

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

С. И. ВАВИЛОВ

ГЛАЗ И СОЛНЦЕ

О „ТЕПЛОМ“
И „ХОЛОДНОМ“
С В Е Т Е

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

АКАДЕМИК

С.И. ВАВИЛОВ

ГЛАЗ и СОЛНЦЕ

•

О „ТЕПЛОМ“
И „ХОЛОДНОМ“
С В Е Т Е

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА • 1961

ГЛАЗ И СОЛНЦЕ
(О СВЕТЕ, СОЛНЦЕ И ЗРЕНИИ)

Книга С. И. Вавилова «Глаз и Солнце» вышла первым изданием в 1927 г., последующими в 1932, 1938, 1941, 1950, 1956 и 1957 гг. Настоящее издание воспроизводится по тексту IV тома собрания сочинений академика С. И. Вавилова (Изд-во АН СССР, 1956). Книге «Глаз и Солнце» (вместе с книгой «Микроструктура снега») в 1951 г. была присуждена Сталинская премия I-й степени

ВВЕДЕНИЕ

*«War nicht das Auge sonnenhaft,
Wie konnten wir das Licht erblicken?
(Будь не солнцем наш глаз,
Кто бы солнцем любовался?)»¹*

Г е т е

Сооставление глаза и Солнца так же старо, как и сам человеческий род. Источник такого сопоставления — не наука. И в наше время рядом с наукой, одновременно с картиной явлений, раскрытой и объясненной новым естествознанием, продолжает бытовать мир представлений ребенка и первобытного человека и, намеренно или ненамеренно, подражающий им мир поэтов. В этот мир стоит иногда заглянуть как в один из возможных источников научных гипотез. Он удивителен и сказочен; в этом мире между явлениями природы смело перекидываются мосты-связи, о которых иной раз наука еще не подозревает. В отдельных случаях эти связи угадываются верно, иногда они в корне ошибочны и просто нелепы, но всегда они заслуживают внимания, так как эти ошибки нередко помогают понять истину. Поэтому и к вопросу о связи глаза и Солнца поучительно подойти сначала с точки зрения детских, первобытных и поэтических представлений.

Играя «в прятки», ребенок очень часто решает спрятаться самым неожиданным образом: он замуривает глаза или закрывает их руками, будучи уверен, что теперь его никто не увидит; для него зрение отождествляется со светом.

Еще удивительнее, впрочем, сохранение такого же инстинктивного смещения зрения и света у взрослых Фотографы, т. е. люди несколько искусственные в практической оптике, нередко

¹ Перевод В. А. Жуковского.

ловят себя на том, что закрывают глаза, когда при зарядении или проявлении пластинок нужно тщательно следить, чтобы свет не проникал в темную комнату. Если внимательно прислушаться к тому, как мы говорим, к нашим собственным словам, то и здесь сразу обнаруживаются следы такой же фантастической оптики. Не замечая этого, люди говорят: «глаза засверкали», «солнце выглянуло», «звезды смотрят».

У поэтов перенос зрительных представлений на светило и, наоборот, приписывание глазам свойств источников света — самый обычный, можно сказать, обязательный прием:

Звезды ночи,
Как обвинительные очи,
За ним насмешливо глядят
Его глаза сияют.

Пушкин

С тобой на звезды мы глядели,
Они на нас

Фет

Неизбежный для зрительного восприятия признак светила — лучи уподобляются ресницам:

Сверкают звезд золотые ресницы

Фет

Такие примеры без труда и в большом числе можно разыскать почти у каждого поэта, древнего или современного.

Неразрывной и сложной предполагалась связь глаза и Солнца в египетских мифах, изображениях и гимнах.

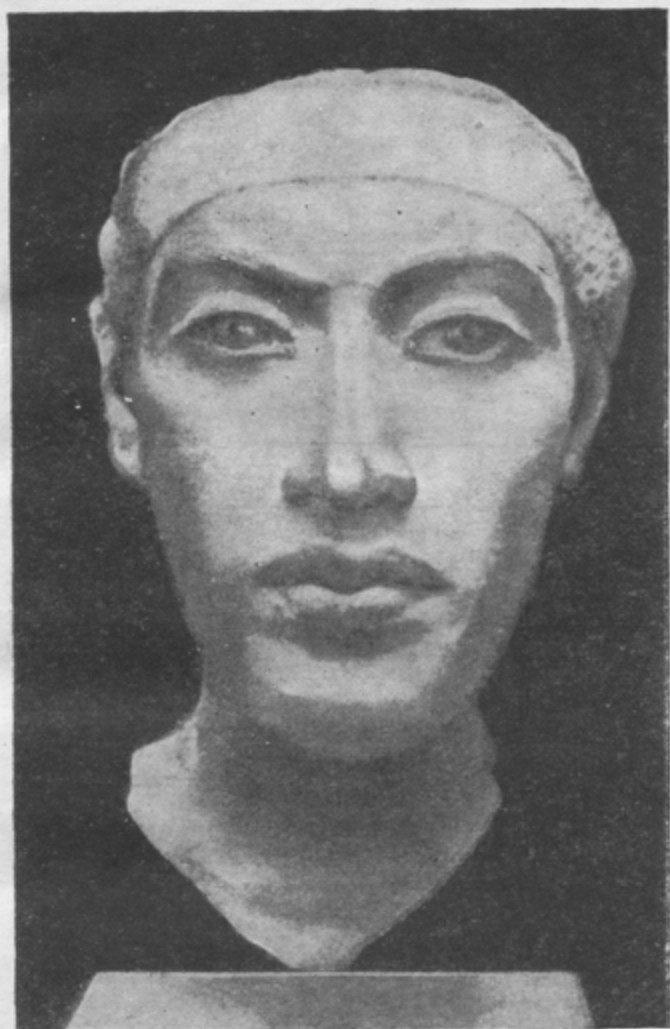
Как прекрасны оба ока Амона-Ра,

говорится в Фиванском гимне, причем под очами бога подразумевались Солнце и Луна. О сложном переплетении зрительных и световых понятий свидетельствуют другие строки того же гимна:

Люди прозрели,
Когда впервые засверкал твой правый глаз,
А левый глаз прогнал тьму ночную.

Древний религиозный символ «всевидящего ока» имеет вид глаза, окруженного лучами (рис. 1). Глаз здесь одновременно сияет и видит. В одном образе слиты глаз и Солнце, зрение и свет.

Таково основное и вместе с тем неосознанное «положение» донаучной или вненаучной оптики; наряду с ним есть и другое.



*Аменофис IV, основатель культа реального Солнца
в древнем Египте (1370 г. до н. э.)*



Рис. 1. Скульптурное изображение «всевидящего ока» на фронтоне лицейской церкви в г. Пушкине

Мы постоянно говорим, что свет «режет», «бьет», «пробивается», «льется». Слово «поток» света вошло даже в научный и технический обиход. У поэтов уподобление света жидкости — неизбежный оборот:

Золото лучей его струится к ноздрям фараонов.
Да буду облит я лучами твоими каждый день.

Египетские гимны

Снова жадными очами
Свет живительный я пью.
...Молниевидный брызнет луч.

Тютчев

И брызжет солнце горстью
Свой дождик на меня.

Есенин

Иногда такое представление о свете как о чем-то телесном принимает резкие формы. На египетских изображениях эпохи Аменофиса IV (1350 г. до н. э.) лучи солнечного диска — Атона (рис. 2) заканчиваются пальцами. Самое слово «луч» значит «стрела» (от того же корня лук — орудие и лук — стрельчатое растение). В наших инстинктивных движениях иногда обнаруживается такое же грубое овеществление света. М. Горький рассказывает в своих воспоминаниях: «Я видел, как А. Чехов, сидя



Рис. 2. Египетское изображение поклонения реальному Солнцу из Эль Амарны эпохи Аменхотеп IV

в саду у себя, ловил шляпой солнечный луч и пытался — совершенно безуспешно — надеть его на голову вместе со шляпой. Ловля света шляпой едва ли менее странна, чем солнечные руки Атона.

Настойчивое уподобление света движущемуся телу или жидкости в детских, первобытных и наших инстинктивных образах явно свидетельствует о стихийном, неосознанном материализме этих представлений. Вместе с тем несомненно, что отождествление света и зрения вызвано примитивным смешением внешнего мира и собственных ощущений. Такое смешение еще очень сильно у ребенка и первобытного человека и остается в некоторой мере у взрослых и культурных людей в условиях «выключенного сознания». Победа настоящей материалистической науки и заключалась прежде всего в ясном разделении внешнего мира от субъективных переживаний.

Сознание, разумеется, неизбежно приходит в свое время и разбивает сложные узоры детской поэтической «оптики». Ребенок постепенно все определеннее начинает отличать свои ощущения от внешнего мира, сон резко отделяется от действительности, обманы чувств — от реальности. Пушкин, конечно, знал, что глаза не «сияют». Фету, разумеется, было известно, что звезды не «глядят», Чехова не требовалось убеждать, что солнечный луч поймать нельзя.

И все же мир представлений ребенка для поэта и до сих пор остается привлекательным, наиболее образным, легче всего подходящим до воображения. Поэтому в поэзии и в обыденной жизни «оптика детей и поэтов», вероятно, будет существовать еще долго. Она живет рядом с сознанием, с наукой, не вмешиваясь в них в наше время, но вместе с тем несомненно, что в прошлом она оказывала некоторое влияние и на науку.

История науки о свете в этом отношении особенно поучительна. Она началась как раз с попытки перенесения «оптики детей и поэтов» в область сознательного, последовательно развиваемого знания. Оба «основных положения» этой оптики, т. е. утверждение тождества зрения и света и телесности света, легли в основу учения о свете в древней Греции и дожили в разных формах почти до XVII в. н. э.

В знаменитом естественно-научном диалоге Платона «Тимей», например, повествуется: «Из органов боги прежде всего устроили *светоносные* глаза, которые приладили с таким намерением: по их замыслу должно было возникнуть тело, которое не имело бы жгучих свойств огня, но доставляло кроткий огонь, свойственный всякому дню. И боги сделали так, что родственный дневному свету огонь, находящийся внутри нас, вытекает очищенным через глаза, которые боги сгустили, особенно в середине, так, чтобы они задерживали грубейшую часть огня и

пропускали только в чистом виде. И вот, когда дневной свет окружает поток зрения, тогда подобное, исходя к подобному, соединяется с ним и по прямому направлению зрачков образует в связи с родственным одно тело — где бы падающее изнутри не натолкнулось на то, что встречает его извне. И как скоро все вместе, по подобию, приходит в состояние подобное, то прикасается ли к чему само, или что другое прикасается к нему, действие тех предметов распространяет оно через все тело, до души, и производит то чувство, которое мы называем зрением. А когда сродный огонь на ночь отходит — этот (т. е. огонь глаз) обособляется, потому что, исходя к неподобному, он и сам изменяется и гаснет, не соединяясь более с ближним воздухом, так как в нем нет огня». Так буйному огню Солнца соответствует у Платона кроткий огонь глаз, заходу Солнца — смыкание век на ночь.

Дамиан из Лариссы (IV в. н. э.) пытался следующим образом защищать теорию зрительных лучей, исходящих из глаза. Форма наших глаз, которые не имеют полую форму, в отличие от остальных органов чувств, и поэтому не приспособлены для восприятия чего-либо, но шарообразны, доказывает, по Дамиану, что лучи исходят от нас. О том, что эти лучи световые, свидетельствуют молнии, вспыхивающие из глаз. У ночных животных глаза ночью даже светятся.

Великие математики древности Эвклид, Птолемей и другие, на основе учения о зрительных лучах, исходящих от глаз, создали теорию отражения света от плоских и сферических зеркал и положили начало геометрической оптике, сохранившей свое значение и для нас.

Естественно задать вопрос, как можно согласовать поразительно высокий для своего времени уровень греческой науки в геометрии, астрономии, механике и в других областях знания с явно нелепым для современного человека учением о зрительных лучах, излагавшимся теми же Эвклидом и Птолемеем, которые оставили бессмертные творения в области геометрии и астрономии?

Наше недоумение объясняется забвением исторической перспективы. Главная, а вместе с тем труднейшая задача, стоявшая перед древними оптиками, состояла в объяснении и з о б р а ж е н и й предметов. В те времена изображения знали только по самому процессу зрения при помощи собственного глаза или по рисункам и живописи. Других способов не было, не была известна еще простая камера-обскура и не подозревали возможности получения изображений предметов на любых поверхностях при помощи линз и вогнутых зеркал. Вместе с тем древние не знали и устройства глаз, им оставался неизвестным факт образования изображений на сетчатке глаза при помощи глазной линзы — хрусталика.

При таком положении дела зрение, возникновение изображений окружающих предметов в человеческом мозгу, было необычайно загадочным. Простейшим решением этой загадки и казалось древним именно представление о зрительных лучах наподобие некоторых щупальцев, исходящих от человека.

Вообразим себя в положении древнего оптика и рассмотрим задачу о получении изображения светящейся точки A от плоского зеркала SS (рис. 3). Древние знали прямолинейность распространения света и закон отражения. Если бы они приняли,

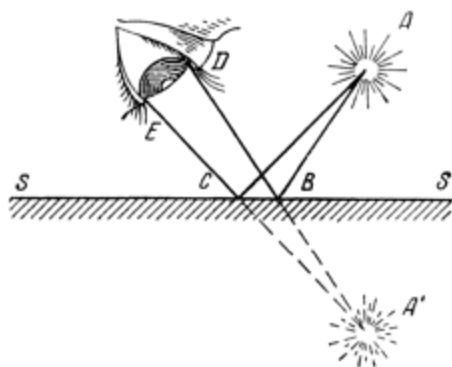


Рис. Наблюдение отражения светящейся точки в зеркале

как мы делаем это теперь, что свет исходит от точки A , то, пользуясь прямолинейностью и законом отражения света, они провели бы лучи ABD и ACE . Они нашли бы, что лучи упираются в глаз в точках D и E . Но дальнейшая судьба лучей оставалась для них неизвестной, возникновение изображения в зеркале в точке A' было непонятным, тем более что, как видно из чертежа, лучи, подходя к глазу, расходятся, а не сходятся. На помощь в этой, казалось, непреодолимой для древнего трудности приходило представление о зрительных лучах, заимствованное из примитивных образов ребенка и дикаря. В самом деле, примем, что лучи, создающие изображение, идут не от источника к глазу, а наоборот, и что глаз каким-то образом чувствует первоначальное направление вышедших из него зрительных лучей. Эти лучи в рассматриваемом примере отражения от зеркала (см. рис. 3) отразятся, как и световые, у зеркала в точках C и B и соберутся в «источнике» в точке A . Первоначальное направление лучей, вышедших из глаз, «сигнализируется», по предположению древних, каким-то способом в мозг, и кажется, что встреча лучей произошла не после отражения, а в мнимой точке A' , где пересекаются продолжения лучей, первоначально вышедших из

глаза. Преимущество такого толкования заключается в том, что вовсе не требуется знание того, что происходит со светом внутри глаза. Достаточно лишь предположить, как это отмечено, что через глаз некоторым способом сигнализируется первоначальное направление зрительных лучей. Мнимое изображение создается в мозгу. Несмотря на всю причудливость воззрения о зрительных лучах, оно, несомненно, было полезным и прогрессивным для своего времени, так как позволяло построить правильную теорию получения изображений при помощи зеркал. Поэтому оно просуществовало очень долго. Еще в начале XVII в. им иногда пользовался Галилей.

Теории зрительных лучей в древности противопоставлялось лишь еще более фантастическое представление Эпикура и Лукреция о «слепках» с предметов, летящих во всех направлениях и попадающих в глаз. От светящихся и освещенных тел, по Эпикуру, постоянно отделялись тончайшие пленки, в точности сохранявшие рельеф и особенности тела. Такие, вполне сформированные отпечатки, попадая в глаз, и определяли, по воззрениям древних атомистов, зрительное изображение в глазу. Воззрение это, так сказать, «спасало положение», но оно было совершенно качественным, и, конечно, в сравнении с ним количественная геометрическая оптика Эвклида и Птолемея должна была рассматриваться как более совершенная.

Мы задержались довольно долго на теории зрительных лучей, для того чтобы показать, что это не была грубая ошибка древних оптиков, а своего рода наименьшее из зол.

В течение многих веков, из поколения в поколение, учили, что Солнце и глаз — братья, проявления единого материального огня, то буйного, то кроткого, что светиться — значит видеть, видеть — светиться. Земля считалась центром мира, а человек — центром этого центра. Черта раздела между поэтической фантазией и наукой во многих случаях была неотчетливой, стиралась или просто отсутствовала. Поэтический домысел переносили в науку, пытаясь создать неустойчивое единство поэзии и науки.

Но случалось и обратное: в область мифов и религий проникали сознание и начатки объективной науки. Религией древнего Египта было поклонение Солнцу. Несоизмеримость Солнца и Земли, света и глаза выразилась здесь как отношения бога и человека. Этого бога воображали то соколом, то человеком с соколиной головой и солнечным диском, плавающим в ладье по небесному океану (рис. 4):

Амон-Ра, божественный сокол,

Сверкающий перьями,

Взмахом крыльев совершающий свой круг по небу,—

вот образ Солнца в древнем Фиванском гимне.

Но в XIV в. до н. э. в мировоззрении египтян произошел знаменательный перелом. Естественно думать, что новые веяния были прежде всего итогом наблюдений и размышлений египетских ученых астрономов. История не сохранила, однако, их имен. Переворот в египетских воззрениях на Солнце официальные каменные иероглифы связывают, конечно, с фараоном. Египетским Коперником, таким образом, стал фараон Аменофис IV.



Рис. 4. Египетское изображение Солнца как бога в ладье

В его царствование вводится новый культ — поклонение реальному, истинному Солнцу, не соколу и скарабею, а видимому солнечному диску с его лучами. Фараон меняет свое имя (Аменофис — любезный Амону), принимая имя Эхнатон — угодный Атону, солнечному диску. На памятниках (см. рис. 2) бог изображается просто диском с лучами. Свет и жизнь — единственные проявления нового бога. В гимнах Атону исчезли древняя нестрота, пышность и сложность символов Солнца, воспеваются благие действия Солнца для человека и всего живого.

Прекрасно светишь ты на небосводе,
Ты, Атон живой и живший изначально.
Когда восходишь ты с востока,
То наполняешь красую своюю все земли.
Светел ты, велик, блестящ и высишься над
всеми землями.
Лучи твои обнимают земли
И все, что ты создал на них,—

просто и понятно поется в начале большого гимна Солнцу. Значение Солнца для Земли стало отчетливым и реальным, и, казалось бы, не могло быть больше речи о равноправности глаза и Солнца. Но культ реального Солнца исчез в Египте вместе с Эхнатоном, и должны были пройти тысячелетия, прежде чем возникла наука, свободная от произвола человеческих ощущений и инстинктов, наука, в которой человек полностью отказался от

своего воображаемого привилегированного места во вселенной, приписывавшегося ему религией и древней наукой. Человек стал рассматривать себя как одно из проявлений природы, как результат долгого развития животного мира на Земле.

Древняя догадка о родстве глаза и Солнца, однако, сохранилась, правда в глубоко измененной форме, в современном естествознании. Наука нашего времени обнаружила подлинную связь глаза и Солнца, связь совсем иную, чем та, о которой думали древние, чем та, о которой говорят дети и поэты. Этой связи и посвящена настоящая книжка

Но помимо науки и рядом с ней, поэты, да и все мы, вероятно, еще долго будем твердить о сияющих глазах и глядящих звездах, так же как спустя четыре века после Коперника мы все еще говорим о восходе и заходе Солнца



СВЕТ

«Для чего толь многие учинены опыты в физике и в химии, для чего толь великих мужей были труды и жизни опасные испытания? Для того ли только, чтобы, собрав великое множество разных вещей и материй в беспорядочную кучу, глядеть и удивляться их множеству, не размышляя о их расположении и приведении в порядок»

Ломоносов

От Земли до Солнца около 150 миллионов километров; пролететь это расстояние то же, что 4000 раз объехать кругом Земли. Что же такое свет, непрерывно приносящий глазу из такой дали вести о Солнце, и, прежде всего, как отличить свет от прочего, нас окружающего, каковы его признаки? До XVII в. отвечали так: свет — это то, что видит глаз, причина зрительных ощущений. Признак явно неудовлетворительный. Стоит в полной темноте слегка нажать пальцем около носа на глазное яблоко, и появятся причудливые светлые круги. Если и здесь причину зрительного ощущения назвать светом, то придется вернуться к воззрению о «зрительных лучах», о котором говорилось на предыдущих страницах. Не всякая причина, вызывающая зрительное чувство, может быть названа светом. С другой стороны, следует поставить и такой вопрос: всякий ли свет видим? Несомненно, и это не так; существует бесконечное разнообразие явлений, которые нам придется назвать световыми и которые невидимы. В этом мы скоро убедимся.

Итак, в самом начале учения о свете мы натолкнулись на серьезное затруднение: мы еще не знаем, что составляет предмет этого учения. Чтобы выйти из этого тупика, рассмотрим сначала несколько ближе наши зрительные впечатления.

У зрительных образов два основных качества — яркость и цвет, качества для всех зрячих очевидные (в буквальном смы-

сле этого слова) и не требующие дальнейших пояснений¹. Но и яркость и цвет очень относительны и субъективны. Луна днем не отличима от облака, ночью она возводится в ранг заместителя Солнца «второго ока Амона-Ра». Звезды, не видимые днем, на фоне безлунного осеннего ночного неба кажутся необычайно яркими.

Второй признак зрительных ощущений — цвет — не менее обманчив. Мы различаем черный, белый и промежуточные серые цвета. От них кажутся нам принципиально отличными всевозможные радужные цветовые окраски. В действительности такое отличие в свою очередь в значительной мере субъективно и относительно. Чтобы в этом убедиться, можно произвести такой несложный опыт. Половина белого картонного диска, надетого на деревянную ось, как волчок, заклеивается черным бархатом или просто покрывается хорошей матовой черной краской. На второй половине диска концентрически наклеиваются или закрашиваются черные круговые полоски, как показано на рис. 5 (диск Бенгэма). Если такой диск, освещенный ярким белым светом, например солнечным, заставить вращаться (запустив его как волчок), то вместо ожидаемых серых концентрических окружностей на диске при некоторой скорости появляются цветные круги, правда мало насыщенные и темные. Из смешения черного и белого возникают, таким образом, при некоторых условиях цветные образы.



Рис. 5. Диск Бенгэма

Мы приходим к неутешительному выводу, что при определении понятия света нельзя опираться просто на зрительные ощущения. Именно поэтому в течение более чем двух тысяч лет существования науки о свете ясными в ней были только геометрические свойства лучей. Все остальное, исходившее из субъективных зрительных впечатлений, пребывало веками и тысячелетиями загадочным, расплывчатым и неопределенным.

Оптика была выведена из этого тупика только в XVII в. Исааком Ньютоном, сумевшим, наконец, перевести субъективные ощущения яркости и цвета на объективный язык меры, числа и физического закона. В 1665 г. Ньютон начал производить

¹ При более внимательном наблюдении обнаруживается и третье качество, называемое насыщенностью. Мы видим, например, рядом две одинаково яркие поверхности, обе красные, но утверждаем, что цвет одной более чистый, насыщенный, другой белесоватый, как бы разбавленный белым цветом. Примесь «белого» и служит мерой насыщенности.



Исаак Ньютон (1642—1727)
(рисунок с натуры Штэклера)

опыты над солнечным светом. В этих опытах через круглое отверстие в ставне окна на стеклянную призму падал пучок солнечного света. Пучок преломлялся в призме, и на экране отбрасывалось удлинненное изображение с радужным чередованием цветов. Появление такой радуги — спектра — при прохождении света через призму было известно давно до Ньютона и объяснялось тем, что стекло как-то влияет на белый свет, изменяя его окраску. Ньютон заключил из своих опытов, что это неверно. Белый свет (по Ньютону) — сложный, механическая смесь бесчисленного разнообразия лучей, преломляющихся в стекле в разной степени. Призма не изменяет белого света, а разлагает его на простые составные части, смешав которые можно снова восстановить первоначальную белую окраску (рис. 6). Если выделить простой луч, например красный, из радужного веера призмы и пустить на вторую призму, то нового разложения не

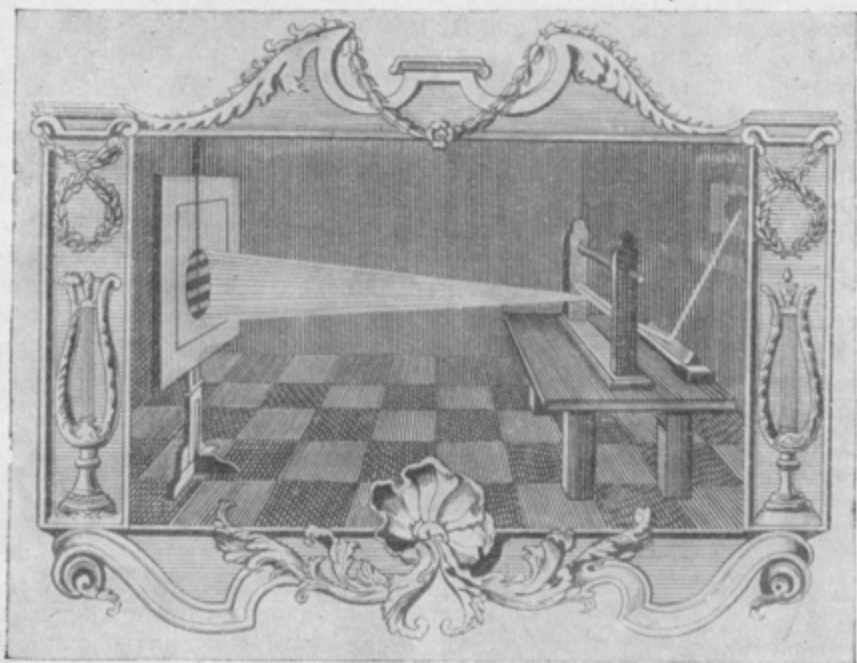


Рис. 6. Изображение установки для разложения солнечного света призмой в темной камере Кунсткамеры Петербургской Академии наук в первой половине XVIII в. (по рисунку академика Крафта)

произойдет, следовательно, при первом разложении в призме действительно выделено что-то постоянное. Цветность этого постоянного, простого цвета сама по себе, однако, снова ничего не говорит о природе света, она по-прежнему субъективна и относительна. Смешав, например, простой красный цвет с зеленым, получим желтый, похожий на один из простых лучей солнечного спектра; смешав зеленый с фиолетовым, получим синий и т. д. Глаз при этом не в состоянии отличить сложного цвета от простого, для этого нужна призма, или вообще спектральный прибор, пространственно разлагающий свет на простые цвета.

Именно это пространственное разделение простых цветов, а не их различная цветность, и дало Ньютону в руки первый объективный и количественный признак света, отвечающий его субъективной цветности. Пространственное разделение простых цветов получается, как показал Ньютон, вследствие их различной преломляемости в призме. Преломляемость можно связать с некоторым вполне определенным числом, показателем

преломления. Таким образом, наконец, Ньютону удалось вывести учение о цвете из неопределенности и путаницы субъективных впечатлений на прямую и прочную математическую дорогу.

После Ньютона дальнейшее изучение преломления света в разных телах обнаружило, что преломление сильно зависит от вещества, из которого сделана призма. В обыкновенных стеклянных и кварцевых призмах синие лучи преломляются больше красных, как в радуге, но если приготовить очень тонкую призму из твердых красок (например, фуксина), то можно получить спектры совершенно необычного вида, в которых красные лучи преломляются больше синих. Таким образом, показатель преломления оказался сложным признаком, зависящим одновременно от качества света и от качества вещества.

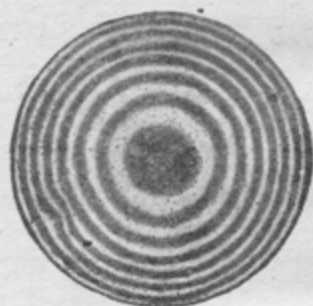


Рис. 7. Кольца Ньютона

Но тот же Ньютон открыл другое поразительное свойство простых лучей, которое позволяет определять их количественно совершенно независимо от природы вещества. Если положить очковое стекло с очень небольшой выпуклостью на стеклянную пластинку, то при освещении белым светом вокруг точки прикосновения линзы к стеклу появляется ряд концентрических радужных колец.

Вместо освещения белым светом Ньютон пробовал осветить линзу со стеклом простыми лучами, полученными от разложения солнечного света призмой. Тогда обнаружилась еще более удивительная картина. Если освещение производится, положим, красным цветом, то вокруг точки прикосновения линзы к стеклу появляются многочисленные, правильные, чередующиеся, концентрические, красные и черные кольца (рис. 7). Чем дальше от центрального темного пятна, тем теснее примыкают кольца друг к другу. Измерив радиусы темных колец, Ньютон нашел, что они относятся друг к другу, как корни квадратные из целых четных чисел, т. е. $\sqrt{2}:\sqrt{4}:\sqrt{6}:\sqrt{8}$.

Если убрать нижнюю стеклянную пластинку и поставить линзу на поверхность, не отражающую света, кольца исчезают. Необходимым условием появления колец, стало быть, как выяснил Ньютон, служит тонкий зазор (рис. 8) между линзой и стеклом. Нетрудно доказать геометрически, что толщины зазора, соответствующие местам светлых и темных колец, относятся, как последовательные целые числа. Наименьший зазор соответствует первому кольцу, остальные будут целыми кратными

этой длины. Если освещать линзу и стекло разными простыми цветами, ширина колец будет меняться; для красных лучей кольца самые широкие, для фиолетовых самые узкие. Каждому простому цвету соответствует своя ширина первого зазора. Какие бы линзы мы ни брали, из какого угодно материала, эта ширина остается постоянной для одного и того же цвета. Она меняется только в том случае, если зазор, вместо воздуха, наполнить какой-нибудь жидкостью. При этом ширина колец будет зависеть от показателя преломления жидкости.

Описанные несложные опыты Ньютона с линзой, которые очень нетрудно повторить (они проще даже опытов с призмой), по своим результатам совершенно удивительны. В самом деле, прежде всего они обнаруживают перед нами в световом потоке наличие какой-то правильной периодичности. Не менее поразительно затем, что, в то время как вся поверхность линзы равномерно освещается падающими лучами, в отраженном и в проходящем свете мы видим черные, т. е. не освещенные, кольца.

К объяснению этих явлений мы вернемся позднее. Сейчас важно установить, что каждый простой цвет на основании опыта с ньютоновыми кольцами можно связать с шириной зазора между линзой и стеклом, отвечающего первому темному кольцу. Вместо показателя преломления простой цвет количественно можно определить, следовательно, шириной этого первого зазора (см. рис. 8). Эту ширину мы будем, пока условно, называть длиной волны, обозначая греческой буквой λ . Длины волн видимого света, как показал впервые Ньютон, чрезвычайно малы, их выражают обычно в особых единицах — в миллимикронах ($m\mu$); миллимикрон равен миллионной доле миллиметра. Ньютон измерил, например, что цвету, лежащему на границе зеленой и синей частей солнечного света спектра, соответствует $\lambda = 492 m\mu$. Крайний красный цвет имеет длину волны приблизительно в 700 $m\mu$, крайний фиолетовый в 400 $m\mu$.

Полезно вдуматься в глубочайшее значение опытов Ньютона. Прихотливая, субъективная область цветовых явлений, в течение тысячелетий ускользавшая от упорядочивающегося стремления ученых, вдруг обнаружила свою количественную сущность и отныне стала вполне подчиненной точному научному анализу.

В то время как Ньютон занимался призматическими цветами и кольцами, в 1675 г. астроном Рёмер из астрономических наблюдений впервые определил скорость света и нашел величину, приблизительно равную (с современными поправками) 300 000 км/сек. На преодоление пути от Солнца до Земли свету требуется около 8 минут. Оптики древности,

основываясь на воззрении о зрительных лучах и считая, что свет идет от глаз к светилу, заключали, что скорость света должна быть необычайно большой. Можно сколь угодно быстро открыть глаза, и мы тотчас же увидим самую удаленную звезду. $300\,000\text{ км/сек}$ — черепашья скорость по сравнению с этой мнимой скоростью зрительных лучей. Если скорость зрительных лучей такова, то, открыв глаза, мы увидели бы Солнце только через 8 минут.

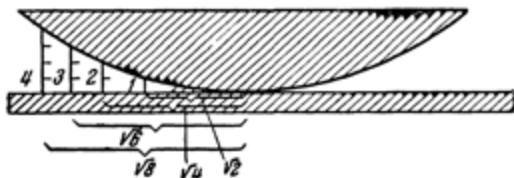


Рис. 8 Образование колец Ньютона

После Рёмера скорость света измерялась много раз различными способами, астрономическими и земными. В настоящее время она известна с очень большой точностью. Для пространства, в котором нет вещества, она составляет $299\,776\text{ км/сек}$. При этом за первые пять цифр можно поручиться полностью, и только последняя, шестая цифра известна недостоверно. Важно отметить, что в пустом пространстве скорость света не зависит от длины волны; она одинакова как для красных, так и для синих лучей. Это доказывается с громадной точностью тем, что при затмении удаленных звезд, например в случае захода одной из двойных звезд в тень другой, не происходит никакого заметного изменения цвета звезды. Если бы скорость различных простых цветов была хотя бы ничтожно разной, то при таком затмении необходимо происходила бы резкая перемена цвета звезды.

При распространении света в веществе, например в воде или в стекле, скорость его, наоборот, зависит от длины волны; в этом как раз состоит причина разложения света призмой в спектр. Наблюдая на небе радуго, мы воочию убеждаемся, что скорость распространения лучей разной цветности в водяных каплях разная. Определить эту скорость можно, если разделить скорость света в пустом пространстве на показатель преломления. Самый показатель преломления равен отношению скорости света в пустом пространстве к скорости света данной цветности в веществе.

Если скорость света разделить на длину волны, то мы узнаем число перемен, испытываемых световым лучом в секунду

ду, т. е. так называемую частоту света. Обозначим частоту буквой ν , скорость света c , длину волны λ . Тогда

$$\nu = \frac{c}{\lambda}.$$

Частота видимого света колоссальна: например, для желтого света с длиной волны в 600 м μ она равна полумиллиону миллиардов раз в секунду!

Отметим одно очень важное обстоятельство. Как мы говорили, скорость света обратно пропорциональна показателю преломления среды. С другой стороны, длина волны λ , как уже упоминалось при описании опытов Ньютона, тоже зависит от среды, в которой свет распространяется; ньютоновы кольца сжимаются, если воздух в зазоре между линзой и стеклом заменить водой. Длина волны, так же как и скорость, обратно пропорциональна показателю преломления среды. Следовательно, частное от деления скорости на длину волны света, т. е. частота ν , как видно из написанной формулы, не зависит от вещества. Стало быть, это очень важная количественная характеристика самого света, именно его свойства, отвечающего цветности.

Однако свет еще не полностью определен его скоростью и частотой. Из субъективных впечатлений мы знаем, что у света в очень широких пределах может меняться его яркость. Достаточно сопоставить мерцание светлячка и прямой свет Солнца, чтобы понять, каких огромных размеров могут достигать различия яркости.

Каков же физический смысл яркости света? На это в науке по-настоящему сумели ответить только после того, как выяснилось понятие энергии. Несомненно, что свет всегда несет с собою энергию, которая проявляется в действиях света, нагревании, в химических изменениях и т. д. Вообще узнать о наличии света мы можем только по его действиям, т. е. вследствие того, что он несет с собою энергию. Ощущение яркости и связано тесным образом с энергией световых лучей. Яркость простого «монохроматического» (одноцветного) луча тем больше, чем больше переносимая светом энергия.

Впрочем, глаз — очень плохой судья в вопросе об энергии света. В ночных условиях даже сияние светлячка кажется ослепительным, в дневных — глаз выдерживает сияние прямого света Солнца. С другой стороны, если сравнивать разноцветные лучи, то, например, красный луч с большей энергией будет казаться менее ярким, чем зеленый с энергией значительно меньшей. Следовательно, понятия энергии и яркости света взаимно связаны, но в то же время глубоко различны. Ввиду такой неопределенности для измерения энергии света оптик

прибегает в наше время к объективным физическим приемам измерения энергии.

Подведем некоторые итоги. Освободившись от произвола и сложности субъективных световых ощущений, мы можем теперь, на основании изложенных опытов и измерений, утверждать, что свет — это носитель энергии, распространяющийся в межзвездном пространстве со скоростью около 300 000 км/сек и обладающий периодическими свойствами. Попробуем все, что подходит под это определение, независимо от того, вызывает ли оно зрительные впечатления или нет, считать светом. Впоследствии мы увидим, что в такое определение придется вносить добавления и оговорки. Временно, однако, остановимся на нем.

Действительно, начиная с первых лет XIX в. физикам пришлось включать в область оптики все новые и новые широкие области «невидимых лучей», во множестве которых совершенно поблекла область видимого спектра. Ньютоновский солнечный спектр уходит обоими своими концами, красным и синим, в темноту. Кроется что-нибудь в этой тьме или нет? Глаз там практически ничего не видит.

В 1800 г. Гершель произвел очень простой опыт. Он поместил в темноту за красным краем солнечного спектра термометр с зачерненным кошцом. Оказалось, что термометр очень заметно нагревается, т. е. в этой области есть лучи, не видимые глазом, но вызывающие нагревание. Эти лучи были названы инфракрасными; удалось измерить длины их волн, доказать, что они распространяются с обычной световой скоростью и, следовательно, во всех отношениях соответствуют физическому определению понятия света. Инфракрасные лучи простираются очень далеко. В настоящее время удалось обнаружить лучи с длиной волны примерно в 0,3 мм. Они идут, следовательно, начиная от видимой красной границы в 750 мμ до (по крайней мере) 300 000 мμ. Но и здесь нет предела спектру. Те электрические волны, которые излучаются радиостанциями, также распространяются со скоростью 300 000 км/сек и обладают периодичностью; стало быть, и они должны рассматриваться как световые волны. Такие искусственные электрические волны могут быть получены с самыми различными длинами — от десятков километров до долей миллиметра.

Итак, от красной границы спектра можно непрерывно идти до практической бесконечности радиотелеграфных волн. Что делается, с другой стороны, за фиолетовой границей? Здесь, по крайней мере от обычных источников света, термометр заметно не нагревается, но если поместить туда фотографическую пластинку, то она при проявлении потемнеет. Так обнаруживаются невидимые ультрафиолетовые лучи. Можно обнаружить их и другими способами. Под действием этих лучей мно-

гие тела начинают светиться видимым светом (люминесценция), становятся электропроводными или испускают электроны (фотоэлектричество). Область ультрафиолетовых лучей обычно считают от видимой фиолетовой границы (довольно, впрочем, неопределенной — около 400 м μ) далеко в область коротких волн, по крайней мере до 10 м μ . На этом, впрочем, спектр не кончается; далее следуют лучи, открытые в конце прошлого века Рентгеном и обладающие, как мы теперь знаем, всеми свойствами световых лучей. Они, так же как и ультрафиолетовые лучи, действуют на фотографическую пластинку, вызывают видимую люминесценцию и производят электрические действия. К лучам Рентгена (в соответствии с практическими методами получения) относят волны примерно от 10 до 0,1 м μ . Но и это еще не конец светового спектра. За лучами Рентгена следуют лучи с волнами еще более короткими, так называемые гамма-лучи, испускаемые радием и другими радиоактивными веществами. Нет оснований указать какую-либо границу гамма-лучей. Известны гамма-лучи с длиной волны короче 0,001 м μ .

Можно сказать, что в природе существуют световые лучи со всевозможными длинами волн, начиная от бесконечно больших (практически) до бесконечно малых (также практически). Ничтожный участок видимых лучей (от 400 до 700 м μ) тонет в этом многообразии.

У света есть и другие замечательные свойства, о которых мы пока не говорили. Сделаем такой опыт (рис. 9, а). В стеклянный сосуд нальем слегка взмученную (например, каплей молока) воду и пустим в нее прямой солнечный луч. В такой взмученной воде след пучка света будет ясно виден вследствие рассеивания света частичками. На первый взгляд кажется само собой разумеющимся, что во все стороны свет должен рассеиваться одинаково, будем ли мы смотреть сверху на след пучка или сбоку. В случае прямого (обыкновенного) пучка солнечного света это действительно так.

Теперь сделаем второй опыт. Пустим прямой луч предварительно на стекло под углом примерно 54° (луч перпендикулярен плоскости чертежа), а потом в сосуд с взмученной водой (рис. 9, б). Внимательно осмотрев со всех сторон след светового пучка в сосуде, мы заметим поразительное явление: если смотреть сбоку, рассеяние света очень большое (сравнительно яркая светлая полоса), сверху же нет почти никакого рассеяния, следа пучка в воде не видно. Свет, отраженный от зеркала, получил новое, очень странное свойство: вверх и вниз он не действует, а действует только в стороны. В поперечном сечении пучка появляются преимущественные направления действия, возникает полярность. Подобно тому как в палочном магните максимум действия идет по линии, соединяющей полюсы

магнита, а в направлении, отвесном к этой линии, действия почти нет, так и здесь наибольшее действие света сосредоточивается в горизонтальном направлении. Описываемое свойство света (но в более сложном случае так называемого двойного лучепреломления исландского шпата) было впервые названо Ньютоном, по аналогии с магнитом, полярностью света. В обыкновенном пучке света присутствует смесь лучей, поляризованных во всевозможных направлениях; поэтому поляризация и не обнаруживается. При отражении от стекла преимуще-

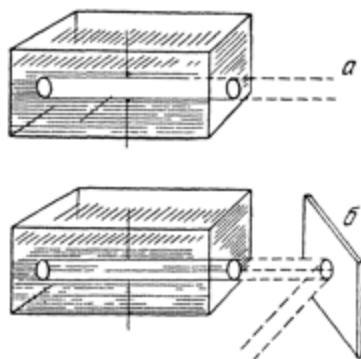


Рис. 9. Поляризация света при отражении

ственно отражаются лучи с определенной поляризацией, поэтому последняя становится заметной. Свойством поляризации обладают не только видимые лучи, но вообще все лучи, которые мы называем световыми, начиная от радиолучей и до лучей гамма.

