





Arnold

Б.И.СТЕПАНОВ

---

**ВВЕДЕНИЕ  
В СОВРЕМЕННУЮ  
ОПТИКУ**

535  
5794

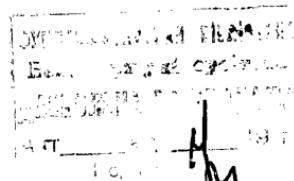
---

# ФОТОМЕТРИЯ. О ВОЗМОЖНОМ И НЕВОЗМОЖНОМ В ОПТИКЕ

КХН

БІБЛІОТЭКА  
Белгээргүүнівсерсітәте  
імім. У. І. Ленина

1338741



УДК 535.24

Степанов Б. И. Введение в современную оптику: Фотометрия. О возможном и невозможном в оптике.—Мн.: Наука и техника, 1989.—254 с.—ISBN 5-343-00063-0.

Рассказывается о месте фотометрии в оптике, ее специфике, основных фотометрических величинах, приемниках и источниках излучения. Обсуждаются вопросы офтальмологии и физиологической оптики, а также работа зрительного аппарата, цветоведение. Изучается влияние фона теплового излучения на показания приемников излучения.

Интерес представляет также раздел «О возможном и невозможном в оптике». Показано, что многое из казавшегося принципиально неосуществимым стало реальным.

Рассчитана на научных работников, инженеров, преподавателей и студентов.

Табл. 7. Ил. 101. Библиогр. в конце глав.

Редактор  
чл.-кор. АН БССР В. П. Грибковский

Рецензенты:  
д-р физ.-мат. наук Г. С. Круглик,  
канд. физ.-мат. наук Ф. К. Рутковский

1604060000—070  
C ————— 58—89  
M316(03)—89

ISBN 5-343-00063-0

© Издательство  
«Наука и техника», 1989.

## ОТ РЕДАКТОРА

Фотометрия — раздел физической оптики, в котором разрабатываются теория и методы измерения энергетических характеристик видимого, инфракрасного и ультрафиолетового излучения при его испускании, распространении, поглощении и рассеянии. В узком смысле слова фотометрию связывают с изучением только видимого излучения или света. В рамках фотометрии исследуются также свойства источников и приемников излучения, в том числе и человеческого глаза.

Основное понятие этой науки — поток излучения, равный средней мощности, переносимой электромагнитными волнами. Он входит в определение силы света, светимости, яркости, освещенности и других энергетических характеристик.

По-видимому, исторически первая работа по фотометрии была выполнена во II в. до н. э. Гиппархом, составившим каталог звезд и разделившим их на шесть классов по блеску (яркости). Зависимость освещенности объекта от яркости и удаленности источника света исследовалась Леонардо да Винчи. В 1604 г. И. Кеплер сформулировал фундаментальный закон фотометрии, согласно которому освещенность предмета убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до точечного источника света.

Основоположником современной экспериментальной фотометрии можно считать французского физика П. Бугера, разработавшего в 1729 г. метод визуального количественного определения яркости источников света на основании уравнения освещенностей соседних поверхностей. Он же, пользуясь листами промасленной бумаги и свечами, установил закон экспоненциального ослабления силы света при его прохождении через поглощающую среду. П. Бугеру принадлежит первая в мировой литературе крупная монография по фотометрии «Оптический трактат о градации света».

Развитие теоретической фотометрии было начато работой И. Ламберта по световому полю (1760 г.). В 30-е годы XX в. А. А. Гершуном, а затем другими советскими и зарубежными учеными была разработана теория переноса излучения, теоретическая основа современной фотометрии.

Фотометрия связана с геометрической оптикой и спектрископией, но развивается в значительной степени изолированно от них. Высокий уровень развития геометрической оптики в

*XVI и XVII вв. слабо отразился на становлении фотометрии. Она осталась безучастной и к революционному перевороту в спектроскопии, вызванному квантовой теорией излучения. В XX в. принципиально новое в фотометрию было внесено, пожалуй, только Б. И. Степановым, опубликовавшим в 1961 г. монографию «Основы спектроскопии отрицательных световых потоков». В этой работе впервые детально проанализировано влияние фона теплового испускания на результаты измерений и показана возможность использования в спектроскопии и фотометрии охлажденных тел в качестве источников отрицательных световых потоков.*

*В настоящей книге читатель найдет изложение широкого круга вопросов, относящихся к фотометрии. В ней определены основные понятия и термины, изложены важнейшие закономерности, рассмотрены характеристики источников и приемников излучения. Большое внимание уделено строению глаза, цветному зрению и фотографии. Детально излагается фотометрия отрицательных световых потоков, пределы разрешающей способности оптических приборов. Все изложение обогащено многочисленными экскурсами в историю науки и философскими размышлениями. Обсуждается место фотометрии среди других наук и границы ее применимости.*

# 1

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ФОТОМЕТРИИ

### § 1. СВЕТОВОЙ ПОТОК

**Место фотометрии в оптике.** Как уже отмечалось неоднократно, световая волна характеризуется четырьмя параметрами: амплитудой  $A$ , частотой  $v$ , фазой  $\delta$ , скоростью волны  $v$ . Именно они несущи однозначно все сведения о световой волне.

Скорость распространения света для данной среды, как правило, известна и, следовательно, существенной информацией не даст<sup>1)</sup>. Значительно содержательнее (информативнее) три другие величины: амплитуда, фаза и частота. В понятие амплитуды входит в общем случае и поляризация световой волны — амплитуда есть вектор; каждому его направлению может соответствовать своя фаза.

Изучению основных параметров световых волн посвящены три связанных и в то же время сравнительно самостоятельных раздела оптики: фотометрия, интерферометрия и спектроскопия. Фотометрия исследует энергетические характеристики оптического излучения во временном, пространственном и спектральном распределении, т. е. свойства квадрата амплитуды  $|A|^2$ . В интерферометрии измеряется разность фаз  $\Delta\delta$  и исследуются эффекты, возникающие при сложении волн с различными значениями фаз. Спектроскопия — наука о законах поглощения и испускания света. Она занимается изучением частот световых волн; решая эту задачу, физики получают огромную информацию о свойствах источников света и о свойствах вещества, поглощающего и отражающего свет.

Все эти три направления науки тесно переплетены друг с другом. В той или иной степени они занимаются изучением поляризации световых волн. В процессе сложения волн имеет значение не только разность фаз  $\Delta\delta$ , но и разность частот  $\Delta v$ . В науке, которая названа спектрофотометрией, измеряются не только частоты световых волн, но и распределение интенсивностей по их спектру. Еще один раздел оптической науки — цветоведение — связан и со спектроскопией и с фотометрией. Поскольку длина волны определяет цвет, воспри-

<sup>1)</sup> Однако известно, что по показателю преломления судят о свойствах вещества.

нимаемый глазом, то цветоведение имеет прямое отношение к спектроскопии. Однако в настоящее время его относят к фотометрии, так как оно непосредственно связано со свойствами глаза, с его способностью воспринимать разные цвета.

Свет несет всегда богатейшую информацию о свойствах окружающего нас мира. Именно поэтому оптика стала одной из ведущих естественных наук, именно поэтому мы уделяем ей особое внимание.

**Основные фотометрические величины.** Как мы уже сказали, фотометрией называется раздел оптики, занимающийся изучением энергетических характеристик световых явлений, а также способами их измерений. Ранее фотометрию ограничивали свойствами видимого излучения и его влиянием на глаз человека. Однако в настоящее время экспериментаторы используют для измерения интенсивности света чаще всего не глаз, а другие более объективные приемники (фотоэлементы, фотопластинки, фотоумножители и т. п.). Именно поэтому характеристики световых потоков уже не связывают с той или иной областью спектра или с тем или иным приемником излучения.

Фотометрия — наука феноменологическая, описательная. В ней нет никаких сведений о природе света, о его волновых или корпускулярных свойствах. Она лишь описывает количественно параметры излучения, которые подлежат измерению, и строго формулирует законы их изменения. В фотометрии нет гипотез. Разумеется, она опирается во многом на другие разделы оптики, но в принципе это не обязательно. В ней сделаны некоторые исходные определения и затем рассматриваются следствия, из них вытекающие, выводятся рекомендации для правильной строго количественной постановки оптического эксперимента, для создания источников и приемников излучения, их контроля и градуировки.

При изложении фотометрии мы будем по возможности кратки. Фотометрия в качестве науки сложилась уже давно и новые проблемы возникают в ней достаточно редко, чаще всего при появлении новых источников или приемников излучения. Изложению проблем фотометрии посвящено большое число монографий и учебных пособий (см., например, [1—23]). Кроме того, фотометрии посвящены специальные разделы во всех учебниках оптики. В данной главе мы ограничиваемся самым главным — описанием некоторых основных понятий. Они широко используются во всех последующих главах.

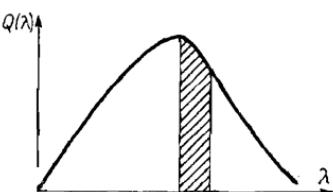
Фотометрическими методами измеряют энергию излучения  $Q$ , переносимую светом от одного места пространства к другому (от источников света к приемникам). Измерение осуществляется за времена, много большие периода световых колебаний. Энергию, переносимую в данном потоке всеми дли-

нами волн, принято называть *интегральной энергией*. При необходимости возможна более полная характеристика данного излучения, учитывая распределение энергии по длинам волн:

$$dQ = Q(\lambda) d\lambda. \quad (1.1.1)$$

Величина  $Q(\lambda)$  называется спектральной плотностью энергии излучения. На рис. 1.1.1 приведено одно из возможных распре-

Рис. 1.1.1. Распределение световой энергии по длинам волн



делений. Энергия  $Q(\lambda) d\lambda$  равна заштрихованной площадке. Полная площадь под кривой равна интегральной энергии  $Q$ . Энергия  $Q(\lambda_1, \lambda_2)$ , приходящаяся на интервал длин волн от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ , определяется интегралом

$$Q(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(\lambda) d\lambda. \quad (1.1.2)$$

Излучение всегда занимает какое-то пространство. Объемная плотность энергии излучения

$$u = dQ/dV. \quad (1.1.3)$$

Эта величина измеряется согласно ГОСТу в  $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3}$ . В атомной и молекулярной физике чаще всего пользуются другой единицей —  $\text{эрг} \cdot \text{см}^{-3}$ .

Аналогично предыдущему вводится понятие спектральной плотности объемной плотности энергии излучения:

$$du(\lambda) = u(\lambda) d\lambda. \quad (1.1.4)$$

Отсюда следует

$$u = \int_0^{\infty} u(\lambda) d\lambda. \quad (1.1.5)$$

Величина  $u(\lambda)$  измеряется в  $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-4}$  или  $\text{эрг} \cdot \text{см}^{-4}$ .

Часто применяется понятие потока энергии излучения

$$\Phi = dQ/dt. \quad (1.1.6)$$

Величина  $\Phi$  характеризует количество энергии, проходящей за единицу времени через данную площадку. Размерность потока

$\Phi$  — мощность, она измеряется в ваттах или в эрг·с<sup>-1</sup>. Спектральная плотность потока энергии излучения  $\Phi(\lambda)$  определяется равенствами

$$d\Phi(\lambda) = \Phi(\lambda) d\lambda, \quad (1.1.7)$$

$$\Phi = \int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda. \quad (1.1.8)$$

Значение  $\Phi(\lambda)$  измеряется в Вт·м<sup>-1</sup> или в эрг·с<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>.

В формулах (1.1.1) — (1.1.8) спектральные функции  $Q(\lambda)$ ,  $u(\lambda)$  и  $\Phi(\lambda)$  заданы в шкале длин волн. С той же степенью полноты их можно определять в шкале частот  $Q(v)$ ,  $u(v)$ ,  $\Phi(v)$ . Ранее, в XIX в., пользовались только шкалой длин волн. Это зависело от техники эксперимента, самой постановки задачи. Работая со спектральными приборами, исследователь получал непосредственно зависимость  $u(\lambda)$ , а не  $u(v)$ . Во всех обычных спектральных приборах лучи разных длин волн по-разному отклоняются от их первоначального общего направления. В дифракционной решетке этот угол пропорционален длине волны; экспериментальное определение  $Q(\lambda)$ ,  $u(\lambda)$  или  $\Phi(\lambda)$  особенно просто.

С начала XX в. зависимости  $Q(v)$ ,  $u(v)$ ,  $\Phi(v)$  приобрели принципиально новое звучание, конкретный физический смысл. Это связано с работами М. Планка, возникновением квантовой физики. Частота стала определять не только число колебаний светового поля за 1 с, но и энергию светового кванта (с точностью до постоянной Планка  $h$ ). Это в корне изменило трактовку функций распределения. В частности, величина  $u(v) dv/hv$  равна числу квантов в единице объема с частотами в интервале от  $v$  до  $v+dv$ .

Именно по этой причине в последнее время чаще всего пользуются спектральными распределениями, выраженными в шкале частот. Использование функций  $Q(\lambda)$ ,  $u(\lambda)$ ,  $\Phi(\lambda)$  сохраняет свое значение при решении технических задач.

Переход от распределений  $Q(\lambda)$ ,  $u(\lambda)$ ,  $\Phi(\lambda)$ , измеренных экспериментально, к распределениям  $Q(v)$ ,  $u(v)$ ,  $\Phi(v)$  достаточно прост. В прозрачной среде с показателем преломления  $n$  длина волны

$$\lambda' = v/v = c/nv. \quad (1.1.9)$$

При переходе светового потока из заданной среды в вакуум частота  $v$  сохраняется неизменной<sup>2)</sup>. Для пустоты  $\lambda = c/v$  и, следовательно,

$$\lambda' = \lambda/n. \quad (1.1.10)$$

<sup>2)</sup> Этот факт также доказывает, что распределение в шкале частот более приемлемо. При переходе из одной среды в другую длина волны изменяется.

По аналогии с (1.1.1) запишем

$$dQ = Q(v) dv. \quad (1.1.11)$$

Для данного спектрального интервала

$$Q(\lambda) d\lambda = Q(v) dv. \quad (1.1.12)$$

Подставляя в (1.1.12) значение

$$|dv| = \frac{c}{\lambda^2} d\lambda,$$

справедливое при  $n=1$  (т. е. для вакуума), получаем окончательно

$$Q(v) = \frac{\lambda^2}{c} Q(\lambda). \quad (1.1.13)$$

Совершенно аналогичен переход от  $u(\lambda)$  к  $u(v)$  и от  $\Phi(\lambda)$  к  $\Phi(v)$ :

$$u(v) = \frac{\lambda^2}{c} u(\lambda), \quad (1.1.14)$$

$$\Phi(v) = \frac{\lambda^2}{c} \Phi(\lambda). \quad (1.1.15)$$

Между потоком энергии  $\Phi$  и объемной плотностью излучения  $u$  имеется простая связь. Для ее вывода рассмотрим световую трубку, изображенную на рис. 1.1.2. Световой трубкой называется трубка, мысленно выделенная в поле излучения, в которой нет перехода световой энергии через боковую поверхность. Если волна, распространяющаяся внутри трубы, плоскопараллельна, то ее боковая поверхность имеет форму цилиндра, причем плотность радиации во всех сечениях световой трубы одинакова. Если же поток энергии внутри трубы сходится или расходится, то плотность излучения  $u$  в разных сечениях различна.

На рис. 1.1.2 изображено одно из сечений световой трубы  $ds$ . Поток энергии излучения  $d\Phi$  через это сечение

$$d\Phi = u \frac{c}{n} ds. \quad (1.1.16)$$

Формулу (1.1.16) обосновать нетрудно. В течение секунды через сечение трубы пройдет все излучение, которое находится в трубке на расстоянии  $v=c/n$  от него. Величина  $cds/n$  характеризует объем светового поля, проходящего через сечение  $ds$  за 1 с. Умножая эту величину на плотность излучения  $u$ , получим (1.1.16). Нетрудно показать, что формула (1.1.16)

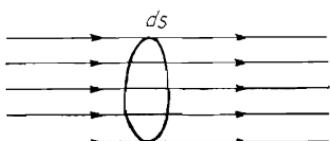


Рис. 1.1.2. Световая трубка

справедлива и для сходящихся или расходящихся световых трубок; в этом случае величина  $u$  будет функцией точки и определяет объемную плотность энергии излучения на границе с сечением  $ds$ .

В фотометрии широко пользуются еще двумя понятиями, характеризующими поверхностную плотность потока излучения. Первое из этих понятий — энергетическая светимость — определяет поток излучения, испускаемый единичной площадкой (рис. 1.1.3):

$$M = d\Phi/ds. \quad (1.1.17)$$

Очень часто вместо слова «светимость» говорят «испускатель-

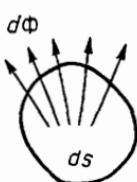


Рис. 1.1.3. Светимость площадки  $ds$

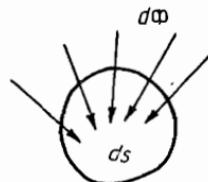


Рис. 1.1.4. Освещенность площадки  $ds$

ная способность». Второе понятие — энергетическая освещенность — позволяет оценить количественно поток, падающий на единичную площадку (рис. 1.1.4):

$$E = d\Phi/ds. \quad (1.1.18)$$

Энергетическая светимость и энергетическая освещенность измеряются в  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$  или  $\text{эр} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ .

По аналогии с предыдущим введем спектральные плотности энергетической светимости и энергетической освещенности:

$$dM(\lambda) = M(\lambda) d\lambda, \quad dM(v) = M(v) dv, \quad (1.1.19)$$

$$dE(\lambda) = E(\lambda) d\lambda, \quad dE(v) = E(v) dv, \quad (1.1.20)$$

причем

$$M(v) = \frac{\lambda^2}{c} M(\lambda), \quad E(v) = \frac{\lambda^2}{c} E(\lambda). \quad (1.1.21)$$

Следует подчеркнуть, что вид всех спектральных распределений, выраженных в шкале длин волн, отличается от вида

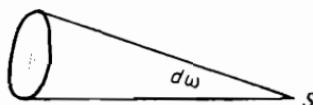


Рис. 1.1.5. К определению понятия силы излучения

распределений, выраженных в шкале частот. Мы это увидим наглядно в § 4 при анализе яркости свечения абсолютно черного тела.

Введем еще две важные фотометрические величины: силу излучения и яркость. Рассмотрим точечный источник света  $S$  (рис. 1.1.5). Силой излучения источника называется величина

$$I = d\Phi/d\omega, \quad (1.1.22)$$

где  $d\Phi$  — поток энергии излучения в телесном угле  $d\omega$ . Сила излучения измеряется в  $\text{Вт}\cdot\text{ср}^{-1}$  или в  $\text{эрг}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$ . Если источник света изотропен, то значение  $I$  для всех углов оди-

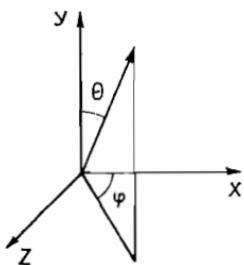


Рис. 1.1.6. Сферическая система координат

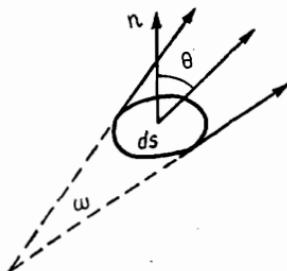


Рис. 1.1.7. К определению понятия яркости поверхности

наково. Для неизотропного источника света оно зависит от направления. Поверхность равных значений  $I$  называется индикаторисой испускания источника. В общем случае

$$d\Phi = I(\theta, \varphi) d\omega,$$

где  $\theta$  и  $\varphi$  — углы в сферической системе координат, характеризующие данное направление (рис. 1.1.6). Поток излучения через всю сферу, окружающую источник света  $S$ , можно представить в виде

$$\Phi = 4\pi I, \quad (1.1.23)$$

где  $I$  — значение  $I$ , усредненное по всем углам  $\theta$  и  $\varphi$ . Величину  $I$  называют средней сферической силой излучения.

Рассмотрим теперь поток излучения, испускаемый светящейся площадкой  $ds$  в телесном угле  $d\omega$  (рис. 1.1.7). Он равен

$$d\Phi = L \cos \theta ds d\omega, \quad (1.1.24)$$

где  $L$  — величина, называемая энергетической яркостью площадки;  $\theta$  — угол между нормалью к площадке и направлением распространения лучей. Пропорциональность потока  $\cos \theta$  подтверждается во многих случаях (черное тело, раскаленные твердые тела с шероховатой поверхностью, бумага,

снег...) и носит название закона Ламберта<sup>3)</sup>. Излучатели, удовлетворяющие этому закону, называются косинусоидальными. Многие самосветящиеся (люминесцирующие) и рассеивающие тела закону Ламберта не подчиняются. В этих случаях в формуле (1.1.24) нужно учитывать индикатрису излучения, т. е. зависимость яркости от углов  $\theta$  и  $\phi$ .

Из предыдущих формул находим

$$L = \frac{dI}{ds \cos \theta} = \frac{dI}{ds_n}, \quad (1.1.25)$$

и, следовательно, яркость равна силе излучения, испускаемого в нормальном направлении с единичной площадки. Она изменяется в  $\text{Вт} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$  или  $\text{эр} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . Как и прежде,

$$dL(\lambda) = L(\lambda) d\lambda, \quad L = \int_0^{\infty} L(\lambda) d\lambda, \quad (1.1.26)$$

$$L(v) = L(\lambda) c/v^2. \quad (1.1.27)$$

Нетрудно показать также, что для косинусоидальных источников

$$L = M/\pi, \quad M = kE, \quad L = kE/\pi, \quad (1.1.28)$$

причем коэффициент рассеяния (отражения)  $k$  всегда меньше или равен единице. Поверхность, для которой коэффициент  $k$  не зависит от углов  $\theta$  и  $\phi$ , называется идеальным излучателем. Такой случай встречается редко. Коэффициент  $k$  обычно зависит от  $\lambda$ . При этом

$$L(\lambda) = \frac{k(\lambda)}{\pi} E(\lambda), \quad L = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} k(\lambda) E(\lambda) d\lambda. \quad (1.1.29)$$

Так как значение  $k$  зависит от  $\lambda$ , то спектральный состав падающего и рассеянного света различен. Идеальным белым рассеивателем называется поверхность, для которой  $k = 1$ .

В формуле (1.1.24) величина  $d\Phi$  определяет поток энергии излучения, испускаемый площадкой  $ds$ , а величина  $L$  — яркость этой площадки. Формула (1.1.24) общепринята. Однако в фотометрической литературе понятие яркости используется и в другом смысле; ею характеризуется интенсивность светового пучка (световой трубы).

<sup>3)</sup> И. Г. Ламберт (1728—1777 гг.) — немецкий ученый. В 1760 г. вышел его фундаментальный труд «Фотометрия, или об измерениях и сравнениях света, цветов и теней», в котором заложены основы фотометрии. В нем Ламберт установил впервые главные понятия этой науки (сила света, яркость, освещенность) и ряд ее законов (автор закона Ламберта и соавтор закона Ламберта—Бугера). Кроме фотометрии Ламберт занимался теплопроводностью, пирометрией и отчасти математикой и астрономией.

В однородной среде свет распространяется внутри световой трубы по прямым линиям. Боковая поверхность трубы параллельна ее лучам. При отсутствии поглощения света поток  $\Delta\Phi$  в пределах трубы не изменяется.

В данном случае по-прежнему справедлива формула (1.1.24). Однако смысл ее сомножителей другой:  $d\Phi$  — поток энергии излучения от внешнего источника, проходящий через сечение световой трубы  $ds$ ,  $L$  — яркость потока. Яркость све-

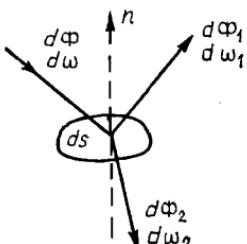


Рис. 1.1.8. Отражение и прохождение потока энергии излучения через плоскую границу двух прозрачных сред

тowego потока вдоль световой трубы сохраняется неизменной. Для любого сечения световой трубы справедлива формула (1.1.24).

Если пучок света исходит из площадки  $ds$  светящегося тела, то ее можно считать первым сечением световой трубы. Отсюда следует, что яркость светящейся площадки  $ds$  совпадает с яркостью возникающего светового пучка. Это строго справедливо только для прозрачных тел.

Сделаем одно важное замечание, которое послужит впоследствии основой интересного разговора — о возможном и невозможном в оптике. Сейчас это только прелюдия к решению большой проблемы. Пусть яркость пучка конечна. Если в этом случае лучи параллельны, т. е.  $d\omega=0$ , то значение  $d\Phi$  равно нулю: строго плоскопараллельный световой поток не несет никакой энергии. Странно, но факт. А ведь мы чаще всего говорим именно о плоской электромагнитной волне.

Рассмотрим, наконец, изменение яркости при прохождении светового потока через плоскую границу двух прозрачных тел. На рис. 1.1.8 изображен поток  $d\Phi$ , падающий на площадку  $ds$  в телесном угле  $d\omega$ , и два образующихся потока: отраженный поток в первой среде ( $d\Phi_1$ ,  $d\omega_1$ ) и поток, проникший во вторую среду ( $d\Phi_2$ ,  $d\omega_2$ ). Простой расчет показывает (см., например, [1]), что

$$L_2/L = (1-\rho) n_2^2/n_1^2,$$

где  $L$  и  $L_2$  — яркости падающего и прошедшего потоков,  $\rho$  — коэффициент отражения,  $n_2$  и  $n_1$  — показатели преломления второй и первой среды.

Величины  $L/n_1^2$  и  $L_2/n_2^2$  называют иногда приведенной яркостью пучков. Если  $\rho \ll 1$ , то приведенные яркости падающего и прошедшего света одинаковы.

Фотометрические величины, описанные выше, обычно связывают с вектором Умова—Пойнтинга, введенным этими учеными в волновой теории света. Как известно, вектор Умова—Пойнтинга

$$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} [\mathbf{EH}] \quad (1.1.30)$$

определяет энергию, переносимую электромагнитной волной через единичную площадку за время, равное 1 с. Сравнивая (1.1.30) с (1.1.6), получим

$$d\Phi = S_n ds, \quad (1.1.31)$$

где  $S_n$  — проекция вектора  $\mathbf{S}$  на нормаль к площадке  $ds$ . Из (1.1.18) и (1.1.31) следует, что нормальная составляющая вектора Умова—Пойнтинга  $S$  равна освещенности  $E$  площадки  $ds$ . Так как  $S \sim |E_0|^2$  ( $E_0$  — амплитуда напряженности электрического поля), то освещенность также пропорциональна  $E_0^2$ .

Как мы увидим в § 6, связь между фотометрическими величинами и величинами, определяемыми в электродинамике, проста только для плоских волн. В общем случае она весьма сложна и даже неоднозначна.

Удобные фотометрические характеристики поля излучения введены в обиход крупным ленинградским светотехником А. А. Гершуном в 1933 г.

Пространство, занятное излучением, говорил Гершун, можно рассмотреть как поле вектора  $\mathbf{S}$ . Зная значение  $\mathbf{S}$  в каждой точке пространства, можно найти все фотометрические характеристики. Если в пространстве имеется несколько источников света, то значение  $\mathbf{S}$  в данной точке будет равно векторной сумме значений  $\mathbf{S}$  от отдельных источников.

Мы не имеем возможности останавливаться на работах Гершуна более подробно<sup>4)</sup>. Приведем только очень наглядный рисунок, на котором изображены световые линии от двух точечных источников света разной интенсивности (рис. 1.1.9). Касательные к световым линиям определяют направление вектора  $\mathbf{S}$  в данной точке пространства, густота световых линий — величину  $S$ . Вид световых линий сложен. Он прост только для точечного источника в однородной среде. В этом источнике световые линии суть радиально расходящиеся прямые. Вместе с тем кривые рис. 1.1.9 действительно хорошо отображают свойства светового поля. Построение таких кривых сущест-

<sup>4)</sup> Желающим познакомиться с работами А. А. Гершуна (1903—1952 гг.) следует обратиться к литературе [5—9, 28]. Он внес фундаментальный вклад в развитие фотометрии и светотехники. А. А. Гершун скончался в своей лаборатории на рабочем месте.

венно при светотехническом расчете светового поля в разных помещениях.

**Поглощение света.** Рассмотрим поток монохроматического излучения частоты  $v$ , распространяющийся в среде, поглощающей свет. Допустим, что световая волна плоская. Уменьшение потока энергии излучения в плоскопараллельном слое толщиной  $dl$  найдем из формулы

$$d\Phi(v) = -k(v)\Phi(v)dl. \quad (1.1.32)$$

Величина  $k(v)$  носит название коэффициента поглощения. Размерность  $k(v)$  обратна длине. В технических расчетах в качестве единицы  $k$  обычно используют  $\text{м}^{-1}$ , в молекулярной физике и спектроскопии —  $\text{см}^{-1}$ .

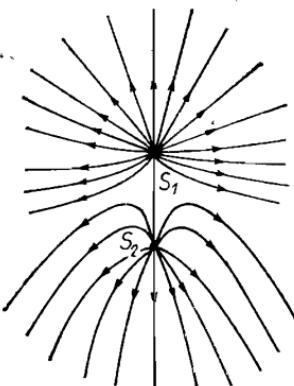


Рис. 1.1.9. Световое поле от двух источников света

Формула (1.1.32) выражает один из основных законов оптической науки и получила особое название дифференциального закона Бугера. Он известен уже более 250 лет [15] и, несмотря на свою простоту, характеризует основные особенности многих поглощающих сред.

До появления лазеров считали даже, не подчеркивая это специально, что коэффициент поглощения  $k(v)$  не зависит от интенсивности падающего излучения (т. е. от  $\Phi(v)$ ). Такое предположение хорошо оправдывалось экспериментально. В 20-е годы С. И. Вавилов выполнил ряд работ, направленных на поиск границ применимости этого предположения. Он хорошо понимал, что при некоторых достаточно больших значениях  $\Phi(v)$  коэффициент поглощения начнет уменьшаться. И тем не менее, несмотря на огромный диапазон изменений величины потока — от  $10^{-7}$  до  $10^8$  эрг·с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>, опыты дали отрицательный результат: коэффициент поглощения сохранялся неизменным [24]. Только спустя 10 лет В. Л. Левшину [25, 26] удалось найти вещества, для которых значение  $k(v)$  начинает изменяться даже при сравнительно небольших интенсивностях. Свойства этих веществ описываются трехуровневой схемой.

Проблема, поставленная тогда С. И. Вавиловым, была чрезвычайно важна; речь шла о границах применимости всей линейной оптики<sup>5)</sup>, т. е. той оптики, с которой до создания ла-

<sup>5)</sup> Такое сочетание слов (линейная оптика) в те годы еще не применялось. Оно вошло в обиход, когда появилась нелинейная оптика.

зеров повседневно встречались все исследователи и которая подтверждалась огромным множеством опытных фактов. С. И. Вавилов пришел к своим выводам, анализируя самую суть процесса поглощения, уменьшения числа частиц на нижнем уровне комбинирующей пары и накопления частиц на верхних уровнях. Его следует по праву считать основоположником нелинейной оптики, этого могучего здания, получившего свое основное развитие уже позже, в 60-е годы. Первые результаты были получены в школе Вавилова еще раньше, но только после лазерных источников света нелинейные явления стали проявляться, как говорят, на каждом шагу.

Проблемы нелинейной оптики будут рассмотрены особо. Здесь же допустим, что интенсивность света <sup>6)</sup> сравнительно невелика и коэффициент поглощения сохраняется постоянным.

Если  $k(v)$  не зависит от  $\Phi$ , то, интегрируя (1.1.32) по толщине поглощающего слоя от 0 до  $l$ , получаем

$$\Phi_l(v) = \Phi_0(v) e^{-k(v)l}. \quad (1.1.33)$$

Этот закон называется интегральным законом Бугера или просто законом Бугера [15]. Бугер открыл его в 1729 г. <sup>7)</sup> Согласно (1.1.33), по мере распространения монохроматического света в поглощающей однородной среде поток энергии излучения уменьшается экспоненциально. Величина  $k(v)l$ , встречающаяся нам впервые, получила специальное название — оптическая плотность. Ее обозначают иногда буквой  $D$ .

Еще раз подчеркнем, что нарушения закона Бугера возможны только в трех случаях: при немонохроматичности падающего излучения, при неоднородности среды ( $k(v)$  зависит от координаты  $l$ ) и, наконец, при зависимости  $k(v)$  от  $\Phi(v)$ .

Для немонохроматического света вместо (1.1.33) имеем

$$\Phi_l = \int_{v_1}^{v_2} \Phi(v) e^{-k(v)l} dv. \quad (1.1.34)$$

Зависимость  $\Phi_l$  от  $v$ , разумеется, неэкспоненциальна.

Для неоднородных сред формула (1.1.33) также трансформируется:

<sup>6)</sup> Мы иногда применяем слова «интенсивность излучения». Они в фотометрии точно не определены и могут означать и поток энергии излучения, и объемную плотность излучения, и силу света...

<sup>7)</sup> Французского ученого П. Бугера (1698—1758 гг.) можно назвать также родоначальником фотометрии. Он занимался многими проблемами (астрономия, геодезия, гидрография, гравиметрия, теория корабля), но главные его успехи достигнуты в оптике. Бугер установил понятие количества света, сконструировал фотометр и разработал методы измерения силы света. Но главное достижение Бугера — это закон (1.1.33).

$$\Phi_l = \Phi_0 e^{- \int_0^l k(v, z) dz} \quad (1.1.35)$$

В этом случае легко измерить только среднее значение коэффициента поглощения

$$\overline{k(v, l)} = \frac{1}{l} \int_0^l k(v, z) dz = \frac{1}{l} \ln \frac{\Phi_l}{\Phi_0} \quad (1.1.36)$$

Определение значения  $k(v, l)$  в каждой точке поглощающего слоя затруднительно, а иногда и вообще невозможно. Поэтому при изучении особенностей поглощения того или иного вещества всегда стараются работать с однородными средами, что, к сожалению, не всегда удается. Для мелкодисперсных рассеивающих сред необходимо пользоваться формулами (1.1.35) и (1.1.36).

Упомянем здесь еще о некоторых фотометрических терминах. Если в видимой области спектра показатель поглощения равен нулю или очень мал, то данное тело называется прозрачным. Это название условно и связано со спецификой зрения. Все вещества поглощают излучение, для прозрачных тел поглощение происходит в ультрафиолетовой и инфракрасной областях.

Вещества, у которых зависимость  $k(v)$  очень резка, называются селективно-поглощающими. Если же  $k$  практически не зависит от  $v$ , то говорят о сером, или нейтральном, поглотителе. Последние определения условны; для одной области спектра вещество может быть селективно-поглощающим, для другой — нейтральным.

Численные измерения коэффициента поглощения для разных сред и разных  $v$  проводятся в настоящее время в очень большом количестве; значения  $k$  и вид функций  $k(v)$  являются важнейшими спектроскопическими характеристиками вещества. Абсолютные значения  $k$  нужны для решения многих практических задач, связанных с расчетом освещенности тех или иных объектов. На экспериментальном изучении функции  $k(v)$  и интерпретации ее вида основана в значительной мере целая наука — спектроскопия. Вид функции  $k(v)$  нужно знать также в лазерной физике при поиске новых активных сред и расчете коэффициентов усиления.

Величина коэффициента поглощения варьирует в разных случаях в очень больших пределах. Если для воздуха  $k(v) \sim \sim 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ , для стекла в видимой области  $\sim 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ , то для металлов и растворов красителей значение  $k$  достигает  $\sim 10^4 \text{ см}^{-1}$ .

Поглощающую среду можно охарактеризовать также величиной пропускания света. Пропусканием называется отно-

шение потока, прошедшего слой толщины  $l$ , к падающему потоку. Согласно (1.1.33),

$$T(v) = \frac{\Phi_l(v)}{\Phi_0(v)} = e^{-k(v)l}. \quad (1.1.37)$$

Нетрудно получить аналогичные выражения для селективно-поглощающих и неоднородных сред.

До сих пор при рассмотрении свойств поглощающего слоя

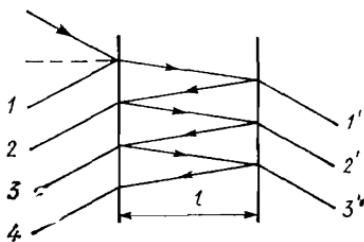


Рис. 1.1.10. Многократное отражение света от границ внутри плоскопараллельного слоя

мы не учитывали условия на границах. Это допустимо только при очень малых значениях коэффициента отражения. В общем случае учет отражения необходим. Действительно при наличии границы даже для малых коэффициентов отражения света  $\rho$  значение пропускания не будет описываться формулой (1.1.37). Вместо нее при малых  $\rho$  справедливо выражение

$$T(v) = \frac{\Phi_l(v)}{\Phi_0(v)} = (1-\rho)^2 e^{-k(v)l}. \quad (1.1.38)$$

Обосновать формулу (1.1.38) нетрудно. Рассмотрим слой толщиной  $l$ , находящийся в пустоте. Поток  $\Phi_0(v)$ , падающий на слой, частично отражается, частично проходит через границу. Отраженный поток равен  $\rho\Phi_0(v)$ , прошедший через границу —  $(1-\rho)\Phi_0(v)$ . До второй границы слоя доходит поток  $(1-\rho)\exp[-k(v)l]\Phi_0(v)$ , проходит через нее поток (1.1.38).

Учет условий на границе часто очень важен. Следует иметь в виду, что на опыте реально измеряется не сам коэффициент поглощения, а именно пропускание слоя  $T(v)$ . Поэтому переход от  $T(v)$  к  $k(v)$  должен быть точен. Иногда экспериментатор измеряет не пропускание слоя  $T(v)$ , а его полный коэффициент отражения  $R(v)$ . Зная  $R(v)$ , можно также определить  $k(v)$ .

Если значение  $\rho$  достаточно заметно (например,  $\rho \geq 0,1$ ), то формула (1.1.38) теряет силу. В этом случае надо учитывать многократное отражение света от границ внутри слоя. На рис. 1.1.10 приведена схема образующейся картины. Нужно только иметь в виду, что обычно свет падает на первую поверхность нормально и поэтому все лучи  $1, 2, 3, 4, \dots$  сливаются реально в один отраженный луч. То же самое происходит с лучами  $1', 2', 3', 4', \dots$  Они образуют проходящий луч.

Простой расчет показывает [26] <sup>8)</sup>, что

$$R(v) = \rho \left[ 1 + \frac{(1-\rho)^2 e^{-2k(v)t}}{1-\rho^2 e^{2k(v)t}} \right], \quad (1.1.39)$$

$$T(v) = \frac{(1-\rho)^2 e^{-k(v)t}}{1-\rho^2 e^{-2k(v)t}}. \quad (1.1.40)$$

Если  $\rho$  мало, то  $R = \rho$ , а формула (1.1.40) переходит в (1.1.38). При малых  $k(v)$ , т. е. для прозрачных тел, формулы (1.1.39), (1.1.40) упрощаются, причем  $R + T = 1$ . Если  $k(v)$  очень велико, то  $R = \rho$ ,  $T = 0$ .

Следует заметить, что в общем случае значение  $\rho$  неизвестно. Поэтому для определения двух неизвестных  $\rho$  и  $k(v)$  надо измерить одновременно  $R$  и  $T$ .

При экспериментальном определении коэффициента поглощения чаще всего делаются разные упрощающие предположения, используются разные схемы опыта, различные номограммы. Если значение  $k(v)$  определяется для растворов, то нужно учитывать зависимость величин  $T$  и  $R$  от коэффициентов отражения кювет, в которых они находятся.

Приборы, приспособленные для измерения значений  $k(v)$ , называются спектрометрами.

Читатель, наверно, заметил, что мы рассматривали здесь только один частный случай: падение плоских волн на плоско-параллельную пластинку. В действительности встречаются различные частные случаи. Однако если речь идет об измерении коэффициента поглощения  $k(v)$ , то схему опыта делают возможно проще. Именно поэтому всегда работают с плоскими волнами и плоскопараллельными слоями.

**Реабсорбция.** Во многих случаях испускание излучения следует относить не к поверхности, а к объему. Объемными источниками света являются газы, свечение различных дуг и искр... Это обстоятельство очень существенно и может заметно повлиять на энергетические и спектральные характеристики источника света.

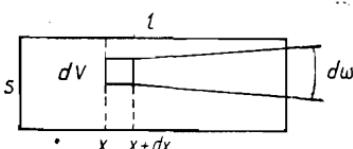


Рис. 1.1.11. К расчету излучения объемного источника света

На рис. 1.1.11 изображен объемный источник света. Его толщина равна  $l$ , площадь основания  $s$ . Поток излучения от элемента объема  $dV$  в интервале частот  $dv$

<sup>8)</sup> В [26] можно найти формулу для  $R$  и  $T$  при неперпендикулярном падении света на поглощающий слой, а также соответствующие формулы с учетом интерференционных явлений. Обычно для толстых и не строго параллельных слоев интерференцию учитывать не нужно.

$$d\Phi(v) = \frac{d\omega}{4\pi} F(v) ds_n dx, \quad (1.1.41)$$

где  $F(v)$  — коэффициент, который можно назвать спектральной плотностью мощности излучения единицы объема. Так как толщина источника конечна, то на пути от  $x$  до  $l$  поток  $d\Phi(v)$  будет поглощаться (или рассеиваться). Такое поглощение получило название самопоглощения, или реабсорбции.

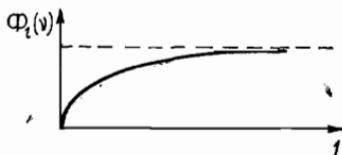


Рис. 1.1.12. Зависимость потока излучения, выходящего из объемного источника, от толщины слоя

Умножая (1.1.41) на  $\exp[-k(v)(l-x)]$ , интегрируя по всем  $x$  и производя несложные преобразования, получаем

$$\Phi_l(v) = \Phi_1(v) \frac{1 - e^{-k(v)l}}{k(v)}, \quad (1.1.42)$$

где  $\Phi_1(v)$  — поток от слоя единичной толщины.

На рис. 1.1.12 построен график зависимости  $\Phi_l$  от  $l$ . При малых  $l$  выходящий поток равен просто  $l\Phi_1(v)$ . По мере увеличения  $l$  темп роста  $\Phi_l(v)$  замедляется и при очень больших  $l$  выходящий поток перестает зависеть от толщины излучающего слоя. Работать со слишком толстыми источниками света ( $k(v)l \gg 1$ ) не имеет никакого смысла.

Особенно своеобразна зависимость  $\Phi_l(v)$  от частоты света  $v$ . Допустим, что в объеме  $dV$  испускается спектральная линия (полоса), контур которой изображен на рис. 1.1.13, а. Если при всех  $v$  значение  $k(v)l$  много меньше единицы, то контур линии, испускаемой всем объемом, совпадает с контуром линии, испускаемой объемом  $dV$ . В этом случае экспериментатор получает истинный спектральный контур испускания данного вещества. Если же  $k_{\max}(v)$  очень велико и, следовательно,  $k(v)l \gg 1$ , то будет наблюдаться картина, изображенная на рис. 1.1.13, б; в центре линии испускания будет провал. Для интервала частот, в котором значение  $k(v)$  велико, объемный источник света вообще не будет испускать излучения. В промежуточных случаях будет наблюдаться излучение,

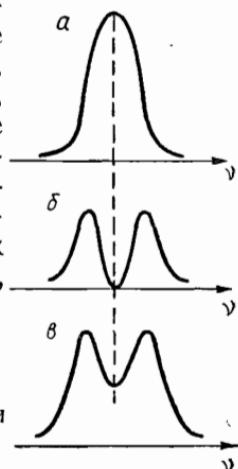


Рис. 1.1.13. Провал в спектральной линии при наличии реабсорбции

спектр которого представлен на рис. 1.1.13, в. На практике заметная реабсорбция встречается часто и переход от наблюдаемой спектральной зависимости потока  $\Phi_1(v)$  к истинному контуру линий, испускаемых элементарным объемом вещества, крайне затруднен.

Определению вида функции  $k(v)$  при наличии реабсорбции посвящено много работ. Однако решение такой задачи может интересовать только узкий круг специалистов, и мы на нем не останавливаемся.

**Закон Ламберта—Бера.** Во многих случаях коэффициент поглощения пропорционален числу поглощающих центров (атомов, молекул). При этом

$$k(v) = k^*(v) \cdot c, \quad (1.1.43)$$

где  $c$  — концентрация поглощающих частиц. Закон Бугера (1.1.33) переписывается в форме

$$\Phi_l(v) = \Phi_0(v) e^{-k^*(v)c l}, \quad (1.1.44)$$

подчеркивающей экспоненциальную зависимость  $\Phi_l$  от концентрации частиц  $c$ . Соотношение (1.1.44) получило название закона Ламберта — Бера. Ламберт в 1760 г. и почти через сто лет после него (1852 г.) Бер детально проверили эту зависимость.

Закон Ламберта — Бера во многих случаях справедлив и служит надежной основой для определения коэффициента  $k^*(v)$ ; построив экспериментальную зависимость  $\ln \Phi_l(v) / \Phi_0(v)$  от концентрации и определив наклон получающейся прямой, находят значение  $k^*(v)$ . С другой стороны, если величина  $k^*(v)$  известна из предыдущих опытов, то, измеряя  $\ln \Phi_l(v) / \Phi_0(v)$ , можно определить концентрацию. Коэффициент  $k^*(v)$  не имеет особого названия. Так как концентрация  $c$  измеряется в  $\text{м}^{-3}$  или  $\text{см}^{-3}$ , то он измеряется в  $\text{м}^2$  или  $\text{см}^2$ .

Формула (1.1.44) справедлива отнюдь не всегда. При больших концентрациях в веществе начинаются различные процессы. К ним относится, в частности, образование димеров, тримеров..., т. е. совсем других поглощающих центров. Нарушение закона Ламберта — Бера при больших концентрациях может быть связано также с возникновением качественно новых процессов, например, резонансной передачи энергии возбуждения от одной молекулы к другой.

## § 2. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ С УЧЕТОМ СВОЙСТВ ГЛАЗА

**Функция видности.** Фотометрические величины, рассмотренные выше, приведены в энергетических единицах. Они правильно характеризуют световой поток и создают основу для его измерения с помощью объективных приемников энергии.

Если же приемником излучения является глаз, а именно это осуществляется в нашей повседневной практике, то основные фотометрические величины не дают надежной информации о свойстве потока, падающего на глаз человека. Допустим, например, что яркость источника излучения очень высока, но оно принадлежит к ультрафиолетовой или инфракрасной областям. В этом случае глаз не получит никакого ощущения.

Для правильной характеристики того, что будет восприниматься глазом, необходимо ввести еще одно важное понятие — функцию видности. Она учитывает степень чувствительности глаза к свету разных длин волн. У разных людей эта чувствительность различна<sup>9)</sup>. Поэтому речь может идти о средней функции видности  $V(\lambda)$ <sup>10)</sup>.

Введем величину

$$d\Phi_V(\lambda) = V(\lambda) d\Phi(\lambda) = V(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda. \quad (1.2.1)$$

Она носит название светового потока (в отличие от  $\Phi(\lambda)$  — потока энергии излучения). Как всегда, можно ввести понятие интегрального светового потока

$$\Phi_V = \int_0^{\infty} V(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda. \quad (1.2.2)$$

В табл. 1.2.1 приведены значения функции видности  $V(\lambda)$  для дневного зрения. Значение  $V$  для  $\lambda = 555$  нм принято здесь за единицу. Ниже 400 нм и выше 700 нм значение  $V(\lambda)$  равно нулю, это излучение глаз не воспринимает. Вид функции видности для сумеречного периферического зрения  $V'(\lambda)$  (см. главу 2) приведен в той же таблице.

На рис. 1.2.1 функции  $V(\lambda)$  и  $V'(\lambda)$  изображены графически. Как видно из рисунка, кривые  $V(\lambda)$  и  $V'(\lambda)$  существенно различны. Ясно также, что поток энергии излучения и свето-

Т а б л и ц а 1.2.1. Стандартизованные значения функций видности  $V(\lambda)$  и  $V'(\lambda)$

$\lambda$ , нм	$V(\lambda)$	$V'(\lambda)$	$\lambda$ , нм	$V(\lambda)$	$V'(\lambda)$
420	0,004	0,097	560	0,995	0,329
440	0,023	0,328	580	0,870	0,121
460	0,060	0,567	600	0,631	0,033
480	0,139	0,783	620	0,381	0,0074
500	0,323	0,982	640	0,175	0,0045
520	0,710	0,935	660	0,061	0,0003
540	0,954	0,650	680	0,017	0,00001
555	1	0,405	700	0,004	0,0000

<sup>9)</sup> Например, дальтоники не воспринимают излучение больших диапазонов видимого спектра.

<sup>10)</sup> В литературе обычно приводятся данные о функции видности в шкале длин волн, а не в шкале частот.

вой поток очень сильно отличаются друг от друга<sup>11)</sup>. По аналогии можно ввести и остальные световые величины (светимость, освещенность, яркость, сила света).

При большой интенсивности излучения вид функции  $V(\lambda)$  зависит от мощности падающих потоков. Данные табл. 1.2.1 приведены для обычных освещенностей.

**Единицы измерения фотометрических величин.** Выше мы всякий раз отмечали размерность фотометрических величин.

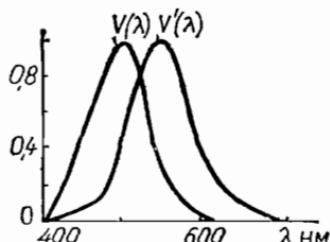


Рис. 1.2.1. Функции видности для дневного  $V'(\lambda)$  и сумеречного  $V(\lambda)$  зрения

Исходной единицей были джоуль и эрг. Однако для практических светотехнических целей это не всегда удобно. Трудно всякий раз производить точные измерения энергии. Поэтому в фотометрии используется специфическая световая система единиц, специально приспособленная для светотехники с учетом свойств глаза.

Исходной единицей стала единица силы света  $I_v$ . После 1960 г. специальным международным соглашением за единицу принята свеча. Она составляет  $1/60$  силы света, испускаемого с  $1 \text{ см}^2$  стандартного эталона по нормали к его поверхности [23].

Все остальные фотометрические (световые) величины можно выразить через свечу. В отличие от энергетических единиц они отмечены индексом  $v$ :

световой поток  $\Phi_v$  — люмен (Вт),

световая энергия  $Q_v$  — люмен · с (Дж),

сила света  $I_v$  — свеча = кандела ( $\text{Вт} \cdot \text{ср}^{-1}$ ),

освещенность  $E_v$  — люкс = люмен ·  $\text{м}^{-2}$  ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ),

светимость  $M_v$  — люкс ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ),

световая яркость  $L_v$  — нит = свеча ·  $\text{м}^{-2}$  ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ ).

В скобках приведены обычные энергетические единицы. Световую яркость часто измеряют в стиляхах ( $\text{св} \cdot \text{см}^{-2}$ ).

При переходе от световых единиц к энергетическим следует учитывать спектральный состав эталонного источника и функцию видности. Для узких спектральных интервалов справедливо соотношение

<sup>11)</sup> Именно поэтому в соответствии со стандартом [23] к определениям фотометрических величин мы добавляли слова «энергетическая» и «излучения» (поток излучения, сила излучения, энергетическая освещенность, энергетическая яркость).

$$\Phi_v = k \int V(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda, \quad (1.2.3)$$

где  $k$  — величина, имеющая размерность, соответствующую переходу от энергетических единиц к световым. В области наибольшей чувствительности глаза она равна  $\sim 680$  лм·Вт<sup>-1</sup>, и, следовательно, световому потоку в 1 лм соответствует мощность 0,0015 Вт.

Приведем в заключение некоторые численные значения освещенности и яркости для разных конкретных условий:

освещенность прямыми лучами Солнца (летом), лк	$\sim 10^5$
на открытом месте при сплошной облачности	$\sim 10^3$
днем в светлой комнате	$\sim 10^2$
освещенность, необходимая для чтения, лк	$\sim 30$
ночью при Луне	$\sim 0,25$
яркость светового пучка от Солнца, нит светового пучка от Луны	$\sim 1,5 \cdot 10^9$ , $\sim 4 \cdot 10^3$
светового пучка от нити электрической лампочки	$\sim 5 \cdot 10^6$
белой поверхности, освещенной прямыми лучами Солнца	$\sim 3 \cdot 10^4$

**Несколько слов об истории фотометрии.** Фотометрия стала развиваться поздно, когда многие закономерности геометрической оптики были уже хорошо известны. Геометрическая оптика была нужна людям для создания оптических приборов, расширения границ и дальности зрения, для решения проблем навигации и астрономии. Фотометрия как наука долгое время была неактуальна, так как существовавшие тогда источники света не могли подвергнуться количественной оценке. Керосиновые лампы появились лишь в XIX в., всего за 2—3 десятилетия до создания электрических ламп. А до этого искусственное освещение осуществлялось лучинами, факелами, свечками, плошками и лампадами.

Или еще несколько примеров. Ламповое стекло изобретено позже, чем ахроматические объективы. В XVII в. были уже микроскопы и телескопы, а улицы в городах не освещались.

Фотометрия зародилась для решения проблем астрономии. Во II в. до н. э. Гиппарх составил каталог звезд, разделяя их на шесть классов по блеску (яркости). Но в дальнейшем этот раздел науки развития не получил.

Одним из основоположников научной фотометрии следует считать Леонардо да Винчи (1452—1519 гг.). Он так много сделал для развития геометрической оптики, теории зрения, что не мог обойти проблемы измерения интенсивности света.

Какие-то элементы фотометрии были необходимы Леонардо да Винчи для живописи. Проблема теней и полутеней и вообще проблема освещения натуры была, разумеется, очень важна.

Франческо Мавролик (1494—1575 гг.) дал нарождающейся

фотометрии новые результаты. Но таково уж было средневековые, что публикация научных исследований была даже опасной. Первая часть его труда по оптике завершена к 1521 г., вторая — в 1554 г., но публикация была лишь через 36 лет после смерти Мавролика. Мавролик дал несколько примеров точной математической оценки освещенности объекта. У него есть, как это и полагалось в те времена, строгие определения, постулаты и теоремы. Но есть и ошибки.

Трудами И. Кеплера (1571—1630 гг.) развилась геометрическая оптика. Он создал много оригинальных оптических систем, разрабатывал такие тонкие проблемы, как качество оптического изображения, анализ и синтез оптических систем, сферическая аберрация и методы борьбы с ней. В области фотометрии Кеплер четко сформулировал положение: «Сила света расходящихся лучей убывает в обратных отношениях к воспринимающим поверхностям».

Медленно развивалась фотометрия. Ни Декарт, ни Гюйгенс, ни Ньютон не внесли ничего качественно нового. В 1700 г. Ф. Мари создает фотометрический метод гашения. Свет ослаблялся им в определенное число раз до порога зрительного восприятия. Зная это число, он судил об интенсивности света. Подобный метод измерения применяется и до сих пор.

Мы уже знаем закон Бугера (1.1.33), постоянно используемый во всей повседневной практике оптического эксперимента. Но роль Бугера в становлении фотометрии еще существеннее. В 1760 г. вышел в свет его «Оптический трактат о градации света» [15]. О широте обсуждаемых вопросов можно судить, посмотрев оглавление трактата. В сокращенном варианте оно имеет вид:

Книга I. РАЗЛИЧНЫЕ СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕТА И НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ЭТИХ СПОСОБОВ.

1. Обоснование понятий, приемов, инструментов.
2. Метод светового равновесия полей.
3. Изменение расстояний, применение линз.
4. Различие яркостей зависит от их отношения, а не абсолютного значения.
5. Яркость по диску Солнца.

Книга II. Исследование количества света, которое отражается поверхностями, как гладкими, так и шероховатыми.

1. Для астигматических пучков освещенность обратно пропорциональна произведению расстояний от меридионального и орбитального фокусов.
2. Определения и методы измерения коэффициентов отражения.
3. Гониофотометрия — (новый) раздел фотометрии, изучающий пространственное распределение яркости (т. е. индикатрисы испускания).

Книга III. Изыскания о прозрачности и непрозрачности тел.

Дальнейшее развитие фотометрии связано с именами Ламберта и Бера. Именно Бер провел (1852 г.) широкую экспериментальную проверку закона Ламберта—Бугера.

В последующее время фотометрия развивалась во многих

научных школах. В Государственном оптическом институте, организованном в 1918 г. в Ленинграде, почти сразу же был создан ряд лабораторий этого профиля, в том числе лаборатория фотометрии и лаборатория светотехники. Как мы уже отмечали, значительный вклад в теорию фотометрии внесен А. А. Гершуном [6, 8, 28, 47], а также М. М. Гуревичем [5, 9, 33, 49—51]. Фотометрическим проблемам посвящены важнейшие работы С. И. Вавилова [24, 27].

### § 3. ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

**Тепловые приемники излучения.** До настоящего времени разработано множество типов приемников излучения. Они отличаются друг от друга механизмом действия, чувствительностью, точностью, селективностью к длине волны излучения, степенью сложности устройства. Для различных экспериментов удобны различные приемники. Действие большинства приемников радиации косвенно, они измеряют не сам поток излучения в абсолютных единицах, а результат его воздействия на вещество. Поэтому обычные приемники излучения необходимо градуировать по излучению абсолютно-черного тела.

В дальнейшем мы дадим лишь краткую характеристику различных приемников, не останавливаясь на деталях их устройства. Более подробные сведения можно получить в уже цитированной литературе, а также в [27—41].

Широкое распространение получили тепловые приемники излучения. Они особенно удобны для измерений в инфракрасной области спектра. Принцип их действия прост: при поглощении светового потока происходит нагревание вещества. Ввиду этого измерение потока энергии излучения сводится к измерению температуры. Степень повышения температуры определяется в свою очередь путем измерения того или иного эффекта, зависящего от температуры. К ним относится тепловое расширение вещества, изменение его оптического сопротивления, испарение и т. д. Чаще всего эти эффекты линейно зависят от величины потока излучения, что облегчает градуировку приборов.

