колбу лампы, и через провода, по которым к нити подводится ток. Эта часть энергии есть так называемая «тепловая потеря» лампы. Итак, затрачиваемая нами в лампе электрическая энергия расходуется тремя путями: часть ее отводится в окружающее пространство в виде тепла, через теплопроводную среду, другая превращается в невидимое инфракрасное и ультрафиолетовое излучение и, наконец, третья часть превращается в свет. Каково соотношение между этими тремя частями?

фрамовой позволила так сильно повысить экономичность этой лампы только потому, что вольфрамовую нить мы накаливаем до более высокой температуры, чем угольную. Действительно, угольная нить в лампе Эдисона накаливалась только до температуры около 2000 градусов, и выше накаливать ее нельзя было, потому что она быстро испарялась и перегорала. Вольфрамовая же проволока в современных лампах выдерживает температуру в 2500—2700 градусов.

Повышение температуры отражается на излучении твердого тела двояким образом. Прежде всего, по мере возрастания температуры возрастает общая энергия, излучаемая телом с каждой единицы его поверхности. Этот рост идет очень круто: общая излучаемая энергия растет пропорционально четвертой степени абсолютной температуры¹ тела, так что, например, при повышении температуры от 1500 до 3300 градусов интенсивность излучения возрастает больше чем в шестнадцать раз.

Но это не все. По мере повышения температуры изменяются и состав теплового излучения, его распределение по различным частотам или длинам волн. Поднесите к щеке нагретый утюг, и вы ясно ощутите, что от утюга «пышет жаром».

Но видимого света утюг не испускает, температура слишком низка. Все излучение утюга состоит только из лучей инфракрасных. Лишь тогда, когда тело нагрето примерно до 800 градусов, оно начинает светиться красным светом. Кроме инфракрасных лучей, в излучении появляются в заметных количествах и красные лучи, самые длинноволновые из видимых. По мере дальнейшего повышения температуры в излучении будут появляться и лучи оранжевые, желтые, зеленые, синие, фиолетовые и даже ультрафиолетовые. Цвет светящегося тела из красного станет желтоватым и затем — при температуре около 2500 градусов — белым. Таким образом, по мере повышения температуры не только возрастает общая интенсивность излучения, но в нем увеличивается

Абсолютной температурой называется температура, отсчитываемая не от температуры замерзания воды (0 градусов Цельсия), а от температуры, на 273,2 градуса более низкой. Таким образом, 1500 градусов соответствуют температуре в 1773,2 градуса абсолютных, а 3300 градусов Цельсия — это 3573,2 градуса абсолютных, и т. д.

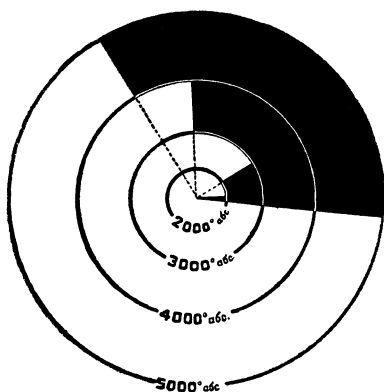


Рис. 8. Площади кружков соответствуют общему количеству энергии, излучаемой с единицы поверхности черного тела при разных значениях температуры, указанных на рисунке. Заштрихованная часть каждого круга изображает долю видимых лучей в составе излучения при соответствующей температуре.

доля видимого света. Это ясно видно из рисунка 8, на котором заштрихованные секторы изображают долю видимого света, а площадь всего круга — суммарное излучение при указанных на рисунке значениях температуры.

При каждом значении температуры тела лучи некоторой определенной длины волны представлены в составе излучения наиболее сильно, а в обе стороны от этой длины волны интенсивность излучения убывает. Как это можно видеть из кривых на рисунке 9, по мере повышения температуры та длина волны, которой соответствует максимальная интенсивность излу-

чения, постепенно перемещается в сторону коротких волн. Так например, при абсолютной температуре излучателя в 2000 градусов максимальную интенсивность будут иметь лучи инфракрасные с длиной волны 1,44 микрона; при 4000 градусов место максимума перейдет в область красных лучей с длиной волны 0,72 микрона; при 5000 градусов максимальную интенсивность будут иметь желто-зеленые лучи с длиной волны 0,57 микрона, и так далее: центр тяжести излучения постепенно будет перемещаться в сторону синих, фиолетовых и ультрафиолетовых лучей. Именно поэтому доля видимого света в таком излучении сначала возрастает за счет уменьшения доли лучей инфракрасных, а затем начинает спадать из-за увеличения доли ультрафиолетовых лучей, которые тоже невидимы, то есть светотехнически бесполезны. Так например, при 2000 градусов на долю видимых лучей приходится всего лишь около 2 процентов энергии излучения; при 3000 градусов эта доля возрастает

примерно до 10 процентов и при 4000 градусов — до 27 процентов. При 6500 градусов она достигает максимального возможного значения, превышающего 40 процентов, а затем снова начинает уменьшаться: при температуре в 10 000 градусов доля видимого излучения была бы равна 35 процентам всей энергии излучения. Мы видим, что наличие огромного бесполезного «привеска» невидимых лучей в составе теплового излучения является совершенно неизбежным.

Вольфрам, применяемый в современных лампах, является одним из наиболее тугоплавких и трудноиспаряемых тел, какие нам известны, но и он выдерживает длительное нагревание лишь до температуры в 2500—2700 градусов. Даже при этой температуре срок жизни лампы ограничен примерно одной тысячей часов горения, в течение которых нить лампы постепенно распыляется и наконец обрывается. Между тем, чтобы увеличить светоотдачу лампы в полтора-два раза против существующей, необходимо было бы повысить температуру нити до 4—5 тысяч градусов, что практически совершенно невозможно, ибо уже при повышении температуры вольфрама до 3000 градусов срок жизни лампы измерялся бы несколькими часами или даже минутами, а при температуре около 4000 градусов плавятся все известные нам тела.

Мы видим, таким образом, что возможности тепловых источников света практически почти исчерпаны и дальнейший прогресс их чрезвычайно затруднен.

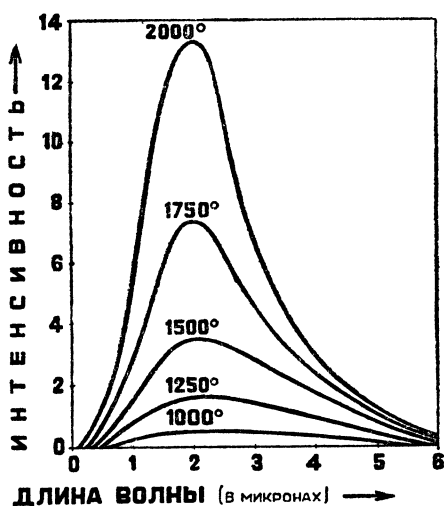


Рис. 9. Распределение энергии излучения черного тела по длинам волн при разных значениях температуры тела.

Но если неумолимые законы природы, управляющие «тепловым излучением», не дают возможности существенно улучшить экономичность тепловых источников света, в частности ламп накаливания, то это вовсе не означает, что мы должны отказаться от борьбы за создание более совершенных источников света. Это означает лишь, что мы должны использовать иные, не тепловые источники света, над которыми эти законы не властны.