Глаз у большинства людей не отличает поляризованного света от неполяризованного. Но примерно 25—30% людей обладают этим свойством, хотя почти никогда об этом и не подозревают. При

наблюдении поверхности, излучающей поляризованный свет, такие люди могут заметить в середине поля зрения полосу слабо желто-лимонного цвета, имеющую вид слегка изогнутого снопа колосьев. Если плоскость поляризации света поворачивается, то одновременно поворачивается и указанная полоска в глазу. При некоторых положениях Солнца на небе свечение неба, возникающее вследствие рассеяния солнечных лучей в атмосфере, оказывается сильно поляризованным, и тогда человек, обладающий названной способностью, видит на фоне неба слабую, желтую, снопообразную полосу.

Редким примером тонкой наблюдательности великого художника могут служить строки из «Юности» Л. Н. Толстого, в которых он, по-видимому, совершенно не подозревая физического смысла явления, в 1855 г., в то время, когда и в науке оно было известно немногим (оно впервые описано в 1846 г. Гайдингером), с полной ясностью описал желтое поляризационное пятнышко на фоне неба¹. В XXXII главе «Юности» можно

¹ См. заметку Б. И. Пилипчука «О юношеской наблюдательности Л. Н. Толстого». «Природа», № 2, 92, 1945.

прочитать такие строки: «...я невольно оставляю книгу и взгляды ваюсь в растворенную дверь балкона, в кудрявые висячие ветви высоких берез, на которых уже заходит вечерняя тень, и в чистое небо, на котором, как смотришь пристально, вдруг показывается как будто пыльное желтоватое пятнышко и снова исчезает».

Очень рекомендуем читателю проверить свои глаза и постараться заметить желтую поляризационную полоску на небе. Таким образом можно убедиться, по крайней мере некоторым из читателей, что их глаза обладают свойством, о котором они ранее не знали. Наблюдение лучше производить в свете, отраженном от стекла, задняя поверхность которого зачернена. Под некоторым углом падения и отражения такая пластинка довольно значительно поляризует свет.

За последние десятилетия найдены способы массового изготовления сколь угодно больших прозрачных пленок, полностью поляризующих свет. Один из видов такого «поляроида» изготавливается на основе пластической массы — винилового спирта. Тонкая пленка винилового спирта, натянутая в одном направлении, подвергается действию паров иода и после этого приобретает свойство полностью поляризовать свет. В настоящее время поляроиды широко применяются в лабораторной практике, в технике, в области фотографии. Если посмотреть на любую освещенную поверхность, на небо, на стену через поляроид, то всегда будет видна желтая сноповидная полоска, если только глаза наблюдателя обладают соответствующим свойством. При повороте поляроида полоска тоже вращается.

К физическому объяснению поляризации света мы скоро вернемся; сейчас же обратимся к другому замечательному свойству света.

Свет в однородной среде идет по прямым линиям, небольшая преграда на пути от источника света к глазу закрывает источник. На этом основании еще древние создали стройную науку — геометрическую оптику. Однако это не всегда верно. Посмотрите на яркую светящуюся лампу, находящуюся от вас на расстоянии 20—40 м, через два пальца, довольно тесно прижатых друг к другу, так, чтобы между ними оставалась очень узкая щель. Через такую щель вы увидите вместо светящейся точки длинную полосу, поперечную щели. Эта полоса состоит из яркой точки в середине и из чередующихся боковых темных и радужных светлых полос — спектров. Ни о какой прямолинейности распространения света в таких условиях не может быть и речи. Это явление было, конечно, знакомо людям с доисторических времен; при всяком прищуривании глаз вследствие наличия ресниц обнаруживаются такие нарушения прямолинейности света, что известно, и особенно хорошо, детям. Однако

впервые на это явление и его важность было указано только в XVII в. Гримальди.

На рис. 10 приведены, по опытам В. К. Аркадьева, пять фотографий тени руки, держащей тарелку. Первая фотография (слева) получена при таких условиях: расстояние от светящейся точки до руки a было около 2 м, расстояние b от руки до экрана, на котором получалась тень, около 1 м. На второй фотографии $a + b$ выбиралось эквивалентным 2 км, на третьей — 7 км, на четвертой — 29 км, на пятой — 235 км. В то время как на первой фотографии тень вполне отчетлива, на следующих она постепенно принимает крайне причудливый вид: в центре тени тарелки получается отчетливое светлое пятно, тень руки испещряется темными и светлыми полосами; о строгой прямолинейности света, стало быть, здесь не может быть и речи. По законам геометрии прямолинейные лучи от малого источника света на таком расстоянии должны были бы дать безукоризненно правильную тень.

Следовательно, проходя сквозь узкие щели и обходя малые предметы, свет огибает их. Гримальди назвал это явление дифракцией. Ньютон, по обычаю своему, тщательно исследовал явление и установил, что дифракция совершенно не зависит от того, из какого материала сделана щель или огибаемый предмет и, следовательно, отвечает основному свойству самого света.

Впоследствии было доказано, что дифракция существует у всех лучей по всему спектру от радио до лучей Рентгена. Чем меньше длина волны, тем уже должны быть отверстия и предметы, при помощи которых отклонения от прямолинейности и дифракция становятся заметными.

Мы рассмотрели несколько важнейших свойств света, обнаруженных на опыте: периодичность, скорость, поляризацию, дифракцию. Все эти свойства, вместе взятые, явно подсказывают объединяющую мысль о свете как волновом потоке с поперечными колебаниями. Временно воздержимся, однако, от таких обобщений, отложив их до окончательного ознакомления со всеми основными свойствами света. Известны еще и другие свойства, о которых мы до сих пор ничего не говорили.

Свет всегда исходит от вещества, рождается в веществе и, поглощаясь, исчезает в веществе. Встреча света с веществом всегда сопровождается взаимодействиями. С одной стороны, вещество отражает, преломляет, поглощает свет, может поворачивать плоскость его поляризации. Действие вещества на свет начинается еще на расстоянии. Лучи звезд, проходя около Солнца на расстояниях в миллионы километров, заметно отклоняются, как бы притягиваются к Солнцу, и в результате звезды кажутся нам смещенными на небесном своде. С другой стороны,

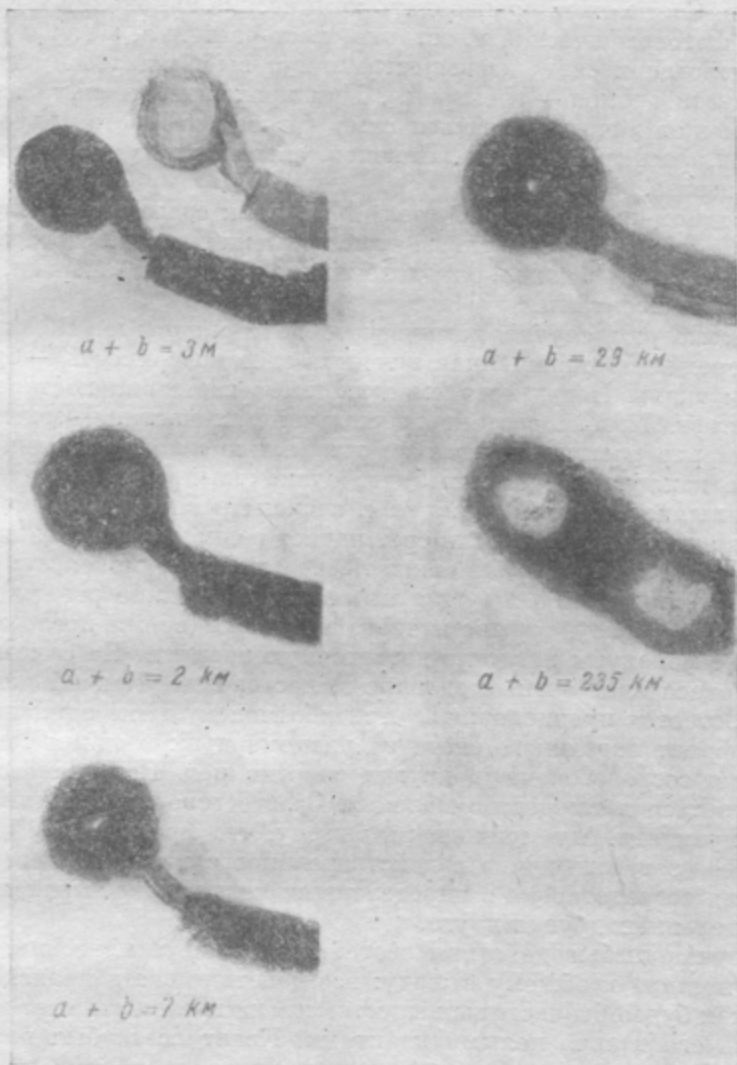


Рис. 10. Дифракция света при прохождении около непрозрачного предмета (опыт В. К. Аркадьева)

свет, встречая вещество, проявляет разнообразные действия. Свет давит на вещество, хотя это давление и крайне незначительно. Свет может производить химические изменения в веществе (фотографическая пластинка, лист растения, загар и пр.). Под действием света из вещества могут выбрасываться составные части атомов — электроны. При прохождении света вещество может начать светиться само (рассеяние света, флуоресценция, фосфоресценция). Наконец, свет, поглощаясь, нагревает вещество.

В самом начале нашего века М. Планк сделал многозначительное открытие. Оказалось, что свет может поглощаться и излучаться лишь вполне определенными порциями энергии, названными квантами.

Рассмотрим случай химического действия света. Положим, что перед нами окрашенная в тонком слое поверхность — бумага или ткань. Под действием солнечного света она постепенно выцветает. Краска состоит из мельчайших частиц — молекул, равномерно распределенных по ткани. Все молекулы одинаковы, на каждую падает как будто одинаковый свет, между тем ткань выцветает постепенно, т. е. сначала распадается одна молекула, потом другая. Если свет падает равномерно и молекулы одинаковы, следовало бы ожидать, что либо все молекулы разложатся сразу, либо ни одна не разложится, либо разложение произойдет сразу, взрывом, через некоторое время после того, как все молекулы поглотят достаточную энергию. На самом деле процесс идет очень медленно и постепенно. Как объяснить это? Остается предположить, что либо молекулы не одинаковы, либо фронт падающего света не равномерный: в одних точках энергия сосредоточена, в других энергии нет. Нет оснований сомневаться в тождестве молекул. За это говорит вся химическая практика. Мы приходим к выводу, что фронт якобы однородного светового пучка в действительности не однороден. Его энергия сосредоточена в определенных центрах, пространственно отделенных друг от друга.

Изучая любые действия света, не только химические, физики пришли к общему выводу: все действия света происходят так, как будто бы частицы вещества могли поглощать свет и излучать его только целыми квантами. Квант света был назван также **ф о т о н о м**.

Если освещение происходит однородным простым светом с частотой ν раз в секунду, то величина кванта равна $h\nu$, где h — всегда постоянная, очень малая величина ($6,62 \cdot 10^{-27}$, т. е. 6,62, деленное на единицу с 27 нулями). С этой точки зрения постоянное выцветание ткани становится вполне понятным. Энергия светового потока не распределена повсюду равномерно и непрерывно, она сосредоточена в некоторых центрах —

квантах. Разлагаются только те молекулы вещества, которые встретили летящие кванты света. В некоторых случаях можно рассуждать так. Если за определенное время веществом поглощена энергия E , то количество разложившихся молекул получится делением этой энергии на энергию кванта

$$N = \frac{E}{h\nu}.$$

В простых случаях химического разложения под действием света это заключение хорошо подтверждается опытом. Прерывный, квантовый характер действия света проявляется всюду: при нагревании вещества, при электрических действиях света, при флуоресценции и т. д. Особенно замечательно, что при очень слабых световых потоках человеческий глаз также замечает прерывность световой энергии. К этому мы вернемся в последней главе книги.

Для лучей радио частота ν относительно очень мала, поэтому квант $h\nu$ ничтожно мал; в этом случае крайне трудно уловить прерывный характер действий. Наоборот, для лучей Рентгена, имеющих очень большую частоту, квант велик, и здесь квантовые действия света особенно резки и отчетливы.

К нашему списку основных свойств света прибавилось, таким образом, новое важнейшее свойство, трудно совместимое с другими, ставшими ранее известными световыми признаками. Еще не исчерпав изложения всех известных до настоящего времени основных свойств света, перейдем, однако, к попыткам объяснения физической сущности света. Это несколько облегчает понимание и запоминание явлений.

Издавна рождались и умирали различные догадки о природе света. Многие из них были совершенно беспочвенными, так как судили, в сущности, неизвестно о чем: о явлении, свойства которого были скрыты; смешивали зрение со светом; в результате возникали странные теории о зрительных лучах, о которых была речь во введении. Были, впрочем, и догадки, довольно близкие к теперешним теоретическим взглядам.

Свет несет от Солнца к Земле через огромные пространства энергию. Знали или, вернее, чувствовали это и древние.

Как можно передать энергию на расстояние? Способов не так много. Самое простое — перебросить энергию вместе с веществом с одного места на другое. Выстрел — это перенос разрушительной энергии пороха от стрелка к цели, энергия переносится летящей пулей. Можно переносить энергию с веществом непрерывным потоком, лавиной, но это, в сущности, одно и то же. И тут и там вещество странствует вместе с энергией. Но есть и другой способ. Морская волна, поднятая ветром, несется вдаль и, наконец, обрушиваясь, отдает свою энергию. Но если

присмотреться к волнам, то легко заметить, что волна несется, а вода ею не увлекается, она только колеблется на одном месте вверх и вниз. Энергия передается от слоя к слою без передвижения вещества. Точно так же распространяется энергия звука в воздухе. Звуковая волна — это не ветер, а последовательное колебание слоев воздуха. «Если бы от струн, — рассуждает Ломоносов в своем «Слове о происхождении света», — так скоро двигался проходным течением воздух, как голос, т. е. больше 1000 футов в секунду, то бы от такой музыки и горы с мест своих сдвинуты были». Для передачи энергии на расстояние волнами нужна промежуточная среда, в наших примерах — вода и воздух; в безвоздушном пространстве звук не распространяется. Иных способов передачи энергии мы не знаем. Значит, свет, несущий энергию от Солнца к Земле, должен быть либо потоком частиц, либо системой волн в некоторой среде, либо тем и другим сразу. Эти воззрения существовали в разных формах и у древних. Неизбежно воскресли они и в новой физике при попытках связать все разнообразные свойства единым образом.

Ньютон стремился не смешивать домыслов с достоверностями, предположений с фактами, но в особо выделенных местах своих сочинений он много раз возвращался к вопросу о природе света, склоняясь к теории истечения. Главным его доводом против теории волн было отсутствие вещественной среды — «эфира» в мировом пространстве. В самом деле, планеты движутся совершенно регулярно, не встречая никакого заметного сопротивления или трения в окружающем их пространстве; следовательно, между планетами и Солнцем нет оснований предполагать наличие вещественной среды, которая необходима для распространения волн. Как в сосуде, из которого выкачан воздух, звук перестает существовать, так и механические колебания светил не могут превратиться в волны «пустого» мирового пространства. По Ньютону, более вероятно предположение, что свет — это поток мельчайших частиц вещества.

Периодичность, по Ньютону, можно объяснить, например, тем, что частицы вращаются. Пространство, пробегаемое такой частицей — корпускулой — за время ее одного оборота, и будет «длиной волны». Поляризацию Ньютон считал свойством только твердых частиц, видя в наличии ее у света доказательство того, что свет состоит из твердых корпускул. Огибание, дифракцию, Ньютон пытался истолковать отталкивательными и притягательными действиями вещества на свет.

Но в собственном экспериментальном наследстве Ньютона скрывалось тяжкое затруднение для его механической теории световых частиц. Вернемся к опыту с ньютоновыми кольцами (стр. 21). Не приходится сомневаться в том, что эти кольца возникают в результате взаимодействия, встречи (интерференции)

двух лучей, отразившихся от верхней и нижней границ, ограничивающих зазор между линзой и стеклом. Рассмотрим два таких луча (рис. 11)

Луч 1 отражается от первой границы, создавая отраженный луч 1, луч 2, преломляясь на первой поверхности, отражается от второй и попадает снова в линзу. Такие встречающиеся, «интерферирующие», лучи и дают при своем взаимодействии постоянную картину ньютоновых колец. Представим себе теперь, по Ньютону, что лучи 1 и 2 — это пути световых частиц, беспорядочно вылетающих из источника света. Обе частицы совершенно независимы друг от друга. Если мы применим очень слабое освещение, то должны достигнуть, наконец, такого состояния, что вероятность одновременного прохождения частиц по пути 1 и 2 станет ничтожной. Если прав Ньютон, то в таком случае кольца должны исчезнуть: частицам не с чем взаимодействовать, интерферировать. Между тем опыт с кольцами удается с тем же результатом при сколь угодно малых интенсивностях. Можно, например, выбрать такое слабое освещение, что для фотографирования колец Ньютона потребуется несколько дней, и тем не менее кольца получаются такими же отчетливыми, как и при ярком освещении.

150 лет должны были пройти, прежде чем было показано, что опыты с кольцами и аналогичные интерференционные явления без всяких затруднений объясняются, если только допустить, что свет есть волновое движение. В самом деле, волна распространяется от светящейся точки во все стороны и при любой интенсивности на всех своих участках несет какую-то энергию, следовательно, лучи 1 и 2 всегда могут интерферировать. Кроме того, теория волн предсказывает вполне точно и результат интерференции: если разность хода двух лучей 1 и 2 при встрече такова, что впадина одной волны как раз приходится на гребень другой, то в этом месте волны как бы гасят одна другую, получается темное кольцо; наоборот, в соседнем участке, где сходятся гребни обеих волн, получается взаимное усиление, т. е. светлое кольцо.

С таким же успехом новая теория световых волн объяснила все тонкости дифракции, предсказывая факты, всегда безупречно оправдывавшиеся на опыте. Поляризация света в теории волн также получила ясное толкование. Явление поляризации показывает, что световые волны поперечны, т. е. колебания совершаются отвесно к направлению луча, точно так же как в водяных волнах на поверхности пруда. В неполяризованных лучах колебания происходят в любых направлениях вокруг луча (рис. 12), в поляризованных — только в одном направлении.

Волновая теория в первой половине XIX в. победила теорию истечения Ньютона безукоризненной качественной и количест-

венной точностью своих предсказаний. Но насколько прочна была эта победа? Вспомним, что для Ньютона главным доводом против теории волн было отсутствие механической среды — эфира в межпланетном пространстве. Устранили ли этот довод Юнг и Френель? Нет, для них именно волновые свойства света казались доказательством бытия эфира. В течение всего XIX в. физики тщетно стремились найти прямые доказательства существования эфира. В особенности роковыми для эфира оказались

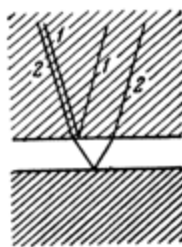


Рис. 11. Прохождение лучей в опыте Ньютона с интерференционными кольцами

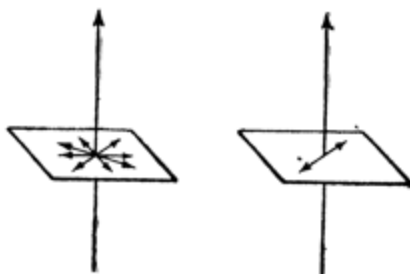


Рис. 12. Колебания в неполяризованном и поляризованном свете

опыты с распространением света в движущихся телах. Если существует неподвижная механическая среда, в которой распространяются световые волны, то, например, годичное движение Земли вокруг Солнца должно сопровождаться своего рода «эфирным ветром», влияющим на оптические явления. На опыте такого «ветра» не оказалось. Следовательно, либо эфира нет, либо он обладает совершенно особыми, не механическими свойствами.

Несмотря на это, волновая теория света получила поддержку, совсем неожиданную, в области электрических и магнитных явлений. На опыте было показано, что электрические и магнитные возмущения распространяются со скоростью света; при этом связь электрических и магнитных состояний такова, что в пространстве при некоторых условиях должны распространяться электромагнитные волны. Эти волны, предсказанные теоретически Максвеллом, были обнаружены на опыте Г. Герцем. А. С. Попов нашел впервые способ претворить электромагнитные волны в могучее средство для сигнализации на дальние расстояния и таким образом положил начало радио. П. Н. Лебедев и другие исследователи показали, что электромагнитные волны обладали всеми известными тогда признаками света — они отражались, преломлялись, поляризовались, обнаруживали дифракцию. Таким образом было открыто еще новое свойство

света — он оказался электромагнитным явлением. Это объяснило взаимодействия света и вещества. Вещество, как мы хорошо знаем теперь, построено из электрически заряженных частиц, положительных ядер и отрицательных электронов, расположенных на периферии атомов. Всякое движение этих частиц должно порождать электромагнитные волны, т. е. свет. Наоборот, электромагнитные волны, падая на атомы и молекулы, раскачивают заряженные частицы, энергия волн рассеивается и поглощается.

Вернемся теперь к затруднениям с эфиром. В механической теории световых волн эфир совершенно обязателен; без среды, без эфира не может и существовать механических волн, так же как не может быть звука без воздуха или другой среды. Но с тех пор, как было доказано, что световые волны — электромагнитные, положение круто изменилось. Независимо от того, есть эфир или нет, мы знаем из прямых и хорошо известных опытов, что вокруг заряженных тел существует электрическое поле. Если заряд начинает двигаться, то, по законам электромагнетизма, в пространстве обязательно появятся электромагнитные волны. Они должны существовать, поскольку существует электрическое поле.

Позволительно, конечно, задать вопрос, а можно ли само электрическое поле объяснить без эфира? На это приходится ответить только одно: бесчисленные попытки, начиная с попыток самого Максвелла, вывести законы электричества и магнетизма на основе представления о механическом эфире оказались до сих пор тщетными.

Независимо от этого, как уже было отмечено, волновая теория света на электромагнитной основе к концу XIX в. была доказана, казалось, с несомненностью, а возражение Ньютона об отсутствии эфира потеряло значение, как только стало ясно, что световые волны не механические.

Волновая теория торжествовала, казалось, окончательную победу. В оптике все было «приведено в порядок». Но торжество оказалось очень кратковременным. Не прошло и пяти лет со времени открытия радио, как выяснились квантовые законы действия света (стр. 31), непостижимые с волновой точки зрения. Как может энергия поглощаться целыми порциями, если она подводится непрерывными волнами? С тех пор прошло больше 30 лет, а недоумение осталось прежним; волновая теория не может ответить на этот вопрос и теперь.

Волновая теория беспомощна перед квантовыми законами действия света. Это неудобное положение таково, что снова приходится вспомнить Ломоносова, который по адресу теории истечения сказал: «Неудобность часто живет в соседстве с невозможностью».

С другой стороны, именно «невозможная» теория истечения снова получила шансы на признание. Для нее нет эфирных затруднений: световые корпускулы летят в пустоте, для них не нужен эфир. Квантовые законы также вполне согласуются с воззрением Ньютона. Молекулы поглощают свет целыми квантами, потому что к ним подлетает либо целая корпускула, либо ничего; поэтому при химических превращениях под действием света разлагаются не сразу все молекулы, а только те, на которые попал квант — корпускула.

Уменьшая яркость волн, мы уменьшаем их размах, напряженность, а ослабляя поток корпускул, мы оставляем действие каждой корпускулы прежним, уменьшая только число корпускул. Квантовые законы действий света в теории истечения значат только то, что свет распространяется целыми квантами — корпускулами.

Но в то же время воскресшая теория истечения по-прежнему не может объяснить интерференции, дифракции и других свойств света, где автоматически все затруднения разрешает теория волн.

Положение, создавшееся в оптике, было совершенно нетерпимым, и физик имел все основания повторять горестную фразу Ломоносова, приведенную в начале этой главы и сказанную именно по поводу теории света. Два совершенно различных воззрения на природу света властвовали каждое в своей области и оставались бессильными в соседней.

Проблеск разрешения трудности появился с неожиданной стороны. Вспомним, как мы пришли к выводу о возможности только двух представлений о свете. Мы основывались на привычных повседневных наблюдениях, показывающих, что механическая передача энергии происходит только двумя способами: посредством частиц или посредством волн. Мыслимо, конечно, сочетание того и другого, но этими возможностями и исчерпывается все, что удастся «представить» и «понять».

Классическая механика, созданная, так же как и оптика, Ньютоном, есть математическое обобщение нашего привычного опыта, и выводы ее, в смысле возможных способов передачи энергии на расстояние, ничем не отличаются от наших простых заключений. Так называемая «классическая физика» характеризуется уверенностью, что в законах Ньютона найдена полная истина, сомневаться в которой невозможно. На основе этой уверенности возникло «механистическое» естествознание, стремившееся объяснить все явления природы движением частиц, связанных некоторыми силами и подчиняющихся законам Ньютона.

Основой уверенности в непогрешимости этих законов была, во-первых, их понятность, полное соответствие нашим привычным, вненаучным представлениям, во-вторых, — огром-

ный у с п е х классической механики во всех областях естествознания и техники. Между тем эти доводы в пользу законов Ньютона далеко не безупречны. «Понятным» мы называем то, что соответствует нашим привычкам. Мы сравниваем, например, летящий атом с летящей пулей, объясняя или поясняя себе образ атома посредством более привычного образа пули. Но всякому ясно, что в действительности пуля безмерно сложнее атома, и наше «объяснение» сводит более простое к более сложному, но привычному. «Понятность» тех или иных законов и явлений еще не залог их действительной простоты и достоверности. С другой стороны, человек исторически развивается, меняются его навыки, и бывшее ранее непопаятым становится постепенно очевидным. Наши привычные представления во многом соответствуют действительному ходу явлений, и по мере развития человек все ближе подходит к постижению истины, однако говорить о полном совпадении наших представлений с абсолютной истиной значило бы отрицать другую бесспорную истину о развитии человека. Короче говоря, уверенность в механистичности природы и в непреложности законов Ньютона покоится, в сущности, на очень зыбком фундаменте «привычки».

Кажущиеся непреодолимыми внутренние противоречия были обнаружены на переходе от XIX в. к XX в. не только в световых явлениях, но и в свойствах вещества. Масса тел оказалась зависящей от их скорости, потребовался пересмотр даже понятий о пространстве и времени. Нашлись физики и философы, заговорившие о «дематериализации» материи, о том, что «материя исчезла — остались одни уравнения». Последовательно проводимый механистический, метафизический материализм, натолкнувшись на трудности и противоречия, дал для некоторых ученых повод к перемещению позиций на противоположные, к ясному или замаскированному переходу в туманы идеализма и мистицизма. Этому способствовала вся социальная обстановка капиталистического мира, приближающегося к своему концу; идеалистический туман — это одна из дымовых завес, скрывающих от передового человечества насилие, обман и неустойчивость капиталистического общества.

Но метафизический материализм, воплощением которого пытались представить «классическую физику», и порожденный им новый физический идеализм были преодолены мировоззрением диалектического материализма. Проникновенный анализ новой физики с точки зрения позиций диалектического материализма дал В. И. Ленин в гениальной книге «Материализм и эмпириокритицизм», появившейся в 1909 г.

Основные особенности диалектического метода изучения природы состоят в том, что природа рассматривается как

связное, единое, целое, находящееся в состоянии непрерывного движения и изменения. «Любое явление в любой области природы может быть превращено в бессмыслицу, если его рассматривать вне связи с окружающими условиями, в отрыве от них», — пишет И. В. Сталин в своей работе «О диалектическом и историческом материализме». «...В противоположность метафизике диалектика исходит из того, что предметам природы, явлениям природы свойственны внутренние противоречия, ибо они все имеют свою отрицательную и положительную сторону, свое прошлое и будущее, свое отживающее и развивающееся»¹.

В. И. Ленин в своей книге «Материализм и эмпириокритицизм» показал, что метафизическое, механистическое учение о материи должно быть заменено широким живым диалектическим понятием материи как объективной реальности. В это понятие материи не может не войти любое свойство природы с его противоречиями и сложностями, если оно действительно существует.

С этой точки зрения вскрытое в итоге развития оптики «непреодолимое» противоречие волновых и корпускулярных свойств в световых явлениях есть новое выражение диалектики природы, реального единства противоположностей. Упрощенные механические представления классической физики о непрерывных волнах и прерывных частицах, якобы исключаящих друг друга, в действительных явлениях природы уживаются одновременно. Это непривычное для нас противоречивое единство свидетельствует только о недостаточности и примитивности нашей механической картины.

Материя действительного мира бесконечно сложнее упрощенных метафизических образов, возникших у нас в силу привычки и длительного обыденного опыта.

Ход науки подтвердил справедливость этого. Успех классической механики, связанный с необычайным расцветом техники опыта, привел в конце концов к бессилию и беспомощности ее перед новыми фактами.

Существующий материальный мир — движущаяся материя — представляется нам в двух основных формах — как **вещество** и **свет**. Постепенно окрепло убеждение, что вещество во всем своем многообразии построено из отрицательно заряженных электронов, положительно заряженных протонов и нейтронов, не имеющих заряда. Вещество казалось поэтому более понятным, чем свет, в котором одновременно обнаруживались свойства и волн и частиц. В то время как неотделимое свойство света — его движение, и мысль о «неподвижном свете» кажется абсурдом, механическая физика вполне примирилась

¹ И В Сталин Вопросы ленинизма Изд 11, стр 536, 539.

с «покоящимся веществом». Волна немислима без движения. Если физик и говорит о «стоячих волнах», то он разумеет при этом результат сложения двух волн, бегущих навстречу одна другой. Наоборот, отдельно взятую частицу можно представить вполне неподвижной. Однако такая форма материи, лишенной движения, т. е. ее неотъемлемого свойства, чистая абстракция с точки зрения диалектического мировоззрения. Она действительно оказалась таковой, как это показали новые, совсем неожиданные и удивительные ответы. В опытах, произведенных впервые около четверти века назад, было обнаружено, что поток электронов, протонов и молекул, встречая малые препятствия и отверстия, дает такие же отчетливые дифракционные явления, как и свет, т. е. обладает теми же основными свойствами волн.

На рис. 13 приведен образец дифракционной картины, получающейся при прохождении электронов через очень тонкий слой серебра, состоящий из микроскопических кристалликов. Дифракция здесь не менее отчетлива, чем в случае света, и столь же убедительно свидетельствует о волновой природе электронов, т. е. вещества.

В настоящее время длина этих «волн вещества» измеряется с большой точностью и оказалась равной h/mv . Здесь h — та же постоянная величина, с которой мы уже встречались в свойствах света (стр. 31), m — масса частицы и v — ее скорость.

Можно предполагать, что не только элементарные частицы — электроны, атомы и молекулы — соответствуют волнам; имеются основания утверждать, что любое отдельное скопление вещества, будет ли то человек, трамвай или Солнце, характеризуется подобающей его массе и скорости волной.

Во всей истории точного естествознания трудно указать другое открытие, которое было бы столь же непредвиденным и так же резко порывало бы с нашими привычными представлениями.

С механикой случилось то же, что и с оптикой. Древнее учение о свете считало пучок света сплосом прямолинейно распространяющихся лучей, но явления дифракции заставили понять, что свет есть волновое движение, которое в отсутствие малых препятствий и отверстий на пути действительно ведет себя так же, как пучок лучей. За кажущейся лучевой геометрической оптикой скрывалась волновая оптика. Механика Ньютона была «лучевой механикой», но открытия нашего времени показали, что за ней скрывается более общая «волновая механика».

Не следует, впрочем, отождествлять «волны вещества» с волнами света. Мы видели, что световые волны имеют электромагнитную природу, чего нельзя сказать относительно волн вещества. Последние органически совпадают с самим веществом,

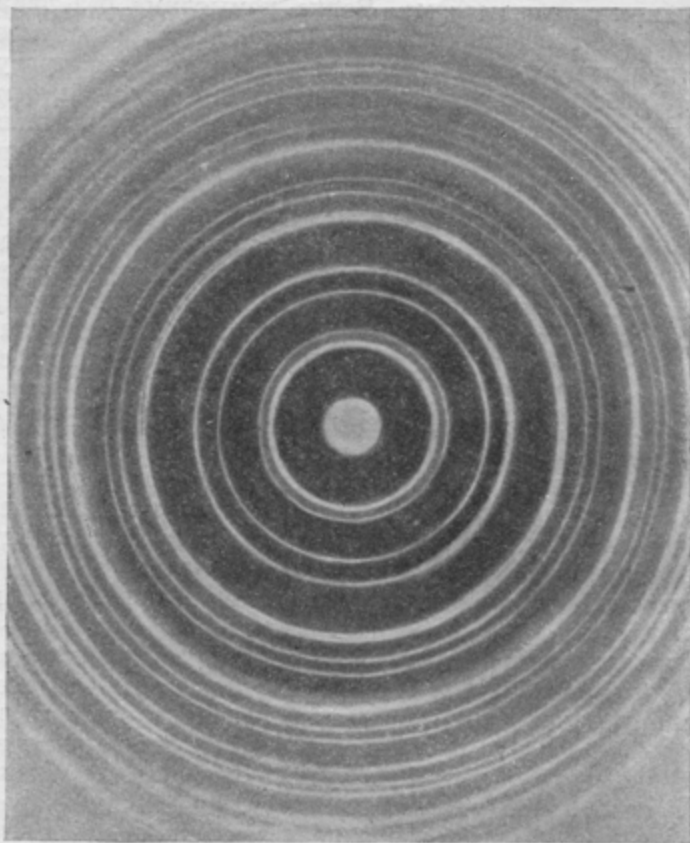


Рис. 13. Дифракция электронов при прохождении через очень тонкий слой серебра

с его частицами, в то время как световые волны излучаются, отдаются веществом и имеют совсем другие свойства.

Ошибочно думать также, что теория частиц сменилась более верной теорией волн. Существование частиц материи, атомов и электронов в веществе, квантов в световом потоке столь же достоверно, как и существование волн вещества и света. Были попытки представить материю как механическое сочетание частиц и волн, причем волны должны в этой схеме играть роль только рулевого или пилота, направляющего частицу туда, куда следует по законам распространения волн. На первый взгляд возможно обратное механическое предположение, что волны вызываются частицами в эфире, подобно тому как корабль оставляет волны за кормой. Эти предположения,

однако, в своих выводах полностью расходились с действительностью.

Весьма распространено мнение, что в опытах одного типа (например, в опыте с кольцами Ньютона) свет полностью ведет себя как волновое движение, а в опытах другого типа (например, выцветание окрашенной ткани) свет целиком проявляет себя как поток частиц. Это, однако, ошибочно.

Если опыт Ньютона производить с чрезвычайно слабым светом, то при некоторых условиях есть возможность наблюдать статистические беспорядочные колебания яркости светлых колец, свидетельствующие о том, что энергия света и в этом типично волновом явлении сосредоточена в отдельных центрах фотона. С другой стороны, если освещать окрашенную ткань через узкие отверстия, то при выцветании обнаруживаются дифракционные явления.

Материя, т. е. вещество и свет, одновременно обладает свойствами волн и частиц, но в целом это не волны и не частицы и не смесь того и другого. Наши механические понятия не в состоянии полностью охватить реальность, для этого не хватает наглядных образов.

Формальная математическая теория света, хотя и не вполне совершенная, в настоящее время создана, она охватывает почти весь круг известных явлений. Эта теория остается, однако, крайне отвлеченной и «непонятной» (в смысле отсутствия наглядных образов).

Теперь уместно вернуться к затруднению, с которым пришлось встретиться в начале этой главы. Читатель, вероятно, не забыл, что мы столкнулись с неясностями в самом определении предмета учения о свете. Прояснился ли этот вопрос теперь? Принципиально — да. Постепенно были установлены основные объективные свойства света, отличающие его от других видов материи. Но практическое применение различающих признаков, особенно в их совокупности, до сего времени иногда связано с трудностями.

В конце прошлого века физики довольно долго пребывали в нерешительности по поводу природы катодных лучей — вещество это или свет? Вопрос решен был экспериментальным доказательством существования отрицательного электрического заряда у катодных лучей. Световая природа лучей Рентгена также долгое время подвергалась сомнению. Только после обнаружения дифракции лучей Рентгена в 1913 г. физики окончательно согласились, что перед ними световое явление. Впрочем, строго говоря, этот вывод надлежало проверить, после того как дифракцию открыли у пучков заряженных частиц электронов и протонов, а также и незаряженных — нейтронов. В конце концов

только совокупность различных явлений, ясно указывающих на электромагнитную природу лучей Рентгена, безукоризненно доказывает их световую природу.

В течение нескольких десятилетий исследователи радикально изменяли свое мнение о природе так называемых космических лучей, непрерывно приходящих на Землю со всех сторон из мировых пространств и обладающих огромной проникающей способностью. Два десятилетия назад считалось установленным, что космические лучи в основной своей части состоят из световых лучей с чрезвычайно малой длиной волны, с более короткой в среднем, чем у лучей гамма радия. Однако позднее было доказано, что космические лучи отклоняются магнитным полем Земли и, следовательно, состоят из электрически заряженных частиц. Сначала предполагалось в связи с этим, что первичные космические лучи состоят из электронов. Однако исследования последнего времени, в особенности опыты советских физиков, произведенные в верхних слоях атмосферы, с несомненностью доказали, что основная часть первичных космических лучей состоит из положительно заряженных протонов. Заметим, что космические лучи распространяются с громадной скоростью, практически совпадающей со скоростью света.

Приведенные примеры ясно показывают, насколько практически трудно в отдельных случаях с несомненностью установить световую природу того или иного явления.

Неисчерпаемость содержания реальной материи в различных ее проявлениях, вещества и света, раскрывается все больше по мере углубления научного исследования. Противопоставляя свет веществу, несмотря на многие сходные свойства у того и другого (свойства волн и частиц, квантовые закономерности), мы до сих пор считали свет и вещество по существу разнородными, отличающимися друг от друга примерно так же, как отличается звук скрипки от самой скрипки и радиоволны от радиопередатчика. Но около двадцати лет назад было сделано еще одно поразительное открытие в области учения о свете.

На основании своей формальной математической теории света, о которой мы только что упоминали, Дирак пришел к теоретическому выводу, что при некоторых условиях свет должен превращаться в вещество и обратно. В сильном электрическом поле атомного ядра световые кванты с длиной волны не более примерно $0,001 \text{ м}\mu$, по Дираку, могут распадаться на две противоположно заряженные частицы — электрон и позитрон. Это весьма удивительное теоретическое предсказание все же полностью подтвердилось на опыте. Превращение света в вещество было экспериментально доказано. На рис. 14 мы видим фотографию этого поразительного процесса. Возможность такого рода фотографий основана на том, что быстрые заряженные частицы,

проходя в воздухе, пересыщенном водяными парами, оставляют следы из осевших капелек воды. Противоположно заряженные частицы, электрон и позитрон, пролетают в сильном магнитном поле, вследствие чего загибаются в противоположные стороны.

Перед нашими глазами, как это видно на фотографии, разыгрывается изумительное зрелище преобразования светового гам-



Рис. 14. Образование пары электрон — позитрон из светового гамма-кванта. В магнитном поле налево (наверху) отклонен позитрон, направо — электрон (фотография А. В. Грошева и И. М. Франка)

ма-луча в пару легких частиц вещества. Происходит нечто, действительно, до известной степени напоминающее сказочное превращение мелодии в скрипку!

Для объяснения этого явления наука до сих пор не имеет ничего, кроме формальной и в этом смысле явно нас не удовлетворяющей теории Дирака. Во всяком случае с несомненностью обнаруживается глубочайшая связь света и вещества, о которой ранее не подозревали. Человек овладел природой еще с одной стороны.

Мы начали с субъективных зрительных ощущений света и яркости, а затем, шаг за шагом следуя за историей развития оптики, подошли к современному сложному состоянию объективной науки о свете. Читатель, вероятно, не удовлетворен концом повествования о судьбах развития воззрений на природу света. Загадка оказалась неразгаданной в обычном смысле слова и сделалась еще более сложной, чем казалось во время Ньютона

и Ломоносова. Но такова судьба всякой области настоящего знания. Чем ближе мы подходим к истине, тем больше обнаруживается ее сложность и тем яснее ее неисчерпаемость. Непрерывная победоносная война науки за истину, никогда не завершающаяся окончательной победой, имеет, однако, свое неоспоримое оправдание. На пути понимания природы света человек получил микроскопы, телескопы, дальномеры, радио, лучи Рентгена; это исследование помогло овладению энергией атомного ядра. В поисках истины человек безгранично расширяет область своего владения природой. А не в этом ли подлинная задача науки? Мы уверены, что история исследования света, его природы и сущности далеко не закончена; несомненно, что впереди науку ждут новые открытия в этой области, что мы ближе подойдем к истине, а техника обогатится новыми средствами.

СОЛНЦЕ

«В середине всего пребывает Солнце. И кто же поместил бы сей светоч в этом прекрасном храме в иное или лучшее место, чем то, откуда он может равно освещать все. Не без основания поэтому одни называют его светочем мира, другие Разумом, иные Управителем, Тризмегист — зримым богом, Электра — Софокла — всевидящим. Итак, как бы восседая на царском троне, Солнце управляет семьей окружающих его звезд».

Коперник

У Козьмы Пруtkова есть такое изречение: «Если у тебя спрошено будет: что полезнее, Солнце или месяц? — ответствуй: месяц. Ибо Солнце светит днем, когда и без того светло, а месяц — ночью». Конечно, ни один из читателей не соблазнится этой остроумной чепухой. Днем светло потому, что светит Солнце, и ночью от Луны также есть свет, потому что где-то светит то же Солнце и Луна отражает его лучи на Землю. Загородившись от прямых солнечных лучей козырьком фуражки или зонтиком, мы не мешаем Солнцу освещать воздух, облака, поля и все окружающее. Солнце может быть скрыто облаком, но лучи его, рассеиваясь воздухом, по-прежнему освещают Землю. Но если между Землей и Солнцем на достаточно большом удалении очутится большой непрозрачный предмет, он может не пропустить прямых лучей Солнца в земную атмосферу, свет исчезнет. Так и бывает во время солнечных затмений, когда Земля, Луна и Солнце попадают на одну прямую линию. Рисунок 15 поясняет суть дела.