Если спектр поглощения нагреваемого вещества сплошной (коэффициент поглощения света слабо зависит от длины волны), то приемник неселективен, способен одинаково хорошо регистрировать излучение любого спектрального состава. Малая селективность достигается различными способами, в частности зачернением нагреваемой поверхности. В ряде случаев используют селективные приемники, способные регистрировать излучение только узкого спектрального диапазона.

В качестве приемника излучения, основанного на термическом расширении, часто применяют две тонкие полоски твердых веществ, обладающие разными коэффициентами теплового

го расширения и скрепленные вместе. При нагревании этот двухслойный приемник изгибаются, а измерение изгиба не вызывает затруднений.

Часто используется также ячейка Голея. В камере с каким-либо газом имеются два отверстия. В одном из них находится зачерненная мембрана, поглощающая падающий поток и постепенно нагревающая газ. Во втором отверстии камеры помещена тонкая мембрана с зеркальной наружной поверхностью. По мере нагрева газ расширяется, мембрана прогиба-

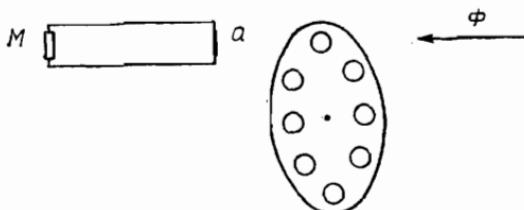


Рис. 1.3.1. Оптико-акустический приемник излучения

ется. Прогиб легко зарегистрировать по отклонению луча света, падающего на эту мембрану. Порог чувствительности приемника Голея очень мал, порядка  $5 \cdot 10^{-11}$  Вт.

Упомянем чуть подробнее об оптико-акустическом приемнике М. Л. Вейнгерова, предложенном в конце 30-х годов [29]<sup>12)</sup>. Его устройство изображено на рис. 1.3.1. Измеряемый поток излучения  $\Phi$  через окно  $a$  может попасть в камеру с поглощающим газом. На пути светового потока поставлен вращающийся диск с большим числом отверстий. Когда то или иное отверстие находится на пути потока, излучение проникает в камеру, свет поглощается, газ нагревается и, расширяясь, давит на мембрану  $M$ . Когда в следующий момент времени поток излучения прерывается, начинается обратный процесс: газ охлаждается и, следовательно, сжимается, мембрана стремится восстановить первоначальное положение. При быстром вращении диска возникает периодический процесс, мембрана начинает колебаться. При соответствующей скорости вращения появляются звуковые волны, легко воспринимаемые ухом. Разумеется, амплитуду и частоту колебаний мембранны лучше определять не ухом, а микрофоном с подачей сигнала на какую-либо проградуированную шкалу.

Оптико-акустический приемник используется чаще всего как селективный приемник, настроенный на частоту, соответ-

<sup>12)</sup> Автор делает это с особым удовольствием, так как создание нового приемника инфракрасного излучения (и одновременно отличного газоанализатора) проходило у него на глазах, в соседней комнате Государственного оптического института. В 1945 г. работы М. Л. Вейнгерова были удостоены Государственной премии СССР. Следует отметить, что работы Голея выполнены уже в послевоенный период.

ствующую полосе поглощения данного газа. Меняя газ, можно перестроить приемник на другую частоту.

Оптико-акустическую камеру легко использовать и для другой цели — для определения концентрации газа. При заданном значении потока  $\Phi$  интенсивность колебания мембраны зависит от числа молекул газа внутри камеры. Подробное освещение теории оптико-акустического газоанализатора можно найти в [40, 41]. Там же описаны методы применения спектрофона Вейнгерова для определения длительности возбужденного колебательного состояния молекул газа, находящегося в камере, а также для измерения вероятностей превращения колебательной энергии в тепло. Оптико-акустический приемник очень прост, весьма чувствителен и обладает широкими возможностями.

Измерительные приборы, основанные на термическом изменении электрического сопротивления  $R$ , называются болометрами. Основной элемент болометра — тонкая проводящая полоска. Свет, падающий на нее, поглощается, электрическое сопротивление  $R$  изменяется. Оно измеряется с высокой точностью в обычных электрических схемах. В качестве исходного материала для болометров используются металлы и некоторые полупроводники. Чувствительность полупроводниковых приемников выше, чем обычных болометров. Кроме того, ее можно повысить охлаждением. Особо высокая чувствительность достигается в сверхпроводниковых болометрах. В сверхпроводящем состоянии температурный коэффициент сопротивления очень велик.

Порог чувствительности обычных металлических болометров порядка  $10^{-10}$ — $10^{-8}$  Вт. Это, как правило, достаточно, так как при работе со спектрометрами, обладающими сравнительно высокой разрешающей силой, интенсивности излучения, падающего на приемник, находятся в интервале от  $5 \cdot 10^{-9}$  до  $5 \cdot 10^{-7}$  Вт.

Болометры применяются для измерения интенсивности излучения в видимой и особенно в инфракрасной области. Следует заметить, что развитие инфракрасной спектроскопии стало возможным именно благодаря применению болометров (1880 г.).

На практике часто используется еще один вид тепловых приемников излучения: термопара (рис. 1.3.2). Измеряемый световой поток падает на термопару — зачерненный спай двух проводников. При наличии излучения спай нагревается, по-

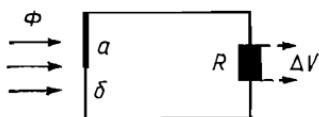


Рис. 1.3.2. Измерение световых потоков с помощью термопары

этому в цепи возникает разность потенциалов  $\Delta V$ . Как правило, для термопары используются проволочки, сильно различающиеся по своим термоэлектрическим свойствам. Площадь приемной поверхности обычно меньше 1  $\text{мм}^2$ . Для получения высокой чувствительности необходимо устраниć все бесполезные потери тепла; с этой целью термопару помещают в откачанные сосуды, окна которых прозрачны для исследуемой радиации. При работе в близкой инфракрасной области в качестве материала окон часто применяют флюорит, прозрачный до 9 мкм. Флюорит негигроскопичен. Если нужно работать в более далекой инфракрасной области, то входные окна приемника делаются из КВг.

Порог чувствительности термопар, так же как и болометров, ограничивается флуктуациями температуры их приемных элементов, иначе говоря, тепловым шумом. Для хороших термопар он равен  $\sim 5 \cdot 10^{-11}$  Вт.

Все тепловые приемники излучения обладают заметной инерционностью. Нагрев и последующее охлаждение осуществляются по законам

$$\Delta T = \frac{k\Phi}{\chi} [1 - e^{-t/\tau}], \quad (1.3.1)$$

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-t/\tau}. \quad (1.3.2)$$

В этих формулах  $k$  — коэффициент поглощения,  $\chi$  — коэффициент теплоотдачи,  $\tau = C/\chi$  — постоянная времени,  $C$  — теплопроводность приемника. Для различных типов приемников значение  $\tau$  различно. Чаще всего оно порядка миллисекунд. Из-за инерционности тепловых приемников они неприемлемы для измерения потоков, быстро изменяющих свою величину.

Краткий и достаточно полный обзор разного типа приемников излучения дан в работе [37].

**Фотоэлектрические приемники излучения.** Здесь мы перечислим лишь те фотоэлектрические устройства, которые специально приспособлены для измерения интенсивности излучения. Они называются фотоэлементами. Фотоэлементы обладают многими цennыми свойствами, удобны для практического применения и широко распространены.

Внешний фотоэффект наблюдается у металлов и некоторых полупроводников. При падении света на их поверхность какая-то доля падающего потока поглощается. Энергия поглощенного фотона  $h\nu$  передается электрону внутри металла; его кинетическая энергия увеличивается. Если она превысит работу выхода  $A$ , необходимую для преодоления потенциального барьера, то электрон вырывается из металла. Его кинетическая энергия вне металла

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2} + h\nu - A. \quad (1.3.3)$$

Здесь  $m$  — масса электрона,  $v_0$  — скорость электрона внутри металла до поглощения света. Энергия выходящих электронов линейно зависит от частоты падающего света, а их число — от числа падающих квантов, т. е. от интенсивности света. Явление фотоэффекта пороговое, при  $h\nu < A$  оно отсутствует.

Наличие порога фотоэффекта существенно затрудняет создание фотоэлементов для инфракрасной области спектра. Пороговые длины волн  $\lambda_0$  для Pt, Ni, Cu, Zn, Na, Cs соответ-

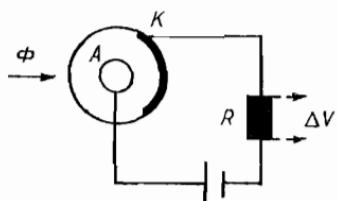


Рис. 1.3.3. Измерение световых потоков с помощью фотоэлемента

ственно равны (мкм): 0,19; 0,25; 0,30; 0,30; 0,60; 0,90. В последнее время для увеличения  $\lambda_0$  ведется поиск новых сред. Представляют интерес свинцовые соединения (PbS, PbSe, PbTe), антимониды индия (InSb), легированные германием и кремнием, окисел цезия. Для  $\text{Cs}_2\text{O}$  с избыточным металлическим цезием на серебряной подложке значение  $\lambda_0$  равно 1,3 мкм. Свинцовые соединения и антимонид индия позволяют выйти в более далекую инфракрасную область.

Устройство фотоэлемента несложно (рис. 1.3.3). Он состоит из вакуумной колбы, на одну из стенок которой нанесен светочувствительный слой  $K$  (фотокатод). Внутри колбы помещен анод  $A$ . До освещения фотокатода тока в цепи нет, он появляется при освещении. При неизменном значении потока  $\Phi$  ток  $i$  зависит от разности потенциалов между анодом и катодом. По мере ее увеличения наступает насыщение. Значение  $\Phi$  измеряют обычно в условиях насыщения. Это проще. Величина тока измеряется обычными методами и дает надежную информацию о величине падающего потока.

Пусть  $N$  — число падающих фотонов,  $n$  — число выходящих электронов. Величина

$$\eta = n/N \quad (1.3.4)$$

называется квантовым выходом фотоэффекта. Значение  $\eta$  для разных материалов, разумеется, различно. Если  $v < v_0$ , где  $v_0$  — частота, соответствующая границе фотоэффекта, то  $\eta = 0$ . При увеличении частоты  $v$  значение  $\eta$  повышается. Зависимость  $\eta$  от  $v$  может иметь максимумы. Если максимум острый, то фотоэлемент селективен, настроен на определенную длину волн.

Для чистых металлов значение  $\eta$  в видимой и ближней ультрафиолетовой областях порядка 0,01. В области короткого

ультрафиолета  $\eta \sim 0,2$ . Для комбинированных, специально подобранных фотокатодов значение квантового выхода более высоко. Для сурьмяно-цеизиевого фотокатода (в области 450 нм) оно равно 0,20—0,30.

Если поток  $\Phi_v$  монохроматичен, то

$$n = \frac{\eta(v)}{hv} \Phi_v. \quad (1.3.5)$$

Фототок в цепи фотоэлемента

$$i = en = \eta(v) \frac{e}{hv} \Phi_v = S(v) \Phi_v. \quad (1.3.6)$$

Для монохроматической радиации зависимость  $i$  от потока энергии линейна.

Величина  $S(v)$  называется спектральной чувствительностью фотокатода. Если функция  $S(v)$  известна, то, измерив силу тока, находят значение  $\Phi_v$ . Вид функции  $S(v)$  для каждого фотокатода надо определять предварительно градуировкой по абсолютному эталону. В качестве эталона используется обычно черное тело.

Если на фотоэлемент падает свет сложного спектрального состава, то вместо (1.3.6) имеем

$$i = \int_0^{\infty} S(v) \Phi(v) dv. \quad (1.3.7)$$

Отношение  $i/\Phi$ , где  $\Phi = \int \Phi(v) dv$ , называется интегральной чувствительностью катода. Оно сильно зависит от спектрального состава измеряемой радиации.

В табл. 1.3.1 приведены некоторые данные о трех распространенных фотоэлементах. Во всех фотоэлементах существует темновой ток, т. е. ток при  $\Phi=0$ . Он возникает из-за термоэмиссии с катода. Наличие темнового тока мешает измерению очень слабых потоков.

Постоянная времени фотоэлемента зависит от времени проleta электронов от катода до анода. Оно равно обычно 3—5 нс.

Остановимся теперь на фотоэлементах, основанных на внутреннем фотоэффекте. Фотоэлементы такого типа называ-

Таблица 1.3.1. Техническая характеристика фотокатодов

Фотокатод	Область чувствительности, нм	$i/\Phi$ , мкА/лм
Ag—O—Cs	400—1100	10—25
Sb—Cs	215—600	70—130
Bi—Ag—O—Cs	400—750	40—130

ются фотосопротивлениями или фоторезисторами. Внутренний фотоэффект характерен для полупроводников. До освещения полупроводниковые материалы не проводят электрический ток; подавляющее большинство электронов находится в валентной зоне. При освещении полупроводника светом частоты  $v > v_0$  ( $v_0$  — частота, определяемая энергетическим расстоянием между зоной проводимости и валентной зоной) часть электронов переходит в зону проводимости. Число переходов зависит от величины падающего потока излучения  $\Phi$ . Под действием внешнего напряжения  $E$  электроны, находящиеся в зоне проводимости, способны перемещаться от катода к аноду, в результате возникает ток проводимости. Измеряя величину этого тока, можно определить  $\Phi$ .

Фотосопротивления изготавливаются просто. Тонкий слой полупроводника наносится на диэлектрическую подложку. К концам полупроводника подводятся электроды. Сила тока измеряется обычными чувствительными методами. Наиболее употребительны следующие полупроводниковые соединения:  $\text{PbTe}$ ,  $\text{Bi}_2\text{S}$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{InSb}$ ,  $\text{PbS}$ ,  $\text{PbSe}$ , а также  $\text{Se}$  и  $\text{Ge}$  с примесями  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$  и других металлов.

В общей форме можно записать

$$i = E(\sigma_{\text{темн}} + \beta\Phi) \quad (1.3.8)$$

Темновой ток отсутствует только при  $T=0$ . При  $T>0$  в зоне проводимости всегда имеется небольшое число электронов. Параметр  $\beta$  в (1.3.8) не постоянен, а зависит от  $\Phi$ . Поэтому в этих фотоэлементах значение  $i$  зависит от  $\Phi$  нелинейно; как и прежде, необходима градуировка.

Для многих полупроводников значение  $h\nu_0 \sim 1-2$  эВ. Это соответствует длинам волн от 600 до 1200 нм. Однако длины регистрируемых волн можно существенно увеличить, если воспользоваться примесными полупроводниками. Благодаря наличию примесных уровней будут поглощаться кванты света меньших частот. Например, для чистого кремния  $h\nu_0 = 1,05$  эВ. При наличии примесей  $\text{Al}$ ,  $\text{P}$  пороговое значение  $h\nu_0$  снижается до 0,067, 0,046 эВ соответственно. Для чистого германия  $h\nu_0 = 0,62$  эВ, а с примесями  $\text{Zn}$  или  $\text{Cu}$  — 0,099 и 0,040 эВ. Как мы уже отмечали, многие примесные полупроводники ( $\text{PbSe}$ ,  $\text{PbTe}$ ) способны регистрировать инфракрасное излучение 5—6 мкм. Германиевые полупроводники способны регистрировать и более высокие значения длин волн.

Интегральная чувствительность фотосопротивлений весьма велика (для  $\text{CdSe}$  порядка  $12000 \text{ мкА} \cdot \text{лм}^{-1}$ ). Имеется спектральная зависимость, специфическая для каждого полупроводника. Фотосопротивления, как правило, селективны. Постоянная времени фотосопротивлений определяется вероятностями перехода между зонами или примесными уровнями. Ее значение порядка  $10^{-5}-10^{-3}$  с. Понижение температуры умень-

шает темновой ток и способствует увеличению чувствительности и точности измерений. Для регистрации очень слабых потоков иногда работают при гелиевых температурах.

Более подробные сведения о фотосопротивлениях для инфракрасной области спектра можно найти в [37]. Непрерывное совершенствование фотосопротивлений позволяет разрешать многие проблемы инфракрасной техники. Стоит упомянуть о возникновении нового, весьма эффективного научного направления — диодной лазерной спектроскопии<sup>13)</sup>.

**Усилительные системы.** Для измерения особо слабых потоков в настоящее время применяются различные схемы усиления фототоков.

Физики сороковых годов хорошо помнят появление трубок ленинградского ученого Г. А. Кубецкого, впоследствии названных фотоумножителями. Они резко увеличили возможности экспериментальной техники, удивили очень многих. Их практическое применение оказало заметное влияние на дальнейшее развитие как оптики, так и электроники.

Действие фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) основано на вторичной электронной эмиссии. При падении пучка электронов на металлическую поверхность из нее выбивается поток вторичных электронов. Ток насыщения, образованный движением выбиваемых электронов, равен

$$i = \sigma i_0, \quad (1.3.9)$$

где  $i_0$  — ток, связанный с движением первичных электронов,  $\sigma$  — коэффициент вторичной эмиссии. Для ряда металлов  $\sigma > 1$ . В этом случае возникает усиление тока. Значение  $\sigma$  зависит от типа поверхности, скорости первичных электронов и угла падения.

Схема простейшего фотоэлектронного умножителя изображена на рис. 1.3.4. В вакуумной трубке находится фотокатод  $K$ . Образовавшиеся электроны попадают на положительно за-

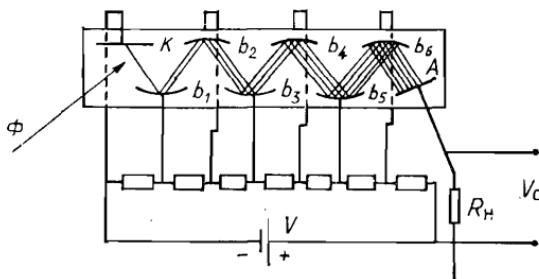


Рис. 1.3.4. Фотоэлектронный усилитель

<sup>13)</sup> В 1985 г. авторы этой работы Л. Н. Курбатов, А. П. Шахов и др. были удостоены Государственной премии СССР.

ряженный электрод  $b_1$ . Возникает вторичная эмиссия, причем при  $\sigma > 1$  число электронов, вылетающих из электрода  $b_1$ , становится больше. От электрода  $b_1$  под действием электрического поля эти электроны попадают на положительно заряженный электрод  $b_2$  и по пути ускоряются. На электроде  $b_2$  образуются новые вторичные электроны, которые вновь ускоряются. На последнем этапе они попадают на анод  $A$ . Сила возникшего тока измеряется обычными методами. Чаще всего определяется разность потенциалов на краях разгрузочного сопротивления  $R$ . Электроды  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3, \dots$  называются динодами. Они имеют ковшобразную форму, что позволяет фокусировать электроны, направляющиеся к следующему диноду.

Если общее число динодов равно  $p$ , то анодный ток равен

$$i = i_0 \sigma^p. \quad (1.3.10)$$

Так как значение  $p$  достаточно велико (15—20), то усиление может быть больше  $10^{10}$ . Зная  $i$  и коэффициент пропорциональности  $\alpha$  в формуле  $i = \alpha \Phi$ , можно найти  $\Phi$ . При больших значениях  $\Phi$  параметр  $\alpha$  также начинает зависеть от  $\Phi$ . Чувствительность ФЭУ очень высока. Наименьшие регистрируемые потоки (для лучших ФЭУ) порядка  $1.5 \cdot 10^{-15}$  Вт. Если поток равен одному люмену, то возникает ток порядка 100 А. Это означает, что интегральная чувствительность ФЭУ в десятки и сотни тысяч раз больше чувствительности обычного фотокатода. Так как значение  $i$  очень резко зависит от  $\Phi$ , приборы ФЭУ пригодны для регистрации быстропеременных потоков.

Более подробные сведения о параметрах различных ФЭУ можно найти в специальной литературе [34, 35].

В принципе внутреннее усиление в ФЭУ может быть столь велико, что один электрон, выбитый фотоном из катода, образует на выходе ФЭУ импульс тока, достаточный для регистрации. Однако наряду с фотоэлектронами в прикатодной области случайным образом возникают группы электронов, которые также усиливаются и дают на выходе ФЭУ шумовые импульсы тока. В связи с этим были разработаны специальные методы отбора ФЭУ для работы в режиме счета отдельных фотоэлектронов, а также методы дискриминации (разделения) сигнальных и шумовых импульсов фототока (см., например, монографии [31]).

Такой режим использования ФЭУ важен не только для достижения чрезвычайно высокой чувствительности регистрации интенсивности излучения (при небольшом охлаждении для уменьшения числа шумовых импульсов удается регистрировать слабые световые потоки в десятки и единицы квантов в секунду), но и в не меньшей степени — для измерения времен затухания (разгорания) свечения. Общепризнанных успехов в этом направлении кинетической спектрофотометрии достиг коллектив Научно-исследовательского института прикладных

физических проблем им. А. Н. Севченко [31]. Здесь же получен счет отдельных фотонов на полупроводниковых структурах, отличающихся от ФЭУ значительно более высокими эксплуатационными параметрами [38].

На практике используются также другие типы усилителей. Они основаны на тех или иных оптических явлениях. К ним относится, например, электронно-оптический преобразователь — прибор для усиления изображений или преобразования спектрального состава излучения. В последние годы в оптике и особенно в радиофизике начали широко применяться прямые оптические методы усиления излучения, основанные на вынужденном испускании, на законах квантовой электроники.

**Фотографическая пластиинка.** Мерой световой радиации может служить также количество вещества, образовавшегося в результате осуществления той или иной фотохимической реакции. Этот способ чрезвычайно удобен и широко применяется в фотометрии. Важнейшая особенность таких приемников — способность измерять крайне слабые световые потоки. Увеличивая время освещения (экспозиции), можно получить заметное количество продукта фотохимического процесса. Фотоэмульсия — это единственный приемник, аккумулирующий долговременное световое воздействие.

Фотографическая фотометрия уже давно применяется на практике для получения изображений предметов. Она очень удобна также для спектроскопических исследований. В этом случае удается сразу же получить сведения о распределении интенсивности излучения по всему спектру исследуемой радиации; после прохождения через спектральный прибор на фотопластиинке (или пленке) регистрируется одновременно множество отдельных линий. Положение линий определяется длиной волны, а почернение пластиинки — их интенсивностью.

Основной светочувствительный материал, применяемый в фотографии, — бромистое серебро. Оно равномерно распределяется в слое желатины. (В последнее время в связи с острым дефицитом серебра ведутся активные поиски новых светочувствительных материалов, которые позволят создать «бессебрянную фотографию».) При поглощении света молекула  $\text{AgBr}$  разлагается. В результате реакции в эмульсии появляются атомы серебра, которые и образуют скрытое фотографическое изображение. Оно становится видимым после проявления и фиксации освещенного слоя.

Под действием проявляющих веществ кристаллы галоидного серебра, содержащие центры скрытого изображения, в течение нескольких минут восстанавливаются до металлического серебра. Кристаллы, на которые свет не подействовал, восстанавливаются медленно. Их небольшая часть все же восстанавливается и создает слабое почернение всего фотослоя (т. е. вуаль, хорошо знакомую тем, кто занимался фотографи-

фией, и даже тем, кто просто рассматривал любые фотографии). После проявления все невосстановившееся бромистое серебро нужно удалить из эмульсии. Это достигается фиксацией, т. е. растворением бромистого серебра в фиксаже и промыванием образовавшегося слоя водой.

Фотографическое изображение всегда имеет зернистую структуру, что связано с исходной структурой эмульсии. Высокочувствительные эмульсии имеют крупное зерно, малочувствительные — мелкое. Чем мельче зерно эмульсии, тем выше при прочих равных условиях качество изображения, тем лучше выявляются его отдельные детали.

Как мы уже заметили, фотографическая пластина регистрирует не освещенность  $E$ , а произведение  $H = Et$ , где  $t$  — время экспозиции. Величина  $H$  имеет специальное название — количество освещенности. Именно это свойство фотографического приемника обеспечивает ему своеобразные преимущества перед другими типами приемников. Существенно также еще одно положительное свойство фотографического слоя — почернение слоя, вызванное светом, сохраняется долгое время практически без изменений. Заснятая и обработанная фотопластина может служить длительное время документом, обеспечивающим сохранность полученной информации.

В последнее время в связи с повышением чувствительности фотоэлектрических и тепловых приемников света фотографические слои применяются в научных исследованиях значительно реже. Это связано и с экономией времени, необходимого для проведения измерения, и с повышением точности самих измерений. Данное положение можно проиллюстрировать, например, развитием спектрального анализа. Еще недавно в спектральном анализе использовались главным образом фотографические методы (для качественного и полуколичественного анализа — визуальные методы). В настоящее время все более широкое распространение получают квантметры, т. е. измерительные приборы, основанные на фотоэлектрических эффектах. Это резко ускоряет анализ. Квантметры стали основным прибором в спектральных лабораториях, в которых необходимы массовые анализы.

Точность измерений с помощью фотослоя невысока. Свойства слоя существенно зависят от метода его изготовления. Степень почернения зависит также от способа проявления, который трудно стандартизировать. Результат проявления зависит от состава проявителя, температуры, времени проявления. Качество фотослоя зависит также от длительности его хранения.

Несмотря на все очевидные недостатки фотографических методов измерения световых потоков, они все еще широко применяются на практике. Это связано с разработкой специальных методов градуировки каждой отдельной пластиинки.

После проявления отдельные точки фотослоя имеют разное почернение. Прозрачность этих точек равна

$$T = \Phi / \Phi_0, \quad (1.3.11)$$

где  $\Phi_0$  — световой поток, падающий на пластиинку, а  $\Phi$  — поток, прошедший через нее. В различных точках слоя значения  $\Phi$  и  $T$  разные.

Оптической плотностью почернения названа в этом случае величина

$$D = \lg \frac{1}{T} = \lg \frac{\Phi_0}{\Phi}, \quad (1.3.12)$$

где  $\lg$  — десятичный логарифм. Зависимость оптической плотности почернения (иногда говорят короче — зависимость почернения) от количества освещенности  $H$  изображена на рис. 1.3.5. Вид кривой достаточно сложен и для каждого отдельного фотослоя специфичен; поэтому она называется характеристической кривой данного фотослоя. Характеристическая кривая слоя должна быть построена предварительно из независимых измерений с помощью соответствующих эталонных источников света.

Характеристическая кривая состоит из трех частей. Участок  $BC$  кривой линеен:

$$D = \gamma (\lg H - \lg H_i) = \gamma \lg H - i. \quad (1.3.13)$$

Смысл величины  $H_i$  ясен из рисунка, величина  $i$  равна  $\gamma \lg H_i$ . Постоянная  $\gamma = \operatorname{tg} \alpha$  называется коэффициентом контрастности фотослоя. Чем больше изменение  $D$  при изменении  $H$ , тем он контрастнее.

Линейный участок характеристической кривой назван областью нормальных почернений или нормальных экспозиций. Отрезок  $BC$  на оси абсцисс характеризует величину области линейной зависимости кривой. Участок  $AB$  — это так называемая область недодержек, участок  $CD$  — область передержек. Для определения значений  $D$  удобнее всего работать в области линейной зависимости  $D$  от  $\lg H$ ; однако часто приходится работать и в области недодержек (когда измеренные значения  $\Phi$  очень близки к  $\Phi_0$ ). Участок насыщения фотослоя

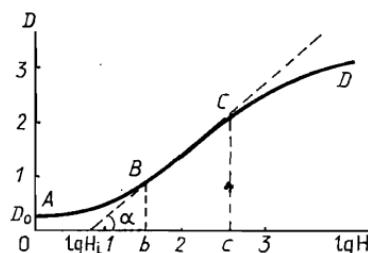


Рис. 1.3.5. Характеристическая кривая фотослоя

$CD$  для работы непригоден, так как большому изменению значений  $\lg H$  соответствуют слишком малые изменения оптической плотности  $D$ .

К сожалению, форма характеристических кривых зависит не только от величины  $H=Et$ , но и от  $E$  и  $t$  в отдельности. Если при двух разных временах экспозиции  $E_1t_1=E_2t_2$ , то равенства почернений в общем случае не будет. Поэтому на практике строят два типа характеристических кривых: зависимости  $D$  от освещенности  $E$  и зависимости  $D$  от времени освещения  $t$  при постоянном значении освещенности  $E$ . В эксперименте обнаруживаются отступления от формулы (1.3.13). Более точная формула имеет вид

$$D=\lg [cE^{\gamma} t^{\gamma'}], \quad (1.3.13')$$

где  $c$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma'$  — соответствующие постоянные.

Из (1.3.13') следует, что равные почернения  $D$  при двух разных освещенностях  $E_1$  и  $E_2$  будут получены, если значения  $t_2$  и  $t_1$  связаны между собой соотношением

$$(t_2/t_1)^P=E_1/E_2, \quad (1.3.14)$$

где  $P=\gamma'/\gamma$ . Коэффициент  $P$  носит название коэффициента Шварцшильда<sup>14)</sup>. Для обычных пластинок он несколько меньше единицы.

Светочувствительностью фотослоя по ГОСТу называется величина

$$S=1/H_{\text{кр}}. \quad (1.3.15)$$

Здесь  $H_{\text{кр}}$  — количество освещенности в лк·с, соответствующее ординате  $D_0+0,2$ , т. е. ординате, лежащей на 0,2 выше плотности вуали.

До сих пор мы говорили об интегральных характеристиках фотослоя. Они справедливы при освещении фотослоя белым светом и могут применяться приближенно для обычной черно-белой фотографии. В спектроскопии фотослой освещается обычно узкими (или не очень широкими) спектральными линиями. В этом случае надо знать зависимость контрастности  $\gamma$  и чувствительности  $S$  от длины волны  $\lambda$ . Зависимость  $\lg S$  для обычных бромосеребряных пластинок от  $\lambda$  изображена кривой 1 на рис. 1.3.6. Максимум чувствительности приходится на синюю область спектра ( $\lambda \sim 430$  нм). Ультрафиолетовое излучение хорошо регистрируется таким фотослойем, видимая область значительно хуже, инфракрасная область вообще не регистрируется. Чтобы увеличить чувствительность фотопластинок в видимой области и продвинуться в инфракрасную

<sup>14)</sup> Карл Шварцшильд (1873—1916 гг.) — немецкий астроном и физик. Заложил основы точной фотографической фотометрии, разработал (1906 г.) теорию лучистого равновесия звезд. Известен также своими работами в общей теории относительности и квантовой теории эффекта Штарка.

область, пластиинки сенсибилизируются, при этом в желатину добавляют различные красители, поглощающие свет в этих областях спектра. Исследуемое излучение поглощается красителем, а затем энергия возбуждения неоптическими путями передается кристаллам бромистого серебра. В результате происходит разложение молекулы  $\text{AgBr}$  и образование скрытого изображения.

Кривая 2 на рис. 1.3.6 характеризует зависимость  $S(\lambda)$  для

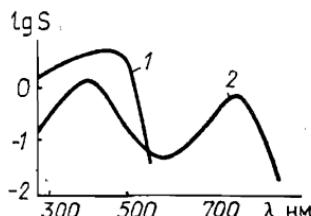


Рис. 1.3.6. Спектральная зависимость фоточувствительности слоя

панхроматических пластиинок, сенсибилизованных для красной области спектра. Возможно изготовление фотослоев, чувствительных в инфракрасной области спектра вплоть до  $\lambda = 1,2$  мкм. Для регистрации излучения больших длин волн фотослои непригодны. В этих случаях надо переходить на другие типы приемников радиации.

Несколько слов о методе градуировки фотослоев, т. е. о методах построения характеристической кривой. На фотослой наносятся марки почернения. Для этой цели обычно применяют ступенчатые ослабители, состоящие из ряда полосок с известным пропусканием. Они освещаются равномерным потоком. На фотослой, находящемся позади ослабителей, возникают соответствующие полоски почернения (спектроскописты говорят — марки почернения). Измеряя плотность образовавшихся почернений и зная пропускание всех полосок фильтра, строят характеристические кривые.

Более подробное описание свойств фотопластиинок как приемников радиации можно найти в литературе. Для начала целесообразно воспользоваться книгами С. Э. Фриша и В. К. Прокофьева [39]. Они содержат ценную информацию и вместе с тем достаточно кратки.

#### § 4. АБСОЛЮТНО ЧЕРНОЕ ТЕЛО

**Постановка задачи.** При фотометрических измерениях мы всегда пользуемся теми или иными источниками света. Механизм их действия самый различный. Описанию некоторых конкретных источников света, применяемых в фотометрии и спектрофотометрии, будет посвящен § 5. Это чаще всего тепловые источники света (нагретые тела). Источниками света

могут быть также газоразрядные лампы, люминесцирующие и фосфоресцирующие тела. В последние годы в качестве источников света, применяемых в научных исследованиях, все чаще используются лазеры.

Во всех случаях мы должны знать интенсивность свечения источников света и распределения их интенсивности по спектру. Для строго количественных измерений необходимы точные значения светимостей, выраженные в стандартных энергетических единицах.

Решение поставленной задачи непросто. Каждый конкретный источник света нужно сравнивать в принципе с каким-то надежным эталоном. Необходима градуировка. Кстати сказать, градуировке подлежат и все приемники радиации. Нужно знать, какому световому потоку, падающему на приемник, соответствует то или иное показание его регистрирующего устройства.

Для градуировки всех спектральных приборов нужен источник света с точно известной светимостью. Появление такого источника стало возможным только на основе работ Кирхгофа и Планка, когда было создано абсолютно черное тело.

**Закон Кирхгофа.** Как известно, закон Кирхгофа характеризует поглощение и испускание тел при термодинамическом равновесии. Открытие этого закона сыграло огромную роль в развитии многих разделов оптики и, разумеется, термодинамики. После формулировки закона Кирхгофа началось развитие нового направления науки — термодинамики лучистой энергии.

Световой поток, падающий в вакууме на площадку  $ds$  данного тела в телесном угле  $d\omega$  и в интервале частот  $dv$ , равен

$$d\Phi_v = f_v \cos \theta ds d\omega dv, \quad (1.4.1)$$

где  $f_v$  — спектральная плотность яркости потока, а  $\theta$  — угол между направлением потока и нормалью к площадке. Часть этого потока

$$d\Phi_v^{\text{погл}} = A_v d\Phi_v \quad (1.4.2)$$

поглощается телом, часть  $d\Phi_v^{\text{отр}} = R_v d\Phi_v$  отражается и рассеивается им, остальная часть  $d\Phi_v^{\text{проп}} = P_v d\Phi_v$  проходит внутрь тела и затем после многократных отражений на стенах выходит из него в различных точках поверхности и в различных направлениях. Величина  $A_v$  называется обычно поглощающей способностью данной площадки тела, величины  $R_v$  и  $P_v$  — соответственно ее отражением и пропусканием. Все эти величины зависят от местоположения площадки  $ds$  и от направления угла падения света на нее.

Значения  $A_v$ ,  $R_v$  и  $P_v$  связаны между собой соотношением

$$A_v + R_v + P_v = 1. \quad (1.4.3)$$

Смысл (1.4.3) очевиден: падающий поток либо поглощается телом, либо отражается от него и рассеивается им, либо проходит сквозь него. Величины  $A_v$ ,  $R_v$ ,  $P_v$  безразмерны.

В направлении, противоположном падающему потоку (1.4.1), площадка  $ds$  данного тела испускает поток

$$d\Phi_v^{\text{исп}} = L_v \cos \theta ds d\omega dv. \quad (1.4.4)$$

Величина  $L_v$  называется спектральной яркостью поверхности тела или иногда ее испускательной способностью<sup>15)</sup>. Чтобы не было недоразумений, следует подчеркнуть, что величина  $d\Phi_v^{\text{исп}}$  включает в себя только ту энергию, которая действительно испущена телом. В нее нельзя включать энергию, распространяющуюся в том же направлении после отражения и рассеяния других внешних потоков, а также энергию, пропущенную телом.

Кирхгоф детально рассмотрел термодинамическое равновесие вещества и излучения. При таком равновесии испускание света каким-либо телом полностью компенсируется поглощением окружающего равновесного излучения, падающего на это тело извне. Именно поэтому температура тела, взаимодействующего с излучением, не изменяется, именно поэтому наступает термодинамическое равновесие.

Как известно из термодинамики, при наличии термодинамического равновесия соблюдается принцип детального равновесия. Это означает, что внутри замкнутой системы существует полная компенсация противоположных процессов по всем возможным каналам. Если, например, происходит реакция химического разложения, то она полностью компенсируется соответствующей реакцией соединения частиц. Точно так же уравновешиваются все другие прямые и обратные процессы, в том числе поглощение и испускание света любым конкретным телом. До Кирхгофа такая точка зрения не высказывалась.

Таким образом, непосредственно из термодинамики следует

$$d\Phi_v^{\text{исп}} = d\Phi_v^{\text{погл}}. \quad (1.4.5)$$

Учитывая (1.4.1), (1.4.2) и (1.4.4), получим

$$L_v/A_v = f_v. \quad (1.4.6)$$

Состояние термодинамического равновесия всегда характеризуется некоторой температурой. Ранее, до Кирхгофа, понятия температуры относили только к телам (системам), взаимодействующим друг с другом и обменивающимся энергией.

<sup>15)</sup> Как мы видели в § 1, в ГОСТе одно и то же обозначение  $L$  используется и для яркости площадки  $ds$  и для яркости потока, падающего на нее. При формулировке закона Кирхгофа это очень неудобно. В результате мы вынуждены здесь обозначить яркость светового потока не буквой  $L$ , а буквой  $f$ . Кстати сказать, это обозначение общепринято.

Кирхгоф распространил понятие температуры и на излучение, взаимодействующее с телами и находящееся с ними в термодинамическом равновесии. При термодинамическом равновесии яркость световых потоков однозначно зависит от температуры. От температуры зависят также яркости поверхностей тел и их поглощательные способности. Ввиду этого применительно к термодинамическому равновесию формулу (1.4.6) следует записать в виде

$$L(v, T)/A(v, T) = f(v, T). \quad (1.4.7)$$

Соотношение (1.4.7) имеет в физике чрезвычайно большое значение и носит название закона Кирхгофа.

Из него сразу же вытекает много следствий. Одно из них: прозрачные тела ( $A=0$ ) не имеют теплового испускания ( $L=0$ ).

Поглощающие способности и спектральные яркости всех тел и разных точек одного и того же тела различны (даже при термодинамическом равновесии). Именно на этой основе сформировался спектральный анализ. Спектры разных атомов, молекул, твердых тел и жидкостей отличаются друг от друга, и именно по их спектру можно судить о внутренней структуре исследуемого объекта.

Вместе с тем правая часть (1.4.7) — яркость теплового равновесного излучения, совершенно не зависит от того, с какими конкретными телами оно взаимодействует. Таким образом, величины  $L(v, T)$  и  $A(v, T)$  для разных тел сугубо индивидуальны, а их отношение — функция  $f(v, T)$  универсальна и не зависит ни от веществ, из которых состоят тела, ни от структуры поверхностей, ни от направления распространения света. Если бы яркость теплового излучения  $f(v, T)$  зависела от типа вещества, то установление термодинамического равновесия между веществом и излучением было бы вообще невозможно. Существование универсальной функции  $f(v, T)$  есть прямое следствие основных законов термодинамики.

Вклад Кирхгофа в науку был поистине велик. Тонко сочетающая искусство экспериментатора и теоретика, он открыл спектральный анализ и вслед за этим установил теснейшую связь между веществом и излучением. Излучение по Кирхгофу есть независимая и всегда реально существующая субстанция.

Вероятно, стоит привести слова русского физика В. А. Михельсона, одного из последователей Кирхгофа<sup>16)</sup>, хорошо характеризующие состояние оптической науки тех лет [42]: «Теперь уже накопилась такая масса «новых фактов» и разрозненных наблюдений, что, быть может, новому Ньютону удастся их удовлетворительно систематизировать и свести к

<sup>16)</sup> В. А. Михельсон первым начал поиск (1887 г.) вида универсальной функции  $f(v, T)$ .

общим и простым законам. Пока же единственным прочно обоснованным и более или менее общим законом, почти единственной руководящей нитью в этих исследованиях остается закон Кирхгофа».

Речь шла тогда и об интерпретации огромного множества спектров, этой груды малопонятного экспериментального материала, и о поисках вида универсальной функции Кирхгофа. *Если она универсальна, то она должна быть проста.* Это было уже ясно, но как найти ее, оставалось загадкой.

**Введение понятия абсолютно черного тела.** После формулировки своего закона Кирхгоф сразу же ввел понятие абсолютно черного тела. Для абсолютно черного тела значение  $A(v)$  равно единице при всех частотах  $v$ . Отсюда следует

$$L_{\text{ч.т.}}(v, T) = f(v, T). \quad (1.4.8)$$

Размерность  $L(v, T)$  совпадает с размерностью  $f(v, T)$  (эрг·с·см<sup>-2</sup>).

В природе не существует абсолютно черных тел. Сажа, например, имеет значение  $A(v, T)$ , близкое к единице, только в узком спектральном интервале. То же самое относится к другим якобы черным телам. Однако вскоре после Кирхгофа ученые научились создавать системы, у которых  $A=1$ . Такой системой стала замкнутая полость с небольшим отверстием. Весь свет, попадающий через это отверстие в рассматриваемую полость, может многократно рассеиваться на ее внутренних стенах и в конце концов поглотится полностью. Яркость отверстия этой полости соответствует яркости абсолютно черного тела и равна  $f(v, T)$ .

Если функция  $f(v, T)$  известна, то отверстие в такой полости, обладающее свойствами абсолютно черного тела, становится идеальным источником света для точной фотометрии. Все другие источники света должны градуироваться путем сравнения их спектра со спектром испускания черного тела.

Приведенные соображения подчеркивают важность поисков универсальной функции  $f(v, T)$ . В истории науки, как уже отмечалось, они завершились работой М. Планка, возвестившей о начале эры квантовой физики. Вместе с тем определение вида функции  $f(v, T)$  и экспериментально и теоретически послужило основанием для нового этапа развития фотометрии и метрологии; впервые был найден источник света, яркость которого была известна точно. До этого интенсивности света измерялись в каких-то достаточно произвольных единицах.

Созданию эталонного источника света было посвящено много метрологических работ. Современное состояние проблемы хорошо изложено в монографии [9]. На базе основного эталона разработаны различные более удобные вторичные эталоны.

Яркость абсолютно черного тела связана с другой важней-

шай универсальной величиной — спектральной плотностью энергии равновесного излучения  $u_0(v, T)$ :

$$f(v, T) = \frac{c}{4\pi} u_0(v, T). \quad (1.4.9)$$

Формула (1.4.9) для пустоты непосредственно следует из (1.1.16) и (1.4.1). Так как равновесное излучение изотропно, то формула (1.4.1) проинтегрирована предварительно по всем углам  $\omega$ .

Величина  $u_0(v, T)$  важна не только сама по себе, но и составляет важное звено при расчете вероятностей оптических переходов, происходящих под действием равновесного излучения.

**Формула Планка.** Мы не будем приводить здесь многочисленных выводов формулы Планка; их можно найти в различных монографиях и, в частности, в работах самого Планка [43], написанных ясно и доступно. Кстати сказать, чтение физической литературы, написанной создателями основных положений науки, чрезвычайно обогащает. При этом вырабатывается понимание методов решения трудных физических проблем, вырабатывается разумная методология научного поиска. В учебниках обычно приводятся лишь самые главные результаты, а логика научного процесса чаще всего теряется.

Согласно Планку, для вакуума:

$$u_0(v, T) = \frac{8\pi h v^3}{c^3} \frac{1}{e^{hv/kT} - 1}, \quad (1.4.10)$$

$$f(v, T) = \frac{2hv^3}{c^2} \frac{1}{e^{hv/kT} - 1}. \quad (1.4.11)$$

Напомним, что постоянная Планка  $h$  равна  $6,6252 \cdot 10^{-34}$  Дж·с =  $= 6,6252 \cdot 10^{-27}$  эрг·с. Размерность  $u_0(v, T)$  — эрг·см<sup>-3</sup>. Плотность энергии равновесного излучения в расчете на интервал частот  $dv$  равна  $u_0(v, T) dv$ .

При спектроскопических исследованиях обычно пользуются другой шкалой и выражают частоты в см<sup>-1</sup>. Новая частота  $v'$  (см<sup>-1</sup>) связана с истинной частотой  $v$  (с<sup>-1</sup>) простым соотношением

$$v' = \frac{v}{c} = \frac{1}{\lambda}. \quad (1.4.12)$$

Применение частот  $v'$  удобнее, так как при этом получаются существенно меньшие числа. Так, например, для  $\lambda = 563,27$  нм значение  $v$  равно  $5,3256 \cdot 10^{14}$  с<sup>-1</sup>, а значение  $v' = 37752$  см<sup>-1</sup>. В некоторых работах величину  $v'$  называют волновым числом.

В частотах, выраженных в см<sup>-1</sup>, формула Планка принимает вид

$$u_0(v', T) = \frac{1}{8\pi h c v' e^{h c v' / k T} - 1}, \quad (1.4.13)$$

причем  $u_0(v', T) dv' = u_0(v, T) dv$ .

Функция Планка, выраженная в частотах, имеет непосредственный физический смысл. Разделив (1.4.10) на энергию фотона  $h\nu$ , можно сразу же найти число фотонов в 1 см<sup>3</sup> и в единичном интервале частот. И тем не менее в обычной фотометрической литературе функцию Планка выражают чаще всего в длинах волн. Это связано только с устаревшей традицией. Все спектроскопические измерения проводятся приборами, проградуированными обычно по длинам волн, и поэтому яркости тел выражаются как функции  $\lambda$ , а не частоты  $v$ .

Вид формулы Планка в длинах волн значительно более громоздкий:

$$u_0(\lambda, T) = \frac{u(v', T)}{\lambda^2} = \frac{8\pi h c}{\lambda^5 (e^{h c / \lambda k T} - 1)}. \quad (1.4.14)$$

Переход от (1.4.13) к (1.4.14) осуществляется с помощью соотношения

$$u_0(v', T) dv' = u_0(\lambda, T) d\lambda, \quad (1.4.15)$$

где

$$|dv'| = d\lambda / \lambda^2. \quad (1.4.16)$$

Как мы уже подчеркивали, функция  $u_0(v, T)$  универсальна, справедлива для равновесия излучения с любыми телами. Она стала одной из важнейших формул теоретической физики. Достоверность формулы Планка не вызывает никаких сомнений. Это следует не только из полного совпадения с экспериментом. Не менее значимо, что вид функции Планка получен самыми разнообразными методами исходя из разных теоретических предпосылок. Все последующее развитие физики после Планка подтвердило справедливость и огромную значимость его формулы.

Нужно сразу же обратить внимание на следующее важное обстоятельство. Закон Кирхгофа выведен из условия равновесия вещества и излучения. Однако область его применения шире. Он приобретает особый эвристический смысл именно при отклонении от термодинамического равновесия. Яркость поверхности тела  $L(v)$  и его поглощательная способность  $A(v)$  — внутренние характеристики данного тела. Они зависят лишь от структуры тела и от температуры. Поэтому независимость отношения  $L(v, T)/A(v, T)$  от свойств тел, установленная для случая равновесия вещества и излучения, имеет место с высокой степенью приближения и при отсутствии такого равновесия. Изменение отношения  $L(v, T)/A(v, T)$  после нарушения равновесия тела с излучением может, конечно, произойти, но только в том случае, если такое нарушение вызовет серьезное

изменение состояния тела. Чаще всего можно считать, что тепловое испускание тела при наличии внутреннего термодинамического равновесия также подчиняется соотношению (1.4.7). Отсюда следует, что формулу Планка можно использовать для оценки  $L(v, T)$  при заданных значениях  $A(v, T)$  и при отсутствии равновесия с излучением. Подобный метод широко используется на практике.

**Исследование функции Планка.** Использование абсолютно черного тела в качестве эталонного источника излучения требует детального исследования функции Планка. Вид этой функции нужно знать также и при количественном описании многих неравновесных процессов. Дело в том, что тепловое излучение испускается всеми телами, находящимися в состоянии полного или локального термодинамического равновесия, и, следовательно, оно неизбежно создает тепловой фон для всех других неравновесных процессов. В ряде случаев, особенно при высоких температурах и работе в инфракрасной области спектра, тепловой фон весьма велик. Тепловое излучение существует всюду. Оно заполняет все пространство между телами и внутри тел. Поэтому на практике (при постановке физического эксперимента, в технике, метрологии и, естественно, в фотометрии) необходимо учитывать влияние теплового излучения на ход исследуемых процессов, на состояние вещества, на показания регистрирующих приборов. Это проявляется иногда самым неожиданным образом, например, при изучении отрицательных световых потоков, которым будет посвящена глава 4.

Мы подчеркнули здесь, что при анализе неравновесных оптических процессов необходимо всегда учитывать существование фона теплового излучения. Справедливо и обратное. При оценке теплового испускания тела всегда надо учитывать присутствие неравновесных процессов. Если интенсивности излучения не слишком велики, то полная яркость поверхности тела <sup>17)</sup>

$$L_v = L_v^{\text{равн}} + L_v^{\text{неравн}}. \quad (1.4.17)$$

К неравновесным процессам относятся люминесценция, рассеяние внешней неравновесной радиации, излучение Черенкова и лазерное излучение.

Вид функции Планка надо знать каждому оптику. Это можно сделать, ознакомившись с таблицами распределения энергии и фотонов в спектре равновесного излучения, составленными П. А. Апанасевичем и В. С. Айзенштадтом [44]. Таблицы вычислены в 1961 г. с помощью создаваемой тогда элек-

<sup>17)</sup> При очень больших интенсивностях свечения возникают нелинейные оптические явления и разделение  $L_v$  на две части становится невозможным.

тронно-вычислительной техники. Более ранние таблицы содержат мало информации, а иногда и ошибочны. В рекомендованном издании имеется подробная вступительная статья, затрагивающая разные стороны проблемы.

В дальнейшем мы будем анализировать формулу (1.4.13). Лишь в конце параграфа рассматривается функция  $u_0(\lambda, T)$ , а распределение энергии излучения по частотам сравнивается с соответствующим распределением по длинам волн.

Приведенные на рис. 1.4.1 зависимости яркости абсолютно черного тела от  $\nu'$  соответствуют кривым  $u_0(\nu, T)$  с точностью до множителя  $4\pi/c$ . Кривые имеют один максимум и стремятся к 0 при  $\nu' \rightarrow 0$  и  $\nu' \rightarrow \infty$ . Положение максимума определяется из уравнения

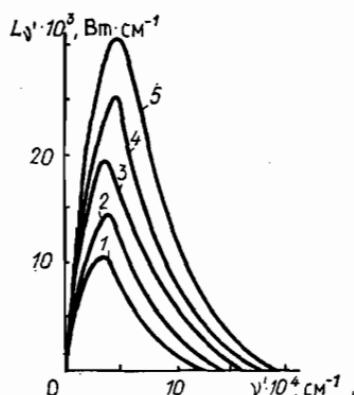


Рис. 1.4.1. Зависимость яркости абсолютно черного тела от частоты  $\nu'$ :  $T = 1800$  К (1), 2000 (2), 2200 (3), 2400 (4), 2600 (5)

$$3(e^a - 1) - ae^a = 0, \quad (1.4.18)$$

которое следует из (1.4.13). Значение  $a$  равно

$$a = hc\nu'_{\max}/kT. \quad (1.4.19)$$

Численное решение (1.4.18) дает  $a = 2,82144$ . Отсюда следует

$$\nu'_{\max} = akT/hc = 1,9610T \text{ см}^{-1}. \quad (1.4.20)$$

Согласно (1.4.20), при повышении температуры значение  $\nu'_{\max}$  растет линейно. Это соответствует закону смещения Вина, выведенному еще до Планка и подтвержденному экспериментом.

При комнатной температуре ( $T = 293$  К) частота, соответствующая максимуму, равна  $544,6 \text{ см}^{-1}$  (далекая инфракрасная область). В видимой области спектра (от 12500 до  $25000 \text{ см}^{-1}$ ) максимум  $u_0(\nu', T)$  будет находиться при температурах от 6400 до 12 800 К соответственно.

Подставляя значение  $\nu'_{\max}$  в (1.4.13), получим величину максимума

$$u_0(\nu'_{\max}, T) = \frac{8\pi k^3}{h^2 c^2} \frac{a^3 T^3}{e^a - 1} = \\ = 0,23822 \cdot 10^{-14} \cdot T^3 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{см}^{-1}. \quad (1.4.21)$$

Таким образом, плотность равновесного излучения в максимуме растет пропорционально кубу температуры.

При высоких температурах и малых частотах  $\left(\frac{hcv'}{kT} \ll 1\right)$  из формулы Планка вытекает известная ранее формула Рэлея — Джинса

$$u_0^{\text{клас}}(v', T) = 8\pi v'^2 kT. \quad (1.4.22)$$

Она выведена Рэлеем<sup>18)</sup> и Джинсом<sup>19)</sup> на основе классических представлений. Вывод (1.4.22) крайне прост. Первый сомножитель  $8\pi v'^2$  — представляет собой число независимых стоячих волн в замкнутом кубике ( $V = 1 \text{ см}^3$ ) в расчете на единичный интервал частот (на  $1 \text{ см}^{-1}$ ). Второй сомножитель  $kT$  — характеризует среднюю энергию гармонической волны (гармонического осциллятора), рассчитанную в рамках классической термодинамики. Как было известно в конце XIX столетия, формула Рэлея — Джинса хорошо передает распределение энергии равновесного излучения по частотам лишь в далекой инфракрасной области и в радиообласти спектра<sup>20)</sup>.

Формула Рэлея — Джинса имеет ограниченную область применимости, так как при ее выводе неправильно определена средняя энергия гармонического осциллятора. Она равна  $kT$  только в рамках классической теории при предположении о непрерывности возможных значений колебательной энергии. В действительности колебательная энергия осциллятора квантована. Ее возможные значения равны

$$E = \hbar v (v + 1/2),$$

где  $v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$ ,  $k$  — квазиупругая постоянная,  $\mu$  — приведенная масса,  $v = 0, 1, 2, \dots$  Средняя энергия такого осциллятора при равновесном (больцмановском) распределении по уровням энергии равна

<sup>18)</sup> Дж. Рэлей (1842—1919 гг.) — английский физик. Один из основоположников теории колебаний. Внес значительный вклад в акустику, теорию теплового излучения, оптику, молекулярную физику. Трудно найти ту область физики, в которой не было бы принципиально важных результатов Рэлея. Он развел, в частности, понятие групповой скорости и нашел связь между нею и фазовой скоростью. До сих пор оптики широко пользуются формулой Рэлея для молекулярного рассеяния света. Автор многих известных монографий [45], оказавших заметное влияние на формирование соответствующих разделов науки.

<sup>19)</sup> Д. Джинс (1877—1946 гг.) — английский физик и астрофизик. Известен работами в области кинетической теории газов и теории теплового излучения. В свое время широкую известность приобрела его космогоническая гипотеза о происхождении нашей планетной системы (см. [46]).

<sup>20)</sup> Формула Рэлея — Джинса не объясняла вида функции  $u_0(v', T)$  в ультрафиолетовой области спектра. На этом основании во многих публикациях тех лет упоминали об «ультрафиолетовой катастрофе».

$$\bar{E} = hc\nu' \frac{1}{e^{hc\nu'/kT} - 1}. \quad (1.4.23)$$

Умножая  $8\pi\nu'^2$  на (1.4.23), мы и получаем формулу Планка.

При  $hc\nu'/kT \gg 1$ , т. е. в области низких температур и высоких частот, формула Планка переходит в формулу Вина

$$u_0(\nu', T) = 8\pi hc\nu'^3 e^{-hc\nu'/kT}. \quad (1.4.24)$$

В границах ее применимости формула Вина хорошо удовлетворяет эксперименту. Промежуточная область ( $hc\nu'/kT \sim 1$ ) описывается правильно только формулой Планка, только квантовой теорией.

Функция Планка несимметрична относительно ее максимума. Это следует из простых численных расчетов и построений графиков. То же самое можно показать в общем виде. Найдем значения двух частот  $\nu'_a$  и  $\nu'_b$ , соответствующих половине максимума:

$$u_0(\nu'_{a,b}, T) = \frac{1}{2} u_0(\nu'_{\max}, T). \quad (1.4.25)$$

Расчеты дают [44]

$$\nu'_a = 0,8045T \text{ см}^{-1},$$

$$\nu'_b = 3,7612T \text{ см}^{-1}.$$

Таким образом,

$$\nu'_{\max} - \nu'_a < \nu'_b - \nu'_{\max}.$$

Величину

$$\Delta\nu' = \nu'_b - \nu'_a = 2,9567T \text{ см}^{-1} \quad (1.4.26)$$

можно трактовать как ширину спектра равновесного излучения. Она пропорциональна температуре излучения. Так как  $\nu'_{\max}$  пропорциональна кубу температуры, а  $\Delta\nu'$  — ее первой степени, то по мере роста температуры функция  $u_0(\nu')$  становится более острой.

На интервал частот от  $\nu'_a$  до  $\nu'_b$  падает 75,4% всей энергии равновесного излучения. В интервале частот от 0 до  $\nu'_a$  находится всего 5% энергии, в интервале частот от  $\nu'_b$  до  $\infty$  — 19,6%.

При рассмотрении распределения энергии равновесного излучения по частотам нередко пользуются безразмерными величинами. Введем обозначение

$$x = \frac{\nu'}{\nu'_{\max}} = \frac{hc}{ak} \frac{\nu'}{T} = 0,50996 \frac{\nu'}{T}, \quad (1.4.27)$$

где, согласно (1.4.18),  $a=2,82144$ . Тогда

$$\varphi_v(x) = \frac{u_0(x, T)}{u_0(x=1, T)} = (e^a - 1) \frac{x^3}{e^{ax} - 1}. \quad (1.4.28)$$

В этих безразмерных величинах формула Планка определяется только одним параметром  $x$ . В таком виде она удобна для графических построений. Зная  $\varphi_v(x)$ , легко найти  $u_0(x, T)$ :

$$u_0(x, T) = 8\pi \frac{k^4 T^4}{h^3 c^3} \frac{a^4}{e^a - 1} \varphi_v(x). \quad (1.4.29)$$

Найдем теперь полную плотность энергии равновесного излучения. Для этого любую из формул (1.4.10), (1.4.13), (1.4.15) или (1.4.29) нужно проинтегрировать по всем значениям переменных (от 0 до  $\infty$ ). Это дает

$$u_0(T) = \sigma_1 T^4, \quad (1.4.30)$$

где  $\sigma_1 = \frac{8\pi^5}{15} \frac{k^4}{h^3 c^3} = 7,5642 \cdot 10^{-15}$  эрг  $\cdot$  см $^{-3}$   $\cdot$  град $^{-4}$ . Выражение (1.4.30) представляет собой хорошо известный (еще до работ Планка) закон Стефана<sup>21)</sup> — Больцмана<sup>22)</sup>. Значение  $u_0(T)$  пропорционально четвертой степени температуры.