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ, ИЛИ «ХОЛОДНЫЙ СВЕТ»

Каждый может вспомнить, что в жизни он не раз встречался с явлениями «холодного света». Тем, кому случалось провести лето в деревне, я напомним о светлячках, на теле которых «горит» в летние ночи довольно яркий зеленый фонарик. Как маленькие летающие огоньки, порхают эти насекомые темной летней ночью в густой листве кустов. Попробуйте поймать одного из этих светляков. Не бойтесь, вы не обожжете пальцы. Рассмотрев это насекомое внимательно, вы увидите на его спинке небольшое пятнышко, которое испускает ровный зеленый свет, хотя температура его и не выше температуры окружающей среды. Таким же свойством светиться обладают и многие другие живые организмы: бактерии, насекомые, рыбы. На рисунке 10 изображены, например, живущие на большой глубине рыбы, на теле которых ярко горят два «фонаря», расположенные под их глазами. Эти «фонари» — колонии светящихся бактерий, живущих на рыбе и освещающих ей путь.

Излучение света есть непрерывная отдача энергии в окружающую среду. Откуда-то, очевидно, эта энергия должна черпаться. Раз светляк испускает свет, то, значит, какие-то процессы, происходящие в его организме, непрерывно доставляют необходимую для этого энергию. Действительно, удалось установить, что в светящихся органах светляка (и других, сходных с ним организмов) имеется особое вещество — люциферин, которое в присутствии другого вещества — люциферазы — окисляется кислородом воздуха, причем часть энергии, освобождающейся при этой химической реакции, непосредственно превращается в свет, минуя предварительное превращение в тепловую форму.

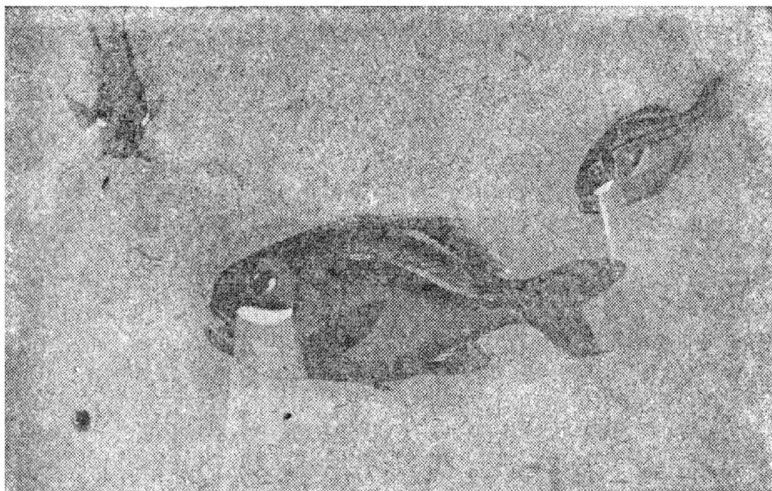


Рис. 10. Глубоководная рыба со светящимися органами — «фонарями» — под каждым глазом.

Такого рода явления «холодного света», в которых какая-либо форма энергии переходит в свет или невидимое излучение, без повышения температуры светящегося тела, получили у физиков название явлений люминесценции. В тех примерах, о которых мы говорили, в свет непосредственно превращается химическая энергия, и потому эти явления относятся, как говорят, к числу явлений хемилюминесценции. Существуют и другие явления люминесценции, в которых источником энергии служит не химическая энергия, а иные формы ее. Явления хемилюминесценции очень интересны и во многих своих деталях еще загадочны. Но пока практического применения для нужд светотехники эти явления не получили. Гораздо важнее для нас два других вида «холодного света» — так называемая фотолюминесценция и свечение паров и газов при прохождении через них электрического тока.

Фотолюминесценцией называется свечение разных тел, возникающее при освещении их другими — видимыми или ультрафиолетовыми — лучами. Веществ, обладающих такими свойствами, существует довольно много. К ним относятся, например, растворы очень мно-

гих органических красок, а также такие жидкости, как керосин, одеколон и особенно хвойный экстракт для ванн, продающийся в аптеках. Если вы внимательно присмотритесь к краю поверхности такой жидкости, налитой в сосуд и ярко освещенной солнцем, то вы ясно увидите, что керосин отливает синеватым светом, одеколон — синевато-зеленым, а хвойный экстракт и в бутылке ярко переливается живым зеленым светом. Все это явления фотолюминесценции. Что происходит в этих жидкостях и подобных им веществах? Падающий на тело свет частично этим телом поглощается. В веществах нелюминесцирующих поглощенная энергия превращается, как правило, в тепло и нагревает тело. Это означает, что поглощенная энергия распределяется между всеми частицами тела и заставляет их сильнее колебаться. В люминесцирующих веществах часть этой энергии, поглощенной определенной частицей вещества, снова излучается в окружающее пространство в виде электромагнитной волны, но в большинстве случаев в виде волны с иной, большей длиной, чем у той волны, которая была поглощена. Если, например, осветить раствор краски, которая называется флуоресцеином, невидимыми ультрафиолетовыми лучами, то она будет светиться ярким зеленым светом. Если раствор другой краски — родамина — осветить синим или зеленым светом, то жидкость будет светиться оранжево-красным светом. Но никогда не бывает так, чтобы при освещении красным светом тело испускало синие или ультрафиолетовые лучи или чтобы вообще происходило превращение излучения малой частоты в излучение большей частоты. Это правило было установлено физиком Стоксом и называется поэтому «правилом Стокса». Оно представляет собой основной и самый общий закон для всех явлений фотолюминесценции.

Способностью люминесцировать — чаще всего под действием ультрафиолетовых лучей — обладает очень большое число веществ, преимущественно органических. При этом часто достаточно присутствия ничтожных количеств люминесцирующего вещества, для того чтобы можно было наблюдать его свечение. Например, характерное зеленое свечение упомянутой выше краски — флуоресцеина — можно наблюдать, даже если в растворе эта краска составляет по весу только одну мил-

лиардную долю (например, если 1 грамм краски растворен в 1 тысяче тонн воды). Поэтому часто по свечению можно установить наличие в веществе ничтожного количества посторонних примесей.

Для светотехники, однако, важны не растворы органических веществ, а другая группа тел, обладающих способностью светиться под действием ультрафиолетовых лучей. Это — неорганические твердые тела, получившие благодаря своей способности светиться наименование фосфоров или, точнее, кристаллофосфоров. Все они представляют собой кристаллические порошки сравнительно простого состава, как, например, сернистый цинк, силикат цинка или вольфрамат магния, в которые введены в ничтожном количестве атомы тяжелых металлов — меди, марганца или серебра.

Если такой порошок осветить ультрафиолетовыми, а иногда и просто синими лучами, то он сам начнет светиться ярким видимым светом — синим, зеленым, оранжевым, красным, — в зависимости от состава порошка и способа его приготовления. Поглотив излучение одной частоты, фосфор сам излучает волну другой частоты. Но механизм этого преобразования, сущность процессов, в результате которых происходит излучение света, а также и свойства самого свечения фосфоров и растворов органических веществ существенно различны.

Не вдаваясь в подробности, укажем только, что свечение органических веществ есть свойство каждой отдельной частицы (молекулы) этих веществ. Весь процесс поглощения и обратного излучения света другой частоты происходит в основном внутри отдельной молекулы. Напротив, в случае применения кристаллофосфоров в процессе свечения участвует большое число правильно расположенных атомов порошка. Свечение и его свойства теснейшим образом связаны с кристаллическим строением светящегося тела. Наиболее резко проявляется это различие механизмов свечения в совершенно разном поведении фосфоров и растворов после прекращения возбуждения.

Если мы прекратим освещение раствора ультрафиолетовыми лучами, то возбуждаемое ими видимое свечение исчезнет практически в тот же момент; точнее говоря, оно затухнет в течение чрезвычайно короткого времени — нескольких миллиардных долей секунды. Та-

кое свечение, мгновенно исчезающее при прекращении действия вызвавшей его причины, называется флуоресценцией.