Свет, доходящий до человека (разумею как видимые, так и невидимые лучи), может быть тройкого происхождения. На Землю падают п р я м ы е солнечные лучи, которые мы стараемся видеть возможно реже. Оси наших глаз обычно направлены горизонтально, и Солнце стоит перед глазами только на восходе и закате. Днем непрерывно к нам в глаза доходят р а с с е я н н ы е солнечные лучи. Небесная лазурь — результат рассеяния



Николай Коперник (1473—1543)

солнечных лучей молекулами воздуха. Если рассеивающие частицы очень малы, то более всего рассеиваются лучи с короткими длинами волн (в видимом спектре — синие и фиолетовые). Иначе обстоит дело, если частицы крупные, тогда довольно сильно рассеиваются и более длинные волны. В этом очень легко убедиться, закурив папиросу. Цвет дыма папиросы, выходящего с зажженного конца, голубой, а со стороны мундштука — белый. Объясняется это тем, что частицы дыма, пройдя толщу табака, слипаются, становятся крупными. Точно так же рассеянный свет облаков, состоящих из крупных капелек влаги, белый, в то время как цвет чистого неба голубой. Если бы Земля была без атмосферы, мы видели бы Солнце на совершенно черном небе.

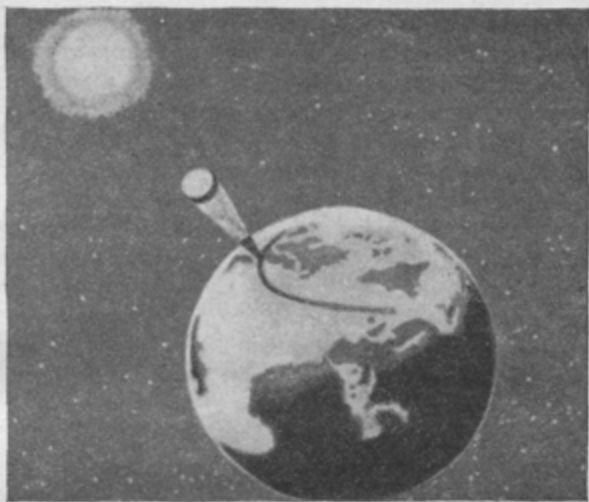


Рис. 15. Схема солнечного затмения

На высоте 20—22 км над Землей из гондолы стратостата наблюдатели видели над собой именно такое, почти черное небо при сияющем Солнце.

Зори, зеленый цвет полей и лесов, белизна снегов, сияние Луны — все это отраженный или рассеянный свет Солнца.

Но помимо прямого и рассеянного солнечного света, до нас доходят лучи, от Солнца не зависящие. Всякое нагретое тело излучает свет. Если нагревание очень велико, в этом свете много видимых лучей; если нагревание незначительно, излучаются невидимые инфракрасные лучи, которые можно обнаружить по тепловым их действиям. Кругом нас все нагрето. Если мы и называем одни тела теплыми, другие холодными, то делаем это условно, по отношению к температуре нашего тела. Совершенно охладить тело — это значит остановить движение его частиц. Такое охлаждение возможно только приблизительно при -273° по Цельсию (абсолютный нуль температуры). На Земле же все теплое, и поэтому все светится видимыми или невидимыми лучами; светится и сам человек, светятся и его глаза. В этом смысле древние, приписывавшие глазу «кроткий внутренний огонь», оказались правыми. Энергия этих внутренних лучей глаза такова, что если бы глаз чувствовал их также, как, положим, зеленые лучи, то его постоянно сопровождало бы и днем и ночью свечение с яркостью примерно в 5 млн. свечей (ср. стр. 99—100).

Нам шлют видимые лучи звезды — удаленные солнца, туманности, иногда небосклон прорезывают блистающие молнии или загораются причудливые северные сияния. В летней листве ночью светятся светляки, а в лесу гнилушки. Молнии вместе с видимым светом излучают и невидимые электромагнитные волны, и в ясную погоду по радио слышны странные потрескивания в приемнике, мешающие приему, — это электромагнитные атмосферные разряды. Наблюдая эти разряды, А. С. Попов и пришел к открытию радио. За последние годы с несомненностью выяснилось, что Солнце и звезды также излучают радиоволны. Во время второй мировой войны радиоизлучение Солнца и других светил составляло иногда существенную помеху правильной работе радиолокации. В Земле идет медленный распад некоторых атомов, радиоактивный процесс, сопровождающийся, в частности, излучением световых гамма-лучей с очень короткими волнами.

Помимо этого света, достигающего до человека вследствие естественных процессов на Земле и во вселенной, человек создаст себе по мере надобности искусственные источники света. Он зажигает дерево, керосин, свечи, пользуется электрическими лампами накаливания, в которых металлические нити нагреваются электрическим током. В новых, более совершенных люминесцентных лампах электрический ток вызывает сначала разряд в парах ртути, сопровождающийся испусканием ультрафиолетовых лучей. Эти лучи поглощаются затем на стенках стеклянной трубки, покрытой изнутри люминесцирующим составом, и превращаются в видимый свет. Всякая радиостанция — своего рода источник света, посылающий чрезвычайно длинные волны. Для научных и медицинских целей устраиваются трубки Рентгена, излучающие невидимый свет, легко проходящий сквозь человеческое тело.

Но энергия всех этих светочей, в отдельности и вместе взятых, поистине ничтожна по сравнению с энергией свечения Солнца. Нужно вспомнить, что в конечном итоге, зажигая лампу, заставляя работать радиостанцию или трубку Рентгена, мы потребляем ничтожную часть солнечной энергии, накопленной в виде угля, нефти и дров растениями. Пользуясь энергией ветра, водопадов и водохранилищ, мы снова применяем энергию солнечного света, вызывающую ветер, поднимающую воду. Поэтому ясно, что ни один искусственный источник не может конкурировать с Солнцем в смысле общей излучаемой энергии.

Причина, заставляющая человека пользоваться наряду с Солнцем собственными скромными искусственными источниками света не только ночью, но и днем, «сидеть днем с огнем», кроется в том, что во многих случаях важно не только количе-

ество световой энергии, но также ее основное качество, ее спектральный состав.

Мы знаем, что впервые Ньютон ввел это важнейшее понятие о спектральном составе света. Опыт Ньютона с призматическим разложением солнечного света стал прообразом всех разнообразных спектросков, применявшихся и применяемых в науке. На рис. 16, сделанном по чертежу самого Ньютона, ясна идея простейшего ньютоновского спектроскопа. Свет падает на узкую щель, за ней помещается линза так, что щель находится почти в фокусе последней. Из линзы пучок света падает на призму, здесь преломляется и попадает в зрительную трубу,

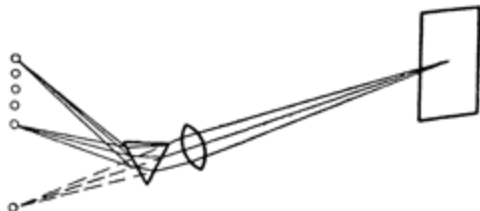


Рис. 16 Схема спектроскопа (чертеж Ньютона)

установленную «на бесконечность». В окуляр трубы видно изображение щели спектроскопа в каждом из цветов, из которых состоит исследуемый сложный цвет. Если бы щель была очень широкой, изображения накладывались бы друг на друга, спектр был бы нечистым, цвета в нем были несколько смешанными.

Если перед щелью спектроскопа поставить керосиновую или электрическую лампу, мы увидим в зрительную трубу непрерывное чередование цветов, от красного до фиолетового. Вместо глаза можно поместить фотографическую пластинку, тогда за фиолетовым концом обнаружится короткое ультрафиолетовое продолжение. Но и глаз и пластинка не пригодны для суждения о распределении энергии в спектре; они имеют свои узкие области особенной чувствительности и почти не отвечают на соседние участки. Глаз особенно чувствителен к зеленой части спектра, обыкновенная пластинка — к синей и фиолетовой. Чтобы судить об энергии, лучше всего воспользоваться тепловым прибором, в котором поглощаются полностью любые лучи, превращаясь в тепло (термоэлемент). К несчастью, такие приборы, даже при самом тщательном выполнении, чрезвычайно мало чувствительны по сравнению с глазом или фотографической пластинкой. На рис. 17 показано распределение энергии, измеренное таким способом для некоторых источников света. По горизонтальной оси отложены длины волн в микронах (напомним, что $0,4 \mu$ соответствуют фиолетовому краю видимого

спектра, а $0,7 \mu$ — красному краю). По вертикальной оси нанесена энергия в относительных единицах, так что для каждого источника энергия при $0,59 \mu$ приравнена условно к 100. Кривая 2 дает распределение энергии в видимой части солнечного спектра, кривая 1 — в голубом свете неба; мы видим, что благодаря рассеянию, максимум энергии переключался в синюю часть. Кривая 3 дает распределение энергии в электрической лампочке.

Если накаливать различные твердые тела, например металлы, до одной и той же высокой температуры, то распределение

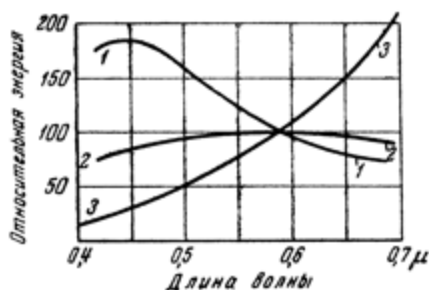


Рис. 17. Распределение энергии в спектре разных источников

энергии у них будет несколько разным. Различие вызывается неодинаковостью отражательной способности поверхности накаливаемого тела. Если поверхность сделать совершенно черной, т. е. поглощающей полностью все лучи и ничего не отражающей, то распределение энергии при одной и той же температуре будет одно и то же для любого тела.

В нагретом теле энергия движения молекул переходит в свет и, обратно, свет поглощается молекулами. Для каждой данной температуры устанавливается равновесие между поглощением и излучением света.

В главе о свете мы пришли к выводу, что излучение и поглощение света не может происходить иначе как целыми квантами $h\nu$. Рассматривая равновесие между излучением и поглощением в теле с совершенно черной поверхностью и учитывая квантовый характер обоих процессов, можно довольно легко и вполне строго вывести закон распределения энергии света, испускаемого черным телом. Исторически решение задачи протекало как раз наоборот. В поисках правильного, соответствующего опыту, спектрального закона излучения черного тела М. Планк впервые убедился, что этот закон нельзя вывести иначе, как сделав предположение о квантовом характере излучения и поглощения света. На этом пути и произошло чреватое последствиями открытие квантовых законов природы.

На рис. 18 изображен закон «черного излучения» для нескольких температур. По горизонтальной оси чертежа отложены длины световых волн в микронах ($1 \mu = 1000 \text{ м}\mu$), по вертикальной — интенсивность, или энергия, в относительных единицах. Из рисунка видно, что, по мере повышения температуры, максимум спектральной кривой перемещается в сторону коротких волн. Это отвечает исходи известному постепенному переходу накаливаемого металла от красного каления к белому.

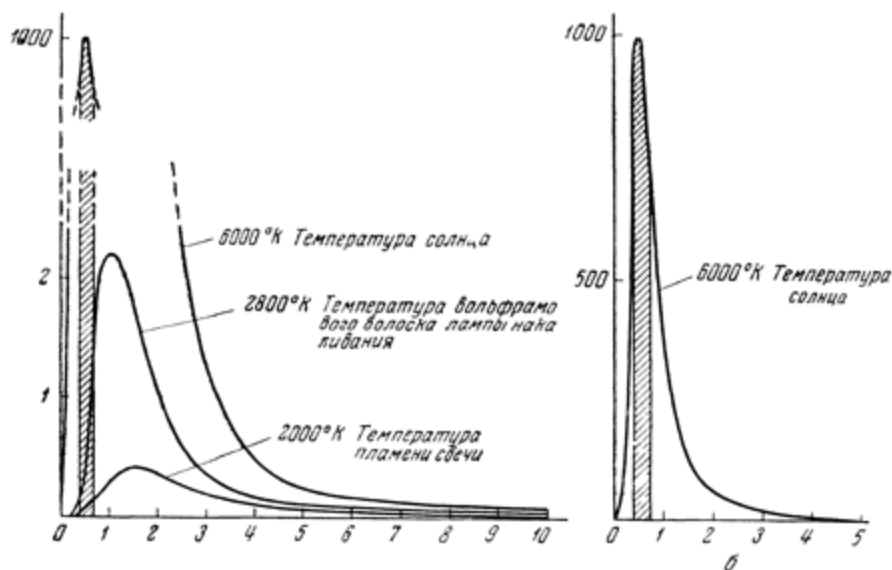


Рис 18 Распределение энергии в спектре излучения черного тела при разных температурах

По оси абсцисс — длина волны в микронах, по оси ординат — интенсивность в относительных единицах (Ввиду огромной разности в интенсивностях кривая для 6000°K на рис 18, а не может быть полностью изображена в выбранном масштабе. На рис 18, б приведена полная кривая для 6000°K в другом масштабе) Заштрихованная часть отмечает область видимого спектра

Теоретический закон распределения энергии в спектре черного тела подтверждается на опыте со всей доступной в наше время точностью. Частное следствие этого закона состоит в том, что произведение длины волны λ , соответствующей максимуму спектральной кривой, на абсолютную температуру (т. е. температуру Цельсия $+273^{\circ}$) T есть величина постоянная

$$\lambda_{\text{max}} T = K = 2897,18 \text{ микрон} \times \text{град.}$$

Зная величину λ_{max} (в микронах), можно на основании этой формулы по спектру определить температуру тела.

Мы обратились к спектральному распределению света в связи с вопросом о качестве солнечного света. Солнце, несомненно, есть накалившее тело, поэтому его спектр должен быть близок к спектрам, получаемым на Земле от наших ламп и свечей. В плохой спектроскоп с широкой щелью солнечный спектр действительно кажется непрерывным. При грубом измерении распределения энергии в этом спектре получается кривая, похожая на одну из кривых для черного излучения (рис. 18). По виду этой кривой, а также из положения ее максимума можно вычислить приблизительно температуру солнечной поверхности, если только предположить, что Солнце похоже на накалившее тело с черной поверхностью. Вычисление дает около 6000° . Установление более точной цифры имеет мало смысла, так как разные области солнечного диска различаются по накалу.

Наш глаз в смысле различения качества света много хуже самого плохого спектроскопа. Поэтому приведенные грубые результаты будут достаточны, когда в следующей главе придется сравнивать свойства солнечного света и глаза.

Физик и астроном, изучая Солнце, пользуются телескопами, совершенными спектроскопами, постоянно применяют вместо глаза фотографию. Им открываются такие детали солнечного света и его распределения по Солнцу, которые совершенно ускользают от невооруженного глаза.

В 1802 г. Воластон заметил свойство солнечного спектра, почему-то ускользнувшее от внимания Ньютона. Спектр оказался испещренным черными тонкими линиями. Позднее эти

Таблица 1

| Линия | Длина волны, $\text{м}\mu$ | Цвет | Источник |
|-----------------------|----------------------------|------------|--------------------------------|
| <i>A</i> | 759,4 | Красный | Кислород в земной атмосфере |
| <i>a</i> | 718,5 | » | Водяной пар в земной атмосфере |
| <i>B</i> | 686,7 | » | Кислород в земной атмосфере |
| <i>C</i> | 656,3 | » | Водород на Солнце |
| <i>D</i> ₁ | 589,6 | Желтый | Натрий » » |
| <i>D</i> ₂ | 589,0 | » | » » » |
| <i>E</i> | 527,0 | Зеленый | Кальций » » |
| <i>b</i> ₁ | 518,4 | » | Магний » » |
| <i>b</i> ₂ | 517,3 | » | » » » |
| <i>b</i> ₄ | 516,8 | » | » » » |
| <i>F</i> | 486,1 | Синий | Водород » » |
| <i>g</i> | 430,8 | Фиолетовый | Кальций » » |
| <i>H</i> | 396,9 | » | » » » |
| <i>K</i> | 393,4 | » | » » » |

темные пропасти на ярком фоне солнечного спектра подробно изучил Фраунгофер; их называют поэтому линиями Фраунгофера. В табл. 1 даны главные линии Фраунгофера для видимого спектра. ими часто пользуются для указания той или иной области солнечного спектра. Они всегда остаются на своих местах и служат естественными отметками на спектре Солнца. Во втором столбце указаны длины волн в миллимикронах, в третьем — цветность спектральной области, в которой линии расположены.

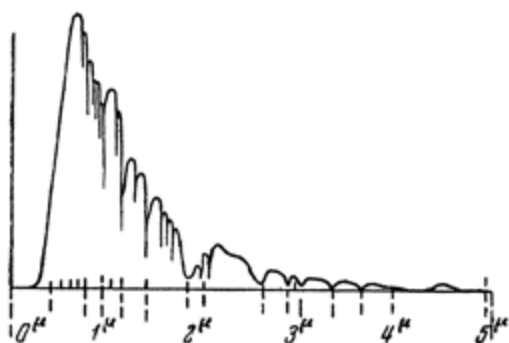


Рис. 19. Распределение энергии в спектре Солнца.

По оси абсцисс — длина волны, в микронах, по оси ординат — интенсивность в относительных единицах

Мы сказали выше, что в плохой спектроскоп солнечный спектр кажется непрерывным, а кривая распределения энергии — правильной и плавной. Детальное изучение кривой распределения показывает, что она сплошь изъедена зазубринами как в видимой, так и в невидимой области (рис. 19). Эти зазубрины — следы линий Фраунгофера. В ультрафиолетовой области солнечный спектр довольно резко обрывается, причем граница колеблется в разное время дня и в разные времена года. Практически от Солнца до нас не доходят лучи с волнами короче 290 м μ . Более короткие волны поглощаются озоном, находящимся в верхних слоях атмосферы с максимумом около 30 км.

Как объяснить отсутствие некоторых цветов в солнечном спектре? Внесем в бесцветное спиртовое или газовое пламя поваренную соль. Пламя становится ярко-желтым; если посмотреть в спектроскоп (хороший), то сплошного спектра почти не видно, видны только рядом две желтые линии, длины волн которых в точности совпадают с фраунгоферовыми линиями D_1 и D_2 . Точность совпадения такова, что она не может быть случайной. Разница в том, что в случае пламени получаются

свелящиеся линии на темном фоне, а от Солнца, наоборот, черные линии на блестящем фоне спектра.

В пламени соль распадается на хлор и натрий, светится натрий. Естественно предположить, что черные D -линии на Солнце вызываются также парами натрия. Действительно, если на пути непрерывного спектра, например от лампы накаливания, поместить сосуд с парами металлического натрия или газовое пламя, окрашенное солью, то области, соответствующие D -линиям, ослабляются, мы искусственно получим фразунгоферовы линии на фоне сплошного спектра. Стало быть, пары натрия способны и поглощать и излучать D -линии; осторожнее следует сказать, что в парах натрия громадное большинство атомов способно поглощать свет. Но, поглотив кванты света D -линий, атомы становятся «возбужденными», далее излучения не поглощают и, наоборот, через некоторое время отдают захваченную энергию в виде света. Иными словами, в накаливаемых парах соли есть нормальные, поглощающие атомы натрия и возбужденные, уже поглотившие и затем светящиеся

В парах каждого элемента теми или иными способами можно возбудить свечение, состоящее из отдельных тонких спектральных линий. Число этих линий может быть очень большим. Это указывает на многообразие состояний, в которых атом может существовать «возбужденным».

Атомные линейные спектры, так же как и непрерывный спектр черного тела, оказались подчиняющимися квантовым законам. Это значит, в частности, что в них проявляется та же квантовая постоянная h . С другой стороны, линейные спектры есть выражение внутреннего строения атомов. Следовательно, строение атомов, подобно свету, подчиняется квантовым законам. Квантовые закономерности обнаруживаются также в спектрах и строении молекул. В весьма разреженном газообразном состоянии молекулы излучают «полосатые» спектры. При помощи спектральных приборов полосы удается разделить на множество очень тонких линий. Положение этих линий следует довольно простым квантовым законам. Мы убеждаемся еще раз, что у света и вещества есть важнейшие общие, родственные черты.

Вернемся к линейным спектрам. Итак, у каждого элемента есть свои оптические приметы — спектральные линии, положение которых можно точно измерять и которые трудно смешать с другими. Находясь на Земле, можно по спектрам изучать химию Солнца и других светил. Пары элементов в солнечной атмосфере, пропуская на Землю сплошной спектр солнечного ядра, оставляют на нем свои следы в виде фразунгоферовых линий. В табл. 1 в последующем столбце указано, каким элементам соответствуют линии.

Часть линий получается от поглощения солнечного света в земной атмосфере, что также отмечено в таблице. Большинство химических элементов, находящихся на Земле, обнаружено и на солнечной поверхности. Не найдены главным образом такие тяжелые элементы, как золото, ртуть, таллий, висмут, радий и пр.

На рис. 20 сравнивается количество атомов различных химических элементов в земной коре (крестики) и на поверхности Солнца (кружки). Слева отложены логарифмы относительных количеств элементов; это значит, что, например, цифра 5 соответствует 10^5 атомов. Мы видим, что относительные количества

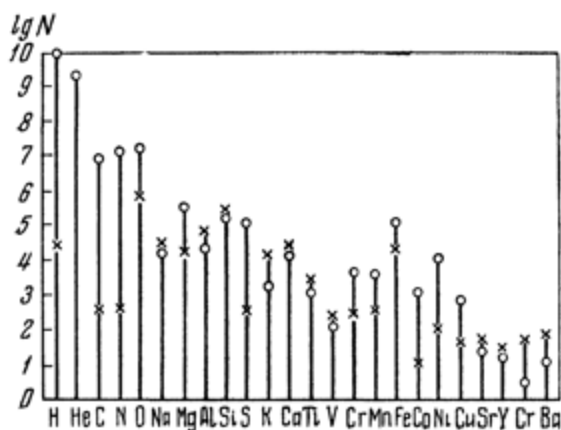


Рис. 20. Сравнение среднего относительного числа атомов различных химических элементов на поверхности Солнца и в земной коре

некоторых атомов на поверхности Земли и Солнца расходятся очень сильно. Наоборот, почти совпадают такие элементы, как натрий, кремний, кальций, стронций. Отсутствие спектральных линий не может еще служить признаком отсутствия элемента. Линии могут лежать в ультрафиолетовой области, не доходящей до Земли. Ультрафиолетовый спектр Солнца закрыт от земного наблюдателя главным образом озоном, находящимся в земной атмосфере и сосредоточенным преимущественно в стратосфере на высотах 20—30 км.

После второй мировой войны захваченные в качестве трофеев в Германии ракеты Фау-2 были применены в США для фотографирования спектра Солнца на таких высотах, на которых озоновый слой находится уже позади. На рис. 21 воспроизводятся фотографии солнечного спектра, снятые автоматически с ракеты на различных высотах. Высоты (в километрах) отложены

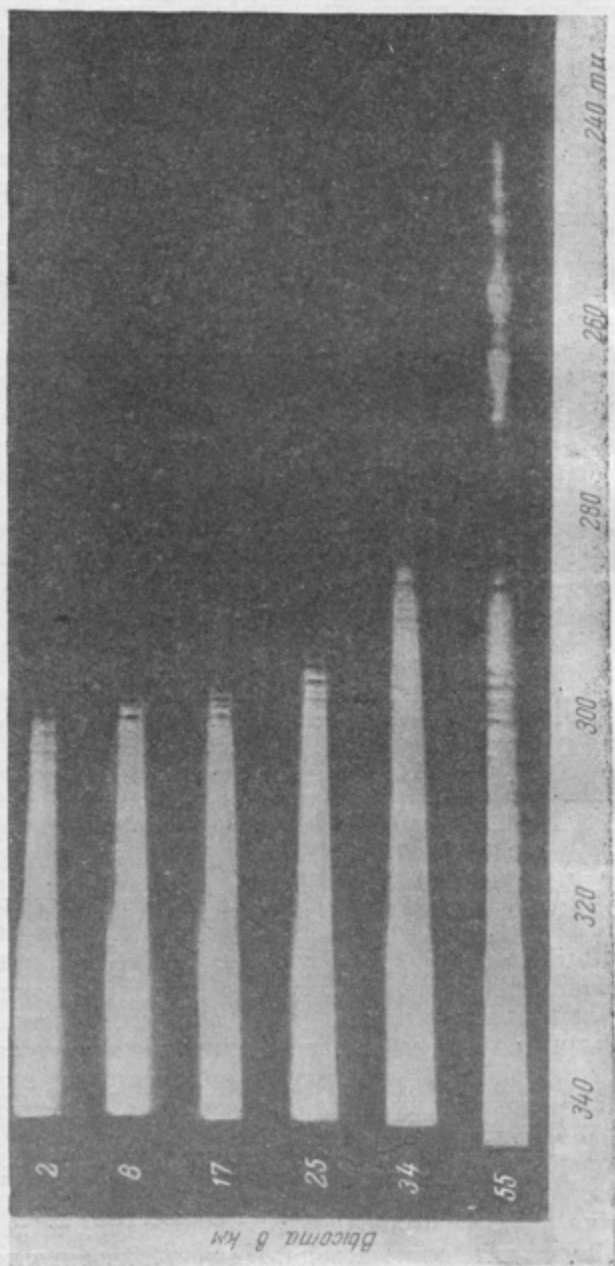


Рис. 21. Солнечный спектр, снятый с ракет на различных высотах

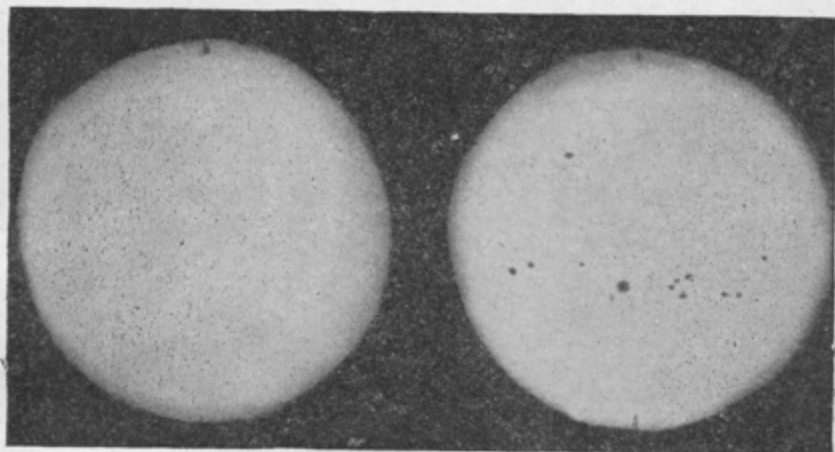


Рис. 22. Солнечный диск с максимумом (справа) и минимумом солнечных пятен

слева. По оси абсцисс отложены длины волн в миллимикронах. Мы видим, что с высоты 25 км спектр начинает удлиняться в ультрафиолетовую сторону. На высоте в 34 км снятый спектр простирается приблизительно до 280 м μ ; здесь он, однако, довольно резко прерывается. При дальнейшем подъеме, до 55 км, обнаруживается новая широкая область спектра примерно до 240 м μ . Темная полоса при 280 м μ , однако, остается. Она соответствует поглощению парами магния.

На Солнце найдены не только атомы, но и простейшие молекулы, например OH, CN, CaH, H₂ и т. д.

Размеры Солнца огромны: поперечник его составляет около 1 400 000 км, т. е. в 110 раз больше, чем у Земли, а объем в 1 305 000 раз больше объема Земли. Но Земля значительно плотнее; средняя плотность Солнца по сравнению с водой 1,406, а Земли — 5,6. Общее количество вещества на Солнце в 330 420 раз больше, чем на Земле. Если выразить количество солнечного вещества в тоннах, то получится мало вразумительное число $2 \cdot 10^{27}$ (т. е. к двойке надо подписать 27 нулей); если бы Солнце теряло каждую секунду по миллиарду тонн, то для того чтобы «похудеть» наполовину, ему потребовалось бы 30 миллиардов лет!

Это гигантское скопление вещества мы знаем только с поверхности. Внутренняя жизнь Солнца не известна, о ней можно только догадываться. Поверхность Солнца далеко не однородна: если мы говорим о распределении энергии солнечного света, о его температуре, то разумеется всегда пробуем среднюю

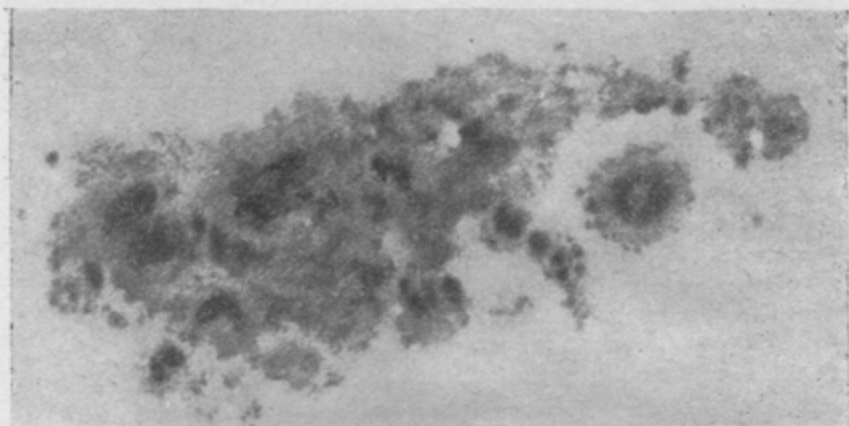


Рис. 23. Вид группы солнечных пятен

величину. Видимое путешествие Солнца по небу сопровождается также кажущимся изменением распределения энергии в его спектре. На восходе и на закате Солнце кажется красным, его лучам приходится преодолевать большую толщу атмосферы, чем в зените.

На поверхности Солнца, главным образом в экваториальной области, почти всегда имеются пятна (рис. 22). Пятна бывают иногда настолько большими, что их легко видеть глазом через запыщенное стекло. В китайских летописях сохранилась запись о наблюдениях солнечных пятен невооруженным глазом еще в 28 г. до н. э. В 1858 г. на солнечном диске было видно пятно длиной в 230 000 км, т. е. в 18 раз больше диаметра Земли. Пятно занимало $\frac{1}{36}$ общей видимой поверхности Солнца. Пятна имеют разнообразные формы с темным ядром в середине и более светлой каймой снаружи (рис. 23).

Спектроскопическое исследование показывает, что в области пятен находится главным образом водород и пары кальция. Вокруг пятен вращаются гигантские вихри, циклоны, состоящие иногда из потоков электрически заряженных частиц. Возникающие электрические токи сопровождаются огромными магнитными полями, вызывающими изменение (расщепление) спектральных линий. Эти спектральные изменения и позволяют обнаружить солнечные вихри.

Число пятен на Солнце изменяется периодически; длина периода около 11 лет. На рис. 24 приведена кривая, доказывающая такую периодичность. По горизонтальной оси нанесены годы, по вертикальным — относительные числа пятен. Кривая

охватывает громадный, почти двухвековой период, с 1749 по 1947 г. Периодичность выражена с полной очевидностью. Перед нами несомненный и очень важный для жизни Земли закон «солнечной деятельности». На рис. 25 повторена часть той же кри-

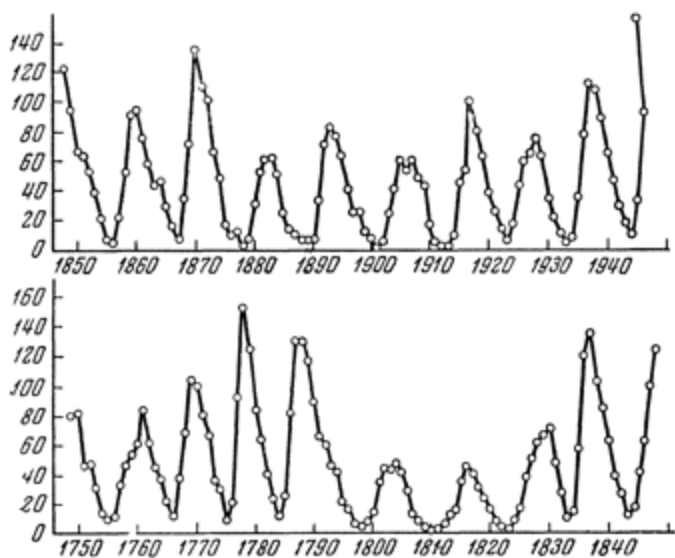


Рис. 24. Одиннадцатилетний период солнечных пятен

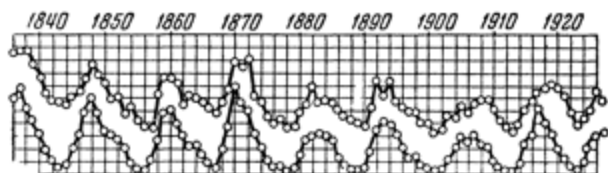


Рис 25 Периодичность солнечных пятен и параллелизм числа пятен и земных магнитных возмущений (верхняя кривая)

вой, с 1836 по 1926 г., но здесь она составлена с кривой магнитных возмущений на Земле за те же годы. Верхняя кривая изображает магнитные возмущения на Земле за те же годы. Очевиден параллелизм этих кривых. Таким образом, помимо тяготения и света, между Солнцем и Землей существуют и другие посредники. Теперь известно, что от Солнца к Земле постоянно летят потоки отрицательно заряженных частиц — электронов. Эти электрические потоки отклоняются магнитными полюсами

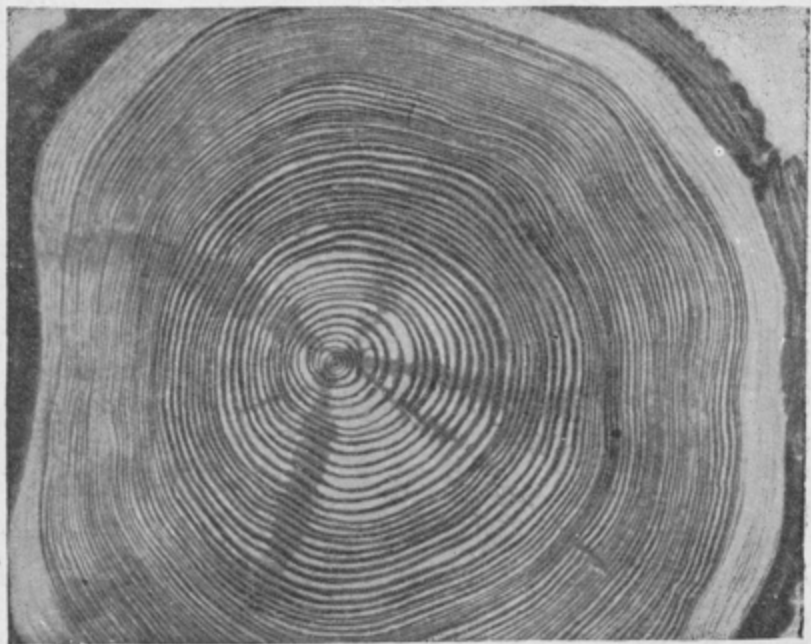


Рис. 26. Срез ствола сосны, показывающий, что толщина колец меняется с одиннадцатилетним периодом

Земли в полярные области и вызывают изменения магнетизма на Земле, отмеченные на рис. 25. С другой стороны, проникая в верхние разреженные слои земной атмосферы, быстро летящие электроны заставляют светиться находящиеся там газы. Так объясняются северные сияния. Число северных сияний в полярных областях показывает такую же периодичность, как и солнечные пятна и магнитные возмущения на Земле.

Изменения в числе солнечных пятен существенно влияют на перемены погоды и, следовательно, на растительность и на все живое на земле. На рис. 26 приводится фотография среза ствола сосны, из которой видно, что толщина годовых колец меняется с явным одиннадцатилетним периодом, следующим за периодичностью солнечных пятен. На рис. 27 кривая солнечных пятен за 1830—1910 гг. сравнивается со средней кривой роста деревьев для нескольких европейских стран. Параллелизм вполне ясен и здесь, хотя картина осложняется действием других причин, не зависящих от солнечных пятен. Таким образом, несомненно, что солнечные пятна составляют важный фактор в жизни земной поверхности.

Внешнюю оболочку, которую мы только и видим на Солнце в обычных условиях, называют фотосферой. Эта оболочка имеет зернистое, гранулярное строение, особенно ясное, если снимать солнечный диск в монохроматическом свете отдель-

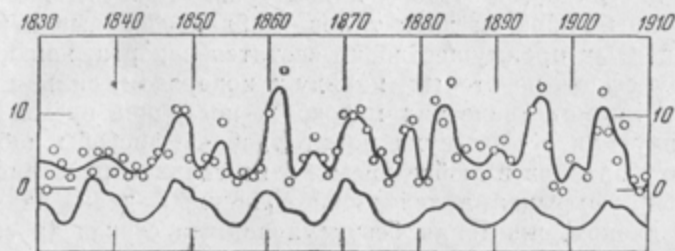
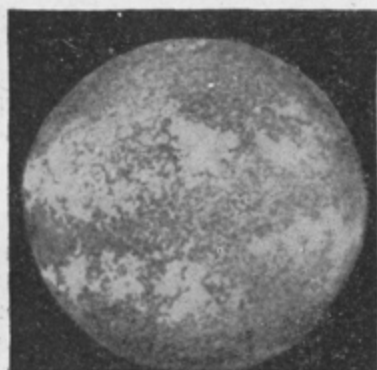


Рис. 27. Сравнение кривой солнечных пятен (нижняя кривая) со средней кривой роста деревьев для нескольких европейских стран

ной спектральной линии, например водорода или кальция (рис. 28). Эти гранулы, разнообразных форм и размеров, оче-



а



б

Рис. 28. Спектрограмма Солнца, снятого в свете линии кальция (а) и водорода (б)

видно соответствуют облакам и парам газов, плавающим в фотосфере. Если смотреть с вершины горы вниз на облака (рис. 29), то можно видеть такую же зернистость. Отдельные места фотосферы светятся особенно ярко; это так называемые факелы, в которых наиболее сильны линии кальция.

Во время полных солнечных затмений имеется возможность рассмотреть оболочку Солнца в деталях — мы видим ее как бы в поперечном разрезе (рис. 30). Фотосфера окружена тонким

слоем красного цвета, так называемой хромосферой; в нее проникают факелы из фотосферы. Толщина хромосферы около 10 000 км. Из нее вылетают колоссальные фонтаны светящегося газа, так называемые протуберанцы, высота которых достигает иногда сотен тысяч километров. Протуберанцы бывают главным образом двух типов — облакообразные и взрывные. В первых преимущественно светится водород, как и в самой хромосфере, во вторых, наряду с водородом, сильно выражены линии металлических паров. За последнее время астрономы получили в свои руки новые удобные способы наблюдения протуберанцев в любое время, а не только при затмениях. Тщательно закрывая в телескопе солнечный диск до краев темным диском, применяя безукоризненные стекла (в смысле отсутствия рассеивающих пузырьков и свилей) и пользуясь, кроме того, хорошими светофильтрами, пропускающими только узкую часть спектра, можно наблюдать солнечные протуберанцы вне затмений. Кроме того, за последнее десятилетие разработаны в СССР и за рубежом весьма совершенные светофильтры, выделяющие практически только одну узкую спектральную линию. В результате стала вполне возможной кинематографическая съемка протуберанцев, открывающая такие особенности солнечных взрывов, которые ранее оставались совершенно скрытыми.

Между фотосферой и хромосферой расположен очень тонкий, так называемый **о б р а щ а ю щ и й с л о й**, в котором, по видимому, и возникают главные линии Фраунгофера.

Во время полных солнечных затмений наблюдается невооруженным глазом поразительное явление так называемой **к о р о н ы** (рис. 31), простирающейся на миллионы километров от края Солнца. Корона имеет, вообще говоря лучеобразную структуру. Иногда лучи приблизительно равномерно окружают солнечный диск, в других случаях корона особенно вытянута в определенных направлениях. В сечении короны можно различить три спектра. Наиболее яркое непрерывный спектр внутреннего кольца короны. В этом спектре нет линий Фраунгофера; природа этой части короны до сих пор остается загадочной. Ее обычно приписывают рассеянию солнечных лучей в атмосфере электронов. Однако провести такое объяснение последовательно, до конца, согласуя со всеми фактами, еще не удалось. Второй спектр тоже непрерывный, но с фраунгоферовыми линиями; его приписывают отраженному свету фотосферы (отражать могут более холодные и удаленные от Солнца частицы пыли). Третий спектр линейчатый и соответствует свечению атомов. Можно думать, что этот третий спектр возникает вследствие флуоресценции паров под влиянием солнечного света. На это указывают некоторые особенности



Рис. 29. Вид с вершины высокой горы на облака

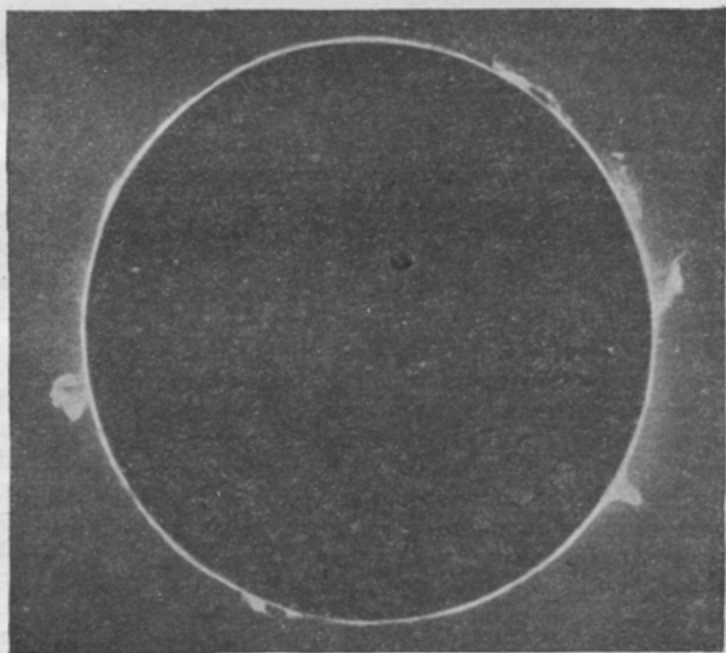


Рис. 30. Вид солнечной хромосферы с протуберанцами

поляризации этого спектра. Таким образом, Солнце на несколько миллионов километров окружено веществом в разреженном состоянии, частью в виде паров, частью в виде пыли. Эта пыль и пары могут отгоняться от Солнца электрическими силами и световым давлением. Впрочем, во многих отношениях солнечная корона остается еще непонятным явлением. Не исключена, например, возможность, что некоторая часть свечения короны вызывается своеобразным процессом «саморассеяния» лучей в результате пересечения интенсивных световых пучков вблизи Солнца. Современная теория света считается с возможностью такого процесса.