Обычно этот закон записывается применительно к яркости абсолютно черного тела  $L(v, T)$ . Согласно (1.4.9), она равна  $cu_0(v, T)/4\pi$ .

Так как значение постоянной  $\sigma_1$  мало, то интегральная плотность равновесного излучения также невелика. При  $T=293$  К

$$u_0(T) = 5,57 \cdot 10^{-5} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3}. \quad (1.4.31)$$

В работе [44] эта величина сравнивается для наглядности с кинетической энергией 1 см $^3$  идеального газа, которая равна

$E_{\text{кин}} = \frac{3}{2}P$ , где  $P$  — давление газа. При  $P=760$  мм рт. ст.

значение  $E_{\text{кин}}$  равно  $1,52 \cdot 10^6$  эрг  $\cdot$  см $^{-3}$ , т. е. в  $2,73 \cdot 10^{10}$  раз

<sup>21)</sup> Иозеф Стефан (1835—1893 гг.) — австрийский физик. Работал в области оптики, акустики, кинетической теории газов. Его главный результат — экспериментальное доказательство соотношения (1.4.30). Оно выполнено в 1879 г. Стефану принадлежит существенная роль в формировании австрийской физической школы.

<sup>22)</sup> Людвиг Больцман (1844—1906 гг.) — выдающийся австрийский физик, один из основоположников классической статистической физики. Работы Больцмана трудно перечислить. Но главное нам известно еще со студенческой скамьи. Мы очень часто пользуемся распределением Больцмана, постоянной Больцмана, законом Больцмана,  $H$ -теоремой Больцмана... Впервые применив термодинамику к равновесному излучению, Больцман вывел в 1884 г. уравнение (1.4.30). В том же году из термодинамических соображений он обосновал существование давления света.

больше (1.4.31). Однако с повышением температуры энергия излучения растет чрезвычайно быстро и при  $T=260\,000$  К сравнивается с кинетической энергией идеального газа.

Плотность равновесного излучения  $u_0(T)$  очень мала. Но яркость абсолютно черного тела или, что то же, энергетическая яркость потока равновесного излучения существенно больше. Умножая (1.4.31) на  $c/4\pi$ , получаем

$$L_{\text{ч.т.}}(T) = f(T) = 1,32 \cdot 10^5 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (1.4.32)$$

При увеличении температуры значение  $f(T)$  резко возрастает.

**Распределение энергии равновесного излучения в шкале длин волн.** Как уже отмечалось, большинство светотехников строят функцию Планка не в шкале частот (волновых чисел), а в шкале длин волн. Это иногда удобно с точки зрения эксперимента, но по существу необоснованно. При работе с объективными приемниками излучения шкала частот, разумеется, логичнее<sup>23)</sup>.

Вместе с тем анализ функций  $u_0(v, T)$  и  $u_0(\lambda, T)$  показывает, что они обладают существенно разными свойствами; максимумы этих кривых находятся в разном спектральном интервале, зависимости максимальных значений  $u_0(v, T)$  и  $u_0(\lambda, T)$  от температуры существенно различны. Это послужило поводом для своеобразной научной дискуссии. Мы сошлемся здесь на четыре статьи, опубликованные в разное время в журнале «Успехи физических наук» [47—50].

Дискуссия позволила сделать ряд методологических выводов. Прежде всего было подчеркнуто, что спектральная плотность излучения, выраженная в той или иной шкале, сама по себе ни с какой энергией не связана. Она является лишь вспомогательной величиной, позволяющей определить плотность энергии излучения в выбранном участке спектра.

Реальное значение имеют величины  $u_0(v, T) dv$  и  $u_0(\lambda, T) d\lambda$ . Их размерность — эрг·см<sup>-3</sup>, тогда как размерность  $u_0(v, T)$  — эрг·см<sup>-3</sup>·с, размерность  $u_0(\lambda, T)$  — эрг·см<sup>-3</sup>·см<sup>-1</sup>. Естественно, что сравнение величин  $u_0(v, T)$  и  $u_0(\lambda, T)$ , имеющих существенно разные размерности, вряд ли имеет физический смысл, и, выполненное на практике, оно не могло не дать качественно различных результатов. Значения  $u_0(v, T)$  и  $u_0(\lambda, T)$  не пропорциональны друг другу и потому расчет максимумов этих функций дает несопоставимые результаты.

<sup>23)</sup> Возможно, точно такие же соображения справедливы и для субъективного приемника излучения — глаза. В следующей главе будет показано, что приемники излучения, находящиеся в сетчатке глаза, основаны на фотохимических процессах. В то же время возможность осуществления фотохимического процесса непосредственно связана со значением частоты падающих квантов, а число возникающих фотохимических процессов пропорционально числу фотонов, поглощаемых палочками и колбочками. Во всем механизме зрительного аппарата длина волны излучения, падающего на глаз, вряд ли имеет какое-либо значение.

Вместе с тем в дискуссии подчеркнуто, что спектральная зависимость  $u_0$  может быть выражена по существу в бесконечном числе переменных. На практике использовались функции  $u_0(v)$ ,  $u_0(v')$ ,  $u_0(\lambda)$ ,  $u_0(\ln v)$ ,  $u_0(\ln \lambda)$ . Разумеется, выбор переменных, характеризующих область спектра, отнюдь не исчерпывается этими вариантами.

Цитируемые авторы пришли далее к выводу, что значение  $u_0$  лучше всего выражать как функцию  $\ln v$  и  $\ln \lambda$ . Это якобы больше соответствует существу спектра, так как размерность величины  $u_0(\ln \lambda)$  совпадает с размерностью  $u_0(\ln v)$ . Такой вывод не основателен. Можно было бы выбрать еще неограниченное число переменных, обладающих такими же свойствами.

Графики функций  $u_0(\ln v)$  или  $u_0(\ln \lambda)$  строить, конечно, можно. Иногда они дают исследователю более удобную основу для интерполяции или экстраполяции экспериментальных данных. Вместе с тем ясно, что величины  $u_0(\ln v)$  и  $u_0(\ln \lambda)$  не отражают каких-либо реальных свойств электромагнитной волны.

Так как функция  $u_0(\lambda, T)$  все еще широко используется при конкретных расчетах, целесообразно привести некоторые сведения о ней.

Положение максимума кривой (1.4.14) соответствует длине волны

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{ka_\lambda} \frac{1}{T} = 0,28978 \frac{1}{T} \text{ см}, \quad (1.4.33)$$

где  $a_\lambda = 4,9651$  — корень уравнения

$$5(e^{a_\lambda} - 1) - a_\lambda e^{a_\lambda} = 0.$$

Формула (1.4.33) выражает закон смещения Вина. Именно в этой форме он был подвергнут впервые экспериментальной проверке.

Частота  $v'_{\lambda_{\max}}$ , соответствующая  $\lambda_{\max}$ , равна

$$v'_{\lambda_{\max}} = 1/\lambda_{\max} = 3,4507 T.$$

Это значение существенно отличается от значения  $v'_{\lambda_{\max}} = 1,9610 T$ , приведенного раньше для кривой  $u_0(v', T)$ . Высота кривой (1.4.14) в максимуме пропорциональна пятой степени температуры:

$$u_0(\lambda_{\max}, T) = 1,7164 \cdot 10^{14} T^5 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3}. \quad (1.4.34)$$

Напомним, что в шкале частот рост  $u_0(v'_{\lambda_{\max}}, T)$  был пропорционален третьей степени температуры.

При повышении температуры острота максимума в шкале

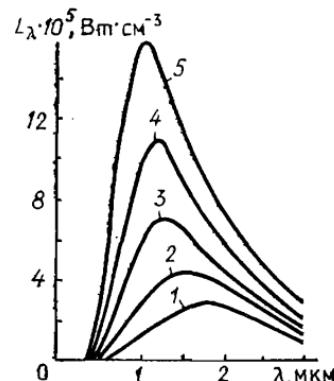
длин волн возрастает очень быстро, отношение высоты максимума к ширине спектра пропорционально  $T^6$ . В результате при высоких температурах подавляющая доля энергии сосредоточивается на очень малом интервале длин волн.

На рис. 1.4.2 приведены значения  $L(\lambda, T)$  для нескольких температур.

**Тепловое излучение, испускаемое реальными телами [44].** Выше были описаны свойства равновесного излучения. Оно заполняет все пространство между телами с одинаковой температурой, а также внутри сред и тел, находящихся при термодинамическом равновесии.

Абсолютно черное тело — это идеализация реальных тел. Испускание света черным телом зависит

Рис. 1.4.2. Зависимость яркости абсолютно черного тела от длины волны  $\lambda$ . Кривые 1—5 те же, что и на рис. 1.4.1



только от температуры, испускание реальных тел, кроме того, и от свойств тела и от состояния его поверхности.

Поглощательная способность любого тела  $A(v, T)$  всегда меньше единицы. Поэтому, согласно закону Кирхгофа,

$$L(v, T) = A(v, T) f(v, T) = \frac{c}{4\pi} A(v, T) u_0(v, T).$$

Яркость реальных тел всегда меньше яркости абсолютно черного тела. Если в данной спектральной области поглощающая способность тела велика, то также велика яркость теплового излучения его поверхности. В тех диапазонах спектра, где значение  $A(v, T)$  близко к единице, реальное тело близко к черному телу. Если в некоторой области спектра тело прозрачно, то в этой области оно и не испускает света.

Если для некоторого тела величина  $A(v, T)$  для всех частот постоянна ( $A(v, T) = A_0$ ), то спектральное распределение яркости его теплового излучения совпадает со спектральным распределением яркости черного тела. Вместе с тем его яркость в  $A_0$  раз меньше. Такие тела называются серыми<sup>24)</sup>. Испускание серого тела описывается формулой Планка (с

<sup>24)</sup> Следует обратить внимание, что понятия «серое тело» и «серое вещество» в спектроскопии существенно различны и их нельзя путать.

точностью до коэффициента серости  $A_0$ ) и к нему применимы все законы равновесного излучения.

В природе нет строго серых тел. Однако на ограниченных участках спектра значение  $A(v, T)$  может не зависеть от  $v$ . Многие диэлектрики и полупроводники можно считать серыми в широкой области спектра.

Поглощательную способность  $A(v, T)$  измеряют экспериментально. Однако для непрозрачных тел ( $A=1-R$ ) с плоской поверхностью ее можно рассчитать теоретически с помощью формул Френеля. Она зависит от угла падения и показателя преломления. В той области спектра, где показатель преломления не зависит от частоты, рассматриваемое тело можно считать серым. При  $n=1$  (поглощательная способность  $A$  равна единице) яркость тела изотропна. В остальных случаях она уменьшается с увеличением угла падения. Возрастание  $n$  приводит к уменьшению испускательной способности тел.

Для многих диэлектриков  $n < 2$ . В этом случае непрозрачные диэлектрики обладают высокой испускательной способностью (до 90% яркости черного тела).

Более детальные расчеты оптических свойств металлов можно найти в [44]. Как оказалось, интегральная яркость металлов пропорциональна пятой степени температуры. Максимум испускания металлов сдвинут в фиолетовую область по сравнению с максимумом испускательной способности черного тела.

## § 5. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

**Солнце.** Каждое тело, температура которого не равна нулю, испускает электромагнитное излучение. Нас интересуют здесь источники излучения, используемые при научных исследованиях и в повседневной практике, например для освещения. Одним из них является Солнце.

Солнце — важнейший источник энергии на поверхности Земли. Земля получает от Солнца  $8 \cdot 10^{20}$  ккал в год. Это примерно в 20000 раз больше годовой выработки электроэнергии на всем земном шаре.

Солнце — тепловой источник света. Его фотометрическая характеристика — солнечная постоянная  $S_0$ . Так называется мощность солнечного излучения, приходящего по нормали на  $1 \text{ см}^2$  поверхности, расположенной вне земной атмосферы на расстоянии в 1 астрономическую единицу от Солнца<sup>25)</sup>. Наиболее достоверное значение  $S_0 = 2,00 \text{ кал} \cdot \text{мин}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} = 1,39 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$  (1 кал = 4,1868 Дж).

Эффективной радиационной температурой солнца  $T_a$  назы-

<sup>25)</sup> Астрономической единицей называется среднее расстояние Земли от Солнца, равное  $149,5 \cdot 10^6 \text{ км}$ .

вается температура абсолютно черного тела, которое при том же угловом размере, что и Солнце, создает в вакууме интегральную облученность, равную солнечной постоянной. Значение  $T_s$  равно 5787 К.

Источник солнечной энергии — ядерные реакции. Механизм этих реакций нас пока не интересует (см., например, [13, 14]).

В атмосфере Земли солнечное излучение заметно ослабляется. Это связано с поглощением света молекулами  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $H_2O$ ..., а также крупными частицами (пыль, капли воды, ледяные кристаллики). Существенную роль играет рассеяние света в атмосфере Земли, особенно в видимой области спектра. В инфракрасной и ультрафиолетовой областях ситуация обратная — главную роль играет поглощение света. Ультрафиолетовая радиация поглощается в основном слоем озона, расположенным на высоте 20—30 км.

Первичное излучение Солнца (излучение фотосферы) существенно ослабляется и в атмосфере самого Солнца. В результате на фоне сплошного спектра возникают многочисленные атомные линии поглощения (фраунгоферовы линии гелия, водорода, натрия, калия, кальция, железа и других элементов). Освещенность поверхности Земли в значительной мере зависит от высоты Солнца над горизонтом и состояния атмосферы. Более подробные сведения об особенностях испускания Солнца можно найти в [14, 51—54].

**Классификация искусственных источников излучения.** Искусственных источников света чрезвычайно много. Они используются в различных целях (освещение, сушка материалов инфракрасным излучением, нагрев помещений инфракрасным излучением, освещение растений, ультрафиолетовое облучение в медицине и биологии, рентгеновское облучение, научные исследования, технический контроль производства и т. д.). С появлением лазеров область применения искусственных источников света существенно расширилась. Источники света отличаются друг от друга прежде всего по способу возбуждения: тепловые, люминесцентные, лазерные. Реже используются источники тормозного излучения, излучение Вавилова—Черенкова, синхронное излучение. Источники света могут испускать сплошной спектр, могут быть монохроматическими. В ряде случаев они характеризуются линейчатым спектром или спектром, состоящим из полос.

В тепловых источниках света тепловая энергия преобразуется в световую. Если распределение частиц светящегося тела подчиняется закону Больцмана ( $N_i = N_0 \exp(-E_i/kT)$ ), то испускаемое излучение близко к равновесному. При заметном нарушении равновесия тепловое испускание может сопровождаться люминесценцией.

Нагрев тепловых источников света осуществляется разны-

ми способами: за счет электрического тока, химических реакций, механической энергии. Наиболее употребляемы электрические лампы накаливания с нитью из металлов, находящейся в вакууме или в каких-либо инертных газах.

Люминесцентные источники света очень разнообразны. Каждое тело имеет свой спектр люминесценции, который зависит от способа возбуждения. Здесь мы перечислим несколько наиболее широко распространенных люминесцентных источников: газосветные лампы тлеющего разряда (неоновые, гелиевые, водородные), газосветные лампы дугового разряда (натриевые, кадмиеевые, циркониевые, цезиевые, ртутные низкого давления, ксеноновые высокого давления), газосветные лампы импульсного разряда, люминесцентные лампы низкого давления с люминофором на стенках трубы.

К числу смешанных источников излучения относятся электрические дуги в атмосфере воздуха (электроды из угля или металла), а также различные лампы и трубы (электрическая дуга в инертном газе и тепловое излучение горячих стенок и электродов).

О лазерах надо говорить много или ничего. Число их типов уже не сосчитать. Первый лазер появился сравнительно недавно — в 1960 г. С тех пор лазеры как источники света нашли необычайно широкое применение (лазерная спектроскопия, лазерная химия, лазерная биология, лазерная медицина, лазерная метеорология, лазерная метрология, лазерная технология, лазерное разделение изотопов, лазерная связь, голограммия и т. д. и т. п.). Можно надеяться, что пройдет 10—15 лет и лазерные источники света войдут в быт каждой семьи.

Оценки качества искусственных источников разнообразны. Все они испускают свет за счет энергии от источников питания. В технике принимают во внимание их энергетические характеристики: потребляемую мощность, полный испускаемый световой поток и, наконец, коэффициент полезного действия. В экспериментальной практике особое значение имеет распределение испускаемого излучения по спектру. В ряде случаев важно знать пространственное распределение светимости источника (индикатору испускания), которое зависит от его конструктивных особенностей<sup>26)</sup>.

**Тепловые источники излучения.** Яркости всех нечерных тел можно охарактеризовать коэффициентом испускания  $\epsilon_v$ . Он определяется формулой

$$\epsilon_v = L_v / L_v, \quad (1.5.1)$$

где  $L_v$  — спектральная плотность яркости данного тела, а  $L_v$  — та же величина для абсолютно черного тела. Анало-

<sup>26)</sup> Типичный вид индикатора различных источников света можно найти в монографиях [10, 14, 55—57].

гичный коэффициент вводится обычно и для шкалы длин волн.

В предыдущем параграфе мы записали закон Кирхгофа:

$$\frac{L_v(v, T)}{A(v, T)} = \frac{c}{4\pi} u_0(v, T). \quad (1.5.2)$$

Так как  $L_v = c u_0(v, T) / 4\pi$ , то

$$\varepsilon_v = A(v, T). \quad (1.5.3)$$

Коэффициент испускания нечерных тел равен их поглощательной способности. Значение  $\varepsilon_v$  меньше единицы, и, следовательно, яркость нечерных тел меньше яркости абсолютно черного тела. Как правило, все тела поглощают свет разных участков спектра по-разному. Именно поэтому их называют селективно-поглощающими телами.

Интегральная яркость нечерных тел равна

$$L'(T) = \int_0^{\infty} A(v, T) L(v, T) dv = \bar{A} \int L(v, T) dv \cong \bar{A} \sigma T^4. \quad (1.5.4)$$

Последнее равенство следует из закона Стефана—Больцмана. Так как  $A(v, T)$  зависит от температуры, то пропорциональность  $L'$  четвертой степени температуры только приближенная (для ряда металлов  $L' \sim T^{4.5}$ ).

Значения  $A(v, T)$  и  $\bar{A}(T)$  зависят от состояния поверхности тела. У полированных тел они меньше, чем у шероховатых.

В качестве исходного материала, чаще всего используемого для создания тепловых источников света (ламп накаливания), служит вольфрам. Среди чистых металлов он наиболее тугоплавок. Это важно, так как по мере повышения температуры максимум испускания перемещается ближе к видимой области спектра. Температура плавления вольфрама — 3660 К. Коэффициент полезного действия электрической лампы с вольфрамовой нитью при  $T = 2900$  К равен  $\sim 0.03$ . Она излучает поток, примерно равный 18 лм на 1 Вт потребляемой мощности.

Детальное описание устройства и свойств искусственных тепловых источников света можно найти в обширной литературе. Этим проблемам посвящена специальная наука — светодиодика (см. [3, 4, 8, 10—14, 19, 56—63]).

**Люминесцентные источники излучения.** Эти источники света сейчас все шире применяются как в научных исследованиях, так и для освещения. В СССР развитие люминесцентных источников света связано с неутомимой деятельностью С. И. Вавилова, В. Л. Левшина и их учеников. Они разработали промышленные основы и технологию изготовления люминесцентных ламп, обладающих заметными преимуществами перед лампами накаливания: их коэффициент полезного действия выше, а спектр свечения ближе к спектру свечения Солнца.

Именно поэтому люминесцентные лампы называют иногда лампами белого света. Вместе с тем на основе люминесценции создаются и лампы любого другого спектрального состава. Основную роль в люминесцентных источниках света играет электролюминесценция и несколько реже фотолюминесценция.

Рассмотрим основной механизм действия всех типов люминесцентных ламп. Каждая лампа состоит из замкнутой стеклянной (иногда кварцевой) трубки, в которую впаяны электроды.

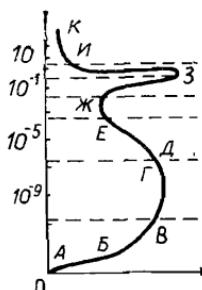


Рис. 1.5.1. Вольт-амперная характеристика газового разряда

троды. На анод подается положительное напряжение, на катод — отрицательное. Разрядная трубка наполняется тем или иным газом. Давление газа разное, чаще всего в интервале от 0,01 до 2 мм рт. ст. Форма трубки и расположение электродов также варьируются. В газе всегда имеется некоторое количество свободных электронов и ионов, образующихся за счет различных внешних причин и, в частности, весьма слабого фона ультрафиолетового и радиоактивного излучений. Если между катодом и анодом создается разность потенциалов, то внутри трубки пойдет электрический ток; электроны и отрицательные ионы направляются к аноду, положительно заряженные ионы — к катоду. При столкновениях этих частиц с нейтральными атомами газа и электродами число заряженных частиц будет увеличиваться, некоторые атомы ионизируются. Вместе с тем при столкновениях будет происходить возбуждение атомов. Возвращаясь затем в основное и другие более низкие энергетические состояния, атомы будут испускать излучение — люминесцировать. Спектр свечения зависит от типа газа, находящегося в трубке, и от режима разряда.

На рис. 1.5.1 приведена типичная вольт-амперная характеристика газового разряда. По оси абсцисс отложена разность потенциалов, приложенная к электродам, по оси ординат — сила возникающего электрического тока. Форма кривой отображает сложность процессов, происходящих в трубке при столкновениях заряженных и нейтральных частиц. На начальном участке кривой  $OA$  ток растет линейно. Затем имеется участок  $AB$ , где увеличение напряжения не приводит к существенному

увеличению силы тока. На участке *БВ* ток снова увеличивается. Вся область *ОВ* называется областью тихого несамостоятельный разряда. На дальнейшем участке кривой *ВГ* ток быстро растет практически при неизменном напряжении. На участке *ГД* рост тока сопровождается уменьшением напряжения. Участок *ДД* — это область тихого самостоятельного разряда. В переходной области *ДЕ* напряжение быстро падает, а ток растет. Это связано с внутренними процессами, происходящими в газе. Сам газ в трубке начинает светиться. Область *ЕЖ* — область нормального тлеющего разряда. Далее в областях *ЖЗ* и *ЗИ* возникает аномальный тлеющий разряд. Область *ИК* соответствует дуговому разряду. Она характеризуется большой силой тока при сравнительно невысоком напряжении. В разных режимах разряда различные участки трубки светятся по-разному<sup>27)</sup>.

Газосветные трубки с тлеющим разрядом для обычного освещения не применяются. Они используются как источник узких спектральных линий для научных исследований, а также для рекламы и сигнализации. Создание таких трубок связано с именем Гейсслера<sup>28)</sup>.

В качестве наполнителя трубок используются аргон, неон, водород, гелий, азот, пары ртути, ксенон и другие газы. Рабочее напряжение трубок порядка 2000—3000 В. В случае неона питающее напряжение существенно меньше.

Широкое практическое применение получили в настоящее время газосветные источники с дуговым разрядом. В них используется катод с независимым подогревом, в результате чего появляются дополнительные термоэлектроны. Большую группу источников с дуговым разрядом небольшой интенсивности составляют спектральные лампы с линейчатым спектром свечения. Они необходимы для решения многих задач спектрофотометрии. Рабочий газ таких ламп — пары металлов (ртути, натрия, кадмия, цинка, калия) и инертные газы. Размеры спектральных ламп обычно невелики. Их цоколи похожи на цоколи радиоламп. Рабочее напряжение от 8 до 70 В.

Хорошим источником ультрафиолетовой радиации является водородная лампа. Ее спектр непрерывен. Он возникает при рекомбинации свободных электронов с ионами водорода.

<sup>27)</sup> Первый патент на ртутную лампу низкого давления был получен в 1879 г. русским профессором Репьевым. Широкое применение газоразрядные приборы низкого давления получили с 1902 г.

<sup>28)</sup> Г. И. Гейсслер (1815—1879 гг.) — немецкий физик и изобретатель. Создатель многих типов научных приборов и, в частности, ртутно-вакуумного насоса и гейсслеровской трубки. Именно он продемонстрировал способность газов светиться при прохождении электрического тока. Еще в 1858 г. Гейсслер высказал мнение, что цвет свечения газонаполненных трубок можно использовать для определения химического состава газов. Эта точка зрения — предвестник спектрального анализа, исходные идеи которого сформулированы в 1859 г. Кирхгофом и Бунзеном.

Все перечисленные лампы основаны на явлении люминесценции. Однако они обычно носят другие названия. Слово «люминесцентные лампы» обозначает в повседневной практике лампы, используемые для освещения [14, 62, 63]. Внутренняя поверхность трубок этих ламп покрыта люминофорами. Ультрафиолетовая радиация, испускаемая газом газоразрядной ртутной трубки низкого давления, поглощается люминофором, который затем фосфоресцирует. Здесь происходит сочетание первичной электролюминесценции внутри трубы с последующей фотolumинесценцией на поверхности трубы. На фоне широкой сплошной полосы фосфоресценции проявляется сравнительно слабый спектр излучения ртутного разряда.

На том же принципе основано свечение ультрафиолетовых люминесцентных ламп. В данном случае используются другие люминофоры.

Практическое применение нашли многие другие типы искусственных источников излучения. К ним относятся люминесцентно-тепловые источники, ртутные лампы, электрические дуги, лампы накаливания с парами йода, ксеноновые лампы сверхвысокого давления, плазмотроны и т. д. В ряде случаев для фотометрических целей используется свечение синхрофазotronов, т. е. кольцевых циклических ускорителей электронов до больших энергий. Свечение вызывается электронами, движущимися с ускорением по круговым орбитам.

В случае электрических дуг, горящих при атмосферном давлении между двумя электродами, два вида свечения накладываются друг на друга: свечение раскаленных электродов и газов, образующихся в канале между электродами<sup>29)</sup>.

**Лампы сверхвысокого давления.** Среди источников света, основанных на излучении электрического разряда в газах, особое место занимают лампы сверхвысокого давления [61]. Эти лампы (ЛСВД) выгодно отличаются значительно большей светоотдачей, высокой яркостью, хорошими спектральными характеристиками, малыми размерами и простотой эксплуатации. Их можно использовать в качестве источников света для различных оптических приборов.

Как мы уже упоминали, лампы низкого давления светятся при давлении 0,01—0,1 мм рт. ст. Источники света с электрическим разрядом в парах хорошо работают и при атмосферном давлении (лампы высокого давления) и при давлениях во много раз больше атмосферного (до 250 атм). Температура дуги при атмосферном давлении выше 6300 К, при сверхвысо-

<sup>29)</sup> Дуга, горящая между угольными электродами в атмосфере воздуха, получила название дуги Петрова. Она создана впервые [64] русским физиком академиком В. В. Петровым (1761—1834 гг.). Его основные работы относятся к электротехнике. Вместе с тем он занимался пионерскими исследованиями в области люминесценции: выявил различия хемилюминесценции, биолюминесценции и фотolumинесценции.

ких давлениях  $\sim 8000$  К. Яркость такого излучателя выше яркости Солнца в ясную погоду и при высоком положении Солнца над горизонтом. Предельное значение яркости получено при электрическом разряде в капиллярной кварцевой трубке с внутренним диаметром 1 мм. Количество энергии излучения, испускаемой такой трубкой, составляет 75% от мощности электрического тока, проходящего через трубку.

В лампах сверхвысокого давления необходимая ионизация газа осуществляется за счет соударений быстро движущихся частиц (термическая ионизация). При этом происходит интенсивное возбуждение атомов, сопровождаемое свечением. Все компоненты газа (невозбужденные атомы, электроны, положительные ионы, возбужденные атомы) активно обмениваются энергией. Возникает изотермическая плазма, электрический режим которой, так же как и все другие ее характеристики, определяется температурой, давлением и природой газа.

Опыт показал, что лампы сверхвысокого давления, предназначенные для создания источников яркого сосредоточенного излучения, лучше изготавливать не из цилиндрических кварцевых трубок малого диаметра, а в виде кварцевых колб шаровой формы (шаровые ЛСВД). Электроды располагаются обычно на расстоянии несколько миллиметров друг от друга.

Спектр свечения ртутных ламп состоит из нескольких относительно слабых линий в среднем ультрафиолете, сильно расширенных линий в ближнем ультрафиолете (с длинами волн 312,5—313,2; 334,1 и 365,0—366,3 нм) и в видимом спектре (404,7; 435,8; 546,1 и 557,0—579,0 нм). Всюду имеется сильный непрерывный фон. Энергия излучения фона примерно равна энергии, испускаемой отдельными спектральными линиями. Изменение цветности свечения лампы возможно путем добавления других металлов.

Благодаря высокой яркости и световой отдаче ртутные лампы СВД постоянно используются в кинопроекторах<sup>30)</sup>, прожекторах, осциллографах, для контроля внутренней поверхности узких полых тел, для проекции изображения, даваемого микроскопом на большой экран, в микрофотографии, фотосинтезе, киносъемках.

С помощью ЛСВД резко расширились возможности люминесцентной микроскопии. Раньше не было способа рассматривать в микроскоп живые объекты без их окраски. Теперь такая возможность существует. К той же области техники относится использование прожекторов с ЛСВД, имеющих черный фильтр, в театральных постановках для получения яркой люминесценции декораций.

Ртутные лампы сверхвысокого давления хорошо оправдали себя и широко применяются для решения многих практи-

<sup>30)</sup> Для проекции цветных фильмов ртутные лампы СВД непригодны.

ческих и чисто научных задач. Вместе с тем очевидно, что потребности в источниках света, обладающих повышенной экономичностью, большой яркостью и желаемыми спектральными характеристиками, не могут быть удовлетворены только ртутными лампами СВД. Естественно было попытаться найти и другие источники света с новыми параметрами. Такова логика всякого научного исследования: искать, творить, не успокаиваться на достигнутом.

В данном случае возникал вопрос — нельзя ли для ламп СВД использовать пары других металлов и какие-либо газы. Опыт показал, что свойства ртути весьма специфичны и другие металлы, действительно, почти непригодны. Как оказалось, высокие давления требуют чрезмерно высоких температур внутри ламп, что при отсутствии специального охлаждения осуществить невозможно. В то же время такое охлаждение требует громоздкой аппаратуры и сразу же снижает положительные достоинства этих ламп. Кроме того, другие металлы, использованные для создания ламп СВД, не дали никаких преимуществ в спектральном составе излучения.

Использование ламп СВД, наполненных инертными газами (аргон, криpton, ксенон), оказалось более целесообразным. Не останавливаясь на деталях; отметим, что такие лампы обладают хорошими спектральными характеристиками. В ультрафиолетовой и видимой области спектра их излучение практически непрерывно. Линейчатая структура появляется только в ближней инфракрасной области спектра. Нижняя граница для ультрафиолета обусловлена прозрачностью кварца, из которого состоят стенки ламп ( $\lambda \sim 200$  мм).

Создание ламп сверхвысокого давления — это новый раздел современной техники. Ее развитие привело одновременно к решению серьезных научных проблем. Стоит отметить, например, что лампы СВД стали одним из главных элементов квантовой электроники — они служат для накачки (возбуждения) твердотельных лазеров. Тесное сочетание научных исследований с решением насущных прикладных задач является непременным условием дальнейшего прогресса как науки, так и техники.

**Оптическая пирометрия.** Оптической пирометрией называются оптические методы измерения температур источников света. Таких методов много. Здесь мы остановимся только на одном из них — измерении температур путем непосредственного применения формулы Планка. При этом предполагается, что закон Кирхгофа применим, что внутри источника света сохраняется термодинамическое равновесие. Для большинства тепловых источников света подобное предложение справедливо. Если же это не так, то теряет смысл измерение температуры; понятие температуры применимо к системе только при наличии в ней термодинамического равновесия.

Методы оптической пирометрии существенно дополняют все другие методы измерения температур. Прежде всего важна их применимость для измерения очень высоких температур, т.е. в области, где другие методы практически нереальны. Современная метрология использует оптические методы для градуировки всех эталонов температуры, установления основных точек термометрической шкалы в области высоких температур.

Существенным преимуществом оптических методов следует считать также возможность определения температур источника света на значительном расстоянии от него. Это относится, например, к измерению температуры Солнца.

На практике используется несколько вариантов оптического метода измерения температур, основанных на формуле Планка: радиационный, яркостный, цветовой [1, 65, 66].

Радиационный метод исходит из закона Стефана—Больцмана. Согласно (1.1.28) и (1.4.30),

$$T = \sqrt[4]{M/\sigma} = 86,28 \sqrt[4]{M/\pi}. \quad (1.5.5)$$

Для определения светимости  $M$  используют специальные радиационные пирометры. Перед измерением они градуируются по источникам света, температура которых известна.

Формула (1.5.5) справедлива для черных тел. Для реальных тел

$$M = \bar{A}\sigma T^4, \quad (1.5.6)$$

где  $\bar{A}$  — среднее значение поглощательной способности. Согласно (1.5.6),

$$T = \sqrt[4]{M/\bar{A}\sigma}. \quad (1.5.7)$$

Значение  $\bar{A}$  в принципе зависит от температуры, однако эта зависимость сравнительно мала и поэтому формулой (1.5.7) обычно можно пользоваться. Если зависимость  $\bar{A}(T)$  измерена заранее, то в (1.5.7) надо брать значение  $\bar{A}(T)$  при температурах, близких к измеряемым.

Нечерные тела характеризуют иногда радиационной температурой  $T_P$ . Она измеряется по формуле (1.5.5) и равна истинной температуре с точностью до множителя  $\sqrt[4]{1/\bar{A}}$ . Радиационная температура всегда меньше истинной.

В яркостном методе определения температуры нагретых тел измеряется не светимость, а спектральная плотность яркости  $L(v, T)$  для какой-то частоты  $v$  (или длины волны  $\lambda$ ). Для нечерных тел

$$L(v, T) = A_v \frac{c}{4\pi} u_0(v, T). \quad (1.5.8)$$

Измеряя  $L(v, T)$  при известных значениях  $A_v$ , можно с помощью таблиц формулы Планка определить  $T$ . Однако чаще обходятся без таблиц и пользуются пирометром с исчезающей нитью [1]. В нем сравнивается яркость изображения исследуемого источника света с яркостью свечения калиброванной лампочки накаливания. Частота излучения задается с помощью светофильтра.

Зная  $A_v$ , можно провести приближенный расчет  $T$ . В видимой области спектра при не слишком высоких температурах  $\exp(hv/kT) \gg 1$  и, следовательно, формула Планка аппроксимируется формулой Вина:

$$L(v, T) \approx A_v \frac{2hv^3}{c^2} e^{-hv/kT}. \quad (1.5.9)$$

Отсюда следует

$$T \approx \frac{hv}{k} \frac{1}{- \ln L_v + \ln A_v + \ln \frac{2h}{c^2} + 3 \ln v^3}. \quad (1.5.10)$$

Если значение  $A_v$  почему-либо неизвестно (трудно измеримо), то ограничиваются определением так называемой яркостной температуры светящегося тела. Эта температура вычисляется по формуле (1.5.10), в знаменателе которой опущено слагаемое  $\ln A_v$ . Яркостная температура данного тела совпадает с температурой черного тела, обладающего той же самой яркостью свечения  $L_v$ . Так как поглощательная способность  $A_v$  всегда меньше единицы, то  $T_y < T$ . Значения  $T_y$  и  $T$  совпадают только для черного тела.

Широкое применение получил цветовой метод измерения температур. Его основное преимущество — отсутствие абсолютных измерений яркости. В данном методе измеряется только отношение яркостей двух частот. Пусть яркости нечерного тела для двух частот  $v_1$  и  $v_2$  равны  $L_{v_1}$  и  $L_{v_2}$ . Логарифм их отношения имеет простой вид:

$$\ln \frac{L_{v_1}}{L_{v_2}} = \ln \frac{A_{v_1}}{A_{v_2}} + 3 \ln \frac{v_1}{v_2} + \frac{h(v_2 - v_1)}{kT}. \quad (1.5.11)$$

Измеряя левую часть (1.5.11) и зная  $A_{v_1}/A_{v_2}$ , легко рассчитывать температуру  $T$ .

Если значения  $A_{v_1}$  и  $A_{v_2}$  трудно измеримы, то говорят о цветовой температуре  $T_{\text{ц}}$ . Она определяется по той же формуле (1.5.11), в которой изъято первое слагаемое правой части. Между истинной и цветовой температурой имеется прямая связь:

$$T = T_{\text{п}} \frac{\ln \frac{L_{v_1}}{L_{v_2}} - 3 \ln \frac{v_1}{v_2}}{\ln \frac{L_{v_1}}{L_{v_2}} - 3 \ln \frac{v_1}{v_2} - \ln \frac{A_{v_1}}{A_{v_2}}}. \quad (1.5.12)$$

Так как отношение  $A_{v_1}/A_{v_2}$  может быть и больше и меньше единицы (оно зависит от выбора частот  $v_1$  и  $v_2$ ), то цветовая температура может быть и больше и меньше  $T$ .

Цветовая температура нечерного тела равна такой температуре абсолютно черного тела, для которой отношения яркостей  $L_{v_1}/L_{v_2}$  обоих тел равны. Так как при измерениях обычно используют значения частот на краях видимого спектра, то равенство отношений яркостей означает приблизительно равенство цветности черного и исследуемого нечерного тела.

### § 6. О ГРАНИЦАХ ПРИМЕНИМОСТИ ФОТОМЕТРИИ

**Что изучает фотометрия?** Точное выяснение предмета фотометрии в рамках самой фотометрии вообще невозможно. Фотометрия есть часть оптики и, чтобы найти эту часть, необходимо исходить из основных проблем и методов всей оптики как чего-то целостного. Оптику, как и любую другую науку, нельзя разбить формально на изолированные части. Все разделы оптики тесно связаны между собой и понять один без другого по существу невозможно.

Подобное рассуждение относится не только к оптике, но и вообще к физике. Оптику невозможно понять без теории электричества, без квантовой механики, без теории колебаний и волн, без теории относительности, термодинамики и статистической физики, без всех других разделов нашей науки.

Как мы уже говорили, фотометрия развивалась в основном эмпирически или, лучше сказать, феноменологически. Она отвлекалась от проблем строения света, от диалектического единства его волновых и корпускулярных свойств. Ей было важно правильно осветить вопросы светотехники, научиться характеризовать интенсивности излучения, научиться измерять их, создавать источники и приемники излучения. Основы фотометрии были заложены еще Бугером и Ламбертом. С тех пор понятия фотометрии практически не изменились.

Фотометрия изучает свойства света, а их нельзя описывать только одной интенсивностью. Излучение характеризуется фазой, длиной волны, поляризацией, длиной цуга, тем или иным спектральным составом. Разные световые потоки обладают разной когерентностью, могут интерферировать, дифрагировать.

Из этого, безусловно, следует, что необходимо четко сформулировать границы применимости фотометрии, правильно

пользоваться ее понятиями, не выходить за пределы допустимого.

Очертить место фотометрии в оптике можно только с точки зрения более общих наук: классической электродинамики, квантовой электродинамики и, быть может, больше всего с позиций статистической оптики.

В 1977 г. вышел в свет обзор Г. В. Розенберга, посвященный всем этим проблемам [20]<sup>31)</sup>. Автор поставил немало вопросов: почему фотометрия (и возникшая на ее основе теория переноса излучения) стала обособленным разделом оптики? Каким образом формирующие его достаточно примитивные представления устояли перед напором современной науки? Почему они не были сметены ни вековым развитием классической электродинамики, ни такими «взрывами», как возникновение квантовой электродинамики и статистической оптики? Все эти науки резко изменили лицо оптики, сделали ее молодой, современной. Оптика изменяется, изменяется быстро. В оптику вошла ныне квантовая электроника, т. е. учение о свойствах лазеров и их излучении, интегральная оптика, нелинейная оптика, голография.

И тем не менее фотометрия сохранила свое лицо, практически не изменилась. Кое-что, разумеется, добавилось, но основное содержание, все главные принципы остались прежними.

Источником такой изолированности и ограниченности фотометрии стала бесплодность многочисленных попыток как-то связать ее с электромагнитной теорией света, сделать фотометрию частным случаем этой теории. Исключение только одно — распространение плоской монохроматической волны. Только для такой волны удалось сопоставить создаваемую ею освещенность с вектором Пойнтинга. В этом частном случае все ясно — интенсивность света пропорциональна квадрату напряженности электрического поля.

Произвольное электромагнитное поле длительное время вообще не поддавалось фотометрической трактовке. Это очевидно хотя бы из анализа любой интерференционной картины: понятия яркости и поляризации лишаются всякого физического смысла при суперпозиции когерентных (и даже частично

<sup>31)</sup> Георгий Владимирович Розенберг (1914—1981 гг.) — московский физик, долгие годы работавший в Институте физики атмосферы АН СССР. Крупный специалист в области рассеяния света и переноса лучистой энергии. Вместе с белорусскими физиками он принимал активное участие в организации первого в СССР научного совещания по спектроскопии рассеивающих сред (29—30 марта 1956 г.). В нем участвовали тогда представители около 30 научных учреждений. Г. В. Розенберг выступил с двумя основными докладами. С тех пор научные совещания по этой тематике стали проводиться регулярно. На первом совещании было заслушано всего 15 докладов, на следующих — сотни. Это направление спектроскопии и физической оптики быстро развивается.

когерентных) световых потоков различных направлений. Многие световые поля вообще не могут быть описаны в фотометрических понятиях. К ним относятся, в частности, поле от дифракционной решетки и даже поле, которое образуется в опыте Юнга при интерференции света от двух щелей. Методами фотометрии никак не описать стоячие волны, электромагнитное поле внутри частицы с отражающими стенками или поле внутри просветляющих слоев, которыми покрываются, например, объективы оптических приборов.

Приведенные примеры показывают, что фотометрия отнюдь не всесильна, а, наоборот, весьма ограничена. Это ограничение надо иметь в виду при ее практическом использовании.

Применение фотометрических соотношений к сложному световому полю возможно только в случае, если его можно рассматривать как совокупность некогерентных световых пучков. Именно на этой основе возникла современная и весьма эффективная теория переноса лучистой энергии, позволяющая исследовать, например, многие проблемы рассеяния света в атмосфере, воде, фотослоях, в самых разнообразных мутных средах.

Уравнения переноса принципиально формулируются в рамках фотометрических представлений и существенно опираются на предположение о расщеплении светового поля в рассеивающей среде на некогерентные между собой световые пучки. Однако границы применимости уравнений теории переноса по-прежнему не всегда ясны. В принципе в каждом конкретном случае нужен анализ возможной когерентности световых потоков.

Рассмотрим еще одну сторону проблемы, также освещенную в [20]. Фотометрия развивалась всегда параллельно с геометрической оптикой, но в то же время как самостоятельная наука. По сути дела, геометрическая оптика и фотометрия весьма близки друг к другу; они исследуют один и тот же предмет — световой луч, воспринимаемый как поток фотонов, не взаимодействующий с другими потоками. Геометрическая оптика изучает закономерности распространения световых потоков в разных средах, фотометрия — проблемы, связанные с интенсивностями этих потоков, распределением энергии при переходе из одной среды в другую, с законом сохранения энергии. По существу, они должны слиться в одну единую науку, и то дробление, которое имеет место до сих пор, явно нецелесообразно.

**Фотометрия и наблюдаемость.** Как мы только что отметили, при анализе границ применимости фотометрии возникает множество проблем: как, например, ввести фотометрические понятия для произвольной пространственно-временной структуры поля излучения? Сколько параметров необходимо знать

для исчерпывающего описания светового цуга? И т. д. и т. п.

В рамках электромагнитной теории на этот вопрос отве-тить трудно. Чтобы понять существо-проблемы, необходимо возвратиться к истории фотометрии и вспомнить ее чисто эм-пирическое происхождение; фотометрия имеет дело только с наблюдаемыми величинами. Природа фотометрических величин принципиально неотделима от специфики процесса изме-рения, от прибора. Для процесса измерения всегда характерна квадратичность приемников излучения, конечность их размеров и конечность времени измерения. Тем самым измери-тельный прибор всегда осредняет значение измеренной величины и в пространстве, и во времени. Пространственные мас-штабы прибора всегда намного больше длины волны. Дли-тельность акта любого измерения всегда намного больше периода световых колебаний. На это существенное обстоя-тельство обратил внимание еще Планк. Тут важны не толь-ко технические причины. Как следует из законов квантовой механики, решающее значение приобретает принцип неопре-деленности. Согласно этому принципу, невозможно, в частно-сти, построить мгновенный оператор плотности фотонов в точ-ке. Такая возможность появляется только при достаточном осреднении пространства и времени, т. е., иначе говоря, для светового цуга или светового луча.

Мы будем еще не раз рассматривать все эти вопросы, име-ющие принципиальное значение для определения основных понятий оптической науки, для определения возможного и невозможного в оптике.

На данной стадии, повторяемся, мы должны помнить только, что фотометрия строится в терминах 'наблюдаемых величин применительно к понятию светового луча как совокуп-ности некогерентных световых цугов. Естественно произвести также объединение геометрической оптики, фотометрии и поляриметрии в одну общую науку. Даже непонятно, как могла современная фотометрия, описываемая в бесчисленном множестве монографий и учебников, отвлекаться от поляриза-ции светового луча. Мы уже говорили о параметрах Стокса. Они также имеют прямое отношение к предмету фотометрии, описывают не плоскую волну и не поле излучения вообще, а именно световой луч с той или иной поляризацией.

Проблемы светового поля необходимо анализировать на всех этапах развития оптической науки, особенно статисти-ческой оптики, теории когерентности, теории переноса лучи-стой энергии и теории рассеяния. Все эти проблемы быстро развиваются. Желающие ознакомиться с ними могут про-честь обзор [20] и цитированную там богатую литературу.

А сейчас мы вернемся к классической фотометрии, к рас-смотрению работы глаза человека и проблемам цветоведения. Они имеют большое практическое значение.

## ЛИТЕРАТУРА

### К ГЛАВЕ 1

1. Фриш С. Э. Оптические методы измерений. Л., 1976. Ч. 1. 126 с.
2. Фабри Ш. Общее введение в фотометрию. Л.; М., 1934.
3. Мешков В. В. Основы светотехники. М., 1979. Ч. 1. 368 с.
4. Лихонинский С. Д., Блюдин А. П. Светотехника. Л., 1941.
5. Гуревич М. М. Введение в фотометрию. Л., 1968. 244 с.
6. Гершун А. А. Световое поле. Л., 1936.
7. Сапожников Р. А. Теоретическая фотометрия. М., 1977. 264 с.
8. Гершун А. А. Избранные труды по фотометрии и светотехнике. М., 1958. 550 с.
9. Гуревич М. М. Фотометрия: Теория, методы и приборы. Л., 1983. 268 с.
10. Справочная книга по светотехнике: Световые приборы и источники света. М., 1956.
11. Гуторов М. М. Сборник задач по основам светотехники. М., 1977.
12. Шицловский А. А. Прикладная физическая оптика. М., 1961. 822 с.
13. Рвачев В. П. Введение в биофизическую фотометрию. Львов, 1966. 378 с.
14. Рвачев В. П. Основы экспериментальной фотометрии и спектрофотометрии. Гомель, 1977.
15. Бугер П. Оптический трактат о градации света. М., 1950.
16. Афанасьев В. А. Оптические измерения. М., 1981. 229 с.
17. Майзель С. О. Свет и зрение. Л.; М., 1932.
18. Бабко А. К., Пилипенко А. Т. Фотометрический анализ: Общие сведения и аппаратура. М., 1968. 388 с.
19. Мельников Ю. Ф. Светотехнические материалы. М., 1976.
20. Розенберг Г. В. // УФН. 1977. Т. 121, вып. 1. С. 97—138.
21. Иванов А. П. Оптика рассеивающих сред. Мн., 1969. 592 с.
22. Вафиади В. Г. Фотоэлектрическая автоматика. Мн., 1966. 208 с.
23. ГОСТ 7601-78. Физическая оптика. М., 1979.
24. Вавилов С. И. // Собр. соч.: В 5 т. М., 1954. Т. 1. С. 80—83.
25. Левшин В. Л. Фотолюминесценция жидких и твердых тел. М.; Л., 1951.
26. Степанов Б. И., Грибковский В. П. Введение в теорию люминесценции. Мн., 1963. 443 с.
27. Вавилов С. И. Глаз и Солнце: О свете, Солнце и зрении. 9-е изд. М., 1976. 127 с.
28. Гершун А. А. Принципы и приемы световой маскировки. М.; Л., 1943.
29. Вейнгеров М. Л. // Автоматические газоанализаторы: Сб. М., 1961. С. 177—192.
30. Гвоздева Н. П., Коркина К. И. Прикладная оптика и оптические измерения. М., 1976. 383 с.; Эпштейн М. И. Измерение оптического излучения в электронике. М., 1975. 247 с.
31. Демчук М. И., Иванов М. А. Статистический одноквантовый метод в оптико-физическом эксперименте. Мн., 1981. 176 с.; Данилевич В. В., Чернявский А. Ф. Временные измерения в физическом эксперименте. М., 1984. 106 с.
32. Анисимова И. Д., Викулин И. М., Зотов Ф. А., Курмишев Ш. Д. Полупроводниковые фотоприемники. М., 1984. 216 с.; Конозенко И. Д. // УФН. 1965. Т. 61, вып. 1. С. 283—308.
33. Гуревич М. М. Цвет и его измерение. М., 1950.
34. Волькенштейн А. А., Куволдин Э. В. Фотоэлектрическая импульсная фотометрия. Л., 1975. 192 с.
35. Миберн Дж. Обнаружение и спектрометрия слабых источников света. М., 1979. 304 с.; Берковский А. Г., Гаванин В. А., Зайдель И. Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. М., 1976. 344 с.
36. Асатиани В. С. Биохимическая фотометрия. М., 1957.

37. **Мосс Т. С.** // УФН. 1962. Т. 78. С. 93—121.
38. **Воропай Е. С., Дмитриев С. М., Ермалицкий Ф. А., Чернявский А. Ф.** // Импульсная фотометрия: Сб. 9. Л., 1985. С. 102—105; **Воропай Е. С., Карась В. И.** // Метрология. 1985. № 9. С. 31—38; **Воропай Е. С.** // Измерительная техника. 1985. № 3. С. 19—21.
39. **Прокофьев В. К.** Фотографические методы количественного спектрального анализа металлов и сплавов. Ч. 2: Методика. М.; Л., 1951.
40. **Степанов Б. И.** // ЖЭТФ. 1950. Т. 20, вып. 10. С. 948—955.
41. **Слободская П. В., Степанов Б. И.** // Тр. ГОИ. 1951. Т. 23, вып. 133. С. 5—15.
42. **Михельсон В. А.** Очерки по спектральному анализу. Закон Кирхгофа и лучеиспускание идеально черного тела. Варшава, 1901.
43. **Планк Макс.** Избр. труды. М., 1975. 788 с.
44. **Апанасевич П. А., Айзенштадт В. С.** Таблицы распределения энергии и фотонов в спектре равновесного излучения. Мин., 1961. 251 с.
45. **Рэлей Дж. В.** Волновая теория света. М.; Л., 1940; Теория звука: В 2 т. М., 1955.
46. **Джинс Дж. Г.** Движение миров. М., 1933.
47. **Гершун А. А.** // УФН. 1952. Т. 46, вып. 3. С. 388—395.
48. **Сапожников Р. А.** // УФН. 1960. Т. 70, вып. 2. С. 387—390.
49. **Гуревич М. М.** // УФН. 1955. Т. 56, вып. 3. С. 417—424.
50. **Гуревич М. М.** // УФН. 1962. Т. 78, вып. 2. С. 463—470.
51. **Гуревич М. М.** Модель солнечного излучения. М., 1963.
52. **Макарова Е. А., Харитонов А. В.** Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная. М., 1972.
53. **Исследования по использованию солнечной энергии.** М., 1957.
54. **Бринкворт Б. Дж.** Солнечная энергия для человека. М., 1975.
55. **Иванов А. П.** Электрические источники света. Т. 1: Лампы накаливания. М., 1938.
56. **Иванов А. П.** Электрические источники света. Т. 2: Лампы газового разряда. М., 1948.
57. **Вознесенский З. С., Скобелев В. М.** Электрические источники света. М., 1957.
58. **Кнорринг Г. М.** Осветительные установки. Л., 1981.
59. **Газосветные лампы: Лампы тлеющего разряда, ртутные лампы типа ИГАР, ПРК, СВДШ: Каталог.** М., 1956.
60. **Маршак И. С.** Импульсные источники света. М., 1963. 336 с.
61. **Капцов Н. А., Годхберг Д. А.** // УФН. 1951. Т. 43, вып. 3. С. 620.
62. **Фабрикант В. А.** // УФН. 1945. Т. 27, вып. 2. С. 159—198.
63. **Нилендер Р. А.** Люминесцентные лампы и их применение. М., 1948.
64. **Петров В. В.** Известие о гальвано-вольтовых опытах. СПб., 1903; М., 1934.
65. **Радиационные измерения температур слабонагретых тел / Под ред. Вафиади В. Г. и Мирошникова М. М.** Мин., 1969. 196 с.
66. **Поскачей А. А., Чуборов Е. П.** Оптико-электронные системы измерения температуры. М., 1979.

### § 1. ИЗ ИСТОРИИ ОФТАЛЬМОЛОГИИ И ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Изучение зрения — важнейшая задача многих наук: фотометрии, физиологической оптики, офтальмологии, светотехники, колориметрии. Первые попытки изучения свойств глаза были связаны с офтальмологией, с лечением болезней зрительного аппарата. В истории этой науки можно выделить два периода. Первый период — пассивное накопление наблюдений — продолжался примерно два тысячелетия до нашей эры и далее до XVIII ст. Второй период продолжается и в настоящее время. Это период развития офтальмологии как особой науки, основанной на данных других наук: физиологии, анатомии, биохимии и, разумеется, оптики.

Глаза пытались лечить всегда. От ассирио-ававилонской культуры сохранилась рукопись (2250 лет до н. э.), в которой описываются, в частности, болезни глаз. В Древнем Египте (1500 лет до н. э.) были описаны уже 28 болезней глаз и методы их лечения.

В древнегреческой медицине (Гиппократ, 460—377 гг. до н. э.) имеются попытки описать строение глаза, его развитие и происхождение болезней. Последним ученым-медиком греко-римской эпохи был Клавдий Гален (131—201 гг. н. э.). Его представления об анатомии глаза, несмотря на их примитивность и ошибочность, сохранились до XVII в. Гален считал, например, что главной частью глаза является хрусталик и именно на нем фиксируются зрительные впечатления.

Свойства глаза древние ученые еще не знали. Методы лечения болезней носили сугубо эмпирический характер. Отсутствие сведений о строении глаза и механизме зрения не способствовало развитию оптического приборостроения. Оптических приборов тогда не существовало.

Не знали свойств глаза и механизма зрения не только медики, но и представители других наук. В своей работе «Глаз и Солнце» [1] С. И. Вавилов пишет: «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, излагавшим-

ся теми же Евклидом (III в. до н. э.) и Птолемеем (II в. до н. э.), которые оставили бессмертные творения в области геометрии и астрономии» [1, с. 9].

Да, именно Евклид вслед за Платоном был автором представлений о зрительных лучах, якобы исходящих из глаза. И, что удивительно, на основе этих неверных представлений греческие ученые создали много верного и, в частности, теорию отражения света от плоских и сферических зеркал. Евклид сформулировал закон прямолинейного распространения света. В своих трудах он рассматривал также образование тени. Именно Евклида можно по праву считать родоначальником геометрической оптики.

И все же: лучи света, исходящие из глаз!??

Вот что говорил по этому поводу Платон в своем естественнонаучном диалоге «Тимей» [1]:

«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 краткий огонь, свойственный всякому дню. И боги сделали так, что родственный дневному свету огонь, находящийся внутри нас, вытекает очищенным через глаза, которые боги сгостили, 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» [1, с. 8—9].

Эта точка зрения сохранилась надолго. Ее защищал уже в IV в. н. э. Дамиан. По его мнению, зрение существенно отличается от всех других органов чувств; глаз не способен воспринимать что-либо извне. Шарообразность глаза доказывает, по Дамиану, что лучи исходят из него. То, что лучи состоят из света, доказывается также молниями, иногда вспыхивающими в глазу. Кроме того, у некоторых животных ночью глаза светятся.

Да, труден процесс познания. Древние не знали еще причин формирования изображения, не знали линз, не знали роли хрусталика глаза. Получение изображений с помощью глаза было загадкой более трудной, чем определение закономер-

ностей ночного неба или анализ основных законов геометрии. Все это и привело к понятию зрительных лучей как каких-то пальцев, буквально ощупывающих внешний мир и познающих его (см. подробнее [1]).

Понятие о зрительных лучах просуществовало очень долго, до начала XVII в. Несмотря на причудливость, это понятие было полезным и для своего времени прогрессивным. Оно позволило, в частности, построить правильную теорию изображений, получаемых с помощью зеркал. Понятием о зрительных лучах пользовался даже Галилей.

В древности теория зрительных лучей была не единственной теорией зрения. Ей противостояли еще более фантастические представления Эпикура и Лукреция о «слепках» с предметов, летящих во всех направлениях и попадающих в глаз.