Совершенно иную картину дают фосфоры. Если мы достаточно сильно осветим многие из них ультрафиолетовыми лучами или даже обычной лампой, а затем выключим возбуждающий свет, то порошок будет еще светиться после этого очень долго, иногда в течение многих часов. На протяжении этого времени яркость свечения будет постепенно спадать, но многие фосфоры можно совершенно ясно видеть в полной темноте даже спустя 10—12 часов после того, как на них перестал действовать возбуждающий свет. Такого рода свечение продолжающееся и после прекращения действия возбуждающего излучения, называется фосфоресценцией; отсюда и происходит название «фосфоры» или «кристаллофосфоры», которым обозначают тела, обладающие такой способностью.

От состава и способа приготовления фосфора зависит не только цвет свечения и длительность его, но и то, какими лучами данный фосфор возбуждается. Например, сернистый цинк возбуждается и видимым светом — синими лучами — и длинноволновыми ультрафиолетовыми лучами с длиной волны примерно 0,35 миллимикрона, а силикат цинка или вольфрамат магния возбуждается лучше всего коротковолновыми ультрафиолетовыми лучами с длиной волны около 0,25 миллимикрона. Таким образом, для каждого источника возбуждающего излучения мы можем подобрать такой фосфор, который этим источником лучше всего возбуждается.

Многие фосфоры обладают способностью светиться не только под действием видимых или ультрафиолетовых лучей, но и под действием других факторов. Вы видели, вероятно, светящиеся в полной темноте стрелки часов, компасов и других приборов. Они покрыты специальным «светосоставом», представляющим собой в основном фосфоресцирующий сернистый цинк, смешанный с ничтожным количеством радиоактивных солей, излучение которых возбуждает довольно яркое свечение сернистого цинка. Такими светящимися красками покрывают шкалы и циферблаты многих авиационных и артиллерийских приборов. Эти краски значительно

облегчают работу летчика в условиях ночного полета и, кроме того, гарантируют ему возможность видеть приборы и в том случае, если пуля или случайное повреждение выведет из строя систему электрического освещения на самолете. Другие фосфоры обладают способностью светиться под действием рентгеновских лучей или под ударами катодных лучей — пучков быстро летящих электронов. Они нашли себе очень широкое применение в самых разнообразных областях науки и техники, в частности в радиолокации и телевидении.

Фосфор может излучать видимый свет даже и при комнатной температуре, тогда как тепловое излучение черного тела при такой температуре совершенно не содержит видимых лучей. В этом заключается самое существенное и самое важное отличие люминесценции от теплового излучения. Во всех случаях, где вещество испускает в какой бы то ни было длине волны больше энергии, чем может излучать в этой длине волны тело совершенно черное и имеющее ту же температуру, мы имеем дело с явлениями люминесценции.

Не действуют для люминесцирующих тел и те законы распределения излучения по разным длинам волн, о которых мы говорили выше. В частности, вовсе необязательно, чтобы в этом излучении, кроме видимых волн, были также лучи инфракрасные или ультрафиолетовые. Кривые на рисунке 11 показывают, как распределена энергия излучения некоторых технически наиболее важных фосфоров. В этом излучении содержатся только видимые лучи. В определенной длине волны — например, в длине волны около 480 миллимикрон для вольфрамата магния — интенсивность наибольшая; для других длин волн она меньше, и этим определяется цвет излучения. Но в излучении содержатся лишь видимые лучи. Мы не обязаны получать вместе с видимым светом огромный, совершенно ненужный «привесок» невидимых инфракрасных или ультрафиолетовых лучей. Но по правилу Стокса мы можем только превращать излучение с малой длиной волны в излучение с большей длиной волны, а не наоборот. Это ограничение снижает возможную экономичность люминесцентных источников света, но все же оно гораздо мягче, чем те ограничения, которые накладывают законы теплового излучения. Именно поэтому новая светотехника в поисках более совершенных

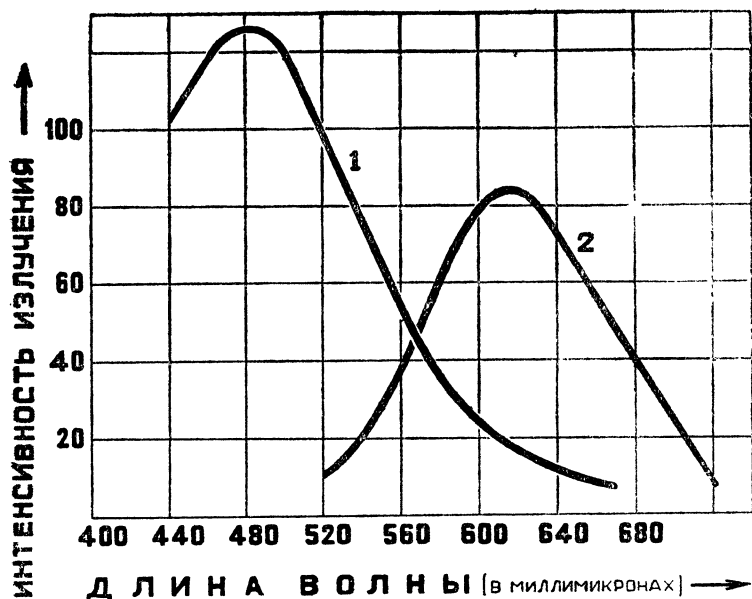


Рис. 11. Распределение энергии, излучаемой некоторыми фосфорами, по длинам волн:
1 — вольфрамат магния, 2 — цинк — бериллий — силикат.

источников света, чем существующие, идет все увереннее по пути отказа от тепловых источников света и замены их источниками люминесцентными. Мы увидим ниже, какие замечательные новые лампы уже удалось создать на этом пути. Но, прежде чем мы перейдем к ним, нам нужно познакомиться несколько подробнее с еще одним, очень интересным и своеобразным явлением люминесценции — свечением различных паров и газов при прохождении через них электрического тока¹.

¹ Для более подробного ознакомления с явлениями люминесценции и их практическим применением можно рекомендовать брошюру профессора В. Л. Левшина «Холодный свет», выпущенную Издательством Академии наук в 1938 году в Москве, а также брошюру С. И. Вавилова, вышедшую под тем же названием и в том же издательстве в 1942 году в Казани.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ГАЗАХ И ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЛАМПЫ

Все москвичи и люди, побывавшие в Москве, видели над входами в станции московского метрополитена большую букву «М» из стеклянных трубок, которые с наступлением вечера наливаются ровным красным светом. Из таких же светящихся трубок изготавливаются всевозможные вывески и рекламы, которые можно видеть в разных городах нашего Союза над кинематографами, магазинами, клубами. Если вам случится днем подойти поближе к такой трубке и рассмотреть ее, то вас поразит, вероятно, то, что по внешнему виду это — «пустая» трубка из обычного прозрачного стекла. В ней нет никаких проволок или нитей, как в обычных электрических лампах, и сразу трудно даже понять, что там, собственно, светится. Трубка, конечно, не совсем «пустая», в ней находится небольшое количество газа — неона или аргона, а в каждом из концов ее имеется по электроду — металлическому цилиндру или диску, к которому подводится электрический ток через проволоку, впаянную в стекло и соединенную с электродом. Когда мы включаем такую трубку в сеть, то ток от одного электрода проходит к другому через газ, заполняющий трубку, и при этом весь объем газа светится красным светом, если трубка наполнена неоном, и синим светом, если в ней находится аргон. Такую светящуюся трубку можно взять в руку совершенно безбоязненно — она лишь чуть теплее человеческого тела. Это сразу показывает нам, что свечение, которое мы наблюдаем здесь, есть один из видов люминесценции, ибо при столь низкой температуре никакой тепловой излучатель не может давать видимого света.