Наш мимолетный и крайне упрощенный очерк оптических явлений на поверхности Солнца мы закончим сведениями об энергии, излучаемой Солнцем. Эта энергия распределена по всему спектру и в невидимой и в видимой областях. На видимую область при этом падает около 40% всей энергии.

Представим себе, что Земля лишена атмосферы. Основываясь на прямых измерениях энергии солнечных лучей, действительно падающих на земную поверхность, и учитывая влияние атмосферы, можно рассчитать, что при отвесном падении солнечных лучей поверхность Земли без атмосферы получила бы в минуту в среднем 2 калории, или 0,033 калории в секунду на 1 кв. см. На самом деле часть этой энергии поглощается атмосферой

Зная эту цифру, так называемую с о л н е ч н у ю п о с т о я н н у ю, легко вычислить общее количество энергии, излучаемое Солнцем в одну секунду. Для этого достаточно сделать естественное предположение, что Солнце излучает одинаково во все стороны, вычислить поверхность шара с радиусом в 150 млн. км (расстояние между Солнцем и Землей) и полученную площадь, выраженную в квадратных сантиметрах, помножить на солнечную постоянную, т. е. на 0,033 калории. При выполнении такого расчета приблизительно получается 10^{26} калорий в секунду (т. е. число, первая цифра которого 1, а за нею следует 26 нулей). Это число и само по себе мало наглядно, да и самое понятие калории довольно отвлеченное. Поэтому поучительно будет сделать следующий пересчет.

Современная физика выяснила, что энергия всегда эквивалентна массе. Первым и важнейшим указанием на эту связь послужит факт давления света на тела, впервые открытый и измеренный П. Н. Лебедевым. Тонкими и исключительно трудными опытами Лебедев доказал, что свет, падая на зачерненную пластинку, полностью его поглощающую, давит на пластинку с силой, равной E/c . Здесь E — энергия света, поглощаемого за t секунд, а c — скорость света. Если пластинка не черная, а, наоборот, зеркальная, полностью отражающая свет,

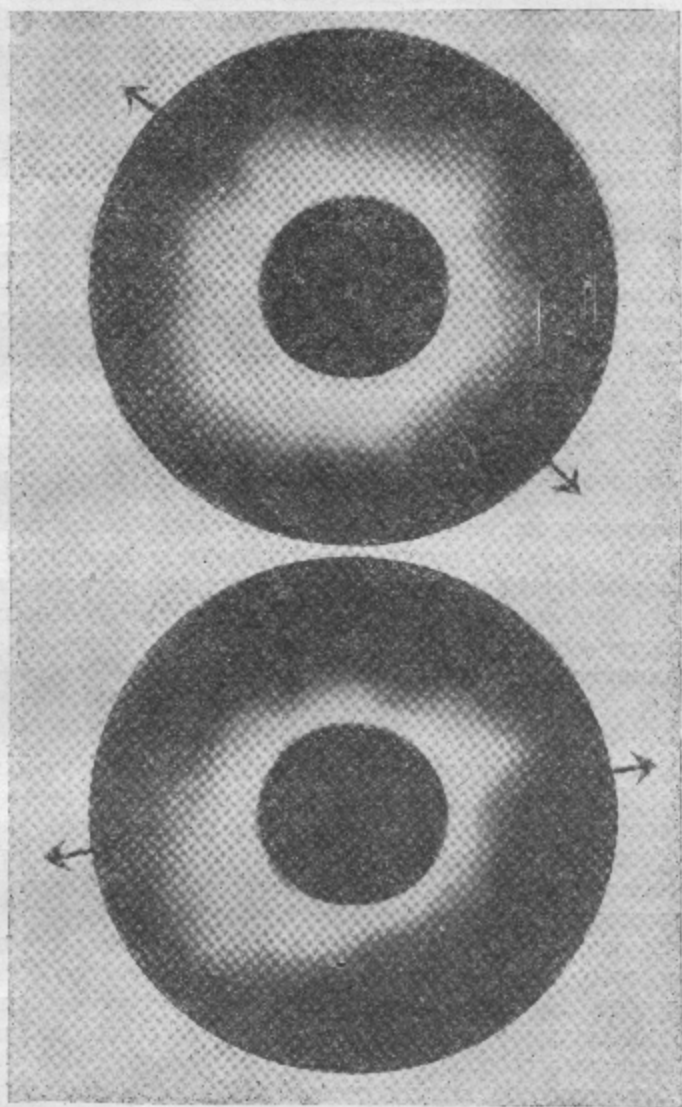


Рис. 31. Фотографии солнечной короны, снятые во время полного солнечного затмения в сентябре 1937 г. Снимки производились через поляриод в двух его взаимно-перпендикулярных положениях, отмеченных на фотографиях. Из различия снимков следует, что свет короны поляризован

то давление на нее вдвое больше. Лебедев своими многолетними опытами показал далее, что свет оказывает давление не только на твердые тела, но и на газы. Это обстоятельство приобрело первостепенное значение для современной теории солнечных явлений.

По законам механики следует, что для того, чтобы остановить за время t какой угодно поток (водяной, световой), оказывающий давление, необходимо его «уравновесить» силой F , определяемой из соотношения $Ft = mv$, где mv — произведение массы m , приносимой потоком, на его скорость v , носящее название количества движения. Итак, сила давления потока F равна изменению количества движения за 1 секунду, т. е.

$F = \frac{mv}{t}$. В случае светового потока $v = c$ (скорость света). Приравняв найденное выражение для силы давления величине, полученной согласно опытам Лебедева для давления света, найдем $\frac{mc}{t} = \frac{E}{tc}$, откуда $m = \frac{E}{c^2}$. Полученная формула определяет массу света m , эквивалентную его энергии E . Это чрезвычайно важное уравнение получено в приведенном выводе в итоге применения законов механики к оптическим измерениям Лебедева и на первый взгляд имеет ограниченное применение — только для света. Впервые Эйнштейн указал, что уравнение

$$mc^2 = E$$

универсально и должно быть справедливым для любых видов энергии. Заключение Эйнштейна получает все большее и широкое экспериментальное подтверждение по мере развития новой физики, в особенности физики атома и атомного ядра, и в настоящее время должно рассматриваться как одно из важнейших положений науки.

Пользуясь написанной формулой, произведем пересчет энергии, излучаемой Солнцем в секунду, на массу. Найденная выше цифра 10^{26} малых калорий в секунду оказывается равнозначущей примерно 5 млн. тонн в секунду. Эта масса, громадная сама по себе, ничтожна для Солнца. Ранее (стр. 58) мы нашли, что при отдаче миллиарда тонн в секунду Солнце уменьшилось бы по массе вдвое только за 30 млрд. лет, стало быть, при отдаче 5 млн. тонн в секунду Солнце может «исхудать» наполовину только за 6000 млрд. лет.

¹ Вывод, приводимый в тексте, представляет небольшое видоизменение вывода С. И. Вавилова, в котором одна и та же величина была применена для обозначения энергии и света и мощности света, что может привести к недоразумениям.— *Ред.*

Совершенно так же можно пересчитать энергию, получаемую в секунду всей Землей, на массу. Для этого нужно помнить, что одновременно освещается только половина земного шара и, кроме того, что солнечная постоянная относится к отвесным лучам. В результате пересчета получается совсем скромная и легко запоминаемая цифра — около 2 кг в секунду.

Эти пересчеты, делающие несколько осязаемой энергию, излучаемую Солнцем, имеют вместе с тем большой принципиальный смысл. Нас поражает масса Солнца и его практически неисчерпаемая энергия. Как собираются массы, подобные болочной, и где источник их непрерывно излучаемой энергии? Массы стягиваются в солнечные центры, вероятно, всемирным тяготением. Но, по-видимому, солнечная масса почти предельная; бывают скопления вещества, раз в 10 превышающие массу Солнца, но дальнейшего нарастания астрономы не знают. Чем же объясняется такой предел?

При стягивании масс всемирным тяготением возникают колоссальные давления внутри светил и развиваются опрочные температуры, которые должны достигать десятков миллионов градусов. Накаленная не только добела, но до рентгеновского света внутренность звезды излучает (по закону Планка, стр. 51) наружу от центра чрезвычайно большие количества лучистой энергии. Этот внутренний свет давит от центра наружу на звездные массы. Таким образом, действию тяготения противодействует световое давление. Разумеется, это противодействие не может превзойти вызывающего его тяготения. Но к световому давлению добавляется центробежная сила, сопровождающая вращение звезды. Когда сумма светового давления и центробежных сил будет равна силе тяготения, дальнейшее нарастание массы светила должно прекратиться. Теоретический расчет показал, что, действительно, массы, порядка солнечной, должны быть во вселенной предельными. Таков частичный ответ астрофизики на вопрос о происхождении солнечной массы.

Но чем возмещается энергия, теряемая Солнцем в виде излучения? В свое время предполагалось, что поток метеоров, падающих на Солнце в количестве (по массе), равном примерно сотой части Земли, за год в состоянии дать нужную компенсацию. Указывалось также, что сжатие поперечника Солнца на 75 м в год должно сопровождаться развитием тепла, вполне равноценным лучистой отдаче. Таким образом, можно бы объяснить существование Солнца в его современном виде по крайней мере в течение 100 млн. лет. Этот срок, однако, ничтожен; геология и астрофизика требуют по меньшей мере десятков миллиардов лет для Солнца. Такого длительного бытия Солнца не могут объяснить названные предположения.

Источники излучения Солнца и звезд надо искать по направлениям совсем иным — в запасах энергии, раскрытых новой физикой. Соотношение между энергией и массой, о котором мы только что говорили, указывает в самом общем виде, что любое скопление массы может рассматриваться как эквивалент энергии. Каждый грамм массы — это огромная энергия, величину которой можно вычислить, помножив массу на квадрат скорости света. Грамм массы оказывается равным 20 тыс. млрд. калорий. Для получения такой же энергии пришлось бы сжечь 20 тыс. тонн угля.

Мы заговорили об угле как простом примере источника тепловой энергии. Полезно несколько вдуматься в этот пример. Кусок угля — это инертная масса, с механической точки зрения мало отличающаяся от камня. Кусок лежал сотни тысяч лет в инертном состоянии, пока, наконец, не попал в руки человека, сумевшего превратить скрытую энергию угля¹ посредством горения в кислороде в доступную форму тепла. Это открытие было очень важным событием в истории человечества. Оно обозначало, как мы теперь знаем, освобождение скрытой химической энергии угля. Но современным людям пришлось стать свидетелями другого чрезвычайно важного события — начала овладения атомной энергией. Правда, сейчас это открытие используется капиталистическими государствами как империалистическая угроза для мира, но в руках нового общества, передового человечества, овладение атомной энергией, несомненно, в свое время станет важнейшим этапом новой техники, позволяющим решать хозяйственные задачи, бывшие доселе недоступными. Энергия атомного ядра, освобождаемая в соответствующих процессах, неизмеримо больше энергии сгорания угля. Однако и в том и в другом случае перед нами примеры, в сущности, одного и того же — использования скрытой в веществе энергии в доступной форме.

Какими же путями скрытая энергия, эквивалентная массе, может превращаться в доступные формы световой или тепловой энергии? С точки зрения представлений современной физики можно указать три таких пути. Путь первый — это полное превращение частиц вещества, например протонов, в свет. В предыдущей главе (стр. 43) мы говорили о процессе превращения света в вещество, о переходе светового кванта в электрон и позитрон. Однако возможен и обратный процесс. Вероятность его в обычных условиях необычайно мала, но внутри Солнца при колоссальной плотности вещества, огромных давлениях и темпе-

¹ Имеется в виду не скрытая энергия угля, а энергия системы (уголь + кислород), освобождающаяся при переходе этой системы в углекислоту (сгорание).— *Ред.*

ратурах, измеряемых миллионами градусов, подобные процессы могут происходить много чаще. В итоге этих процессов вся масса исчезающих частиц проявится в энергии света. Во избежание довольно часто встречающейся ошибки при этом важно заметить, что масса не исчезает, не превращается в энергию, как это иногда говорят; масса остается в виде массы получающихся фотонов, но только эквивалентная энергия из формы недоступной становится вполне доступной — световой.

Второй путь перехода скрытой энергии, эквивалентной массе, в энергию доступную состоит в распаде атомных ядер. Давний известный пример этого — распад атома радия. Однако этот естественный процесс происходит чрезвычайно редко, он не может служить источником значительных количеств энергии. Важнейшим шагом вперед в вопросе использования распада атомного ядра как источника энергии было открытие распада изотопа атома урана с атомным весом 235, входящего в количестве 0,7% в обычный уран, под действием медленных нейтронов. Главное преимущество этого процесса состоит в том, что он имеет цепной характер. В результате распада ядра возникают снова нейтроны, в свою очередь вызывающие распад, и т. д. Получается цепь распадающихся ядер, причем каждое звено этой цепи сопровождается выделением значительной энергии. На основе этого явления построена вся техника освобождения атомной энергии сегодняшнего дня. Для Солнца этот процесс, по-видимому, не имеет значения; внутри Солнца, на основании весьма правдоподобных теоретических представлений, ядер тяжелых атомов урана и других нет.

Имеется, однако, третий путь превращения скрытой энергии, неразрывно связанной с массой, в доступные формы. Этот путь противоположен второму, он состоит не в распаде, а, наоборот, в усложнении, в синтезе атомных ядер. Это давно известно из сопоставления атомных весов. Например, атомный вес водорода равен 1,0080, а атомный вес гелия 4,003. Но гелий должен быть построен из четырех атомов водорода $4 \times 1,0080 = 4,032$. Сравнивая эту величину и указанный атомный вес гелия, мы получаем заметную разницу $4,032 - 4,003 = 0,029$ ¹. Единственное объяснение этой разницы состоит в том, что при образовании ядра гелия из ядер водорода (протонов) исчезает значительная масса, она превращается в излучение или в другие формы энергии. Энергия эта громадна: при превращении 1 г водорода в гелий должна выделяться энергия в 5 млн. раз большая, чем энергия, получаемая при сжатии 1 г водорода в присутствии 8 г кислорода в воду.

¹ Точнее — ядро гелия построено из двух протонов (ядер водорода) и двух нейтронов. В соответствии с этим разница между атомным весом He и составляющих его частиц равна 0,030 — *Ред*

Есть довольно веские основания предполагать, что именно этот процесс образования ядер гелия из ядер водорода (протонов) и лежит в основе солнечной энергетики. Роль ускорителя, «катализатора», при этом, вероятно, играет ядро углеродов. Вопрос о действительном процессе, приводящем к превращению связанной энергии атомных ядер в излучение внутри Солнца, не может, однако, еще считаться окончательно решенным: ясно только, что имеется несколько возможностей для этого. Не приходится сомневаться, что получаемый нами на Земле свет Солнца есть результат работы огромной машины, освобождающей в течение многих миллиардов лет внутри Солнца атомную энергию.

В наших земных лабораториях мы не можем воссоздать тех огромных давлений и температур, которые должны быть внутри Солнца. Можно с несомненностью утверждать одно: излучение должно сопровождаться уменьшением солнечной массы. Солнце, так сказать, само себя сжигает, но не в обычном химическом смысле, когда продукты горения остаются бесполезной инертной массой; здесь масса переходит в мировое пространство в виде активной формы энергии — световой радиации; два литра воды, как мы видели, по массе равны свету, получаемому всей Землей от Солнца в секунду. Но мы хорошо знаем, что за счет двух килограммов света живет вся Земля, в то время как два литра воды это незаметная «мелочь».

Солнечные лучи несут с собой солнечную массу. Свет — не бестелесный посланник Солнца, а само Солнце, часть его, долетевшая до нас в совершенной, раскрытой, в энергетическом смысле, форме, в форме света.

Г Л А З

«Глаз обязан бытием своим свету. Из безучастных животных вспомогательных органов свет вызывает орган, который стал бы ему подобным; так образуется глаз на свету, для света, чтобы внутренний свет встречал внешний».

Г ё т е

«Лучи твои создают глаза всех тварей твоих»

«Малый гимн Атому»

Живое существо не имеет более верного и сильного защитника, чем глаз. Видеть — значит различать врага и друга и окружающее во всех подробностях. Другие органы чувств выполняют то же, но несравненно грубее и слабее. Осязание и чувство теплоты дают нам вести о внешнем мире только при непосредственном соприкосновении; слух и обоняние, извещающие издали, недостаточно информируют о расстоянии, направлении и формах. Наши слова «очевидно», «поживем — увидим» равносильны тому, что видимость — достоверность. Современный физик убеждает других в реальности атомов тем, что мы, наконец, увидели пути отдельных атомов, а прежние противники существования атомов постоянно аргументировали тем, что атомов никто не видел. В этом смысле надо понимать изречение Анаксагора: «Зрение есть явление невидимого», невидимый мир становится реальностью, явлением посредством зрения.

Задачи идеального глаза как физического прибора ясны. От окружающих предметов исходит свет. Глазу дается направ-

¹ В главе «Глаз» введены весьма небольшие изменения, в соответствии с терминологией физиологической оптики. С. И. Вавилов иногда отступает от строгой светотехнической терминологии. Эти отступления могли быть сделаны сознательно, ввиду сложности этой терминологии, мало пригодной для популярного изложения. Поэтому мы ограничились в этих местах главным образом исправлением опечаток и описок.— *Ред.*

ление лучей, энергия, спектральный состав и поляризация. От каждой точки предмета должно получиться свое, отдельное ощущение. Сочетание этих ощущений в мозговом центре должно воссоздать в идеале точное подобие излучающей поверхности со всеми ее оптическими особенностями. Важна пространственная правильность передачи, мозг должен получить верные сведения о форме, размерах и расстоянии. Далее мозг может корректировать полученные сведения в зависимости от потребности организма.

Как увидим, глаз довольно близко подходит к решению этой идеальной задачи.

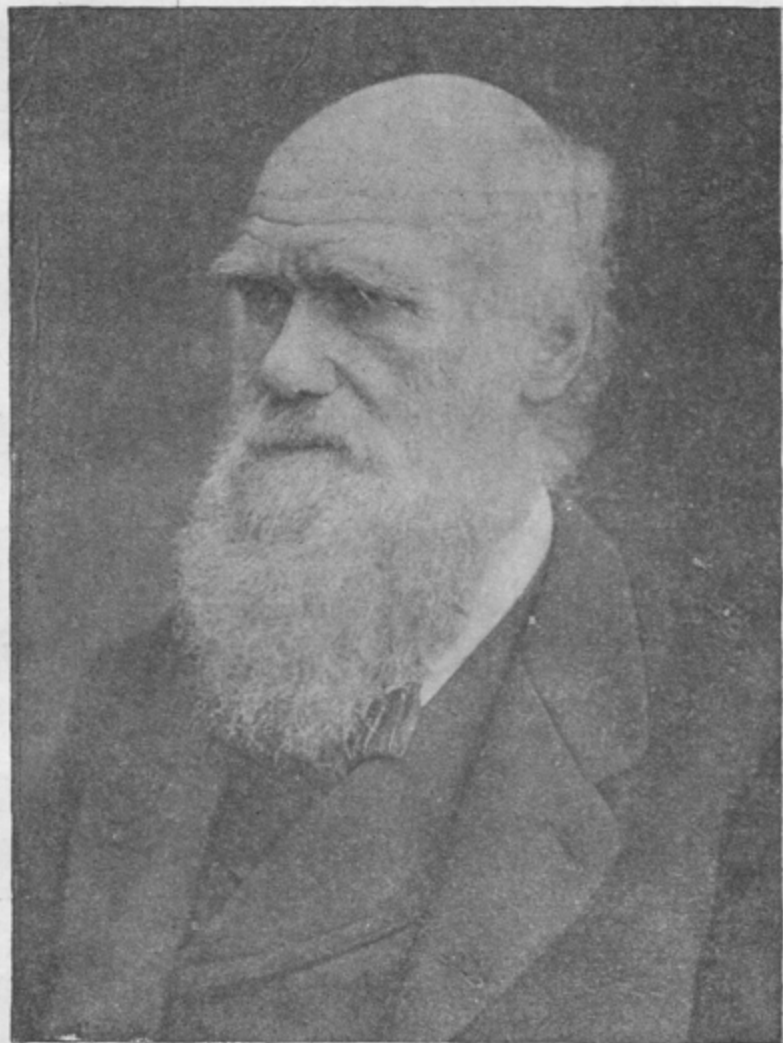
Но как мог возникнуть вспомогательный живой орган, решающий оптические трудности иногда с большим совершенством, чем это доступно современному оптику, вооруженному огромными физическими знаниями и техникой?

На вопросы такого рода ответила биология дарвиновской теорией развития. Глаз есть результат чрезвычайно длительного процесса «естественного отбора», итог изменений организма под действием внешней среды и борьбы за существование, за лучшую приспособленность к внешнему миру.

Могучий фактор наследственности гарантирует сохранение биологических свойств, если они соответствуют внешним условиям и увеличивают стойкость организма в борьбе за жизнь. Многообразные воздействия окружающего мира создают различия в отдельных особях, которые в некоторых случаях дают им преимущества перед остальными. Так происходит «естественный отбор», так выживает и размножается дальше только наиболее приспособленное к внешнему миру, наиболее сильное.

В бесчисленном разнообразии живого перед нами — всевозможные решения оптической задачи; все они не совершенны, но во всех немало целесообразного и, с точки зрения человека, «остроумного».

На рис. 32 сопоставлены некоторые примеры различных способов решения задачи о глазе, о «приборе» для зрительного восприятия внешнего мира. На рис. 32, *а* — пример «глаза» в одноклеточном организме. Перед чувствительным веществом помещается шаровидная линза *l*. Конечно, говорить об аппарате для получения изображения здесь еще нельзя. Ничтожные размеры линзы и ретины в этом случае предопределяют резкие дифракционные явления, а следовательно чрезвычайное искажение изображения. На рис. 32, *б* представлены зрительные органы дождевого червя. Здесь нет глаза; у червя светочувствительна вся его поверхность; зрительные клетки, соединенные с нервными волокнами, распределены равномерно по всему телу; об изображении не может быть речи. Рис. 32, *в* — пример примитивного решения оптической задачи, когда свет воспринимается



Чарльз Дарвин (1809 — 1882)

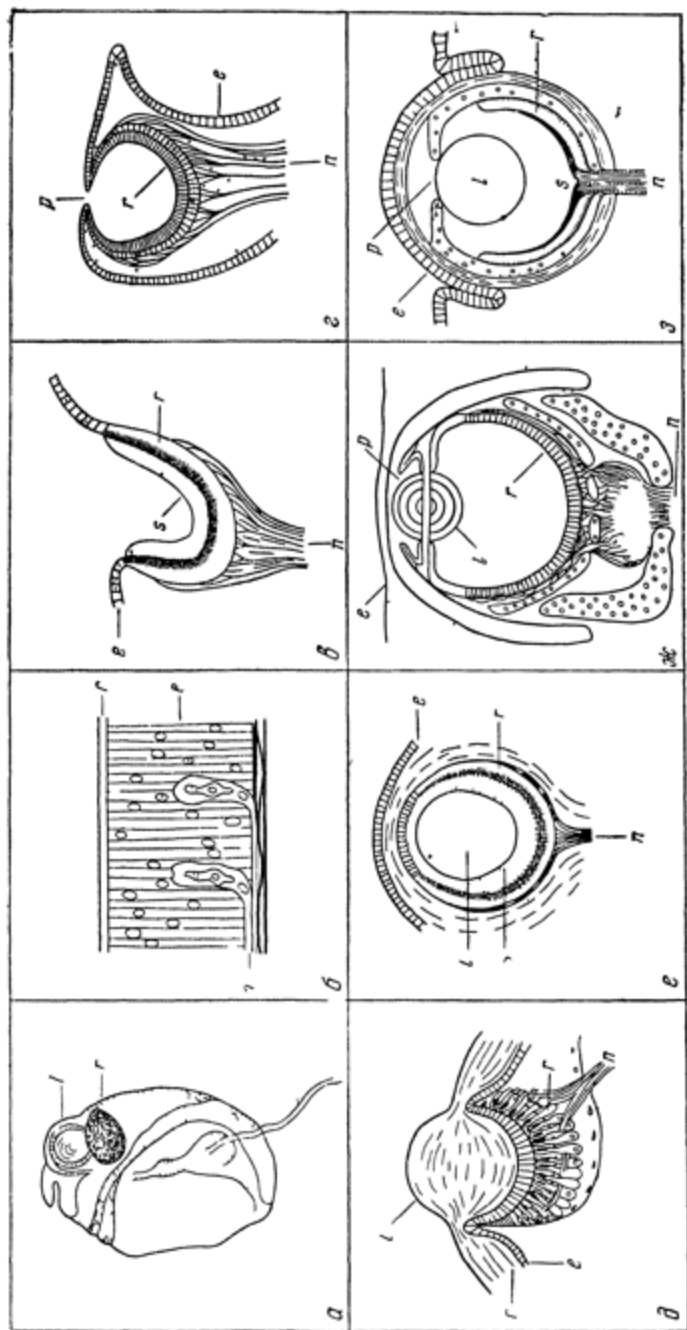


Рис 32 Различные способы зрительного восприятия в животном мире

а — одноклеточный организм *Roschelia cotti*; б — светочувствительные клетки, расположенные по всей коже дождевого червя, в — зрительный орган в виде углубления у ракушки *Raflesia*, г — глаз в виде камеры обскуры у моллюсков, д — глаз скорпиона *Euscorpius* с концентрирующей линзой, е — глаз улитки *Murex*, ж — глаз улитки *Murex*, з — глаз, дающий изображение у головоногого *Loligo*, и — глаз позвоночного с — кутикула, л — линза, н — зрительный нерв, п — сетчатка, р — прозрачная среда

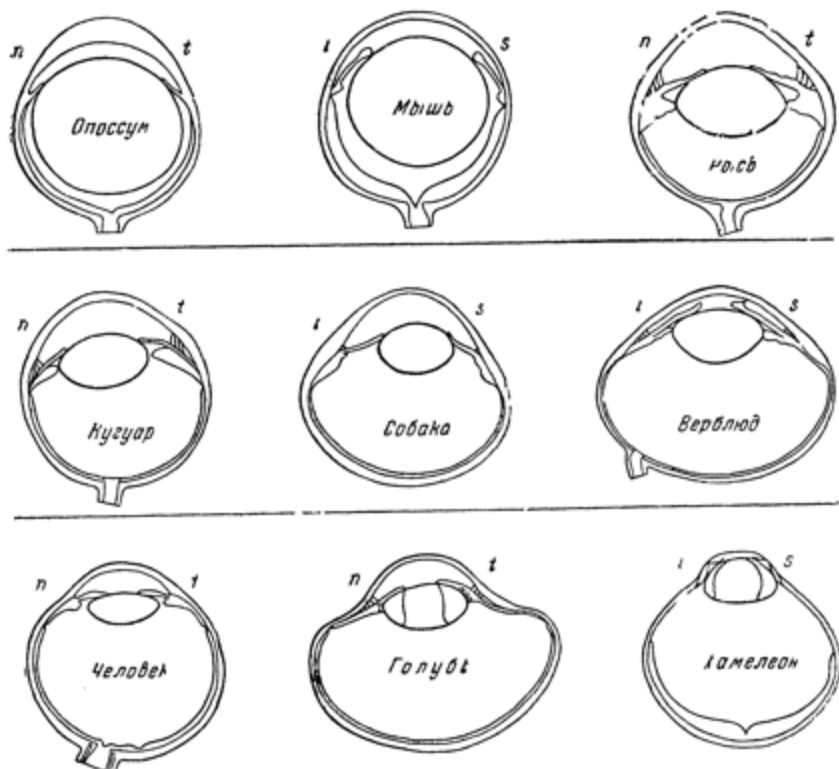


Рис. 33. Разрез глаз различных позвоночных

зрительным углублением, получается нечто вроде уха; при помощи такого устройства можно приблизительно определить направление светящегося тела, но не больше. На рис. 32, *г* мы видим более совершенное решение задачи — живую камеру-обскуру с маленьким отверстием *р* и внутренней светочувствительной полостью *г* у моллюска. Четыре последних примера на рис. 32, *д*, *е*, *ж*, *з* относятся к последовательно совершенствующемуся разрешению оптической задачи с применением линзы. Сначала у скорпиона это еще очень грубый инструмент: вместо линзы шар, близко подходящий к чувствительному слою *г*. Это напоминает стеклянные шары, которыми, по преданию, в древности пользовались как зажигательным стеклом, или микроскоп Левенгукка с «линзами» из капелек меда. На рис. 32, *е*, *ж*, *з* перед нами постепенный переход к глазу, похожему на человеческий глаз, у улитки, головоногих, позвоночных. При этом у различных позвоночных задача решается вовсе не одинаково. На рис. 33 мы видим примеры разрезов глаз нескольких позвоночных, ночных животных (опоссума, мыши, рыси) и дневных

(пумы, собаки, верблюда, человека, голубя, хамелеона). Без пояснений видно, что задача оптически решается с большими вариациями.

Очень интересны и поучительны с точки зрения приспособления живого организма к среде особенности глаз рыб, живущих на больших глубинах, куда почти не проникает солнечный свет. Казалось бы, что здесь рыбы должны быть просто безглазыми; надобности в глазах нет. В действительности это не так. Большинство глубоководных рыб имеет глаза, и притом (относительно) самые большие в мире позвоночных. Глаза их при этом (или в значительной мере поэтому), по-видимому, самые чувствительные в животном мире. Как же согласовать этот факт с отсутствием света на глубине? Ответ состоит прежде всего в том, что слабые следы солнечного света все же проникают и на значительные морские глубины. Преимущества же зрительного восприятия при отыскании пищи, размножении и борьбе за существование таковы, что много выгоднее повышать чувствительность глаза к свету, чем по «линии наименьшего сопротивления» — обречь глаз на отмирание.

Но не только слабые следы света, проникающего в морские глубины, объясняют наличие глаз у существ, живущих там. Глубоководные морские рыбы сами способны производить свет, немного освещать окружающее и становиться видимыми для других зрячих животных. Поэтому у них развиваются люминесцирующие органы, помещающиеся около глаз или на других местах тела. На рис. 34 изображены рыбы *Photoblepharon palpebratus* и *Anomalops katoptron*, у которых рядом с глазом расположена светящаяся ткань (выделенная на рисунке пунктиром). Свечение этой ткани происходит за счет окисления и служит маленьким маяком для рыб, освещая им путь и встречные тела. Такой маяк может быть, однако, и опасным для рыбы, обнаруживая ее врагу. Поэтому у обеих изображенных на рисунке рыб имеются приспособления вроде век для скрытия люминесцирующего маяка в случае надобности. У первой рыбы это производится выдвижением особого темного щитка, у второй сама светящаяся ткань может вдвигаться в особую защитную камеру (рис. 34, в). «Люминесцентные лампы» у глубоководных рыб совсем не редкость. Такими устройствами обладают более 90% всех рыб, живущих на больших глубинах.

В дальнейшем нам придется говорить преимущественно о глазе человека. Это вытекает из основной темы нашей книги, посвященной связи глаза и Солнца; помимо того, только человеческий глаз изучен довольно глубоко, хотя многое и в нем еще неясно до сих пор.

Начнем с пространственной задачи. Как получается геометрическое подобие в глазе и как оценивается расстояние гла-

зом? Свет несет с собой только один элемент пространственности — направление лучей, который и должен быть использован светочувствительным органом. Для живого зеленого листа свет не только вестник окружающих предметов, а источник его жизни. Лист тянется к Солнцу, солнечные лучи направляют лист. Листья разрастаются в солнечную сторону, располагаются на

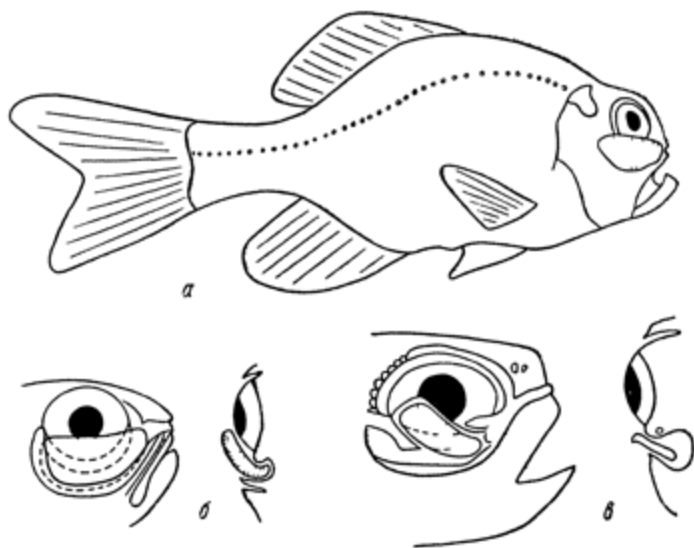


Рис. 34. Рыбы со светоносными органами, связанными с глазами
 а — *Photoblepharon palpebratus*; б — его голова в профиле и в разрезе, показывающих светопроизводящий орган и экран, его закрывающий,
 в — голова *Anomalops katoptron*, профиль и разрез. Видно светоносное приспособление и углубление, в которое оно может пригнаться

дереве так, чтобы не загораживать друг другу Солнца. Очень многие растения и цветы поворачиваются вслед за суточным движением Солнца. Подсолнечники, засеянные на больших площадях, все, как по команде, следуют за положением Солнца на небосводе. Такое стремление к свету, фототропизм (иногда отрицательный), проявляется, помимо растений, у многих бактерий, инфузорий и других простейших организмов. Эта реакция на свет, на направление его лучей и энергию может рассматриваться как примитивная форма зрения.

У некоторых насекомых имеются следующие приспособления для оценки направления лучей и получения зрительных образов (рис. 35). На сетчатой оболочке, образованной нервными окончаниями, расположены, как мозаика, мелкие конусы (наподобие сотов). Стенки этих конусов покрыты темным окра-

шенным веществом, поглощающим свет так же, как поглощает его черный матовый лак внутренних стенок зрительной трубы. На дно такой конусообразной ячейки могут попадать только лучи, ограниченные линиями *B* и *O*. На дно другой ячейки попадут лучи из другого участка. В результате на сетчатке получается мозаичное грубое изображение предмета, по которому насекомое может узнавать его формы.

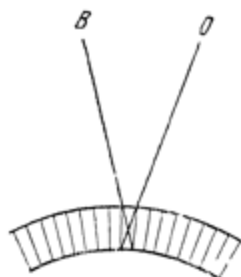


Рис 35 Схема глаз некоторых насекомых

Как в истории фотографического аппарата человек постепенно перешел от камеры-обскуры к прибору с объективной линзой, так и биологическая эволюция привела от мозаики трубочек к зрительному аппарату с линзой у позвоночных животных. На рис. 36 дан разрез человеческого глаза. Глаз почти шарообразен, диаметр его у новорожденного около 16 мм, у взрослого 24 мм; у лошади диаметр глазного яблока достигает 51 мм, у крысы — 6 мм. Снаружи глаз обложен толстой белой оболочкой (склерой); передняя часть ее прозрачна и выпукла (роговица), толщина ее около 0,5 мм. За ней следует передняя глазная камера, отделенная от задней камеры линзой — хрусталиком. Непосредственно перед хрусталиком расположена радужная оболочка с почти круглым отверстием, ограничивающим сечение пучка света, входящего в глаз. Толщина передней камеры и хрусталика около 3,6 мм. Передняя камера наполнена прозрачной жидкостью, задняя — прозрачным стекловидным веществом; показатель преломления обеих близок к показателю преломления воды (1,336).

Внутренняя поверхность склеры покрыта сосудистой оболочкой, которую можно рассматривать как разветвление кровеносных сосудов, питающих глаз. На внутренней поверхности сосудистой оболочки расположена светочувствительная сетчатая оболочка (ретица). Она состоит из двух слоев: наружного, или пигментного, и внутреннего, или нервного, и представляет собой разрастание зрительного нерва.

Прозрачный хрусталик имеет слоистую структуру. Посредством мускулов у радужной оболочки выпуклость хрусталика может изменяться; наибольший показатель преломления в слоях хрусталика 1,41. Изображение в глазе получается на сетчатке так же, как на фотографической пластинке в камере. Способность изменять выпуклость хрусталика (аккомодация) дает возможность устанавливать глаз «на фокус» так, чтобы на сетчатке получалось отчетливое изображение. В детском возрасте удается видеть отчетливо предмет, начиная с расстоя-

ния в 7—10 см от глаза. Нормальный глаз взрослого человека начинает видеть отчетливо только примерно с 14 см. В старости обыкновенно аккомодационная способность чрезвычайно слабеет.

Недостатки глаза (близорукость и дальновзоркость) можно исправлять искусственными стеклянными линзами — очками,

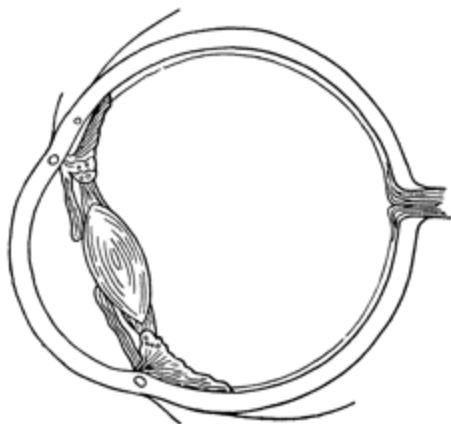


Рис 36. Разрез человеческого глаза

рассеивающими или собирающими. Правильность изображения на сетчатке далека от совершенства. Верная передача достигается только в том случае, если изображение невелико и лежит на оси глаза. Впрочем, следует заметить, что так называемая сферическая аберрация в человеческом глазе довольно хорошо исправлена. Этому способствует особенно то обстоятельство, что хрусталик плотнее в середине, чем во внешних слоях.

Улучшению качества изображения помогает сужение входного отверстия, определяемого радужной оболочкой. Это легко может быть проверено людьми, страдающими дальновзоркостью. При ярком освещении они более четко и ясно видят предметы на небольшом расстоянии (25—40 см). При этом, как известно, отверстие зрачка суживается и, следовательно, уменьшается угол раскрытия лучей, попадающих в глаз. С другой стороны, дальновзоркий человек может прочесть сравнительно мелкую печать на небольшом расстоянии без очков, если будет смотреть сквозь узкое отверстие, оставляемое рукой, сложенной в кулак и прижатой к глазу.

Указанные недостатки в известной мере компенсируются возможностью легкого поворота глаза в глазной впадине. Глаз

можно поворачивать больше чем на 80° в вертикальном и горизонтальном направлениях, быстро обегая таким образом все точки рассматриваемого большого предмета.

Приблизительно плоская картина на сетчатке дает не только представление о его форме, но и о размерах и расстоянии, даже если смотреть одним глазом. Объяснить это можно тем, что в наших предыдущих наблюдениях мы оцениваем расстояния и размеры окружающих предметов, смотря двумя глазами, и к ним относим данное наблюдение одним глазом; определить

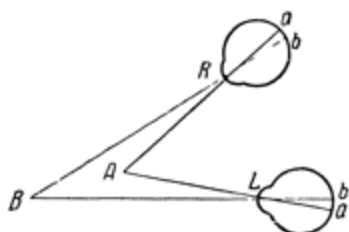


Рис. 37. Зрение двумя глазами

расстояние и размеры позволяют прежний опыт и привычка. Имеет значение, несомненно, также аккомодация хрусталика, степень натяжения которого мы бессознательно чувствуем и по ней оцениваем пространство. Существенную роль надо также приписать бессознательному движению глаза. За короткий промежуток времени получается ряд картин предмета с разных точек зрения, сопоставление которых дает возможность произвести пространственную оценку.

Достоверность пространственных впечатлений при зрении одним глазом, однако, невелика. Возьмите в обе руки по карандашу, закройте один глаз и попробуйте свести карандаши остриями встык. В большинстве случаев это сразу не удастся. Наоборот, смотря обоими глазами, мы никогда не ошибемся в этом опыте. Направляя оси обоих глаз на данный предмет, мы устанавливаем их под определенным углом (рис. 37). Инстинктивная оценка этого угла и служит мерой расстояния в довольно широких пределах. Очень важно приять во внимание, что в наших субъективных зрительных впечатлениях и образах громадную роль имеет ясно нами не сознаваемая работа мозга, вносящая очень большие коррективы в непосредственное физическое изображение на сетчатке. Одно из наиболее существенных проявлений этого вмешательства мозга — выпрямление изображений на сетчатках глаз; в действительности эти изображения, получаемые при помощи хрусталика, обратные. Корректирующая роль мозга очень велика при пространственных

восприятиях. На рис. 38 наверху даны линейные элементы простейшего графического изображения куба, внизу из этих элементов построен куб, и мы сразу получаем пространственную картину. Это, конечно, результат работы мозга. На этом основана возможность правильных перспективных изображений в живописи. Для того чтобы предмет казался нам более удаленным, его надо написать в соответственно уменьшенном размере. Если один человек предполагается стоящим вдвое дальше от воображаемого зрителя картины, то он должен быть написан вдвое меньшим. В то же время изображенные таким образом два человека субъективно кажутся нам одинакового роста, перспективное уменьшение дает лишь возможность воспринимать его находящимся на расстоянии вдвое большем.