Мы уже не раз подчеркивали, что процесс познания идет диалектически, противоречиво. И очень часто правильные взгляды возникают путем проб и ошибок, путем весьма своеобразных гипотез. И совсем не так редко неверные гипотезы правильно объясняют некоторые исходные экспериментальные факты и лишь дальнейшее научное исследование заставляет отказаться от них. Так было с понятиями упругого эфира, электромагнитного эфира, теплорода, с теорией истечения Ньютона.

В средние века развитие офтальмологии, физиологической оптики, как и всей медицины, как и всей физики, затормозилось. Следует отметить, однако, 9 лечебных книг Эгинуса (VII в.). Три из них посвящены глазным болезням.

Арабские ученые оставили 12 подробных руководств, посвященных болезням глаза. «Понятная книга для глазных врачей», составленная Али-бен-Изой (XI в.) служила основным руководством и для европейских врачей почти до XVIII в. Глазным болезням посвящены также многие страницы «Канона врачебного искусства», написанного Ибн-Синой (Авиценной), крупнейшим ученым, философом и поэтом Средней Азии (XI в.).

Серьезный шаг в развитии учения о глазе сделал арабский ученый Альхасен (Абу Али Хайсама, 965—1039 гг.). Его книга «Сокровище оптики» была переведена на латинский язык в XII в. и распространялась в рукописи. Ее первое издание — 1572 г. О полувековой задержке издания следует пожалеть, так как в трактате Альхасена сделан ряд важнейших заключений. Строение глаза он описывает в соответствии с точкой зрения Галена. Вместе с тем чисто экспериментально он доказывает несостоительность взглядов Платона и Евклида о свете как о лучах, выходящих из глаза и «ощупывающих» предметы. Согласно Альхасену, свет есть нечто внешнее по отношению к глазу и зрительный образ получается при помощи лучей, которые падают на глаз. Каждой точке

наблюдаемого предмета соответствует некоторая воспринимающая точка глаза<sup>1)</sup>.

В конце XIII в. в Италии были изобретены очки. Это сделано чисто эмпирически, авторы такого выдающегося открытия остались неизвестны. Ими были шлифовальщики и полировщики стекол; они часто подносили свои изделия к глазам и случайно обнаружили усиление остроты зрения при работе с некоторыми из них.

Однако ученые-оптики, которые в то время уже появились и публиковали свои работы, к изобретению очков отношения не имели. Более того, в некоторых исторических исследованиях утверждается, что ученые-оптики считали это изобретение вредным. Вот одно из высказываний ученых тех лет [2]: «Основная цель знания — знать правду. Линзы для очков дают возможность видеть предметы большими или меньшими, чем они есть в действительности; через линзы можно увидеть предметы ближе или дальше, иной раз, кроме того, перевернутыми, деформированными или ошибочными. Следовательно, они не дают возможности видеть действительность» [3, с. 123]. И далее совершенно уникальный вывод: «Поэтому, если вы не хотите быть введенными в заблуждение, не пользуйтесь линзами» (там же).

Все это еще раз подтверждает, что механизм зрения был тогда совершенно неясен. С. И. Вавилов пишет по этому поводу: «Очки, несмотря на всю их удивительность для человека XIV и XV вв. и практическую важность, не сделались основой для дальнейшего развития оптики. Книги Альхасена, Витело, Бэкона мирно лежали в монастырских и университетских библиотеках, в университетах читались оптические курсы как часть повышенного курса, именитые люди исправляли свое зрение в старости очками, но оптическая наука в XIV и XV вв., если не говорить о перспективе, имевшей значение только для художников, их игнорировала».

Для офтальмологии очки стали решающим фактором ее развития. Существенное ускорение она получила в конце XV в. в значительной мере благодаря Леонардо да Винчи [3]: «Когда будешь излагать науку..., — писал он, — не забудь под каждым положением приводить его практические применения, чтобы твоя наука не была бесплодна» [с. 23]. Леонардо да Винчи был художником. И на его рисунках, в частности, встречается нередко изображение строения человеческого глаза, хода лучей в нем, построение хода лучей в линзах. В 1509 г. им предложена конструкция станка для шлифовки вогнутых зеркал и методы изготовления очковых линз. Разу-

<sup>1)</sup> Сейчас это утверждение кажется элементарным, но сколько веков прошло, прежде чем оно было высказано! Само понятие «простое» изменяется во времени.

меется, ход лучей в глазу был построен не строго, так как закон преломления света был еще неизвестен.

Леонардо да Винчи предложил и построил модель глаза и провел с нею ряд интересных экспериментов. Это был совершенно новый подход к изучению проблем офтальмологии и физиологии зрения вообще. «Чтобы увидеть, какую функцию выполняет роговая оболочка в отношении зрачка,— писал он,— вели сделать из хрусталия нечто подобное роговой оболочке глаза» [3, с. 708].

Приведем еще несколько цитат из работ Леонардо да Винчи (см. подробнее [3]). «Опыт, показывающий, как предметы посылают свои изображения или подобия, пересекающиеся в глазу в водянистой влаге. Это станет ясно, когда сквозь маленькое круглое отверстие изображения освещенных предметов проникнут в очень темное помещение, тогда ты уловишь также изображения на белую бумагу, расположенную внутри указанного помещения неподалеку от этого отверстия, и увидишь все вышеуказанные предметы на этой бумаге с их собственными очертаниями и красками. Но будут они меньших размеров и перевернутыми по причине упомянутого пересечения» [3, с. 712]. Здесь Леонардо да Винчи рассматривает образование изображения на сетчатке глаза по аналогии с образованием изображения в камере-обскуре. Тем самым им поставлен один из основных вопросов физиологической оптики.

В своих работах Леонардо да Винчи подробно рассматривает вопросы аккомодации и адаптации глаза. «Зрачок глаза получает столь разнообразные размеры, сколь разнообразна светлота и темнота предметов, которые предстают перед ним. В этом случае природа пришла на помощь зрительной способности, которая, будучи поражена чрезмерным светом, имеет возможность сокращать зрачок глаза и, поражаемая различной темнотой, шире раскрывать это светлое отверстие наподобие отверстия кошелька. И природа поступает здесь, как тот, у кого в помещении слишком много света, закрывающего половину окна, больше или меньше, смотря по надобности, и когда приходит ночь, он открывает все окна, чтобы лучше видеть внутри помещения. И природа прибегает здесь к постоянному выравниванию, увеличивая и уменьшая зрачок соразмерно градациям темноты и света, непрестанно перед ним возникающим» [3, с. 723].

Удивительно, как много сделал этот человек. Именно он пытался теоретически обосновать действие очков, использовать их для борьбы с дальнозоркостью и близорукостью. В самом конце XV в., изучая бинокулярное зрение, он создал первый стереоскоп.

А ведь проблемы работы глаза, как и вообще проблемы фотометрии, были лишь второстепенными направлениями его

яркой жизни. Как тут не вспомнить слова И. П. Павлова: «Прорвавшейся страстью дышит период, недаром названный эпохой Возрождения, период начала свободного художества и свободной исследовательской мысли в новейшей истории человечества. Приобщение к этой страсти всегда останется могучим толчком для теперешней художественной и исследовательской работы. Вот почему художественные и научные произведения этого периода должны быть постоянно перед глазами теперешних поколений». Вот почему автор настоящей монографии все время отвлекается от изложения основного материала и старается рассказать об истории вопроса. Изложение предмета науки в отрыве от истории ее развития во всяком случае непедагогично<sup>2)</sup>.

И все же физиологическая оптика и офтальмология развивались в те годы медленно, хотя после Галилея, Торричелли, Тихо-Браге и Кеплера развитие других разделов прикладной оптики резко ускорилось. Были созданы зрительные трубы, телескопы, микроскопы. Но механизм действия глаза по-прежнему оставался неясным. Положение изменилось только после Декарта.

Мы уже не раз говорили о работах Декарта. Он внес заметный вклад во многие науки, в том числе и в оптику, и в физиологию глаза (1632 г.). В этой работе [4] Декарт дал обобщение всего уже известного и много нового, дал правильные представления об основных элементах и механизме действия зрительного аппарата, способах коррекции глаза. Надо напомнить, что в те годы анатомия глаза как наука только зарождалась. А Декарт уже четко формулировал вопрос о характере изображения, возникающего на сетчатке, сравнивал его с изображением в камере-обскуре, в отверстие которой вставлена линза.

Декарт изучает зрение не вообще, а чтобы улучшить его. Трудно улучшать его, не зная, как образуется изображение, чем обусловлено его качество. Характерна следующая мысль Декарта [2]: «Поведение человека в жизни зависит от чувств, среди которых чувство зрения — наиболее разностороннее и благородное; несомненно, что изобретения, служащие для его усиления, являются самыми полезными из всех остальных. Трудно найти другое изобретение, в большей степени усиливающее его, чем те чудесные зрительные трубы, которые хотя и находятся в употреблении с недавнего времени, уже позволили открыть новые светила на небе и новые предметы

<sup>2)</sup> К сожалению, исторические исследования, посвященные развитию физики, чаще всего трактуют только о давно прошедших временах; в лучшем случае рассматривается становление квантовой механики или теории относительности. А ведь уже надо писать научную историю послевоенной физики, физики 50—80-х годов. Здесь темпы развития чрезвычайно велики и изучение направлений творческого поиска крайне необходимо.

на Земле в гораздо большем числе, чем это было возможно до сих пор. Отодвигая границы зрения намного дальше, чем позволяло воображение наших предков, они как бы проложили нам путь к гораздо более глубокому и совершенному, чем прежде, знанию природы» (с. 33).

Здесь чрезвычайно четко формулируются общие задачи научного исследования, его прикладной аспект. Мы уже отмечали этот поворот науки, характерный для эпохи Возрождения, цитируя Леонардо да Винчи. Новое понимание задач ученых, отход от сколастики, от бесконечного повторения взглядов Аристотеля, борьба с церковным мракобесием — именно это импонирует нам, когда мы говорим о науке XVII в.

Но как мало знали они в те годы. Ведь только Декарт (независимо от Снеллиуса) дал формулировку закона преломления. А как можно описать закон образования изображения на сетчатке глаза, не зная закона преломления!?

Дальнейшее изучение свойств глаза перешло в основном в руки врачей. Однако оно развивалось по-прежнему не быстро и основные успехи относятся уже к XIX ст. Первые самостоятельные кафедры глазных болезней появились в университетах Австрии и Венгрии. В 1850 г. крупнейший ученый тех лет А. Графе основал в Германии первую глазную клинику. Лечение больных совмещалось с научными исследованиями, созданием специальной медицинской аппаратуры.

Особую роль в развитии физиологии зрения сыграл Г. Гельмгольц<sup>3)</sup>. Уже в 1853 г. он создал теорию аккомодации, в 1859—1866 гг. разработал учение о цветном зрении. Он же предположил, что зрительная оценка величины и удаленности предметов основана на своеобразных ощущениях, возникающих при движении мышц глаза.

<sup>3)</sup> Г. Л. Ф. Гельмгольц (1821—1894 гг.) — выдающийся немецкий естествоиспытатель. Главное дело его жизни — мемуары «О сохранении силы» (1847). Здесь впервые дана формулировка и математическое обоснование закона сохранения энергии, выявлен всеобщий характер этого закона, его справедливость для механических, тепловых, электрических и физиологических явлений. В 1882 г. Гельмгольц придал новую форму второму началу термодинамики, что позволило применить его к изучению химических процессов. Это стало одним из основных направлений физической химии. Гельмгольц ввел понятия свободной энергии, которая может превращаться в любые формы энергии, и связанной энергии, которая может превращаться только в тепловую энергию. Гельмгольц впервые доказал применимость принципа наименьшего действия к тепловым, электромагнитным и оптическим явлениям, связал его со вторым началом термодинамики, использовал в работе «Энергия волн и ветра» (1890). Гельмгольц заложил основы теории вихревого движения жидкостей. Впервые обнаружил явление колебательного разряда в контуре, состоящем из емкости и индуктивности. Впервые построил теорию аномальной дисперсии. Высказал идею об атомарном строении электричества. Ряд работ Гельмгольца относятся к акустике и теории слуха.

Работы Гельмгольца по физиологии также имели революционизирующее значение.

В России развитие научной медицины связано с деятельностью либеральной интеллигенции, воспитанной на произведениях А. И. Герцена и Н. Г. Чернышевского. Возникает земская медицина, собираются пироговские съезды. В середине XIX в. в России организуются университетские кафедры офтальмологии и начинается быстрое развитие этой отрасли науки. Создается отечественная школа офтальмологии, работают выдающиеся ученые А. Н. Маклаков, М. М. Воинов и А. А. Крюков в Москве, В. П. Добровольский и Л. Г. Беллярминов в Петербурге, Е. В. Аданюк в Казани, А. В. Иванов и А. В. Ходин в Киеве.

С первых дней советской власти развитие офтальмологии резко ускоряется. Создаются специализированные научные медицинские учреждения<sup>4)</sup>.

Физиологической оптикой сразу же стали заниматься и физики. В Москве академиком П. П. Лазаревым был организован Институт биологической физики. Одна из его основных задач — теория зрения [5]. Петру Петровичу Лазареву, его огромной научной, организационной и педагогической деятельности мы посвятим несколько страниц в конце главы.

В Ленинграде в 1918 г. Д. С. Рождественский создает Государственный оптический институт и в нем вскоре возникают лаборатория физиологической оптики, лаборатория фотометрии и лаборатория светотехники. В работы этого направления активно включается С. И. Вавилов и его ученики.

После возникновения лазерной физики применением лазеров в офтальмологии и одновременно изучением вредного влияния лазерного излучения на зрение стало заниматься особенно много физиков.

## § 2. РАБОТА ЗРИТЕЛЬНОГО АППАРАТА

**Строение глаза.** Устройство глаза весьма сложно. Мы не можем здесь вдаваться в подробности и упомянем только о самом важном. Для физиков, специально интересующихся фотометрией, физиологической оптикой или светотехникой, этих сведений, разумеется, недостаточно, им следует обратиться к соответствующей литературе. Хорошее изложение основных вопросов

<sup>4)</sup> Автору особенно хочется отметить Институт глазных болезней и тканевой терапии им. В. П. Филатова, созданный в Одессе в 1936 г. В этом научно-лечебном учреждении автор много лет лечил глаукому, перенес успешную операцию. Хочется выразить глубокую благодарность бывшему директору института Н. А. Пучковской, профессору Л. А. Линнику и кандидату медицинских наук И. Б. Чоковой. Л. А. Линник первый в СССР в 1962 г. начал применять лазеры в офтальмологии и вообще в медицине. Золотые руки И. Б. Чоковой навсегда запоминают многие, очень многие исцеленные ею больные, автор в их числе.

сов можно найти в монографии С. В. Кравкова «Глаз и его работа» [6] и во многих других монографиях и учебниках (см., например, [7—13]). Автор пользовался также специальной медицинской литературой, в которой есть сведения, полезные и для физиков.

Форма глаза близка к шаровидной (рис. 2.2.1). Его диаметр у взрослого человека близок к 24 мм. Наружная, фиброзная оболочка глаза представлена плотной эластичной

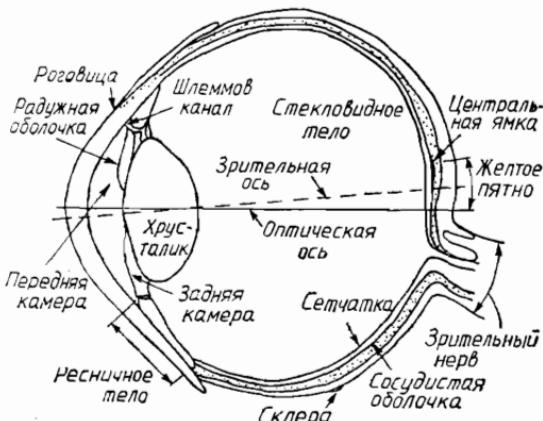


Рис. 2.2.1. Строение глаза

тканью. 90% этой ткани составляет непрозрачная часть — скlera, 10% — прозрачная роговица. Склера и роговица обеспечивают постоянство формы, объема и тонуса глаза. Фиброзная оболочка служит остовом для прикрепления глазодвигательных мышц. Ее пронизывают сосуды и нервы, в том числе и зрительный нерв. Роговая оболочка является одной из преломляющих (оптических) структур глаза. Преломляющая сила роговицы вместе с хрусталиком  $\sim 44$  диоптрии (определение понятия диоптрии см. ниже).

К склере примыкает сосудистая оболочка глаза. Она подразделяется на три части: радужную оболочку, цилиарное тело (рис. 2.2.2) и собственно сосудистую оболочку у задней части глаза.

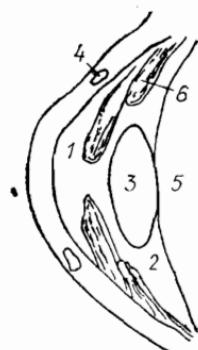


Рис. 2.2.2. Детали строения глаза: 1 — передняя камера, 2 — задняя камера, 3 — хрусталик, 4 — шлеммов канал, 5 — стекловидное тело, 6 — цилиарное тело

Радужная оболочка служит своеобразной диафрагмой, изменяющейся в зависимости от условий поступления света в глаз. Диаметр зрачка у взрослых изменяется от 2 (очень яркое освещение) до 8,5 мм (полная темнота). При нормальном (дневном) освещении размер зрачка здорового глаза равен приблизительно 3 мм. Диаметр зрачка зависит не только от освещенности, но и от состояния человека. Известно, например, что зрачки расширяются при нервном (эмоциональном) возбуждении, а также при болях. Зрачки сужаются не только при ярком освещении, но и при сходящемся взгляде, а также при рассматривании очень близко расположенных предметов.

Через зрачок происходит также отток внутриглазной жидкости, выделяющейся в цилиарном теле и определяющей величину внутриглазного давления. Радужная оболочка представляет собой пигментированную круглую пластинку, расположенную между роговицей и хрусталиком.

Цилиарное тело — это, образно говоря, железа внутренней секреции глаза. Кроме выработки внутриглазной жидкости оно осуществляет аккомодацию глаза (благодаря изменению кривизны поверхности хрусталика создает условия для ясного видения и фокусировки изображения предмета на сетчатой оболочке глаза).

Собственно сосудистая оболочка (хориоидия) — задний отдел сосудистого тракта. Она располагается внутри склеры. На ее долю приходится 2/3 всего сосудистого тракта. Хориоидия принимает участие в питании всех бессосудистых структур глаза и фотоэнергетических слоев сетчатки, в поддержании нормального уровня внутриглазного давления (офтальмotonуса). Толщина хориоидии до 0,2 мм в задней части и до 0,1 мм спереди. Благодаря пигменту она образует своеобразную темную камеру-обскуру, препятствующую отражению лучей, поступающих в нее через зрачок, и обеспечивающую получение на сетчатке четкого изображения. Если пигmenta в сосудистой оболочке мало, то зрение резко ухудшено.

Сетчатка — это своеобразное «окно в мозг», периферическое звено зрительного анализатора, внутренняя структура оболочек глазного яблока, выстилающая глазное дно. Задний отдел сетчатки примыкает к хориоидии. Он состоит из высокодифференцированной, прозрачной, мягкой, но малоэластичной нервной ткани. Это оптически деятельный участок сетчатки. Самым важным и очень тонким местом сетчатки является так называемое желтое пятно. Это область наиболее чувствительного восприятия зрительных ощущений. Она находится в 3—4 мм от виска и немного выше диска зрительного нерва.

Светочувствительными элементами сетчатки являются палочки и колбочки. При помощи колбочек осуществляется цветное восприятие, при помощи палочек — только световое. Общее число палочек во всей сетчатке 125—130 млн., колбочек —

6—7 млн. Плотность их расположения в разных отделах сетчатки неодинакова. В пределах центральной ямки желтого пятна плотность колбочек достигает 113—147 тыс./мм<sup>2</sup>, а палочки почти отсутствуют. К периферии плотность колбочек снижается до 3 тыс./мм<sup>2</sup>, одновременно увеличивается плотность палочек. Они появляются впервые на расстоянии 130 мкм от центральной ямки небольшими скоплениями, а затем образуют как бы частокол, окружающий каждую колбочку. Палочки достигают наибольшей плотности (до 170 тыс./мм<sup>2</sup>) в 5—6 мм от центральной зоны. К периферии их число уменьшается в 3—4 раза.

Палочки и колбочки — это отростки зрительных клеток. Они погружены в пигментный слой, непосредственно прилегающий к сети капилляров сосудистой оболочки. Во внешних члениках палочек присутствует зрительный пурпур — родопсин. В колбочках обнаружен другой фотопротеин — йодопсин, химическая природа которого окончательно не установлена.

Устройство сетчатки чрезвычайно сложно. Она содержит по крайней мере 10 слоев различного назначения (см. рисунки в работах [1, 6—8]).

Зрительный нерв соединяет сетчатку с головным мозгом. В зрительном нерве заключено около 1 млн. волокон. Внутриглазная часть нерва представлена диском диаметром до 2 мм. Область диска зрительного нерва не содержит фоторецепторов и является слепой зоной глазного дна (слепое пятно).

Перейдем теперь к прозрачным внутриглазным средам. К ним относятся хрусталик, стекловидное тело и внутриглазная жидкость передней и задней камеры (см. рис. 2.2.2).

Хрусталик — важнейшая оптическая часть глаза. На его долю приходится около трети преломляющей силы. Как уже упоминалось, при сокращении цилиарной мышцы хрусталик может автоматически изменять кривизну своей передней поверхности и приспосабливать глаз к ясному видению предметов, расположенных на различном расстоянии (аккомодировать).

Хрусталик представляет собой двояковыпуклое, гладкое с ровными контурами, прозрачное, плотноэластичное, бессосудистое тело, расположенное между радужной оболочкой и стекловидным телом. Толщина хрусталика ~4,6 мм, диаметр ~10, радиус кривизны передней поверхности до 10, задней до 9 мм.

Стекловидное тело располагается позади хрусталика и составляет 65% массы глаза (4 г). Стекловидное тело ограничено задним полюсом хрусталика, плоской частью цилиарного тела и областью диска зрительного нерва. На остальном протяжении оно прилегает к внутренней мемbrane сетчатки. В стекловидном теле содержится до 98% воды и ничтожное количество белков и солей. Оно прозрачно, бесцветно, почти

шаровидно (радиус кривизны  $\sim 9$  мм), желеобразно, эластично, не имеет сосудов и нервов. Жизнедеятельность и постоянство среды стекловидного тела обеспечиваются путем диффузии питательных веществ из внутрглазной жидкости через стекловидную мембрану. Коллоидное вещество стекловидного тела имеет высокое поверхностное натяжение. Стекловидное тело — опорная ткань глазного яблока.

Внутрглазная жидкость (или водянистая влага) содержится в задней и передней камерах глаза. В ее составе 99% воды, остальное — белки. Общее количество этой жидкости — 0,45 см<sup>3</sup>. Внутрглазная жидкость прозрачна. Коэффициент ее преломления почти такой же, как у роговицы, и, следовательно, она практически не преломляет световые лучи, проникающие в глаз. Внутрглазная жидкость создается цилиарным телом в задней камере глаза, проходит через зрачок в переднюю камеру и выходит через сложную дренажную систему и шлеммов канал в эписклеральные вены (см. рис. 2.2.2). Внутрглазная жидкость обеспечивает питание многих бессосудистых тканей глаза и стабильность внутрглазного давления.

Орбита, или глазница, — защитный костный остов глаза и его основных придатков (сосуды, нервы, мышцы, клетчатка, слезные железы).

Четыре прямые и две косые глазодвигательные мышцы обеспечивают хорошую подвижность глаза во всех направлениях.

#### Внутрглазное давление

$$P_0 = P_\alpha + P_v = \frac{F}{c} + P_v, \quad (2.2.1)$$

где  $P_\alpha$  — давление оттока,  $P_v$  — давление в венах,  $F$  — скорость поступления жидкости в глаз (мм<sup>3</sup> · мин<sup>-1</sup>),  $c$  — коэффициент легкости оттока, который равен количеству жидкости в мм<sup>3</sup>, оттекающей из глаза в 1 мин на каждый мм рт. ст. давления оттока. Уравнение (2.2.1) считается основным уравнением гидродинамики глаза<sup>5)</sup>. Ввиду малости коэффициента  $c$  восстановление нарушенного равновесия происходит медленно.

**О работе сетчатки.** Основная функция зрительного аппарата глаза — восприятие и трансформация света, приходящего от самосветящихся предметов или от предметов, отражающих и рассеивающих внешнее излучение, в реальные зрительные образы.

<sup>5)</sup> По мнению автора, ознакомившегося со специальной медицинской литературой, строго говоря, гидродинамики глаза пока еще не существует, и формулу (2.2.1) можно считать лишь нулевым приближением. Столь же примитивны методы измерения внутрглазного давления.

Свет, падающий на сетчатку, вызывает в ней сложные процессы, то, что называется зрительным актом.

При деятельности фоторецепторов — палочек и колбочек — происходят различные фотохимические превращения. Механизм этих процессов во многом еще неясен. В фоторецепторах осуществляется, очевидно, поглощение света с последующим возбуждением или разрушением молекул или целых комплексов молекул. Одновременно возникают обратные процессы восстановления исходного состояния фоторецепторов. При стационарном освещении они уравновешиваются. После прекращения облучения фоторецепторы возвращаются в первоначальное состояние. Природа фоторецептора, находящегося в палочках, в основном известна. Ведущую роль играет зрительный пурпур — родопсин. Природа фоторецептора в колбочках пока еще неясна; фотохимические процессы, происходящие в колбочках, значительно сложнее, так как они обеспечивают не только свето-, но и цветоощущение.

Продукты фотохимических превращений, а также возникающие одновременно электрические потенциалы служат раздражающим фактором в тех частях сетчатки, где возникают импульсы возбуждения, несущие зрительную информацию к центральной нервной системе. Процессы зрительного восприятия, протекающего в глазу, являются неотъемлемой частью деятельности мозга; восприятие света неразрывно связано с мышлением. Приблизительно 95 % информации, воспринимаемой человеком, приходится именно на зрение. Вследствие конечности скорости света и задержки нервных импульсов, поступающих в мозг, человек всегда видит происходящее немногого позже, видит прошлое.

Сетчатая оболочка, воспринимающая свет, может быть разделена на две части: центральную и периферическую. По функциональным свойствам они существенно различны. Именно поэтому говорят о центральном и периферическом зрении. Наиболее совершенное зрительное восприятие возможно, если изображение предмета попадает на область желтого пятна и особенно центральной ямки. Чем дальше от центра к периферии проецируется изображение предмета, тем менее отчетливо оно воспринимается. Центральный зрительный аппарат (колбочки) обеспечивает дневное зрение (высокая острота зрения и цветоощущение), периферический зрительный аппарат (палочки) — цветоощущение или сумеречное зрение, темновую адаптацию.

Способность глаза воспринимать мелкие детали предметов на большом расстоянии от глаза или различать две светящиеся точки, видимые под наименьшим углом, характеризует остроту зрения.

• Еще Р. Гук в конце XVII в. показал, что минимальный угол, при котором глаз может различать две точки, равен од-

ной минуте. Эта величина угла зрения и была принята впоследствии за интернациональную единицу остроты зрения. Острота зрения, при которой глаз различает две точки с таким угловым расстоянием, считается нормальной.

При угле зрения  $1'$  величина изображения на сетчатке равна 4,5 мкм. Диаметр колбочки равен 2,0—4,5 мкм. Принято считать, что для раздельного ощущения двух точек необходимо такое раздражение светочувствительных колбочек, чтобы между двумя облученными колбочками находилась по крайней мере одна необлученная.

У многих людей и целых народностей острота зрения бывает больше единицы.

Способность к ощущению света — свойство почти всех живых организмов. У простейших представителей животного мира зрительная функция ограничивается именно ощущением света, падающего на поверхность тела, где имеются клетки, приспособленные для фотохимического процесса. Специализированные органы зрения развивались впоследствии из этих светочувствительных клеток. Следует напомнить, что глаза человека отнюдь не самые сложные и высокоорганизованные.

Зрение человека и животных двойственno. Как уже отмечалось, колбочковая система служит в основном аппаратом дневного зрения, палочковая — ночного и сумеречного. Дневная острота зрения и цветоощущение — функции центрального зрения, цветоощущение — периферического. Светоощущение обусловлено обратимой фотохимической реакцией распада молекул родопсина на свету и их восстановлением в темноте. Как мы увидим в дальнейшем при описании опытов С. И. Вавилова и Е. М. Брумберга, светочувствительные элементы сетчатки могут работать под действием одного-двух квантов света, однако реальное ощущение света возникает только при воздействии 5—8 квантов. Отдельные светочувствительные элементы глаза превышают по чувствительности любые приемники света, однако только  $\sim 10\%$  световых квантов, падающих на глаз, достигают сетчатки. Остальные кванты теряются в роговице, внутриглазной жидкости, хрусталике, стекловидном теле.

Светоощущение характеризуется порогом раздражения (минимальным световым потоком, воспринимаемым глазом) и порогом различения (различением минимальной разницы в освещении). Порог раздражения для света с длиной волны  $\lambda \sim 500$  нм, как уже отмечалось, равен 5—6 квантам, или  $\sim 5 \cdot 10^{-18}$  кал·с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>. В идеальных условиях глаз мог бы видеть стеариновую свечу на расстоянии 27 км.

Цветоощущение как результат деятельности колбочек осуществляется при освещенности наблюдаемых предметов больше 30 лк. При освещении от 1 до 0,3 лк глаз переходит к сумеречному зрению; в этом случае функционируют и колбочки, и

Таблица 2.2.1. Участие колбочек и палочек (%) при переходе от дневного зрения к сумеречному и ночному

Зрительные клетки	Освещенность, лк							
	30	25	15	5	1	0,30	0,1	0,01
Палочки	0	18	27	38	60	82	92	100
Колбочки	100	82	73	62	40	18	8	0

палочки. Освещенность, меньшая 0,3 лк, обуславливает мезоптическое зрение за счет действия палочек. Более подробные сведения собраны в табл. 2.2.1.

Постепенность перехода от дневного зрения к сумеречному и ночному имеет большое практическое значение. Одна из важнейших особенностей сумеречного зрения — его бесцветность; при низких освещенностях колбочки не работают, цвета не воспринимаются. Недаром говорят: «ночью все кошки серы». При больших освещенностях палочки совсем не работают, они оказываются полностью ослепленными.

Вторая особенность сумеречного зрения — изменение кажущейся яркости (светлости) цветов. Днем наиболее ярким кажется зеленовато-желтый свет ( $\lambda=550$  нм), в сумерках — зеленый (510 нм). Это явление открыто Пуркинье. Красный, желтый и оранжевый цвета называются даже теплыми цветовыми тонами, голубой, синий и зеленый — холодными. В сумерках максимум чувствительности смещается в сторону коротких волн и приходится на  $\lambda=510$  нм. Поэтому теплые тона кажутся более темными, а холодные — более светлыми. Явление Пуркинье широко используется в разных областях оптики и в технике, например, при светомаскировке.

Третья особенность сумеречного зрения — его периферический характер. Центральное зрение практически отсутствует. Место наибольшей чувствительности периферической сетчатки к восприятию света находится в  $10-12^\circ$  от центра.

Четвертая особенность сумеречного зрения связана с темновой адаптацией. Темновая адаптация глаза — это его приспособление к работе в условиях слабого освещения. Адаптация колбочек завершается примерно за 7 мин, адаптация палочек — в течение часа. Срок адаптации связан со скоростью фотохимических превращений в палочках. Если предшествующее освещение длилось достаточно долго, то значительная часть молекул родопсина обесцвечивается и глаз теряет способность видеть в темноте. По мере восстановления светочувствительного материала происходит адаптация глаза к малым освещенностям.

Здесь стоит упомянуть об одной принципиально важной работе П. П. Лазарева. Теоретически и экспериментально он обосновал зависимость максимального уровня темновой адаптации глаза (время, необходимое для достижения максималь-

ной чувствительности глаза после прекращения облучения) от возраста человека. Он даже считал возможным по этой кривой определить возраст людей. Более того, с ее помощью Лазарев определил и возрастной предел жизнедеятельности нервных клеток человека (в том числе и зрительного аппарата) примерно в 150 лет.

Вернемся чуть подробнее к оценке периферического зрения. Его называют также полем зрения — это все пространство,

одновременно воспринимаемое неподвижным глазом. Границы поля зрения выражаются обычно в градусах (рис. 2.2.3). Периферическая часть поля зрения имеет большую протяженность. Наружные границы составляют со стороны носовой части в среднем  $60^{\circ}$ , с височной части —  $90^{\circ}$ , с лоб-

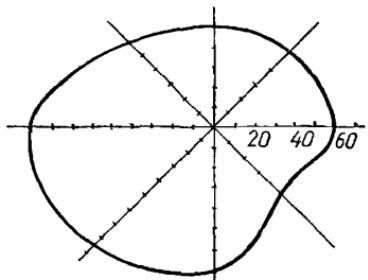


Рис. 2.2.3. Нормальные границы поля зрения

ной —  $50^{\circ}$ , с челюстной —  $70^{\circ}$ . В поле зрения различаются анатомические и физиологические границы. При различных заболеваниях, например, при глаукоме (повышенном внутриглазном давлении) зрительный нерв постепенно погибает и поле зрения резко сужается вплоть до полной потери зрения.

Поле зрения на монохроматические цвета значительно уже, чем на белый цвет. Это естественно, так как палочки не воспринимают отдельные цвета.

**Оптическая система глаза.** Свет, поступающий в глаз от внешнего источника и попадающий на светочувствительные рецепторы сетчатки, проходит первоначально через прозрачные среды глаза: роговицу, внутриглазную жидкость внутри передней камеры, хрусталик и стекловидное тело. На границах всех этих сред свет преломляется. Глаз является сложной оптической системой.

Чтобы найти свойства какой-либо оптической системы и ход лучей в ней, необходимо знать показатели преломления сред, радиусы кривизны преломляющих поверхностей, расположение различных преломляющих сред друг относительно друга. На основании данных в геометрической оптике (см., например, [14, 15]) рассчитываются положения кардинальных точек оптической системы, определяющих ход лучей на выходе из нее. Таких точек в оптической системе шесть: две главные точки, две узловые и две фокусные. Зная их расположение, нетрудно рассчитать величину, место и характер изображения предмета (прямое или обратное).

Мы не имеем возможности описывать здесь методы определения кардинальных точек. Для сложных систем это совсем не просто. Представление о фокусных расстояниях и главных

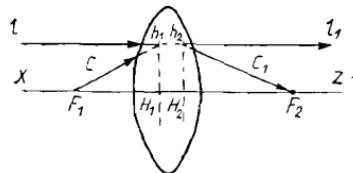


Рис. 2.2.4. Главные плоскости выпуклой линзы

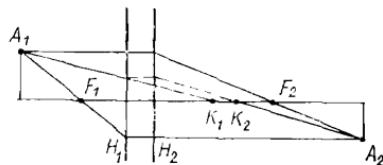


Рис. 2.2.5. Главные и узловые точки при построении изображения

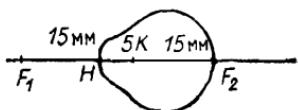
точках двояковыпуклой линзы дает рис. 2.2.4. Смысл фокусных расстояний  $F_1$  и  $F_2$  очевиден. В точке  $F_2$  сходятся лучи, падающие на линзу слева параллельно оптической оси, в точке  $F_1$  — такие же лучи, падающие на нее справа. Смысл точек  $h_1$  и  $h_2$  ясен из рисунка. Плоскости, перпендикулярные оси линзы и проходящие через точки  $h_1$  и  $h_2$ , называются главными плоскостями, точки  $H_1$  и  $H_2$  на пересечении главных плоскостей и оси линзы — главными точками.

Смысл узловых точек  $K_1$  и  $K_2$  произвольной оптической системы ясен из рис. 2.2.5. Луч, идущий в первой среде по направлению к первой узловой точке  $K_1$ , после преломления оказывается смещенным параллельно своему первоначальному направлению и выходящим из второй узловой точки  $K_2$ .

Как мы уже говорили, расчет всех этих точек для глаза затруднителен. Глаз — слишком сложная система. Кроме того, у каждого человека глаза различны. Поэтому для описания оптических свойств глаза пользуются средними характеристиками. Такой глаз называется схематическим, а его более простой вариант — редуцированным. Оптическая схема редуцированного глаза изображена на рис. 2.2.6. Предполагается, что такой глаз состоит из одной преломляющей поверхности, разделяющей две среды с разными показателями преломления. Наружная среда (воздух) имеет показатель преломления, равный 1, внутренняя среда (глаз) — равный 1,4. Радиус преломляющей поверхности редуцированного глаза равен 6,8 мм, преломляющая сила  $+58,82$  диоптрии (см. ниже). В редуцированном глазе два фокуса — передний и задний, одна главная и одна узловая точки.

Изображение рассматриваемых предметов получим четким, если фокус оптической системы глаза попадает на сетчатую

Рис. 2.2.6. Редуцированный глаз:  $F_1$  — передний фокус,  $F_2$  — задний фокус,  $H$  — главная точка,  $K$  — узловая точка



оболочку. Действительно, большинство наблюдаемых нами предметов находится на расстояниях, во много раз больших двойного фокусного расстояния, и их изображение будет находиться близко от фокальной плоскости глаза. Расстояние наилучшего зрения равно обычно 25 см. На таком расстоянии держат, например, книгу при чтении.

Для измерения преломляющей силы линзы или целой оптической системы пользуются величиной, обратной фокусному расстоянию:

$$D = 1/F. \quad (2.2.2)$$

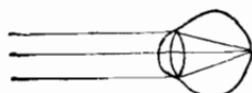
Ее называют оптической силой. За единицу оптической силы принята диоптрия — оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м.

Преломляющая сила оптической системы носит и другое название — рефракция. Связь ее с фокусным расстоянием однозначна. Однако для оценки свойств глаза одной рефракции недостаточно. Она не дает сколько-нибудь определенной информации о качестве зрительной функции глаза. Ввиду этого в физиологической оптике введено другое понятие — клиническая рефракция. В ней диоптрийная (физическая) рефракция рассматривается в связи со строением глаза и прежде всего длиной его оси. Как уже отмечалось, четкое изображение будет осуществляться в глазу, если оно попадает на сетчатку. Поэтому клиническая рефракция характеризуется положением фокуса по отношению к сетчатке.

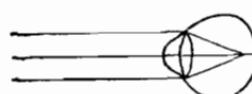
Если изображение предмета попадает на сетчатку, то клиническая рефракция нормальна (медики говорят — эмметропия). Слабая клиническая рефракция наблюдается при дальнозоркости (гиперметропия), сильная — при близорукости (миопия). В первом случае изображение предмета получается за сетчаткой, во втором — между хрусталиком и сетчаткой. Так как фокусное расстояние изменяется очень незначительно, то различие клинической рефракции связано с различием

расстояния от хрусталика до сетчатки.

*a* На рис. 2.2.7 изображены все виды клинической рефракции. Как при близорукости, так и при дальнозоркости изображение на сетчатке нечеткое, каждая точка предмета отображается кружком. В обоих случаях нужны очки: при близорукости необходимо ослабить,



*б*



*в*



*в* Рис. 2.2.7. Три вида клинической рефракции:  
*а* — нормальная, *б* — близорукость, *в* — дальнозоркость

при дальнозоркости усилить преломляющую силу глаза. В первом случае это достигается вогнутыми, во втором — выпуклыми линзами.

В некоторых случаях наблюдается астигматизм глаз. Оптическая система этих глаз асферична. В двух взаимно перпендикулярных плоскостях рефракции различны. Чаще всего астигматизм обусловлен эллипсоидальностью роговицы. Астигматизм компенсируется очками с цилиндрическими линзами.

Несколько слов надо сказать и об аккомодации. В повседневной жизни человеку приходится рассматривать предметы, находящиеся на разных расстояниях от глаза. Разумеется, они не всегда бесконечно далеки и поэтому даже при нормальной клинической рефракции изображение предметов не будет попадать строго на сетчатку. Чтобы устранить это явление и обеспечить предельную четкость изображения, глаз способен слегка изменять величину рефракции. Это происходит в основном за счет изменения кривизны передней поверхности хрусталика. Оно в свою очередь связано с действием цилиарных мышц глаза.

Область расстояний предмета от глаза, в которой благодаря аккомодации можно получить изображение, сфокусированное на сетчатке, называется областью ясного зрения (областью аккомодации). Объем аккомодации измеряется предельным количеством диоптрий, на которые глаз способен изменять свою рефракцию. Для нормальной клинической рефракции глаз хорошо видит предметы от бесконечности до расстояния от глаза  $\sim 10$  см. В этом случае объем аккомодации равен примерно 10 диоптриям.

Приведенные данные относятся к людям двадцатилетнего возраста. К 60—65 годам способность глаза к аккомодации уменьшается.

**Характер зрения.** Нормальное зрение характеризуется бинокулярностью, объемностью, стереоскопичностью. При нормальном бинокулярном зрении в обоих глазах на сетчатках получаются различные отчетливые изображения внешних предметов. Когда эти изображения передаются в кору головного мозга, происходит их слияние в одно объемное изображение. Бинокулярное зрение достигается благодаря нормальному тонусу наружных мышц обоих глаз, что обеспечивает параллельность их зрительных осей.

Бинокулярность зрения (одновременное видение обоими глазами) создает значительные преимущества зрительному анализатору: расширение поля зрения в горизонтальном направлении до  $180^\circ$ , увеличение четкости и яркости изображений, т. е. повышение остроты зрения, возможность определения расстояния до предмета.

Самое важное, что дает человеку бинокулярное зрение — это возможность стереоскопического зрения, возможность ви-

деть мир в трех измерениях. Ощущение глубины, объемности предметов возникает на основе рассматривания предмета двумя глазами. По существу устройство глаза гораздо проще устройства многих современных многолинзовых объективов. В глазе всего три строго оптические детали: диафрагма (зрачок), линза (хрусталик) и фоточувствительная сетчатка. И тем не менее глаз работает. И как работает! Можно только поражаться искусству природы, создавшей такое чудо — глаз, зрительный аппарат.

Некоторая небольшая степень стереоскопичности зрительных восприятий возможна и при монокулярном зрении: в этих случаях оценка глубины осуществляется степенью аккомодации, мышечным чувством...

Мы уже неоднократно обращали внимание на роль коры головного мозга в формировании зрительных ощущений. Это стало ясно отнюдь не сразу. До XX ст. в рецепторной теории, развивавшейся, в частности, Гельмгольцем, основная роль в слиянии изображений, воспринимаемых обоими глазами, отводилась сетчатке. Правильные представления о сущности зрения были разработаны биологами (И. М. Сеченовым, А. А. Ухтомским, И. П. Павловым), создавшими рефлекторную теорию ощущений и, в частности, теорию бинокулярного зрения. Важную роль в решении этой задачи имели работы П. П. Лазарева [5].

**Цветное зрение.** Колбочки сетчатки глаза способны различать световые волны различных длин (чаще всего от 396 до 760 нм)<sup>6)</sup>. Восприятие света различных длин волн ощущается зрительным аппаратом глаза как различие цветов. Вся видимая часть электромагнитного поля создает цветовую гамму с переходом от фиолетовой к красной области спектра. Эмпирически установлено, что глаз воспринимает не только семь основных цветов (фиолетовый, синий, голубой, зеленый, жел-

Таблица 2.2.2. Соотношение между длинами световых волн и ощущаемыми цветами

Фраунго-ферова линия	$\lambda$ , нм	Цвет	Фраунго-ферова линия	$\lambda$ , нм	Цвет
<i>A</i>	760	Крайний красный	<i>E</i>	527	Зеленый
<i>B</i>	687	Красный		517	Голубовато-зеленый
<i>C</i>	656	Оранжево-красный		486	Голубой
<i>D</i>	589	Оранжевый		430	Индиго-синий
	580	Желтый	<i>H</i>	397	Фиолетовый

<sup>6)</sup> При высоких интенсивностях света область чувствительности глаза расширяется приблизительно до 1350 нм. Это обусловлено, по-видимому, двухфотонной фотоизомеризацией молекул зрительного пигмента клеток колбочек.

Таблица 2.2.3. Оптическое смешение двух цветов

Смешиваемые цвета	Желтый	Зелено-желтый	Зеленый	Голубо-зеленый	Голубой	Синий
Красный	Оранжевый	Золотисто-желтый	Белесо-желтый	Белый	Белесо-розовый	Темно-розовый
Оранжевый	—	Желтый	Желтый	Белесо-желтый	Белый	Белесо-розовый
Желтый	—	—	Зелено-желтый	Белесо-желтый	Белесо-желтый	Белый
Зелено-желтый	—	—	—	Зеленый	Белесо-желтый	Белесо-желтый
Зеленый	—	—	—	—	Голубо-зеленый	Аквамариновый
Голубо-зеленый	—	—	—	—	—	Аквамариновый

тый, оранжевый, красный), но и огромное множество промежуточных оттенков цвета и цветов, полученных от смешения света разных длин волн. Всего насчитывается до 15000 цветовых тонов и оттенков.

В табл. 2.2.2 приведено примерное соотношение между длинами волн и цветами. Разумеется, читателю эти сведения известны еще со школьной скамьи, но нельзя не привести их в книге, посвященной оптике.

Начало научного изучения смешения цветов, как и вообще начало научного изучения проблемы цветности, связано с работами И. Ньютона. Именно он с помощью призмы разложил белый свет на спектральные составляющие.

В результате исследований Ньютона и других ученых были сформулированы следующие основные законы смешения цветов.

**1-й закон.** Для всякого цвета имеется другой цвет, от смешения с которым получится белый или, точнее сказать, серый, ахроматический цвет. Такие два цвета называются дополнительными.

**2-й закон.** Если смешивать свет двух цветов, получим промежуточный цвет.

**3-й закон.** Цвета, одинаково воспринимаемые глазом (не-

зависимо от их происхождения, т. е. от спектрального состава светового потока) при смешении дают одинаковые цвета.

Все эти законы были доказаны экспериментально. Наблюдать смешение цветов можно по-разному. Ламберт направлял на глаз два потока разного спектрального состава. Максвелл использовал диск, составленный из секторов разного цвета. При быстром вращении диска происходит чередование цветов, попадающих на глаз, и благодаря инерции зрения глаз воспринимает суммарный цвет.

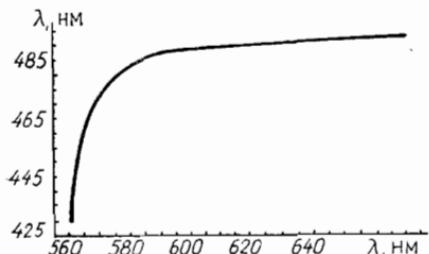


Рис. 2.2.8. Дополнительные цвета

вание цветов, попадающих на глаз, и благодаря инерции зрения глаз воспринимает суммарный цвет.

В табл. 2.2.3 приведены основные результаты, получающиеся при смешении некоторых цветов. Как видно из таблицы, при смешении любых двух цветов, лежащих друг к другу ближе, чем дополнительные цвета, возникает промежуточный цвет. Если смешивать три цвета, то можно получить всевозможные цветовые тона.

Для белого цвета, создаваемого светом полуденного Солнца<sup>7)</sup>, Международный осветительный комитет предложил в 1931 г. пользоваться следующим уравнением для расчета взаимодополнительных монохроматических волн:

$$(\lambda_2 - 565,52 \text{ нм}) (497,78 \text{ нм} - \lambda_1) = 223,02 \text{ нм.}$$

Задавая значение  $\lambda_1$  (в нм), можно определить  $\lambda_2$ . Существенно, что значение  $\lambda_1$  должно быть меньше 497,78 нм. Для  $\lambda_1 \geq 497,78$  нм дополнительные цвета отсутствуют. Они отсутствуют также для  $\lambda_2 \leq 565,52$  нм. На рис. 2.2.8 приведена кривая  $\lambda_1 = f(\lambda_2)$ , построенная по данным многих авторов [6].

Строгая теория цветового зрения до сих пор еще не создана, хотя этой проблемой занималось множество ученых — физиков и особенно медиков. В данной области знаний остро встают проблемы психофизиологии, связи ощущений человека с характером воздействий внешней среды. В неживой природе как таковой цветов нет, на глаз воздействуют электромагнитные волны разных длин волн (разных частот). Возникновение у живых существ способности цветного зрения дало им воз-

<sup>7)</sup> Следует иметь в виду, что белый белому рознь. Белые цвета бывают различными.

можность гораздо полнее познавать окружающий их объективный мир и лучше ориентироваться в нем. Благодаря цветному зрению стали различать предметы одинаковой яркости.

Исходные идеи ныне общепринятой трехкомпонентной теории цветного зрения мы находим у М. В. Ломоносова в его «Слове о происхождении света, новую теорию о цветах представляющем, июля 1 дня 1756 г. говоренном» [16]. По мнению Ломоносова, свет есть движение частиц эфира, обладающих зыблющим (колебательным) и коловратным (вращательным) движением. Эфир состоит из частиц трех типов, отличающихся своими размерами. Частицы эфира могут совмещаться с различными типами частиц материи и приводить их во вращательное движение. При этом, цитируем Ломоносова, «первой величины эфир с соляною, второй величины со ртутью, третьей величины с серною... материю». Из этих материй состоит «дно глаза». «Наконец нахожу, что от первого рода эфира происходит свет красный, от второго — желтый, от третьего — голубой. Прочие цвета рождаются от смешения первых» [16, с. 157]. Черный цвет Ломоносов объясняет, говоря современным языком, поглощением телом всех падающих на него световых лучей. Или иначе: «Всех родов эфирные частицы к ним прикасаются; через совмещение теряют коловратное движение и... лучи солнечные без оного не производят никаких цветов в глазе, не имея силы побуждать в коловратное движение на дне составляющие его части. Итак, тела показываются тогда черными» (там же). Правильно объясняется и ощущение белого цвета. Он рассматривается как результат отражения телом всех солнечных лучей и одновременного воздействия на глаз всех цветов. А вот как объясняется наличие цветов: «Так как если поверхность покрыта частицами соляной материи, тогда первого рода эфирная материя для совмещения с оными, лишаясь коловратного движения, не будет в глазе производить чувствия красного цвета и только желтый и голубой эфир, обращаясь свободно, действовать станет в оптических нервах на ртутную и серную материю, произведет чувство желтого и голубого цвета в одно время, отчего таковые тела должны быть зелены. Равным образом на поверхности одна материя ртутная — вишневый, одна серная — рудо-желтый цвет в тела производят». «Природа рудо-желтый из красного и желтого, зеленый из желтого и голубого, вишневый из красного и голубого, другие роды смешанных цветов из других разных смешаний сложить может» [16, с. 158—159].

Через 46 лет в 1802 г. Т. Юнг вновь выступил с той же гипотезой о трехкомпонентности цветного зрения. Он предположил, что в сетчатой оболочке существуют три типа элементов, воспринимающих три разных основных цвета. Эти элементы не строго специфичны, они могут воспринимать и

два других основных цвета, но с меньшей степенью раздражения. При расстройстве одного из цветовоспринимающих центров сетчатки будет цветослепота не только на данный цвет. Одновременно пострадает восприятие всех других цветов.

Проблема смешения цветов была систематически исследована Максвеллом (1880 г.). В качестве основных цветов, из которых можно получить любой другой цвет, Максвелл выбрал красный (630 нм), зеленый (528 нм) и синий (457 нм).

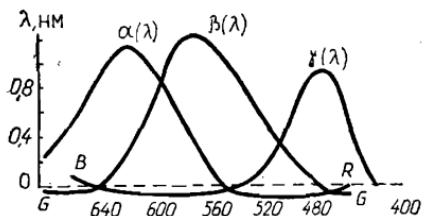


Рис. 2.2.9. Кривые сложения основных раздражителей (по Максвеллу)

Разумеется, можно выбрать и другую комбинацию основных цветов. С комбинацией Максвелла нельзя получить, например, фиолетовый цвет. Согласно Максвеллу,

$$\lambda = \alpha(\lambda)\lambda_{\text{крас}} + \beta(\lambda)\lambda_{\text{зел}} + \gamma(\lambda)\lambda_{\text{син}}. \quad (2.2.3)$$

Изменяя интенсивности соответствующих цветов  $\alpha(\lambda)$ ,  $\beta(\lambda)$  и  $\gamma(\lambda)$ , можно варьировать цвет (длину волны) суммарного излучения (рис. 2.2.9).

Опыт показал, что для некоторых значений  $\lambda$  один из коэффициентов оказывается отрицательным. Это означает, что при суммировании трех основных цветов данное значение  $\lambda$  вообще не возникает. Так, например, для оранжевого цвета уравнение

$$\lambda_{\text{ор}} = 2,36\lambda_{\text{крас}} + 0,74\lambda_{\text{зел}} - 0,01\lambda_{\text{син}}$$

надо трактовать так:

$$\lambda_{\text{ор}} + 0,01\lambda_{\text{син}} = 2,36\lambda_{\text{крас}} + 0,74\lambda_{\text{зел}}.$$

После Максвелла вопросом о смешении цветов занимались многие ученые — физики и биологи. Особенно значительный вклад в решение проблем цветного зрения внес Г. Гельмгольц. И совсем не случайно одна из глазных клиник Москвы носит его имя (1911 г.). Именно Гельмгольца надо считать основателем физиологической оптики в ее современном виде.

Как мы видели, Максвелл предполагал, что глаз воспринимает только три основных монохроматических цвета, а все остальные образуются в результате их смешения. Гельмгольц вернулся к идее Юнга. Согласно Гельмгольцу, в нашем зрительном органе существуют три сорта нервных аппаратов. Изолированное возбуждение одного из них дает ощущение

насыщенного красного цвета, возбуждение другого — насыщенного зеленого, возбуждение третьего — насыщенного фиолетового. Однако каждый из этих аппаратов реагирует и на все другие цвета, только в меньшей степени (рис. 2.2.10).

Гельмгольц не уточнял тогда, каков механизм действия и строение этих аппаратов. По современным представлениям это также не очень ясно. Очевидно только, что во всех трех случаях имеются какие-то различия в органах сетчатки и одновременно в мозговых центрах.

Проблемами цветного зрения активно занимался П. П. Лазарев. Придерживаясь идеи трехкомпонентной теории цветного зрения, он стремился дать ей более конкретное толкование. По мнению Лазарева, начальной стадией зрительного возбуждения служит фотохимический распад трех особых светочувствительных веществ.

Кривые, изображенные на рис. 2.2.10, служат лишь для иллюстрации идеи Гельмгольца. Исходя из многочисленных экспериментальных данных, в том числе зрения цветно-слепых людей, в работах Кенига были построены реальные кривые (рис. 2.2.11). В основном они используются и до сих пор. Площади под всеми кривыми на рис. 2.2.11 одинаковы. Для расчета реального цветоощущения каждой из этих кривых надо умножать на коэффициент яркости. Для красного возбуждения он равен единице, для зеленого — 1,47, для синего — 0,006.

Используя кривые рис. 2.2.11 и соответствующие коэффициенты яркости, трехкомпонентной теорией можно объяснить главные особенности цветного зрения. Белый цвет возникает в результате равного возбуждения всех трех цветовоспринимающих аппаратов, ощущение цвета — при их неравном возбуждении. Характер цветового ощущения можно рассчитать численно, зная спектр падающего излучения. Этой проблеме будет посвящена следующая глава.

Необходимо подчеркнуть еще раз, что строение и механизм действия фоторецепторов, обеспечивающих цветное зрение, окончательно не выяснены. Долго шел спор: одни авторы до-

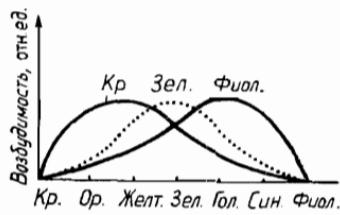


Рис. 2.2.10. Схема к трехкомпонентной теории зрения (по Гельмгольцу)

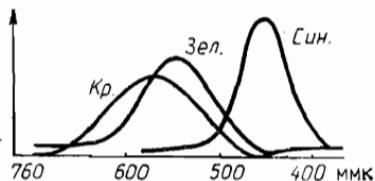


Рис. 2.2.11. Кривые основных цветов возбуждения глаза

пускали, что в каждой колбочке заложены три разных светочувствительных пигмента; другие считали, что существует три вида колбочек с разным спектром поглощения.

Хочется отметить специально для физиков, что значительный вклад в теорию цветного зрения внес создатель квантовой механики Э. Шредингер (1926 г.).

Смешение цветов возникает не только тогда, когда оба цвета поступают в каждый глаз, но и тогда, когда в один глаз посыпается излучение одной длины волны, а во второй глаз — другой. Такое бинокулярное смешение цветов доказывает, что важную роль в его осуществлении играют процессы, происходящие не только на сетчатке, но и в головном мозге.

Каждый цвет, ощущаемый глазом, характеризуется тремя признаками: цветовым тоном, насыщенностью и яркостью (иногда говорят, светлотой). Цветовой тон — это основной признак цвета, обусловленный длиной падающей волны. Человек с нормальным цветовосприятием различает цвет по этому признаку. Насыщенность цвета указывает на степень его разведения белым цветом. Яркость цвета обусловлена в значительной мере местом расположения его в спектре, так как сетчатка ярче всего воспринимает участок желтого и зеленого цвета (556 нм). Другие цвета ощущаются хуже. Инфракрасная и ультрафиолетовая радиация вообще не воспринимается.

Международная осветительная комиссия обследовала большое число людей и определила среднюю величину относительной видности лучей различных длин волн. Они сведены в табл. 2.2.4<sup>8)</sup>. Приведенные значения относятся к дневному зрению при поле зрения 2°. В той же таблице даны абсолютные значения видности в люменах на 1 Вт.

Зависимость видности от длин волн связана с приспособлением глаза к солнечному свету. Максимум свечения Солнца и максимум кривой видности находятся в одной области. С солнечной радиацией связан и диапазон длин волн, вос-

Таблица 2.2.4. Видность монохроматического излучения

$\lambda$ , нм	Видность		$\lambda$ , нм	Видность	
	отн. ед.	лм/Вт		отн. ед.	лм/Вт
400	0,004	0,25	580	0,870	539,4
440	0,023	14,26	600	0,631	391,0
480	0,139	86,3	620	0,381	236,0
520	0,710	440,6	660	0,061	37,8
540	0,954	593,0	700	0,0041	2,5
560	0,995	617,5	740	0,00025	0,15

<sup>8)</sup> Мы повторяем здесь частично табл. 1.2.1, но добавляем очень важный третий столбец.