Электрический ток — это всегда процесс движения электрически заряженных частиц. Для того чтобы ток мог проходить через какое-нибудь тело, необходимо наличие в этом теле таких частиц и возможности движения их сквозь тело. Эти общие положения относятся ко всем без исключения случаям прохождения тока через любые тела — твердые, жидкие или газообразные. Но природа этих заряженных частиц, способы создания их и условия их движения в разных телах различны, и этим определяется различие в механизме и законах

электропроводности разных тел. В растворах так называемых электролитов — различных кислот, щелочей, солей — носителями электрического заряда служат ионы, то есть заряженные положительно или отрицательно атомы (или группы атомов), на которые распадается в растворе молекула растворенного вещества. Под влиянием сил электрического поля отрицательные ионы перемещаются от отрицательного электрода — так называемого катода — к положительному электроду — аноду, а положительные ионы двигаются в обратном направлении. Это движение ионов и представляет собой сущность процесса прохождения электрического тока через раствор электролита.

Иначе осуществляется прохождение тока через металл. Здесь нет заряженных подвижных частиц вещества — ионов, но в результате взаимодействия между атомами металла часть электронов, входящих в их состав, оказывается свободной и может перемещаться под действием сил электрического поля. Таким образом, в отличие от ионной проводимости растворов электролитов, проводимость металлов является электронной. Движущимися заряженными частицами в них являются электроны.

Прохождение электричества через газы представляет собой явление очень сложное. Правильнее было бы даже сказать, что в зависимости от условий мы имеем при этом дело с целой совокупностью довольно разнообразных явлений. Носителями заряда при этом могут служить и электроны и ионы, но прежде всего нужно, чтобы эти заряженные частицы в газе были каким-то образом созданы. В растворах электролитов заряженные ионы возникают при растворении вещества: молекула его в растворе распадается на заряженные части. В металлах свободные электроны тоже существуют независимо от наличия или присутствия электрического поля: они освобождаются вследствие взаимодействия атомов вещества. Откуда же берутся свободные электроны и ионы в газе? Ведь обычно в нормальных условиях атомы и молекулы газов представляют собой нейтральные, незаряженные частицы, и в соответствии с этим газы являются изоляторами, то есть веществами, через которые электрический ток не проходит. Для того чтобы сделать газ проводящим, как это имеет место в

наших рекламных трубках, нужно прежде всего создать в нем носители тока — заряженные частицы. Если, например, подвергать газ воздействию коротковолнового ультрафиолетового излучения или радиоактивного излучения, то некоторые молекулы газа ионизируются, от них отщепляется электрон, а остаток молекулы оказывается заряженным положительно. Если число таких положительных ионов и электронов достаточно велико, то, перемещаясь под воздействием электрических сил, они могут осуществить прохождение через газ довольно значительного тока. Так как при этом заряженные частицы создаются в газе действием внешнего фактора, то такие случаи прохождения тока через газы называются случаями несамостоятельной проводимости. Наряду с такой несамостоятельной проводимостью часто наблюдается и проводимость газов, при которой частицы в газе создаются не внешним фактором, а самим электрическим полем. Раз возникнув, разряд в этих случаях идет дальше без воздействия внешних факторов. В этих случаях говорят о самостоятельной проводимости газа. Обычно самостоятельная проводимость наблюдается в газах разреженных и при довольно большом напряжении между электродами (несколько сот или несколько тысяч вольт). В разреженном газе расстояние, которое пробегает каждая движущаяся частица, прежде чем она ударится о другую частицу, довольно велико. Поэтому электроны или ионы, небольшое количество которых всегда имеется в газе, двигаясь под влиянием сил электрического поля, успевают на протяжении такого свободного пробега достигнуть достаточной скорости и приобрести достаточную кинетическую энергию, для того чтобы при ударе о нейтральную частицу ионизовать ее, то есть вышибить из нее электрон. Возникшие таким образом две заряженные частицы тоже будут двигаться под влиянием сил поля и при соударениях с частицами газа, в свою очередь, будут их ионизовать. Число заряженных частиц будет, следовательно, нарастать подобно лавине. Оно нарастало бы неограниченно, если бы в газе не существовало и обратных процессов — соединения электрона с ионом в одну незаряженную частицу. Этот процесс ограничивает количество электронов и ионов в газе, но, во всяком случае, число их может при надлежащих условиях оказаться достаточно большим, для того чтобы через

газ проходил довольно сильный ток, то есть чтобы газ обладал хорошей проводимостью.

Мы знаем, что и жидкие тела (растворы электролитов) и металлы обладают определенным электрическим сопротивлением и что при прохождении по ним тока в проводнике выделяется тепло, количество которого пропорционально этому сопротивлению. Энергия переходит из формы электрической в форму тепловую, и механизм этого явления нужно представлять себе так: движущиеся в жидкости или в твердом теле заряженные частицы испытывают как бы своего рода трение; это означает, что при столкновениях с частицами тела они передают им часть своей кинетической энергии. Таким образом, увеличивается запас внутренней тепловой энергии тела, и температура его повышается. Нечто аналогичное имеет место и в газах. И здесь часть энергии тока превращается при соударениях между заряженными и незаряженными частицами в кинетическую энергию движения и нагревает газ. Но возможны здесь случаи и другого рода: сталкиваясь с частицей газа, электрон может передать ей кинетическую энергию своего движения и перевести частицу в так называемое возбужденное состояние, в котором запас энергии больше, чем в нормальном состоянии. По истечении короткого времени — нескольких миллиардных долей секунды — частица снова возвращается в нормальное состояние, а избыток энергии отдает в окружающее пространство в виде излучения той или иной частоты. Таким образом, здесь энергия движения электрона переходит в энергию излучения непосредственно, не переходя в тепловую форму. Процесс этот весьма сходен с тем, что мы имели в случае фотолюминесценции, но там атом или молекула флуоресцирующего вещества переходили из нормального состояния в возбужденное в результате поглощения определенной порции энергии внешнего излучения; здесь же этот переход происходит за счет энергии движущегося электрона, ударяющегося о данную частицу газа.

Мы видим, таким образом, что при прохождении электрического тока через пары и газы эти тела могут становиться источниками света. Трубка, в которой происходит электрический разряд, сопровождающийся более или менее сильным испусканием света, является

газоразрядной лампой. Неоновые и аргоновые трубки световых реклам и являются представителями этого нового и очень важного типа источников света.

Неоновые и аргоновые газоразрядные трубки дают сравнительно мало света. Они не могут применяться в качестве источников света для искусственного освещения, так как дают свет резко выраженной окраски: красный — в случае применения неона, и синий — при наполнении трубок аргоном. Между тем человеческое зрение на протяжении многих тысячелетий приспособилось к белому свету, даваемому солнцем, и цветное освещение, как бы сильно оно ни было, нас удовлетворить не может. Окрашенность света, даваемого всеми известными нам газоразрядными лампами, является, как мы увидим ниже, главным препятствием для широкого применения этих ламп. Почему же газоразрядные лампы дают свет не белый, а цветной?