Рис. 38. Перспективное восприятие. 12 линий наверху рисунка кажутся лежащими в одной плоскости. Составленный из параллельным перемещением рисунок куба внизу воспринимается как пространственный образ

На рис. 39 представлены результаты опытов Гальвея и Боринга по вопросу о зависимости видимого размера предмета от его расстояния. Предметом служил светящийся диск, угловые размеры которого все время оставались постоянными, расстояние же от наблюдателя менялось в пределах от 3 до 36 м. Види-

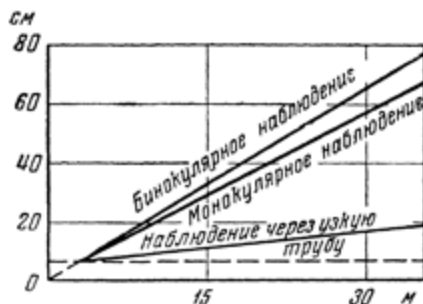


Рис. 39. Опыт Гальвея и Боринга

мый размер сравнивался с другим светящимся диском, находившимся на постоянном расстоянии в 3 м. Диаметр этого диска менялся измеримым образом так, чтобы он как раз равнялся первому, наблюдаемому диску. Если бы мозг не вносил никаких автоматических поправок в размеры изображения на сетчатке, то, ввиду того что угловые размеры первого диска оставались всегда постоянными, следовало бы ожидать, что на рис. 39,



Рис. 40. Фотография лежащего человека. Пример расхождения оптической и мозговой правильности

на котором по оси абсцисс отложено расстояние в метрах, а по ординатам — воспринимаемый нами размер в сантиметрах, мы получим неизменную прямую, параллельную оси абсцисс (она нанесена штриховой линией). В действительности получается совсем иное. При наблюдении последовательно сразу двумя глазами, одним глазом и через длинную тонкую трубку получаются наклонные прямые. Этот наклон уменьшается по мере устранения видимости окружающих предметов.

Описанный опыт в количественной форме соответствует всем хорошо известному факту, что размеры предметов, находящихся недалеко от нас, несмотря на их движения и удаление, кажутся не меняющимися по размеру. Только в отношении очень далеких фигур и предметов мы ясно замечаем, что они становятся маленькими. Это легко видно, если смотреть вниз с высокой башни. Очень большое значение для внесения указанных мозговых поправок в физическое изображение предметов на сетчатке имеет окружающее. Если его устранить, то мы начинаем приближаться к чисто физическому результату, как видно из рисунка. Таким образом, воспринимаемое мозгом изображение не есть простое физическое изображение, оно осложнено не сознаваемыми нами коррективами мозга. Это обстоятельство имеет, конечно, большой биологический смысл. Живое существо нуждается в правильном представлении об окружающих предметах, а не в правильных оптических изображениях. На рис. 40

дана фотография лежащего человека, снятая с близкого расстояния. Оптически здесь все правильно, но снимок кажется нам нелепой карикатурой, так как подметки с гвоздями составляют основу картины. Этот снимок свидетельствует, конечно, о ненамеренной или намеренной неопытности фотографа, но оптически он правилен. Если бы мозг не вносил поправок в работу глаза, нас постоянно преследовали бы подобные карикатуры.

Но мозговое корректирование может приводить и к ошибкам и обманам зрения. Автору этой книги много раз приходилось переживать весьма грубые пространственные ошибки. Один раз маленькая красная сигнальная жестяная пластинка, висевшая вблизи на трамвайных проводах, показалась красным флагом огромных размеров по той причине, что красная пластинка была мысленно ошибочно отнесена к шпилю на удаленном доме в конце улицы. Другой раз в течение короткого мгновения кошка была видна величиной с корову; показалось, будто эта кошка идет по удаленному забору; на самом деле она шествовала по крыше, около окна, через которое ее было видно. Получилась приблизительно двадцатикратная ошибка в оценке расстояния.

Солнце и месяц на горизонте кажутся огромными, в зените — маленькими. Перед нами снова, несомненно, зрительная ошибка, притом свойственная всем людям¹. Причина этой ошибки до сего времени не совсем ясна. Возможно такое объяснение. Оценивая свечение неба, мы, естественно, бессознательно за границу атмосферы принимаем то место атмосферы, которое шлет в наш глаз еще заметный рассеянный свет, и к этой границе относим предметы, находящиеся на небе. На закате и на восходе западный или восточный край атмосферы светится больше всего; предел атмосферы, еще посылающей нам свет, значительно отодвигается, небосвод делается глубже, и к этому удаленному слою мы относим светило. Происходит такая же ошибка, как и в рассказанных случаях с флагом и кошкой.

Психологические причины вносят ошибки не только в пространственные образы, но и для плоских фигур. На рис. 41 проведены две пары параллельных линий, обрамленных соответственной штриховкой. Обе пары кажутся нам переломленными и изогнутыми. При этом даже сосредоточенное внимание не устраняет иллюзии; приходится приложить линейку, и только тогда истина делается несомненной.

На рис. 42 начерчен правильный квадрат. Штриховка в одном из углов создает резкое впечатление перекошенности квад-

¹ Если Солнце или Луну фотографировать на горизонте и в зените, они оказываются одного и того же размера и тут и там.

рата. На рис. 43, на пестром поле, прочерчены прерывистые, строго concentрические окружности. Между тем мы получаем полное и зрительно неустранимое впечатление нарисованной спирали. Убедиться в том, что это не так, можно, только прибегнув к циркулю. Одна из причин зрительных обманов состоит в том, что пестрота штриховки заставляет наш глаз невольно

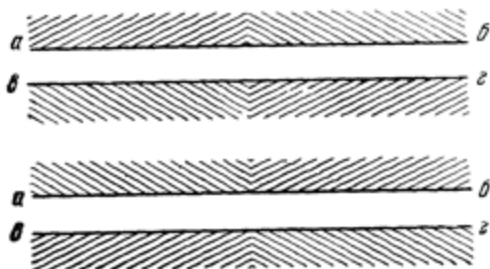


Рис. 41. Обманы зрения

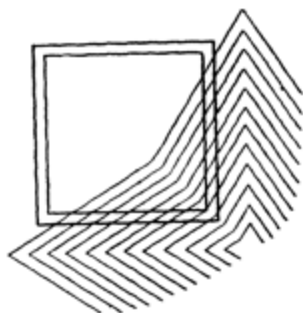


Рис. 42. Обманы зрения

двигаться, перебегая от штриха к штриху. Если осветить рисунки мгновенным светом электрической искры, то обман (по крайней мере для некоторых случаев) пропадает: глаз за время свечения искры не успевает заметно передвинуться.

Итак, пространственная задача далеко не совершенно разрешается человеческими глазами и мозгом.

Перейдем к тому, как оцениваются глазом энергия и спектральный состав света. Для этого следует остановиться на строении сетчатой оболочки, в которой эта оценка производится. На рис. 44 дана схема поперечного разреза через сетчатку. Во внешнем слое 1, непосредственно примыкающем к сосудистой оболочке, расположены клетки, окрашенные черным пигментом. Затем идут основные элементы зрительного восприятия 2, называемые по внешнему виду палочками и колбочками. Слои 3—5 соответствуют нервным волокнам, подходящим к палочкам и колбочкам. За этими слоями расположены так называемые зернистые слои, также связанные нервными волокнами. Слой 8 — это ганглиозные клетки, каждая из которых соединена с нервными волокнами, расположенными в слое 9. Слой 10 — внутренняя ограничивающая оболочка. Каждое нервное волокно оканчивается либо колбочкой, либо группой палочек. Мозаика этих клеточек на поверхности сетчатки далеко не равномерна. Число колбочек и палочек очень велико (около 7 млн. колбочек и более 100 млн. палочек). На рис. 45 видно распределение колбочек и палочек по дну глаза. По оси абсцисс отложено угловое расстояние соответственного места сетчатки от «цент-

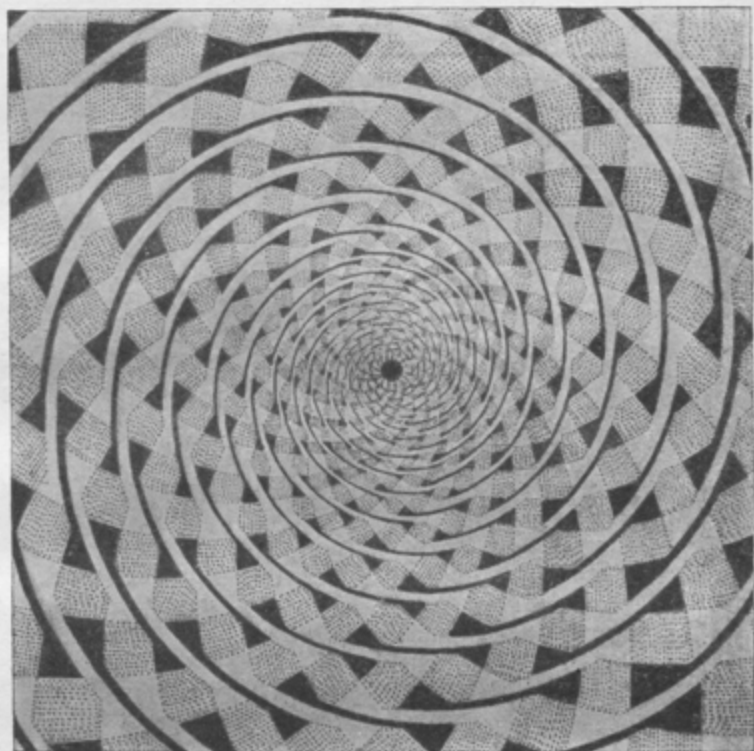


Рис. 43. Обманы зрения

ральной ямки» (*fovea centralis*), по оси ординат — число колбочек K или палочек P на один квадратный миллиметр. Кривые прерываются «слепым пятном», о котором речь будет дальше. Из рисунка видно, что в середине сетчатки преобладают колбочки, к периферии идет преобладание палочек. Палочки окрашены красным зрительным пурпуром, который быстро выцветает под действием света. Длина палочек около 0,06 мм, колбочек — около 0,035 мм. Диаметр палочек составляет около 2 м, колбочек около 6 м. В центре сетчатки находится так называемое «желтое пятно» овальной формы (наибольшая длина 2 мм, наименьшая 0,8 мм). В центре этого пятна преобладают колбочки; палочки совершенно исчезают в «центральной углублении»; это место наиболее отчетливого, резкого зрения. В некоторых местах сетчатки отсутствуют и колбочки и палочки. Если закрыть левый глаз и фиксировать правый на крест (рис. 46), то при расстоянии глаза примерно в 20 см от книги черный диск справа перестанет быть видимым: его изображение попадает на место

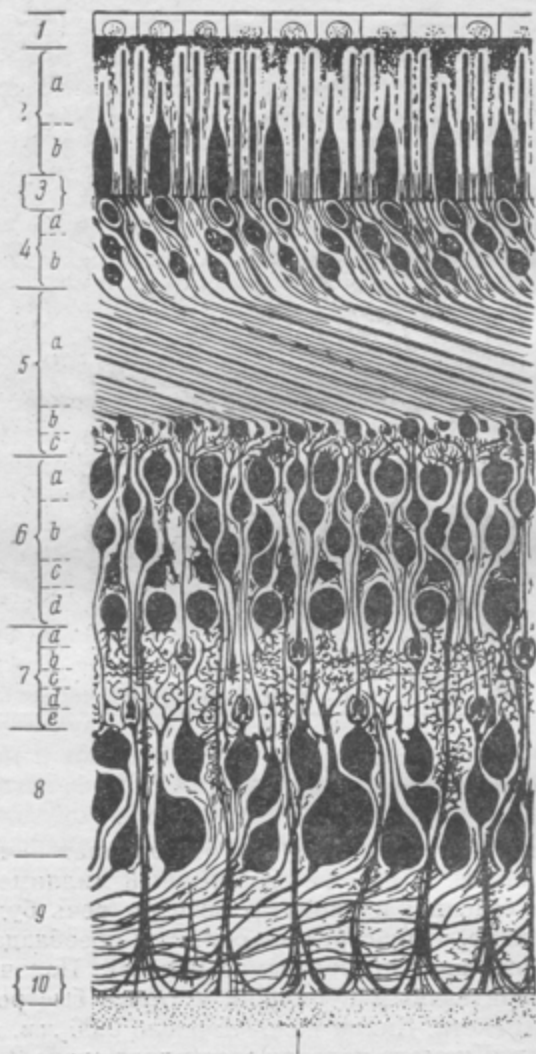


Рис. 44. Схема разреза через сетчатку человеческого глаза. Стрелка показывает направление света, падающего на сетчатку

входа зрительного нерва, где нет светочувствительных элементов (слепое пятно).

Насколько проста оптическая часть глаза, настолько сложен его воспринимающий механизм. Мы не только не знаем физиологического смысла отдельных элементов сетчатки, но не в состоянии сказать, насколько целесообразно пространственное распределение светочувствительных клеток, к чему нужно слепое

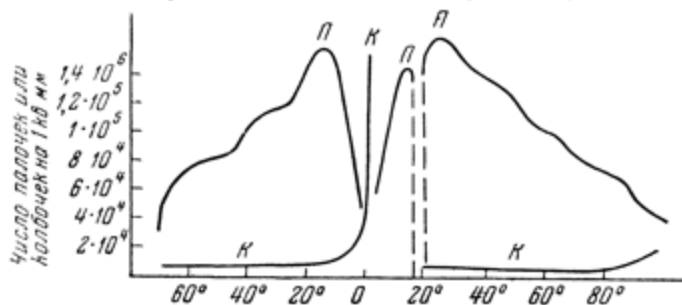


Рис. 15. Распределение палочек и колбочек на сетчатке по Остербергу

пятно и т. д. Перед нами не искусственный физический прибор, а живой орган, в котором достоинства перемешаны с недостатками, но все неразрывно связано в живое целое.



Рис. 16. Рисунок Марриотта для нахождения слепого пятна

Займемся теперь вопросом об оценке энергии света, приходящего в глаз. Этот вопрос трудно отделить от вопроса о цветности; глаз получает зрительное впечатление только от лучей с длинами волн примерно от 400 до 750 м μ . Только при сравнительно мощном излучении удастся видеть ультрафиолетовые лучи в интервале приблизительно от 400 до 300 м μ и инфракрасные от 750 до 950 м μ , причем видимость в этих областях спектра сильно зависит от возраста и колеблется в широких пределах для разных наблюдателей. Ограничимся только этим участком длин волн. В предыдущей главе мы видели, что энергия солнечного света, падающая в секунду на 1 кв. см поверхности земной атмосферы, равна 0,033 калории. На долю видимых лучей приходится около 40% этой величины. Наибольшее отверстие в радужной оболочке не превышает 0,7 кв. см. Из этих цифр нетрудно видеть, что максимальная энергия видимого солнечного света,

которая может проникнуть в глаз за секунду, не превышает 0,01 калории. Разумеется, собрав солнечный свет или свет вольтовой дуги зеркалом или линзой, можно в тысячи раз превысить этот предел. В природе таких зеркал и линз нет, факты такого рода повлиять на эволюцию глаза не могли, поэтому здесь их можно оставить в стороне. Если бы энергия в 0,01 калории в секунду была сосредоточена в области зеленого цвета с длиной

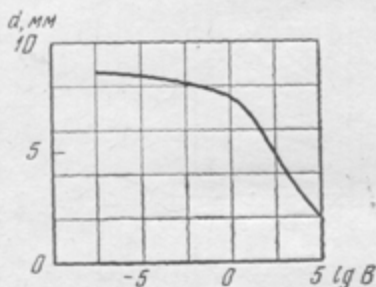


Рис. 47. Изменение диаметра зрачка глаза при увеличении яркости

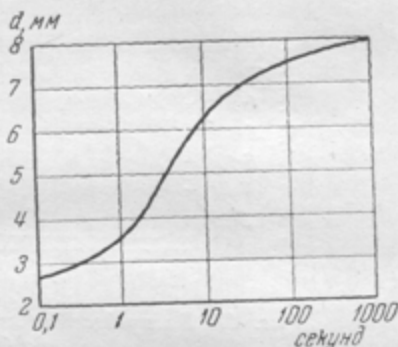


Рис. 48. Изменение диаметра зрачка со временем, после перехода из хорошо освещенного помещения в темноту

волны 556 м μ (максимум чувствительности глаза), то глаз получил бы зрительное впечатление, как от лампы в 200 000 свечей, поставленной на расстоянии 1 м от глаза. Таков верхний предел. С другой стороны, глазу надо уметь различать ничтожный свет темной ночи, когда сила света не достигает и миллионных долей одной свечи. Глаз должен приспособиться к любым интенсивностям в этом огромном интервале, чтобы обслуживать живое существо на Земле.

При работе фотографическим аппаратом есть три способа приспособиться к изменению яркости света. Во-первых, можно в широких пределах менять «выдержку» снимка, от тысячных долей секунды до часов и дней. Во-вторых, можно менять отверстие объектива, расширяя или уменьшая так называемую диафрагму. Наконец, чувствительность пластинок может быть очень различной; соответственно освещенности можно применять те или иные пластинки.

Для глаза первый способ недопустим, он должен давать всегда «моментальные снимки». Второй способ глазом применяется. Отверстие радужной оболочки автоматически, в зависимости от яркости света, может сжиматься или расширяться. Диаметр наибольшего отверстия в среднем около 8 мм, наименьшего — около 2 мм. Площадь отверстия может, следовательно, изме-

ряться раз в 16. На рис. 47 приводится ход изменения диаметра зрачка по мере увеличения яркости. По оси абсцисс отложен логарифм яркости, по ординатам — диаметр зрачка. На рис. 48 представлено изменение диаметра зрачка d со временем после перехода из хорошо освещенного помещения в темноту. Из этих рисунков ясно, что изменение диаметра зрачка совершенно недостаточно для компенсации изменений яркости, с которыми приходится иметь дело глазу. Природа привлекает третий, наиболее радикальный способ — изменение чувствительности сетчатки. К темноте глаза начинают приспособляться (адаптация), постепенно чувствительность сетчатки нарастает. При этом элементы сетчатки — колбочки и палочки — ведут себя очень различно. В колбочках чувствительность возрастает только в несколько десятков раз по сравнению с чувствительностью на дневном свете. В палочках чувствительность медленно (в течение часа и более) увеличивается в полной темноте в сотни тысяч раз, достигая некоторого предела. Предельная величина порога зрительного раздражения выражается для света с длиной волны около 500 мμ цифрой около $5 \cdot 10^{-18}$ калории в секундах на 1 кв. см. Однако эта величина различна для разных людей и зависит от условий опыта (маленький и большой источник света, прерывное или постоянное освещение). Кроме того, для достижения такой чувствительности глаза необходимо, чтобы изображение источника на сетчатке получалось не в ее центре, а на периферии, где чувствительность больше. Для этого при наблюдении приходится скосить глаз, смотря на источник «бокком».

Стеариновая свеча на расстоянии 1 м от глаза посылает около двух десятимиллионных ($2 \cdot 10^{-7}$) калории в секунду на 1 кв. см в видимых лучах. Для того чтобы от нее доходило до глаза $5 \cdot 10^{-18}$ калории, ее надо бы удалить от глаза на 200 км. Иными словами, можно сказать, что порог зрительного раздражения соответствует энергии видимого света, падающего на 1 кв. см в секунду от стеариновой свечи, удаленной от глаза на 200 км. При этом, конечно, предполагается, что атмосфера света не поглощает, что на самом деле неверно.

Изумительная приспособленность глаза к изменениям освещенности особенно стала выясняться за последние годы. На схеме поперечного разреза сетчатки (см. рис. 44) видно, что во внешнем слое находятся зерна черного пигмента. Какую роль он выполняет? Несомненно, что пигмент ослабляет свет, доходящий до палочек и колбочек, и, стало быть, защищает их от слишком яркого света. Но, очевидно, такая защита становится ненужной и, наоборот, вредной в ночных условиях, при очень слабых освещенностях. Исследование у некоторых видов животных (рыбы, амфибии) показало, что при слабом свете черный

пигмент из верхнего слоя сетчатки постепенно опускается на ее дно и таким образом перестает мешать доступу света. Самый процесс постепенной адаптации глаза к темноте мог бы объясняться медленным переходом черного пигмента на дно сетчатки. Однако у других животных (например, обезьян), по-видимому, миграция пигмента не происходит. Впрочем, этот вопрос еще не окончательно выяснен.

Мы говорили выше, что отверстие радужной оболочки сжимается при возрастании освещенности, но при некоторых болезнях, а также при вырыскивании различных веществ в организм сокращение зрачка прекращается, он остается широко раскрытым при любом освещении. Опасность ослепления при этом, однако, оказывается предотвращенной. Световые лучи, попадающие на самый край широко раскрытого зрачка в условиях довольно яркого освещения, вызывают на сетчатке зрительное раздражение, приблизительно в пять раз меньшее, чем при падении на центр зрачка. Каким образом это достигается, до сих пор неизвестно, но во всяком случае несомненно, что при ярком освещении даже при вполне открытом зрачке действует главным образом только центральная часть отверстия; свет, проходящий через краевые области зрачка, действует на сетчатку очень слабо; наоборот, при переходе к слабым освещенностям все части зрачка одинаково действительны и, следовательно, широкое раскрытие его в темноте сильно увеличивает световое раздражение.

Естественно предположить, что при этом большую роль играет черный пигмент, переставший загоразивать сетчатку при слабых освещенностях. Однако, как упоминалось, миграция пигмента у человека еще не доказана.

В главе о свете мы встретились с общим законом действия света: свет может поглощаться и действовать только целыми квантами. Иными словами, нельзя построить прибор, который отвечал бы на энергию меньше кванта, по той простой причине, что свет обнаруживается только по его действиям. Энергия $5 \cdot 10^{-18}$ калорий в секунду (для длины волны 500 м μ) соответствует 52 квантам. Эти 52 кванта «растянуты» на секунду. Отсюда ясно, что мгновенно глаз в состоянии зрительно почувствовать очень небольшое число квантов, т. е. близок по своим свойствам к идеальному прибору в смысле чувствительности.

Пользуясь этим, можно глазом обнаружить прерывное, квантовое строение света. Представим себе, что мы смотрим на маленькое, слабо светящееся пятнышко *A* (рис. 49), яркость которого можно по произволу ослаблять. Предположим, что яркость источника ослаблена до такой степени, что от него в глаз попадает в секунду только небольшое число квантов. Кванты не могут следовать один за другим регулярно, через одинаковые про-

межутки времени; они будут лететь беспорядочно, иногда в большем числе, иногда в меньшем. Разумеется, и яркий источник света излучает беспорядочный поток квантов, но в этом случае число квантов огромно и процентные случайные отклонения от среднего будут практически незаметными. Точно так же, например, процентные колебания в числе новорожденных за год в большом городе ничтожны, и это число статистик предсказы-

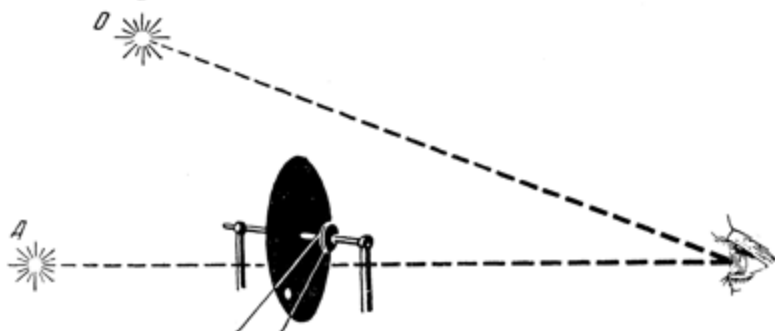


Рис. 49. Схема наблюдений квантовых флуктуаций света

вает с большой точностью, но число рождений в небольшом доме того же города за год будет колебаться в чрезвычайно широких пределах, и предсказания статистика в этом случае, несомненно, окажутся ошибочными.

Таким образом, по законам статистики (если только верна теория квантов) следует ожидать, что при ослаблении источника света, когда за секунду в глаз будет попадать небольшое число квантов, должны возникнуть резкие колебания яркости источника. Если число квантов, попадающих в глаз, будет меньше числа, соответствующего порогу зрительного раздражения, то глаз не ощутит света; наоборот, если число квантов превышает порожнее значение, свет будет виден. Следовательно, при постепенном понижении яркости источника должен наступить такой момент, когда источник для глаза должен превратиться из постоянного в мигающий.

Однако в такой простой форме опыт осуществить нельзя и по двум причинам. Во-первых, глазное яблоко, как мы говорили, чрезвычайно подвижно, вследствие чего колебания яркости получаются и при больших интенсивностях. Поэтому глаз следует фиксировать. Это достигается тем, что в стороне от светящейся точки *A* помещается более яркая (обыкновенно красная) светящаяся точка *O*, которая и фиксируется глазом. Таким образом, в центре сетчатки получается изображение этой фиксационной точки, а изображение источника *A* получается в стороне, на постоянном расстоянии от центра.

Далее, глаз обладает свойством сохранять зрительное впечатление; это свойство дало, например, возможность осуществить кино. Но оно же, конечно, будет мешать восприятию быстрых колебаний интенсивности источника света; эти колебания будут сливаться, размываться и усредняться для глаза.

Чтобы обойти это затруднение, можно поступить так. Между глазом и источником помещается диск с одним отверстием (см. рис. 49). Диск совершает один оборот в секунду, оставляя источник открытым для глаза только во время прохождения отверстия (например, в течение одной десятой секунды). При такой установке глаз видит только короткие вспышки через каждую секунду. Если число квантов во время каждой вспышки будет одно и то же и больше порожного значения, то каждому прохождению отверстия будет соответствовать вспышка. Если же число квантов, излучаемое за время прохождения отверстия, подвергается резким статистическим колебаниям, то, очевидно, не всякому прохождению отверстия будет соответствовать видимая вспышка.

Опыт подтвердил это ожидание. Действительно, при больших интенсивностях фиксированный глаз при каждом прохождении отверстия видит вспышку, но при постепенном ослаблении яркости начинают наблюдаться пропуски, которые становятся тем чаще, чем слабее яркость.

Считая число пропусков и вспышек, по законам статистики можно определить среднее число квантов, излучаемое при таких условиях за одну вспышку. Глаз, таким образом, действительно «воочию» позволяет убедиться в квантовой, прерывной структуре света.

Замечательно, что таким способом определяется не чувствительность глаза как целого, а чувствительность только последних клеток (палочек), ответственных за зрительное возбуждение. Найденная до сих пор у разных наблюдателей предельная чувствительность колеблется в широких пределах от двух до нескольких десятков квантов-фотонов. Отдельные кванты стали в буквальном смысле слова видимыми.

Описанные опыты, помимо своего очевидного значения для теории света и глаза, вместе с тем дают исследователю новый способ изучения сетчатки глаза у здоровых и больных людей без хирургического вмешательства, в нормальном состоянии глаза.

Мы говорили до сих пор о крайних значениях энергии, с которыми приходится иметь дело глазу на Земле. Но прямой свет Солнца глаз выносит с трудом, а яркости, лежащие на пороге зрительного раздражения, замечает с крайним напряжением. После продолжительного смотрения на Солнце нас долго сопровождает отпечаток солнечного диска на сетчатке: взглянув на

белую стену, мы видим на ней темный цветной диск — это утомленное место сетчатки. Такие же длительные утомления получаются и от обыкновенных ламп, если они слишком ярки. Иногда, например, после долгой работы с незакрытой вольтовой дугой это утомление может длиться часами и в крайнем случае приводит к ослеплению. Если долго смотреть на Солнце или яркую лампу, то и при закрытых глазах мы отчетливо видим образ светящегося тела, окраска которого постепенно изменяется, а интенсивность постепенно слабеет (последовательные образы). Последовательные образы (отрицательные и положительные) — верный признак ненормально большой яркости изображения на сетчатке. Иногда отпечаток, виденный при ярком освещении, остается на сетчатке почти целые сутки. Его удается видеть особенно ясно ночью или рано утром при закрытых глазах. Сетчатка в этом случае действует как фотографическая пластинка. До сих пор неизвестно, за счет каких изменений в сетчатке это происходит. Очевидно, существует некоторая яркость, наиболее приятная для глаза, наблюдаемая без напряжения и переносимая без утомления.

На рис. 50 графически изображены результаты следующего опыта: испытуемого заставляли читать развернутую книгу на расстоянии 25 см; освещенность книги менялась: при этом просили указать, сколько слов прочитывается в минуту при той или иной освещенности. На рисунке по горизонтальной оси отложена освещенность таким образом, что, например, цифра 40 соответствует лампе в 40 свечей, поставленной на расстояние одного метра от книги, по вертикальной оси отложено число прочитанных слов в минуту. Верхняя кривая *a* соответствует нормальному глазу, нижняя *b* — глазу, испорченному долгой работой при искусственном освещении. Мы видим, что сначала при возрастании освещенности продуктивность чтения быстро растет, но при 100 люксах¹ возрастание прекращается. Это — очень важное обстоятельство, которое приходится принимать во внимание при освещении рабочих помещений, комнаты и пр.

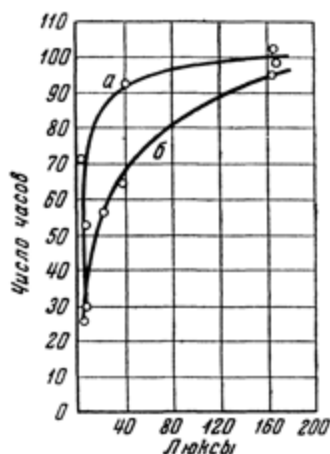


Рис. 50. Скорость чтения в зависимости от освещенности

¹ Люкс — освещенность, получаемая от одной свечи на расстоянии в один метр.

Многочисленные опыты, произведенные за последние десятилетия светотехниками и врачами, показывают, что производительность различных видов труда заметно повышается, если увеличивать освещенность до 300 и даже 500 люксов. При этом заметного утомления глаза не наблюдается. Это предел, к которому должна стремиться наша светотехника. В большинстве случаев мы еще очень далеки от этого предела. На искусственное освещение еще не обращено то большое внимание, которого оно заслуживает.

Освещенность окружающего в природе и яркость изображений на сетчатке глаза меняются в самых широких пределах в зависимости от времени года и дня, от облачности, от того, какие предметы находятся кругом (зелень, снег). Вывести «оптимальное» среднее для всех живых существ невозможно. Для дневных животных оно одно, для ночных (сов, летучих мышей) совсем другое. Для них свет наших скромных ламп и свечей невыносим. С биологической точки зрения «оптимальная освещенность» должна быть результатом эволюционного приспособления глаза к средней освещенности, создаваемой на Земле Солнцем. Глаз в отношении энергии приспособлен не к самому Солнцу, а к солнечному свету, рассеянному от окружающих тел. Об этом свидетельствуют переменная диафрагма зрачка, изменение чувствительности сетчатки и наиболее удобная яркость.

Заметим еще следующее. Для утомления глазной сетчатки не столько важна полная энергия, входящая в глаз, сколько энергия, приходящаяся на единицу площади изображения на сетчатке. Чем дальше стоит свеча, тем меньше ее изображение; но «удельная яркость», т. е. яркость на единицу поверхности изображения, остается постоянной в широких пределах при передвижении свечи. Если взглянуть на длинный ряд дуговых светящихся фонарей убегающей вдаль городской улицы, то яркость ближних и дальних фонарей кажется почти одинаковой (свет дальних фонарей несколько ослабляется поглощением в запыленном воздухе). Другое дело, если заставить освещаться какую-нибудь поверхность светом первого, второго, третьего фонаря и т. д.; в этом случае мы увидим, что освещенность будет чрезвычайно быстро убывать с увеличением расстояния до фонаря. Малосвечная, тусклая лампа, если на нее смотреть в упор, может крайне утомлять глаз, — изображение волосков лампы на сетчатке будет обладать очень большой «удельной яркостью». Вот почему лампы снабжаются рассеивающими свет колбами и абажурами. Забвением этого объясняются частые жалобы, что современные люминесцентные лампы, имеющие вид узких ярких светящихся трубок, вызывают «боль» в глазах. Избавиться от этого можно просто, поставив перед несколькими лампами

рассеивающее матовое или молочное стекло. Можно также спрятать лампы так, чтобы они освещали, но их самих не было видно. Проще всего, конечно, не смотреть прямо на лампы, а только на освещенные ими предметы.

До сих пор мы говорили об абсолютной оценке световой энергии глазом. Оценка эта совершенно качественная: большие яркости мы воспринимаем «болезненно», ничтожные — «неприятной напряженностью», есть яркости для нас «удобные и приятные»; но мы не чувствуем ни изменения величины зрачка, ни изменения чувствительности сетчатки; эти процессы не доходят до сознания, а только они и могли бы служить действительной оценкой яркости. Мы резко замечаем только минимальную величину света (порог раздражения), потому что за нею зрительное впечатление полностью исчезает. Поэтому только наличие порога зрительного ощущения дает возможность иногда использовать глаз в качестве прибора для абсолютных измерений величины энергии света.

Но глаз может сравнивать яркости, судить о том, что светлее и что темнее. Суждение само по себе опять качественное, но им нетрудно воспользоваться для количественных измерений. Положим, что две лампы освещают каждая одну из рядом поставленных белых поверхностей (рис. 51). Одна поверхность кажется темнее, другая светлее. Имеется немало способов ослаблять силу света в точно известное число раз (простейший способ — отодвигание лампы). Изменим расстояние одной из ламп во столько раз, чтобы освещаемая ею поверхность казалась нам одинаковой яркости с соседней. Добившись этого, можно сказать, что одна лампа сильнее другой во столько раз, во сколько потребовалось ослабить ее свет. Если справа, например, стояла свеча, а слева 16-свечная лампа, то последнюю для достижения равенства освещенности придется ослабить в 16 раз (например, отодвинуть на расстояние, в четыре раза большее, чем до свечи). Этот прием называется фотометрированием, а соответствующие приборы фотометрами.

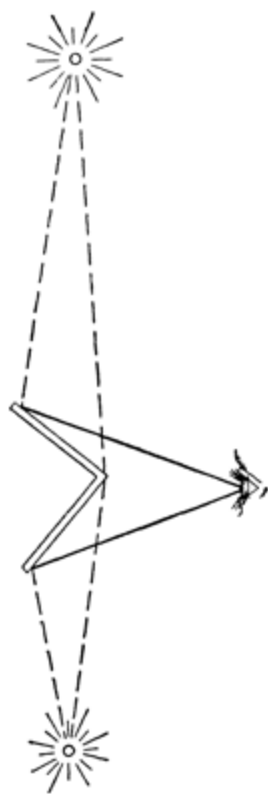


Рис. 51. Схема фотометра

В настоящее время существует множество всякого рода фотометров, основанных на фотографическом, фотохимическом и фотоэлектрическом действии света. Эти приборы дают возможность производить измерения не только в видимом, но также и в инфракрасном и ультрафиолетовом свете, притом с большой точностью. Однако сейчас фотометр для нас интересен главным образом потому, что он позволяет обнаружить важные свойства человеческого глаза.

Насколько тонко может судить глаз о том, что две поверхности освещены одинаково? При какой разнице в освещении он заметит это? Пусть, скажем, две поверхности одинаково освещены тысячесвечными лампами, расположенными на расстоянии 1 м от поверхностей; заметим ли мы разницу, если с одной сто-

Таблица 2

| Сила света в свечах | Наименьший заметный прирост в % | Сила света в свечах | Наименьший заметный прирост в % |
|---------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 200 000 | 4,25 | 100 | 2,78 |
| 50 000 | 2,55 | 50 | 3,78 |
| 20 000 | 1,83 | 20 | 4,60 |
| 10 000 | 1,63 | 10 | 6,10 |
| 5 000 | 1,58 | 5 | 10,3 |
| 2 000 | 1,80 | 2 | 16,7 |
| 1 000 | 1,98 | 1 | 21,2 |
| 500 | 2,25 | 0,5 | 27,6 |
| 200 | 2,35 | 0,2 | 33,2 |

роны прибавим одну свечу? Опыт показывает, что нет; надо добавить примерно 20 свечей, чтобы разница освещения стала заметной. Отношение наименьшего заметного прироста освещения к основному освещению будет стало быть 20 : 1000, т. е. 2%. В табл. 2 приведены значения этого процентного прироста для разных сил света (в свечах) для желтого света с длиной волны 605 мμ.

Исходная сила света в 200 000 свечей в таблице приблизительно соответствует освещенности прямым солнечным светом. Мы видим, что глаз лучше всего различает разницу в яркостях примерно при силе света в 5000 свечей; при больших и меньших яркостях эта способность уменьшается и необходимый процентный прирост возрастает. Величина прироста почти постоянна (около 2%) в пределах 200—20 000 свечей.

Способность различать яркости имеет, конечно, большое значение для живого существа; она позволяет отличить один пред-

мет от другого. Ширина интервала (200—20 000 свечей), где эта способность наиболее развита, приблизительно соответствует тем колебаниям освещенности, вызываемой Солнцем, о которых говорилось выше. Стало быть, способность различать яркости, так же как и абсолютное ощущение яркости глазом, приспособлены к Солнцу, но не к прямому солнечному свету, а к его лучам, рассеянному атмосферой и окружающими предметами.

«Солнечность» глаза, точнее говоря — его приспособление к солнечному свету, яснее всего, однако, сказывается в том, как отвечает глаз на спектральный состав света. Шкала лучей безгранична: со стороны длинных волн она уходит в бесконечность,

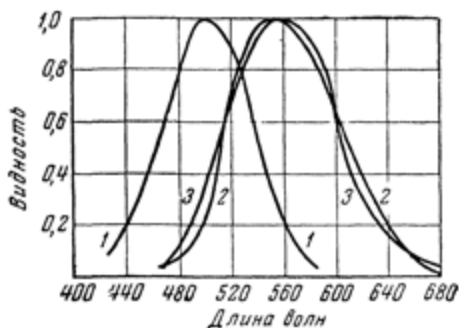


Рис. 52. «Дневная» и «сумеречная» кривые видимости

со стороны коротких волн на границе стоят волны ничтожно малые. Участок видимых волн тонет в этом многообразии. Предположим, что к глазу подводятся лучи с разными длинами волн, но с равной энергией. Инфракрасные лучи глаз совсем не увидит, красные заметит, но слабо, желто-зеленые, покажутся ярче всего, фиолетовые будут едва заметны, а ультрафиолетовые почти совсем невидимы.

Возьмем яркость желто-зеленых лучей за единицу и сравним с нею яркости других лучей при одинаковой энергии (практически это сделать нелегко). Таким образом получится кривая так называемой «видимости» лучей (рис. 52). По горизонтальной оси рисунка отложены длины волн, по вертикальной — видимость. При значительных яркостях получаются кривые, находящиеся справа; кривая 2 соответствует «среднему» глазу, кривая 3 — случайному отдельному наблюдателю. Мы видим, что максимум находится в желто-зеленой части (556 м μ), кривая круто и почти симметрично спадает в обе стороны. Ультрафиолетовые лучи с длинными волнами (примерно 360 м μ) можно видеть, если интенсивность их велика. Цвет их фиолетовый. Можно видеть, правда очень слабо, и лучи с более короткими волнами, приблизительно до 300 м μ . Такие лучи сильно погло-

щаются в хрусталике глаза и только в ничтожной доле доходят до сетчатки. Но, поглощаясь, они вызывают голубую флуоресценцию глаза, которую тоже видит сетчатка. Если посмотреть, например, на мощный источник ультрафиолетовых лучей — ртутную кварцевую лампу — через особое черное стекло, задерживающее все видимые лучи и пропускающее ультрафиолетовые, то все окружающее помещение кажется наполненным синеватым туманом, похожим на табачный дым. Этот «дым» — флуоресценция глаза, замечаемая сетчаткой.

Нормальные глаза видят только небольшой участок из безграничной области лучей. Чем же определился выбор участка видимости? Вспомним (см. главу «Солнце»), что солнечный спектр для поверхности Земли практически кончается около 290 м μ , более короткие волны задерживаются слоем озона в атмосфере. Биологически существование глаза, приспособленного к восприятию лучей с волнами короче 290 м μ , было бы, разумеесть, бессмысленным. Но есть и другая причина, заставляющая глаз не только не приспособляться к восприятию ультрафиолетовых лучей, но, наоборот, защищаться от них. Лучи с короткими волнами в большинстве случаев химически разрушают органические вещества и могут убивать живые организмы. На этом основано действие так называемых бактерицидных ртутных ламп в кварцевых трубках или, чаще, в специальном стекле, пропускающем ультрафиолетовые лучи с короткими волнами. Свет таких ламп дезинфицирует помещения больниц, склады продуктов, водопроводную воду и т. д. Он же вызывает искусственный загар, но может и ослепить глаз, если глаз в течение долгого времени подвергался действию ультрафиолетовых лучей с длиной волны около 250 м μ .

Самая сетчатка человеческого глаза, как это доказано, обладает довольно большой чувствительностью к лучам с волнами короче 400 м μ (практической границы видимого спектра), но, оказывается, эти лучи почти не допускаются до сетчатки вследствие того, что хрусталик глаза чрезвычайно сильно их поглощает. Хрусталик не только дает изображение на сетчатке, но и служит предохранительным светофильтром для нее от лучей с короткими волнами, начиная примерно от 400 м μ . Заметно задерживая синие и фиолетовые лучи, хрусталик тем самым способствует уменьшению хроматической аберрации в глаз, делающей изображение нерезким.

Приведенные причины биологически вполне объясняют практическое прекращение видимости света со стороны коротких волн (около 400 м μ).

Перейдем к другой границе видимости со стороны длинных волн. Почему глаз перестает видеть в области инфракрасных лучей? Здесь также можно указать две очень уважительные при-

чины. Представим себе, что глаза стали бы чувствительны к инфракрасным лучам в такой же степени, как к зеленым. Для человека произошло бы нечто трудно вообразимое. Все нагретые тела, как мы говорили, излучают свет; у мало нагретых тел все излучение сосредоточено в инфракрасной части спектра. Температура человеческого тела, в частности и полости глаза, около 37° . По законам теплового излучения можно вычислить (см. стр. 52), что максимум излучения человеческого тела соответствует 9—10 μ , а энергия, излучаемая с одного квадратного сантиметра поверхности в секунду, равна примерно 0,012 калории. Внутренние стенки глаза, разумеется, также излучают эту энергию; внутренность глаза светится инфракрасным светом. При этом внутри глазной полости поверхность столько же поглощает, сколько излучает. Общая внутренняя поверхность глаза около 17 кв. см. Умножив 0,012 на 17, получим 0,2 калории, т. е. общую энергию внутреннего собственного невидимого света, поглощаемую глазом. Представим себе теперь на мгновение, что невидимый инфракрасный свет стал видимым так же, как зеленый. Одна «зеленая свеча» излучает на один квадратный сантиметр с расстояния в один метр около 38 миллиардных долей калории в секунду; 0,2 калории равносильны 5 млн. свечей. Глаз внутри засветился бы миллионами свечей. По сравнению с этим внутренним светом потухло бы Солнце и все окружающее. Человек видел бы только внутренность своего глаза и ничего больше, а это равносильно слепоте.