принимаемых глазом; поверхности Земли достигают в основном лучи света с длиной волны 393,4—759,4 нм. Биологический световоспринимающий аппарат глаза, приспособленный к регистрации лучей с длинами волн, выходящими за эти пределы, был бы бесцельным.

Следует обратить внимание, что распределение чувствительности нашего цветного зрения для света различных длин волн также очень сходно с распределением энергии в солнечном свете, отражаемом зелеными листьями растений. Именно в этой световой гамме жил животный мир в моменты формирования у него органов зрения.

Как мы уже отмечали, инфракрасные лучи не воспринимаются глазом. С. И. Вавилов [1] объяснил данное явление все той же биологической целесообразностью; свойства глаза вырабатывались в результате многовекового приспособления живых существ к наилучшему восприятию окружающего объективного мира. Если бы глаз воспринимал инфракрасное излучение, то он ощущал бы не только внешнее излучение, но и свое собственное. В этом случае внешний мир оставался бы практически не различимым на фоне мешающей световой дымки.

Здесь уместно сделать одно важное замечание. Говоря о цветном зрении, мы все время сравнивали цвет, воспринимаемый глазом, с длиной волны падающего излучения. На рис. 2.2.9—2.2.11 по оси абсцисс откладывается значение  $\lambda$ . Так делается во всей литературе, посвященной физиологической оптике. Это естественно, так как уже полтора столетия световые потоки характеризуются в литературе длиной волны. Большинство спектральных приборов измеряет именно длину волны.

И тем не менее это вряд ли правильно. По оси абсцисс надо откладывать частоты излучения. Ощущение цвета возникает в результате взаимодействия излучения с фоторецепторами сетчатки. Суть этого взаимодействия — фотохимические процессы, возникающие после акта поглощения света. Их характер зависит, разумеется, от энергии поглощенного кванта, т. е. от частоты света, а не от его длины волны<sup>9)</sup>. Можно думать, что и при смешении цветов воспринимаемый цвет связан какой-то зависимостью с суммой энергий поглощаемых квантов ( $h\nu_1 + h\nu_2$ ).

В дальнейшем необходимо, видимо, провести детальный анализ таблиц типа 2.2.3, но с точным указанием частот смешиваемых потоков и частот, характеризующих возникающее ощущение цвета. Оценка смешиваемости различных цветов по

9) Длина волны может влиять на прохождение света в оптической системе глаза, на образование хроматической aberrации, возникновение каких-либо дифракционных явлений.

их длинам волн в данном случае неуместна и затормозила объяснение существа процесса.

**Развитие зрительных ощущений во времени.** Между моментом попадания света на сетчатку глаза и моментом возникновения зрительного ощущения проходит некоторое время. Оно необходимо для осуществления фотохимических реакций в колбочках и палочках и, кроме того, каких-то процессов в нервных клетках и соответствующих центрах головного мозга.

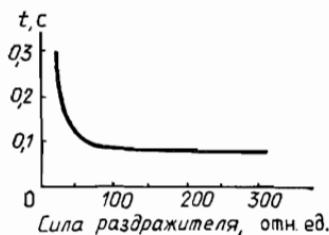


Рис. 2.2.12. Зависимость времени зрительного ощущения от интенсивности раздражителя

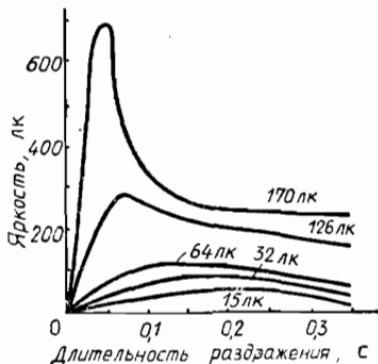


Рис. 2.2.13. Зависимость ощущаемой яркости от времени действия раздражителя

Время зрительного ощущения зависит от интенсивности светового потока. На рис. 2.2.12 приведена типичная экспериментальная кривая. Из нее следует, что при обычных достаточно сильных освещенностях время ощущения порядка 0,1 с.

Стационарное зрительное ощущение возникает при данной стационарной освещенности не сразу. Вначале оно нарастает, достигает через некоторое время максимума, а затем постепенно ослабляется до стационарного уровня. На рис. 2.2.13 приведено изменение воспринимаемой яркости белого света во времени; надписи на кривых показывают, каким яркостям соответствуют данные раздражители при длительном воздействии на глаз. Яркость в максимуме может превосходить яркость последующего почти постоянного уровня в 4—5 раз.

Зрительное ощущение не исчезает сразу после прекращения действия света. Вызванные фотохимические процессы не заканчиваются мгновенно, а, как показал впервые П. П. Лазарев, затухают экспоненциально. Если пауза между вспышками света мала, то при последующем воздействии света глаз будет реагировать на него не так, как на одну вспышку.

На рис. 2.2.14 приведена схема действия прерывистого светового раздражителя, типичная для многих оптических процессов с конечной длительностью возбужденного состояния. Если сократить перерывы между импульсами света, то

расстояние между максимальным и минимальным возбуждением будет также уменьшаться и при малых  $\Delta t$  мы вообще не заметим мелькающих вспышек и получим впечатление ровного немигающего света. Как известно, свет от электрической лампочки кажется нам непрерывным, хотя частота колебаний переменного тока равна 50 и, следовательно, лампочка тухнет 50 раз за секунду. Минимальная частота мельканий света, при которой наступает слияние мельканий, называется критичес-

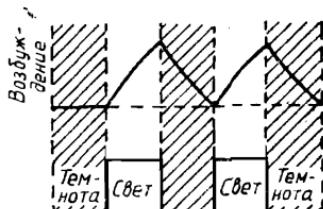


Рис. 2.2.14. Схема воздействия прерывистого светового раздражителя на глаз

кой частотой мельканий. Разумеется, эта частота зависит от интенсивности падающего света.

Посредством зрения мы воспринимаем очень многое, в том числе и движение окружающих предметов. Зрительное восприятие движения надо считать одним из наиболее сложных вопросов психопроцесса зрения, а это уже из биофизики, которой занимался П. П. Лазарев.

**П. П. Лазарев.** Роль П. П. Лазарева в становлении советской физики исключительно велика. Его труды касаются основных вопросов физики, биологической физики, физиологии, медицины, физической химии и геофизики. И во всех этих направлениях науки сделано очень многое, оставлено большое наследство. Нас здесь интересуют в основном работы П. П. Лазарева в области физиологической оптики, хотя никак нельзя не вспомнить, например, о его работах, связанных с открытием и самыми первыми исследованиями Курской магнитной аномалии.

П. П. Лазарев родился 14 апреля 1878 г. в Москве. В 1896 г. он поступил на медицинский факультет Московского университета. Кроме медицины он изучал физику, слушал лекции Н. А. Умова, П. Н. Лебедева, Н. Е. Жуковского. Осенью 1901 г., по окончании медицинского факультета, П. П. Лазарев вновь поступает в университет, но уже на физико-математический факультет, который и окончил экстерном в 1903 г. Первое время он работал в клинике болезней уха, горла и носа, где начинал свои замечательные исследования в акустике. В 1905 г. П. П. Лазарев поступил в лабораторию П. Н. Лебедева.

Как известно, в 1911 г. передовые профессора и преподаватели Московского университета в знак протеста против реак-

ционных действий министра просвещения Кассо покинули университет. Среди них были П. Н. Лебедев и его ученик П. П. Лазарев. Их научная деятельность продолжалась в лаборатории, организованной на частные пожертвования. В январе 1912 г. П. Н. Лебедев скончался и руководство лабораторией перешло к П. П. Лазареву. Создается московская научная школа. Следует заметить, что эта небольшая лаборатория была тогда единственным научным физическим центром России, не связанным с кафедрами университетов. В ней под руководством Лазарева начинал свою деятельность С. И. Вавилов. Его исследования были связаны с формируемой Лазаревым фотохимической теорией зрения.

В 1912 г. в Москве научным обществом создается первый в стране Физический институт. Его директор П. П. Лазарев деятельно участвует в строительстве специального здания. Реальная работа института начинается только в начале 1917 г. В этот институт было передано все оборудование лаборатории П. Н. Лебедева. Туда же переведены все рентгеновские кабинеты, созданные Лазаревым в Москве для обследования раненых<sup>10)</sup>. В институте работали многие ведущие учёные Москвы, но... бесплатно. В штате института было только две должности: директора и ученого секретаря.

В 1917 г. П. П. Лазарев избирается в состав Российской Академии наук на кафедру физики, освободившуюся после смерти академика Б. Б. Гомицына.

С первых дней Великой Октябрьской социалистической революции П. П. Лазарев становится на сторону победившего народа и проявляет огромную активность в организации научных исследований в интересах здравоохранения, военного дела (светомаскировка), народного хозяйства. Сделано было многое, очень многое.

В 1919 г. Физический институт был реорганизован, перешел в ведение Наркомздрава и получил название Института биологической физики (позже Института физики и биофизики). В 1934 г. на его базе был создан нынешний Физический институт им. П. Н. Лебедева Академии наук — ведущий научный центр Советского Союза. Все это происходило в одном и том же небольшом здании на Миусской улице, д. № 3. С этим зданием у нас, физиков старшего поколения, особенно у оптиков, связаны самые теплые воспоминания.

Автор просит прощения у читателей за отход от основной темы. Хотелось сказать хоть пару слов о становлении советской физики, о тех трудностях, которые ей пришлось преодолеть. Читатель, естественно, сравнит то, что есть сейчас, с тем, что было в 1917 г., и отдаст должное первым организато-

<sup>10)</sup> Здесь в 1922 г. В. И. Ленину был сделан рентгеновский снимок грудной клетки после злодейского покушения на него.

рам советской физики: Д. С. Рождественскому, А. Ф. Иоффе и П. П. Лазареву.

Следует обратить внимание, что на той же базе возник и нынешний Институт биофизики АН СССР. П. П. Лазарев был организатором журнала «Успехи физических наук». Его имя связано с деятельностью многих других научных учреждений и высших учебных заведений.

Основная часть исследований Лазарева относится к биофизике<sup>11)</sup>. Остальные области знания, которыми он занимался, имели для него вспомогательное значение. Нельзя заниматься биофизикой и, в частности, физиологией зрения, не зная физики (оптики, фотометрии, акустики, молекулярно-кинетической теории, статистической физики...), биологии, химии. Решение биофизических проблем может быть получено только на основе синтеза многих наук и именно это продемонстрировал Лазарев, как до него его предшественник Гельмольц, также врач и также физик.

Среди биофизических проблем, волновавших Лазарева, следует отметить прежде всего ионную теорию возбуждения нервных волокон, фотохимическую теорию зрения, законы изменения чувствительности нервных центров. Он показал, что все явления возбуждения тканей, в том числе всех органов чувств, могут быть количественно обоснованы, исходя из общего закона раздражающего действия ионов, сформулированного ранее Нернстом и Лебом применительно к раздражению нервов и мышц электрическим током и растворами солей. Согласно Лазареву, начальным процессом физиологического возбуждения является свертывание (коагуляция) коллоидных белковых частиц. Устойчивость системы по отношению к этому процессу зависит от величины поверхностного натяжения частиц. Анализируя ход процесса, Лазарев вывел формулу, описывающую его основные особенности. Ионной теорией возбуждения Лазарев занимался всю жизнь. Ею и сейчас занимаются ученики и последователи Лазарева. Существенно применение этой теории к проблемам адаптации (приспособления) органов чувств к действующим на них раздражителям, к темновой и световой адаптации глаза, к проблемам сумеречного зрения. Надо отметить также разработку Лазаревым чисто биологических вопросов, связанных с торможением головным мозгом периферических рефлексов, разработку теории последовательных образов, кинетики зрения при пульсациях света, многих проблем фотометрии, изучение собственного свечения сетчатки, пороговых явлений зрения и других органов чувств.

Под руководством П. П. Лазарева начались первые серьезные исследования фотохимических процессов. Не зная суще-

<sup>11)</sup> П. П. Лазарев известен и как математик, еще в 1912 г. избранный почетным членом Московского математического общества.

ства явлений, происходящих в молекуле под действием света, нельзя понять сущности процесса зрения, сущности процессов, происходящих на сетчатке глаза. Фотохимическая теория цветного зрения не случайно называется сейчас теорией Юнга—Гельмгольца—Лазарева.

Нет, невозможно даже перечислить все, сделанное П. П. Лазаревым: и работы в области вязкости стекла и методов его закалки, и изучение капиллярных явлений, безэлектродного разряда, океанских течений и их влияния на климат Земли.

П. П. Лазарев многое сделал для разработки истории развития физики и физиологии в России.

Можно только преклоняться перед научным подвигом учёного, его самоотверженным трудом.

С работами П. П. Лазарева по проблемам зрения можно познакомиться в [5]. Там же приведены подробные статьи учеников Лазарева о его жизни и деятельности. Кроме того, можно рекомендовать статьи и обзоры [17—20].

**Физиологическое доказательство квантовой природы света.** Еще в 1923 г. П. П. Лазарев отметил, что при изучении раздражения сетчатки нужно учитывать квантовые свойства света. Тогда это было только догадкой. Через 10 лет С. И. Вавилов и его ученики начали систематические исследования столь принципиального вопроса. Свет состоит из фотонов, следовательно, его квантовые свойства должны проявляться и в процессе зрения.

Всякий источник света испускает кванты света неравномерно. При очень слабых световых потоках должны обнаруживаться статистические свойства совокупности квантов. Как известно из статистической физики, относительное значение среднего отклонения от среднего в многочастичной системе мало, флуктуации числа частиц сравнительно невелики. В то же время в малочастичной системе флуктуации должны быть заметны. Именно так рассуждал Вавилов. При кратковременных вспышках очень слабого (по яркости) и очень небольшого (по площади) источника света вспышки света будут не всегда замечаться глазом. Они будут видимы лишь тогда, когда число фотонов, поглощенных светочувствительными элементами сетчатки, будет больше порогового значения, необходимого для осуществления фотохимической реакции и возникновения зрительного ощущения. Вероятность видения вспышек света будет зависеть от среднего количества фотонов  $n$ , достигающих сетчатки за время вспышки, и от минимального количества фотонов  $n_0$ , которое должно быть поглощено сетчаткой для получения ощущения света. Исходя из вероятностного закона Гаусса, Вавилов вывел формулу [21]

$$p = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{n_0}{2}} \frac{1 - n/n_0}{\sqrt{n/n_0}} \right). \quad (2.2.4)$$

Здесь  $p$  — отношение числа вспышек, замеченных испытуемым человеком, к общему числу вспышек. Величина  $n/n_0$  пропорциональна интенсивности света. Зависимость вероятности  $p$  от  $\frac{1-n/n_0}{\sqrt{n/n_0}}$  линейна. Наклон прямой (2.2.4) определяется величиной  $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{n_0}{2}}$ .

Измеряя его экспериментально, можно определить пороговое количество фотонов, обнаруживаемых наблюдателем. Эта величина зависит только от свойств сетчатки, но не зависит от потерь света в других средах глаза. По данным Вавилова и Брумберга, значение  $n_0$  в среднем равно 25 квантам, но в ряде случаев равнялось и 8 квантам [21]. Позже некоторые другие авторы, пользуясь методом Вавилова, пришли к выводу, что пороговое число квантов, соответствующее сумеречному зрению, равно всего 2.

Световая чувствительность глаза чрезвычайно велика, в тысячи и десятки тысяч раз больше чувствительности лучших типов приемников радиации. В яркостных единицах (свеча  $\times \text{см}^{-2}$ ) — пороговые раздражители глаза лежат в пределах  $10^{-7}$ — $10^{-11}$  (в зависимости от углового размера раздражющего поля). По освещенности, создаваемой на зрачке наблюдателя, пороговый раздражитель близок к  $5 \cdot 10^{-9}$  лк.

Заметим здесь, что по измерениям Пинегина (см. [6]) чувствительность колбочкового аппарата сетчатки в тысячи раз выше чувствительности ее палочкового аппарата (для  $\lambda = 546$  нм). Чувствительность палочек равна  $5,6 \cdot 10^{-9}$  эрг·с<sup>-1</sup>.

### § 3. О СУЩНОСТИ И ИЛЛЮЗИЯХ ЗРЕНИЯ

Зрение — сложный психологический процесс. Мы уже не раз говорили, что процесс зрения не сводится к образованию изображения предметов на сетчатке глаза. В нем участвует или, лучше сказать, его организует деятельность нашего мозга. Изображение, возникающее на сетчатке глаза, отличается от того, что мы видим реально.

Оптическое изображение предмета, образующееся на сетчатке, перевернутое; преломляющая система глаза работает как обычная линза (рис. 2.3.1). Тем не менее никакой перевернутой картины мы не видим, наблюдаемое нами изображение предмета соответствует самому предмету, наш разум автоматически «переворачивает» изображение, образованное на сетчатке.

В книге И. Д. Артамонова, посвященной этому вопросу [22], приведено описание эксперимента, полностью подтверждающего сделанный вывод. В 1961 г. И. Мур<sup>12)</sup> надел на себя

<sup>12)</sup> Еще ранее, в начале 20-х годов, аналогичный эксперимент проведен А. Стрэттоном.

прилегающие к лицу специальные очки, через которые наблюдал все окружающее в перевернутом виде. Восемь дней Мур, проходя несколько десятков шагов, ощущал симптомы морской болезни, путал верх и низ, левую сторону с правой. А потом в тех же очках он снова увидел окружающий мир так же, как и все другие люди. Ученый снова приобрел способность к быстрой ориентации в пространстве. В своих очках он ездил на мотоцикле, автомобиле, пилотировал самолет. После

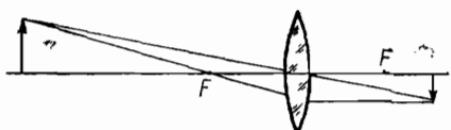


Рис. 2.3.1. Ход лучей при образовании изображения

Мур снял очки и окружающий мир вокруг него снова «перевернулся». Однако через несколько дней все снова пришло в норму.

Следовательно, образы, воспринимаемые зрением, отличаются от изображения, формируемого на сетчатке глаза. Зрение — это сложный психологический процесс, зрительные впечатления согласуются с сигналами, полученными от других органов чувств, с предшествующим опытом человека. Как показал эксперимент Мура, требуется некоторое время, прежде чем вся система настроится и начнет функционировать нормально.

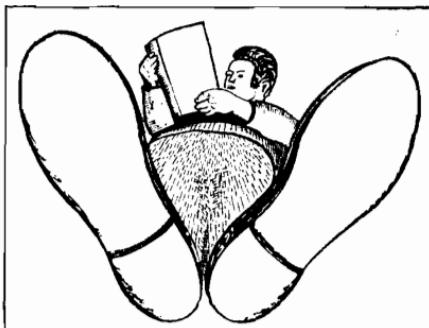
Таким образом, мы судим о внешнем мире, участвуя в обосновывать и правильно оценивать наши ощущения. Ребенок в первый период своей жизни также воспринимает световые ощущения, но еще не понимает их значения. И только постепенно на основе всех ощущений он начинает делать выводы о присутствии тех или иных окружающих его предметов. При этом он сразу же делает правильные заключения, т. е. видит предметы такими, какими они есть в действительности, а не так, как они отображаются на сетчатке.

Еще один пример возьмем из книги С. И. Вавилова [1]. Снимок был сделан с близкого расстояния оптически правильно, но как здесь искажена действительность (рис. 2.3.2). А ведь то же самое видит и глаз, рассматривая этого человека с того же расстояния. Однако мозг вносит поправки в работу глаза и мы не замечаем карикатурности увиденного. С подобными ситуациями мы встречаемся непрерывно, но благодаря работе мозга полученная информация чаще всего (но не всегда) адекватна действительности. Нужно иметь в виду, что внесение мозгом поправок в оптическое изображение предметов на сетчатке связано с одновременным видением многих других окружающих деталей. Именно оно вместе с памятью о подобных расположениях предметов, виденных ранее, и обеспечи-

вает правильную ориентацию в окружающем мире. То, что видит человек, это не всегда то, что видит его глаз; человек воспринимает осмысленное мозгом.

И еще пример сотрудничества мозга и зрительного аппарата (см. подробнее [9]). Как мы уже говорили, поле зрения глаза весьма велико. Однако его различные участки видят по-разному. В районе желтого пятна разрешающая способность сетчатки глаза очень большая. Если предмет находится на

Рис. 2.3.2. Рисунок с фотографии лежащего человека. Пример расхождения оптической и мозговой правильности



расстоянии 25 см, то глаз способен различать детали размером до 0,1 мм. Но это относится только к небольшому участку рассматриваемого предмета, близкому к оси глаза (несколько десятых миллиметра). Другие детали предмета, находящиеся от оси на расстоянии всего нескольких миллиметров, воспринимаются глазом значительно менее четко<sup>13)</sup>. И тем не менее этого существенного недостатка зрительного аппарата мы не замечаем. Обычно мы убеждены, что площадь предмета с ясно выраженными деталями значительно больше действительной.

Приведенные факты доказывают, что зрительные образы, воспринимаемые человеком, формируются не в виде фотографических изображений на сетчатке глаза, а в виде согласованной совокупности многочисленных отдельных картин, воспринимаемых движущимися глазами. Движение глазного яблока происходит непрерывно и достаточно быстро, причем так, чтобы все наиболее существенные детали рассматриваемого предмета последовательно попадали в зону наибольшей разрешающей способности глаз. Тем самым глаза производят своеобразное сканирование предмета — последовательный просмотр деталей, лежащих вдоль тех или иных линий. Это сканирование охватывает большие расстояния, так как при необ-

<sup>13)</sup> Читатель может убедиться в этом сразу же. Достаточно сосредоточить свое внимание на деталях одной буквы, все другие буквы станут расплывчатыми.

ходимости кроме вращения глазного яблока используется движение головы и всего человека.

Все эти действия чаще всего бессознательны и выполняются автоматически. В сознании человека фиксируются не отдельные частные картины, схваченные глазом в отдельные моменты времени, а общая картина. Процесс зрения, повторяясь, есть результат совместного действия и зрительного аппарата и мозга.

Очень хорошая иллюстрация этого приведена на рис. 2.3.3.

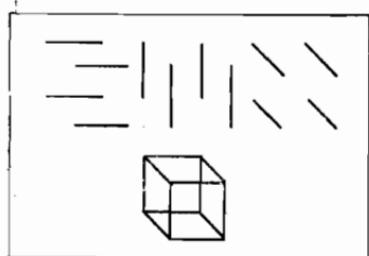


Рис. 2.3.3. Перспективное восприятие 12 линий, лежащих в одной плоскости

Наверху рисунка изображено 12 линий. Все они лежат в одной плоскости, во всяком случае, так нам кажется. Внизу рисунка те же самые линии расположены иначе и мы отчетливо видим куб, некий пространственный образ, в котором разные линии находятся в разных плоскостях и частично перпендикулярны друг другу.

Следует сказать также о стереоскопичности зрения. Если смотреть одним глазом, то человек иногда получает некоторое представление о расстоянии до предмета и его размерах. Это можно объяснить в основном предшествующим опытом; человек много раз видел нечто аналогичное и, сравнивая с предыдущим, делает умозаключение о настоящем. Имеет значение также и аккомодация глаза. Переводя взгляд с одного предмета на другой, фокусируя на них внимание, человек изменяет натяжения мышц, управляющих хрусталиком, и по этому изменению судит о расстоянии между предметами. Такое суждение также основано на предшествующем опыте.

Все же одним глазом трудно оценивать расстояния и объемные размеры предметов. Эта проблема решается при рассматривании предметов двумя глазами. Если смотреть на какой-то объемный предмет двумя глазами, то оптическое изображение, получаемое на сетчатке одного глаза, не совпадает с соответствующим изображением на сетчатке другого глаза. Это различие учитывается мозгом в процессе переработки получаемой информации и позволяет оценивать объемные размеры предметов и расстояния между ними.

Стереоскопическое зрение возможно только при не очень

большом расстоянии от предмета до глаз человека. Если оно велико, то изображения предмета на сетчатках обоих глаз выравниваются и способность к оценке степени удаленности предметов теряется.

**Ошибки и иллюзии зрения.** Нередко воспринимаемый нами зрительный образ не соответствует действительности. В этом случае мы говорим об ошибках или иллюзиях зрения.

Иногда причины неправильного восприятия предметов находятся вне нас. Иногда мы видим предметы не там, где они расположены на самом деле, что связано с наличием отраженных и преломленных лучей в зеркалах, призмах и линзах. Палка, опущенная в воду, кажется нам изогнутой. Если мы смотрим на дно озера, находясь в лодке, то оно кажется нам менее глубоким, чем на самом деле. Более сложные случаи — астрономическая рефракция и различные кажущиеся явления в атмосфере. Иллюзионисты цирка отлично создают видимость того, что в действительности не существует.

Все эти иллюзии к свойствам глаза не имеют никакого отношения.

Существует много других ошибок зрения, обусловленных и физиологическими причинами и ошибками психологического акта. Физиологические причины связаны с недостатками глаза. Глаз — не идеальный оптический прибор. В нем имеются сферическая аберрация, астигматизм, хроматическая аберрация, иррадиация, энтооптические явления. Кроме того, в глазу имеется слепое пятно. Можно назвать также наличие абсолютного порога чувствительности глаза, порогов различия разных яркостей, адаптации, инерции зрения, различной чувствительности к разным областям спектра... Нужно учитывать также индивидуальные особенности разных людей — близорукость, дальтонизм, дальтонизм, косоглазие, цветовую слепоту (дальтонизм). Трудно встретить двух людей с одинаковыми свойствами глаз<sup>14)</sup>.

Сферическая аберрация глаза невелика, но несомненно существует и влияет на зрение. Лучи, идущие от предмета близко к оптической оси глаза, сходятся в одной фокальной точке, лучи, идущие под большим углом к оси или вдали от нее, — в другой. Существование сферической аберрации глаза можно подтвердить простым экспериментом. Поместим страницу книги близко к глазу (ближе, чем расстояние наилучшего зрения). Глаз не будет различать напечатанное. Если теперь поставить перед ним лист бумаги с небольшим отверстием, то буквы становятся отчетливыми.

Астигматизмом страдают многие люди. Он связан с асим-

<sup>14)</sup> Это относится и к другим органам чувств. И тем не менее все люди познают окружающий мир одинаково. Недостатки зрения не приводят к какому-либо искаженному познанию действительности.

метрией хрусталика глаза. Его можно исправить соответствующими очками с цилиндрическими линзами.

Глаз имеет и хроматическую aberrацию: фокус фиолетовых лучей ближе к хрусталику, чем фокус красных лучей (примерно на 0,43 мм).

В результате aberrаций, близорукости и дальнозоркости каждая светящаяся точка проецируется на сетчатку в виде небольшого кружка. Поэтому любой достаточно яркий пред-



Рис. 2.3.4. Какой квадрат больше?

мет кажется нам несколько больше, чем он есть на самом деле. Подобные явления называются иррадиацией. Иррадиацию можно проиллюстрировать с помощью рис. 2.3.4. На рисунке изображен белый квадрат на черном фоне и черный квадрат на белом фоне. Квадраты совершенно одинаковы, однако вследствие иррадиации нам кажется, что белый квадрат больше черного. Именно об этом явлении говорил В. Гете: «Темный предмет кажется меньше светлого той же величины. Если рассматривать одновременно белый круг на черном фоне и черный круг того же диаметра на белом фоне, то черный нам кажется примерно на 1/5 меньше белого. Если черный круг сделать соответственно больше, они покажутся равными. Молодой серп луны кажется принадлежащим кругу большего диаметра, чем остальная темная часть луны, которая иногда бывает различима».

Много наглядных примеров влияния иррадиации приведено в книге [22], посвященной иллюзиям зрения. Вот некоторые из них. Датские специалисты, изучив статистику автомобильных аварий, пришли к выводу, что 61% всех происшествий происходит с машинами черного цвета. Только 6% аварий приходится на машины светлых тонов. Опыты показали, что черная окраска как бы удаляет машину и делает ее меньше.

И еще. В темном платье люди кажутся тоньше, чем в светлом. Раскаленная нить лампы кажется толще, чем холодная. Черная нить, если держать ее перед ярким пламенем, кажется порванной.

Два слова о происходящих внутри глаза так называемых энтооптических явлениях. Они субъективны, у каждого человека разные. Внутри глаза всегда могут быть (плавать) какие-то неоднородности, мелкие тела. Они, так же как и неко-

торые кровеносные сосуды, могут дать тень на сетчатой оболочке глаза и влиять на форму образующихся на ней изображений. Многие из этих явлений можно наблюдать, если смотреть на равномерно освещенную часть неба.

На рис. 2.3.5 и 2.3.6 приведены еще два примера иллюзий, возникающих вследствие иррадиации. На первом рисунке на черном фоне наклеено равномерно большое число мелких белых кружочков. Если смотреть издали, то из-за иррадиации

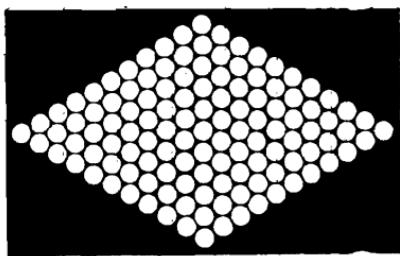


Рис. 2.3.5. Что наклеено на черный фон: кружки или шестиугольники?



Рис. 2.3.6. Еще одна иллюзия, возникающая вследствие иррадиации

все кружочки кажутся шестиугольниками. Еще более удивительна иллюзия, наблюдаемая на рис. 2.3.6. Прямая  $f$  кажется нам продолжением прямой  $a$ , тогда как в действительности продолжением прямой  $a$  является прямая  $d$ . Наблюдаемая иллюзия связана с тем, что светлые углы между черными линиями, из которых одна широкая, кажутся увеличенными.

Ряд ошибок зрения связан с усталостью глаза после продолжительного освещения [23]. Это особенно важно для водителей автомобилей, освещаемых фарами встречных машин. Уровень ослепленности водителя оценивается по изменению дальности его зрения. Без встречных фар она равна примерно 77 м. При наличии слабого света от встречных машин, находящихся на расстоянии 215—230 м, дальность зрения снижается до 71 м. Когда автомобили сближаются до 116—57 м, водитель видит предметы, удаленные от него не больше чем на 60 м. При дальнейшем сближении дальность видимости падает почти вдвое. Когда машины разъезжаются, уровень ослепленности постепенно снижается, острота зрения у водителя восстанавливается.

Продолжительное раздражение глаза одним цветом также притупляет способность воспринимать именно этот цвет. Если освещать глаза долгое время каким-то одним цветом, а затем перевести взгляд на белую поверхность, то некоторое время мы будем видеть пятно дополнительного цвета. Подобные явления связаны, вероятнее всего, со свойствами фотопре-

цепторов сетчатки. Они наблюдаются постоянно. Сюда относится, например, явление окрашивания теней: в сумерках тень от желтоватого источника света кажется нам синеватой.

Перейдем теперь к иллюзиям зрения, обусловленным психологическими причинами. Их очень много. Допустим, что изображение на сетчатке от двух разных источников совершенно одинаково. Это может быть, например, когда мы будем наблюдать мнимые и действительные изображения предметов.

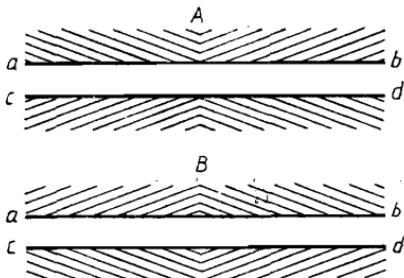


Рис. 2.3.7. Рисунок Геринга

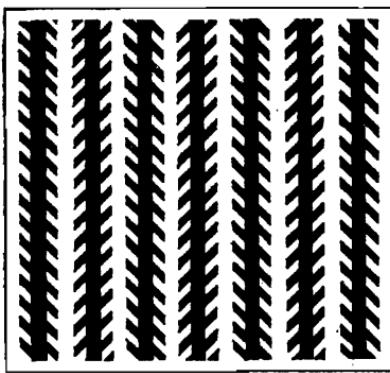


Рис. 2.3.8. Параллельны ли черные жирные линии?

Нам будет казаться, что предметы находятся там, где находятся их изображения. Мы показали это, например, на рис. 2.3.3. Вот еще аналогичный рисунок (2.3.7). Он даже имеет специальное название — рисунок Геринга (см. подробнее [24]). На нем приведены две прямые параллельные линии  $ab$  и  $cd$ . Однако в верхней части рисунка ( $A$ ) они кажутся сходящимися к концам, в нижней ( $B$ ) — сходящимися к середине. На рис. 2.3.8 широкие черные линии параллельны друг другу. Однако они кажутся непараллельными. Эта иллюзия еще более увеличивается при повороте рисунка на  $45^\circ$ . Если рис. 2.3.8 быстро осветить в темноте (искрой), то широкие линии покажутся строго параллельными. Кратковременное освещение не дает возможности взору скользить по рисунку, а правильное мгновенное изображение рисунка на сетчатке вызывает и правильную реакцию мозга.

Еще один более простой пример. В вагоне движущегося поезда мы смотрим в окно. Нам кажется, что движется весь окружающий ландшафт. С помощью только органов зрения нельзя доказать обратное. И только деятельность мозга дает нам правильную оценку ситуации. Она в свою очередь основана на всем нашем предшествующем опыте и работе всех органов чувств.

На рис. 2.3.9 изображена стеклянная пластина. Воспринимать ее можно по-разному. И глаз здесь не при чем. Можно представить себе, что ребро *ab* ближе к нам, чем ребро *bg* (рис. 2.3.9, *a*). Но столь же легко представить себе обратную ситуацию. Какие грани отмечены буквами *A* и *B*? Можно представить два разных варианта: 1) обе грани горизонтальны; 2) грани *A* и *B* вертикальны, грань *A* сзади, грань *B* спереди. Рассматриваемая пластина может быть полой и грани *A* или

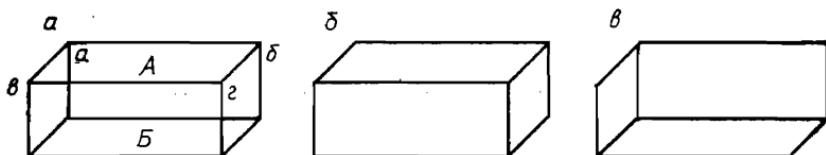


Рис. 2.3.9. Иллюзии в стеклянной пластиинке

*B* могут отсутствовать вовсе. Ответы на все эти вопросы могут зависеть от напряжения зрительного аппарата, и мы можем увидеть на рисунке то, что нам хочется. Неоднозначность связана с начертанием рисунка. Если нарисовать пластиину так, как это сделано на рис. 2.3.9, *b* и *c*, то неопределенность уменьшается.

В монографии [22] можно найти множество других примеров. Там же есть специальный раздел: «Иллюзии зрения, создаваемые искусственными устройствами». Все они подчеркивают основную мысль, высказанную в начале параграфа,— одного глаза недостаточно, чтобы видеть, чтобы правильно представить ощущаемое. Видит человек, а не глаз. Если полностью доверять глазам, можно наделать много ошибок. Глаз может дать и неверную информацию. Примеры иллюзий, приведенные выше, еще раз подтверждают эту общую истину. Только практика, повседневная деятельность человека может доказать достоверность того, что воспринимается нашими органами чувств.

**Эволюция глаза.** Когда автор писал эту главу, в журнале «Успехи физических наук» за 1984 г. [25] появился обзор М. В. Волькенштейна «Сущность биологической эволюции». Она начинается словами: «Эта статья о биологии, написанная физиком для физиков. Ее задача — рассказать о современном состоянии эволюционного учения» [25, с. 429].

Статья М. В. Волькенштейна интересна и ее следует рекомендовать всем физикам. Быть может, они найдут в ней проблемы, которые увлекут их, дадут пищу для размышлений и новых идей. Ведь хорошо известно, что новое развивается особенно успешно на стыке разных наук, разных научных направлений. Новое очень часто возникает там, где ученый одного профиля переходит работать в другую область знания. У такого ученого заметные преимущества: он еще не привык к

этой области знания, пока еще не консервативен, рассматривает ее проблемы как бы со стороны, привносит в нее идеи из той области науки, которой он занимался раньше. Сказанное выше составляет один из основных принципов правильно поставленного процесса научного творчества. Плохо, если научный сотрудник долгие годы занимается одной и той же проблемой, в одной и той же сравнительно узкой отрасли знания. В этом случае в своих новых публикациях он очень часто на-

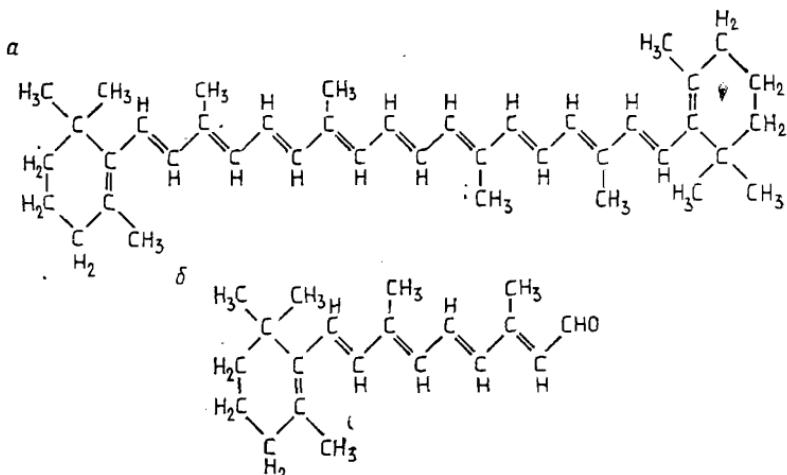


Рис. 2.3.10. Структура  $\beta$ -каротина (a) и ретиналя (b)

чинает повторять самого себя, привыкает к устоявшимся идеям, относится с недоверием к новому.

Автор снова просит прощения за отвлечение от основной темы, за увлечение проблемами методологии научного творчества. Быть может, эти рассуждения кому-нибудь пригодятся.

Итак, М. В. Волькенштейн написал обзор, посвященный биологии<sup>15)</sup>. В нем есть глава «История глаза». Проблемы эволюции глаза, разумеется, выходят за пределы задач, поставленных при написании книги, посвященной оптике. И все же хочется уделить этой проблеме две-три странички.

Так как автор не специалист в области биологии, то он ограничивается кратким изложением содержания упомянутого источника.

Как же возник глаз?

Биосфера, жизнь существуют благодаря солнечному излу-

<sup>15)</sup> М. В. Волькенштейн, с которым автор тесно сотрудничал около 10 лет, начинал свою научную жизнь как физик. Но уже в начале 50-х годов он переключается на решение биологических проблем и достигает там значительных успехов. Хороший резонанс получили его оригинальные монографии «Общая биофизика», «Биофизика», «Молекулы и жизнь», «Молекулярная биофизика» и другие.

чесию. Как мы уже отмечали, излучение в видимой области спектра определяет важнейшие биологические явления и прежде всего фотосинтез, ответственный за существование мира зеленых растений и созданной им атмосферы, содержащей кислород. Благодаря этому возникло и существует царство животных.

Свет оказывает воздействие на систему, если он ею поглощается. Как известно, хлорофиллы — вещества, поглощающие

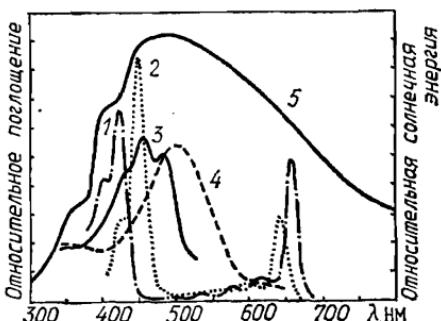


Рис. 2.3.11. Спектры поглощения хлорофилла *a* (1), хлорофилла *b* (2),  $\beta$ -каротина (3), родопсина (4) и спектра солнечного света (5)

свет в зеленых растениях, в ряде бактерий и водорослей. Существенное значение имеют также каротиноиды и фикобилины (рис. 2.3.10, 2.3.11).

Живая природа оперирует ограниченным числом «строительных кирпичей». Основой структуры хлорофилла является порфириновый цикл, в центре которого расположен атом магния. Такой же цикл, но с атомом железа, имеется в миоглобине, гемоглобине, в цитохромах и т. д. В крови членистоногих содержатся белки с атомами меди и т. д. Каротиноиды универсальны — они функционируют в организмах и растений, и животных.

История глаза начиналась с явлений фототаксиса — ориентации организма или его частей к свету, например поворотов к свету листьев и цветков растений. Применительно к свободно движущимся организмам (животным, некоторым бактериям) говорят о фотодвижении. В основе фототаксиса — явление фоторецепции, т. е. поглощение света каким-то образом организованными молекулами пигментов. Повороты и изгибы спорангиифора ряда грибков при освещении связаны с откликом сократительных белков (подобных мышечным) на фотостимуляцию. При этом возникает изменение электрохимического потенциала соответствующих клеток.

Красные галобактерии (комплекс белка оиссина с ретиналем) живут в соленых озерах. Они обладают положительным фототаксисом на видимый свет и отрицательным — на ультрафиолетовый. Поглощение света ведет к опреснению внут-

ренней среды бактериальной клетки. Бактериородопсин является не только фотосенсором, но и фотогенератором, создающим своего рода фототок.

Инфузории эвглена обладают положительным фототаксисом — они плывут к свету. В отличие от галобактерий, фоточувствительное вещество сосредоточено у них в виде фоторецепторного органа — глазного пятна. Оно связано со жгутиком, посредством которого эвглена движется. Здесь реа-

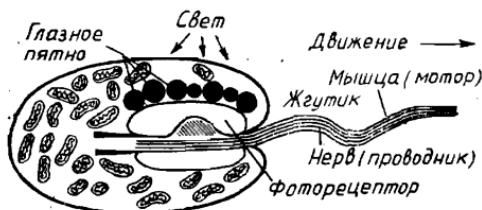


Рис. 2.3.12. Фоточувствительная клетка эвглены, содержащая систему глазное пятно—жгутик

лизуется взаимодействие, подобное нейромышечному у многоклеточных животных (рис. 2.3.12 и 2.3.13, а).

Развитие глаза у многоклеточных животных шло различными путями. Можно указать четыре стадии — примитивная фоторецепторная система (глазное пятно), простой глаз с изображением (булавочное отверстие), сложный глаз и преломляющий глаз. Как уже давно замечено, есть лишь несколько возможностей построения органа зрения. Холдейн, один из

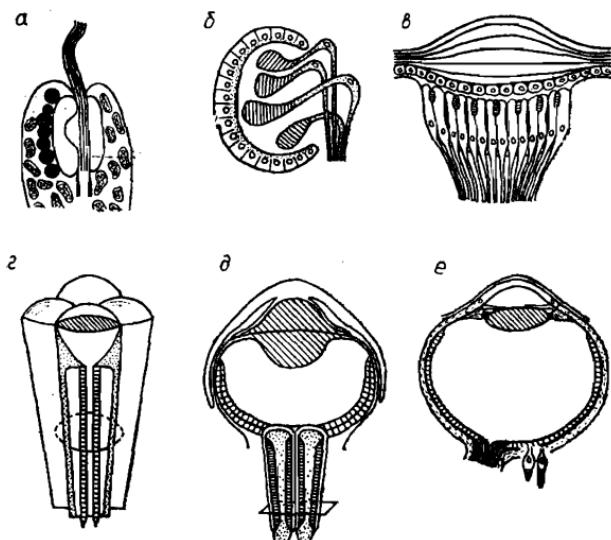


Рис. 2.3.13. Филогенетическое развитие различных типов глаз и структуры их фоторецепторов: а — глазное пятно—жгутик у инфузории, б — простой глаз плоского червя, в — простой глаз насекомого, г — сложный глаз членистоногого, д — глаз головоногого моллюска, е — глаз позвоночного

ученых, работающих в этом направлении, писал: «Имеются лишь четыре возможных типа глаза, если мы определим глаз как орган, в котором свет, падающий в одном направлении, стимулирует одно нервное волокно. Существует пучок трубок, смотрящих в разные стороны, и три типа, аналогичные трем хорошо известным инструментам: камера с булавочным отверстием, обычная камера с линзой и отражающий телескоп. Направленный ряд малых шагов ведет через тип с булавочным отверстием к типу с линзой и очень легко понять, как это могло произойти и не один раз».

Плоские черви обладают глазами — булавочными отверстиями. У дождевого червя светочувствительные клетки находятся на поверхности тела, каждая из них имеет линзу и окружена нейрофибрillярной сетью. Линза — специализированная область кутикулы — утолщение кожи. Структура, состоящая из линзы и скопления фоточувствительных клеток, называется простым глазом. Она показана на рис. 2.3.13, б, в. У многих насекомых такие простые глаза.

Таким образом, светочувствительные участки возникают уже у одноклеточных, соединения типа нейромышечных существуют у инфузорий. Появление линзы первоначально связано со случайным утолщением поверхностных тканей — соответствующие мутанты получали преимущества.

Второй тип оптической системы — пучок трубок. Размер изображения совпадает с объектом независимо от расстояния. Можно хорошо рассмотреть лишь объекты, равные или меньшие по размерам, чем это устройство. Невозможна оценка расстояния. Однако если отверстия трубок расположены по поверхности сферы или ее сегмента, причем трубы направлены к центру, то система работает много лучше. На этом принципе основана структура глаза ряда членистоногих. Сложный глаз, образующий изображение, установлен уже у трилобитов, живших в кембрийском периоде. Элементы такого глаза называются омматидиями. Их число может превышать 2000 (у стрекозы). Каждый омматидий в сложном глазе содержит линзу — утолщение роговицы, кристаллический конус и клетки ретинулы (сетчатки) с дифференцированной светочувствительной структурой (рис. 2.3.13, г).

На других ветвях эволюционного дерева возник глаз, подобный человеческому (рис. 2.3.13, д, е). У осьминога глаз устроен так же, как у позвоночных животных. Однако фокусирование изображения у осьминога происходит, как в фотоаппарате, — перемещением хрусталика, а у позвоночных — изменением его кривизны.

Сходство глаз моллюсков и позвоночных не означает их происхождения от общего предка. Общая схема биологической эволюции у них различна (см. [25]).

Во всей живой природе в качестве фоточувствительных

веществ используются различные родопсины — белковые соединения ретиналя; светочувствительные вещества однотипны. Эволюция органа зрения шла различными путями, заданными структурой исходного типа развития и естественным отбором.

Желающие ознакомиться с этим вопросом более подробно и рассмотреть проблемы эволюции глаза на фоне биологической эволюции могут обратиться к подлиннику и цитированной там обширной литературе.

## ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 2

1. **Вавилов С. И.** Глаз и Солнце: О свете, Солнце и зрении. 9-е изд. М., 1976. 127 с.
2. **Гуриков В. А.** Становление прикладной оптики XV—XIX вв. М., 1983.
3. **Леонардо да Винчи.** Избранные естественнонаучные произведения. М., 1955.
4. **Декарт Р.** Рассуждения о методе. М., 1953. 656 с.
5. **Лазарев П. П.** // Собр. соч. М.; Л., 1957. Т. 1.
6. **Кравков С. В.** Глаз и его работа. М.; Л., 1950.
7. **Майзель С. О.** Свет и зрение. Л.; М., 1932.
8. **Гвоздева Н. П., Коркина К. И.** Прикладная оптика и оптические измерения. М., 1976. 383 с.
9. **Покровский Г. И.** Свет. Глаз. Информация. М., 1968.
10. **Рвачев В. П.** Введение в биофизическую фотометрию. Львов, 1966. 378 с.
11. **Соколов Е. Н., Измайлов Ч. А.** Цветовое зрение. М., 1984.
12. **Роуз А.** Зрение человека и электронное зрение. М., 1977. 216 с.
13. **Шаронов В. В.** Свет и цвет. М., 1961. 311 с.
14. **Волосов Д. Г., Цивкин М. В.** Теория и расчет светооптических систем. М., 1960. 526 с.
15. **Тудоровский А. И.** Теория оптических приборов. М.; Л., 1948. Т. 1; 1952. Т. 2.
16. **Ломоносов М. В.** // Избранные философские сочинения. М., 1940. С. 146—165.
17. **Вавилов С. И.** // Собр. соч. М., 1956. Т. 3. С. 202—208.
18. **Кравец Т. П.** // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1943. Т. 7, № 6. С. 185—192; УФН. 1945. Т. 27, вып. 1. С. 13—21.
19. **Дерягин Б. В.** // УФН. 1947. Т. 32. С. 81.
20. **Кравков С. В.** // УФН. 1952. Т. 46, вып. 4. С. 441—449.
21. **Вавилов С. И.** // Собр. соч. М., 1952. Т. 2. С. 383—543.
22. **Артамонов И. Д.** Иллюзии зрения. М., 1969. 223 с.
23. **Левитин К., Ходош Л.** // Автомобильная пром-сть. 1983. № 12. С. 14—15.
24. **Хвольсон О. Д.** Курс физики. 3-е изд. СПб., 1911. Т. 2. 839 с.
25. **Волькенштейн М. В.** // УФН. 1984. Т. 143, вып. 3. С. 429—466.

## 3

## § 1. СМЕШЕНИЕ ЦВЕТОВ

«Все живое стремится к цвету». Так говорил великий Гете в книге «К учению о цвете (хроматика)». Он, вероятно, был первым, кто пытался выяснить специфику воздействия цвета на человека, на его психику. Ощущение цвета обогащает наше восприятие внешнего мира, позволяет глубже и легче познавать его, открывает нам неисчислимое множество деталей, явлений и предметов<sup>1)</sup>.

Число цветов, воспринимаемых глазом человека, невероятно велико. Их изучение — это особая наука, часть фотометрии. Ее называют цветоведением. Раздел цветоведения, связанный непосредственно с количественным измерением цветов, называют колориметрией. При современном развитии науки и техники только качественная оценка цветов уже невозможна, нужна строгая количественная характеристика, нужно однозначно обозначить любой цвет, измерять и воспроизвести его.

Человек изучает цвет уже очень давно. В языке всех народов есть специальные термины для обозначения важнейших цветов: белый, черный, серый, красный, желтый, зеленый, синий, фиолетовый. Имеется и много других слов, характеризующих самые различные оттенки цвета. Со временем людям понадобилась более точная характеристика цветов. Надо было отличать друг от друга цвета различных растений, животных, тканей, красок, цвета неба в различных условиях погоды... Цвет стал диагностическим признаком не только в повседневной жизни, но и в различных отраслях естествознания, не только в оптике, но и в химии, медицине, минералогии, во многих других науках. Роль цвета в живописи, архитектуре, театре, кино и телевидении переоценить невозможно.

Ранее, до возникновения колориметрии люди пытались

<sup>1)</sup> Не следует думать, однако, что цветослепые (и даже слепые) люди воспринимают внешний мир как-то иначе. Этим людям понять его труднее, у них меньше ощущений, процесс познания существенно усложнен. Но они узнают о внешнем мире то же самое, что и мы, обычные люди. Для них внешний мир также не есть вещь в себе и критерий истинности знания все тот же — способность к практической деятельности.

описывать различные цвета все новыми и новыми словами. Так появились обозначения цветов: красновато-желтый, индиго-синий, кошенильно-красный, томпаково-коричневый, яблочно-зеленый, медово-желтый... На первых порах такая номенклатура как-то удовлетворяла людей. Впоследствии выяснилось, что она не однозначна, субъективна и не удовлетворяет вновь возникающим потребностям. И тогда встал вопрос о создании точной номенклатуры, строгого однозначного определения цвета, способов воспроизводить любой заданный цвет в процессе производства тех или иных предметов и материалов. Именно тогда возникла колориметрия. Разумеется, она развивалась вместе с физиологической оптикой и офтальмологией, на основе этих наук.

Создание колориметрии было затруднено рядом обстоятельств. Необходимо было создать метрику цвета, измерять цвет в числах. Но ведь цвет сам по себе не есть какая-то величина, он только некоторое качество, причем у разных людей не всегда одинаковое. Тем самым измерение цвета качественно отлично от измерения других величин, встречающихся на практике, в физике и даже в фотометрии. Так, например, измерение цвета существенно отличается от измерения яркости. К цвету нельзя применить стандартные приемы метрологии, когда измеряемую величину сравнивают с каким-то эталоном и выясняют, во сколько раз она больше или меньше этого эталона. К цвету такая постановка вопроса принципиально неприменима: нельзя сказать, например, что красный цвет во столько-то раз больше или меньше синего или любого другого цвета.

Цвет светового потока связан, конечно, с его длиной волны, однако эта связь, к сожалению, неоднозначна. Измерение длины волны от 380 до 450 нм не вызывает изменений ощущаемого цвета. Световой поток кажется нам фиолетовым. Дальнейшее увеличение  $\lambda$  вызывает быстрый переход цвета от фиолетового к синему и голубому. В области зеленого цвета длина волны изменяется несколько медленнее. Наиболее быстро цвет изменяется в желтой области: для  $\lambda=570$  нм цвет еще зеленоватый, а для  $\lambda=590$  нм — уже оранжевый. В дальнейшем весь участок спектра от  $\lambda=620$  нм до инфракрасной границы кажется нам красным.

Уже отсюда следует, что точная характеристика цвета связана с длиной волны отнюдь неоднозначно. Но если для монохроматического света какая-то, хотя и грубая, зависимость все же существует, то для света, состоящего из разных длин волн, она вообще отсутствует. Напомним, что ощущение монохроматического света очень часто совпадает с ощущением, возникающим при воздействии на глаз двух или большего числа потоков разных длин волн. Смешение цветов связано с деятельностью мозга и уже поэтому цвет, воспринимаемый

нами, не может охарактеризоваться спектральным составом падающего излучения; данный цвет может быть реализован бесконечным числом способов. Зрение человека не способно определить по цвету истинные спектральные характеристики падающего излучения.

Смесь нескольких цветов воспринимается нами как какой-то новый цвет. Задача колориметрии, а также всего цветоведения и состоит прежде всего в определении цвета, образующегося при смешении нескольких световых потоков с разными длинами волн. Вариантов тут бесконечно много, и в них надо как-то разобраться.

Смешением цветов занимался еще И. Ньютон. Именно он показал впервые, что белый цвет может быть получен смешением других цветов. Он же установил, что при смешении цветов получаются не только те цвета, которые существуют в солнечном излучении, но и многие другие, которые в нем вообще отсутствуют.

Впоследствии в литературу был введен один на первый взгляд довольно странный термин — чистота цвета. И тем не менее этот термин разумен; чистота цвета характеризует долю спектрально чистого цвета в наблюдаемом нами реальном цвете. Это еще больше усложнило задачу, стоящую перед колориметрией.

Таким образом, чтобы разобраться в путанице огромного множества ощущений цвета и дать ему количественную характеристику, нужно было найти какие-то новые принципы классификации и измерения цвета.

**Цветовое уравнение.** Основная закономерность, обобщающая все известные факты смешения цветов, четко сформулирована Г. Грасманом<sup>2)</sup>. На сто лет ранее (1757 г.) аналогичные идеи были высказаны в качественной форме М. В. Ломоносовым. Согласно Грасману, между любыми четырьмя произвольно заданными цветами ( $\Pi_0, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$ ) может быть установлено линейное соотношение:

$$\Pi_0 = m\Pi_1 + n\Pi_2 + p\Pi_3. \quad (3.1.1)$$

В то же время подобная связь между тремя различными цветами имеет место отнюдь не всегда, хотя иногда и встречается на практике. Это означает, что цвет в колориметрии есть трехмерная величина.

После выбора трех независимых основных цветов любой цвет может быть охарактеризован однозначно совокупностью

• <sup>2)</sup> Г. Грасман (1809—1877 гг.) — немецкий математик, занимавшийся также физикой и философией. Он сформулировал учение о многомерном евклидовом пространстве, что, несомненно, способствовало развитию векторного и тензорного исчисления. Общие идеи о векторных пространствах привели Грасмана и к цветоведению; он стал рассматривать цветовые ощущения как трехмерные векторы.

трех чисел ( $m$ ,  $n$ ,  $p$ ). Эти числа были названы координатами цвета. Изменяя значения  $m$ ,  $n$ ,  $p$ , можно перебрать все бесконечное многообразие цветов.

Уравнение (3.1.1), разумеется, на выводится. Его надо считать хорошо обоснованным экспериментальным фактом. Первоначальная формулировка, сделанная Грасманом, была только догадкой. Понадобились многие десятилетия, чтобы она стала истиной, отражением реального процесса сложения цветов.

В качестве трех основных цветов  $\text{Ц}_1$ ,  $\text{Ц}_2$ ,  $\text{Ц}_3$  можно выбрать неисчислимое множество различных комбинаций. Однако нужна стандартизация не только в масштабе одной страны, но и в масштабе всего мира. В противном случае данные научных одной группы будут несравнимы с данными другой группы. Точно так же маркировка продукции одного предприятия (например, при производстве тканей) будет несравнима с маркировкой продукции другого предприятия.

Именно поэтому в одном из стандартов в качестве трех основных цветовых тонов были выбраны три монохроматических излучения:  $R$  (красный цвет) —  $\lambda = 700,0$  нм,  $G$  (зеленый цвет) —  $\lambda = 546,1$  нм,  $B$  (синий цвет) —  $\lambda = 435,8$  нм. Буквы  $R$ ,  $G$  и  $B$  — начальные буквы латинских слов: красный, зеленый, синий.

Обозначим яркости основных тонов  $R$ ,  $G$ ,  $B$  буквами  $L_R$ ,  $L_G$ ,  $L_B$ , а яркость цвета  $F$ , возникающего при их сложении, — буквой  $L_F$ . Допустим далее, что мы освещаем белую поверхность одновременно тремя световыми потоками:  $R$ ,  $G$  и  $B$ . В результате на экране могут возникать самые разнообразные цвета. При некоторых значениях  $L_R$ ,  $L_G$  и  $L_B$  в результате сложения получится белый цвет. Эти яркости назвали единичными. Иногда говорят о единичных цветах — это то же самое.