Солнце является огромным раскаленным телом, наружные слои которого имеют температуру около 6000 градусов. В состав излучения такого тела входят, как мы знаем, лучи и инфракрасные, и видимые, и ультрафиолетовые. Если мы ограничимся только видимой частью этого излучения, то убедимся, что в состав солнечного излучения входят все видимые лучи — от фиолетовых до красных, причем интенсивность излучения постепенно возрастает от фиолетовых лучей к красным (рис. 9). Свет такого состава или близкого к нему мы и воспринимаем как белый свет. Тепловые источники искусственного освещения также содержат в своем излучении все длины волн видимой области, но с несколько иным распределением. Так как температура их ниже, то они содержат относительно большую долю красных и оранжевых лучей и относительно меньшую долю лучей синих и фиолетовых. Такой свет тоже воспринимается нами в общем как белый, но с несколько желтоватым оттенком.

Сложный состав белого света был установлен еще Ньютоном с помощью опыта, изображенного на рисунке 12. Если пучок света сложного состава пропустить через стеклянную призму, то лучи разных длин волн отклонятся в этой призме по-разному и выйдут в разных направлениях. На белом куске бумаги или белой стене позади призмы мы увидим пестро окрашенную полосу,

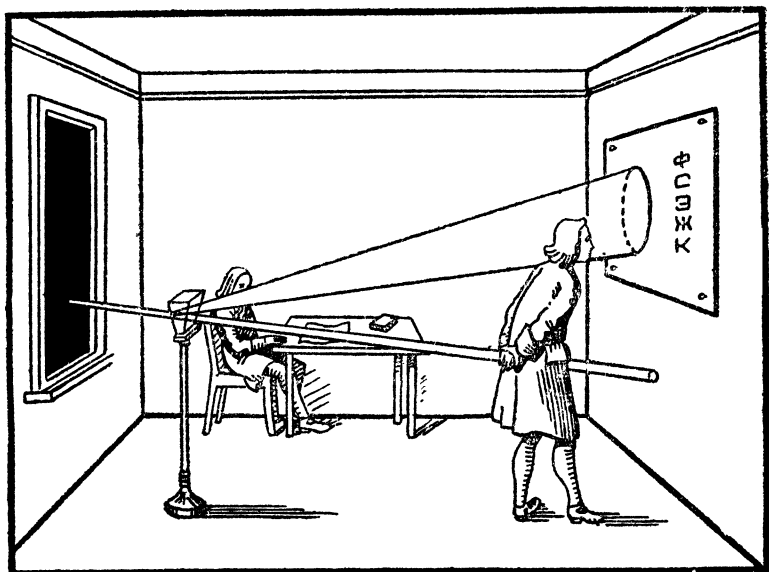


Рис. 12. Опыты Ньютона по разложению солнечного света в спектр с помощью призмы.

называемую спектром. Если источником света было солнце или иной тепловой излучатель, то в этой полоске будут представлены все длины волн, непрерывно переходящие одна в другую. Накаленные твердые тела имеют непрерывный спектр излучения. По обе стороны от видимого спектра находятся места, куда попадают инфракрасные и ультрафиолетовые лучи, также имеющиеся в составе теплового излучения.

Сравнивая спектры солнца и раскаленного твердого тела, вы можете заметить, что спектр солнца пересечен черными линиями, то есть в нем отсутствуют определенные длины волн. Это обусловлено поглощением света в наружных, более холодных слоях солнечной атмосферы.

Если бы в качестве источника света мы взяли флуоресцирующее тело или какой-нибудь из обычных фосфоров, то инфракрасные и ультрафиолетовые лучи в составе этого излучения отсутствовали бы, но видимый



Рис. 13. Спектры некоторых источников света.

спектр в подавляющем большинстве случаев также представлял бы собой непрерывную полосу, охватывающую более или менее значительную часть видимой области. Правда, распределение энергии в этом спектре значительно отличается от распределения энергии в спектре тепловых излучателей, и поэтому свет, исходящий от люминесцирующих веществ, также кажется нам окрашенным — синим, зеленым, оранжевым, но так как каждое люминесцирующее тело имеет свою довольно широкую полосу в спектре, то нетрудно так составить смесь из двух-трех люминесцирующих веществ, чтобы излучение, исходящее от такой смеси, имело спектральный состав, близкий к составу излучения обычных тепловых источников, и производило на наш глаз впечатление белого света.

Совершенно иную картину мы получим, пропустив через призму свет какой-нибудь газоразрядной лампы, например неоновой или аргоновой. В спектре мы увидим только ряд отдельных линий, как это показано на рисунке 13. Говорят, что излучение, исходящее от газов или паров при прохождении через них электрического тока, обладает линейчатым спектром. Это означает, что в состав этого излучения входят не все частоты или длины волн в некоторой более или менее широкой области спектра, а только отдельные, определенные. Строго говоря, это не вполне верно. Каждая линия, которую мы видим в спектре газа, — это не линия в математическом смысле слова, а полоска, но только очень узкая. Излучения совершенно определенной частоты в природе нет и быть не может, но все длины волн, соответствующие одной какой-нибудь спектральной линии, так мало отличаются друг от друга, что практически во многих случаях можно считать спектр линейчатым, состоящим из излучения строго определенных частот.

Люминесцентное излучение мало зависит от температуры и определяется природой самого люминесцирующего тела. Излучение газов и паров при электрическом разряде также определяется природой газа. Водород будет давать одни спектральные линии, гелий — другие, неон — третьи, и т. д. Каждому химическому элементу соответствует свой набор спектральных линий, то есть свой набор тех длин волн, которые могут входить в состав излучения.

Процесс превращения электрической энергии в энергию излучения в газовом разряде не подчинен никаким ограничениям — ни тем, которые накладывают законы теплового излучения на лампы накаливания, ни тем, которые правило Стокса накладывает на процессы фотолюминесценции. Поэтому ничто в принципе не мешает тому, чтобы все 100 процентов энергии превратились в видимое излучение, да и на практике в некоторых случаях удается близко подойти к такому идеальному с точки зрения светотехники соотношению. Например, в лампах, в которых электрический разряд происходит в атмосфере паров металла натрия, все излучение состоит практически из одной только желтой спектральной линии с длиной волны 589 миллимикрон, причем в некоторых лабораторных типах этих ламп удалось добиться превращения в излучение этой длины волны примерно 80 процентов электрической энергии, и даже в технических типах натровых ламп при этой длине волны излучается мощность, равная 20 процентам затраченной электрической энергии. Тем не менее применение этих ламп для освещения очень ограничено, так как желтый, прозрачный их свет совершенно не удовлетворяет нас. На улицах Москвы были установлены для опыта натровые лампы. Однако, несмотря на высокую экономичность, их пришлось очень скоро снять по требованию населения.

Немногим лучше обстоит дело и с ртутными лампами, в которых свечение возникает при прохождении тока через пары ртути. Эти лампы являются важнейшим из газоразрядных источников света, применяемых в настоящее время в технике.

Атомы ртути могут излучать довольно сложный линейчатый спектр, содержащий и видимые и ультрафиолетовые лучи. Для удобства обозрения мы можем разбить все линии этого спектра на четыре группы:

1. Коротковолновые ультрафиолетовые линии — сильная линия, соответствующая длине волны в 254 миллимикрона, и несколько близких к ней, более слабых линий.

2. Группа линий в ультрафиолетовой области от 290 до 313 миллимикрон.

3. Сильная ультрафиолетовая линия с длиной волны в 365 миллимикрон и несколько близких к ней, более слабых линий.

4. Видимые линии, из которых наиболее сильными являются синяя линия с длиной волны в 436 миллимикрон, зеленая — с длиной волны в 546 миллимикрон и две близкие желтые линии — с длиной волны около 579 миллимикрон.

Мы не случайно разбили все линии ртутного спектра на эти четыре группы. Как мы увидим, излучение каждой из этих областей имеет свои весьма замечательные действия и находит свое важное применение.