Вполне целесообразно поэтому, что глаз не видит инфракрасных лучей с длинными волнами.

Но почему же нет зрения в области инфракрасных лучей с более короткими длинами волн, например от 1 до 5 μ ? По-видимому, причина этого кроется в самом механизме зрения. Он неизвестен до сих пор, но во всяком случае можно утверждать, что зрение должно начинаться либо химическими действиями света, либо фотоэлектрическими (вырывание электронов из молекул). Для осуществления и фотохимических и фотоэлектрических процессов нужна, однако, энергия, которая не может быть меньше некоторой минимальной величины, иначе нельзя разорвать молекулу или оторвать от нее электрон.

В настоящее время известны некоторые фотоэлектрические процессы (именно увеличение электропроводности при освещении), простирающиеся в смысле возможной чувствительности очень далеко в инфракрасную область, до 5—6 μ . Однако величина чувствительности при этом все же крайне незначительна. Точно так же фотографические пластинки не чувствительны к этим областям волн.

Изложенные причины, определяемые, с одной стороны, свойствами солнечного света, а с другой — особенностями действий

света на вещество, достаточно объясняют, почему глаз видит только узкую часть спектра, расположенную примерно от 0,4 до 0,7 μ .

Но есть и другой очень важный солнечный фактор, определяющий именно такой «естественный отбор» области видимости. Обратимся к рассмотрению распределения энергии в спектре солнечного света. Для существа, живущего на земной поверхности, это распределение далеко не постоянно. Оно резко меняется в зависимости от положения Солнца на небесном своде.

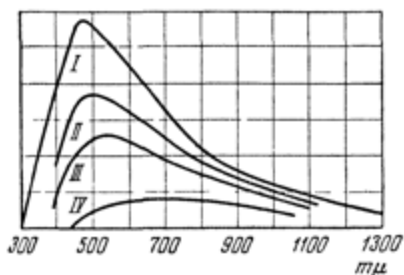


Рис. 53. Распределение энергии в спектре Солнца при различных высотах над горизонтом

При разной высоте над горизонтом солнечным лучам приходится проходить разные толщи атмосферы, которая рассеивает и поглощает эти лучи различным образом для разных длин волн. На это мы уже указывали в главе о Солнце. На фиг. 53 проведены сглаженные (без фраунгоферовых линий) кривые распределения энергии солнечного света: I — за пределами атмосферы; II — при положении Солнца над головой; III — при высоте Солнца 30° над горизонтом; IV — при условиях, близких к восходу и закату, 10° над горизонтом. На рис. 54 приведена средняя годичная кривая распределения энергии полуденного Солнца (верхняя кривая). Разумеется, для глаза важна именно такая усредненная кривая.

Из кривой явствует, что для «среднего» Солнца энергия в области 450—650 μ распределена почти равномерно, но она резко падает в сторону более коротких и длинных волн. Иначе говоря, кривая видности, отмеченная на рис. 54 заштрихованной площадью I, расположена в наиболее выгодной части кривой распределения среднего солнечного света¹.

¹ Совпадение спектральной чувствительности глаза с максимумом кривой распределения энергии Солнца имеет место, если спектральные кривые выражены в шкале длин волн, и не имеет места в шкале частот. Таким образом, приспособленность глаза к Солнцу определяется не указанным совпадением, а всей совокупностью факторов, рассмотренных в книге С. И. Вавилова — *Ред.*

Если бы задачей глаза было только возможно более экономичное восприятие световой энергии, то, разумеется, равномерная чувствительность во всем интервале $0,4-0,7 \mu$ была бы лучшим решением задачи.

Но рассуждая так, мы подходим к вопросу слишком упрощенно и грубо. Биологически существенна не абсолютная чувствительность глаза к тем или иным световым волнам, а умение возможно лучше *отличать* освещенные предметы один от другого. Биологически видеть это не значит просто получить зрительное ощущение, а умение различать подробности окружающего. Узость и резкость кривой видности в значительной мере ослабляют влияние хроматической аберрации, что повышает отчетливость изображения на сетчатке. Этому же помогает различие отражательной способности для разных длин волн у разных тел. При этом чрезвычайно важно, что резкость контраста яркости и окраски разных тел окружающего чрезвычайно увеличивается оттого, что кривая видности глаза не пологая, а имеет резкий максимум и круто падает в обе стороны спектра. Именно поэтому предметы окружающего мира резко отделяются для глаза один от другого.

Вернемся к тому, о чем шла речь в главе о свете, — к интерференционным кольцам Ньютона¹. Оказывается, что если бы мы стали промерять энергию, отраженную от линзы и стекла прибором, одинаково чувствительным к любым волнам (этот прибор — термоэлемент), то мы совсем не заметили бы колец Ньютона! Только потому, что кривая видности глаза имеет форму довольно узкой кривой с рез-

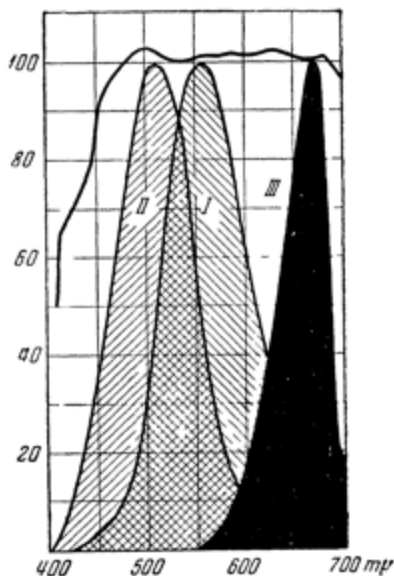


Рис. 54. Средняя годовая кривая распределения энергии полуденного Солнца для средних широт (верхняя кривая)

I — кривая дневной видности; II — кривая сумеречной видности; III — кривая поглощения хлорофилла

¹ Имеется в виду наблюдение в белом свете, когда места максимумов одних длин волн совпадают с минимумами других; большая селективная способность глаза к различению цветов помогает и в этом случае различать отдельные максимумы, хотя энергетических максимумов и минимумов может и не быть. — *Ред.*

ким максимумом, глаз хорошо видит эти кольца. С очень широкой кривой чувствительности глаза мы не увидели бы вокруг себя очень многого.

Следует заметить, что кривая видности для дневного зрения почти совпадает со средней кривой распределения энергии солнечного света, отражаемого и рассеиваемого зелеными растениями. Это обстоятельство, конечно, весьма выгодно для существа, живущего среди растений и в значительной мере питающегося ими.

Перед нами пример удачного приспособления глаза к реальным условиям жизни на Земле и доказательство действительного родства глаза и Солнца¹.

При очень слабых освещенностях кривая видности довольно резко изменяется. На рис. 52 и 54 слева дана кривая видности для слабых освещений: мы замечаем, что она значительно сдвинута в синюю область спектра сравнительно с кривой для ярких освещений. Физиологи дают такое объяснение этой особенности сумеречного зрения. В сетчатке, как мы видели, есть два вида светочувствительных элементов — колбочки и палочки. В дневном зрении главную роль играют колбочки, но чувствительность их невелика; при ослаблении света они перестают действовать, и на сцену выступают палочки с другой кривой видности. С этой точки зрения кривая *I* на рис. 54 соответствует «дневным» колбочкам, а кривая *II* — «ночным» палочкам.

Если дневная кривая видности есть итог приспособления глаза к солнечному свету, рассеянному атмосферой, зеленью и пр., то, казалось бы, мы вправе ожидать, что «ночная» кривая приспособлена к ночному небу. Свечение ночного неба (если на нем нет Луны, рассеивающей прямой солнечный свет) складывается из света звезд, из ничтожного рассеяния солнечных лучей, даже глубокой ночью слегка проникающих в атмосферу, и, наконец, из собственного свечения неба, составляющего значительную часть общего свечения. Это собственное свечение неба объясняется излучением атомов кислорода и азота в верхних слоях атмосферы. Спектр ночного свечения неба линейчатый, в особенности ярка зеленая линия с длиной волны 558 м μ . Собственное свечение неба достигает максимума около полуночи. Однако в вопросе о приспособленности «ночной» кривой видности к ночному небу до сего времени остаются некоторые трудности. Измерения суммарного распределения энергии света от звезд и от свечения неба еще недостаточны. По опытам П. П. Феофилова, произведенным зимою 1941 г., суммарное распределение энергии ночного неба оказалось эквивалентным черному излучателю с температурой 400°, т. е. было краснее,

¹ См. примечание на стр. 101.

а не синее, как ожидалось. Измерения эти не могут, однако, считаться общезначимыми, они должны быть повторены и расширены на разные места Земли и времена года. Кроме того, еще раз важно подчеркнуть, что для глаза в трудных ночных условиях еще более чем в дневных, важно не само зрительное ощущение, а возможность различения окружающих предметов одного от другого. Эти вопросы изучены еще очень мало. Нельзя думать, что перемещение кривой ночного видения в сторону коротких волн случайно. В соответствии со всем ходом развития живого естественно предположить, что указанное перемещение кривой ночной видности способствует увеличению различительной способности глаза в ночных условиях.

В отличие от глаза, который должен видеть, лист растения должен усваивать световую энергию для химических превращений. Это находит свое выражение в спектральном расположении кривой фотохимической чувствительности зеленого растения. На рис. 54 площадью III отмечена основная кривая поглощения зеленого красящего вещества растений — хлорофилла. Ее максимум резко сдвинут по отношению к кривой дневной видности в сторону длинных волн. Насколько это биологически целесообразно, почему в данном случае выгоднее длинные волны?

Вернемся к основному фотохимическому закону, о котором мы говорили в главе о свеге (стр. 31). Мы видели, что для осуществления химического превращения в молекуле необходимо поглотить один квант $h\nu$. Этот квант, конечно, должен по своей энергии превышать некоторую минимальную величину $h\nu_0$, требующуюся для химического разложения, иначе реакция не пойдет. Поэтому ясно, что под действием инфракрасных лучей химические процессы мало вероятны.

С другой стороны, разложение может быть осуществлено всеми поглощающимися квантами $h\nu$, энергия которых больше $h\nu_0$. Однако, сколь бы велика не была энергия кванта, он будет поглощен только одной молекулой и произведет то же, что и квант с относительно малой энергией, но превышающей энергию $h\nu_0$. Отсюда ясно, что фотохимически для растения наиболее выгодны кванты с наименьшей энергией (но большей $h\nu_0$), т. е. с наибольшей допустимой длиной волны.

Если теперь приять во внимание кривую среднего распределения солнечного света, изображенную на рис. 54 (верхняя кривая), то очевидно, что в равномерном участке между 450 и 650 $m\mu$ наиболее выгодно расположить кривую хлорофилла в области 600—700 $m\mu$, где она действительно и находится.

Когда фотографу нужно переместить максимум спектральной чувствительности пластинки из одной области в другую, он прокрашивает светочувствительный слой разными органическими красителями — «сенситизаторами», получая таким

образом фотографические слои, особо чувствительные, смотря по надобности, к красным, желтым, зеленым лучам. Совершенно то же, как мы убедились, происходит и в природе, причем сенсibilизаторами служат зрительный пурпур и хлорофилл.

Форма кривой видности имеет огромное значение для осветительной техники. В большинстве искусственных источников света используется излучение при нагревании (свечи, керосиновые лампы, лампочки накаливания и т. д.); в этом излучении только часть лучей видима, остальные бесследно пропадают для глаза. Если повышать температуру тела с черной поверхностью, то все большие порции лучистой энергии переходят из инфракрасной области в видимую, источник света становится выгоднее. Однако так будет продолжаться не всегда. При повышении температуры одновременно часть лучистой энергии перекачивает в невидимую ультрафиолетовую область. Теоретически возможно достигнуть таких температур, когда огром-

Таблица 3

| | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|--------|
| Температура абс., °K . . . | 1500 | 2000 | 3000 | 4000 | 6000 | 8000 | 12 000 |
| Энергия, получаемая как видимый свет, % | 0,0 | 1,7 | 14,6 | 31,8 | 49,7 | 47,7 | 18,6 |

ная часть лучистой энергии перейдет в невидимую область ультрафиолетовых и рентгеновых лучей. Значит, существует некоторая наивыгоднейшая для глаза температура накала источника света. Какова она?

В таблице 3 указан процент лучистой энергии, проявляющейся как видимый свет для разных температур.

Мы видим, что наивыгоднейшей температурой будет 6000°, когда половина всей энергии превращается в видимый свет. Но это температура Солнца! Какая же связь имеется между излучением Солнца, черным телом и глазом? Не случайность ли найденное совпадение? После того, что мы узнали о свете, Солнце и глазе, после того как для нас становится несомненным, что глаз развился вследствие существования Солнца, в известном смысле для Солнца и под действием Солнца, найденная связь становится вполне естественной и необходимой. И Солнце, и светящееся черное тело наблюдаются одним и тем же глазом. Но глаз приспособился к Солнцу, поэтому для него подобие спектра искусственного источника спектру Солнца есть наиболее совершенное решение задачи.

Как же разбирается глаз в спектральном составе света? Пока мы убедились только, что глаз совершенно не чувствует большинства спектральных областей, а в видимой области одни лу-

чи кажутся ему ярче, другие слабее. Подберем яркости красного и синего света примерно одинаковыми; мы знаем, что глаз безошибочно тем не менее отличит одни лучи от других. Значит, помимо величины ощущения, глаз имеет и другую возможность разбираться в спектральном составе света. В солнечном спектре глаз различает семь радужных цветов и оттенки, число которых колеблется для разных наблюдателей до нескольких сотен. Для того чтобы точно выразить способность глаза к различению цветов, можно поступить следующим образом. Будем сравни-

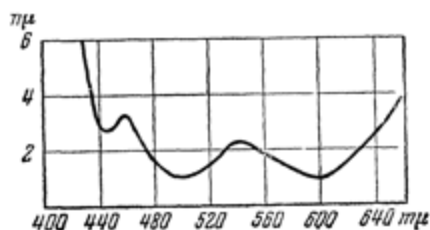


Рис. 55. Кривая спектральной различительной способности глаза

вать два соседних участка непрерывного спектра и наблюдать, на сколько миллимикронов можно изменить одну из сравниваемых областей, прежде чем глаз заметит разницу в окраске. Эта наибольшая разность длин волн в миллимикронах и может характеризовать способность различения в данной спектральной области. На рис. 55 дана кривая различительной способности глаза, полученная таким способом. По горизонтальной оси нанесены длины волн, а по вертикальной — наибольшие допустимые разности длин волн, при которых глаз еще не замечает разности в окраске. Кривая имеет очень сложный вид. Она все же дает некоторое обоснование нашему субъективному делению спектра на радужные цвета. Все минимумы и максимумы этой кривой можно рассматривать как своего рода знаки границ между радужными цветами. Таким образом, около 445 мкм находится граница между фиолетовым и синим, у 460 мкм — граница между синим и голубым, у 500 мкм — между голубым и зеленым, у 540 мкм — между зеленым и желтым, у 600 мкм — между желтым и оранжевым. Далее, в красную область измерения не проводились.

Способностью различать цвета обладают только колбочки; при сумеречном зрении палочками краски в спектре исчезают, все кажется белесоватым. По отсутствию колбочек в сетчатке глаз сов, ночных мышей и рыб можно думать, что они не обладают цветным зрением. Мир кажется им как однотонный фотографический снимок — сочетание белого и черного. Челове-

ский глаз имеет два разных светочувствительных аппарата. Один подобен цветной фотографии, мало чувствителен и применяется днем, другой — сумеречный или ночной похож на однотонную, но зато крайне чувствительную обыкновенную фотографию.

Способность глаза различать цвета не может, впрочем, соперничать со спектральным анализом. Если свет пространственно разложен на простые лучи, то по разности окраски глаз довольно резко отличает одни лучи от других. Но глаз нетрудно обмануть. Можно воспроизвести любой спектральный чистый цвет, смешав три других простых цвета, например красный, зеленый и фиолетовый, в разных пропорциях. На этом основаны простейшие цветные фотографии и кино.

С окрашенного предмета делают три обыкновенных снимка через цветные стекла (светофильтры) — красное, зеленое и фиолетовое. Все три негатива имеют обычный вид; с них получают фотографические отпечатки на стекле (диапозитивы). Разница трех диапозитивов в том, что на один действовали преимущественно красные лучи, на другой — зеленые, на третий — фиолетовые; поэтому светоточка распределяется на снимках по-разному. Диапозитивы окрашивают в цвет того стекла, через которое они были сняты. Если теперь навести световые пучки трех проекционных фонарей на одно место экрана и вставить в фонари прокрашенные диапозитивы, то красное, зеленое и фиолетовое изображения наложатся друг на друга, в результате чего на экране появится снятый предмет во всех натуральных цветах. Из трех цветов получатся все остальные. Если, например, одна часть снимаемого предмета была белой, то от нее в аппарат пройдут лучи через все три стекла. Поэтому при сложении цветов на экране в этом месте будут накладываться друг на друга красный, зеленый и фиолетовый цвета; вместе они дают для глаза белую окраску. Если часть предмета была желтой, то лучи от нее пройдут через красное и зеленое стекла, но не пройдут через синее; на синем диапозитиве в этом месте будет черное пятно, не пропускающее света. В итоге на экран попадут только красный и зеленый цвета, которые вместе для глаза создают впечатление желтого и т. д. Современная цветная фотография по своей технике много сложнее описанного простого приема. Однако во всех так называемых «аддитивных» методах мы имеем по существу тот же принцип¹.

¹ Цветная фотография правильно передает впечатление только «дневного» глаза. При слабом свете, например ночью при Луне, для нас окраска предметов становится существенно иной вследствие того, что кривая сумеречного зрения сдвинута в сторону коротких волн, и, кроме того, потому, что цветные восприятия при сумеречном зрении исчезают. Самая Луна кажется нам, например, светящейся зеленоватым светом, между

Для того чтобы получить любой цвет спектра, вообще говоря, нужны три простых цвета в разных пропорциях. Но эти же три цвета вместе могут создавать и окраски, которых в спектре нет, например белую и пурпуровую. Если подмешивать к простому цвету, положим красному, белый, то окраска остается красной, но она становится все более и более разбавленной, уменьшается ее насыщенность. Следовательно, из одного простого красного цвета можно получить бесконечное разнообразие красных цветов в разной насыщенности — от чисто красного до белого. Вообще любая окраска для глаза характеризуется тремя признаками: яркостью, цветностью и насыщенностью. Таким образом, разнообразие окрасок, видимых человеком, бесконечно больше, чем число цветов видимого спектра. Глаз с этой точки зрения — очень мало пригодный прибор для спектрального анализа света.

В военном деле для маскировки орудий, окопов и пр. от глаз неприятеля применяется окраска под цвет почвы, травы и т. д. Несмотря на значительную спектральную разницу света, отраженного от маскированного предмета и окружающего фона, человеческий глаз легко может быть введен в заблуждение; только спектроскоп в состоянии вскрыть обман. В животном мире маскировка, приспособление животного под цвет местности, чрезвычайно распространена: многие насекомые имеют зеленый цвет листьев и травы, зайцы меняют шерсть, приспособляясь зимой к белому снежному покрову, а летом к бурому тону почвы и т. д. Весьма значительно, что очень часто цвет маскированного животного не только на взгляд, для глаза, имеет окраску окружающего, но совпадает с нею и по спектральному составу. Эта совершенная защита заставляет подозревать, что, может быть, качества глаз некоторых животных, врагов тех, которые маскируются от их взгляда, несколько совершеннее, чем у человека.

Несовершенство глаза как спектроскопа вполне понятно. Физику удается разложить сложный свет на простой только пространственным разделением входящих в него простых лучей путем применения призм и других приборов¹. Оче-

тем распределение энергии в спектре лунного света почти то же, что и у Солнца. Если при помощи очень светосильной фотографической камеры снять обычными методами цветную фотографию с пейзажа, освещенного Луной, то мы, вероятно, получим обычную картину с привычной дешевой раскраской, между тем действительная зрительная картина совсем иная.

¹ Самый простой спектроскоп можно было бы построить так. Нарисуем на белой бумаге радужный спектр красками, которые рассеивают только очень узкий участок длин волн, поглощая все остальное. Заметим, что приготовить такие краски очень трудно. Если осветить нарисованную указанным образом радужную полосу, например светом ртутной лампы, то мы увидим на бумаге грубое изображение ртутного спектра. Желтая

нить спектральный состав без пространственного разделения лучей можно только очень грубо, по особенным действиям отдельных спектральных участков на вещество. Например, красные лучи на фотографическую пластинку действуют слабо, синие сильно. Приходится поистине поражаться тому, что каждый простой цвет вызывает в глазе свое особенное действие, независимо от энергии, хотя никакого пространственного распределения лучей нет. В наших искусственных приборах всегда можно имитировать действие одних лучей действием других, подобрав энергию, если только исследуются непрерывные спектры. Как

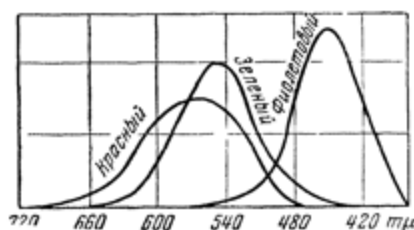


Рис. 56. Кривые трех основных возбуждений.

По оси ординат — чувствительность в относительных единицах

достигается такое высокое совершенство в сетчатке глаза, мы достоверно до сих пор не знаем. Предполагается, что в сетчатке имеется три различных вида светочувствительных элементов, каждый со своей особенной широкой полосой возбуждения (рис. 56). Если например, падает красный цвет, то затрагиваются все три элемента, все они поглощают красный цвет, но в разной степени. Глаз чувствует эту разницу, что и сопровождается ощущением красного цвета. Зеленый цвет также возбуждает все три элемента, но в иных отношениях, чем красный, и т. д. Ощущение суммы возбуждений во всех трех элементах соответствует яркости падающего света, а ощущение отношений возбуждений в трех разных элементах — ощущению цвета. Если бы остался только один элемент, то об отношениях не имело бы смысла говорить, не было бы ощущения цвета, хотя впечатление яркости оставалось бы по-прежнему. Такое

линия ртути будет рассеиваться только желтым участком нарисованной полосы, зеленая — зеленым, синяя — синим и т. д. Свет ртути разложится на спектр. Подобный спектроскоп, конечно, всегда будет очень грубым; его преимущество в том, что не требуется никаких щелей и призм. Вместо нарисованного спектра, конечно, можно приготовить набор узких прозрачных окрашенных пленок, составляющих вместе спектр. Свет от источника, пущенный через такой спектральный набор пленок, будет давать на экране грубый спектр.

представление хорошо объясняет возможность сложения любого цвета из трех других, случаи цветовой слепоты (дальтонизм и др.), когда глаз теряет ощущение цветности в некоторых участках спектра, и т. д. Но до сих пор эта теория не получила безукоризненного анатомического подтверждения.

Обладание цветовым зрением необычайно повышает ценность зрительных восприятий. Цветовое зрение дает возможность очень быстро и по-новому различать предметы. Представим себе, что цветовых восприятий нет, что мы судим о различии предметов, как по обычной фотографии, только по количеству рассеиваемого света. При этом две поверхности, например желтая и зеленая, фотометрически равные, казались бы не различимыми, картина окружающего мира сразу обеднела бы подробностями. Кроме того, цветовые различия воспринимаются чрезвычайно быстро, в то время как для установления небольших отличий в яркости (тем более, отдаленных друг от друга предметов) требуется длительное время и даже количественные измерения. Мы не говорим уже о чисто художественном элементе цветового восприятия.

Ввиду этих громадных преимуществ цветового восприятия очень полезно перенести цветность даже в такие области, где она, казалось бы, исключена по самому существу, например при изучении предметов в невидимых ультрафиолетовых или инфракрасных лучах. Между тем это вполне возможно, как это в микроскопии показал Е. М. Брумберг.

Предположим, что мы фотографируем под микроскопом некоторый препарат в ультрафиолетовых лучах. Сделаем три снимка в различных трех волнах, позаботившись о том, чтобы все они были одинакового масштаба. Фотографии, полученные в трех ультрафиолетовых волнах, будут вообще разные, так как различные волны поглощаются сильнее или слабее. Поступим теперь с тремя полученными «черными» фотографиями точно так же, как при цветном фотографировании (стр. 106). Спроектируем их через различные цветные стекла, например красное, зеленое и фиолетовое, при помощи фонарей на один и тот же экран и совместим три изображения. Мы получим цветную фотографию от объекта, снятого в невидимых лучах. Конечно, в данном случае — это искусственная фотография. Можно пользоваться различными цветными стеклами и получать различные цветные фотографии. Такие искусственные цветные фотографии с объектов, снятых в невидимых лучах, имеют очень большие практические преимущества. Они позволяют быстро открывать в предмете детали, оставшиеся ранее скрытыми, и производить качественный химический анализ.

Разумеется, тот же метод можно из области микроскопии перенести на все виды фотографирования в невидимых лучах.

Экспериментатор при этом правильно подражает природе, в которой существует этот удивительный способ зрительных восприятий.

Наши довольно путанные странствования по различным областям знания подошли к концу. При помощи главным образом физики, астрономии и биологии мы, наконец, начали понимать истинный характер неоспоримого родства глаза и Солнца.

Эта связь почти такая же, как между фотографическим аппаратом и источником света, в лучах которого производится съемка. Конечно, в большинстве случаев снимают не источник света, а освещаемый им предмет, но предмет можно снять только потому, что он рассеивает лучи источника, и потому аппарат должен быть приспособлен к этим лучам. Его объектив должен их пропускать и давать в этих лучах правильное изображение, фотографическая пластинка должна обладать хорошей чувствительностью в нужной области спектра, в аппарате неизбежна диафрагма, позволяющая приспособляться к разным условиям освещения. В зависимости от величины освещенности нужно пользоваться пластинками разной чувствительности. Всем этим обладает глаз, приспособившийся к Солнцу как источнику света. Хрусталик глаза пропускает лучи Солнца, не вредные для организма, к сетчатке и дает в солнечных волнах хорошее изображение. Сетчатка глаза весьма чувствительна, но для дневных условий эта чувствительность очень сильно искусственно понижается, а для ночных снова возрастает. Глаз располагает диафрагмой, автоматически (в зависимости от освещенности) меняющейся в широких пределах. Спектральная чувствительность глаза попадает в максимум спектральной кривой энергии Солнца¹.

Все это результат приспособления глаза к солнечному свету на Земле.

Глаз нельзя понять, не зная Солнца. Наоборот, по свойствам Солнца можно в общих чертах теоретически наметить особенности глаза, какими они должны быть, не зная их наперед.

Вот почему глаз — солнечен, по словам поэта.

¹ См. примеч. на стр. 101.

О «ТЕПЛОМ»
И «ХОЛОДНОМ» СВЕТЕ
(ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ)

*Печатается по тексту IV тома
собрания сочинений
академика С. П. Вавилова*

ПРЕДИСЛОВИЕ

1941 г., в начале Великой Отечественной войны, я прочитал в столице Марийской АССР, в г. Йошкар-Ола, публичную лекцию на тему «Холодный свет». В те дни тяжелых для нашей Родины испытаний полезно было возможно шире распространить сведения о люминесценции, главным образом в применении к вопросам светомаскировки. Лекция сопровождалась многочисленными демонстрациями. Она была издана в 1942 г. Академией наук СССР.

В книжку «О «теплом» и «холодном» свете» вошла часть указанной лекции. В нее, кроме того, вместе с новыми материалами включены отдельные места из некоторых моих статей.

Вопросы рационального освещения и светотехники приобретают в СССР с каждым годом все большее значение для нашего народного хозяйства, культуры и быта. Назначение этой книжки — познакомить широкие круги советских читателей с некоторыми достижениями светотехники в теоретической и практической области, а также с нерешенными вопросами, стоящими перед нею.

В конце книжки приложен список рекомендуемых книг по вопросам люминесценции, которые могут помочь читателю углубить свои знания.

Июль 1949 г.

С. Вавилов

Глава первая

«ТЕПЛЫЙ СВЕТ»
И ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

*«Надо подумать о безвредном свете
гниющих деревьев и светящихся червей.
Затем надо написать, что свет и теплота не
всегда взаимно связаны и потому различаются».*

М. В. Ломоносов

«Удивительная это вещь — свеча».

М. Фарадей. «История свечи».

Роль искусственного света в развитии общества очень велика и своеобразна. Одно из самых важных открытий человека — овладение огнем — следует оценивать не только как первый этап сознательной энергетики, но в значительной мере и как начало истории техники освещения.

В 1937 г. Советский Союз потреблял на освещение одну шестую всей получавшейся у нас тогда электроэнергии, что составляло 6 млрд. киловатт-часов. Однако такая многозначительная дробь в миллиарды киловатт-часов все же недостаточна для характеристики значения искусственного освещения.

Свет — необходимое условие для работы глаза, самого тонкого, универсального и могучего органа чувств. Ночь лишает человека этого органа, превращая жизнь из активной в пассивную. Роль искусственного света — поддерживать деятельное, бодрствующее сознание. Свет фактически удлиняет сознательное существование человека, и в этом прежде всего его великое значение. Не удивительно поэтому, что в наше время вопрос о количестве света вырастает в очень большую технико-экономическую проблему.

Источники света, которыми человечество овладевало по мере своего развития и с которыми каждый из нас до сих пор встречается в своих первых житейских опытах (костры, спички, свечи, электрические, керосиновые и прочие лампы), всегда горячие; прямые солнечные лучи греют и даже жгут; поэтому с незапамятных времен, много раньше всяких астрономических

исследований и теорий, у человека возникла уверенность в том, что солнце очень горячо. Если народ говорит о зимнем солнце, что оно «светит, да не греет», то этим подчеркивается, что это — парадокс, внутреннее противоречие. На почве такого донаучного и привычного слияния представлений о теплом теле и свете выросли древние теории света, отождествлявшие тепло и свет. По мнению многих древних философов и физиков, свет — это разреженный огонь. Огонь — это, так сказать, сгущенный свет. Такое воззрение держалось в науке долго, так думал еще в XVII в. Ньютон, задавая вопрос: «Не обращаются ли большие тела и свет друг в друга?» Было обычаем писать пространные диссертации на тему об огне и свете. Сравнительно поздним примером такого рода сочинений может служить трактат конца XVIII в. «Об огне» знаменитого французского революционера и ученого Ж. Марата. Вот почему слова «холодный свет» до сих пор вызывают недоумение, слова же «теплый свет» звучат более вразумительно и естественно.

Однако для современной науки оба названия — и «холодный свет» и «теплый свет» — кажутся одинаково странными и условными. Они звучат для ученого почти так же, как «светлый звук» или «громкое тепло». Понятия «тепло», «огонь» и «свет» для него совершенно независимы друг от друга. Тепло — это энергия беспорядочного движения молекул и атомов, из которых состоит тело; огонь — это раскаленный газ, а свет — электромагнитные волны той же природы, что и волны радио, распространяющиеся от тел в пространстве с огромной скоростью, около 300 000 километров в секунду. Огонь может быть очень горячим, а вместе с тем бесцветным. Таково пламя горящего водорода и чистого спирта. Понятие тепла относится к веществу, к движению частиц, атомов и молекул, из которых построено вещество. В световом потоке нет атомов и молекул, по крайней мере в обычном химическом смысле, атомов, которые могли бы ускоряться или замедляться, поэтому бессмысленно говорить о «теплоте» или «холоде» света.

Эти бесспорные доводы все же не могли искоренить в практике выражений «теплый свет» и «холодный свет». Наоборот, по мере возрастающего распространения новых источников света и других применений, о которых будет речь в дальнейшем, о «холодном свете» в наше время пишут и говорят значительно чаще, чем раньше. Поэтому волей-неволей надо считаться с этим неудачным с научной точки зрения выражением. Его приходится применять и до некоторой степени оправдывать.

Внутренние противоречия и недоразумения понятий о «теплом» и «холодном» свете значительно притупляются, если вместо «теплого» или «холодного» света говорить о свете, распространяющемся из теплого или холодного источника. Однако и

при таком ограничении трудности не исчезают полностью. Из дальнейшего будет видно, что любое холодное тело все же всегда излучает некоторое количество теплового излучения, и, наоборот, горячее тело может быть в некоторых условиях одновременно источником «холодного» света.

Для того чтобы разобраться в этих довольно тонких вопросах, следует перейти к рассмотрению действительных источников света. Начнем с привычного «теплового» света.

Хорошо известно, что источнику света, до сего времени остающемуся господствующим, — электрической лампе накаливания предшествовали многие тысячи лет развития и усовершенствования. И все же с принципиальной стороны лампа накаливания мало отличается от первобытного костра. На обоих концах многотысячелетней эволюционной лестницы мы находим накаленное твердое тело в качестве излучателя. Вначале — это частицы твердого угля в пламени, в конце — накаленный металл вольфрам. Различие заключается в температуре и в других важных и существенных, но не принципиальных подробностях.

Разберем сначала привычные источники «теплого» света. Вспыхивает спичка, давая на короткое время желтоватое пламя и свет. Температура пламени очень высокая, выше 1500° . При этом если следить за горением спички более внимательно, то вначале (по крайней мере в некоторых сортах спичек) ясно заметно своеобразное резкое желтое свечение, такое же как при введении в бесцветное газовое пламя поваренной соли. Когда пламя устанавливается, то часть его, около ствола спички, имеет слабую голубую окраску. Однако основная часть пламени светится привычным для нас желто-оранжевым, «теплым» светом, зависящим от накаливания пылинок сажи, находящихся в пламени. В стеариновой свече мы встречаемся с той же картиной — желто-оранжевым пламенем и слабо светящейся синей частью у фитиля; и здесь свѣг исходит главным образом от частиц угля, сосредоточенных в пламени и накаленных до температуры выше 1500° . Мало чем в этом отношении отличается керосиновая лампа и даже электрическая лампа накаливания. В первых моделях ламп Лодыгина и Эдисона светилась угольная нить, накаливаемая током. В угольной лампе температура накала примерно на 100 — 200° выше, чем в свечах и кострах. В вольфрамовых современных лампах накал доводится приблизительно до 2700° . По качеству излучаемого света эти лампы все же ближе к костру, чем к Солнцу. Температура Солнца близка к 6000° ; и до сих пор ни одно накаленное тело в практически приемлемых условиях не удалось довести до такого накала. Препятствием служит плавление металлов и их испарение. Вольфрам в этом отношении подходит больше всего

[температура плавления 3660° (абсолютных) и малая испаряемость]. Попытки применения в качестве накаливаемых тел углеродистых соединений — карбидов различных металлов (например, тантала), обладающих более высокими температурами плавления, до сих пор к хорошим результатам не привели.

Даже при поверхностном наблюдении бросаются в глаза некоторые общие черты у самых разнообразных теплых источников света — спички, свечи, лампы накаливания, Солнца и других. Одна из таких особенностей состоит в следующем. Источник при одной и той же температуре светит тем ярче, чем темнее, чернее светящееся тело. Например, при одной и той же температуре прозрачное кварцевое стекло почти не светит, а кусок черного угля излучает весьма сильно. Чернота, так же как и белизна, конечно, не может возрастать безгранично; для нее существует предел, когда весь свет, какого угодно цвета, падающий на тело, без остатка в нем поглощается. Тело с такими свойствами называют «абсолютно черным телом». Осуществить такое тело с большим приближением к требуемым условиям не очень трудно. Всем хорошо известно, что если в яркий солнечный день, когда кругом все светится и блестит, посмотреть издали через открытое окно или дверь в глубь закрытого помещения, то внутренние части кажутся угольно-черными, несмотря на то, что комнаты могут быть побелены или оклеены светлыми обоями. Происходит это потому, что лучи света, проникнув внутрь комнаты через окно, неизбежно там поглощаются вследствие многих рассеяний и отражений и наружу не выходят.

Отсюда становится понятным, как построить абсолютно черное тело и что его можно изготовить из любого материала — угля, железа, белого фарфора и пр., если устроить некоторое замкнутое пространство с маленьким отверстием. Такое отверстие будет вести себя как абсолютно черное тело.

Абсолютно черное тело можно нагреть до высокой температуры, например до накаливания, и поддерживать нагрев постоянным. Внутри полости тела со стенок будет излучаться свет, который должен вновь поглощаться на стенках. Наше тело — абсолютно черное, поэтому поглощение у него, по условию, максимальное, т. е. полное. Но в то же время мы приняли меры к тому, чтобы температура тела была постоянной, поэтому максимальное поглощение должно возмещаться максимальным излучением, иначе температурное равновесие нарушится, тело нагреется или охладится.

Таким образом, мы приходим к выводу, что не только поглощение, но и излучение абсолютно черного тела должно быть максимальным. Вместе с тем, из этого же рассуждения следует, что излучение, поскольку оно максимальное, так же как и поглощение, не может за-

висеть от материала, из которого сделано тело. Заключение это имеет огромное теоретическое значение. В нем и кроется основная причина большого сходства самых разнообразных тепловых источников света. Костер, спичка, Солнце, лампочка накаливания по своим свойствам — достаточно «черные», они близки к абсолютно черному телу. Разница в значительной мере сводится к тому, что температура Солнца равна примерно 6000° , а спички — около 1500° . Если температура низкая, тело не может светиться за счет нагревания заметным видимым светом, оно будет излучать главным образом невидимые инфракрасные лучи с длинными волнами. При повышении нагрева тело начинает испускать темно-красный цвет. При дальнейшем возрастании температуры излучение становится оранжевым, желтым и, наконец, белым. С качественной стороны это одинаково справедливо как для абсолютно черного тела, так и, например, для лампы накаливания.

Нужно, однако, сделать одно важное замечание. Полное тело с небольшим отверстием полностью поглощает всякие лучи, любого цвета с любыми длинами волн. Но существуют тела (конечно, не имеющие вида полости), полностью поглощающие только лучи определенного цвета, с определенной волной. Такие тела можно назвать также абсолютно черными, но только в отношении некоторых длин волн. Рассмотрим, например, спиртовое пламя или газовое пламя в кислороде. Эти пламени почти бесцветны, хотя и имеют высокую температуру. Внесем в такое пламя немного обыкновенной столовой соли. Пламя приобретает резкую желтую окраску, такую же, какую имеют, как уже говорилось, некоторые спички в самом начале горения. В среднем пламя при этом остается прозрачным; вместе с тем оно начинает очень сильно поглощать свет в узком пределе световых волн, в желтой части спектра; здесь оно становится абсолютно черным. Именно потому оно и светится.

Для большего пояснения этого существенного обстоятельства рассмотрим еще один интересный опыт. Химические элементы, называемые редкими землями, такие, как неодим, празеодим, самарий и т. д., при введении их в стекло или кварц дают в спектре очень тонкие сильные полосы поглощения. Можно приготовить тонкую палочку или нитку из стекла или кварца с несколькими редкими землями. Если накалить такую палочку и посмотреть на нее в спектроскоп, то окажется, что светится только несколько тонких линий, как раз отвечающих поглощению редких земель; остальные части спектра — темные, так как самое стекло или кварц в видимой части света не поглощают и потому при накаливании не светятся. Описанная стеклянная палочка стала «черной» только в отдельных узких спектральных областях.

Сказанное позволяет теперь объяснить некоторые ранее упоминавшиеся особенности горения спички и свечи. Ярко желтая вспышка в начальной стадии горения у некоторых сортов спичек объясняется присутствием в головке спички ничтожно-го количества натрия, быстро, впрочем, выгорающего. Причина слабого синего свечения у ствола спички и фитиля свечи может быть объяснена тем, что в этих частях пламени еще не образовалась сажа. Здесь газ, обладающий некоторым поглощением в синей части спектра, светится свойственным ему тепловым излучением синего цвета. Как только начинает выделяться сажа, это слабое свечение перекрывается тепловым излучением накаливаемой сажи.

Таким образом, привычный оранжево-белый «тепловой топ» свечения костров и ламп накаливания — вовсе не обязательный признак того, что перед нами тепловой источник света. Тепловой источник может давать свет, сосредоточенный в отдельных линиях и полосах вовсе не «теплого», например синего тона, и тем не менее оставаться тепловым.

Понятие о тепловом равновесном излучении было введено выше из рассмотрения абсолютно черного тела. В окружающем нас мире много, однако, тел заведомо не абсолютно черных даже в узкой области спектра. Все тела (если не придавать им искусственно формы полости с малым отверстием) в какой-то мере отражают, рассеивают и пропускают часть падающего на них света и поэтому не могут быть абсолютно черными. Такие тела всегда, однако, можно нагреть и поддерживать их температуру постоянной. Наше собственное тело, как известно, нагрето и имеет в нормальных условиях довольно постоянную температуру. Должно, следовательно, существовать равновесие между излучением и поглощением света. Обозначим буквой a долю падающего света, которая поглощается рассматриваемым телом. Обозначим, с другой стороны, через E энергию излучения абсолютно черного тела при той же температуре, которую имеет рассматриваемое тело, а через e энергию, им излучаемую. Тогда из условия равновесия между излучением и поглощением для рассматриваемого тела должно обязательно следовать

$$e = aE,$$

так как поглощаемая энергия равна aE ; в этом важном законе необходимо помнить, что все входящие в него величины, a , e и E , относятся к определенной длине волны света λ и к определенной температуре T . Иными словами, написанный закон можно выразить так: отношение тепловой излучательной способности любого тела к его поглощательной способности (для данных λ и T) равно излучательной способности абсолютно черного тела для тех же λ и T .

Исходя, таким образом, из самых общих представлений о телах, именно предполагая, что они в той или иной степени могут поглощать свет и находиться при этом при постоянной температуре, мы приходим к выводу, что любое тело природы, твердое, жидкое, газообразное, обязательно должно испускать тепловое излучение, если только оно находится в тепловом равновесии при температуре выше абсолютного нуля. В зависимости от степени нагревания этот свет будет видимым или невидимым, но он всегда существует.