Многократно повторенные эксперименты показали, что белый цвет возникает, если отношение яркостей единичных цветов равно

$$L_R : L_G : L_B = 1 : 4,5907 : 0,0601. \quad (3.1.2)$$

Уравнение (3.1.2) можно считать теперь строго научным определением самого понятия «белый цвет». Действительно, белый цвет для каждого человека не одинаков. Что считать по-настоящему белым: снег, облака, белую бумагу, белый фарфор? Ответ абсолютно строг — белый цвет — это тот цвет, который образуется при смешении трех основных тонов  $R$ ,  $G$  и  $B$  в пропорциях, образуемых согласно (3.1.2).

Из (3.1.2) следует, что только одно из значений  $L_R$ ,  $L_G$  и  $L_B$  независимо. Его можно взять произвольно, но для стандартизации измерений в дальнейшем не изменять. Пусть единичный цвет спектральной линии  $R$  равен одному люмену;

тогда два других единичных цвета равны соответственно 4,5907 и 0,0601 лм.

В новых обозначениях формула (3.1.1) принимает вид

$$L_F \equiv r'L_R + g'L_G + b'L_B. \quad (3.1.3)$$

Уравнение (3.1.3) носит название цветового уравнения. Знак тождества показывает, что цветовое поле, записанное в правой и левой части уравнения, принципиально нельзя отличить друг от друга; оба этих поля имеют одинаковую цветность и одинаковую яркость.

В литературе по цветоведению уравнение (3.1.3) часто записывают в иных, более простых обозначениях:

$$F' = r'R + g'G + b'B. \quad (3.1.3')$$

Здесь символы  $R$ ,  $G$ ,  $B$  и  $F'$  обозначают те же самые яркости  $L_R$ ,  $L_G$ ,  $L_B$  и  $L_{F'}$ .

Коэффициенты  $r'$ ,  $g'$  и  $b'$  в уравнениях (3.1.3) показывают, сколько единиц каждого единичного цвета надо взять, чтобы получить данный цвет  $F'$ . Они называются цветовыми коэффициентами. Произведения  $r'R$ ,  $g'G$  и  $b'B$  носят названия цветовых составляющих; их сумма образует цвет  $F'$ . Заданный цвет определяется ими полностью и по цветности и по яркости.

Цветовое уравнение можно проиллюстрировать с помощью простейшего фотометрического устройства. На рис. 3.1.1, *а* изображена гипсовая прямоугольная призма. Будем смотреть на грани призмы в направлении ее оси. Мы увидим обе грани и разделяющую их тонкую линию. Границы призмы в фотометрии называют полями сравнения. Одно из полей сравнения осветим каким-либо цветным потоком излучения  $F'$ . Второе поле осветим совокупностью цветовых составляющих  $r'R$ ,  $g'G$  и  $b'B$ . Так как гипс отражает все падающее на него излучение, то, согласно (3.1.3'), второе поле сравнения будет неотличимо от первого.

Для ряда цветов  $F'$  получение равенства полей сравнения

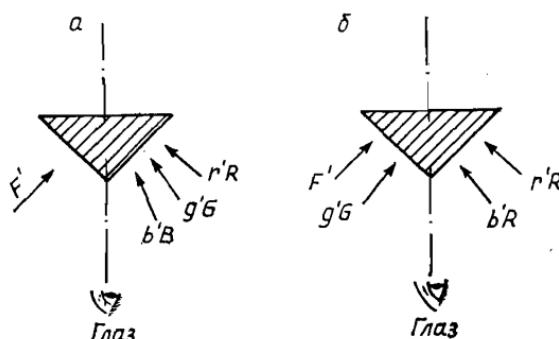


Рис. 3.1.1. Принципиальная схема цветоизмерительных устройств

и по цветности и по яркости неосуществимо. В то же время поля сравнения становятся одинаковыми в ситуации, изображенной на рис. 3.1.1, б. Правая грань призмы освещается световыми составляющими  $r'R$  и  $b'B$ , а левая — потоком  $g'G$  и потоком  $F'$ . В этом случае цветовое уравнение примет вид

$$F' = r'R - g'G + b'B. \quad (3.1.4)$$

Можно, конечно, пользоваться и уравнением (3.1.3), но иметь в виду, что цветовые коэффициенты  $r'$ ,  $g'$ ,  $b'$  иногда отрицательны.

При произвольных значениях  $r'$ ,  $g'$ ,  $b'$  уравнение (3.1.3) определяет цвет и яркость какого-то сложного светового потока. При некоторых значениях цветовых коэффициентов  $r'$ ,  $g'$  и  $b'$  левая часть уравнения (3.1.3) характеризует строго монохроматическое излучение  $F'(\lambda)$ . В этом случае

$$F'(\lambda) = r'(\lambda)R + g'(\lambda)G + b'(\lambda)B. \quad (3.1.5)$$

Подробные таблицы цветовых коэффициентов  $r'(\lambda)$ ,  $g'(\lambda)$  и  $b'(\lambda)$  можно найти в монографии [1]. Она вышла в свет в 1950 г., однако и до сих пор служит основным руководством для всех занимающихся цветоведением. Вместе с тем для желающих ознакомиться с проблемами цветоведения более подробно можно рекомендовать также монографии [2—15]. Монографии [5—7] рассчитаны на широкий круг читателей и содержат богатый иллюстративный материал.

Уравнения (3.1.3) и (3.1.5) дают нам тождество как по цвету, так и по интенсивности. Однако для многих колориметрических задач это не всегда необходимо, так как цвет не связан непосредственно с яркостью световых потоков. Для характеристики только цвета не обязательно задавать три смешиваемых потока в люменах или в энергетических единицах; цвет определяется однозначно относительными интенсивностями потоков  $R$ ,  $G$  и  $B$ , определяемыми (3.1.2). Чтобы найти цвет потока, возникающего при смешении трех основных цветов, достаточно знать отношения

$$r = \frac{r'}{r' + g' + b'}, \quad g = \frac{g'}{r' + g' + b'}, \quad b = \frac{b'}{r' + g' + b'} \quad (3.1.6)$$

Тогда

$$F = rR + gG + bB. \quad (3.1.7)$$

Коэффициенты  $r$ ,  $g$ ,  $b$  называются относительными цветовыми коэффициентами. Уравнение (3.1.7) носит то же название — цветовое уравнение, но определяет теперь только цвет образующегося потока  $F$ , но не его яркость. Для образования белого цвета значения  $r$ ,  $g$  и  $b$  должны равняться 1/3. Размерность величины  $F$  совпадает, разумеется, с размерностью еди-

личных тонов  $R$ ,  $G$  и  $B$ . Она выбирается произвольно. Значение  $R$  можно приравнять единице и совершенно безразлично, будет ли это 1 лм, или 1 Вт, или безразмерная величина — единица. Зная  $R$ , мы точно знаем  $G$  и  $B$  (см. (3.1.2)), и по совокупности трех чисел  $r$ ,  $g$ ,  $b$ , связанных между собой соотношением

$$r+g+b=1, \quad (3.1.8)$$

определяем  $F$  — цвет потока, возникающего при сложении трех исходных потоков  $R$ ,  $G$ ,  $B$ .

**Трехмерность цвета.** Цвет, образуемый в результате смешения трех единичных составляющих  $r'R$ ,  $g'G$  и  $b'B$ , задается однозначно тремя числами  $r'$ ,  $g'$ ,  $b'$ . Это позволяет рассматривать его как векторную величину в пространстве трех измерений. Все многообразие цветов характеризуется совокупностью точек трехмерного пространства.

Описанный метод позволяет сформулировать и решать самые различные задачи колориметрии. Любой цвет представляется в нем векторной суммой трех слагающих векторов, которые в свою очередь пропорциональны числам  $r'$ ,  $g'$  и  $b'$ .

В принципе для построения векторной схемы можно выбирать любые направления осей и любую величину единичных векторов (ортов). Имеется и свобода выбора основных линейно независимых цветов<sup>3)</sup>. На практике используется только несколько таких вариантов. Возможно, например, применение системы координат, единичные цвета которой обусловлены свойствами данного конкретного колориметра (пропусканием его светофильтров). Такие системы допустимы при решении колориметрических задач того или иного массового производства при контроле качества продукции.

Наиболее рациональной общепринятой координатной системой является прямоугольная система координат, орты которой отвечают трем единичным цветам, уже описанным нами ранее<sup>4)</sup>.

Практическое применение получила также координатная система с ортами  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  вне области реальных цветов. Мы опишем ее в конце параграфа. Существуют также координатные системы, однозначно определяемые свойствами используемых приемников радиации. Все эти координатные системы могут быть связаны между собой соответствующими уравнениями перехода (см. [1]).

**Цветовой треугольник.** Если нас интересует только цвет, образованный при смешении единичных цветов  $R$ ,  $G$ ,  $B$ , то результат смешения определяется формулой (3.1.7), причем

<sup>3)</sup> Линейно зависимые цвета оказались бы в одной плоскости и, следовательно, были бы непригодны для описания трехмерных величин.

<sup>4)</sup> Эта система принята Международной осветительной комиссией в 1931 г.

сумма относительных цветовых коэффициентов равна единице; только два из них независимы. Уравнение (3.1.7) в прямоугольной системе координат с ортами  $R$ ,  $G$ ,  $B$  есть уравнение плоскости. Это означает, что все единичные цвета характеризуются точками одной плоскости — секущей трехгранного угла  $RGB$ . Она изображена на рис. 3.1.2. Точка  $F$  на плоскости соответствует определенному цвету. Его же характеризует

направление вектора, проведенного через точку  $F$  из начала координат.

Следует напомнить, что во многих случаях один из цветовых коэффициентов может быть отрицательным. Чтобы лучше разобраться, как это характеризуется точками секущей плоскости, пере-

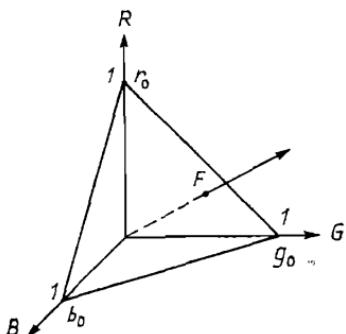


Рис. 3.1.2. Трехмерность цвета

несем треугольник  $r_0g_0b_0$ , изображенный на рис. 3.1.2, в плоскость нашего листа бумаги (рис. 3.1.3, a). Треугольник  $r_0g_0b_0$  равносторонен, его высота равна единице. В точке  $r_0$   $r=1$ ,  $g=0$ ,  $b=0$ . Эта точка соответствует цвету  $R$  без примесей цветов  $G$  и  $B$ . Аналогичен смысл точек  $g_0$  и  $b_0$ . Для точек, находящихся на стороне треугольника  $r_0b_0$ , значение  $g_0$  равно нулю. Все эти точки характеризуют смешение двух цветов  $R$  и  $B$ . Точно так же точки на стороне  $r_0g_0$  характеризуют смешение цветов  $R$  и  $G$  ( $b=0$ ), точки на стороне  $b_0g_0$  — смешение цветов  $B$  и  $G$  ( $r=0$ ).

Рассмотрим теперь произвольную точку  $F$  внутри треугольника  $r_0g_0b_0$ . Она определяется  $r$ ,  $g$ ,  $b$ . Опустим перпендикуляры из этой точки на стороны треугольника. С помощью исходного рисунка (3.1.2) легко показать, что длина перпендикуляра на сторону  $r_0b_0$  равна  $g$ , на сторону  $b_0g_0$  —  $r$ , на сторону  $r_0g_0$  —  $b$ . Таким образом, цвет смеси однозначно задается

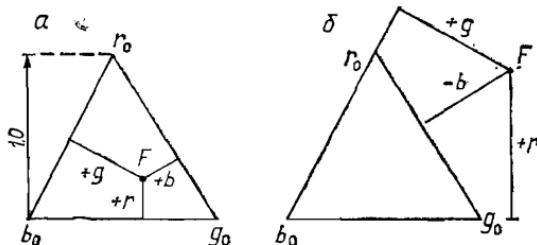


Рис. 3.1.3. Цветовые треугольники

величиной перпендикуляров на все три стороны треугольника<sup>5)</sup>. Именно поэтому он называется цветовым треугольником.

Точка в центре рассматриваемого треугольника ( $r=g=b=1/3$ ) соответствует белому цвету. Можно доказать математически, что цвета, получающиеся при смещении двух цветов  $F'$  и  $F''$ , расположены на прямой линии  $F'F''$ . Цветоведение действительно стало количественной наукой, обладающей способностью не только объяснять, но и предсказывать факты. На биссектрисах треугольника располагаются цвета, образующиеся при смещении двух основных цветов с белым цветом центра треугольника.

Все точки  $F$  внутри цветового треугольника соответствуют положительным значениям  $r$ ,  $g$ ,  $b$ . Но, как мы видели выше (см. формулу (3.1.4)), эти значения бывают и отрицательными. Тем не менее сумма рассматриваемых перпендикуляров будет равна единице и в этом случае (рис. 3.1.3, б). Отсюда следует, что точки плоскости вне цветового треугольника соответствуют цветам, которые не могут быть получены смещением положительных единичных цветов. Эти точки, например, при отрицательных значениях  $b$  характеризуют уравнение

$$F+bB=rR+gG. \quad (3.1.9)$$

Цвет  $F$  — реально существующий цвет, но, повторяясь, суммированием цветов  $R$ ,  $G$  и  $B$  его не получить.

Как уже отмечалось, чистые спектральные цвета  $F(\lambda)$  также подчиняются цветовому уравнению (3.1.5). Если учесть (3.1.6), то оно примет вид

$$F(\lambda)=r(\lambda)R+g(\lambda)G+b(\lambda)B. \quad (3.1.9')$$

На рис. 3.1.4 нанесены точки  $F(\lambda)$ , соответствующие всем спектральным цветам. Значения  $r(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$  и  $b(\lambda)$  взяты из таблицы. На линии, соединяющей спектральные цвета, указаны значения длин волн в нм. Эта линия называется линией спектральных цветов. Как видно из рисунка, все чисто спектральные цвета, кроме трех основных, находятся вне цветового треугольника.

На линии, соединяющей точку красного цвета  $R$  и фиолетовый цвет ( $\lambda=380$  нм), лежат все пурпурные цвета. Детальный анализ цветового графика показывает, что на плоскости, ограниченной кривой чистых спектральных цветов и линией пурпурных цветов, расположены все возможные цвета.

На рис. 3.1.4 проведена прямая, соединяющая белый цвет  $E$  с некоторым спектрально чистым цветом  $F(\lambda)$ . На этой прямой расположены все цвета, которые могут быть получены

<sup>5)</sup> Напомним здесь одну из теорем геометрии: алгебраическая сумма перпендикуляров, опущенных из любой точки, находящейся внутри равностороннего треугольника, на его стороны, равна его высоте. В нашем случае высота треугольника равна единице и, следовательно,  $r+g+b=1$ .

смешением белого цвета с цветом  $F(\lambda)$ . Они имеют одинаковый цветовой тон ( $\lambda$ ), но по-разному разбавлены белым цветом, отличаются друг от друга чистотой цвета. В точке  $E$  чистота цвета всех цветовых тонов, естественно, равна нулю. На линии спектральных цветов чистота цвета всегда равна 100%.

Еще раз повторяемся. Любой не спектрально чистый цвет может быть получен смешением бесчисленного множества пар цветов. Проведем через точку, характеризующую какой-то цвет  $F$ , любую прямую линию (см. рис. 3.1.4). Она пересечет линию спектральных цветов в точках  $a$  и  $b$ . Любые два цвета на этой прямой,

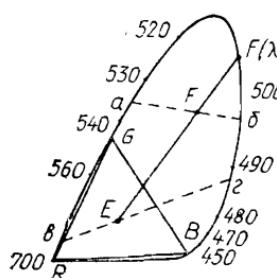


Рис. 3.1.4. Цветовой график всех реально существующих цветов

расположенные по разные стороны прямой  $EF$ , при смешении в определенных количествах дадут цвет  $F$ . То же самое справедливо не только для прямой  $ab$ , но и для любых других, проведенных через точку  $F$ .

Если прямая проведена через центр цветового треугольника  $E$  (прямая  $vg$  на рис. 3.1.4), то суммирование любых двух цветов по разные стороны от точки  $E$  может дать белый цвет. Важно подобрать только соотношение интенсивностей таких цветов. Как мы уже отмечали, эти цвета называются дополнительными. Число пар, дополнительных друг к другу, бесконечно велико.

Цветовой треугольник дает нам огромную информацию. При всем бесконечном многообразии вариантов суммирования цветов он несет вполне определенные и значимые сведения. Вот еще один простой пример. Допустим, смешиваются спектрально чистые цвета  $F_a$  и  $F_b$ . В результате будут получены цвета, лежащие на прямой  $ab$ . Все они не принадлежат к спектрально чистым цветам. Отсюда вывод: при смешивании двух спектрально чистых цветов нельзя получить другой спектрально чистый цвет.

Мы не можем останавливаться здесь на деталях этой интересной проблемы и, в частности, на реальных расчетах цветов с учетом их яркости. Подробности можно найти в цитированной литературе. Они нужны только лицам, специализирующимся в области колориметрии.

**Международная система классификации цветов (XYZ).** Только что описанная система классификации цветов обладает одним существенным недостатком — в ней содержатся

отрицательные цветовые коэффициенты, вследствие чего конкретные численные расчеты значительно усложняются. По этой причине в 1931 г. Международная комиссия по освещению утвердила новую систему определения цвета [16].

В этой системе цветовой треугольник  $RGB$  заменен другим треугольником. В его вершинах лежат новые основные цвета  $X, Y, Z$ . Их выбирают так, чтобы все поле реальных цветов находилось внутри нового треугольника. Это возможно, если новые цвета  $X, Y, Z$  будут находиться вне линии спектральных цветов системы  $RGB$  и, следовательно, будут *нереальными, несуществующими цветами*.

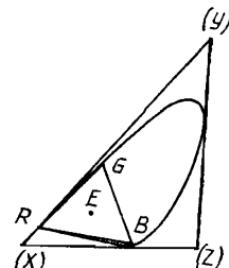


Рис. 3.1.5. Переход от основных цветов  $R, G, B$  к основным цветам  $X, Y, Z$

В процессе выбора новой системы основных цветов  $X, Y, Z$  была введена промежуточная система  $(X), (Y), (Z)$ . Ее основные цвета в исходной системе цветов  $R, G, B$  изображены на рис. 3.1.5. Однако в новом цветовом треугольнике  $(X), (Y), (Z)$  имеется серьезный недостаток, по-прежнему усложняющий численные расчеты,— белый цвет  $E$  не находится в центре треугольника. Поэтому от системы  $(X), (Y), (Z)$  был осуществлен переход к окончательной системе  $X, Y, Z$ , лишенной отмеченного недостатка [1]. Уравнения связи цветов  $R, G, B$  с цветами  $X, Y, Z$  линейны. Они имеют вид

$$\begin{aligned} X &= 2,36461R - 0,51515G + 0,00520B, \\ Y &= -0,89654R + 1,42640G - 0,01441B, \\ Z &= -0,46807R + 0,08875G + 1,00921B. \end{aligned} \quad (3.1.10)$$

Обращаем внимание читателя, что коэффициенты уравнений (3.1.10) даны с точностью до пятой цифры после запятой; это достаточно надежно. Такова, в принципе, точность расчета цветовых характеристик излучения.

Согласно (3.1.10),

$$X + Y + Z = R + G + B, \quad (3.1.11)$$

и, следовательно, белый цвет находится в центре нового цветового треугольника.

Подробности расчетов цвета в новой системе основных цветов можно найти в работе [1].

## § 2. ИЗМЕРЕНИЕ ЦВЕТА

**Основные типы колориметров.** Приборы для измерения цвета называются колориметрами. Процесс измерения — это нахождение трех чисел (координат), характеризующих цвет и яркость исследуемого излучения в системе цветов  $R$ ,  $G$ ,  $B$  или  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  или, в принципе, в какой-то другой системе, удобной для данного конкретного эксперимента. Процесс измерения сводится к созданию из трех основных цветов нового цвета, в точности совпадающего с исследуемым.

Колориметры широко применяются на практике для измерения цвета источников света, светофильтров, цветных стекол, минералов, тканей, красок, естественных покровов, а также в полиграфии, лакокрасочной, электроламповой и текстильной промышленности, фотографии, кино, телевидении и т. д.

Колориметры можно разделить на визуальные и объективные (в основном фотоэлектрические). Визуальные колориметры делятся в свою очередь на аддитивные и субтрактивные.

Визуальные колориметры по своей сути исходят из принципа, приведенного на рис. 3.1.1. В окуляре колориметра наблюдатель видит два световых поля. Одно из них образуется исследуемым излучением, другое — смешением трех основных стандартных излучений, интенсивность которых легко варьируется. Наблюдатель должен подобрать их так, чтобы оба световых поля были неотличимы друг от друга. В данном случае необходимо совпадение двух полей зрения и по цвету и по яркости<sup>6)</sup>.

Визуальная колориметрия имеет очевидный недостаток: восприятие цветов у разных людей несколько различно. Именно поэтому желательно использование объективных методов.

Принцип действия аддитивных визуальных колориметров нами уже сформулирован — он основан на сравнении исследуемого цвета с суммой трех основных цветов. Субтрактивные визуальные колориметры основаны на явлении вычитания цветов.

Объективные колориметры могут быть построены на разнообразных физических принципах с использованием зависимости используемых явлений от длины волны. К ним относятся фотохимическое действие света, термоэлектрический ток, фотоэлектрические процессы.

**Аддитивные колориметры.** Простейший тип аддитивного колориметра был предложен еще Maxwellом. Мы о нем уже упоминали. Этот колориметр называют иногда вертушкой Maxwellла. Он представляет собой плоский диск, приводимый

<sup>6)</sup> При решении ряда задач фотометрии два поля зрения уравнивают только по яркости (без совпадения цвета). В таких случаях говорят о гетерохромном фотометрировании.

во вращение. Диск совершает более 2000 оборотов в минуту. Центральную часть диска занимает круглый образец, цвет которого определяют. Кольцо, окружающее образец, разделено радиусами на три сектора. Каждый сектор окрашен в один из основных цветов (*R, G, B*). Размеры секторов легко варьируются. Необходимо добиться, чтобы при быстром вращении диска цвет его наружной части совпал с цветом исследуемого образца. В данном случае сложение цветов динамическое —

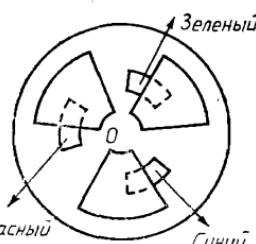


Рис. 3.2.1. Тройная диафрагма со светофильтрами и заслонками в колориметре Л. И. Демкиной

при быстром чередовании цветов колбочки глаза регистрируют суммарный цвет.

Статическое сложение цветов в аддитивных колориметрах применяется значительно чаще. Широко распространен, например, колориметр системы Л. И. Демкиной (см. [1]). Основная деталь этого устройства — тройная диафрагма со светофильтрами и заслонками. Она представляет собой металлический диск с тремя секторными вырезами (рис. 3.2.1), закрытыми тремя цветными стеклами — красным, зеленым и синим. Каждый из трех вырезов может закрываться полностью или частично отдельной заслонкой, вращаемой вокруг оси диска. Размеры открытой площади светофильтров легко измеряются по шкалам, имеющимся на заслонках.

Свет от белого источника света фокусируется линзой в точку *O*. Рядом с линзой ставится только что описанная диафрагма. Тем самым в точке *O* смешиваются три цвета в дозах, определенных открытой площадью светофильтров. Поворачивая заслонки, легко изменять цвет и яркость света в точке *O*. В точке *O* колориметра ставится светорассеивающий экран; свет, отраженный от экрана, попадает в одну половину поля зрения окуляра наблюдателя. В другую половину попадает исследуемое излучение (подробности см. в [1]). Передвигая заслонки, наблюдатель добивается выравнивания картины в обеих частях поля зрения и тем самым определяет коэффициенты цветового уравнения

$$\Phi = k'K + z'Z + c'C. \quad (3.2.1)$$

Уравнение (3.2.1) эквивалентно цветовому уравнению (3.1.4), но имеет другие основные цветовые тона *K, Z, C*, зави-

сящие от типа светофильтров. Как мы уже отмечали ранее, числа  $k'$ ,  $z'$  и  $c'$  называются координатами цвета  $\Phi$ . Они дают и качественную характеристику этого цвета. Сумма  $m = k' + z' + c'$  есть модуль цвета  $\Phi$  в системе основных цветов КЗС и служит мерой его яркости. Отношения

$$k = k'/m, \quad z = z'/m, \quad c = c'/m \quad (3.2.2)$$

характеризуют качество цвета. Согласно (3.2.2),

$$k + z + c = 1. \quad (3.2.3)$$

Такой способ характеристики цвета вполне удовлетворителен, если наблюдатель определяет координаты разных цветов всегда на одном и том же приборе, при заданном источнике света, коэффициенте отражения экрана и, что особенно важно, при заданных светофильтрах. Цвета, пропускаемые фильтрами, не монохроматичны. По всем этим причинам измерения цвета, выполненные на разных колориметрах даже одного и того же типа, нельзя сравнивать друг с другом. Чтобы сравнение цветов стало возможным, нужна соответствующая калибровка каждого отдельного колориметра.

Для решения поставленной задачи цвет  $\Phi$  надо выразить через цвета  $R, G, B$  или международную систему  $X, Y, Z$ :

$$\begin{aligned} K &= x'_k X + y'_k Y + z'_k Z, \\ Z &= x'_z X + y'_z Y + z'_z Z, \\ C &= x'_c X + y'_c Y + z'_c Z. \end{aligned} \quad (3.2.4)$$

Коэффициенты уравнений (3.2.4) можно найти только экспериментально.

Принципы действия всех других визуальных аддитивных колориметров по существу не отличаются от колориметра Демкиной. Различие заключается только в конкретных деталях устройства приборов.

**Субтрактивные колориметры.** Субтрактивные колориметры — это приборы для измерения цвета, основанные не на сложении, а на вычитании цветов. Они используются реже, что связано с трудностями расчета поля зрения колориметра. Вместе с тем конструкция приборов значительно проще и поэтому они широко применяются, например, в цветной фотографии и кинематографии.

Рассмотрим сперва сущность самого процесса вычитания цвета. Пусть имеется излучение с произвольным относительным спектральным составом  $I(\lambda)$  и цветом  $\Phi_0$ . Координаты этого цвета в системе  $X, Y, Z$  равны  $x', y', z'$ . Пропустим излучение  $I(\lambda)$  через поглощающий светофильтр, пропускание которого равно  $T(\lambda)$ . Состав излучения, проходящего через фильтр, равен  $I(\lambda) \cdot T(\lambda)$ , задержанного (поглощенного) им —

$I(\lambda) [1 - T(\lambda)]$ . Цвет излучения  $\Phi_1$ , проходящего через фильтр, определяется разностью

$$\Phi_1 = \Phi_0 - \Phi_2,$$

где  $\Phi_2$  — цвет излучения, задержанного им. Зная цветовые свойства светофильтра заранее, можно, измеряя  $\Phi_1$ , узнать координаты падающего потока  $\Phi_0$ .

Визуальный субтрактивный колориметр работает по сле-

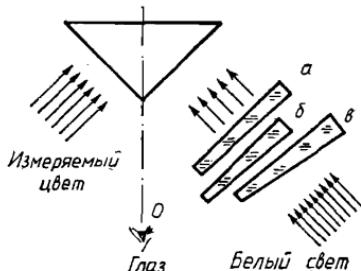


Рис. 3.2.2. Принципиальная схема визуального субтрактивного колориметра:  
а — красный клин, б — зеленый, в — синий

дующей схеме (рис. 3.2.2). Равенство двух полей зрения достигается перемещением трех клиньев в плоскости, перпендикулярной падающему потоку белого света. Клины стеклянные красного, зеленого и синего цвета. В данном случае все эти три цвета вычитаются из белого цвета в пропорциях, соответствующих толщине клиньев. Остающийся цвет воспринимается глазом в правой части поля зрения. Подбор материала для изготовления клиньев заданного цвета не представляет затруднений.

Детали определения координат исследуемого цвета можно найти в специальной литературе.

**Объективные колориметры.** Основные типы объективных колориметров основаны на фотоэлектрических явлениях. В

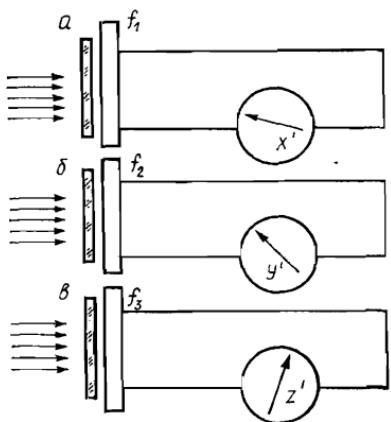


Рис. 3.2.3. Принципиальная схема объективного колориметра на трех фотоэлементах

глаза — фотоэлементы. Принцип действия тот же. Основные элементы колориметра изображены на рис. 3.2.3. Исследуемое излучение падает одновременно на три фотоэлемента. Перед фотоэлементами стоят три разных светофильтра. Они подобраны так, чтобы сила тока в цепи

первого фотоэлемента давала сразу же одну координату исследуемого цвета, в цепи другого — вторую, в цепи третьего — третью.

**Цветные атласы.** Инструментальные методы измерения и расчета цвета требуют времени и достаточно сложных приборов. По этой причине на практике часто пользуются атласами цветов. Они просты для использования, хотя и не точны. Определение цвета окрашенного предмета производится путем подбора одноцветной окраски среди эталонных образцов (накрасок). В атласе содержится большое число образцов<sup>7)</sup>; каждый из них имеет определенное обозначение. Если в данном атласе имеется большое число образцов с постепенно изменяющимися цветами, то использование метода подбора во многих случаях может удовлетворить практические потребности.

Существенный недостаток данного способа — зависимость цвета исследуемого предмета и эталонных образцов от способа освещения. Эта зависимость тем больше, чем значительнее различие в кривых спектрального отражения.

**Спектрофотометрия.** Задача спектрофотометрии — измерение зависимости светового потока от длины волны. Если спектр излучения сплошной, то полученная кривая  $\Phi(\lambda)$  будет непрерывной. В дискретных спектрах необходимо измерять интенсивности световых потоков отдельных спектральных линий. Очень часто спектрофотометрические измерения сводятся к относительным измерениям — к сравнению интенсивностей излучения заданной длины волны исследуемого и эталонного источников света.

Точные спектрофотометрические измерения очень важны для многих разделов оптики и, в частности, для колориметрии. Все расчеты цвета и градуировки колориметров требуют использования спектрофотометрических данных.

Каждый спектрофотометр содержит два основных узла: один — для разложения падающего излучения в спектр и выделения чистых спектральных потоков, другой — для измерения их величины. Спектральное разложение и выделение излучения в интересующей нас области спектра осуществляется с помощью различных призменных устройств, дифракционных решеток, эшелонов, а также веществ с ярко выраженным селективным поглощением. Для измерения потоков  $\Phi(\lambda)$  применяются различные приемники радиации — о них мы уже говорили в главе 1.

Качество спектрального прибора существенно зависит от его дисперсии и разрешающей силы. В спектроскопии требуется обычно выделение очень узкого интервала длин волн  $\Delta\lambda$ . В колориметрии чаще всего удовлетворяются более грубой монохроматизацией света.

<sup>7)</sup> В некоторых атласах содержится по нескольку тысяч различных цветов и тонов.

В ряде случаев, когда требуется особая спектральная чистота выделяемого излучения, прибегают к двойной монохроматизации. Это связано с наличием в любом приборе излучения, рассеянного его деталями. В результате наряду с основным излучением длины волны от  $\lambda_i$  до  $\lambda_i + \Delta\lambda$  из щели спектрального прибора выходит излучение других длин волн; обычно оно малоинтенсивно, но тем не менее нарушает спектральную чистоту полученной радиации.

Для борьбы с рассеянным светом применяют два способа. В первом случае ограничиваются помещением перед выходной щелью светофильтра. Этот светофильтр должен иметь хорошее пропускание в области длин волн  $\lambda_i$  и поглощать излучение других длин волн. К каждому прибору необходимо иметь большой набор светофильтров для разных  $\lambda_i$ . Второй способ устранения рассеянного света связан с последовательным использованием двух призм, иначе говоря, с последовательным применением двух монохроматоров. Выходная щель первого монохроматора служит входной щелью для второго.

### § 3. ЦВЕТНАЯ ФОТОГРАФИЯ

**Краткие исторические сведения.** Фотография основана на химических реакциях, происходящих под действием света. Это явление было замечено только в XVIII в. В 1725 г. наблюдалось действие света на соли железа, в 1727 г.—на соли серебра. Через 50 лет проведено изучение действия различных спектральных лучей Солнца на хлористое серебро.

Открытие фотографии датируют 1839 г. В 1841 г. впервые реализован двухступенчатый негативно-позитивный процесс, позволивший размножать фотографические снимки. Развитие фотографии стимулировало развитие многих смежных наук и, в частности, геометрической оптики, теории фотообъективов. Вместе с тем быстро развивалась химия нового класса соединений, создавались новые типы веществ и новые типы реакций. В 70-х годах XIX в. был изобретен желатиновый процесс, позволивший резко повысить светочувствительность слоев и перейти к использованию долго хранящихся сухих бромосеребряных желатиновых пластиинок. С тех пор началось промышленное изготовление фотографических материалов.

Крупным шагом в развитии фотографии стало открытие явления сенсибилизации фотослоя (1873 г.). Как известно, бромосеребряные слои чувствительны только для света, длина которого меньше 500 нм. Окраска бромосеребряных слоев различными сенсибилизаторами позволила продвинуться в красную и даже инфракрасную область.

Подробное описание особенностей фотографического процесса может быть найдено в монографии, посвященной фото-

химии. Здесь же в главе, посвященной цветоведению, нас интересует лишь история возникновения цветной фотографии и некоторые ее особенности, связанные с понятием цвета.

Первые попытки получения цветных фотографий относятся к самому началу развития фотографии. Исходные идеи принадлежат Дж. Максвеллу, который посвятил цветоведению значительную часть своих научных поисков. В 1861 г. он высказал мнение, что фотографическое воспроизведение цветов вполне возможно и достаточно реально. Для этого необходимо, считал Максвелл, использовать три негатива, полученные съемкой через светофильтры (красный, зеленый, синий). В те годы активно разрабатывалась теория трехкомпонентности цветового зрения, и сам Максвелл по праву считается одним из ее создателей.

Точка зрения Максвella послужила основой многих экспериментов. Уже в 1868—1869 гг. получены первые цветные фотографии, пока еще плохого качества. В 1888 г. было продемонстрировано светотеневое цветное фотографическое изображение путем проецирования на экран одновременно трех диапозитивов (красного, зеленого и фиолетового). Теория смешения цветов позволяла предсказывать новые закономерности.

Следующий важный шаг связан с работами Г. Липпмана<sup>8)</sup>. Он разработал (1891 г.) прямой метод получения фотографических снимков в естественных цветах, основанный на явлении интерференции световых волн. Световой поток, несущий цветное изображение предмета, падает нормально<sup>9)</sup> на толстый фотослой. На другой стороне фотослоя находится зеркальная поверхность. Свет, отразившийся от этой поверхности, интерферирует с падающим светом. В результате образуется стоячая волна, для каждого цвета разная. Она различна и в каждой точке поверхности фотослоя. В пучностях электрического вектора происходит максимальное разложение бромистого серебра. После проявления весь слой разбивается на множество тончайших нитей из металлического серебра, которые в свою очередь то утолщаются, то утончаются. Если теперь образовавшийся слой осветить белым светом, то в отраженном потоке будет наблюдаться четкая цветная фотография предмета; пластиинка избирательно отражает световые лучи разного цвета, в каждой точке поверхности слоя по-разному.

В 1900 г. цветные фотографии, изготовленные по методу Липпмана сотрудником Физического института Московского

<sup>8)</sup> Габриэль Липпман (1845—1921 гг.) — французский физик. Работы Липпмана посвящены механике, молекулярной физике и цветной фотографии. За работы в области цветной фотографии Липпман удостоен (1908 г.) Нобелевской премии.

<sup>9)</sup> Это условие не обязательно. Оно введено для простоты изложения.

университета И. Ф. Угатиным, демонстрировались на Международном конгрессе в Париже.

В настоящее время метод Липпмана не применяется, он заменен другими, более простыми и эффективными методами. Вместе с тем следует сразу же подчеркнуть, что идея метода Липпмана использована через 50 лет ленинградским ученым Ю. Н. Денисиюком при разработке качественно нового способа получения голограмм — объемных изображений предметов.

Не нашел широкого распространения и другой способ прямого фотографирования цветных предметов, основанный на выцветании красителей<sup>10)</sup>. Подбор красителей с одинаковой светочувствительностью весьма сложен.

В конце XIX в. началось развитие негативно-позитивных методов цветной фотографии, в настоящее время общепринятых. В 1896 г. фотограф Е. Ф. Баринский сделал доклад на съезде Русского фотографического общества о разработанном методе цветоделительного фотографирования. После этого было предложено множество конкретных способов получения цветного изображения. Большинство из них не выдержало испытания временем.

**Аддитивный способ получения цветных изображений.** Цветная фотография существует 50 лет. После нее появилось цветное кино, а затем цветное телевидение. Однако молодежи кажется, что все эти чудеса научного творчества существовали всегда. Наша жизнь без цветного телевизора уже как-то неестественна.

Как и при измерении цвета, различают два типа получения цветных фотографий: аддитивный и субтрактивный.

Суть аддитивного метода хорошо демонстрируется с помощью рис. 3.3.1, взятого из научно-популярной книги Г. И. Ашкенази [2]. Рисунок отображает методы получения цветного изображения. Лучшей иллюстрации этого метода, по-видимому, не придумать.

Как видно из рисунка, объект фотографируется 3 раза на панхроматографическую пленку (т. е. пленку, чувствительную ко всем цветам видимой области спектра). При первом фотографировании перед фотоаппаратом ставится красный светофильтр, при втором — зеленый, при третьем — синий. После проявления пленок получаются три негатива. Вид этих негативов показан на рисунке. Почернения всех негативов будут разные и только в тех местах, куда падает свет, пропускаемый светофильтрами. При использовании красного светофильтра почернения будут в тех местах негатива, где объект имеет следующие цвета: красный, оранжевый, желтый, пурпурный,

<sup>10)</sup> Прямые методы фотографирования — это методы, у которых нет разделения процесса на два этапа: получение негативов, а затем на их основе печатание позитивов.

белый и отчасти серый. Степень почернения отдельных частей негатива будет зависеть от яркости отдельных цветов фотографируемого объекта. Аналогичные особенности имеются у второго и третьего негативов. Все они называются *цветоделенными*. Иногда эти негативы называют «красным», «зеленым» и «синим», хотя они не имеют цвета; разные части этих негативов имеют разное почернение.

Следующая операция, также показанная на рисунке, —

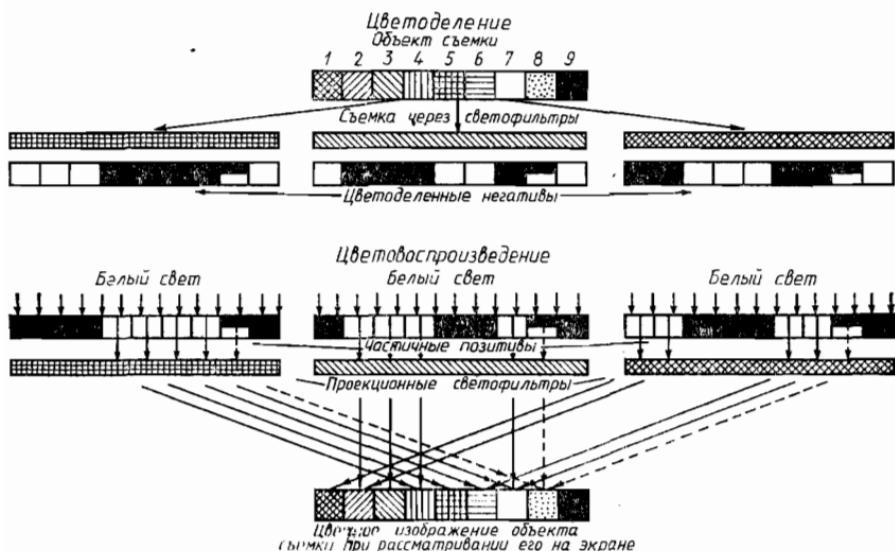


Рис. 3.3.1. Схема получения цветного изображения аддитивным способом: 1 — синий, 2 — голубой, 3 — зеленый, 4 — желтый, 5 — красный, 6 — пурпурный, 7 — белый, 8 — серый, 9 — черный

воспроизведение цветов. Наложим каждый из трех негативов на фотопленку и осветим их белым светом. В результате после проявления получается три позитивных изображения объекта — три частичных позитива. В тех местах негативов, где было сильное почернение, на частичных позитивах почернения не будет.

Если теперь каждый из частичных позитивов поместить в проекционный фонарь, поставив перед ним соответствующий светофильтр, и совместить изображения, полученные на экране, то получается изображение объекта в натуральных цветах. Любой естественный цвет может быть разложен сперва на три основных цвета, а затем при смешении воспроизведен вновь.

**Субтрактивный способ получения цветных изображений.** Субтрактивный метод применяется в настоящее время более широко. Сущность метода ясна из рис. 3.3.2, взятого из той же монографии. Первоначальный процесс цветоделения сохраня-

ется прежним. В результате съемки получаются три цветоделенные негатива. Точно так же получаются три частичных позитива. Затем они подвергаются специальной химической обработке, в результате чего превращаются в одноцветно окрашенные позитивы; окрашенными становятся те места позитивов, где было почернение. Цвет каждого из окрашенных позитивов должен быть дополнительным к цвету светофильтра, с которого получался цветоделенный негатив. Дополни-

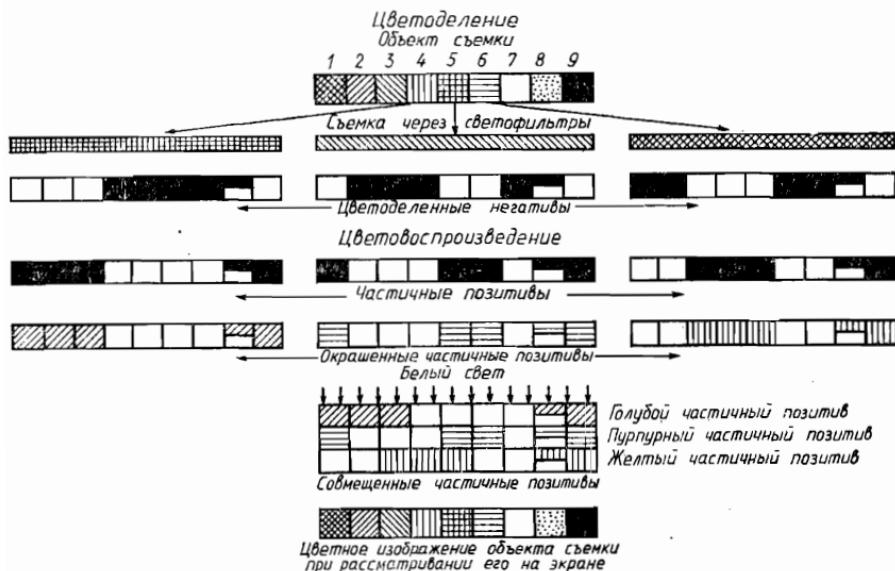


Рис. 3.3.2. Схема получения цветного изображения субтрактивным методом: 1—9 — те же, что и на рис. 3.3.1

тельным к красному является голубой цвет, к зеленому — пурпурный, к синему — желтый.

Совместим полученные частичные позитивы и пропустим сквозь них белый свет. На экране мы увидим цветное изображение сфотографированного предмета. Здесь осуществляется не сложение, а вычитание цвета. На пути белого света сначала будет голубой краситель. Красный цвет будет поглощен, пройдет сквозь него голубой. При прохождении пурпурного красителя пройдут только синие лучи. Третий слой желтый — синие лучи пройдут через него. Точно так же можно рассмотреть изменение цвета в тех местах пленки, где первый слой пропускает другие цвета.

Более удобный метод цветной фотографии связан с трехслойными светочувствительными материалами. В результате удается получить изображение непосредственно на бумаге. Каждый из слоев имеет различную спектральную чувствительность: верхний слой чувствителен к синей части спектра, сред-

ний — к зеленой, нижний — к красной. Образование изображения происходит в результате цветного проявления. В этом процессе окрашенные слои появляются там, где имеется почернение. После получения негатива можно печатать позитивы на специальной трехслойной светочувствительной бумаге. Описание подробностей этих операций выходит за пределы оптики; тут начинает играть свою роль химическая наука.

О цветном телевидении можно узнать многое из достаточно простох специальных руководств [17, 18]. Оно основано на тех же самых принципах смешения цветов. Возможны одновременные и последовательные системы цветного телевидения. В первом случае три основных цвета действуют на глаз зрителя одновременно, во втором — последовательно.

#### § 4. ИЗ ИСТОРИИ НАУКИ О ЦВЕТЕ

Проблема цвета важна для нас, оптиков. Но она не менее важна и для решения множества прикладных проблем. Она актуальна для живописца и дизайнера, ткача и архитектора, врача и домашней хозяйки, для всех нас, так или иначе использующих цвет в своей профессиональной деятельности.

Как мы уже видели, явление «цвет» совсем не простое. В нем содержится и объективное (длина волны) и субъективное начало (зрение). Для понимания сущности цвета одной оптики недостаточно. В науке о цвете используются методы физиологии, психологии, математики, эстетики, этнографии, археологии, теории и истории искусства, философии.

Приведем несколько высказываний великих людей прошлого о роли цвета.

И. В. Гете: «Сопоставление цветных предметов, как и окраска пространства, в котором они находятся, должно происходить согласно целям, которые себе ставит художник. Для этого особенно необходимо знание действия красок на чувство как в отдельности, так и в сочетании».

Г. В. Ф. Гегель: «Краска, колорит — вот что делает художника художником».

В. Ван Гог: «Изучение закона цвета, бесспорно, помогает перейти от инстинктивной веры в великих мастеров к отчетливому пониманию того, почему мы находим ту или иную картину красивой, а это поистине необходимо в наши дни, когда, поразмыслив, убеждаешься, до какой степени произвольны и поверхностны суждения о произведениях искусства».

И. Н. Крамской: «...Колоритность не зависит от большего или меньшего количества красок; можно иметь на палитре все краски, какие есть, и писать однотонно; и обратно, немногими красками можно получить множество разнообразных нюансов, все равно как в математике, в перестановке цифр».

Итак, цветоведение — это важная прикладная наука, зна-

ние которой необходимо даже для крупнейших художников.

В 1984 г. вышла в свет монография Л. Н. Мироновой «Цветоведение» [19]. Она написана как учебное пособие для студентов по специальностям «промышленное искусство», «интерьер и оборудование», «монументально-декоративное искусство». Книга насыщена богатым фактическим материалом. Сведения по физике цвета изложены кратко, больше внимания уделяется основным закономерностям восприятия цвета и его психологическому воздействию, проблемам проектирования цветового климата искусственной среды обитания и деятельности человека. Монография Мироновой очень полезна, так как в ней собраны сведения, до сих пор находившиеся в разных источниках. Нас заинтересовала прежде всего первая часть книги, посвященная истории науки о цвете. Как справедливо пишет автор в предисловии, «в наше время преподавание любой художественной дисциплины (разумеется, не только художественной, но и любой другой.—Б. С.) немыслимо вне связи с историей искусства и духовной культуры. Надо осмысливать опыт, накопленный человеком».

Именно поэтому мы решили дописать к нашей ранее уже законченной главе еще один параграф. В нем в сильно сокращенной, конспективной форме изложены сведения об истории цветоведения, собранные Мироновой. Желающим подробнее ознакомиться с материалом, следует обратиться к оригиналу. Дополнительные материалы можно найти в монографии [20].

**Древний мир.** Трудно сказать, когда возникла наука о цвете. Видимо, в самом начале активного познания окружающей действительности, практического использования приобретаемого опыта и знаний. В красной краске узнавались кровь, огонь, тепло; в белой — дневной свет, молоко, вода, облако, свет, благо; в черной — мрак, зло, страдание. Цвет — это то, что узнается легко. Красный, белый и черный цвета — это основные цвета мифологического периода.

Несколько позже закрепляется понятие о цвете как о существенном элементе мира, как средстве связи между людьми, а также между человеком и богом, как средство воздействия на человека и животных. Цвет активно используется в религиозных обрядах, в начинающейся «медицине».

Понятие синего цвета редко упоминается в древнейших литературных источниках (его нет, например, у Гомера). Из этого был даже сделан неверный вывод о неполноценности цветового зрения у древних народов.

Появляются первые цивилизации, начинается своеобразное понимание свойств цвета. Наиболее развитые и последовательные учения о цвете созданы в Китае и Индии. Здесь эта наука носит уже философский характер, хотя и не порывает со своей мифологической основой. В разных цветах (в том числе синем) и сочетаниях цветов написан замечательный па-

мятник прошлой культуры Китая «Инзин» («Книга перемен»).

Приведем своеобразную таблицу. Пять основных цветов символизируют большую совокупность понятий, характеризующих жизнь человека:

Цвет	Время года	Стихии, предметы	Стороны света	Планеты	Животные символы
Зеленый (синий)	Весна	Дерево	Восток	Юпитер	Дракон
Красный	Лето	Огонь	Юг	Марс	Феникс
Белый	Осень	Металл	Запад	Венера	Тигр
Черный	Зима	Вода	Север	Меркурий	Черепаха, змея
Желтый	Конец лета	Земля	Центр	Сатурн	

Символика цветов стала важнейшим принципом в изобразительном и прикладном искусстве, в архитектуре и поэзии. Даже ведомства китайского государства именовались различными цветами. Регламентировался цвет сословий.

Во времена правления династии Хань китайская культура достигает больших высот. Язык красок становится очень богатым, он дополняется «языком ароматов» и «языком звуков». Колорит императорских дворцов бесконечно разнообразен.

Характерна и реакция на эту роскошь. Во времена Конфуция созрела мысль: благородный муж «умерен в еде, не стремится к удобству в еде». На место красочности и полноцветия приходит монотонность — ведь «пять цветов притупляют зрение».

Не менее развитое учение о цвете создавалось в древней Индии. Великие знатоки тех лет говорили: «Теперь никто не назовет ничего неуслышанного, незамеченного, неузнанного. Ибо благодаря трем образам они узнали все. Они узнали то, что казалось красным, — это образ жара. Они узнали то, что казалось белым, — это образ воды. Они узнали то, что казалось черным, — это образ пищи.

Мы узнали то, что казалось неузнанным, — это совокупность этих трех божеств».

Во всяком случае ясно, что роль цвета в жизни древних была исключительно велика. Цвет присущ, по их мнению, не только стихиям, но и богам. Цвета, присущие Земле и Солнцу, содержатся также и в теле человека. Пища, будучи съеденной, разделяется на три субстанции: красная — это тепло, физическая энергия; белая — то, что поднимается вверх и пополняет духовную энергию; черная — это шлаки, подлежащие удалению из организма. Благодаря общности окраски лучи Солнца проникают в сердце человека и связывают его с Солнцем. Красота природы — это могучая сила, тождественная добру.

Но, как и в Китае, в буддийской религии есть и отрицание роскоши. Нищенствующего монаха не привлекает красочность мира, богатство одежд и украшений!

Дальнейшее развитие цивилизации — Ближний и Средний Восток. В культуре народов этих стран сложилась устойчивая символика цветов, связанная с принадлежностью того или иного цвета к светлым и ярким или темным и тусклым.

Во второй половине I тысячелетия до нашей эры на Ближнем Востоке оформляется качественно новый этап развития культуры и идеологии. Рабовладельческий строй начинает изживать себя. Постепенно изменяется система основных мировоззренческих понятий, что отражается на понятиях света и цвета. Красный цвет становится символом жестокости бога. И только белый цвет сохранил свою высокую сущность. Чудесный смысл получает радуга. «Взгляни на радугу и проплавь соторившего ее: она прекрасна в сиянии своем».

В Греции и Риме свет и цвет становятся предметом размышлений философов. Самое смелое их дерзание — попытка проникнуть в тайну физической сущности цвета и света, а также процессов зрения.

Большинство античных ученых, занимавшихся проблемой цвета, истолковывало его как вид материи, как некоторое тело, способное истекать из предметов подобно воздуху и воде и, попадая в глаз человека, вызывать в нем зрительные ощущения. «Цвета несутся к зрению истечением», — учил Эмпедокл. Демокрит считал, что цвета состоят из атомов, которые сами по себе «бескачественны» и бесцветны; цвет тела — это впечатление, возникающее в органе зрения от различной формы атомов и их взаимного расположения.

Вслед за Демокритом и Эпикуром Лукреций считал, что все сущее состоит из мельчайших частиц — первоначал. Из них складываются и материальные тела, и цвета, и запахи, и звуки, и даже частички молний.

Аналогичных взглядов, но с идеалистических позиций придерживался Платон: «...Цвет — это пламя, струящееся от каждого отдельного тела и состоящее из частиц, соразмерных способности нашего зрения ощущать...

Те частицы, которые несутся от других тел и сталкиваются со зрительным лучом, бывают либо меньше, чем частицы последнего, либо крупнее, либо такой же величины... «Белое» — то, что расширяет зрительный луч, «черное» — то, что его сужает... Из их смешения рождаются всевозможнейшие цвета...» [19, с. 53].

Эти мысли Платона кажутся, на первый взгляд, наивными. На самом же деле предположение о стягивании и расширении при зрительных восприятиях есть в какой-то мере предвидение. Много позднее Гете воспользовался этой идеей в качестве основы для построения своей теории. Современной

наукой доказано, что восприятие цветов различной яркости и цветового тона действительно связано с явлениями сжатия и расширения сетчатки, зрачка, кровеносных сосудов.

Особое место в античном цветоведении принадлежит Аристотелю. Если материалисты предвосхитили корпускулярную теорию света Ньютона, то Аристотель приблизился к волновой теории. В споре со своими предшественниками, сторонниками теории «истечения», он утверждал, что свет не истечение и вообще не тело. Если бы свет был потоком материальных частиц, считал Аристотель, то они, двигаясь в разных направлениях, сталкивались бы и мешали бы двум людям видеть друг друга.

Свет, по мнению Аристотеля, есть подвижное состояние прозрачной среды (этую среду в XIX в. назовут эфиром). Когда она приходит в движение, то возникает свет. Прозрачная среда приводится в движение некоторым «огнем» или чем-то подобным. Этот «огонь» и есть цвет. «Всякий цвет является движущим началом для актуальной прозрачной среды, в этом и заключается его природа». Тона — это инобытие света. В трактате «О цветах», приписываемом Аристотелю, говорится о цвете как «замутнении» света или смешении света с тьмой. «В каждом теле — свой предел прозрачности, и этот предел есть цвет» [19, с. 54].

Эти идеи примут впоследствии и Гете, и Шеллинг, и Гельель. Уже после и вопреки учению Ньютона о цветах.

В работах Аристотеля много говорится о смешении цветов. Его идеи этого направления были прочно забыты и вновь сформулированы только Гельмгольцем спустя две тысячи триста лет.

И многое другое можно найти у Аристотеля. Его нужно читать, читать серьезно. «Видимое при свете есть цвет, потому что цвет невидим без света» (там же).

Для восприятия цвета необходима движущаяся прозрачная среда между светящимся телом и глазом. Доказательство этого очевидно. В самом деле, если бы кто положил себе на самый глаз вещь, имеющую цвет, он ничего бы не увидел. Но «то, что способно воспринимать цвет, само бесцветно, а то, что воспринимает звук, само беззвучно».

Эпиграфом «К учению о цвете (хроматика)» Гете взял следующие слова Аристотеля: «Если воспринимать зрением — значит видеть, а видят цвет или предмет, имеющий цвет, то... видящее также должно иметь цвет... Видящее каким-то образом причастно цвету» [19, с. 54].

Аристотель не только обсуждает проблему, что же такое цвет, но и доходит до конкретных задач цветоведения: «Это явление наблюдается и в красильном деле, ибо при окрашивании тканей, когда работают над разными красками, некоторые краски, располагаясь рядом друг с другом, являются

каждый раз другими, как пурпур на белой и на черной шерсти. Кроме того, все различно при той или другой степени яркости; вот почему занимающиеся тканьем разными цветами рассказывают, как часто они ошибаются, принимая один цвет за другой, особенно когда работают при фонарях» (там же).

У античных философов все еще сохраняется мифологическая связь между цветами и чем-то наиболее важным для человека. По Эмпедоклу и Демокриту, имеется четыре стихии, вода, земля, огонь и воздух. Им соответствуют четыре главных цвета: черный, желтый, красный и белый. Аристотель стремится отойти от этой точки зрения и дать объективное физическое обоснование классификации цветов, но проблемы не решает. У него три основных цвета: белый, желтый и черный. Так, мол, реально окрашены главные объекты природы. Иногда основными считаются только белый и черный цвета.

Античная цветовая эстетика была для европейского искусства таким же фундаментом, как античная философия для науки. Именно тогда важнейшей эстетической категорией становится понятие гармонии. Оно относилось, разумеется, не только к гармонии цветов, но и к строению мироздания, общественному устройству, к математике, музыке, человеческой душе, к творчеству человека. Гармония считалась универсальным принципом бытия, противостоящим хаосу, неорганизованности и неупорядоченности. Гармония — это связующее начало, объединение элементов системы в нечто целое, это — единство противоположностей, соединение и взаимодействие двух противоположных начал, контраст.

Учение о единстве противоположностей, совмещении несовместимого было основой философии Пифагора, Гераклита и всех диалектиков античного мира. Аристотель так излагал взгляды Гераклита: «Противоречивость сближает, разнообразие порождает прекраснейшую гармонию, и все через расплюсование создается» [19, с. 58].

Категория гармонии тесно связана с категорией меры. Все чрезмерное, сверхобильное, гигантское или мизерное, ничтожное не может быть гармоничным.