Каковы бы ни были условия разряда или вообще способы возбуждения атомов ртути, они не могут излучать никаких других длин волн, кроме указанных выше, но в зависимости от условий одни линии будут представлены в спектре сильнее, другие — слабее. В основном это определяется давлением ртутного пара в лампе. Когда давление ртутного пара велико, примерно равно атмосферному или выше его, то наиболее коротковолновая группа линий (около 254 миллимикрон) очень слаба, а самыми интенсивными являются видимые линии и ближайшая ультрафиолетовая линия с длиной волны в 365 миллимикрон; достаточно сильна и группа линий в области 290—313 миллимикрон. Напротив, при очень низком давлении ртутного пара в лампе только линия с длиной волны в 254 миллимикрона достаточно интенсивна, а все остальные — более длинноволновые — линии по сравнению с ней очень слабы. Таким образом, ртутная лампа низкого давления является практически источником только коротковолнового ультрафиолетового излучения, тогда как лампа высокого давления дает и видимый свет и большое количество более длинноволнового ультрафиолетового излучения.

До сравнительно недавнего времени техническое применение имели главным образом ртутные лампы высокого давления. В них давление ртутного пара было примерно равно атмосферному или несколько превыша-

ло его. Давно известно, что ультрафиолетовые лучи оказывают сильное влияние на организм человека и животных. Всем известный «загар» кожи, возникающий под влиянием ультрафиолетовых лучей, содержащихся в солнечном излучении, является внешним проявлением сложных и многообразных процессов, протекающих в человеческом организме под влиянием этих лучей. Но не всегда и не везде можно подвергать нуждающегося в этих лучах человека непосредственному воздействию солнечного света. Поэтому врачи весьма охотно применяют для светолечения ртутные лампы высокого давления. Такая лампа производства советских заводов изображена на рисунке 14а. Трубка ее изготовлена не из стекла, а из плавленного кварца, и потому эта лампа известна под названием ртутнокварцевой. Необходимость изготовлять лампы для медицинских целей из дорогого плавленного кварца вызывается тем, что не все лучи — даже ультрафиолетовые — одинаково действуют на организм человека. Наиболее сильными и важными лечебными свойствами обладают лучи в области 280—320 миллимикрон. Обычное стекло совершенно непрозрачно для этого излучения, да и лучи с длиной волны в 365 миллимикрон оно пропускает плохо — особенно когда оно разогрето до нескольких сот градусов, как это имеет место в лампах высокого давления.

Ртутно-кварцевые лампы, или лампы «горного солнца», как их иногда называют, оказывают медицине неоценимые услуги, и их применяют все шире и шире. Облучение ими укрепляет здоровье человека и повышает его сопротивляемость по отношению к различным болезням. Во время войны наши врачи широко и плодотворно применяли эти лампы для борьбы с последствиями ранений и для скорейшего восстановления здоровья наших раненых бойцов. Нужно, однако, помнить, что как всякое сильнодействующее средство ультрафиолетовые излучения полезны только в определенной дозе; если же подвергать человека слишком сильному или длительному их воздействию, то они вызывают тяжелые ожоги и приносят вред, а не пользу. Определить правильную дозу ультрафиолетового излучения может только врач. Особенно тщательно следует беречь глаза. В течение нескольких секунд излучение ртутно-кварцевой лампы вызывает тяжелые и необычайно мучительные

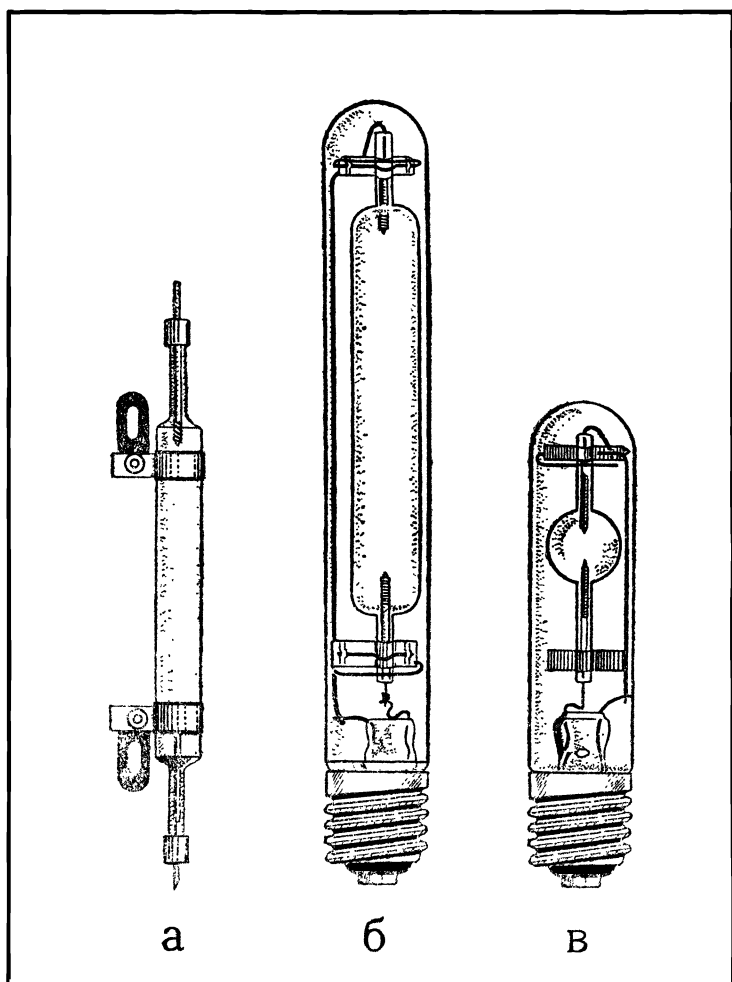


Рис. 14. Основные типы ртутных ламп советского производства: *а* — лампа высокого давления ртутно-кварцевая (медицинская лампа «горного солнца»); *б* — лампа типа «Игар» (стеклянная, высокого давления); *в* — лампа типа СВДШ, сверхвысокого давления шариковая.

ожоги глаз, которые в более тяжелых случаях могут привести к ослаблению или даже потере зрения.

В тех случаях, когда в излучении лампы используется не «биологическая» группа линий (296—313 миллимикрон), а линии видимые и ближайšie к ним ультрафиолетовые, трубку лампы можно делать из стекла. Такая лампа советского производства (типа «Игар») изображена на рисунке 146. В сине-голубой части спектра такие лампы излучают от 3 до 6 процентов поглощаемой ими мощности, тогда как лампы накаливания излучают в этой части спектра только 1 процент мощности. Поэтому лампы «Игар» очень выгодны там, где требуется действие синих лучей, в частности при всяких фотографических процессах. Их светотдача в два с половиной раза больше, чем у ламп накаливания. Казалось бы, нам остается только заменить привычные лампы лампами типа «Игар», и мы сэкономим половину всей ныне расходуемой на освещение энергии. К сожалению, дело не так просто. Широкому применению ртутных ламп высокого давления для целей освещения мешает то же, что и в случае натровых ламп — неподходящий, на этот раз синеvато-зеленый, цвет их излучения. Главная неприятность в случае применения натровых, а особенно ртутных ламп заключается даже не в том, что цвет самого излучения недостаточно белый, а в том, что цвета многих предметов страшно искажаются при освещении ртутной лампой. Лица приобретают мертвенно-зеленоватый, трупный оттенок, а губы кажутся лиловыми, почти черными. Этот недостаток ртутных, да и всех других газоразрядных ламп связан с тем, что спектр их излучения не непрерывный, а линейчатый. В нем содержатся не все длины волн, как в привычных для нас тепловых источниках света, а только некоторые, избранные. В частности, ртутные лампы почти не имеют в составе своего излучения красных лучей, и потому все красные предметы при освещении ими кажутся коричневыми, почти черными. Кроме того, эти лампы дают и довольно много ультрафиолетовых лучей, под действием которых многие предметы, в частности человеческие лица, флуоресцируют, то есть светятся своим собственным светом, что также не улучшает общего впечатления.