Как уже указывалось выше, можно легко доказать, что не может существовать тела, температурное излучение которого превышало бы излучение абсолютно черного тела при той же температуре. В этом смысле абсолютно черное тело — лучший, самый совершенный тепловой излучатель, и Фарадей в приведенных в начале главы словах имел основание удивляться обычной свече, свойства, которой довольно близки к абсолютно черному телу, не говоря уже о ее практических преимуществах.

Такое «совершенство» абсолютно черного тела и близких к нему свечей и ламп накаливания, впрочем, очень относительно и условно. Дело в том, что все «тепловые излучатели» крайне неэкономичны в обычном техническом смысле слова; они превращают в видимый свет только ничтожную часть потребляемой ими энергии. Для абсолютно черного тела, находящегося при 2000° , всего лишь 0,3% энергии переходит в видимый свет; при температуре в 3000° коэффициент полезного действия поднимается до 3%. Выгоднее всего абсолютно черное тело должно работать около 6000° , т. е. при температуре Солнца. Причина этого, на первый взгляд удивительного, совпадения состоит в том, что человеческий глаз биологически, в процессе развития, приспособился к солнечному свету и поэтому свет от теплового излучателя с солнечной температурой наиболее экономичен. Однако экономичность даже этого самого выгодного абсолютно черного тела не велика; коэффициент полезного светового действия составляет приблизительно 13%, т. е. 87% всей потребляемой источником энергии для глаза бесполезны. Для наиболее экономичных современных ламп накаливания чаще всего распространенной мощности около 100 ватт, коэффициент полезного светового действия составляет всего 2—3%.

Естественно возникают два вопроса. Во-первых, почему нельзя превратить всю энергию, сообщаемую абсолютно черному телу, или во всяком случае значительную ее часть в видимый свет? Что ставит этому границы?

Во-вторых, можно ли как-нибудь обойти эти границы и получить источник света, излучающий больше, чем абсолютно черное тело?

Ответим сначала на первый вопрос. Нельзя умолчать, что ответ на него физикам удалось получить не легко; для этого пришлось произвести в сущности целую революцию в науке, потребовалось отказаться от многого общепринятого, считавшегося непреложной истиной.

Если абсолютно черное тело остается постоянно при одной и той же температуре и в то же время излучает свет, то, следовательно, *вся* непрерывно подводимая к телу энергия превращается в излучение. Только ничтожная доля этого излучения видима, остальная часть сосредоточена главным образом в области невидимых инфракрасных лучей с меньшими частотами световых колебаний, с большими длинами волн, чем у видимого света. Подводимая энергия, превращаясь в свет, распределяется между различными волнами, создавая непрерывный спектр теплового излучения. Процесс происходит подобно превращению стройных форм энергии, например механической или электрической, в тепло. При этом молекулы вещества приходят в поступательные, колебательные и вращательные движения с разнообразными скоростями, распределяясь по непрерывному закону. Такое распределение осуществляется посредством беспорядочных столкновений молекул друг с другом. Число молекул в данном объеме конечное, и, применяя обычные правила статистического расчета, можно определить наиболее вероятную среднюю энергию молекул и закон распределения энергии по молекулам.

До конца XIX в. общепринятым мнением в науке было, что свет есть волновое движение среды, заполняющей пространство. Но если свет действительно таков, то в отличие от частиц вещества, число которых в ограниченном объеме, конечно, должно существовать бесконечное число возможностей распределения световой энергии по световым волнам при условии равновесия в тепловом излучении.

В самом деле, поскольку излучение абсолютно черного для всех волн тела не может зависеть от природы вещества, из которого изготовлено тело, в спектре его не может быть никаких характерных линий или полос, должны присутствовать все частоты колебаний, от очень малых до очень больших в непрерывном чередовании. При этом с точки зрения старой классической волновой теории света все частоты равноправны и не имеют никаких преимуществ одна перед другой. А это значит, что на каждый бесконечно малый участок частот в спектре в среднем должна в условиях равновесия приходиться одна и та же бесконечно малая доля энергии.

Ясно, с другой стороны, что, по мере того как мы будем переходить от малых частот к большим, принципиально к бесконечно большим, мы будем встречать все большее число бесконеч-

но малых участков частот, на каждый из которых приходится равная бесконечно малая доля энергии излучения. Иными словами, с точки зрения классического волнового учения о свете в условиях теплового равновесия энергия излучения обязательно должна непрерывно расти при передвижении по спектру от красной к фиолетовой части. Этот вывод, между тем, самым решительным образом расходится с опытом. В действительности во всех тепловых источниках, начиная с абсолютно черного тела, имеется максимум излучения, который в случае температур ниже 4000° находится в инфракрасной области спектра и только при дальнейшем нагревании передвигается постепенно в видимую (желтую, зеленую и т. д.) часть. В фиолетовой области, вопреки теоретическому выводу, энергия при привычных для нас температурах не возрастает, а, наоборот, резко падает. Такое противоречие опыта самым общим представлением о веществе и свете было справедливо названо физиками в свое время «фиолетовой катастрофой»; оно действительно обозначало необходимость полного отказа от многих установившихся воззрений, намечало целый переворот в естествознании.

На опыте получалось, что энергия распределяется по световым частотам примерно так же, как тепловая энергия распределяется по молекулам, т. е. имеется отчетливый максимум. Единственно возможное объяснение опыта (до известной степени подсказываемое аналогией с молекулами) состояло в следующем. Вопреки всем прежним воззрениям и несмотря на несомненный волновой характер распространения света в пространстве, приходится принять, что его энергия сосредоточена в некоторых центрах, что свет поглощается и излучается молекулами только в виде целых порций энергии, названных *квантами*. Величина энергии кванта не постоянна; она пропорциональна частоте световых колебаний ν . Самый же фактор пропорциональности h всегда один и тот же; он составляет весьма малую, но точно известную теперь величину, равную $6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг · сек.

Энергия кванта $h\nu$ совершенно ничтожна для радиоволн, где поэтому прерывное строение излучения практически не заметно, но квант приобретает все более ощутимые значения при переходе через видимый свет к лучам Рентгена. Здесь «зернистость» световой энергии проявляется вполне ясно и резко.

Почти за полвека после открытия квантов энергии были найдены бесчисленные другие доказательства их существования. В настоящее время это твердо установленная истина.

Представление о квантах световой энергии вполне объяснило свойства теплового излучения и дало возможность в точности для абсолютно черного излучения рассчитывать спектр излучения для любых температур. На рис. 1 изображено вычисленное таким образом распределение энергии в спектре теплового

излучения абсолютно черного тела для солнечной температуры 6000° (абс.). По оси абсцисс отложены частоты световых колебаний ν . Для перехода от частот ν к длинам волн, выраженным в сантиметрах, нужно скорость света $3 \cdot 10^{10}$ см/сек разделить на частоту ν . Максимум изображенной кривой соответствует $0,483$ микрона, т. е. сине-зеленой области спектра. На рис. 2

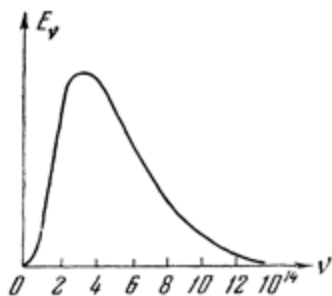


Рис. 1.

в сжатом логарифмическом виде представлено распределение энергии в спектре абсолютно черного тела для громадного интервала температур, начиная от абсолютного нуля до $50\,000^\circ$ (абс.). По оси абсцисс отложены логарифмы длин волн в сантиметрах по ординатам — логарифмы величины, пропорциональной интенсивности излучения. Действительные длины волн указаны на нижней шкале в микронах. При таком изображении максимумы спектра излу-

чения располагаются на прямой линии, как отмечено на рисунке. Из этого рисунка сразу видно, например, что температуре человеческого тела (около 37° С и 310° абс.) соответствует максимум излучения абсолютно черного тела около 10 микрон в далекой невидимой инфракрасной части спектра. Максимум свечения привычных для нас температур тепловых источников около 3000° (абс.) отвечает примерно 1 микрону, т. е. также находится в невидимой инфракрасной области спектра.

Легко понять на основании ранее изложенного закона (стр. 121), что для излучателей не черных, т. е. не полностью поглощающих падающий на них свет, спектральные кривые излучения расположатся ниже. Сеть кривых на рис. 2 отмечает возможные верхние границы, «потолки», для тепловых излучателей.

Только после того как удалось установить квантовый характер излучения и поглощения света, стал возможным ответ на первый вопрос, поставленный выше, — о причине малости коэффициента полезного светового действия тепловых излучателей. До открытия квантов это оставалось, в сущности, неразрешимой задачей.

Теперь мы знаем, что при тепловом равновесии абсолютно черного тела средняя тепловая энергия его молекул, участвующая в тепловом обмене, и средняя энергия световых квантов, находящихся в энергетическом равновесии с молекулами,

должны быть теми же самыми, иначе равновесие было бы нарушено¹. При этом надо иметь в виду, что энергия по спектру распределяется по обе стороны от указанного среднего значения. Как видно из рис. 1 и 2, даже при самых выгодных условиях,

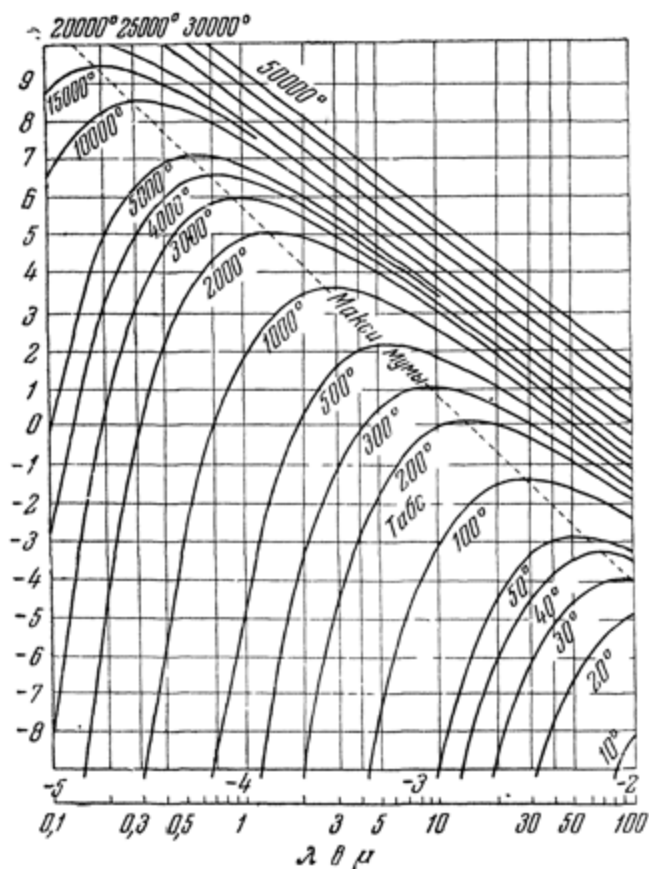


Рис. 2. Распределение E_λ в логарифмическом масштабе.

По оси абсцисс — $\log \lambda$ (см), по оси ординат — $\log 2E_\lambda \frac{w}{\lambda \text{ см}^2}$. Действительные длины волн даны на нижней шкале в микронах

при температуре, близкой к 6000° , когда максимум теплового излучения совпадает с максимумом спектральной чувствительности человеческого глаза, основная часть энергии излучения приходится по обе стороны от максимума, т. е. в условиях мень-

¹ В нечерных телах соотношение будет иным. Только часть тепловой энергии молекул может здесь участвовать в энергетическом обмене со светом вследствие неполного поглощения света.

шей или полностью отсутствующей видимости. В этом и кроется причина очень малой экономичности тепловых излучателей. В условиях теплового равновесия между излучением и телом нет возможности сосредоточить всю энергию на световых квантах, наиболее выгодных для глаза. Большая часть энергии приходится на кванты, бесполезные для зрения.

Перейдем теперь ко второму вопросу, поставленному выше. Можно ли после приведенных соображений вообще надеяться получить источник, излучающий свет более экономично, чем абсолютно черное тело? Мы увидим, что это вполне возможно, для этого нужно только в отношении части энергии тела снять наложенные на тепловые источники условия равновесия. О том, как это осуществляется, говорится в следующей главе.

Глава вторая

**«ХОЛОДНЫЙ СВЕТ»
И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ**

*«Огонек горит светлее,
Горбунок бежит скорее.
Вот уж он перед огнем.
Светит поле словно днем;
Чудный свет кругом струится,
Но не греет, не дымится.
Диву дался тут Иван.
Что, сказал он, за шайтан!
Шапок с пять найдется свету,
А тепла и дыму нету;
Эко чудо-огонек!»*

П. П. Ершов «Конек-Горбунок»

В противоположность «теплому свету» слова «холодный свет» звучат странно и противоречиво даже после того, как их слышали много раз. Удивление обычно бывает еще больше, когда холодный свет в первый раз видят собственными глазами. Это с полной непосредственностью выразил герой «Конька-Горбунка» в приведенных стихах. Впрочем, холодное сияние пера Жар-Птицы и для автора «Конька-Горбунка» казалось несбыточным, сказочным чудом.

На самом деле случаи холодного света не так редки и вовсе не чудесны; они были знакомы людям с незапамятных времен в обыденной жизни и иногда получали практическое применение. Писатель Евгений Петров в своем «Фроптовом дневнике» описывает такой штрих военного лагеря 1941 г. в условиях затемнения и на редкость морозной зимы. «Я замечаю,— писал он,— под ногами множество маленьких и больших светящихся голубым светом крупинок. Как будто кто-то прошел впереди с мешком, из которого понемногу сыпался этот волшебный незатухающий огонь. И я не сразу мог сообразить, что это просто гнилушки, которые собрала в лесу заботливая интендантская рука и провела светящиеся дорожки между палатками. Здесь такие дорожки называют «млечным путем». Раскрыв секрет «холодного света» для данного случая, писатель все же не удержался и назвал его, подобно Ивану, «волшебным», в свою очередь подчеркивая этим эпитетом его удивительность.

Постепенно, однако, непривычность «холодного света» на наших глазах исчезает. Всем знакомой вещью стали циферблаты на часах, самосветящиеся в темноте; холодными лампами «дневного света» освещаются теперь нередко вокзалы, метро, витрины магазинов. Холодный свет в разных видах все чаще и шире входит в жизнь. Как часто бывало и несомненно будет и в дальнейшем в истории науки и техники, явления, считавшиеся раньше редкостью, казавшиеся бесполезными курьезами, постепенно приобретают техническую важность.

Все факты холодного свечения с несомненностью доказывают, что абсолютно черное тело вовсе не предел и не «потолок» для реальных источников света; существуют тела, в определенных условиях светящиеся при той же температуре и в той же области спектра много ярче абсолютно черного тела. Из этого, однако, не следует, что наши выводы, изложенные в первой главе, ошибочны; дело в том, что во всех случаях холодного свечения мы в той или иной степени нарушаем условия теплового равновесия, необходимые для установления теплового равновесного излучения.

Познакомимся прежде всего с различными видами холодных источников света. Разнообразие явлений здесь несравненно большее, чем у тепловых источников.

Начнем с интересного явления, когда «холодный свет» появляется в результате простого механического удара. Правда, человеку с доисторических времен известно, что в результате трения тела или сильного удара развивается тепло, сопровождающееся светом. Достаточно напомнить доисторический кремь или искры, вырывающиеся со шлифовального круга точильщика. Наше явление, однако, глубоко отличается от этих известных фактов. Мы берем небольшое количество желтых кристаллов соли азотнокислого урана и располагаем их на наковальне. Если в темноте ударить молотком по кристаллам, то они заметно вспыхивают при ударе красивым зеленым светом. Если бы с такой же силой мы ударили по кучке металлических опилок, то заметного света не было бы. Даже при очень значительной силе удара мы достигли бы только красноватого накала частиц металла, совсем не похожего на зеленое свечение солей урана. Температура урана в этом опыте не имеет значения. Если бы произвести тот же опыт на сильном морозе, то, как это на первый взгляд ни удивительно, кристаллы вспыхнули бы еще ярче. Несомненно, что перед нами не теплый, а холодный свет.

Стоит обратить внимание еще на одну деталь описанного опыта с холодным свечением кристаллов азотнокислого урана при ударе молотком. Эта деталь очень характерна и имеет принципиальное значение для холодного свечения. Дело в том, что осколки кристаллов, разлетающиеся в темноте в стороны и

вверх при ударе молотком, продолжают некоторое время (несколько сотых секунды) светиться при своем полете подобно трассирующим снарядам. Следовательно, холодное свечение имеет некоторую длительность по удалении причины, его вызывающей (в данном случае по прекращении действия молотка).

Перейдем от механического возбуждения света к химическим причинам. Возьмем стеклянный сосуд с раствором сложного вещества, так называемого триаминофталевого гидразида со щелочью. Прибавляем в раствор перекись водорода и красную кровяную соль; начинается замечательное зрелище химической реакции, сопровождающейся в течение нескольких минут ярким голубым свечением. Следует заметить, что при соответствующих условиях ослабленное голубое свечение может длиться часами и даже днями. Температура сосуда во время реакции совсем не высокая, и совершенно очевидно, что перед нами — бесспорный пример «холодного» света.

Вторым интересным примером хемилюминесценции, т. е. «холодного» света, сопровождающего химические процессы, может служить красивое зеленое свечение раствора сложного вещества люцегенина в щелочном растворе при подливании перекиси водорода, также продолжающееся в ослабленном виде часами.

Несмотря на то, что описанные явления обнаружены сравнительно недавно, человечество было знакомо с хемилюминесценцией с доисторических времен. Свечение насекомых (например, светляков), древесных гнилушек, гниющего мяса и т. д. известно человеку искони. Это также хемилюминесценция, т. е. свечение при химических процессах, главным образом при окислении.

По мере изучения хемилюминесценции и возрастания внимания к ней возникает надежда на то, что в будущем хемилюминесценция может стать серьезным источником света, удобным и дешевым. Этот источник не связан ни с какими электроцентралями и подобен свече, в которой также свет получается путем химических превращений, но только посредством крайне неэкономного теплового звена (накаливание частицы угля в пламени). Надо стремиться к тому, чтобы возможно повысить световой выход химических реакций; вместе с тем хотелось бы, чтобы окисление в среде производилось за счет кислорода воздуха и чтобы превращающиеся вещества восстанавливались до начального состояния простыми и дешевыми средствами. Пока хемилюминесценция еще не вышла за пределы физических и химических лабораторий. Однако на этом участке полезно сосредоточить внимание и энергию исследователей и изобретателей; предмет того вполне заслуживает.

Чрезвычайно распространенным возбудителем холодного света служит сам же свет. Чаще всего для этой цели применя-

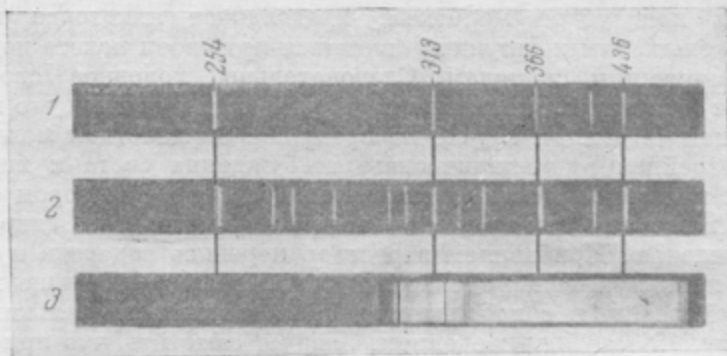


Рис. 3. Спектр разряда в парах ртути

1 — низкое давление; 2 — высокое давление; 3 — сверхвысокое давление.
Цифры наверху обозначают длины волн, выраженные в миллимикронах

ются разные кварцевые ртутные лампы, выпускаемые промышленностью. В этих лампах обычно при невысоких напряжениях происходит разряд в парах ртути. Наиболее распространены три типа таких ламп: лампы низкого давления, составляющие основу современных люминесцентных ламп, о которых будет речь в третьей главе, лампы высокого давления, преимущественно применяемые для опытов с холодным светом, и лампы сверхвысокого давления, свет которых сосредоточен в небольшом объеме и излучение обладает большой яркостью. Спектр ртутных ламп в основной части линейный. На рис. 3 даны фотографии спектров трех указанных типов ламп. Значительная часть энергии ртутных ламп, особенно низкого давления, сосредоточена в ультрафиолетовой части спектра, решительно отличаясь этим от тепловых источников света.

Свечение ртутных ламп само по себе служит важным примером холодного света, получаемого за счет электрической энергии. Температура ртутных ламп, особенно низкого давления, только на несколько десятков градусов выше комнатной, между тем она служит мощным источником света с короткими длинами волн, т. е. с большими квантами.

При помощи стеклянных фильтров из особого, почти черного стекла (в состав которого входит кобальт и никель), задерживающего видимый свет и пропускающего ультрафиолетовые лучи, можно выделить из ртутной лампы только ультрафиолетовые лучи и заставить их падать на различные предметы.

При поглощении ультрафиолетовых лучей многие вещества начинают сами светиться видимым светом. В некоторых случаях возбуждается также невидимый инфракрасный и ультрафиолетовый свет. Если взглянуть в упор на ртутную лампу через

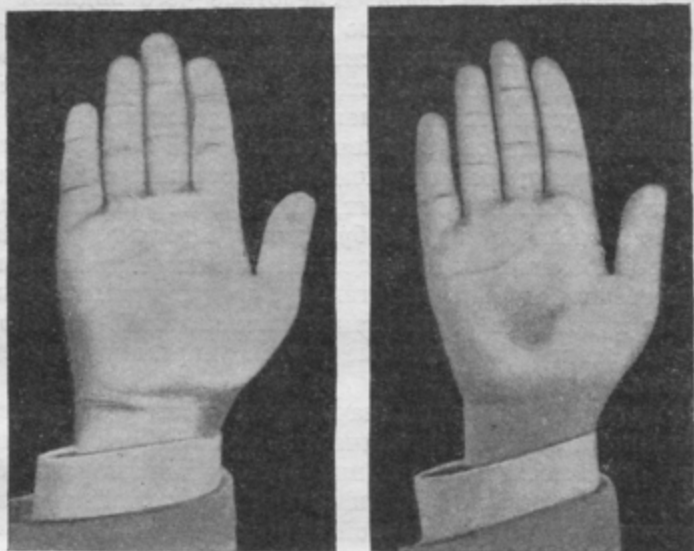


Рис. 4. Снимок руки в обычном свете (слева) и в свете люминесценции

На снимке справа на ладони видно темное пятно — результат ожога, полученного 30 лет назад

указанный черный фильтр, то окружающее пространство кажется наполненным голубым табачным дымом. На самом деле это не дым, а свечение хрусталика нашего собственного глаза под действием ультрафиолетовых лучей. Точно так же светятся наши зубы, кожа и ногти. На рис. 4 дана фотография руки, снятая сначала в обычном свете (слева), затем (справа) в свете холодного свечения, вызываемого ультрафиолетовыми лучами (возбуждающие рассеянные лучи при фотографировании задерживались светофильтром). На втором снимке ясно видно на ладони большое темное пятно, которого не заметно на первом снимке. Это пятно — след ожога ладони, полученного 30 лет назад.

Помещая на пути ультрафиолетовых лучей растворы различных органических красителей (родамина, флуоресцеина, эскулина), получаем яркое свечение в различных цветах (оранжевое, зеленое, синее и т. д.). Свечение при этом возбуждается не только ультрафиолетовыми лучами. Если, например, осветить раствор родамина через зеленое стекло, то раствор будет давать оранжевое свечение, так же как и под действием ультрафиолетовых лучей. Удобство ультрафиолетовых лучей при опытах такого рода состоит главным образом в том, что они непосред-

ственно не видимы для глаза, вследствие чего видимое свечение, возбуждаемое ими, особенно заметно.

Другой пример холодного свечения под действием света — люминесценция кристаллов и стекол. Кристаллы азотнокислого урана и ряд других его соединений под действием света излучают яркий зеленый свет. Замечательно, что свет этот тот же самый, как и при ударе молотком по кристаллам и при электрическом возбуждении. Это значит, что характер свечения в ряде случаев не зависит от вида возбуждения, а только от химической природы светящегося вещества. Хорошо и давно известно холодное свечение урановых стекол, нередко применяемых для различных художественных стеклянных изделий. Красное свечение дают стекла, окрашенные солями марганца, синее — солями церия.

Наибольшее техническое значение за последнее время получили, однако, особые неорганические составы, которые иногда называют кристаллическими, или минеральными, фосфорами. Их знают на протяжении почти четырех столетий, но получать искусственные составы в полной мере научились только за последние полвека. Известны тысячи рецептов таких составов, светящихся всевозможными цветами и обнаруживающих различия и в других свойствах. Они светятся под действием видимых и ультрафиолетовых лучей и в электрическом разряде и дают во многих случаях очень яркую люминесценцию.

Нельзя не отметить, что такие составы с физикохимической точки зрения имеют совсем особое строение. За последние тридцать лет физики получили бесспорные доказательства чрезвычайной правильности строения кристаллов. Во всяком кристалле, например в поваренной соли и в сахаре, атомы или молекулы расположены по правильным шеренгам и плоскостям, образуя в целом правильную кристаллическую решетку. Оказывается, что атомы посторонних веществ во многих случаях сравнительно легко проникают в недра кристалла, например при выдерживании в парах данного вещества или при длительном прокаливании порошков в тиглях при высоких температурах. При этом посторонний атом, проникая в правильную кристаллическую решетку чужого материала, вероятно разрушает некоторые правильные ячейки решетки. Внутри кристалла образуется своеобразное состояние, среднее между химическим соединением и раствором. Во всяком случае кристаллическая основа — необходимое условие существования фосфоров, которые мы рассматриваем.

Особенно хорошо известны и изучены кристаллы сернистого цинка, в которые при длительной прокалке с другими веществами в присутствии так называемых плавней¹ вводятся атомы

¹ Плавнями служат хлористые, сернокислые и другие соли щелочных

меди, серебра или других элементов. В итоге получается кристаллический фосфор (или, как иногда говорят, люминофор), ярко светящийся при возбуждении светом и электронами и обладающий обычно очень длительным послесвечением. Если, как упоминалось выше, у азотнокислого урана послесвечение наблюдалось в течение нескольких сотых секунды, то у сернистого цинка с медью при специальных условиях приготовления можно получить заметное в темноте послесвечение через 10 часов после возбуждения и более. Цвет полученного фосфора зависит от природы внедренного постороннего атома. Для сернистого цинка цвет может меняться от красного до синего. Следует заметить, что иногда чужеродным, внедряющимся в правильную решетку атомом может служить свободный атом того же вещества, из которого решетка построена. Например, чистейший сернистый цинк при некоторых условиях прокала начинает светиться синим цветом. Чистота такого кристалла только химическая; физически светящийся кристалл всегда нечист; в нем несомненно имеются свободные атомы цинка, в некоторых местах разрыхлившие правильное строение решетки и создавшие таким образом центры свечения.



Рассмотренные примеры достаточно поясняют конкретное содержание понятия о холодном свете, хотя далеко не исчерпывают чрезвычайного разнообразия его проявлений. Для того чтобы понять физическую сущность холодного света и его отношение к тепловому излучению, необходимо ознакомиться с некоторыми основными свойствами холодного света. Сосредоточим наше внимание главным образом на случае, когда холодное свечение возбуждается также светом. В этой области закономерности яснее, имеют общий характер и их легко перенести на случай возбуждения свечения любым другим способом.

Бесспорно, что «холодный» свет может появляться только за счет поглощенной первичной энергии, иначе нарушался бы основной закон природы — сохранение энергии. Неверно, однако, обратное; не всякое поглощающее свет вещество дает люминесценцию. Например, обычные чержила, черные или красные, очень сильно поглощают свет, но не дают вторичного свечения, в то время как растворы красителей флуоресцеина, родамина и других прекрасно светятся.

Тепловое излучение имеет, как мы видели, совершенно универсальный характер, ибо не может быть тела без теплового из-

и щелочно-земельных металлов. Плавень, расплавляясь в тигле, облегчает внедрение активатора в кристалл и помогает кристаллизации основы.

лучения, если только его температура выше абсолютного нуля. Наличие нагревания необходимо влечет за собою тепловое излучение. В отличие от этого, «холодный» свет — явление редкое, избирательное; легче найти нелюминесцирующее тело, чем тело, светящееся холодным светом. В этом состоит важнейшая его особенность. Она справедлива для любых способов возбуждения свечения. До сих пор, однако, наука не в состоянии дать объяснение холодного свечения в том или ином веществе.

Второе основное свойство этого свечения состоит в его длительности. Как мы уже имели случай отметить при рассмотрении свечения кристаллов азотнокислого урана и кристаллических фосфоров, холодное свечение продолжается некоторое время после прекращения возбуждения. Эта длительность меняется для разных веществ и условий в крайне широких пределах, от миллиардных долей секунды в случае свечения атомов и молекул (например, молекул красителей в растворах) до часов и даже многих суток для кристаллофосфоров. Для других веществ и условий найдены промежуточные значения. Длительность люминесценции — ее определяющее свойство, оно по существу отличает ее от других видов свечения тел, возникающих, например, при рассеянии и отражении света и при распространении электронов в жидкостях и прозрачных твердых телах со скоростями, превышающими скорость света в этих средах (свечение Черенкова). Все эти виды свечения, по внешности весьма схожие с люминесценцией — также «холодные», т. е. не зависят от температуры. Однако они не обладают измеримой длительностью; они прекращаются практически тотчас же по прекращении возбуждения.

Для того чтобы ясно представить себе значение этого различия двух «холодных» видов свечения, полезно иметь перед глазами «классическую» модель световых колебательных процессов в молекуле в виде простого маятника, висящего на нити. Если такой маятник раскачивать «в такт», т. е. с периодом, равным периоду его собственных колебаний, то по прекращении внешней раскачивающей причины маятник будет качаться до тех пор, пока трение его не остановит. Перед нами модель люминесценции, продолжающейся большее или меньшее время по прекращении возбуждения. Начнем теперь раскачивать тот же маятник с периодом, ему не свойственным, не «в такт», будем заставлять маятник выполнять вынужденные колебания, заметно отличающиеся от его собственного периода. В таком случае маятник после прекращения вынуждающей причины остановится практически мгновенно. Это — модель отражения и рассеяния света, а также и свечения, возникающего при сверхсветовой скорости электронов в среде.

Опираясь на эту механическую модель, во многом верно передающую действительное положение дела, мы можем сказать, что длящееся холодное свечение люминесценции соответствует собственным колебаниям молекул; наоборот, холодное свечение без измеримой длительности, наблюдаемое при отражении, рассеянии света и других процессах, должно быть отнесено к вынужденным колебаниям.

Это необходимо следует из того несомненного факта, что свет — всегда в движении, что не может быть остановившегося, покоящегося света. Если свет возник и между вызывающей его причиной и им самим нет никакого промежуточного звена и механизма, то свет неизбежно прекращается, т. е. улетает в пространство тотчас же по прекращении вызывающей его причины (с точностью до длительности периода световых колебаний). Наоборот, при наличии промежуточного звена между непосредственной причиной и излучением свечение обязательно будет затягиваться, должно наблюдаться послесвечение.

Перейдем к третьему замечательному свойству люминесценции, характеризующему особенности ее цвета.

Цвет ее всегда в основном смещен в красную сторону спектра по сравнению с цветом возбуждающим. Для пояснения этого важнейшего свойства на опыте можно взять чистую серную кислоту, которая, как и все так называемые «чистые» жидкости, почти всегда содержит небольшие органические примеси из воздуха. Эти примеси при возбуждении светом люминесцируют. Мы концентрируем свет ртутной лампы на склянке с серной кислотой. Если возбуждать через стекло, пропускающее только ультрафиолетовые лучи, то возникает голубое свечение. Переменим теперь цвет возбуждающего пучка, заменив черное стекло синим. Свечение приобретает зеленый оттенок. Наконец, вместо синего стекла, поставим зеленое. Люминесценция становится очень слабой и приобретает кирпично-коричневый оттенок. Таким образом, по мере перемещения цвета возбуждения в красную часть спектра передвигается в ту же сторону и цвет холодного свечения. В этом состоит закон Стокса.

Этот закон, или правило, в той качественной форме, в которой он выражен выше, выполняется во всех изученных случаях. Опираясь на основные положения теории квантов, о которой говорилось в конце предыдущей главы, можно обобщить закон Стокса на любые виды возбуждения света. В самом деле, как говорилось выше, энергия света сосредоточена в квантах $h\nu$, или $h\frac{c}{\lambda}$, где c — скорость света. Для получения такого кванта по закону сохранения энергии необходимо, чтобы энергия непосредственного агента, вызывающего квант hc/λ , например электрона или ударяющей молекулы, по крайней мере равнялась

hc/λ . Отсюда следует, что «средняя длина» волны люминесценции, вызываемой агентом с энергией E , определится таким неравенством:

$$\lambda \geq \frac{hc}{E}.$$

Световое возбуждение и обычный закон Стокса составляют частный случай этого более общего выражения, пригодного и для других видов возбуждения. В самом деле, если люминесценция возбуждается светом, состоящим из квантов с энергией

$$E = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0},$$

то, подставляя вместо E значение hc/λ_0 , найдем оптический закон Стокса:

$$\lambda \geq \lambda_0.$$

Эти рассуждения раскрывают квантовый смысл закона Стокса и вместе с тем обобщают его. Так же как и при тепловом излучении, в холодном свечении мы столкнулись с необходимостью для объяснения его основных свойств ввести квантовые представления.

* * *

До сих пор мы равноправно пользовались житейским выражением «холодный свет» и научным термином «люминесценция». Теперь, когда перед нами прошли основные, твердо установленные свойства этого вида свечения, мы можем навести порядок и определенность в нашей терминологии. Дело, конечно, заключается не в словах, а в тех понятиях, которые за ними кроются.

Прежде всего, если быть точными и определенными в словах, то никак нельзя говорить, что перед нами тепловое или холодное излучение просто по температуре тела. Накаленное тело, давая тепловое излучение, вместе с тем может быть источником типично холодного света. Вспомним газовое пламя, в которое введена поваренная соль. Определить, что на самом деле имеем мы перед собою, наблюдая свет линий натрия в этом пламени, можно, только измерив поглощение пламени и сравнив излучение с черным телом в той же спектральной области и при той же температуре. С другой стороны, фосфор, дающий типичный холодный свет, вместе с тем обязательно испускает и тепловое излучение, свойственное его температуре. Далее, нам уже приходилось отмечать, что, например, рассеянный свет от порошка сернистого цинка и его собственное свечение — одинаково холодные, а вместе с тем по природе своей они глубоко различны.

Для прекращения такой путаницы и неопределенности в науку введен термин *люминесценция*. Мы называем люмине-

сценцией избыток свечения тела над тепловым излучением того же тела в данной спектральной области при данной температуре, если притом этот избыток имеет конечную длительность свечения, т. е. не прекращается сразу после устранения вызвавшей его причины.

Такое определение вполне отчетливо и по доступным изменениям признакам отделяет люминесценцию от теплового излучения и от рассеяния света и подобных процессов. По этой причине в дальнейшем изложении мы расстанемся с картинным, но крайне неопределенным и даже ошибочным понятием «холодный свет» и будем применять главным образом слово «люминесценция», определение которого только что было дано. Надо надеяться, что по мере все более глубокого проникновения люминесцентных источников в практику новое слово войдет в жизнь, так же как укоренились слова «радио», «электричество» и многие другие специальные термины.

* * *

Как объяснить свойства люминесценции? Громадные успехи, достигнутые наукой в понимании природы света и строения вещества, дали возможность в основных чертах понять люминесценцию.

Мы говорили уже о квантовой природе света и о том, как теория квантов дала возможность вполне овладеть существом равновесного теплового излучения и понять смысл основного закона люминесценции, закона Стокса.

Квантовые законы применимы, однако, не только в отношении света; они определяют также и строение вещества. Внутренняя энергия, которую может приобретать атом или молекула, имеет ступенчатый, прерывный характер. Молекуле нельзя сообщить любую энергию, а только одно из значений, образующих прерывный ряд. С этим обстоятельством связан прерывный характер атомных и молекулярных спектров, пример которых можно видеть на спектрах ртути на рис. 3.

Если поглощается квант света, то атом или молекула переходят, как говорят, из нормального в возбужденное состояние. В этом состоянии молекула остается некоторое время, которое для разных случаев может меняться в очень широких пределах, от миллиардных долей секунды до практически полной устойчивости. Это время мы и измеряем в опытах с длительностью люминесценции.

В простейших случаях вполне безразлично, чем возбуждается молекула — светом, ударом других частиц или каким-либо

иным способом. Если под действием такого возбудителя атом переходит в возбужденное состояние, то затем он излучает световой квант совершенно независимо от характера возбуждения. В связи с этим выводом вспомним опыт с кристаллами урановой соли, которая давала один и тот же свет как при возбуждении молотком, так и ультрафиолетовыми лучами и электронами.

Эти выводы имеют совершенно общий характер и в одинаковой мере справедливы как для теплового равновесного излучения, так и для люминесценции.

Если говорить об элементарных явлениях, происходящих в тепловых излучателях, то несомненно, что они те же самые по существу, как и при люминесценции. Тут и там молекулы возбуждаются при поглощении света или при взаимных столкновениях. В тепловых источниках света возбуждение возникает за счет беспорядочного теплового движения частиц вещества и не менее беспорядочного их излучения. Наоборот, в случае люминесценции превращение других форм энергии в свет происходит упорядоченным, стройным путем без побочных лишних затрат на ненужные или бесполезные для нас формы энергии. Можно сравнить с полным основанием возбуждение посредством тепла и, например, посредством ультрафиолетовых лучей с действием беспорядочной, не организованной толпы людей, хаотически толкающихся и бегающих в разные стороны, с действием тех же людей, идущих целеустремленно, военным строем. Число людей одно и то же, энергия одна и та же, но в одном случае — беспорядок и хаос, в другом — упорядоченность, стройность и целеустремленность. Тепло привычных источников света — это вовсе не неизбежный признак всякого источника света, а только выражение его большого несовершенства.

Тепло источника света — это лишняя, нерационально и неэкономно растрачиваемая энергия. Наоборот, отсутствие заметного нагревания в люминесцентных источниках — верный признак их значительного экономического превосходства.

Приведенное выше определение люминесценции как избытка света сверх теплового излучения, обладающего конечной длительностью, ясно показывает, в чем состоит глубокое принципиальное различие люминесценции и теплового излучения. В люминесцирующей среде часть сообщенной молекулам энергии не поступает в общее распределение. При том эта часть может быть очень большой. Эта энергия как бы защищена некоторым барьером от коммуникации с остальной средой.

Изоляция энергии возбуждения в люминесцирующих телах от теплового распределения есть только частный случай такой изоляции в веществе. Достаточно напомнить огромную энергию, скрытую, например, в ядре атома радия, тщательно изолирован-

ную от обмена со средой и освобождающуюся только с ничтожной вероятностью через огромные промежутки времени, измеряемые многими сотнями лет. Возбужденная молекула, способная к люминесценции, может хранить в себе энергию, в десятки и сотни раз превосходящую среднюю тепловую энергию частиц, в течение длительных сроков.

Способность молекулы к такой изоляции энергии возбуждения зависит от строения частицы. Этим и объясняется сравнительная редкость, избирательность люминесценции, о которой говорилось выше. Известно, например, что области, «ответственные» за свечение в атомах редких земель, хорошо защищены внешней электронной оболочкой от посторонних воздействий, чем и объясняется способность редких земель к люминесценции. В большинстве случаев, однако, до сих пор не установлено, от каких особенностей строения зависит способность тех или иных молекул или кристаллических фосфоров люминесцировать. Это очередная и очень нелегкая задача теории люминесценции.

Вследствие изоляции энергии возбуждения от тепловой энергии в люминесцирующем теле весь запас энергии тела распределен как бы в двух не сообщающихся между собою этажах. В нижнем, тепловом, этаже энергия обменивается и распределяется, вследствие чего устанавливается равновесие. В верхнем этаже процессы обмена, если они вообще происходят, имеют совсем особый резонансный характер, не приводящий к выравниванию, а только к странствованию энергии возбуждения в целом виде из одной молекулы в другую. В каждом люминесцирующем теле мы наталкиваемся на довольно удивительное состояние с точки зрения обычных представлений о теплоте. Здесь рядом существуют равновесное и неравновесное состояние с соответственным равновесным и неравновесным излучением. Такое разделение по двум несообщающимся этажам устанавливается, впрочем, не сразу. Большая избыточная энергия, получаемая молекулой при поглощении света или электронной бомбардировке, вначале вызывает, разумеется, общую пертурбацию. При этом часть энергии возбуждения передается среде и входит в бюджет равновесного излучения. Такая утечка энергии возбуждения отвечает стоксовскому смещению спектра люминесценции в красную сторону спектра. Возможны также и обратные процессы, т. е. переход части тепловой равновесной энергии в отдельных молекулах в энергию возбуждения. Однако в среднем тепловой запас тела не может уменьшаться за счет таких процессов; иначе говоря, тело не может охлаждаться при люминесценции, так как в «нижнем этаже» люминесцирующего тела в полной силе господствуют законы термодинамики и тепловая энергия не может превращаться в «стройную» энергию люминесценции без затраты соответствующей работы.

В соответствии с законами термодинамики процессы перехода тепловой энергии в энергию возбуждения должны возмещаться обратными отдельными переходами энергии возбуждения в тепло. Действительно, в той области спектра, где длина

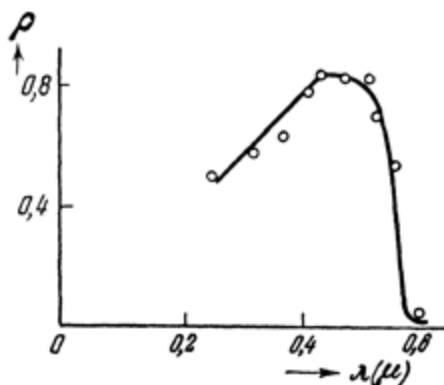


Рис. 5.