Аристотель обобщает эти взгляды в своей эстетике «золотой середины». «...Всякая чрезмерность расстраивает слух — чрезмерность и высоких, и низких звуков; точно так же чрезмерность во вкусовых свойствах расстраивает вкус, и слишком яркое или слишком темное в цветах действует на зрение разрушительно...» (там же).

Продолжаем цитировать Аристотеля. По его мнению, всякий цвет есть результат смешения света и тьмы. В прекрасных цветах пропорции этих «смешений» не случайны, а подчинены определенным числовым закономерностям. Сопоставление двух и более цветов также можно выразить как числовое отношение. «Те цвета,— пишет он,— в которых соблюде-

на наиболее правильная пропорциональность, подобно звуковым гармониям, представляются наиболее приятными» [19, с. 59]. Как это напоминает современную проблему измерения цвета, описанную в первых параграфах главы.

Все принципы гармонии (часть из них мы здесь не описываем) четко отразились на колористике Греции и Рима, этом выдающемся разделе их искусства.

Монохромные структуры максимально связаны между собой единством цветового тона. В цветовой гамме всегда присутствуют противоположные начала, иначе говоря, контрасты (пурпур с белым, красное с черным, яркое с бледным). Цвет должен быть приспособлен к возможностям человеческого восприятия (чувство меры). Слишком резкие контрасты объявляются варварством. Классическая культура цвета противопоставляет умеренность идержанность восточной роскоши. Требуется определенная пропорция цветов, их ясная различимость. Нельзя утомлять глаз. Классическое греко-римское искусство было воздвигнуто на идеалах прекрасного и возвышенного. Нельзя «передавать в цвете что-либо некрасивое, безобразное, отталкивающее. Цвет облагорожен и очищен от случайной «скверны», так же как и форма. Цветовые диссонансы и алогизмы... не допускаются. Прекрасный и гармоничный колорит... внушает душе зрителя чувства правды, добра и красоты» [19, с. 62—64]. Цветовой тон, а также соотношения яркости и насыщенности цветов всегда подчиняются логике формы, содержания материала и назначения вещи. Цель культурной деятельности человека — превращение безобразного и бесформенного хаоса в красивый и упорядоченный мир.

Античное учение о цвете — одна из прекрасных глав в истории этой науки.

**Средние века.** В начале VII в. в странах Ближнего и Среднего Востока распространилась новая религия — ислам. Создана огромная империя. Быстро росли производительные силы, культура, наука, искусство.

В главной книге ислама — Коране — содержатся не только догматы веры, но и начала философии, этики и эстетики. Отношение к цвету выразилось, в частности, в описаниях загробных обителей праведников. Рай по Корану — это награда за труды и тяготы жизни. Стремление на земле создать что-либо подобное. Ковер — это метафора райского сада. Он обилен цветами, ветвями и листьями, заботливо окружен как сад.

Крововость — универсальная категория мусульманского искусства. Цветистость и узорчатость — основной признак крововости. Он находится всюду: в храмах, в орнаментах Корана, в металлических кувшинах, в тканях и даже в народных сказках и стихах придворных поэтов.

Прочтите вновь сказки «Тысяча и одна ночь» и вы почувствуете колористику тех лет в описаниях садов, дворцов, одежд. Все это как идеал, как то, к чему вроде бы надо стремиться. В них смысл цветовой эстетики ислама.

Цвета — это в основном порождение света и его отблесков. Свет и цвета высоко ценятся в Коране. Темнота не переживается как нечто негативное (как у древних). Тень в Коране — тоже вполне позитивная ценность. Она не отрицает свет, а лишь дополняет его.

Белый цвет прямее всех передает сияние света. Он — знак божественности, духовности, чистоты. «Кроме белого есть еще один цвет, сияющий подобно Солнцу и звездам — это цвет золота... Его лицезрение дает свет глазам и радость сердцу» [19, с. 70]. И еще важен красный (пурпурный цвет). Он так же священен и светоносен, как желтый. Это цвет крови — символ жизни, любви, а не символ жестокости бога или греховности, как это было раньше в Библии.

Итак, белый, желтый, красный — это цвета, причастные к свету. Но ведь и тьма — тоже благо, сотворенное Аллахом, который переворачивает ночь и день. Поистине, в этом — наиздание для обладающих зрением. И потому так любимы на Востоке цвета тени, синий, голубой, фиолетовый. Синий цвет — это цвет ночи, «когда она густеет». Он дает отдых глазам, утомленным ярким солнечным светом. Голубой — это цвет неба, а там местожительство богов. Фиолетовый цвет таинствен, он близок к концу спектра, вот-вот погаснет.

Зеленый — цвет растений — стоит особняком. «Зеленый цвет ласкает в полдень тенью, дарует он покой душе и зреню» [19, с. 76].

Но есть два цвета с резко отрицательным значением: серый и коричневый. Они затушевывают прекрасное.

В те годы на Востоке бурно развивалась наука и, в частности, оптика. Однако научного понятия цвета еще не было.

Вернемся в Западную Европу. Тысячу лет после падения Рима представления о цвете и свете переживали «богословский этап». Настоящая наука отсутствовала. Свет и цвет рассматривались не как оптические явления, а как философские категории, как символы других более высоких понятий. О свете и цвете говорится часто, но как-то вообще.

Свет в средневековье — это истина, благо, разум, мудрость, жизнь<sup>11)</sup>; иначе говоря, свет — это бог. Видимый свет — это отблеск невидимого «высшего» света. Цвет ценится как материальное воплощение света. Но он — символ хорошего и плохого.

В священном писании свет и цвет воспеваются как венец красоты. Польский ученый Витело (XIII в.) писал: «Свет,

<sup>11)</sup> В таком смысле слово «свет» употребляется нередко и в наше время.

являющийся первым предметом зрения, создает красоту, а потому мы видим, что солнце, луна и звезды прекрасны уже благодаря одному своему свету. Цвет также создает красоту, например зеленый цвет и розовый, и другие сверкающие цвета, расточающие перед взором форму свойственного им света» [19, с. 79].

И так далее, и тому подобное. Гуго Сен-Викторский (XII в.) писал: «Что прекраснее света, который, хотя и не содержит в себе цвет, однако, освещая, как бы придает окраску всем цветам предметов?» [19, с. 80].

Это — поэзия, но, увы, не наука.

В трудах средневековых ученых (как правило, богословов) много говорится о цветовой символике. Несмотря на самоочевидность символов, их нужно было отчасти объяснять, отчасти закреплять и канонизировать. Символика постепенно изменялась (ведь проходило 1000 лет).

И опять, как и раньше, имеется иерархия цветов, хотя и несколько иного толкования. Обратим внимание, что в позднем средневековье желтый свет приобретает второй, негативный смысл. Это цвет золота, символ света, богатства, власти. Но он же стал символом измены, лжи, жадности, продажности, бесстыдства, дурных намерений. Этот смысл «желтого» сохранился, как мы знаем, и до нашего времени. Черный цвет стал снова восприниматься как символ зла, смирения, отказа от мирских радостей.

Иногда в трудах средневековых ученых все же встречаются элементы теории гармонии и цветовой эстетики. Фома Аквинский писал: «Для красоты требуется тройное. Во-первых, цельность или совершенство, ибо имеющее изъян уже поэтому самому безобразно. Во-вторых, должна пропорция или зозвучие. И, наконец, ясность; вот почему то, что имеет блестящий цвет, называют прекрасным» [19, с. 85].

Многие полностью исповедовали идеи Аристотеля о «золотой середине». То было время алхимии.

**Эпоха Возрождения.** В эпоху Возрождения все начало меняться. Она вобрала в себя все хорошее из прошлого, затем круто пошла вперед.

Работы Леона Баттисты Альберти (1404—1472) и Леонардо да Винчи, посвященные цвету, занимают особое место. Они свободны от власти авторитетов, основаны на собственных естественнонаучных наблюдениях и преследуют четкую цель — дать художнику знания для его практической деятельности. Их работы не потеряли значения.

Следует заметить, что в тот период еще не видели особого различия между наукой и искусством. Наука служила в значительной мере именно искусству. «Науки везде и всегда приносят величайшую пользу всем художникам, к ним принадлежащим, особенно же ваятелям, живописцам и зодчим, откры-

вая им путь к осуществлению замыщляемых ими творений; ибо всякий, кто лишен того, что приобретается при помощи полезных наук, никогда не будет обладать совершенным суждением, каково бы ни было его природное дарование», — писал Вазари [19, с. 89]. То же и у Леонардо да Винчи. «Те, кто влюбляется в практику без науки, подобны кормчим, выходящим в плавание без руля или компаса, ибо они никогда не [могут быть] уверены, куда идут...» (там же).

Интересы Альберти и Леонардо да Винчи в области цвета двояки. Во-первых, всевозможные цветовые феномены в природе и живописи: взаимодействие цвета и света (влияние освещения на цвет, рефлексы), окраска предметов и явлений в природе (воздушная перспектива, радуга, цвет деревьев, неба, гор, человеческого тела и пр.), взаимодействие цветов (индукция, контрасты), некоторые закономерности зрительного восприятия на феноменологическом уровне (иррадиация, адаптация, краевой контраст). Во-вторых, цветовая эстетика применительно к живописи. Какие цвета и их сопоставления следует считать прекрасными, как достичь красоты цвета в картине? Сюда же относятся проблемы иерархии художественных средств, классификации цветов, их места в живописи. Кроме того, Леонардо да Винчи исследовал анатомию человеческого глаза, пытаясь понять, как получается изображение в глазу.

Только по этому перечню видно, какой огромный шаг сделало цветоведение: от мифологии к науке.

Альберти: «...цвета изменяются под влиянием света, ибо каждый цвет, помещенный в тени, кажется не тем, какой он на свету». Здесь уже различаются характеристики цветов, цветовые тона и яркости воспринимаются отдельно. «Итак, примесь белого не меняет род цвета, но создает его разновидности. Также и черный цвет обладает подобным же свойством — производить своей примесью бесчисленные разновидности цветов... белое и черное не суть настоящего цвета, но лишь изменения других цветов» [19, с. 90].

Леонардо да Винчи также утверждает, что «белое и черное не являются цветами». Вместе с тем они оба считают их основными красками в живописи. В «Книге о живописи» Леонардо да Винчи очень много заметок, посвященных рефлексам. «Итак, [если] мы скажем, что непрозрачное тело желтого [цвета], а источник света — синего, то я утверждаю, что освещенная часть будет зеленой, и это зеленое складывается из желтого и синего» [19, с. 91]. Все это, разумеется, верно, но удивительно, что в предшествующие века этого не замечали. Странно, но факт: многие данные о цветах, найденные Альберти и Леонардо да Винчи, долгое время не использовались художниками, в том числе и самим Леонардо да Винчи. Пока еще медленно развивалось общественное знание.

Приведем еще несколько замечаний Леонардо да Винчи: «Белое с черным или черное с белым кажутся более могущественными рядом друг с другом, и вообще противоположности всегда кажутся более могущественными рядом друг с другом... О причине утраты цветов и фигур тел вследствие мрака, который [лишь] кажется, но не существует [в действительности] (это о явлении световой адаптации. — Б. С.).

Существует много самих по себе освещенных и светлых мест, которые кажутся мрачными и полностью лишенными всякого разнообразия фигур и цветов предметов, в них находящихся.

Это происходит по причине света освещенного воздуха, который располагается между видимым предметом и глазом, как это видно за окнами, удаленными от глаза, где воспринимается только однообразная, очень мрачная темнота. А если ты потом войдешь внутрь этого дома, то увидишь, что они, собственно, сильно освещены, и ты сможешь [вполне] отчетливо различить каждую малейшую часть любого предмета за этими окнами... Такое явление происходит от недостатка глаза: побежденный излишним светом воздуха, он очень сжимает свой зрачок, а потому очень теряет в своей силе; в местах же более темных зрачок расширяется и настолько увеличивает свою силу, насколько он приобретает в величине...» [19, с. 92—93].

Леонардо да Винчи замечает и явление иррадиации: «Если предмет, видимый в темноте и мутном воздухе, белый, то он будет казаться по форме большим, чем на самом деле» [19, с. 93].

Леонардо да Винчи много пишет о цвете различных явлений природы. Чаще всего он объясняет их правильно, предвосхищая законы сложения и вычитания цветов при их смешении. И далее множество советов живописцам. «Не всегда хорошо то, что красиво...»

Наука о цветах в эпоху Возрождения, разумеется, не сводится к результатам Альберти и Леонардо да Винчи. Но они составили целую эпоху.

**Семнадцатый век.** XVII век — переломный век в истории культуры. На политическую арену вышла буржуазия. В Англии и Голландии произошли революции. Развитие капиталистического производства требовало не только перестройки государственного аппарата, но и коренной ломки методов научного мышления.

Философия XVII в. (Декарт, Гоббс, Спиноза, Лейбниц), объясняя природу заново, уже отделилась от мифологии, поэзии и богословия. Происходила дифференциация естественных наук. Основным методом науки становится рационализм.

Быстро развивалась оптика. Назовем телескоп Галилея,

исследования Кеплера, Декарта, Гриимальди, Ферми, Гюйгена и, наконец, Ньютона. Оптика из науки о зрении превратилась в науку о свете.

Остановимся здесь лишь на проблемах цветоведения. Гриимальди, работы которого стали известны после его смерти в 1665 г., считал, что цвета возникают вследствие различия скорости колебаний вещества. Цвета существуют объективно. Он писал, что цвета могут существовать только в самом свете; постоянные цвета тел зависят от их способности отражать падающий свет с особыми видоизменениями.

Гук издал в 1665 г. свою «Микрографию». В ней описаны цвета тонких пленок, выдвинута гипотеза о колебательной природе света. На два года раньше Р. Бойль также опубликовал работу «Опыты и соображения, касающиеся цветов». Окраска предметов связывалась в ней с поглощательной способностью поверхностей. Еще ранее Декарт предложил современную формулировку закона преломления света и на этой основе объяснил образование радуги. Объяснить происхождение цвета Декарт еще не мог, хотя и связал его с преломлением света (в частности, в призме). До Декарта цвет не считали чем-то объективным. По Кеплеру, цвет — это качество, которое должны изучать философы, а не физики.

К концу XVII в. оптика становится экспериментальной наукой, а не предметом рассуждений или, в лучшем случае, наблюдений. Многое стало известным. Но единой теории, связывающей свет с цветом, до Ньютона не существовало. Она изложена им в «Лекциях по оптике» (1669 г.), «Новой теории света и цветов» (1672 г.) и, наконец, в «Оптике» (1704 г.).

Мы уже говорили о работах Ньютона в первой главе монографии. Здесь добавим только, что Ньютона надо считать основоположником физической науки о цвете. Теория Ньютона остается справедливой и в наши дни. В «Лекциях по оптике» Ньютон критикует точку зрения Аристотеля, а затем Декарта и Гука, которые считали, что цвет не заложен в самой природе света, а приобретается при отражении или преломлении. Вот его слова: «Я же нашел, что модификация света, от которой происходят цвета, врождена (присуща. — Ред.) свету, а не происходит при отражении или при преломлении или из качеств тел, или каким-либо иным образом и не может быть разрешена или каким-либо способом изменена». Таким образом, Ньютон утверждает впервые органическое единство света и цвета, их физическое тождество. Цвет не возникает в определенных условиях, а лишь проявляется.

И вновь кажется странным, почему это, с нашей точки зрения, совершенно очевидное утверждение было высказано (и доказано) только в конце XVII в. Сложны и извилисты пути научного познания. В XVII в. побеждала новая методология научного творчества, методология Ф. Бэкона. Ранее

были в основном рассуждения, умозрительные заключения, догадки, ссылки на авторитеты, а теперь начался эксперимент.

Ведь только Ньютон научился правильно смешивать цвета и, в частности, получать белый цвет. Именно Ньютон построил впервые 7-ступенчатый цветовой круг. Этот же круг использовался для определения результатов смешения различных цветов. Ньютон установил, что цвета тел зависят от их отражательной способности. Он объяснил явление радуги, цвета тонких пленок, многие атмосферные явления.

Строго говоря, научное цветоведение началось именно с Ньютона. Спектральная система цветовой классификации, введенная Ньютоном, остается основой систематики цветов и до настоящего времени. В те же годы уже на научной основе начали формироваться физиологическая оптика и учение о психологическом действии цвета.

Из других ученых XVII в. следует упомянуть еще двух. Немецкий ученый И. Цан впервые построил цветовой треугольник (см. § 1), позволяющий сразу же определять результат смешения различных цветов. При этом он верно определил основные краски в живописи: красная и синяя (а также белая и черная). И вместе с тем у Цана остается много от мифологии древних. Рядом с наукой уживается и суеверие. Цан строит сложную систему соответствия цветов различным звукам, веществам, «божьим тварям», эмоциям и состоянию человека. Так, например, белый цвет соответствует уму, желтый — вниманию, красный — безумию, синий — праздничности, черный — неизвестности и т. д., и т. п.

XVII век — это век физико-математической науки о цвете. Ее художественно-эстетические направления, столь характерные, например, для Леонардо да Винчи, несколько заглохли. В то же время практика живописи и прикладного искусства переживала бурный расцвет. Однако в ней все еще ориентировались на классицизм. А в классицизме эпохи Возрождения цвет играл второстепенную роль.

И только в 1673 г. появляется работа французского ученого Роже де Пиля «Диалоги о цвете», посвященная цвету как средству живописи. Мы не будем останавливаться на ней, так как описание проблем живописи выходит за пределы наших возможностей (см. монографию [19]).

**Восемнадцатый век.** Как мы уже отмечали, в XVIII в. развитие оптической науки приостановилось. Шло накопление фактов. Новых идей не было. Все факты пытались объяснить с точки зрения теории истечения Ньютона, а это обычно не удавалось.

В 1746 г. Л. Эйлер опубликовал трактат «Новая теория света и цветов». В нем он пытался аналитическим путем (впервые в истории физики) доказать волновую природу света.

Свет, по мнению Эйлера,— это продольные колебания упругого эфира. Подобная идея была высказана давно Гюйгенсом и Гуком, но здесь ей дано строгое математическое оформление.

Важным событием XVIII в. стало возникновение фотометрии. Оно связано с именами Бугера и Ламберта. Быстро совершенствовалось приборостроение. А цветоведением занимались мало, в основном в рамках физиологической оптики и психологического действия света. Наука о цвете активно внедрялась в искусство.

Нельзя не вспомнить здесь М. В. Ломоносова и его трехкомпонентную теорию цветового зрения. Именно он впервые предположил, что в органе зрения имеются всего три цветовоспринимающих аппарата (для красного, синего и желтого). Подробности были описаны в предыдущей главе. Отметим только, что эта идея родилась у Ломоносова из анализа опыта художников, которые получали все цвета смешением трех основных цветов. Теория Ломоносова — яркий пример синтеза науки и искусства. Вот его слова: «Натура тем паче всего удивительна, что в простоте своей многохитростна и от малого числа причин произносит неисчислимые образы свойств, перемен и явлений» [19, с. 114].

Несколько слов о взглядах И. В. Гете (1749—1832 гг.). Гете — не только великий поэт, но и художник. Он занимался ботаникой, минералогией, палеонтологией, философией, эстетикой, художественной и театральной критикой, а также цветоведением. Как мы уже говорили, он пытался противопоставить свою истину «заблуждениям» Ньютона.

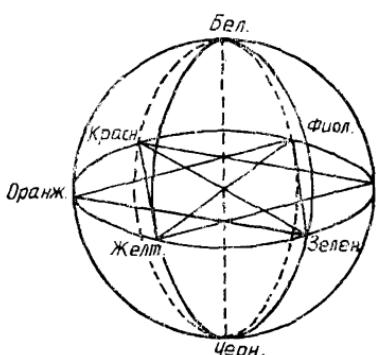
Вот подлинные слова Гете: «Все, что я сделал как поэт, отнюдь не наполняет меня особой гордостью. Прекрасные поэты жили одновременно со мной, еще лучшие жили до меня и, конечно, будут жить после меня. Но что я в мой век являюсь единственным, кому известна правда о трудной науке — о цвете, этому я не могу не придавать значения, это дает мне превосходство над многими». Книга Гете «К учению о цвете» — действительно замечательна. Она — философский трактат, синтез мыслей о цвете, которыми жила его эпоха.

Однако с точки зрения современной физики идеи Гете не выдерживают критики. Свет для Гете — сущность духовная и божественная. Цвета — это различные степени затемнения света. Как можно, говорили сторонники Гете, низвести божественную белизну света до какой-то пестрой смеси разных лучей. Точка зрения Ньютона вызывала ярость. Он ведь разделил неделимое. Продолжался спор идеализма и материализма. По существу Гете не сказал ничего нового. «Цвета — это деяния света, деяния и страдания. В этом смысле мы можем ожидать от них раскрытия природы света». И еще: «Цвет есть элементарное явление природы, которое раскрывается

чувству зрения» [19, с. 116]. По сравнению со взглядами Ньютона — это большой шаг назад.

Заслуги Гете в области цветоведения — анализ конкретных цветовых ситуаций. Описание их здесь вряд ли целесообразно, и мы вновь отсылаем к первоисточнику.

Младшим современником Гете был талантливый живописец и график В. О. Рунге (1777—1810 гг.). В поисках новых путей творчества он обратился к научному цветоведению.



Результат исследований — небольшая монография «Цветовой шар, или Конструкция отношений всех смесей цветов между собой и сродства, с прибавлением опыта выведения цветов».

Рис. 3.4.1. Схема цветового шара Рунге

Цель Рунге сугубо прикладная. Его задача — систематизация всех цветов. Основные три: красный, желтый и синий. Расположив их у вершин равностороннего треугольника, он замечает, что от смешения соседних цветов получаются оранжевый, зеленый и фиолетовый. Все шесть цветов образуют круг; противоположные цвета оказываются контрастными. Нечто схожее было уже у Гете.

Смешением соседних цветов можно получить самые разнообразные оттенки спектральных и пурпурных цветов на цветовом круге, причем для каждого из них можно указать на нем определенное место. Но, замечает Рунге, те же оттенки цветов получаются смешением чистых красок с белой и черной. Где найти им место на этой схеме? В плоскости такую задачу не разрешить и поэтому Рунге разработал (впервые) трехмерную модель системы цветов (цветового тела).

На своем шестиступенчатом круге Рунге построил верхнюю и нижнюю полусфера. Их полюса — белый и черный цвета. Образовался шар. На его меридианах расположились разбели чистых цветов (вплоть до белого) и зачернения (вплоть до черного). Ось шара — ахроматический ряд от белого до черного. В центре шара — серый цвет — цвет смеси всех чистых цветов. В этой модели (рис. 3.4.1) Рунге находит вариации цветов по всем трем основным характеристикам: по цветовому тону (долгота), по светлоте (широта), по насыщенности цвета (различия — удаленность от черно-белой оси). Шар Рунге построен рационально и с современной точки зрения.

Важную роль в науке о цвете сыграл французский энциклопедист Д. Дидро (1713—1784 гг.). Ему принадлежат «Опыт в живописи», «Мои незначительные мысли о цвете», «Все, что я узнал за свою жизнь о светотени» и целый ряд блестящих статей. Острое критики Дидро было направлено против рутинь академического искусства тех лет, против манерности и фривольности рококо.

Дидро исходил в своих работах в основном из соображений эстетики, и поэтому мы не можем останавливаться на них. Ограничимся одной краткой цитатой, но она передает дух всех работ Дидро. «Цвет в картине подобие стилю в литературе... Во все времена стиль и цвет были явлением драгоценным и редкостным».

**Девятнадцатый век.** Историю развития оптики в XIX в. мы уже знаем. Она становится точной наукой, базируется на хорошо поставленном эксперименте. Работа Гете была последней описательной работой о свете и цвете. После него эта наука разветвляется на физическую оптику, физиологическую оптику, эстетику цвета и прикладное цветоведение.

В физической оптике происходили революционные процессы (Юнг, Френель, Фраунгофер, Максвелл, Герц, Лебедев, Кирхгоф, Бунзен, Гельмгольц). Особый вклад внес Максвелл в цветоведение.

В настоящее время мы широко пользуемся достижениями фотометрии и колориметрии XIX в. Они кратко уже описаны. Для нужд прикладного цветоведения этих сведений достаточно.

#### ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 3

1. Гуревич М. М. Цвет и его измерение. М.; Л., 1950.
2. Ашкенази Г. И. Цвет в природе и технике. М.; Л., 1955.
3. Майзель С. О. Свет и зрение. Л.; М., 1932.
4. Гершун А. А. Принцип и приемы световой маскировки. М.; Л., 1943.
5. Минарт М. Свет и цвет в природе. М., 1958.
6. Шаронов В. В. Свет и цвет. М., 1961.
7. Фадеев Г. И. Химия и цвет. М., 1983.
8. Майзель С. О., Ратнер Е. С. Цветовые расчеты и измерения. М.; Л., 1941.
9. Федоров Н. Т. Современное состояние колориметрии. М.; Л., 1933.
10. Нюберг Н. Д. Курс цветоведения. М., 1932.
11. Алексеев С. С. Цветоведение. М., 1952.
12. Майзель С. О. Основы учения о цветах. М., 1946.
13. Федоров Н. Т. Общее цветоведение. М., 1939.
14. Соколов Е. Н., Измайлова Ч. А. Цветовое зрение. М., 1984.
15. Кравков С. В. Цветовое зрение. М., 1950.
16. Колориметрические стандарты Международной осветительной комиссии и их применение / Пер. и доп. Н. Т. Федорова. М., 1934.
17. Самойлов В. Ф., Хромой Б. П. Основы цветного телевидения. М., 1983; Система цветного телевидения СЕКАМ. М., 1977.
18. Богатов Г. В. Цветное телевидение. Л., 1978.
19. Миронова Л. Н. Цветоведение. Мн., 1984. 286 с.
20. Брилл Т. Свет. Воздействие на произведения искусства. М., 1983.

### § 1. ВЛИЯНИЕ ФОНА ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОКАЗАНИЯ ПРИЕМНИКОВ РАДИАЦИИ

**Еще раз о законе Кирхгофа.** До сих пор при рассмотрении проблем фотометрии мы не учитывали, что все процессы поглощения и испускания света происходят на фоне теплового излучения. Тот же недостаток характерен, к сожалению, для всех учебников оптики. А между тем во многих случаях, особенно в инфракрасной области спектра, тепловой фон весьма велик и оказывает заметное влияние на показания приемников радиации и даже на существование происходящих процессов. Тепловой фон отсутствует только в том случае, если температура среды, исследуемого тела, а также приемника излучения равна нулю. А это не осуществляется никогда.

Наличие теплового фона несколько усложняет процесс экспериментального исследования. Приходится учитывать собственное тепловое испускание исследуемого тела и приемника излучения. Нужно учитывать также равновесное излучение, имеющееся в окружающей среде и попадающее на приемник. Вместе с тем наличие теплового фона можно использовать для решения многих качественно новых задач. Как говорят, нет худа без добра. Можно, например, измерить спектр испускания сильно охлажденного вещества, хотя ранее считалось, что для получения спектра испускания вещество должно обязательно нагреваться. Как оказалось, влияние фона теплового излучения удобно описывать с помощью понятий, которые до сих пор вообще отсутствовали. К ним относятся: отрицательный световой поток, поглощение отрицательного потока, отрицательная люминесценция, отрицательное оптико-акустическое явление, отрицательный фотоэффект. Часть этих понятий будет рассмотрена уже в этой главе. Все они дают нам новые эффективные средства для исследования свойств вещества, углубляют наше знание окружающего мира. Подробности можно найти в литературе [1—11].

Для понимания явлений, описываемых в дальнейшем, надо вернуться к закону Кирхгофа. Закон Кирхгофа играет в оптике столь существенную роль, что можно и повториться, чтобы привлечь внимание читателей, заставить взглянуть на него с разных сторон, способствовать его новым применени-

ям. По виду закон Кирхгофа очень прост. Вместе с тем он чрезвычайно содержателен.

Закон Кирхгофа применим строго, если рассматриваемое тело находится в полном равновесии со средой, т. е. при равенстве температур тела и среды, а также при равновесии тела с окружающим излучением. Однако эвристический смысл он приобретает именно при отклонении от равновесия. Это мы уже подчеркивали и хотим подчеркнуть еще раз. Допустим, что температура среды понижена. Если такое нарушение термодинамического равновесия не вызывает сколько-нибудь заметных изменений состояния тела (либо потому, что время восстановления равновесия, т. е. время релаксации, очень велико, либо потому, что внутри тела существуют источники энергии, поддерживающие его температуру), то испускательная и поглощающая способности тела сохраняются неизменными. Измеряя энергию, испускаемую телом в окружающую среду, можно найти его испускательную способность и после этого вычислить поглощающую способность. Подобный метод широко используется для определения спектральной яркости тепловых источников света.

Если на тело, находящееся в тепловом равновесии со средой, направить извне поток излучения, превышающий поток равновесного излучения, то термодинамическое равновесие также будет нарушено. Однако очень часто можно предположить, что нарушение равновесия невелико и внешний поток заметно не изменяет равновесного распределения по уровням энергии, благодаря чему поглощающая способность тела изменится не сильно<sup>1)</sup>. Измеряя ее, можно в соответствии с законом Кирхгофа вычислить тепловую испускательную способность тела. В большинстве опытов, связанных с измерением показателей поглощения вещества, исходят именно из этого предположения.

Следует, однако, помнить, что подобные расчеты приближенны, и при сильном нарушении равновесия внутри тела, связанном с изменением свойств среды или с его облучением мощными потоками радиации, испускание тела становится неравновесным и закон Кирхгофа теряет силу.

Закон Кирхгофа применим к любым телам, в том числе и к приемникам излучения, т. е. к объектам, приспособленным для регистрации падающего излучения. Однако они не только воспринимают внешние потоки, но и сами являются источниками излучения. Этот факт необходимо учитывать при измерениях, так как в противном случае можно получить ошибочные результаты.

При термодинамическом равновесии с окружающей сре-

<sup>1)</sup> Испускательная способность может измениться значительно сильнее, что приведет к возникновению люминесценции.

дой поток энергии, поглощаемый приемником, равен потоку энергии, испускаемому им. Ввиду этого приемники излучения принципиально не регистрируют потоков, соответствующих их собственной температуре. Те или иные показания приемника возникают только после нарушения термодинамического равновесия приемника и среды. Как правило, они пропорциональны разности потоков, поглощенных и испущенных приемником:

$$Y = a (\Phi_{\text{пр}}^{\text{погл}} - \Phi_{\text{пр}}^{\text{исп}}). \quad (4.1.1)$$

Здесь  $a$  — коэффициент пропорциональности, характеризующий свойства приемника.

**Зависимость показаний приемников излучения от температуры источника света, приемника, поглощающего слоя и окружающей среды.** До сих пор, например в главе 1, мы рассматривали поглощение света внутри вещества, отвлекаясь от конкретных условий эксперимента, и не учитывали фона теплового излучения.

Наиболее типичная схема изучения спектров поглощения (рис. 4.1.1) состоит из источника света, нескольких линз, исследуемого плоскопараллельного слоя  $B$  и приемника. Каждый из элементов схемы может обладать своей температурой. Источник света в общем случае неравновесный. Исследуемое вещество также может быть выведено из состояния равновесия. Система в целом находится в среде с температурой  $T_{\text{ср}}$ . Показания приемника зависят от всех подобных факторов, поэтому при анализе экспериментальных данных необходимо исключать влияние источника, приемника, среды и определять свойства поглощающего вещества в чистом виде.

Второй возможный метод измерения поглощательной способности тела основывается на законе Кирхгофа. Для этого достаточно измерить испускательную способность исследуемого объекта (т. е. спектральную яркость его поверхности) и рассчитать  $A(\nu)$  по формуле (1.4.7). Схема опыта проще: надо изъять слой  $B$  (рис. 4.1.1), а исследуемый объект использовать в качестве источника света. Однако и в данном случае нужно учитывать свойства приемника и температуру среды.

Рассмотрим вначале последний случай. Поток энергии, ис-

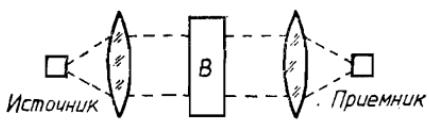


Рис. 4.1.1. Схема установки для измерения спектра поглощения

ходящий от источника света (исследуемого объекта) в направлении приемника, равен<sup>2)</sup>

$$\alpha[\Phi_{\text{ист}} + R_{\text{ист}}\Phi_0(T_{\text{ср}}) + P_{\text{ист}}\Phi_0(T_{\text{ср}})].$$

Здесь  $\alpha$  — постоянная, определяемая геометрией установки,  $\Phi_{\text{ист}}$  — поток, испускаемый источником света (зависимость от частоты для сокращения индексов не отмечается),  $R_{\text{ист}}$  и  $P_{\text{ист}}$  — отражение и пропускание источника света (в направлении приемника);  $\Phi_0(T_{\text{ср}})$  — поток равновесного излучения, падающий на источник со стороны среды;  $\alpha R_{\text{ист}}\Phi_0(T_{\text{ср}})$  и  $\alpha P_{\text{ист}}\Phi_0(T_{\text{ср}})$  — потоки равновесного излучения среды, отражаемые и пропускаемые источником света в направлении приемника<sup>3)</sup>.

Поток излучения, поглощаемый приемником,

$$\Phi_{\text{пр}}^{\text{погл}} = A_{\text{пр}}\alpha[\Phi_{\text{ист}} + (1 - A_{\text{ист}})\Phi_0(T_{\text{ср}})], \quad (4.1.2)$$

где  $A_{\text{пр}}$  и  $A_{\text{ист}}$  — поглощательные способности приемника и источника света. Они связаны с отражением и пропусканием формулами

$$A_{\text{ист}} + P_{\text{ист}} + R_{\text{ист}} = 1; \quad A_{\text{пр}} + P_{\text{пр}} + R_{\text{пр}} = 1. \quad (4.1.3)$$

В общем случае приемник и источник нельзя моделировать черными телами. Для черных тел  $A = 1$ , в этих случаях все последующие формулы значительно упрощаются.

Поток энергии, испускаемый приемником в направлении источника, определяется законом Кирхгофа:

$$\alpha' \Phi_{\text{пр}}^{\text{ист}} = \alpha' A_{\text{пр}} \Phi_0(T_{\text{пр}}), \quad (4.1.4)$$

где  $\alpha'$  — постоянная. Легко показать (см. [1—3]), что  $\alpha' = \alpha$ . С учетом этого из (4.1.1) — (4.1.4) нетрудно найти величину регистрируемого потока:

$$Y/aA_{\text{пр}} = \alpha[\Phi_{\text{ист}} - A_{\text{ист}}\Phi_0(T_{\text{ср}})] + \alpha[\Phi_0(T_{\text{ср}}) - \Phi_0(T_{\text{пр}})]. \quad (4.1.5)$$

Поток (4.1.5) не зависит от свойств приемника (кроме его размеров). Он равен разности двух потоков: потока (4.1.2), падающего на приемник после нарушения термодинамического равновесия, и потока  $\alpha\Phi_0(T_{\text{пр}})$ , падающего на него при  $T_{\text{ист}} = T_{\text{ср}} = T_{\text{пр}}$  (или, что то же, потока, испускаемого приемником в направлении источника). Величина (4.1.5) образует

<sup>2)</sup> Все рассуждения одинаково справедливы как для потоков, так и для яркостей потоков. Говоря о потоках, мы будем иметь в виду их яркости. Коэффициент пропорциональности между ними включен в постоянную  $\alpha$ .

<sup>3)</sup> В главе 1 пропускание слоя обозначалось, как обычно, буквой  $T$ . Здесь мы вынуждены обозначать его буквой  $P$ , чтобы отличать от символа  $T$ , характеризующего температуру.

ся двумя независимыми слагаемыми: потоком  $\alpha[\Phi_{ист} - A_{ист}\Phi_0(T_{ср})]$ , зависящим от состояния источника света, и потоком  $\alpha[\Phi_0(T_{ср}) - \Phi_0(T_{пр})]$ , обусловленным разностью температур среды и самого приемника.

Сформулируем следствия, вытекающие из (4.1.5) применительно к важнейшим частным случаям.

1. При термодинамическом равновесии  $T_{ист} = T_{пр} = T_{ср}$  измеряемый поток и, следовательно, показания приемника равны нулю.

2. Если температура приемника отличается от температуры среды, а источники света отсутствуют ( $T_{ист} = T_{ср}$ ) и, следовательно,  $\Phi_{ист} = A_{ист}\Phi_0(T_{ср})$ , то

$$Y = a\alpha A_{пр}[\Phi_0(T_{ср}) - \Phi_0(T_{пр})]. \quad (4.1.6)$$

Согласно (4.1.6), при  $T_{ср} > T_{пр}$  показания приемника положительны, при  $T_{ср} < T_{пр}$  отрицательны. Анализ явлений, связанных с возникновением отрицательных показаний приемника, будет дан в следующем параграфе. Уменьшение температуры приемника эквивалентно увеличению температуры среды и наоборот. Параметры  $\alpha$  и  $A_{пр}$  также могут зависеть от температуры. Применение соотношения (4.1.6) путем создания вокруг приемника фона равновесного излучения позволяет изучать спектральную зависимость произведения  $aA_{пр}$ .

3. Если температура приемника и среды одинакова ( $T_{пр} = T_{ср}$ ), а в окружающем пространстве имеется источник излучения, то

$$Y = a\alpha A_{пр}[\Phi_{ист} - A_{ист}\Phi_0(T_{ср})]. \quad (4.1.7)$$

Поток излучения от источника  $Y/aA_{пр}$ , непосредственно регистрируемый приемником, равен разности потоков, испускаемого и поглощаемого источником (превышение испускания над его поглощением). В обычных условиях  $\Phi_{ист} > A_{ист}\Phi_0(T_{ср})$  и, следовательно,  $Y > 0$ . Если источник света испускает меньше, чем поглощает, то  $Y < 0$ .

Формула (4.1.7) применима для любых источников света (как равновесных, так и неравновесных). Для тепловых источников, согласно закону Кирхгофа,  $\Phi_{ист} = A_{ист}\Phi_0(T_{ист})$ , и поэтому выражение (4.1.7) упрощается:

$$Y = a\alpha A_{пр}A_{ист}[\Phi_0(T_{ист}) - \Phi_0(T_{ср})]. \quad (4.1.8)$$

Из (4.1.7) и (4.1.8) следует, что при расчетах  $A_{ист}$  или  $\Phi_{ист}$  по экспериментальным данным нужно учитывать как температуру источника, так и температуру среды, особенно если они мало различаются.

Показания приемника в рассматриваемой схеме определяются в общем случае формулой (4.1.5). Ее можно видоизменить, учитывая, что при экспериментальном исследовании обычно интересуются не абсолютными показаниями приемни-

ка, а их изменением при включении источника света. При отсутствии источника или, что то же, при  $T_{\text{ист}} = C_{\text{ср}}$  показания приемника дают нулевой отсчет:

$$Y_0 = a\alpha A_{\text{пр}} [\Phi_0(T_{\text{ср}}) - \Phi_0(T_{\text{пр}})]. \quad (4.1.9)$$

Изменение показаний приемника, связанное с введением источника света, равно

$$Y' = Y - Y_0 = a\alpha A_{\text{пр}} [\Phi_{\text{ист}} - A_{\text{ист}} \Phi_0(T_{\text{ср}})]. \quad (4.1.10)$$

Формула (4.1.10) показывает, что значение  $Y'$  не зависит от температуры приемника. Необходимым условием для определения испускательной (поглощательной) способности является нарушение равновесия между исследуемым объектом (источником) и окружающей средой. С рассматриваемой точки зрения понижение температуры приемника не дает никаких преимуществ при изучении оптических свойств вещества<sup>4)</sup>.

Формула (4.1.8) представляет собой основу для измерения поглощательной способности тела  $A_{\text{ист}}$ . Для этого необходимо путем прямого эксперимента найти значение  $Y$  для всех частот, найти (или исключить) значения  $a\alpha A_{\text{пр}}$ , характеризующие свойства установки, и рассчитать с помощью формулы Планка величину  $[\Phi_0(T_{\text{ист}}) - \Phi_0(T_{\text{ср}})]$ . Для исключения  $a\alpha A_{\text{пр}}$  надо произвести дополнительное измерение величины  $Y$  при замене исследуемого объекта другим объектом с известной испускательной способностью, например черным телом. В этом последнем случае

$$Y_{\text{ч.т.}} = a\alpha A_{\text{пр}} [\Phi_0(T_{\text{ист}}) - \Phi_0(T_{\text{ср}})]. \quad (4.1.11)$$

Разделив (4.1.8) на (4.1.11), получим

$$Y/Y_{\text{ч.т.}} = A_{\text{ист}}. \quad (4.1.12)$$

Зная  $A_{\text{ист}}$ , с помощью закона Кирхгофа можно рассчитать  $\Phi_{\text{ист}}$ .

Из исходной формулы (4.1.5) видно, что измерение испускательной (поглощательной) способности тела возможно только в том случае, когда оно выведено из равновесия с окружающей средой, т. е. если  $T_{\text{ист}} \neq T_{\text{ср}}$ . При  $T_{\text{ист}} = T_{\text{ср}}$  приемник регистрирует значение  $Y_0$ , соответствующее (4.1.9) и не зависящее от свойств источника. Изменение температуры приемника принципиально не может дать никаких результатов, так как приведет к изменению  $Y_0$ . Для измерения  $A_{\text{ист}}$  нужно изменять либо температуру самого тела, либо среды. Чтобы измерить  $A_{\text{ист}}$  при комнатной температуре, нужно применять второй способ.

<sup>4)</sup> Уменьшение  $T_{\text{пр}}$  может изменить значение  $a$  и  $A_{\text{пр}}$ . Одновременно с этим уменьшается флюктуационный предел чувствительности приемника.

Для иллюстрации сказанного на рис. 4.1.2 приведены записи спектров, полученные экспериментально с помощью инфракрасного спектрофотометра и позволяющие определить испускательную и поглощающую способности тонкого слоя диффузионного масла при  $T = 230^{\circ}\text{C}$  [4]. Ось абсцисс представляет собой показания прибора при равновесии ( $T_{\text{ист}} = T_{\text{ср}}$ ), кривая  $Y_b$  — запись значений  $Y$  для рассматриваемого слоя. Дополнительно получена запись  $Y_a$ , характеризующая испу-

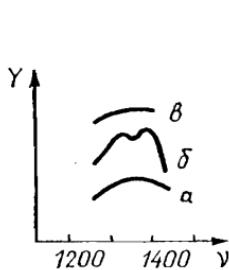


Рис. 4.1.2. Тепловое испускание диффузионного масла

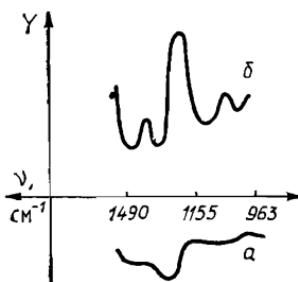


Рис. 4.1.3. Показание приемника при  $T_{\text{ист}} = -100^{\circ}\text{C}$

скательную способность толстого непрозрачного слоя того же масла. Если считать, что отражение слоя мало, то такой объект близок к черному телу. Кроме того, кривой  $Y_a$  воспроизводится запись теплового испускания нагретого кожуха кюветы, который служит вторым независимым источником света. Значения  $Y$ , соответствующие испусканию масла, определяются разностями  $Y_b - Y_a$  и  $Y_b - Y_a$ . В соответствии с (4.1.12) получим

$$\frac{Y_b - Y_a}{Y_b - Y_a} = A_{\text{ист}}.$$

Для получения спектров поглощения из спектров теплового испускания нужно пользоваться тонкими слоями исследуемого вещества. Так, при увеличении толщины свойства слоя приближаются к свойствам черного тела и структура полос размывается.

На рис. 4.1.3 приведен еще один пример определения испускательной способности, основанный на формуле (4.1.8). В качестве объекта исследования был выбран тонкий слой ( $l = 0,05$  мм) нитробензола, охлажденного до  $-100^{\circ}\text{C}$ . Ось абсцисс по-прежнему соответствует нулевым показаниям приемника при  $T_{\text{ист}} = T_{\text{пр}} = T_{\text{ср}}$ . Уменьшение толщины слоя делает полосы более резкими. Кривая  $Y_a$  дает спектр «отрицательного теплового испускания». Он полностью передает все характерные черты обычного спектра поглощения, изображенного кривой  $Y_b$ . В данном случае авторы ограничились только ка-

чественными измерениями, так как не удалось избежать запотевания окошеч кюветы, заметно искажающего истинный спектр вещества. Но именно с этой работы началось развитие спектроскопии отрицательных световых потоков<sup>5)</sup>.

**Измерение поглощения слоя с учетом теплового фона.** Перейдем теперь к анализу схемы измерения, приведенной на рис. 4.1.1. При равновесии ( $T_{\text{ист}}=T_{\text{сл}}=T_{\text{пр}}=T_{\text{ср}}$ ) на приемник падает поток  $\alpha\Phi_0(T_{\text{пр}})$ . Когда равновесие нарушено, падающий поток

$$\begin{aligned}\alpha\Phi_{\text{пад}} = & \alpha[\Phi_{\text{ист}} + R_{\text{ист}}\Phi_0(T_{\text{ср}}) + P_{\text{ист}}\Phi_0(T_{\text{ср}})]P_{\text{сл}} + \\ & + \alpha[\Phi_{\text{сл}} + R_{\text{сл}}\Phi_0(T_{\text{ср}})].\end{aligned}\quad (4.1.13)$$

Здесь  $\Phi_{\text{сл}}$  — испускательная способность слоя,  $P_{\text{сл}}$  и  $R_{\text{сл}}$  — его пропускание и отражение. Первое слагаемое представляет собой поток от источника света, ослабленный внутри исследуемого слоя и затем падающий на приемник. Второе слагаемое (4.1.13) характеризует независимый поток, выходящий со стороны слоя в направлении к приемнику. Приемник регистрирует разность (4.1.13) и потока  $\alpha\Phi_0(T_{\text{пр}})$ :

$$\begin{aligned}Y^* = & \alpha\alpha A_{\text{пр}}\Delta\Phi = [\Phi_{\text{ист}} - A_{\text{ист}}\Phi_0(T_{\text{ср}})](1 - A_{\text{сл}} - R_{\text{сл}}) + \\ & + \alpha\alpha A_{\text{пр}}[\Phi_{\text{сл}} - A_{\text{сл}}\Phi_0(T_{\text{ср}})] + \alpha\alpha A_{\text{пр}}[\Phi_0(T_{\text{ср}}) - \Phi_0(T_{\text{пр}})].\end{aligned}\quad (4.1.14)$$

При переходе от (4.1.13) к (4.1.14) использовано соотношение  $A_{\text{сл}} + P_{\text{сл}} + R_{\text{сл}} = 1$ .

В зависимости от температуры среды и приемника, а также от состояния источника света и исследуемого слоя показания приемника бывают как положительными, так и отрицательными. Изменение знака может происходить также при переходе от одной частоты к другой.

Наиболее важный частный случай формулы (4.1.14), соответствующий измерению коэффициента поглощения при комнатной температуре, получим, подставляя  $T_{\text{сл}}=T_{\text{пр}}=T_{\text{ср}}$ . Это дает

$$Y^* = \alpha\alpha A_{\text{пр}}[\Phi_{\text{ист}} - A_{\text{ист}}\Phi_0(T_{\text{ср}})]P_{\text{сл}}. \quad (4.1.15)$$

Звездочкой мы обозначаем здесь и в дальнейшем показания приемника в схеме рис. 4.1.1. Измеряя значения  $Y^*$ , не трудно определить  $P_{\text{сл}}$ . Для этой цели проще всего произве-

<sup>5)</sup> Автор с удовольствием вспоминает самый первый опыт (1957 г.). Когда формула (4.1.8) была написана, многим казалось, что она имеет только общетеоретическое значение. Однако Я. С. Хващевская доказала обратное. Работая на инфракрасном спектрометре ИКС-11, она вынула из прибора стандартный источник света — штифт Нернста и поставила на его место ... обычное мороженое. И стрелка измерительного комплекса сразу же резко отклонилась в обратную сторону. Тем самым была доказана практическая значимость спектроскопии отрицательных световых потоков.

сти дополнительное измерение показаний приемника  $Y_0$  в отсутствие поглощающего слоя. Соответствующие значения  $Y_0$  определяются формулой (4.1.9). Разделив (4.1.15) на (4.1.9), имеем

$$Y^*/Y_0 = P_{\text{сл}}. \quad (4.1.16)$$

В отличие от (4.1.15) отношение  $Y^*/Y_0$  не зависит от состояния источника света и температуры среды.

Как мы видели в главе 1 (§ 1), пропускание плоскопараллельного слоя однозначно связано с коэффициентом поглощения вещества слоя  $k$  и коэффициентом отражения  $R$  на границе слой—среда. Зная только величину  $P_{\text{сл}}$ , определить  $k$  и  $R$  нельзя. Для этого нужно произвести второе измерение; найти величину  $P_{\text{сл}}$  при другой толщине слоя или величину отражения  $R_{\text{сл}}$ . Тогда  $P_{\text{сл}} = (1 - R_{\text{сл}}) e^{-kL}$ .

Для изучения поглощения слоя при температурах, отличающихся от комнатных, простая формула (4.1.15) неприменима, так как необходимо учитывать тепловое испускание слоя. Подставляя в (4.1.14)  $T_{\text{пр}} = T_{\text{ср}}$  и считая, что  $T_{\text{сл}} \neq T_{\text{ср}}$ , получаем

$$Y^* = a\alpha A_{\text{пр}} \{ [\Phi_{\text{ист}} - A_{\text{ист}} - \Phi_0(T_{\text{ср}})] P_{\text{сл}} + [\Phi_{\text{сл}} - A_{\text{сл}} \Phi_0(T_{\text{ср}})] \}. \quad (4.1.17)$$

Чтобы исключить тепловое испускание слоя, необходимо произвести дополнительно измерения  $Y^*$  при отсутствии источника света ( $Y' = a\alpha A_{\text{пр}} a\alpha [\Phi_{\text{сл}} - A_{\text{сл}} \Phi_0(T_{\text{ср}})]$ ) и отсутствии слоя ( $Y = a\alpha A_{\text{пр}} [\Phi_{\text{ист}} - A_{\text{ист}} \Phi_0(T_{\text{ср}})]$ ). Тогда из трех измерений найдем

$$P_{\text{сл}} = \frac{Y^* - Y'}{Y}. \quad (4.1.18)$$

Некоторые иллюстрации к приведенным соображениям будут даны ниже. Более подробные сведения можно найти в монографиях [1, 2] и в оригинальной литературе [3—11].

## § 2. ИСПУСКАНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ СВЕТОВЫХ ПОТОКОВ

**Отрицательные потоки лучистой энергии.** При термодинамическом равновесии световой поток, испускаемый системой, равен потоку окружающего теплового излучения, поглощаемому в ней. Это обеспечивает сохранение неизменного состояния. Для любой пары уровней энергии системы ( $E_i > E_j$ ) число переходов вниз ( $A_{ij} + B_{ij}u_0$ )  $n_i$  равно числу переходов вверх  $B_{ji}u_0n_j$ <sup>6)</sup>. Только в таком смысле можно говорить, что система

<sup>6)</sup> Напоминаем, что символы  $n_i$  и  $n_j$  обозначают населенности уровней  $i$  и  $j$ ;  $A_{ij}$ ,  $B_{ji}$  — коэффициенты Эйнштейна;  $B_{ij}u_0$  и  $B_{ji}u_0$  — вероятности вынужденных переходов с испусканием и поглощением световых квантов;  $A_{ij}$  — вероятность спонтанного перехода  $i \rightarrow j$ ;  $u_0$  — плотность равновесного излучения (см. конец главы 1).

не подвергается воздействию внешнего излучения. Внешними возбуждающими потоками целесообразно называть лишь те потоки, которые приводят к нарушению термодинамического равновесия. Такие потоки возникают в результате свечения тех или иных источников света, не находящихся в равновесии со средой. Отсюда следует, что внешний поток  $\Phi$ , действующий на систему (слой), равен разности полного потока излучения  $\Phi_0 + \Phi$ , пронизывающего систему, и того потока тепловой ра-

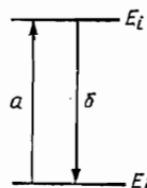


Рис. 4.2.1. Поглощение положительного (а) и отрицательного (б) потоков

диации  $\Phi_0$ , который падал на нее до включения источника света при полном термодинамическом равновесии со средой<sup>7)</sup>. Совершенно аналогично плотность излучения  $u$ , действующего на частицы, есть превышение полной плотности  $u + u_0$  над плотностью равновесного излучения  $u_0$ .

В подавляющем большинстве случаев, встречающихся в экспериментальной практике,  $T_{\text{ист}} > T_{\text{ср}}$ ,  $T_{\text{сл}} = T_{\text{ср}}$ . Благодаря этому полный поток лучистой энергии  $\Phi + \Phi_0$ , падающий на объект, больше потока равновесного излучения, и, следовательно, плотность возбуждающего потока положительна, а число переходов вверх превосходит число переходов вниз. Процесс поглощения внешней радиации при  $u > 0$  изображают обычно стрелкой вверх (рис. 4.2.1, а). В результате поглощения света происходит перераспределение частиц по уровням энергии; число частиц на уровне  $i$  увеличивается ( $n_i > n_i^{\text{равн}}$ ), на уровне  $j$  уменьшается ( $n_j < n_j^{\text{равн}}$ ). Средняя энергия системы также увеличивается, система в целом выходит из состояния равновесия, иначе говоря, возбуждается. Если внешнее воздействие длится достаточно долго, то спустя какое-то время устанавливается стационарное состояние с определенной степенью нарушения равновесия, зависящей от интенсивности конкурирующих процессов. К ним относятся, в частности, различные неоптические переходы.

В той же самой системе частиц может возникнуть, однако, и другое, прямо противоположное нарушение термодинамического равновесия. Допустим, что в пространство, окружающее систему (слой), помещено какое-либо тело с температурой, меньшей температуры системы и среды ( $T_{\text{ист}} < T_{\text{ср}}$ ,  $T_{\text{сл}} = T_{\text{ср}}$ ).

<sup>7)</sup> Разделение полного потока на сумму внешнего и равновесного потоков теряет смысл в нелинейной оптике.

В этом случае световой поток, падающий на систему, также изменится; поток  $\Phi_0 + \Phi$  станет меньше потока  $\Phi_0$ , существовавшего при равновесии. В результате равновесное распределение по уровням энергии также нарушится; число переходов  $j \rightarrow i$  станет меньше числа переходов  $i \rightarrow j$ , произойдет уменьшение числа частиц на уровне  $i$  и увеличение числа частиц на уровне  $j$ . Средняя энергия системы уменьшится. В данном случае система также выводится из состояния равновесия, но уже в противоположном направлении. Причиной такого отрицательного возбуждения является уменьшение окружающего излучения (по сравнению с равновесным), т. е. облучение системы отрицательным световым потоком (значения  $\Phi$  и  $u$  для внешнего потока меньше нуля). В отличие от обычного случая поглощение отрицательного потока радиации следует изображать стрелкой вниз (рис. 4.2.1, б).

В формуле (1.1.32) коэффициент поглощения  $k$  не зависит от знака радиации, падающей на вещество. В соответствии с законом Бугера (1.1.33) отрицательные потоки поглощаются по тому же экспоненциальному закону; по мере увеличения  $l$  поток  $\Phi_l$  уменьшается по абсолютной величине, сохраняя свой знак. При больших  $l$  значение  $\Phi_l$  стремится к нулю, поток радиации приближается к равновесному.

Между положительными и отрицательными возбуждающими потоками имеется резкое, хотя и непринципиальное различие, которое надо подчеркнуть с самого начала. При заданной температуре системы величина положительных потоков, падающих на нее, ничем не ограничена, и значение  $u$  может изменяться от нуля до бесконечности. В то же время отрицательные потоки могут изменяться только в определенных пределах. Минимальное значение  $u$  равно нулю, максимальное отрицательное значение —  $u = -u_0(v)$ . Такое значение  $u$  можно получить только в пределе, полностью окружив облучаемую систему телом (источником отрицательных световых потоков) с температурой  $T=0$ .

Рассматриваемое различие положительных и отрицательных потоков не имеет принципиального характера. Если при заданной температуре источника света непрерывно повышать температуру исследуемого объекта, то абсолютная величина яркости отрицательного потока может достигать очень больших значений<sup>8)</sup>.

Величины отрицательных потоков излучения, которые можно получить в экспериментальной практике, сильно зависят не только от температуры исследуемого объекта, но и от рабочей области спектра. В видимой и ультрафиолетовой областях спектра при комнатной температуре отрицательные пото-

<sup>8)</sup> Звезды постоянно облучаются сверхмощными отрицательными световыми потоками, исходящими из мирового пространства.

ки крайне малы. Они могут быть велики в этой области только при сверхвысоких температурах. В то же время в инфракрасной области спектра вблизи максимума функции Планка значение  $u_0$  достаточно велико уже при комнатной температуре и отрицательные потоки хорошо чувствуются обычными приемниками радиации. Весьма своеобразное положение имеет место в радиочастотной области спектра. В данном случае плотность равновесного излучения мала. Однако уровни энергии очень близки друг к другу ( $h\nu \ll kT$ ), поэтому населенности верхних и нижних уровней почти одинаковы. Возбуждение системы положительными потоками любой интенсивности неэффективно и может приводить лишь к полному выравниванию населенности уровней. В то же время облучение отрицательными потоками приводит в принципе к заметному снижению населенности верхнего уровня.

Первоначально может показаться, что введение понятия отрицательных потоков весьма условно и связано только с произволом в выборе направления распространения световых потоков. В действительности это не так. Отрицательные потоки возникают всегда, когда на тело действует излучение, объемная плотность которого меньше плотности равновесного излучения  $u_0$ .