В последние годы техника ртутных ламп развивалась

в двух направлениях. С одной стороны, появились лампы сверхвысокого давления, в которых давление ртутного пара достигает десятков и даже сотен атмосфер; при этом происходит интересное явление так называемого отщуривания разряда. Свечение уже не заполняет всю трубку, а стягивается в тонкую линию, соединяющую электроды. Электроды здесь также можно сблизить и получить лампу почти с точечным источником света, вроде изображенной на рисунке 14в советской лампы типа СВДШ (эти буквы означают: лампа сверхвысокого давления шариковая). Так как здесь все свечение сосредоточено в очень коротком и тонком промежутке между электродами, то яркость такого источника, то есть интенсивность его излучения, приходящаяся на каждый квадратный сантиметр его поверхности, огромна. Спектральные линии в излучении ламп сверхвысокого давления шире, чем в лампах высокого и особенно низкого давления. Кроме того, помимо отдельных линий, в спектре появляется довольно интенсивный непрерывный фон. Однако цвет этих ламп еще недостаточно белый и искажения восприятия цветов настолько велики, что применять их для общего освещения также невозможно. Поэтому и лампы типа СВДШ находят себе применение лишь для некоторых специальных научных и технических целей, но не могут стать массовым средством освещения.

Наряду с лампами высокого и сверхвысокого давления техника в последние годы усиленно разрабатывала лампы с очень низким давлением ртутного пара, которые практически являются источником только коротковолнового излучения с длиной волны в 254 миллимикрона. Такая лампа дает лишь очень слабое синеватое свечение, в котором сосредоточено всего около 3 процентов поглощаемой лампой электрической мощности; немного дает эта лампа и длинноволнового ультрафиолетового излучения — только около 1 процента расходуемой мощности. Но зато по отношению к коротковолновому ультрафиолету это источник необычайно экономичный. В излучении с длиной волны в 254 миллимикрона заключено до 60 процентов той электрической мощности, которую поглощает лампа.

Интерес к лампам такого рода прежде всего был связан с тем обстоятельством, что их излучение обла-

дает поразительной способностью убивать бактерии и зародыши бактерий, плавающие в воздухе или находящиеся на поверхности освещаемых предметов. Это дает возможность применять подобные лампы для обеззараживания воздуха и предметов в операционных, больницах, школах и других местах, где может происходить массовое распространение инфекции. Трубку лампы приходится изготавливать из специального стекла, более или менее прозрачного для ультрафиолетовых лучей.

Мы видим, какое разнообразное и интересное применение получили ртутные лампы разных типов. Но в решении нашей основной задачи — получения источника искусственного света, более экономичного, чем существующие — мы с ними далеко не продвинулись. Препятствием служат цвет их излучения и искажение цвета разных предметов при освещении этими лампами.

НОВЫЙ ИСТОЧНИК СВЕТА — ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ

Когда необходимость исправления цвета излучения ртутных ламп стала физикам совершенно ясной, прежде всего была сделана попытка исправить цвет ртутной лампы сверхвысокого давления, который наиболее близок к белому. Рассуждали так: в излучении этой лампы, кроме видимых лучей, имеется еще довольно большое количество ультрафиолетовых лучей. Нельзя ли с помощью кристаллофосфоров преобразовать это излучение в те видимые лучи, которых нехватает в спектре ртутной лампы? Таким образом, можно будет исправить ее цвет и повысить ее экономичность за счет использования невидимых ультрафиолетовых лучей. В этом направлении и начала свою работу группа советских физиков, возглавляемая президентом Академии наук СССР академиком С. И. Вавиловым. Небольшую кварцевую ртутную лампу сверхвысокого давления помещали внутрь большой стеклянной колбы, на внутреннюю стенку которой наносился тонкий слой люминесцирующего сернистого цинка и сернистого кадмия, возбуждавшийся ультрафиолетовыми и отчасти синими лучами лампы. Свечение самой лампы проходило сквозь этот слой наружу, и к нему присоединялось свечение слоя фосфор-

ного порошка. По такому же пути пошли некоторые заграничные лаборатории. Но результаты — и у них и у нас — получились не вполне удовлетворительные. Цвет лампы немного исправлялся и экономичность получалась неплохая, но все же лампа давала не вполне белый свет; излучение сохраняло неприятный желто-зеленый оттенок. На широкое распространение такая лампа рассчитывать не могла.

Эта неудача не обескуражила исследователей. Когда были исследованы ее причины, то стало ясно, что в излучении ртутной лампы высокого и сверхвысокого давления слишком много видимого света, цвет которого нужно исправить, и слишком мало ультрафиолетовых лучей, при помощи которых это исправление можно производить. Решили попробовать превратить возможно большую долю электрической энергии в ультрафиолетовое излучение, получив при этом очень мало видимого света, чтобы потом с помощью люминесцирующих веществ превращать ультрафиолетовое излучение в видимый свет того спектрального состава, который нам нужен. На первый взгляд такой путь двукратного преобразования энергии кажется окольным и сложным, но именно он привел к самым крупным успехам, какие знала в своем развитии техника получения света.

Источник излучения, который превращает огромную долю электрической энергии в ультрафиолетовое излучение и почти не дает видимого света, мы уже знаем. Это — ртутная лампа низкого давления, которая нашла уже себе столь интересное применение в качестве прибора, убивающего бактерии. Но теперь нам нет надобности делать ее из специального стекла, прозрачного для ультрафиолетовых лучей малой длины волны. Напротив, мы делаем эти лампы из самого обычного стекла, но на внутреннюю сторону трубки наносим слой таких люминесцирующих веществ, которые полностью поглощают ультрафиолетовое излучение разряда и трансформируют его в видимый свет нужного нам спектрального состава. Такие лампы и получили название люминесцентных.

Лампа представляет собой тонкую и длинную трубку диаметром от 25 до 50 миллиметров и длиной от 60 до 150 сантиметров. Трубка эта имеет матово-белый цвет и производит такое впечатление, как будто она

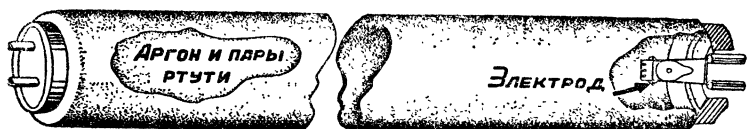


Рис. 15. Разрез, показывающий внутреннее устройство люминесцентной лампы.

изготовлена из матового стекла. Это впечатление обманчиво. На самом деле трубка сделана из обычного прозрачного стекла, но на внутреннюю сторону трубки нанесен тонкий слой белого кристаллического порошка — фосфора. Внутреннее устройство трубки показано на рисунке 15. Трубка заполнена разреженным газом аргоном и содержит крошечную капельку жидкой ртути. По концам трубки с каждой стороны в стекло впаяны две проволоки, к которым приварены электроды. С помощью этих вводов электроды присоединяются к сети тока, который проходит внутри трубки от одного электрода к другому через газовую среду, состоящую в основном из аргона с небольшой примесью ртутного пара. Количество паров ртути в лампе зависит от той температуры, которая устанавливается в ней при горении. Температура эта не превышает 45—50 градусов, и давление ртутного пара значительно меньше, чем давление аргона: оно составляет примерно одну стотысячную нормального атмосферного давления. Несмотря на то, что число атомов ртути в лампе гораздо меньше, чем число атомов аргона, излучающими являются атомы ртути. Спектральных линий аргона в излучении нет.