волны возбуждающего света становится больше средней волны люминесценции (т. е. должен бы нарушаться закон Стокса), выход люминесценции, т. е. отношение излученной энергии и поглощенной, начинает падать и тем больше, чем дальше углубляется возбуждающий свет в антистоксову (т. е. противоречащую закону Стокса) область. На рис. 5 изображено изменение выхода люминесценции рас-

створа красителя флуоресцеина в зависимости от длины волны возбуждающего света. Крутой спад кривой с длинноволновой стороны соответствует переходу в антистоксову область. Эта закономерность наблюдалась для всех до сих пор изученных люминесцирующих веществ и может рассматриваться как обобщение и уточнение закона Стокса.

* *
*

Главный вывод из рассмотрения явлений люминесценции может быть выражен так. Если бы вся энергия, поглощаемая любым веществом, полностью распределялась между всеми частицами вещества, поступаая в конце концов в бюджет теплового запаса тела, то единственными источниками света могли бы быть только тепловые источники. Абсолютно черное тело было бы пределом совершенства в области источников света. К счастью, это не так. Частицы многих веществ имеют такое строение, что значительная часть поглощаемой ими энергии соответствующего качества (быстрые электроны, ультрафиолетовые лучи и т. д.) не поступает в тепловое распределение, она излучается прямо, в виде света без посредства теплового, крайне неэкономичного звена. Это обстоятельство раскрывает перед техникой новые большие возможности, как мы увидим это в следующей главе.

Глава третья

ОВЛАДЕНИЕ «ХОЛОДНЫМ СВЕТОМ»

«Мы не можем ждать милостей от природы; взять их у нее — наша задача.»

И. В. Мичурин

«Если человек зависит от природы, то и она зависит от него. Она его сделала, он ее переделывает.»

А. Франс

Человек развивался на земле под тепловым излучением Солнца. К солнечному спектру приспособился в итоге длительной борьбы за существование глаз человека, ставший важнейшим и самым тонким органом его чувств. Но воспроизвести искусственное солнце как источник света, количественно и качественно заменяющий ночью солнечный свет, люди не умели до последнего времени. Природа без большого сопротивления отдавала человеку огонь и горючее — дерево, уголь, нефть. Поэтому история источников света с незапамятных времен и до наших дней — это, как мы видели в первой главе, история тепловых источников. Это была «линия наименьшего сопротивления». Но температура этих источников очень далека от солнечной, они дают более красный и слабый свет.

Конечно, спектр излучения накаливаемых тел можно легко качественно «исправить» и приблизить по составу к солнечному, надев, например, очки с подходящими синими стеклами. Уже давно по этому рецепту производились так называемые «лампы накаливания дневного света» в синем стекле. Это улучшение качества покупалось, однако, недопустимо дорогой ценой. И без того ничтожное полезное световое действие этих ламп снижалось при этом с 2—3 до 1%. Такие лампы были образцом непроизводительной затраты энергии.

Решительным шагом вперед в технике источников света была, без сомнения, электрическая лампа накаливания. Но ее прогрессивность определилась, конечно, не тем, что в ней элект-

рическая энергия превращалась в тепло, а через его посредство в свет. Успех электрической лампы был обязан тому, что она позволила осуществить светоцентралы в виде электростанций. Однако успех этот снова покупался дорогой ценой; на станции ценная химическая энергия угля и нефти превращается в тепло при сгорании. В полезную электрическую энергию, направленную по проводам к лампам, переходит только около 20% энергии, запасенной в топливе. Если вспомнить еще раз, что в лампах накаливания полезное световое действие составляет всего 2—3%, то мы увидим, что из энергии угля и нефти при их сжигании в полезный свет превращается всего несколько десятых долей процента! Больше 99% ценнейшего горючего тратится бесполезно.

В предыдущей главе мы могли убедиться, что этот крайне расточительный способ получения света вовсе не неизбежен. Надо и можно преодолеть наиболее доступный путь превращения энергии в природе через тепло, так называемый «естественный» путь; надо сойти с пути наименьшего сопротивления. Одна из очень важных задач техники в разных областях состоит в том, чтобы изыскать способы превращения одних видов энергии в другие, минуя тепловое звено. В области светотехники этот способ найден в явлениях люминесценции, открывающих прямые пути превращения любых форм энергии — механической, электрической, химической, световой — в видимый свет.

Люминесценция совсем не новое открытие. Научно заниматься ею начали еще в XVII в. Одним из первых исследователей люминесценции был Галлей. Какие же причины вызвали запаздывание господства люминесценции в светотехнике? Для того чтобы осуществить люминесцентное излучение, воспринимаемое глазом, всегда необходимо, как мы знаем, выполнить два условия: 1) нужно располагать веществом, способным люминесцировать; мы знаем, что далеко не все тела и не во всех состояниях обладают этим свойством; 2) нужно подвести к молекуле возбуждающую энергию или в виде светового кванта с частотой по меньшей мере частоты люминесценции, или в виде частицы (например, электрона) с эквивалентной энергией.

В люминесценции гниющей рыбы, которую описывал еще Аристотель, люминесцирующими частицами были сложные органические молекулы, а необходимая энергия возникала за счет химической реакции окисления. Ломоносов изучал зеленое свечение паров ртути при резком встряхивании пустотной стеклянной трубки, содержавшей некоторое количество жидкой ртути. В этих опытах Ломоносова люминесцирующим веществом, как и в современной люминесцентной лампе, о которой будет речь в дальнейшем, были пары ртути, а возбуждение достигалось за счет движущихся заряженных частиц, возникавших вследствие

электризации при быстром трении жидкой ртути о стеклянные стенки трубки. Ни Аристотель, ни Ломоносов не могли, однако, осуществить практически удобный и выгодный люминесцентный источник света, поскольку они, а вместе с ними и все человечество до второй половины прошлого века не располагали способами выгодного превращения тепловой, механической и химической энергии в электрическую. Электрические машины XVII и XVIII вв. обладали ничтожным полезным действием, паровая машина только парождалась, химические источники тока находились в начале своего развития. Только современная электротехника с ее машинами и трансформаторами поставила проблему получения полноценных, стройных форм энергии, необходимых для возбуждения люминесценции (быстрых электронов, ультрафиолетовых лучей), на прочную, экономически выгодную основу.

Из сказанного ясно, что люминесцентная лампа не могла по-настоящему осуществиться раньше конца XIX в., а ее современная форма — результат очень долгих поисков и проб, которые в конце концов заставили природу подчиниться человеку в вопросе о рациональном источнике света.

Уже в течение полувека делаются попытки создать и ввести в жизнь люминесцентные лампы. На улицах Москвы, Ленинграда и других больших наших городов часто встречаются рекламные лампы, образующие яркие надписи различных цветов, преимущественно красного, зеленого и синего. Это — электрические разрядные лампы высокого напряжения, в которых светятся главным образом газ неон и пары ртути.

Эти лампы существуют уже несколько десятилетий и экономически выгодны в том смысле, что очень большая доля электрической энергии в них переходит в свет. Однако они имеют ряд практических неудобств (высокое напряжение, неудобная форма, спектральный состав излучения), которые не уравновешиваются экономичностью.

Большое значение в развитии ламп «холодного света» имели лампы с парами металла натрия, в которых свечение возникает при электрическом разряде низкого напряжения. Эти лампы дают однородный желтый свет (тот же самый, который мы видим в спиртовом пламени при введении в него поваренной соли), причем в некоторых случаях удавалось достигать коэффициента полезного действия, превышающего 50%, вместо 2—3% ламп накаливания.

Натровые лампы не получили тем не менее широкого распространения. Неприемлимость этих ламп в жизни вызывалась спектральным составом их излучения. В ярком свете паров натрия предметы теряют свою окраску, становясь одноцветными и мало приятными для глаза. По этой причине применение

натровых ламп на практике ограничилось только специальными задачами.

Другое, также несовершенное решение искали в ртутных лампах. Коэффициент полезного действия их значительно меньше, чем в натровых лампах; он не превышает 10%. Белесовато-зеленый суммарный цвет их весьма неприятен. Попытка осветить такими лампами лет пятнадцать назад улицу Горького в Москве вызвала протесты москвичей.

Много раз предлагались газосветные люминесцентные лампы с другими светящимися газами и парами. Но эти предложения также не решали светотехнической проблемы.

Решение было найдено на пути сочетания ртутных ламп и тех твердых кристаллических светящихся составов, о которых говорилось раньше.

Мы видели, что такие составы превращают один вид света в другой, например ультрафиолетовые лучи в зеленые, зеленые в оранжевые и т. д., т. е. они, как и все люминесцирующие вещества, действуют как световые трансформаторы. Очевидно, что такие трансформаторы могут принести промадную пользу светотехнике. При их помощи можно превратить невидимые ультрафиолетовые, т. е. светотехнически бесполезные и даже вредные, лучи в видимые; можно однородный свет трансформировать в широкие спектральные полосы самых различных форм, в частности повторяющих распределение энергии дневного света. Коэффициент трансформации при этом иногда очень велик.

Идея светового трансформатора на основе люминесценции напрашивается сама собой. Еще в прошлом веке мастера-стеклодувы, изготавлившие газосветные трубки для демонстрационных целей, иногда делали их из люминесцирующего уранового стекла. Благодаря этому свечение газового разряда превращалось в более яркое и эффектное.

Лет двадцать назад в СССР и за границей начались систематические опыты использования невидимой ультрафиолетовой части спектра различных источников света (ртутных, аргонных и других ламп) при помощи люминесцирующих современных пленок, стекол и кристаллических фосфоров. В настоящее время эта задача разрешена не только с принципиальной, но и с практической стороны.

Основной частью новых люминесцентных ламп служат ртутные лампы низкого давления с примесью аргона. Они имеют вид цилиндрических трубок, диаметром 15—50 мм и длиной 80—15 см. Трубки, в которых находится несколько миллиграммов ртути, наполняются аргоном при давлении в несколько миллиметров. Во время работы лампы ее температура не превышает примерно 50°, при этом давление паров ртути весьма незна-

чительно, составляя около сотой доли миллиметра ртутного столба. Примесь аргона нужна для лучшего использования электрической энергии в разряде, свечение же разряда в основном определяется ртутью. Электроды, помещенные на концах лампы, состоят из витков вольфрамовой проволоки, активированных окисью бария и стронция. При включении лампы электроды накаляются, затем ток накала автоматически выключается при помощи особого устройства (реле), состоящего из маленькой разрядной трубки, наполненной неона. Один из электродов реле сделан из биметаллической пластинки, положение которой весьма чувствительно к температуре. После автоматического выключения тока зажигания лампы накал электродов поддерживается дуговым разрядом. Для ограничения тока и его стабилизации в цепь включается так называемый дроссель, состоящий из витков изолированной проволоки, намотанных на сердечник из железных прутьев. Электрические характеристики лампы мощностью в 20 ватт таковы: сила тока 0,35 ампера, напряжение на лампе 62 вольта при 110 вольтах в сети.

Такая трубка, если разряд происходит в чистом стекле, светится слабым голубым светом; основное люминесцентное излучение ее сосредоточено в невидимой ультрафиолетовой области спектра, преимущественно в двух мощных линиях с длинами волн 0,2537 и 0,1849 микрона. Для того чтобы превратить эту невидимую радиацию в видимый свет, на внутренние стенки лампы наносится тонкий слой «светового трансформатора» — кристаллических фосфоров, светящихся под действием указанных ультрафиолетовых спектральных линий видимым светом. Применяя различные порошки кристаллофосфоров, можно получить свечение желаемого цвета — зеленое, синее, желтое и т. д. Наибольший интерес и значение представляют, однако, вещества, воспроизводящие «дневной свет». Нужно иметь в виду, что термин «дневной свет» не совсем определенный. Освещение в природных условиях очень сильно меняется в зависимости от времени суток, сезона и погоды. Имеются светящиеся составы, воспроизводящие средний дневной свет при облачном небе; они носят название составов «дневного света». Другой распространенный тип составов называется «белым»; он, как говорят, несколько «теплее», т. е. по оттенку ближе к привычным лампам накаливания. Изменение спектров излучения достигается применением различных составов и их смесей. В последнее время в СССР получены светящиеся составы сами по себе, а не в состоянии смеси, излучающие в лампах свет, по спектральному составу очень близкий к дневному.

Обратимся теперь к экономической характеристике новых люминесцентных источников света. Для того чтобы лампа была наиболее выгодна в смысле светового действия, нужно, что

бы электрическая энергия, подводимая к лампе, полностью превращалась в видимый свет и чтобы этот видимый свет был зеленым с длиной волны около 0,55 микрона, так как этой волне соответствует наибольшая чувствительность человеческого глаза в дневных условиях. Ясно, однако, что такой «идеальный» источник света с точки зрения экономии энергии был бы, как и в случае ранее упоминавшейся натриевой лампы, практически неприемлемым. Он будет одноцветным и превратит окружающее из привычного для глаза пестрого чередования цветов в однообразную смену света и тени в зеленых тонах. С другой стороны, реализации такого «идеального» источника противодействуют квантовые законы света. В самом деле, в люминесцентной лампе, как указывалось, свечение кристаллических флюорофоров возбуждается ультрафиолетовыми спектральными линиями $\lambda = 0,2537$ и $0,1849$ микрона. В нашей «идеальной» лампе излучение должно бы сосредоточиться в спектральной зеленой линии с $\lambda = 0,55$ микрона. Поскольку, однако, из одного ультрафиолетового кванта может (по крайней мере в обычных условиях) возникнуть только один зеленый квант, для видимой радиации будет использовано от возбуждения первой ультрафиолетовой линией только доля $0,25 : 0,55 = 0,45$ и от второй $0,18 : 0,55 = 0,33$.

По этим причинам в люминесцентных лампах, предназначенных для нормальных осветительных целей, т. е. в лампах «дневного» и «белого» света, нельзя достигнуть максимальной экономии электрической энергии. Если взять среднее распределение энергии в солнечном спектре в видимых пределах и кривую дневной спектральной чувствительности глаза, то можно вычислить максимальный мыслимый коэффициент полезного действия для лампы дневного света. Он не больше 40%. Таким образом, качество дневной белизны может быть достигнуто только дорогой ценой — потерей около 60% энергии.

Кроме того, необходимо учесть еще потери, возникающие вследствие резкого различия длины волны возбуждающего света и средней длины волны дневного излучения, — они достигают не менее 50%.

В целом, современная лампа дневного света описанного устройства может в лучшем случае превратить в видимый свет не более примерно 20% электрической энергии. В реальных лампах, выпускаемых промышленностью, есть и другие источники потерь энергии, доводящие действительный к. п. д. до 10%. Сравнивая эту цифру с 2—3% к. п. д. в лампах накаливания, мы видим, что существующие люминесцентные лампы уже сейчас в 3—4 раза экономичнее ламп накаливания.

Новые лампы не лишены многих недостатков. Необходимо еще больше поднять их к. п. д., улучшая флюорофобы и, может

быть, заменив ртуть другим веществом. Лампы, имеющие вид длинных трубок, не удобны по форме. Однако вполне возможно изготавливать люминесцентные лампы в виде трубчатого кольца; в такой форме они более подходят для настольного освещения и вообще для освещения жилищ. Существенный недостаток люминесцентных ламп состоит в том, что они перестают зажигаться при низких температурах вследствие понижения упругости ртутного пара. Несомненно, однако, что этот недостаток будет устранен. Длительность основного свечения кристаллических фосфоров, применяемых до сих пор в лампах, очень коротка; поэтому в лампах, питаемых переменным электрическим током, наблюдается прерывистое освещение с периодом в одну сотую секунды. Вследствие этого при рассматривании быстро движущихся предметов наблюдается характерная полосатость. Для борьбы с этим применяется главным образом особое включение системы ламп, при котором максимумы света одной лампы приходятся на минимумы другой. Есть основания, однако, надеяться изготовить светящиеся составы с люминесценцией достаточной длительности для устранения описанной особенности.

Несмотря на эти недостатки современных люминесцентных ламп, можно без преувеличения сказать, что они открыли новый этап истории светотехники. Человек начинает по-настоящему овладевать источниками света, во всех отношениях, и в качественных и в количественных, подчиняя их своей воле.

* * *

Повышенная экономичность люминесцентных источников — не единственное практическое преимущество люминесценции. Все характерные особенности люминесценции, отличающие ее от теплового излучения, служат основой для различных полезных практических применений. Рассматривая люминесцентные лампы, мы могли уже убедиться, что при их осуществлении решающее значение имела световая трансформация, превращение ультрафиолетовой радиации в видимую посредством люминесцирующих порошков. Люминофоры как световые трансформаторы приобрели очень большое значение. Замечательное открытие лучей Рентгена в 1895 г. удалось сделать только потому, что эти, ранее совершенно неизвестные световые лучи с очень короткими длинами волны, падая на некоторые люминесцирующие вещества, частично превращаются в видимое излучение. В настоящее время техника медицинского просматривания больных лучами Рентгена целиком основана на световой трансформации.

За последние полвека выросла особая, очень большая специальность — химического и сортового анализа, называемая

люминесцентным анализом, основанная также на световой трансформации. Этот вид анализа основан на том, что ультрафиолетовые лучи, падая на различные тела, во многих случаях вызывают видимое излучение различных цветов в зависимости от химического состава тела. Пользуясь ртутной кварцевой лампой и черным стеклом, пропускающим ультрафиолетовые лучи, возможно в условиях практически полной темноты вызывать видимое излучение предметов. В такой обстановке полностью используется огромная чувствительность человеческого глаза, приспособившегося к темноте, и удастся замечать ничтожные примеси и детали. Люминесцентный анализ широко распространен в химии, медицине, пищевой промышленности, в металлообрабатывающей промышленности, минералогии, судебной медицине, уголовном розыске и т. д. Рис. 4 на стр. 108 дает пример качественного люминесцентного анализа.

В соответствии с законом Стокса принципиально нет никаких препятствий к преобразованию световых лучей с короткими длинами волн в излучение с большей длиной волны. Но возможно ли что-нибудь сделать в обратном направлении, т. е. трансформировать длинноволновые лучи, например невидимые инфракрасные в коротковолновые, видимые?

Знания и изобретательность человека нередко находят окольные способы «обходить» запреты, вроде закона Стокса, не нарушая их. Для возбуждения видимого света инфракрасными лучами нашли два пути. Электронный прибор для ночного видения (ноктовизор) устроен следующим образом. Невидимое инфракрасное изображение падает на фотоэлемент, чувствительный к инфракрасным лучам. Из фотоэлемента вырываются электроны, энергию которых можно увеличить добавочным электрическим полем. Вблизи от фотоэлемента стоит люминесцирующий экран, на который и падают электроны, вызывающие видимое свечение. Закон Стокса обходится здесь тем, что к энергии инфракрасного кванта, превратившейся в энергию электрона, добавляется новая порция электрической энергии, так что в сумме общая энергия элементарного процесса достаточна для возбуждения видимого свечения.

Другой способ «обхода» закона Стокса — чисто световой. Среди кристаллических фосфоров есть вещества, очень медленно высвечивающиеся, т. е. практически светящиеся крайне слабо после возбуждения, почти темные. Давно было известно, что некоторые из таких веществ начинают высвечиваться значительно быстрее, если после возбуждения ультрафиолетовым или видимым светом их нагреть или осветить инфракрасными лучами. В итоге достигался способ получения видимой вспышки света под действием инфракрасных лучей, на первый взгляд вопреки закону Стокса. В действительности, как легко понять,

нарушения этого закона здесь нет. Инфракрасный квант играет при этом роль не возбудителя, а только спускового «пистона» для большого заряда, ранее полученного от ультрафиолетовых лучей. За последние годы были изготовлены светящиеся составы на основе щелочноземельных соединений с двумя активаторами из редких земель — церием и самарием или европием и самарием. Эти составы по своим качествам намного превосходили все люминесцирующие вещества, ранее применявшиеся для получения вспышки под действием инфракрасных лучей после предварительного возбуждения. Они могут держать запасенную энергию возбуждения неделями, очень мало ее растрчивая при обычной температуре. При освещении инфракрасными лучами с длинами волн до 2 микронов они дают яркую зеленую или красную вспышку, практически тотчас же исчезающую по прекращении освещения инфракрасными лучами. Такими путями люминесценция дала возможность трансформировать часть невидимого инфракрасного спектра в видимый. В последнее время советским физикам и астрономам удалось на этой основе обнаружить в небесном пространстве новые звезды и туманности, не обнаруживавшиеся ни глазом, ни фотографией. Люминесценция чрезвычайно расширила фактические пределы спектральной чувствительности глаза, распространив их с узкой полосы 0,4—0,7 микрона до широчайшей области от 2 микронов до сколь угодно коротких волн.

Наряду с чисто световой трансформацией особое практическое значение получило преобразование энергии электрических лучей, в особенности потока электронов, в видимое свечение. Все современные системы телевидения опираются на тот факт, что электронный пучок, быстро пробегаая по люминесцирующему экрану, оставляет светящийся след большей или меньшей длительности. Посредством люминесценции энергия электрических сигналов превращается в видимую картину. Во всех радиолокационных установках, имеющих огромное значение в современной военной технике, в конечном счете результат получается в виде световых пятен и линий на люминесцирующем экране. Люминесценция позволила перекинуть крепкий мост между светом и электричеством в самых разнообразных практических областях.

* *

*

Люминесценция возможна только потому, что, как мы видели в предыдущей главе, энергия возбуждения не распределяется в среде, не входит в тепловой равновесный баланс тела. Это обстоятельство определяет важнейшее практическое свойство люминесценции твердых тел: возбуждение резко локализуется в телах, не распространяясь на соседние участки.

Конечно, в газах и жидкостях такой локализации не может быть вследствие малой вязкости среды и быстрых перемещений частей вещества. Локализация люминесценции в твердых телах составляет ее большое практическое преимущество. Именно по этой причине на люминесцирующем экране легко получить изображение предмета при помощи фотографического объектива, поэтому люминесценция применяется в телевидении и радиолокации. Вследствие этого свойства в значительной мере люминесценция получила широкое применение в военном деле, в частности в вопросах светомаскировки.

Война нередко опрокидывала очевидные истины. Бесспорная польза хорошего искусственного освещения в городах, на железных дорогах и т. д. в условиях современной войны, при ночных авиационных налетах противника, превращается в явный вред. Однако полное выключение искусственного света ночью — слишком примитивный, дорогой и нерациональный способ укрываться от глаз воздушного хищника. При таком способе должно почти останавливаться движение людей и транспорта в городе, необычайно тормозится железнодорожное сообщение, особенно на больших и сложных сортировочных узлах, замедляется работа заводов, в частности на открытых площадках. Разумеется, правильнее дать такое освещение, которое позволяло бы более или менее свободно ориентироваться среди окружающих предметов и вместе с тем было бы невидимым для воздушного врага, находящегося на высоте.

Такая задача во многих случаях частично разрешима, причем большую пользу, как и при решении вопроса о хорошем освещении, приносит люминесценция. Недостаток применения обычных теплых источников для маскировочного освещения сводится в основном к двум обстоятельствам: 1) самые источники, например лампы накаливания, очень ярки и легко заметны с большой высоты, если они не закрыты соответствующими фонарями или арматурой; 2) такие лампы светят во все стороны и освещают все, что падо и не падо. Например, пусть перед нами большое заводское машинное отделение, в котором обычные лампы освещают и потолок, и пол, и стены, в результате чего через окна помещения льется яркий свет, совершенно не допустимый в условиях маскировки. Между тем для нормальной работы машинного отделения нужно только, чтобы дежурному были видны измерительные приборы и основные регулирующие ручки. Обычно при таких условиях не находили ничего лучшего, как наглухо закрыть окна машинного отделения. Такое решение делает наличие окон в машинном отделении просто бессмысленным.

Если мы обратимся к люминесценции, к «холодному свету», то без труда найдем выход из таких тушиков. Заменяем, напри-

мер, обычную лампу накаливания в машинном отделении ртутной лампой с черным колпаком, пропускающим ультрафиолетовый свет и задерживающим видимый свет. Покроем, далее, необходимые части в помещении, например циферблаты измерительных приборов, ручки, рубильники и пр., люминесцирующими составами. Тогда в помещении будет видно только то, что нужно, и через окна, не замазанные краской, наружу будет проникать только ничтожный свет, совсем не заметный с самолета.

Светящимися красками, основную часть которых составляет обычно сернистый цинк, активированный медью, наносят указатели, надписи, обводят канты дверей на городских площадях, в поездах, на пристанях, на военных кораблях, на самолетах и т. д. Всюду при этом используется свойство локализации люминесценции.

На том же основании люминесценция давно вошла в театральную технику и постепенно входит в живопись. Многие задачи театрального дела, разрешавшиеся очень сложным путем, стали крайне простыми, когда научились применять ультрафиолетовый невидимый свет и разнообразные светящиеся составы. Так называемые «чудеса» в оперных, балетных и детских спектаклях осуществляются при помощи «холодного света» в большинстве случаев крайне просто. Легко, например, показать танцора, исполняющего сложный и трудный танец на одной ноге. Для этого достаточно, чтобы вторая нога танцора была покрыта не люминесцирующим материалом. Тогда в ультрафиолетовом пучке света все остальные части тела люминесцирующего танцора будут светиться, за исключением одной ноги. Люминесценция позволяет необычайно красиво и фантастично осуществить такие трудные постановки, как «подводное царство» в опере «Садко» или «Конек-Горбунок». Сцена с пером Жар-Птицы осуществляется при этом самыми простыми средствами.

Новые перспективы открывают люминесцирующие краски перед живописью. Обычная живопись в разных видах, существующая с древних времен, основана на рассеянии внешнего света, дневного или искусственного, от теплового источника, написанным в красках изображением. Это обстоятельство вносит важные ограничения в возможности живописи. Прежде всего все известные до сих пор красители при рассеянии белого света дают широкие спектральные полосы; почти нет возможности осуществить чистые насыщенные тона на картине. Только в том случае, если краски нанесены на стекле и изображение рассматривается насквозь (так называемые «витражи»), можно достигнуть достаточно насыщенных тонов. С другой стороны, в обычной живописи весьма ограничен набор яркостей. В самом деле, самые чистые белила рассеивают не более 95—97% света, на них падающего, 3—5% поглощаются; вместе с тем самая

черная краска в действительности поглощает не больше 95% падающего на нее света, рассеивая остальные 5%. Таким образом, самые большие изменения яркости цветных пятен на картине могут колебаться в пределах приблизительно не больше 5—95%, т. е. могут изменяться только в 20 раз. Между тем, в окружающей нас природе, которую часто стремится воспроизвести живописец, воспринимаемые человеческим глазом яркости иногда различаются во многие сотни раз. Достаточно представить себе лес, пронизываемый прямыми лучами солнца, когда чередуются яркие солнечные пятна и густая тень под деревьями, или небо с заходящим солнцем или восходящим месяцем. Такие пейзажи совершенно не доступны обычной живописи.

Совсем другие возможности имеет живописец, пользующийся люминесцентными красками, сияющими собственным светом под ультрафиолетовыми лучами. Здесь вполне достижимы чистые, насыщенные тона, здесь без большого труда можно осуществить ступени яркости красителей, меняющиеся в сотни раз. Поэтому в люминесцентной живописи вполне реальны пейзажи с солнцем и луною на небосводе и другие подобные сюжеты, не возможные для обычной живописи. Первые, весьма успешные шаги в этом направлении уже сделаны советскими художниками.

* * *

*

Энергия возбуждения, полученная люминесцирующим телом, как мы знаем, ограждена от участия в общем обмене энергией в теле, приводящем к тепловому равновесию. Этим объясняется, как уже отмечалось, локализация возбуждения в твердых люминесцирующих телах. С этой же изоляцией связана обязательная конечная длительность процессов люминесценции после прекращения возбуждения.

Длительность люминесценции широко и разнообразно используется в технике. Еще в начале прошлого века, до открытия фотографии в ее современном виде, предлагалось получать изображения предметов, проектируя их при помощи линз на люминесцирующие слои, обладающие большой длительностью после свечения. Такие изображения могли существовать практически в течение нескольких часов, постепенно ослабевая и исчезая. За это время можно было бы зарисовать изображение или силуэт на кальку и таким образом его «фиксировать».

Существенное значение длительность люминесценции приобрела в военное время. Большие поверхности, покрытые светящимися составами, получили применение в бомбоубежищах и всюду, где можно было опасаться внезапного прекращения электрического освещения в результате воздушных бомбардировок.

ровок или других причин. Возбуждая ярким активным светом, например горячей лентой магния, небольшую поверхность, размером открытого письма, можно получить удобный слабый источник света на несколько часов. Эту светящуюся открытку можно класть в карман, когда свет ее не требуется, так как свет люминесценции «холодный» и костюм не сторит. Можно приколоть такую открытку к груди для того, чтобы ночью во время противоздушного затемнения на улицах города не сталкиваться с прохожими. Та же открытка может служить подкладкой для писания ночью в темноте на достаточно прозрачной бумаге.

Жестяной или картонный конус, покрытый изнутри светящимся составом с большой длительностью свечения после возбуждения, заменяет фонарь в условиях затемнения, создавая достаточно освещенный круг у ног лица, несущего такой конус, направленный вертикально вниз на шнуре.

Абажур, сделанный из пластической массы с введенным в нее сернистым цинком, активированным медью, закрывающий лампу накаливания (рис. 6), по выключении лампы превращается в удобный, хотя и слабый по яркости ночник. Такой ночник, если пользоваться подходящим светящимся составом, светится слабым светом до утра. Вместо пластмассы можно воспользоваться любой прозрачной для света тканью, покрыв ее из пульверизатора эмульсией из светящегося состава, сделанной на основе подходящего лака.

Очень важная техническая задача состоит в разыскании таких светящихся веществ, которые обладали бы очень длительным послесвечением при одновременной достаточной яркости. Это нужно для того, чтобы послесвечение могло за счет возбуждения, получаемого в дневные часы, затягиваться через всю ночь до рассвета. Когда такие вещества будут реализованы, откроются интересные перспективы для железных и автомобильных дорог, не имеющих электрического освещения, и вообще для освещения районов, удаленных от населенных мест.

Окрашивая люминесцирующей краской шпалы железных дорог или дорожные столбы и деревья, в будущем, вероятно, удастся обеспечить ориентировочное освещение на всю ночь на больших пространствах простым и экономным способом. До сего времени, впрочем, еще не удалось изготовить светящиеся вещества с необходимыми для указательной цели качествами, хотя, несомненно, с каждым днем решение задачи продвигается вперед. За последние годы в СССР получены светящиеся составы, которые спустя 8 часов после прекращения возбуждения почти в 10 раз ярче, чем наиболее совершенные, имевшиеся до сего времени образцы. Этот успех еще недостаточен для полного разрешения задачи о «преодолении ночи», но близок к нему. Здесь



Рис. 6. Абажур-ночник, сделанный из люминесцирующей пластической массы

Фотографический снимок получен после многочасовой съемки

перед нами одно из очень увлекательных светотехнических применений люминесценции.

Свойство длительности свечения имеет важное значение также в технических устройствах, использующих преобразование энергии электрона в свет. В телевидении электронный пучок, быстро пробегая по люминесцирующему экрану, оставляет свой след в виде изображения предмета. Если, однако, предмет — движущийся, то необходимо, чтобы люминесцирующее пятно, возбужденное электронами, возможно быстрее исчезало, оставляя свежее место для следующего, измененного сигнала. Некоторая длительность изображения гарантируется инерцией зрительного восприятия. Поэтому в телевидении применяются для экранов

вещества с очень быстрым затуханием свечения после возбуждения электронами. Следует заметить, что обычные кристаллофосфоры вообще затухают при электронном возбуждении очень быстро. С другой стороны, в радиолокации и в некоторых специальных устройствах желательно получить запись электронного пучка, остающуюся на экране достаточное время. Для этой цели разрабатываются особые вещества с большой длительностью свечения при электронном возбуждении или применяются «двуслойные» экраны. Нижний слой такого экрана, возбуждаемый электронами, дает быстро затухающее фиолетовое или даже ультрафиолетовое свечение. Но возникающий при этом свет проникает во второй верхний слой экрана и возбуждает в нем зеленое свечение. В этом случае возбуждение производится светом и имеет большую длительность. Описанный двуслойный экран позволяет, таким образом, получить длительную световую запись от электронного луча.

* *
*

Почти у всякого человека, видевшего длящееся свечение кристаллических фосфоров, возникает мысль, нельзя ли каким-нибудь способом получить фосфор всегда светящимся. Ясно, конечно, что с обычными составами сделать этого никак нельзя по закону сохранения энергии. Фосфор в лучшем случае отдает то, что он получил; в довершение беды фосфор не может собирать в себе безгранично много энергии. Число центров, которые в нем способны возбуждаться, ограничено, и раз все центры возбуждены, то дальше падающий свет уже падает напрасно, он проходит не поглощаясь.

Существует пока единственный способ получать так называемые фосфоры постоянного действия, т. е. фосфоры, светящиеся ровным слабым светом если не всегда, то по крайней мере годы. Этот способ состоит в добавке к светящимся составам ничтожных количеств радия или других радиоактивных веществ. Радий — замечательный пример самораспадающихся атомов. За 1700 лет наличное количество радия должно распасться только наполовину и превратиться в другие элементы. При таком распаде выделяется энергия, сосредоточенная в так называемых лучах альфа, бета и гамма. Лучи альфа — это ядра атома гелия, лучи бета — электроны и лучи гамма — световые лучи с чрезвычайно малой длиной волны, короче, чем у лучей Рентгена. Лучи гамма очень мало поглощаются в веществе, поэтому их световое действие незначительно. Основная люминесценция вызывается лучами альфа. Частицы альфа, встречая кристаллы сернистого цинка, поглощаются на очень коротком расстоянии, выделяя при этом огромную энергию, часть которой,

по крайней мере несколько процентов, превращается в видимый свет. За счет одного ядра атома гелия получается, в сущности, целый взрыв; действие это можно видеть в виде отдельной достаточно яркой вспышки люминесценции (так называемые сцинтилляции).

Если бы сам сернистый цинк постепенно не разлагался под действием излучений радия, то люминесценция кристаллического фосфора с радием должна бы длиться, очень мало ослабевая, многие столетия и даже тысячелетия. В действительности сернистый цинк постепенно разлагается, и уже года через два люминесценция заметно уменьшается.

Свечение «фосфора постоянного действия» растет по мере возрастания количества добавляемого радия. Но идти далеко по этому пути нельзя прежде всего по соображениям чисто экономического характера. Радии очень редки и дорогой элемент, стоимость грамма радия превышает миллион рублей. Для получения практически приемлемого, но по существу очень слабого свечения фосфора на один килограмм фосфора нужно добавить около десяти миллиграммов радия. В результате килограмм «фосфора постоянного действия» обходится больше 10 000 руб., в то время как тот же фосфор без радия стоит 200—300 руб.

С другой стороны, чем больше радия добавлено в светящийся состав, тем быстрее свечение его ослабевает. Несмотря на это, светящиеся вещества «постоянного действия» уже несколько десятилетий широко применяются для изготовления светящихся шкал, в особенности в военном деле. Можно вообще сказать, что большая часть радия, добываемого на земле, тратится на «фосфоры постоянного действия», так называемые самосветящиеся краски. В их состав входят фосфоры постоянного действия, которыми покрывают шкалы военных приборов, работающих ночью, циферблаты часов и пр.

Нет ли возможности заменить радий другим, менее дефицитным и дорогим веществом? Надо надеяться, что развитие физики атомного ядра в недалеком будущем приведет к методам получения искусственных радиоактивных веществ, которые смогут заменить радий в «фосфорах постоянного действия». Это задача будущего. Можно заметить только, что светящиеся составы «постоянного действия», по крайней мере с принципиальной стороны, могли бы стать известными лет сто назад, если бы исследователи, химики и физики внимательно и долго присматривались в темноте к кристаллам урановых соединений, например азотнокислого урана, и в особенности к комплексной соли — серноокислому уранилкалию. Они увидели бы еще сотню лет назад, что в темноте эти кристаллы светятся. Причина свечения кроется в медленном распаде атомов урана. Конечно, от таких крайне слабых люминесцирующих источников и даже

от наиболее мощных современных составов постоянного действия еще очень далеко до потребностей практической светотехники. Но мы вступаем в эпоху реального овладения энергией атомных ядер, и можно надеяться, что рано или поздно атомная энергия будет применена и для светотехнических целей, и не только через электростанции, работающие на ядерном «горючем», но и прямо в системах, схожих с современными составами постоянного действия.

Велика роль науки и техники в нашей стране. Советский человек знает, что означало изобретение железнодорожного сообщения, авиации, автомобилей, телефонной связи, радио, способов борьбы с микробами, фотографии, кино в развитии человеческого общества. То, что предвидела народная сказка и песня и что приписывала богам и колдунам — разговоры на расстояниях в тысячи километров, молниеносные перелеты на ковresseсамолете, полное сохранение внешности, движений и голоса давно умерших людей — все это стало такой же обычной вещью, как телега и самовар. Пожалуй, даже наоборот, телега с самоваром во многих местах нашей Родины становятся большей редкостью, чем самолет и электрический чайник.

Не нужно обладать особым даром предвидения, чтобы предсказать заранее то недалекое время, когда «холодный свет» станет для каждого из нас столь же неизбежным и привычным предметом обихода, каким является электрическая лампа накаливания.

«Холодный свет» — это единственное рациональное решение светотехнической проблемы, это освобождение от проторенной дороги тепловых источников света, на который толкает нас природа, это овладение природой, ее переделка. «Холодный свет» — это неотъемлемая часть культурной жизни будущего коммунистического общества. Наша обязанность — приблизить осуществление и повсеместное распространение «холодного света».

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ КНИГ ПО ВОПРОСАМ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

1. В. Л. Левшин. Холодный свет. Изд-во АН СССР, 1938 (120 стр.). (Краткое общедоступное изложение вопроса.)
2. В. Л. Левшин. Светящиеся составы. Изд-во АН СССР, 1936 (134 стр.). (Более специальное изложение, чем в предшествующей брошюре. Содержание в настоящее время частично устарело.)
3. Н. Риль. Люминесценция. Физические свойства и технические применения. Гос. изд-во техн.-теорет. лит-ры, 1946 (184 стр.). (Подробное изложение свойств кристаллических фосфоров и применение их в технике. Книга рассчитана на читателя, знакомого с вопросом.)
4. П. Прингсхейм и М. Фогель. Люминесценция жидкостей и твердых тел и ее практические применения. Гос. изд-во ин. лит-ры, 1948 (262 стр.). (Книга предназначена для читателей, интересующихся люминесценцией главным образом с технической стороны. Содержит много хорошо проверенных сведений.)
5. М. А. Константинова-Шлезингер. Люминесцентный анализ. Изд-во АН СССР, 1948 (288 стр.). (Систематическое изложение применения люминесценции для аналитических целей в разных областях. Книга предназначена для широкого круга специалистов, пользующихся люминесцентным анализом.)
6. Н. Ф. Жиров. Люминофоры. Гос. изд-во оборонной пром-сти, 1940 (478 стр.). (Подробное руководство по изучению и технологии изготовления кристаллических фосфоров. Содержит обширную рецептуру.)
7. Ф. А. Нилендер. Люминесцентные лампы и их применение. Госэнергоиздат, 1948 (60 стр.). (Сжатое изложение свойств люминесцентных ламп, их конструкции и технологии.)
8. А. В. Москвин. Катодолюминесценция. Часть I. Общие свойства явления. Гос. изд-во техн.-теорет. лит-ры, 1948 (348 стр.). (Подробное изложение физических основ катодолюминесценции на основании литературных сведений и собственного опыта автора.)
9. А. В. Москвин. Катодолюминесценция. Часть II. Катодолюминофоры и экраны. Гос. изд-во техн.-теорет. лит-ры, 1949 (700 стр.). (Подробное изложение применения катодолюминесценции в технике; технологии изготовления люминофоров и экранов.)

10. Материалы совещания по вопросам люминесценции 5—10/X 1944 г., созванного Физико-математическим отделением Академии наук СССР. Изв. АН СССР, серия физич., 9, № 4—5, 277—576, 1945. (32 доклада по основным вопросам теории и техники люминесценции в СССР и за границей по состоянию на 1944 г.)
11. Материалы Второго совещания по люминесценции и применению светосоставов, созванного Физико-математическим отделением АН СССР 17—22 мая 1948 г. Изв. АН СССР, серия физич., 13, № 1 и 2, 1949 (328 стр.). (40 докладов по основным вопросам теории и техники люминесценции в СССР и за границей по состоянию на 1948 г.)
12. Научная литература по вопросам люминесценции. Библиография 1935—1946 гг. Изв. АН СССР, 1948 (334 стр.). (Подробный библиографический перечень научных статей и книг по вопросам теории и техники люминесценции, опубликованных в СССР и за границей за указанное время.)

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАЗ И СОЛНЦЕ

(О свете, Солнце и зрении)

| | |
|--------------------|----|
| Введение | 10 |
| Свет | 45 |
| Солнце | 71 |
| Глаз | 71 |

О «ТЕПЛОМ» И «ХОЛОДНОМ» СВЕТЕ

(Тепловое излучение и люминесценция)

| | |
|---|-----|
| Предисловие | 113 |
| Глава первая. «Теплый свет» и тепловое излучение | 115 |
| Глава вторая. «Холодный свет» и люминесценция | 127 |
| Глава третья. Овладение «холодным светом» | 141 |
| Список рекомендуемых книг по вопросам люминесценции | 158 |

Сергей Иванович Вавилов

Глаз и Солнце. О «теплом» и «холодном» свете

*

Утверждено к печати

Редколлегией научно-популярной литературы Академии наук СССР

*

Редактор Издательства *Е. М. Кляус*. Технический редактор *Г. А. Астафьева*
Художник *Бажанов Ю. К.*

РИСО АН СССР № 152-44В. Сдано в набор 21/ХІІ 1960 г.

Подписано к печати 27/ІІ 1961 г. Формат 60×92 1/16. Печ. л. 10. Уч.-изд. л. 9,1

Тираж 15000 экз. Т-00293. Изд. № 5197. Тип. зан. № 1315

Цена 75 коп.

Издательство Академии наук СССР. Москва, В-62, Подсосенский пер., д. 21
2-я типография Издательства АН СССР. Москва, Г-99, Шубинский пер., д. 10