Электроды люминесцентной лампы представляют собой небольшие отрезки спирали из вольфрамовой проволоки, покрытой специальной пастой, в состав которой входят окиси бария и других щелочно-земельных металлов. Эти соли обладают той замечательной особенностью, что уже при сравнительно низкой температуре в 800—1000 градусов они испускают в окружающее пространство очень большое число свободных электронов, которые и обеспечивают возможность прохождения тока через трубку. Когда лампа горит, то тепло, необходимое для поддержания электродов в горячем состоянии, доставляется самим разрядом. Лампа питается

переменным током, который меняет свое направление сто раз в секунду (50 периодов в секунду). Поэтому каждый из электродов попеременно в течение $\frac{1}{100}$ секунды служит анодом и в течение $\frac{1}{100}$ секунды — катодом.

В то время, когда данный электрод служит анодом, о него ударяется большое число летящих к нему электронов. Результатом этой «бомбардировки» и является выделение тепла, разогревающего электрод до нужной температуры. Электроды такой конструкции при горении лампы не требуют специальных приспособлений для подогрева. Но для зажигания лампы подогрев необходим. Когда электроды холодны, то количество электронов в лампе недостаточно для ее нормального горения. Нужно электроды предварительно разогреть, а там уже они будут сами подогреваться разрядом. Это осуществляется следующим образом: свободные концы электродов, то есть концы, не включаемые в сеть, соединяют на 1—2 секунды друг с другом (рис. 16). Ток проходит последовательно через оба электрода и накаливает их. Теперь можно разомкнуть цепь электродов, и ток пойдет через трубку от одного электрода к другому. Замыкание и размыкание цепи электродов можно было бы осуществлять при помощи выключателя или звонковой кнопки, но это неудобно, а при необходимости включения сразу большого числа ламп — просто невозможно. Поэтому обычно свободные концы электродов подключают к специально небольшому приспособлению — так называемому реле, или стартеру, который автоматически производит необходимое соединение и разъединение проводов. Описывать устройство стартера мы здесь не станем.

В зависимости от того, какой фосфор мы применим, можно заставить нашу лампу светиться любым цветом — красным, зеленым, синим и т. п. Такие цветные лампы очень красивы, но большого практического значения не имеют. Можно, однако, так подобрать смесь фос-

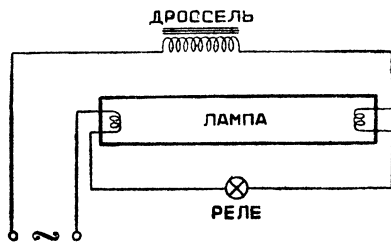


Рис. 16. Схема включения люминесцентной лампы в сеть.

форов, что цвет излучения будет белым. Такие люминесцентные лампы и являются тем новым источником света, которому принадлежит будущее. Они выпускаются в настоящее время трех типов. В лампах «дневного света» состав смеси подобран так, что излучение лампы по своему спектральному составу и цвету чрезвычайно близко к естественному дневному свету. Другие лампы — «белые» — имеют состав и цвет излучения, близкий к цвету обычных электрических ламп накаливания; наконец, третьи — лампы «мягкого белого» света — занимают промежуточное положение.

Некоторая сложность конструкции самой лампы, а также необходимость иметь вместе с лампой стартер и специальное сопротивление — дроссель (рис. 16), — ограничивающее силу тока, проходящего через лампу, конечно, удорожают все устройство и замедляют внедрение ламп в практику. В США эти лампы завоевали себе признание. Впервые американцы выпустили в 1938 году «на пробу» 250 тысяч люминесцентных ламп. К 1940 году выпуск их достиг 25 миллионов штук в год, а сейчас в Америке выпускается около 100 миллионов таких ламп в год.

Наши ученые к началу войны также успешно завершили разработку люминесцентных ламп. Война задержала, конечно, развертывание массового их производства в нашей стране, но теперь соответствующие предприятия быстро строятся, и в ближайшее время страна начнет получать все возрастающее количество этих новых источников света.

Каковы же преимущества новых ламп, обеспечивающие им столь бурный успех? Главным и решающим из этих преимуществ является необычайно высокая светоотдача. Современные люминесцентные лампы дают 40—50 люменов светового потока на каждый расходуемый ватт электрической мощности. Это в три-четыре раза больше, чем светоотдача ламп накаливания. Иными словами, израсходовав одно и то же количество электрической энергии, мы можем получить теперь в три-четыре раза больше света. О том, какое значение это имеет для народного хозяйства нашей страны, говорит такая цифра: если бы нам удалось заменить люминесцентными лампами только половину всех ламп накаливания в нашей стране, то ежегодная экономия энергии была бы

равносильна ее продукции на двух-трех таких огромных станциях, как Днепрогэс.

Другим важнейшим преимуществом люминесцентных ламп является возможность широко изменять спектральный состав их излучения и, в частности, получать лампы, свет которых практически тождественен с дневным.

Вы замечали, конечно, что свет ламп накаливания имеет более желтоватый оттенок, чем дневной, и потому многие цвета при вечернем, искусственном освещении воспринимаются нами иначе, чем при естественном, дневном свете. Тот из вас, кто попробует выбирать галстук или цветную материю в магазине при вечернем освещении, может испытать немалое разочарование, разглядывая свою покупку днем. Это еще полгоря, а вот на многих предприятиях, где требуется очень тонко определять различие цветовых оттенков, разница между цветовосприятием при вечернем и дневном освещении — это уже настоящее горе. К числу таких предприятий относятся текстильные, лакокрасочные, типографии, в которых печатаются цветные иллюстрации, и многие другие. Здесь люминесцентные лампы принесут огромную пользу не только своей экономичностью, но и тем, что они дают «дневной свет». Такими лампами будут также освещены наши музеи, и мы получим возможность полноценного показа их художественных сокровищ в течение всего дня и вечера, а не только в недолгие часы яркого солнечного света.

Если прибавить к этому, что срок жизни новых ламп не 1 тысяча часов, а 3 тысячи часов, что они гораздо прочнее ламп накаливания и не боятся ударов и сотрясений, то значение этих новых источников света станет вполне ясным.

Цель и смысл существования науки — делать жизнь людей богаче, удобнее, содержательнее. Работа советских физиков и инженеров по созданию люминесцентной лампы направлена к этой цели. Эта лампа сделает нашу жизнь еще светлее в прямом смысле этого слова, а значит, и в переносном.

ДЛЯ ШКОЛЬНЫХ БИБЛИОТЕК

К ЧИТАТЕЛЯМ

*Издательство просит отзывы об
этой книге присылать по адресу:
Москва, М. Черкасский пер., д. 1,
Детгиз.*

Для старшего возраста

Ответственный редактор Ю. Моралевич. Художественный редактор Г. Вебер.
Технические редакторы И. Румянцева и Р. Кравцова. Корректоры
Е. Вильтер и А. Враныч.
Подписано к печати 4/IV 1947 г. 3½ п. л. (2,75 уч.-изд. л.). 35088 зн. в п. л.
Тираж 50 000 экз. А03344. Заказ № 52. Цена 1 р. 60 к.

Фабрика детской книги Детгиза. Москва, Суцевский вал, 49.

Цена 1 р. 60 к.