Разумеется, математическое решение задачи можно провести при любом выборе расположения осей, однако не все они соответствуют физическому смыслу тех процессов, которые происходят в изучаемых объектах. В рассматриваемом нами случае системы с двумя уровнями энергии и источником света, внешним по отношению к ней, мы изучаем свойства именно этой системы, а не источника света, который может быть выбран различными способами. Наша система есть индикатор падающего на нее излучения. Она может воспринимать и своеобразно регистрировать как положительные, так и отрицательные световые потоки. Изменение знака падающего излучения не требует изменения направления оси координат. Как мы увидим в дальнейшем, большинство формул теоретической спектроскопии одинаково справедливо как для положительных, так и для отрицательных световых потоков. Введение отрицательных потоков расширяет границы применимости понятия «световой поток» и позволяет описать большое число новых экспериментальных фактов.

Как мы уже упоминали, источником отрицательных потоков может быть любое тело, температура которого ниже температуры исследуемой системы. Свойства таких источников нетрудно изучить, воспользовавшись простой схемой, состоящей из источника и приемника (и различных фокусирующих приспособлений). Согласно (4.1.5), при  $T_{\text{пр}} = T_{\text{ср}}$  и  $\Phi_{\text{ист}} < \langle A_{\text{ист}} \Phi_0(T_{\text{пр}}) \rangle$  поток излучения, регистрируемый приемником, меньше нуля, а показания приемника отрицательны. Макси-

мальное значение отрицательного потока, поглощаемого источником при  $\Phi_{ист}=0$ , равно  $a\alpha A_{ист}\Phi_0(T_{пр})$ .

На рис. 4.2.2 приведен спектральный ход показаний приемника излучения при облучении его холодными источниками света: кусками алюминия, меди и олова, охлажденными до  $T=-140^{\circ}\text{C}$ . Область спектра  $2500-600\text{ см}^{-1}$ . Ширина щели 1,9 мм. Спектральный прибор находился между источником и приемником. Ось абсцисс соответствует показаниям прием-

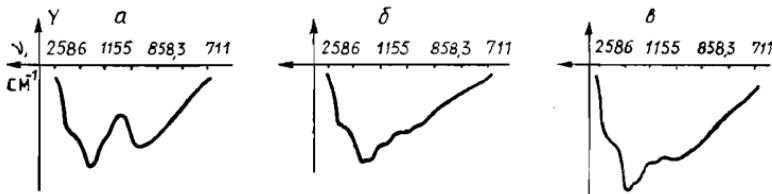


Рис. 4.2.2. Отрицательная испускательная способность металлов при  $T=-140^{\circ}\text{C}$ : *а* — алюминий, *б* — медь, *в* — олово

ника  $Y_0$  при отсутствии источника ( $T_{ист}=T_{пр}=T_{ср}$ ). При нагревании металла приемник давал положительные отсчеты. Прибор достаточно чувствителен к понижению температуры металла и возникновению отрицательных потоков. Каждый металл обладает специфическим «отрицательным спектром» испускания, что может быть использовано для спектрально-аналитических целей<sup>9)</sup>. Значения испускательной, а затем поглощательной способности легко вычислить по формуле (4.1.8), если показания приемника разделить на  $a\alpha A_{пр}[\Phi_0(T_{ист})-\Phi_0(T_{пр})]$ . Процедура исключения величины  $a\alpha A_{пр}$  такая же, как и для положительных потоков. Все формулы предыдущего параграфа справедливы и для холодных источников излучения.

На рис. 4.2.3 приведен пример сопоставления кривых  $Y/\Delta v$  для нагретых и охлажденных тел ( $\Delta v$  — спектральная ширина щели). Кривая 1 дает значения  $Y$ , когда в качестве источника света использовалось отверстие электрической печки ( $T=45^{\circ}\text{C}$ ), кривая 2 — значение  $Y$  для латунной втулки, охлажденной до  $T=-100^{\circ}\text{C}$ . Охлаждение источника на  $120^{\circ}$  приводит примерно к тем же показаниям приемника, что и его нагревание на  $20^{\circ}$ . Кривыми 3 и 4 в произвольном масштабе даны значения  $[\Phi_0(T_{ист})-\Phi_0(T_{пр})]$ , вычисленные по формуле Планка при  $T_{ист}=45$  и  $-100^{\circ}\text{C}$ . Кривая 5 дает значение  $\Phi_0(T_{пр})$  при  $T_{пр}=20^{\circ}\text{C}$  в том же масштабе. Отклонение формы экспериментальных кривых 1 и 2 от кривых 3 и 4, рассчитан-

<sup>9)</sup> По «отрицательному спектру» испускания можно идентифицировать, например, разные металлы. Спектр алюминия снят при неблагоприятных условиях опыта, когда испускающая поверхность металла была покрыта инеем. При тщательном просушивании окружающего воздуха качество спектров значительно улучшается.

ных по формуле Планка, невелико и связано с отличием использованных источников света от черных тел.

На рис. 4.2.4 приведена запись показаний приемника для сильно неравновесного источника света. В одних частотах прибор регистрировал положительные потоки, в других — отрицательные. В первом случае плотность излучения, падающего на приемник, превышала плотность равновесного излучения  $u_0(T_{\text{пр}})$ , во втором — была меньше ее. Ось абсцисс по-прежнему соответствовала показаниям приемника при отсутствии источника. Чтобы получить неравновесный источник света, была использована комбинация двух тел, находящихся при разных температурах (электрическая печь и кювета с охлажденным толуолом). В тех частотах, где толуол прозрачен, прибор регистрировал положительный поток от печи. В тех частотах, где он

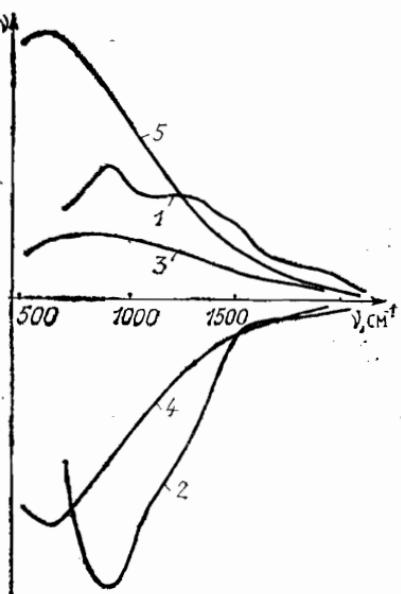


Рис. 4.2.3. Кривые  $Y(s)$  для нагретых и охлажденных тел

был непрозрачен, прибор регистрировал значительный отрицательный поток от охлажденного толуола.

Интерпретация кривой рис. 4.2.4 с помощью понятия отрицательного светового потока совершенно элементарна. Источник света неравновесен. В одних частотах его испускание больше равновесного, световая энергия идет от источника к приемнику. В других частотах ситуация обратная: источник света поглощает больше, чём испускает, энергия идет от при-

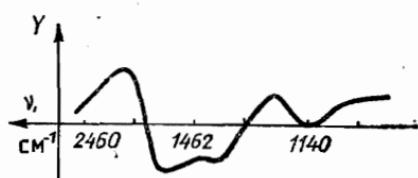


Рис. 4.2.4. Зависимость положительных и отрицательных показаний приемника от частоты для сильно неравновесного источника света

емника к источнику, измерительное устройство приемника дает отрицательные значения.

**Измерение поглощения отрицательных световых потоков.** Свойства отрицательных световых потоков не отличаются принципиально от свойств положительных потоков. Они способны поглощаться, отражаться или рассеиваться в среде, могут вызывать люминесценцию, охлаждать облучаемое тело, подвержены двойному лучепреломлению в анизотропных средах, имеют определенную поляризацию и т. д.

Рассмотрим здесь поглощение отрицательных потоков в схеме эксперимента, приведенной ранее на рис. 4.1.1. Все не-

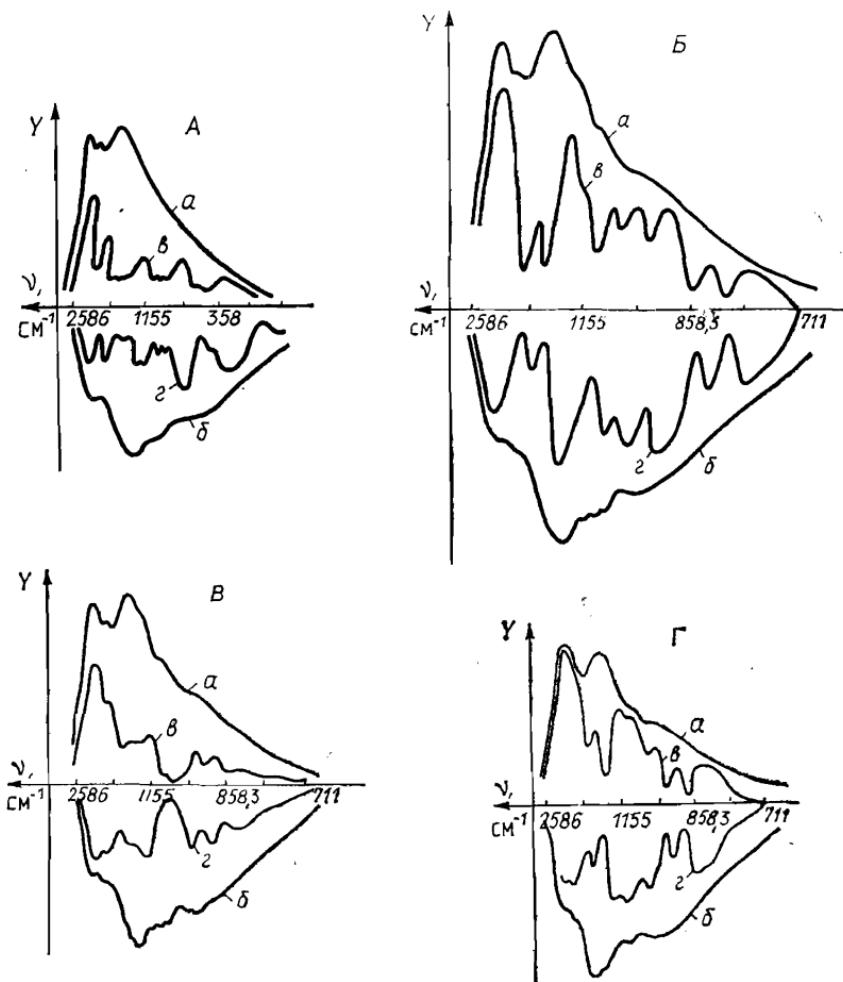


Рис. 4.2.5. Спектры поглощения циклогексанола (A), нитробензола (B), глицерина (C) и дихлорэтана (D) с нагретыми и охлажденными источниками света

обходимые формулы были уже приведены в предыдущем параграфе. Из (4.1.15), в частности, следует, что для измерения пропускания слоя одинаково применимы как положительные, так и отрицательные потоки. Точность измерений зависит от величины потока, падающего на исследуемый слой, но отнюдь не от его знака.

На рис. 4.2.5, А приведены записи спектров поглощения циклогексанола [1, 5, 7—9]. Температуры слоя вещества и приемника излучения комнатные. Горизонтальная линия соответствует отсутствию источника. Две верхние кривые с положительными значениями  $Y$  соответствуют нагретому источнику света, две нижние — охлажденному. Источником света слу-

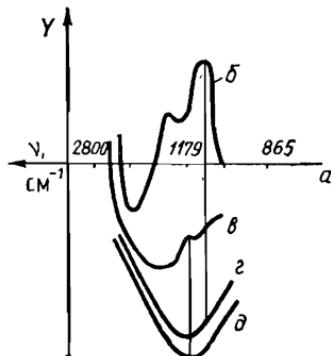


Рис. 4.2.6. Показания приемника при нагретом источнике света и охлажденном слое циклогексанола

жила зачерненная полость латунной втулки, в первом случае при  $T=80^{\circ}\text{C}$ , во втором при  $T=-100^{\circ}\text{C}$ . Кривые  $a$  и  $b$  соответствуют показаниям приемника при отсутствии слоя циклогексанола и характеризуют испускательную способность втулки, кривые  $c$  и  $d$  дают запись показаний приемника при наличии слоя циклогексанола. Они обладают хорошей симметрией относительно нулевой линии. Эта симметрия приближенная и осуществляется при симметрии спектров испускания нагретых и охлажденных источников света, т. е. кривых  $a$  и  $b$ . Расчет функции  $P_{\text{сл}}(\nu)$ , выполненный по приведенным экспериментальным данным с помощью формулы (4.1.15), дал одинаковые результаты для нагретого и охлажденного источников. Закон Бугера отрицательных потоков выполняется строго.

На рис. 4.2.5, Б—Г приведены аналогичные записи для нитробензола, глицерина и дихлорэтана. Толщины слоя в различных случаях различные. В последнем случае источником света служило охлажденное олово ( $T_{\text{ист}}=-100^{\circ}\text{C}$ ). В этих и многих других случаях экспериментально измеренный спектр  $P_{\text{сл}}(\nu)$  не зависел от типа источника света.

Изучение температурной зависимости коэффициента поглощения в инфракрасной области требует особых предосторожностей. Даже при небольшом изменении температуры кюветы нельзя пренебречь изменением теплового испускания исследуемого вещества [4, 9].

На рис. 4.2.6 приведен результат измерений спектров поглощения слоя циклогексанола, когда температура слоя отличается от температуры среды и приемника ( $T_{ист} = 240^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{сл} = -140^{\circ}\text{C}$ ). Для правильной интерпретации полученных кривых надо исходить из формулы (4.1.17), но вместе с тем учитывать тепловое испускание окошек кюветы, которые редко бывают абсолютно прозрачными. На рис. 4.2.6 кривая  $b$  есть запись спектра источника при пустой кювете, кривая  $e$  — при наличии слоя циклогексанола, кривая  $\delta$  — запись спектра теплового испускания кюветы с циклогексанолом, кривая  $\sigma$  — спектра теплового испускания пустой кюветы. В двух последних случаях источник света отсутствовал. Разность  $Y_b$  и  $Y_e$  позволяет учесть тепловое испускание пустой кюветы<sup>10)</sup>. Она равна  $[\Phi_{ист} - A_{ист}\Phi_0(T_{ср})]P_{кюв}$ . Разность  $Y_e - Y_\delta$  равна  $[\Phi_{ист} - A_{ист}\Phi_0(T_{пр})]P_{сл}P_{кюв}$  и не содержит теплового испускания слоя и кюветы. Их значения на рис. 4.2.6 обозначены вертикальными линиями. Отношение этих разностей равно пропусканию исследуемого слоя при  $T_{сл} \neq T_{ср}$ :

$$\frac{Y_e - Y_\delta}{Y_b - Y_e} = P_{сл}.$$

4

Для измерения  $P_{сл}$  нужно произвести (при каждой частоте) четыре измерения. Только таким образом можно исключить влияние источника, приемника, окошек кюветы и теплового испускания самого слоя.

На рис. 4.2.6 кривая  $b$  пересекает ось абсцисс. В тех частотах, в которых окошки поглощали значительную часть внешнего потока, приемник регистрировал отрицательный поток, создаваемый тепловым испусканием окошек кюветы. В остальной области спектра положительный поток от источника доминировал над отрицательным потоком от кюветы. При наличии в кювете слоя циклогексанола показания приемника всегда отрицательны.

Значительно большее число экспериментальных кривых, иллюстрирующих свойства отрицательных световых потоков, приведено в работах [1—9]. Подробный анализ теории вопроса дан в монографии [1], посвященной спектроскопии отрицательных световых потоков.

Интересные применения отрицательных потоков описаны в работах М. Л. Вейнгерова и его сотрудников по отрицательному оптико-акустическому эффекту. С их помощью удалось измерить испускательную способность ряда газов при комнатной температуре и разработать эффективные методы количественного спектрального анализа газов [12—14].

<sup>10)</sup> Подробности см. в [1].

### § 3. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО МЕТОДУ САМООБРАЩЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

**Существо метода.** Как мы уже упоминали, некоторые частные проблемы спектроскопии отрицательных потоков излучения были решены много лет назад и уже широко применяются. К ним относится прежде всего метод измерения температуры пламен по самообращению спектральных линий. Он предложен Фери в 1903 г. и окончательно обоснован Коном в 1914 г. Подробное изложение сущности и деталей этого метода можно найти в различных руководствах и пособиях (см. [15—17]). Мы остановимся только на принципиальных основах обычного метода и на его новой форме, предложенной Н. Н. Соболевым и А. Г. Свиридовым [18, 19], не касаясь вопросов точности, аппаратуры, способов автоматизации и т. д.

При измерении температуры методом обращения спектральных линий (рис. 4.3.1) эталонный источник света  $S$  проецируется с помощью линзы  $L_1$  на исследуемое пламя, в которое введена соль щелочного металла. На щель спектрального аппарата с помощью линзы  $L_2$  проецируется изображение пламени и изображение накаленной полосы эталонной лампы.

Картина, наблюдаемая в спектроскопе при увеличении силы тока в цепи эталонной лампы, изображена на рис. 4.3.2. До тех пор, пока яркостная температура лампы будет ниже температуры пламени, на темном фоне будут видны линии испускания пламени ( $a$ ). Если яркостная температура лампы станет равной температуре пламени, то линии испускания исчезнут, и спектральный прибор зарегистрирует ту же картину, которая была бы при отсутствии пламени ( $b$ ). При температурах  $T_{\text{ист}} > T_{\text{пл}}$  на фоне сплошного спектра будут видны линии поглощения пламени ( $c$ ). Исчезновение спектральной линии пламени на фоне сплошного спектра эталонной лампы при равенстве температур лампы и пламени называется обращением спектральных линий. Варьируя температуру лампы и добиваясь исчезновения линий, можно определить температуру пламени. Наблюдение обращения спектральных линий ведется чаще всего визуально.

**Расчетные формулы.** Основой для интерпретации описанных экспериментальных результатов может служить общая формула (4.1.14). Так как в данном случае температура среды ( $T_{\text{ср}} = T_{\text{пр}}$ ) мала по сравнению с температурой источника

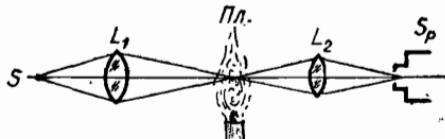


Рис. 4.3.1. Схема установки для измерения температуры по методу самообращений спектральных линий

света и пламени, то можно пренебречь значениями  $\Phi_0(T_{\text{ср}})$  по сравнению с  $\Phi_{\text{ист}}$  и  $\Phi_{\text{пл}}$  (обозначение  $\Phi_{\text{пл}}$  введено вместо  $\Phi_{\text{сл}}$ ). В результате формула (4.1.14) сильно упрощается:

$$Y^* = a\alpha A_{\text{пр}} [\Phi_0(T_{\text{ист}}) (1 - A_{\text{пл}} - R_{\text{пл}}) + \Phi_{\text{пл}}]. \quad (4.3.1)$$

При применении уравнения (4.3.1) к пламени предполагается, что коэффициент отражения пламени очень мал и его можно не учитывать. Кроме того, допускается, что испускание

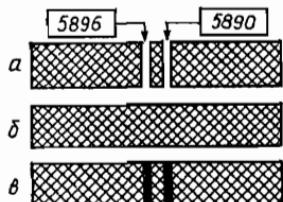


Рис. 4.3.2. Самообращение спектральных линий натрия

пламени носит термический характер и поэтому применим закон Кирхгофа [ $\Phi_{\text{пл}} = A_{\text{пл}}\Phi_0(T_{\text{пл}})$ ]. В этом случае

$$Y^* = a\alpha A_{\text{пр}} [\Phi_0(T_{\text{ист}}) (1 - A_{\text{пл}}) + \Phi_0(T_{\text{пл}}) A_{\text{пл}}]. \quad (4.3.2)$$

Вычитая это значение из показаний приемника при отсутствии пламени

$$Y_{\text{ист}} = a\alpha A_{\text{пр}} \Phi_0(T_{\text{ист}}), \quad (4.3.3)$$

получим

$$Y - Y^* = a\alpha A_{\text{пр}} A_{\text{пл}} [\Phi_0(T_{\text{ист}}) - \Phi_0(T_{\text{пл}})]. \quad (4.3.4)$$

Разность  $Y - Y^*$  пропорциональна превышению испускания источника над испусканием источника и пламени. Именно эта разность непосредственно воспринимается глазом как разность фона сплошного спектра в ближайшей окрестности линии и интенсивности в центре спектральной линии пламени. Согласно (4.3.4), она может быть как положительной, так и отрицательной. При  $T_{\text{пл}} < T_{\text{ист}}$  значение  $Y - Y^*$  больше нуля, при  $T_{\text{пл}} > T_{\text{ист}}$  меньше нуля. При  $T_{\text{пл}} = T_{\text{ист}}$  значение  $Y - Y^*$  равно нулю, наступает обращение спектральной линии.

Основным преимуществом метода обращения спектральных линий по сравнению с другими оптическими методами измерения температуры следует считать автоматический учет реабсорбции.

В работах [18, 19] предложен новый вариант рассматриваемого метода измерения температур. Он осуществляется с помощью той же оптической схемы без наблюдения самого обращения спектральных линий и позволяет пользоваться объективной регистрацией интенсивности световых потоков.

В данном случае можно применять источник света с постоянной температурой, что также весьма существенно (не нужно иметь источник света с температурой, превышающей температуру пламени).

Для определения по показаниям объективного приемника значения  $\Phi_0(T_{пл})$  при заданном  $\Phi_0(T_{ист})$  нужно исключить из уравнения (4.3.4) не только значения  $a\alpha A_{пр}$ , как это делалось в предыдущих параграфах, но и значения  $A_{пл}$ . С этой целью необходимо провести одно дополнительное измерение — показания приемника при выключении источника:

$$Y_{пл} = a\alpha A_{пр} A_{пл} \Phi_0(T_{пл}). \quad (4.3.5)$$

Складывая (4.3.3) и (4.3.5) и вычитая (4.3.2), получим

$$Y_{ист} + Y_{пл} - Y^* = a\alpha A_{пр} A_{пл} \Phi_0(T_{ист}). \quad (4.3.6)$$

Разделив (4.3.5) на (4.3.6), имеем окончательно

$$\Phi_0(T_{пл}) = \Phi_0(T_{ист}) \cdot \frac{Y_{пл}}{Y_{ист} + Y_{пл} - Y^*}. \quad (4.3.7)$$

Зная  $T_{ист}$ , измеряя  $Y_{пл}$ ,  $Y_{ист}$ ,  $Y^*$  и пользуясь аналитическим выражением функции Планка, легко рассчитать температуру пламени.

Н. Н. Соболев и А. Г. Свиридов исследовали различные детали этого метода и, в частности, зависимость показаний приемника от ширины спектральной линии, испускаемой или поглощаемой пламенем. В результате они пришли к выводу, что окончательная формула (4.3.7) справедлива как для пламен с узкими линиями испускания (меньше спектральной ширины щели), так и для пламен со сплошным спектром. В то же время для узких линий испускания исходные формулы (4.3.1) — (4.3.6) должны зависеть от отношения ширины линии к спектральной ширине щели. Для узких щелей и широких полос поглощения пламени выражения (4.3.1) — (4.3.6) справедливы полностью.

Метод измерения температуры по обращению спектральных линий, а также методы, основанные на применении формулы (4.3.6), во многих случаях дают достаточную точность.

## ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 4

1. Степанов Б. И. Основы спектроскопии отрицательных световых потоков. Мн., 1961. 123 с.
2. Степанов Б. И., Грибковский В. П. Введение в теорию люминесценции. Мн., 1963. 443 с.
3. Степанов Б. И. // Молекулярная спектроскопия. Л., 1960. С. 20—34.
4. Степанов Б. И., Хващевская Я. С. // ИФЖ. 1958. Т. 1, № 10. С. 82—87.

5. Степанов Б. И., Хващевская Я. С. // Уч. зап. БГУ. Сер. физ. 1958. № 41. С. 19—26.
6. Степанов Б. И. // Опт. и спектр. 1957. Т. 3, № 1. С. 3—8.
7. Степанов Б. И., Хващевская Я. С. // Докл. АН СССР. 1957. Т. 116, № 4. С. 588—590.
8. Степанов Б. И., Хващевская Я. С. // Изв. АН СССР Сер. физ. 1958. Т. 22, № 9. С. 1089—1092.
9. Степанов Б. И., Хващевская Я. С. // Опт. и спектр. 1958. Т. 5, № 4. С. 393—403.
10. Степанов Б. И., Рубанов А. С. // Докл. АН СССР. 1959. Т. 128, № 3. С. 517—520.
11. Степанов Б. И., Рубанов А. С. // Докл. АН БССР. 1960. Т. 4, № 9. С. 372—375.
12. Вейнгеров М. Л. // Автоматические газоанализаторы. М., 1961. С. 177—192.
13. Вейнгеров М. Л., Герловин Я. И., Панкратов Н. А. // Опт. и спектр. 1956. Т. 1, вып. 8. С. 1023.
14. Вейнгеров М. Л., Сивков А. А., Малых Э. В. // Опт. и спектр. 1957. Т. 2, № 6. С. 823—825.
15. Гейдон А. Спектроскопия и теория горения. М., 1950.
16. Ладенбург Р. У., Льюис Б., Пиз Р. Н., Тейлор Х. С. Физические измерения в газовой динамике и при горении. М., 1957.
17. Катин Г. П. Оптические датчики температуры. М., 1959.
18. Соболев Н. Н. // Тр. ФИ АН. 1956. Т. 7. С. 159—229.
19. Свиридов А. Г., Соболев Н. Н. // ЖЭТФ. 1953. Т. 24, № 1. С. 93—106.

### § 1. К ИСТОРИИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КНИГИ Г. Г. СЛЮСАРЕВА «О ВОЗМОЖНОМ И НЕВОЗМОЖНОМ В ОПТИКЕ»

Книга Г. Г. Слюсарева «О возможном и невозможном в оптике» [1] — явление уникальное, ничего подобного в оптической литературе автор не встречал. Первое издание книги вышло в свет в 1944 г. И как мы увидим несколько дальше из слов самого автора, эта дата совсем не случайна. Редактором 1-го издания книги был С. И. Вавилов. Второе издание той же монографии [2] вышло спустя 13 лет, уже в 1957 г. Оно было сильно расширено и переработано. Третий основной источник сведений, которым мы будем пользоваться, — это доклад Г. Г. Слюсарева «О возможном и невозможном в оптике», сделанный им в декабре 1968 г. на 22-х чтениях им. Д. С. Рождественского, проводимых ежегодно в Государственном оптическом институте. Эти чтения проходили в связи с 50-летием основания института.

Книга Г. Г. Слюсарева крайне необходима всем работающим в области оптики, помогает им оценить перспективы тех или иных новых типов приборов, новых идей. К большому сожалению, тираж книги Г. Г. Слюсарева очень мал: первое издание — 5000 экз., второе — 12000. Этую книгу сейчас можно найти только в некоторых библиотеках. Нынешние молодые научные работники ее, как правило, не видели.

Когда-то очень давно Парижская Академия наук приняла специальное решение — не рассматривать впредь проекты вечного двигателя. Закона сохранения энергии тогда еще не знали, но на основе анализа бесчисленного множества неудачных попыток приняли правильное решение. Это был первый, чрезвычайно полезный опыт.

Не все, что хотелось бы сделать, возможно. И, следовательно, во всех отраслях знания крайне важна оценка степени возможного и невозможного, оценка перспектив развития перспектив решения тех или иных конкретных задач. Такой оценки, как правило, не существует, и книга Г. Г. Слюсарева является отличным примером, которому необходимо последовать и в других науках.

Содержание книги Г. Г. Слюсарева весьма важно. Именно поэтому мы решили подробнее остановиться на нем. В даль-

нейшем изложении будем следовать книге Г. Г. Слюсарева, разумеется, в сильно сокращенном варианте. Нам неизвестно, будет ли она переиздаваться и как скоро, а знакомство с материалами книги необходимо.

Следует заметить, что жизнь вносит свои коррективы. Кое-что из того, что ранее казалось невозможным, сейчас уже осуществлено. Это относится, например, к явлению обращения волнового фронта, к превращению хаотических потоков света в луч направленный. Все подобные случаи будут рассмотрены специально.

**Рассказывает Г. Г. Слюсарев.** «Тридцатые годы нашего столетия ознаменовались появлением большого количества изобретений в области оптики, относящихся преимущественно к вопросам создания ультрателескопов, сверхмикроскопов и других оптических приборов, обладающих необыкновенно большими увеличениями и необычными свойствами. Эти изобретения, естественно, направлялись в Оптический институт на рецензирование и отнимали немало времени у сотрудников института, вынужденных разбираться в сложных и путанных схемах и выискивать ошибки в рассуждениях авторов.

Д. С. Рождественский, автор одной из самых серьезных теоретических работ по теории микроскопа, в первое время относившийся положительно к полетам мысли изобретателей, вскоре разочаровался в них и пришел к убеждению, что единственным средством для ограничения этого потока является составление книги, где были бы разъяснены основные законы образования изображения и показано, почему бесполезны попытки добиться сверхвысоких увеличений. К сожалению, попытки Д. С. Рождественского что-либо предпринять в этом направлении оказались безуспешными, и среди сотрудников ГОИ не нашлось желающих заняться этим делом.

После начала второй мировой войны поток изобретений увеличился. К предыдущим предложениям добавились новые, направленные на уничтожение военной мощи противника с помощью различных вариантов лучей смерти, сжигания на расстоянии и т. п. ... При современном состоянии оптического приборостроения, казалось, открывались блестящие перспективы для решения более смелых задач, например для создания систем, разрушающих объекты противника на больших расстояниях. Большинство таких предложений проходило через руки С. И. Вавилова, которому приходилось тратить изрядное количество времени хотя бы на беглое ознакомление и препровождение изобретения по назначению, чаще всего в вычислительный отдел, который в какой-то степени привык к этой добавочной нагрузке и меньше других отделов возражал против нее.

Естественно поэтому, что С. И. Вавилов обратился к автору этих строк с просьбой написать популярную книгу, пред-

назначенную главным образом для изобретателей сверхмикроскопов, ультрателескопов, лучей смерти и подобных приборов, преследуя при этом две цели:

1) повышение уровня знаний предполагаемых изобретателей;

2) возможность ссылки на эту книгу взамен подробного объяснения ошибок изобретателя».

«С. И. Вавилов предложил и название книги «О возможном и невозможном в оптике», оказавшееся удачным и вызвавшее появление других популярных брошюрок с аналогичным названием, например: «О возможном и невозможном в кибернетике». Содержание книги было намеренно ограничено областью геометрической и дифракционной оптики в той мере, в какой это необходимо для объяснения предела разрешающей силы, а также элементами фотометрии и оптической энергетики, позволяющими оценивать действие оптических систем на больших расстояниях» [3, с. 5–6].

**Точка зрения С. И. Вавилова.** С. И. Вавилов не только был редактором 1-го издания книги, но и написал к ней введение. Приведем здесь точку зрения Вавилова о цели этой книги.

«Строгое решение оптических задач, связанных с вопросами распространения света, очень сложно и трудно, и оно существует только для немногих случаев. Основная причина трудностей заключается в волновой электромагнитной природе света.

Почти всегда приходится ограничиваться приближенными методами и результатами. Геометрическая оптика, возникшая еще в древние времена, является наиболее грубым и простым методом решения оптических задач. Учение об интерференции света несколько углубило лучевую оптику, оставляя ее все же в состоянии приближенного метода. Теория дифракции электромагнитных волн указала, наконец, путь точного решения оптических задач. Однако эта дорога настолько сложна и терниста, что сама теория дифракции, естественно, модифицируется в ряд упрощенных, приближенных методов разной степени точности. Помимо того, оптические задачи обычно разрешаются простоты ради для несуществующих и невозможных «светящихся точек», излучающих одинаково во все стороны.

При таком положении дела не удивительно, что в оптике чаще, чем в других разделах физики, приходится на каждом шагу преодолевать всевозможные парадоксы. Не удивительно, что лица, освоившие приближенные законы геометрической оптики, привыкшие оперировать со «светящимися точками» и «параллельными пучками», начинают изобретать приборы, сводящие излучение светящегося тела в точку, комбинируют телескопы с микроскопами в надежде увидеть новые детали на Луне и Солнце и поражаются косноти опти-

ков-профессионалов, не догадывающихся для рассмотрения молекул взглянуть на изображение в микроскопе через второй микроскоп.

Научные учреждения, имеющие отношение к оптике, обычно закидываются такого рода предложениями, поступающими со всех краев Земли. Проектов регретиit mobile в настоящее время фабрикуется гораздо меньше, чем ультрателескопов, сверхмикроскопов и оптических систем, сжигающих на расстоянии. Снижению числа предложений вечных двигателей, несомненно, способствовали научная пропаганда и научно-популярная литература. К сожалению, в области оптики такой литературы, достаточно просто и конкретно объясняющей возможное и невозможное в оптике, до сих пор не было, и давно пришла пора направить ум и силы изобретателей на другие, менее безнадежные пути.

Поэтому появление небольшой брошюры проф. Г. Г. Слюсарева, выдающегося оптика-вычислителя, автора фундаментальной «Теории расчета оптических систем», вполне своевременно. В пределах небольшой брошюры Г. Г. Слюсарев мог разъяснить далеко не все парадоксы практической оптики, и многое в ней изложено поневоле коротко и схематично. Потребуются, несомненно, и дальнейшие книги и брошюры, разъясняющие оптические парадоксы, но на сегодняшний день надо приветствовать первую ласточку в этом нужном деле» [2, с. 5—6].

**Еще раз о цели книги.** Добавим несколько слов из предисловия автора к 1-му изданию:

«Области применения оптики умножаются и расширяются с каждым годом. Инженерам, химикам, медикам, биологам, военным специалистам приходится волей-неволей овладевать ее основными принципами и законами. ... Если с практическим знанием элементарных свойств оптических инструментов дело обстоит сравнительно благополучно, то гораздо хуже воспринимаются ее теоретические основы» [2, с. 7]. Отсюда и возникают ошибки, часто весьма тонкие и труднообнаружимые. Чаще всего возможности оптических приборов сильно переоцениваются.

Среди специалистов-неоптиков распространено мнение, что оптика всемогуща, что со световыми пучками можно проделывать все, что угодно: получать любые освещенности (что еще терпимо), любые яркости (что уже противоречит второму началу термодинамики), «превратить любой пучок в параллельный, да еще притом тонкий, как игла, откуда один шаг до недопустимой фантастики некоторых романов»<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Г. Г. Слюсарев имеет в виду роман А. Н. Толстого «Гиперболоид инженера Гарина». Однако заметим, что в 1944 г. лазеров еще не знали, а они сильно изменили наши представления о возможном и невозможном в оптике. Ниже этот вопрос будет рассмотрен специально.

Плохо то, что в обычных учебниках такие неразрывно связанные между собой разделы оптики, как геометрическая оптика, фотометрия и дифракция, преподносятся в виде вполне независимых научных дисциплин. А ведь именно эти науки лежат в основе всех основных свойств оптических инструментов<sup>2)</sup>.

Необходимо ликвидировать вредные последствия такого разделения взаимосвязанных наук. Сделать это не просто, так как стандартная классификация разделов оптической науки стала общепринятой, а ломать сложившиеся традиции достаточно трудно.

Но надо. И Г. Г. Слюсарев решился на первый шаг. Он подчеркивает, однако, что его работа — не систематический курс оптики и даже не дополнительные главы к нему, а изложение некоторых случайно выбранных проблем прикладной оптики. Именно эти проблемы наиболее излюблены горе-изобретателями.

Все рассмотренные примеры объединены одним качеством — невозможностью осуществить заложенные в них идеи. У Г. Г. Слюсарева, однако, нет «оптического пессимизма», он верит в богатые возможности нашей науки.

В предисловии ко 2-му изданию Г. Г. Слюсарев отмечает, что за истекший период «было сделано» много новых «якобы изобретений». Некоторые из них отражены в книге. За это время появились и новые точки зрения, основанные, в частности, на аналогии с радиотехникой. Вместе с тем Г. Г. Слюсарев делает следующее замечание, которое хочется привести полностью.

«После выхода в свет первого издания предлагаемой читателю книги прошло больше двенадцати лет. За такой короткий срок в истории развития древнейшей и доведенной до высокой степени совершенства дисциплины не могло произойти больших и неожиданных перемен, а тем более каких-нибудь заметных перемещений границ, отделяющих «возможное» от «невозможного». Все же появились некоторые новые направления, уже ранее известные, но оставленные без внимания» [2, с. 9].

С основными положениями этого абзаца согласиться нельзя. Да, действительно, оптика — древняя наука, доведенная до высокой степени совершенства. Но 12 лет в наше время — это не такой уж короткий срок. Опыт истории науки учит, что в наше время все науки, и оптика в том числе, развиваются бурно. Разве не произошла в оптике подлинная революция всего

<sup>2)</sup> Эта ошибка характеризует и нашу монографию. Геометрическая оптика в ней вообще не излагается. Оправдание одно — монография посвящена не теории оптических приборов, а изучению в основном законов взаимодействия света и вещества. Помещение в монографию данного раздела, разумеется, не спасает положения.

за 6 лет, с 1900 по 1906 г. (Планк, Эйнштейн)? Разве не произошло коренное изменение представлений в атомной физике и оптике в 1913 г. (Бор)? И разве не были созданы в 1925—1928 гг. основы квантовой механики и квантовой электродинамики? И в тот момент, когда Г. Г. Слюсарев писал свою книгу, уже создавались квантовая электроника и голография. И сейчас оптика изменяется на ходу. И к этому надо быть готовым!

## § 2. СВЕТОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

**Возникновение идеи о сжигании на расстоянии.** Легенда об Архимеде, сжегшем вражеский флот с помощью зеркал, оказалась потрясающее впечатление на многие поколения изобретателей. Эта легенда распространилась особенно широко в средние века. Г. Г. Слюсарев считает, что ее распространял какой-то изобретатель с целью оправдать свои усилия, ссылаясь на авторитет Архимеда. Жан-Баттиста делла Порта, изобретатель «камеры-обскуры», дал нам описание «сжигателя», крайне похожего по идеи на «Гиперболоид инженера Гарина».

Уже тогда многие видные ученые не верили в возможность таких приборов. Кеплер в своей «Диоптрике» опровергает предложение Порта с помощью аргументов, которыми мы пользуемся и сейчас.

Большая роль в популяризации «сжигателей» принадлежит авторам фантастических романов. Это марсиане из романа Г. Уэллса, почти завоевавшие Землю. Это и инженер Гарин из романа А. Н. Толстого. Роман Толстого, несомненно, оказал большое влияние на многих русских изобретателей, пользовавшихся в основном его «идеей». Она казалась правдоподобной, хотя на самом деле ошибочна. «К тому же инженер Гарин сильно позабыл геометрию, путает гиперболоид с параболоидом, не умеет найти фокус последнего и т. д.» [2, с. 12].

Любопытно, что Жюль Верн такой ошибки не сделал. В его романах много оптических приборов, но «сжигателей» нет.

Как во времена Архимеда, так и у многих современных «изобретателей» носителем энергии становится пучок световых лучей с концентрирующим приспособлением.

**Основные положения.** Рассмотрим теперь причины неудач тысяч уже предложенных конструкций сжигания на расстоянии.

Теоретически существование такого «сжигателя» вполне возможно. Обладая мощным источником света и большой оптической системой, можно на любом расстоянии вызывать

концентрацию энергии, достаточную, чтобы загорелось легко-воспламеняющееся вещество.

Эффект нагревания предмета зависит и от источника лучей, и от оптической системы, передающей энергию. Однако при существующих в настоящее время<sup>3)</sup> источниках лучей необходимы совершенно фантастические размеры оптических систем.

Основная идея сжигания на расстоянии хорошо известна всем. Возьмем в солнечный день линзу с большим диаметром  $D$  и малым фокусным расстоянием  $F$ . В фокусе линзы образуется небольшое изображение Солнца. Если относительное отверстие линзы  $D/F$  велико, то можно без труда зажечь кусок бумаги, материи. Но если взять длиннофокусную линзу (очкиковую линзу) в 1/2 диоптрии, то изображение Солнца будет уже на расстоянии  $\sim 2$  м. Его размеры — порядка 2 см. При этом никакого сжигания, разумеется, не будет.

Влияние величины относительного отверстия легко объяснить, если вспомнить некоторые основные положения фотометрии (см. главу 1).

Поток лучей — это носитель некоторого количества энергии. Падая на поглощающее тело, она нагревает его. В стационарном режиме количество энергии, поглощенной телом, будет равно количеству энергии, испускаемой телом в окружающее пространство. Разумеется, исследуемое тело поглощает не всю световую энергию, падающую на него, часть ее отражается. Доля света, отраженного телом по всем направлениям, носит название альбедо  $a$  (иногда говорят — коэффициент альбедо).

Если стационарный режим еще не достигнут, то нагревание тела пропорционально энергии потока, падающего на единицу площади тела. Нагревание тела тем больше, чем меньше площадь, на которой концентрируется поток, и чем больше продолжительность нагревания.

Рассмотрим поток, испускаемый Солнцем. Он равен 2 кал/мин (0,14 Вт) на каждый квадратный сантиметр тела. Если  $a=0$  (черное тело), теплоемкость площадки равна единице, толщина тела равна 1 см, а теплопроводность материала тела бесконечно велика, то площадка нагревается на 120° в час. Черное тело, нагретое до 120°, испускает 0,16 Вт с 1 см<sup>2</sup> своей поверхности. Поэтому солнечные лучи могут поднять температуру всякого тела не более чем до 120°. Для воспламенения сухого дерева нужна температура 500—700°. Эта температура может быть достигнута черным телом, если мощность падающего потока равна 2—5 Вт, т. е. в 20—40 раз больше реальной мощности, испускаемой Солнцем. При этом

<sup>3)</sup> Это было сказано до появления лазеров. К нам мы вернемся в конце главы.

Таблица 5.2.1

Ощущение или воздействие	Интенсивность, кал·см <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>
Солнечный свет летом	0,016
Боль через 3 с	0,23
Нижний предел излучения, достаточный для воспламенения дерева любого вида при длительном воздействии, когда дополнительно к излучению на расстоянии полдюйма от поверхности помещается небольшое пламя	0,3
Нижний предел излучения, достаточный для самовозгорания дерева любого вида после длительного воздействия	0,7
Самовозгорание хлопчатобумажной ткани:	
через 7 с	0,8
через 5 с	1,0
через 3 с	1,3
Самовозгорание толстых дубовых досок:	
через 20 с	1,1
через 10 с	1,3
через 8 с	1,35

нагревание будет продолжаться долго — десятки минут. Для мгновенного воспламенения необходимы мощности в сотни ватт.

Каким же образом можно получить мощность потока, достаточную, чтобы вызвать сжигание легко воспламеняющихся тел на больших расстояниях?

В табл. 5.2.1 [2, с. 16] приведены более подробные сведения о действии излучения разной интенсивности. Все эти данные получены из эксперимента.

Привлечем теперь уже известные нам фотометрические соотношения. На рис. 5.2.1 изображена световая трубка:  $s$  — малая площадка, испускающая энергию,  $ON$  — нормаль к ней,  $s'$  — другая малая площадка,  $OO'$  — нормаль к ней. Световой поток  $\Phi$ , падающий на площадку  $s'$ ,

$$\Phi = (Ls \cos \theta) s' / l^2, \quad (5.2.1)$$

где  $L$  — яркость пучка,  $Ls \cos \theta$  — сила света площадки в направлении  $s'$ , а  $s' / l^2$  — телесный угол световой трубы. Так как сила света  $I$  равна  $d\Phi / d\omega$ , то

$$\Phi = I\omega. \quad (5.2.2)$$

Если источник имеет большие размеры, то общий поток есть сумма всех элементарных потоков.

Действие потока на какой-либо экран, стоящий на его пути, определяется освещенностью  $E = \Phi / s'$ . Приведем примеры. Яркость Солнца в видимой области спектра  $1,2 \cdot 10^5$  сб, обычной дуги —  $1,5 \cdot 10^4$ , «точечной» лампы — до  $2,5 \cdot 10^3$ , нити лам-

пы накаливания — 300—800 сб. Освещенность, вызываемая Солнцем на поверхности Земли, около  $10^5$  лк.

Определим теперь освещенность, достаточную для зажигания легко воспламеняющихся предметов.

Рассмотрим две площадки: одну, освещенную Солнцем, другую — изображением Солнца, получаемым с помощью линзы. Ее диаметр  $D = LL'$  (рис. 5.2.2), фокусное расстояние

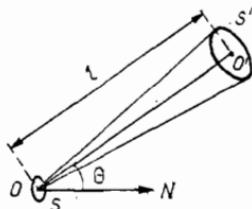


Рис. 5.2.1. Световая трубка

ф. Так как Солнце видно с Земли под углом  $31'$ , то изображение Солнца имеет диаметр

$$d = 2f \operatorname{tg} \frac{31'}{2} = \frac{f}{110}. \quad (5.2.3)$$

Весь поток лучей, попадающий на поверхность линзы площадью  $\pi D^2/4$ , концентрируется в изображении Солнца, площадь которого

$$\frac{\pi}{4} \left( \frac{f}{110} \right)^2.$$

Освещенность  $E_1$  изображения Солнца относительно непосредственной освещенности  $E$  равна

$$\frac{\pi}{4} D^2 / \frac{\pi}{4} \left( \frac{f}{110} \right)^2 = 110 \left( \frac{D}{f} \right)^2. \quad (5.2.4)$$

Опыт показывает, что линза с относительным отверстием  $D/f$ , равным  $1/2$ , достаточно быстро сжигает кусок пробки, сухую щепку и т. д. Но такая линза усиливает радиацию Солнца в  $(110 \cdot 1/2)^2 \approx 3000$  раз.

Таким образом, радиация, позволяющая быстро сжигать предметы, должна быть в 3000 раз больше, чем солнечная радиация на поверхности Земли.

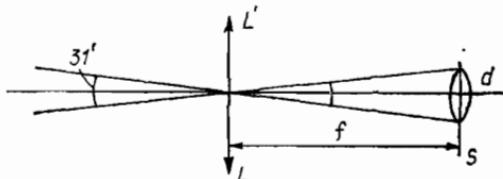


Рис. 5.2.2. Изображение Солнца, даваемое линзой

**Общий случай облучения.** До сих пор рассматривался частный случай — источником света служило Солнце. В более общем случае источником энергии может служить накаленное тело (рис. 5.2.3). Пусть  $O_1O_2$  — источник света,  $K$  — оптическая система,  $O'_1O'_2$  — изображение источника,  $\Phi$  — мощность светового потока, падающего на линзу.

Зная яркость источника света, найдем значение  $\Phi$  в двух частных наиболее реальных случаях:

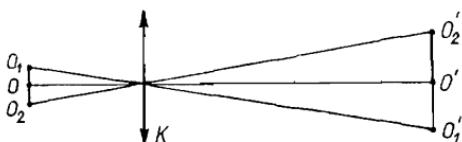


Рис. 5.2.3. Изображение источника света, находящегося на конечном расстоянии

1) сила света постоянна по всем направлениям<sup>4)</sup>,

2) яркость источника света постоянна по его поверхности и по всем направлениям<sup>5)</sup>. Предположим также, что источник света находится на оси оптической системы, проецирующей его изображение на поражаемую цель (рис. 5.2.4). Пусть  $I$  — сила света источника,  $\varphi$  — угол, образованный с осью лучом через край линзы. Телесный угол, под которым видна линза из точки  $O$ , определяется площадью поверхности  $Q$ , вырезанной конусом крайних лучей на сфере с радиусом, равным единице, и центром в точке  $O$ . Эта площадь равна  $4\pi \sin^2(\varphi/2)$ .

В первом случае поток, излучаемый источником и падающий на оптическую систему, равен произведению силы света  $I$  на телесный угол:

$$\Phi = I \cdot 4\pi \sin^2(\varphi/2). \quad (5.2.5)$$

Во втором случае постоянна яркость  $L$ , а сила света изме-

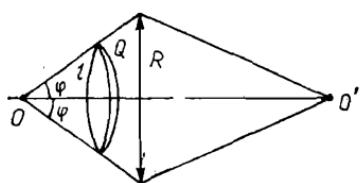


Рис. 5.2.4. К расчету светового потока

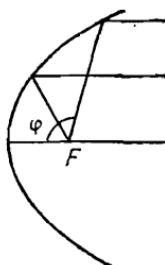


Рис. 5.2.5. Апертурный угол параболического зеркала

<sup>4)</sup> К этому случаю близки точечные лампы.

<sup>5)</sup> К этому случаю относится Солнце и его изображение, кратер дуги...

няется по закону  $I = Ls \cos \varphi$ , где по-прежнему  $s$  — площадь источника. Нетрудно получить выражение для потока

$$\Phi = \pi L s \sin^2 \varphi, \quad (5.2.6)$$

При малых углах  $\varphi$  обе формулы дают одинаковый результат:

$$\Phi = \pi I_0 \varphi^2 = \pi I_0 (R/l)^2 = sE, \quad (5.2.7)$$

где  $I_0$  — сила света в направлении оси,  $R$  — радиус отверстия линзы оптической системы,  $l$  — ее расстояние от источника,  $s$  — площадь линзы, а  $E$  — освещенность, вызываемая источником на поверхности линзы.

Однако случай малых углов  $\varphi$  не интересен, так как при малых размерах линзы световой поток не может быть значительным.

У прожекторных зеркал угол  $\varphi$  велик (рис. 5.2.5). В этом случае формулы (5.2.5) и (5.2.6) дают различные результаты. Первая из этих двух формул дает большие значения  $\Phi$ . Например, при  $\varphi = 90^\circ$ , согласно (5.2.5),  $\Phi = 2\pi I$ . В то же время, согласно (5.2.6),  $\Phi = \pi I$ . Различие в два раза.

С помощью глубоких оптических систем (например, прожекторных зеркал) можно, согласно (5.2.5) и (5.2.6), уловить значительную часть всей мощности источника света. Именно это, очевидно, и наводит на мысль о возможности сконцентрировать мощный поток на далеко расположеннем предмете и сжигать его.

Однако при концентрации потока мы наталкиваемся на непреодолимое препятствие — рассеяние света.

**Формула Манжена—Чиколова.** В оптическую систему поступает мощный поток света. Остается только превратить его в параллельный или слабо сходящийся пучок. Кажется, так просто. Стоит только рассчитать и изготовить хорошую оптическую систему.

Но не тут-то было. Здесь начинают действовать законы чрезвычайно большой общности, являющиеся следствием закона сохранения энергии. Это — законы, управляющие распределением лучистой энергии на больших расстояниях от источника.

Наибольшая концентрация лучей, прошедших через оптическую систему, возникает в тех точках пространства, где образуется изображение источника света. Размеры изображения легко вычислить с помощью известного закона геометрической оптики

$$nl \sin \varphi = n'l' \sin \varphi'. \quad (5.2.8)$$

Здесь  $n$  и  $n'$  — показатели преломления сред, в которых находится предмет и его изображение;  $l$  и  $l'$  — их геометрические

размеры;  $\phi$  и  $\phi'$  — углы, под которыми оптическая система видна из центра предмета и центра изображения.

Уравнение (5.2.8) иногда [3] называют законом Лагранжа—Гельмгольца, хотя впервые оно было получено, по-видимому, Клаузиусом в 1864 г. [5]. Как уже сказано, оно следует из закона сохранения энергии. Закон Лагранжа—Гельмгольца справедлив для любой оптической системы, как угодно составленной из любых оптических деталей. Именно в этом законе «таится,— по мнению Г. Г. Слюсарева,— гибель всех надежд на идеальную концентрацию лучевой энергии»<sup>6)</sup>.

Найдем освещенность изображения, создаваемого оптической системой. Допустим, что потерями энергии в самой оптической системе можно пренебречь; вся мощность потока, падающего на систему, достигнет плоскости изображения и распределится по ее площади. Рассмотрим сперва один малый элемент источника. Пусть он имеет форму кружка с радиусом  $r$  (его площадь  $\pi r^2$ ). Пусть  $r'$  — радиус круга изображения. Согласно (5.2.8),

$$nr \sin \phi = n'r' \sin \phi'. \quad (5.2.9)$$

Во всех практических случаях  $n=n'=1$  и, следовательно,

$$r \sin \phi = r' \sin \phi'. \quad (5.2.10)$$

Освещенность элемента изображения равна

$$E' = \frac{\Phi'}{s'} = \frac{\Phi}{\pi r'^2}, \quad (5.2.11)$$

где  $\Phi$  — исходный поток,  $\Phi'$  — выходящий поток, т. е. поток, падающий на изображение площадки  $s$ . Очевидно, что при отсутствии потерь  $\Phi'=\Phi$ .

Подставляя вместо  $r'$  его значение из закона Лагранжа—Гельмгольца, получаем

$$E' = \frac{\Phi}{\pi r^2} \left( \frac{\sin \phi'}{\sin \phi} \right)^2. \quad (5.2.12)$$

Выразим теперь поток  $\Phi$  через яркость источника света и угол охвата  $\phi$ . Допустим, что яркость  $L$  постоянна. Тогда значение  $\Phi$  определяется формулой (5.2.6) (сила света  $I_0$  равна  $L\pi r^2$ ):

<sup>6)</sup> В книгах [1, 2] приведено два доказательства закона (5.2.8). Сперва это сделано в рамках обычной геометрической оптики, а затем (независимо) с помощью принципа Ферма, учитывавшего волновые представления (подробнее см. главу 6, § 5). В главе 6 изложена также точка зрения И. И. Собельмана, отрицающего эти утверждения.

В литературе соотношения (5.2.8) называют по-разному, чаще всего условием синусов (Борн и Вольф [5]), а иногда условием синусов Аббе (А. И. Тудоровский).

$$\Phi = L\pi r^2 \cdot \pi \sin^2 \varphi, \quad (5.2.13)$$

$$E' = \pi L \sin^2 \varphi'. \quad (5.2.14)$$

Ради общности нужно учесть потери света в оптической системе. Охарактеризуем их множителем  $k$  ( $k < 1$ ). Тогда

$$E' = k\pi L \sin^2 \varphi'. \quad (5.2.15)$$

Угол  $\varphi'$  для удаленных предметов всегда мал. Поэтому

$$\sin \varphi' = D/2A, \quad (5.2.16)$$

где  $D$  — диаметр выходного зрачка системы, а  $A$  — расстояние от оптической системы до цели. С учетом (5.2.16)

$$E' = kLs/A^2, \quad (5.2.17)$$

где  $s = \pi D^2/4$  — площадь выходного зрачка оптической системы. Эта формула носит название формулы Манжена—Чиколова<sup>7)</sup>.

Приведем численный пример. Имеется зеркало диаметром 2 м. В фокусе зеркала находится дуга высокой интенсивности с яркостью  $L = 10^5$  сб. Освещенность одного квадратного сантиметра, которая создается зеркалом на расстоянии 1 км, равна  $\frac{100000\pi (100)^2}{(100000)^2} k$ .

Умножая эту величину на  $10^4$ , получаем значение освещенности, выраженное в люксах. Таким образом,

$$E' = k \cdot 3 \cdot 10^3 \text{ лк.}$$

Несмотря на большую мощность источника света и высокую эффективность оптической системы, такая освещенность мала, в 30 раз меньше той, которая создается Солнцем на поверхности Земли. При этом здесь не учтены потери в оптической системе и атмосфере.

**Некоторые итоги и выводы.** Из формулы Манжена—Чиколова следует, что освещенность цели не зависит от размера источника света. Увеличение размера источника может привести только к увеличению размеров поражаемой цели, но не ее освещенности. Освещенность цели обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Формула Манжена—Чиколова однозначно показывает, что при заданном источнике света и заданном расстоянии до цели

<sup>7)</sup> Манжен (1825—1885 гг.) — французский военный инженер, известный своими работами по маякам, прожекторам и другим осветительным приборам дальнего действия.

В. Н. Чиколов (1845—1898 гг.) — русский военный инженер, автор ряда оригинальных работ по светотехнике. Именно ему принадлежит первый вывод формулы (5.2.17). Однако в зарубежной литературе она известна под названием формулы Манжена.

есть только один способ повысить освещенность цели — увеличить поперечные размеры оптической системы.

Г. Г. Слюсарев приводит такой пример: рассчитаем размеры оптической системы, которые необходимы для получения достаточно сильного эффекта (например, быстрого воспламенения таких предметов, как бумага). Мы видели раньше, что подобный эффект вызывает лупа с относительным отверстием 1 : 2, если источником света служит Солнце. Из (5.2.14) следует, что при данном источнике угол  $\phi'$  определяет освещенность цели. Отсюда вывод: выходное отверстие оптической системы, направляющей лучи Солнца на цель, должно быть равным не менее половины расстояния до цели — только в этом случае угол  $\phi'$  будет иметь то же значение, что и в опытах с лупой.

Результаты теории полностью соответствуют опыту. Еще в 1747 г. французский натуралист (!) Бюффон построил зажигательный прибор, составленный из 168 стеклянных зеркал длиной 15 см и шириной 20 см. Зеркала держались общей оправой, которая могла двигаться во все стороны. Кроме того, каждое зеркало имело свою оправу и могло отдельно от остальных вращаться также во все стороны. В результате можно было 168 изображений Солнца послать в одно и то же место. Размер изображения Солнца составлял 40 см. На расстоянии 47 м зажглась сосновая смолистая доска. На процедуру зажигания требовалось несколько минут. В данном случае освещенность цели была в 36 раз больше, чем освещенность поверхности Земли, вызываемая Солнцем в обычных условиях.

Мощность потока достигала в этом опыте 5 Вт на 1 см<sup>2</sup> и могла поднять температуру до 700°. Эквивалентное зеркало было бы видно из цели под углом  $\phi' = 3^\circ$ . Для моментального воспламенения необходима освещенность в сотни раз большая, значение  $\phi'$  должно равняться 30°.

«Но представим себе, — пишет Г. Г. Слюсарев, — невероятное: противник не мог помешать постройке и установке зеркала диаметром в 1—2 км, причем постройка происходит у него на глазах, совсем близко (несколько километров) от него. Обезвредить это орудие не представляет никакого труда. Достаточно окрасить в белый цвет или покрыть алюминиевой или иной фольгой все легко сгорающие предметы, представляющие какую-нибудь ценность, чтобы всякая опасность пожара была исключена. Белая краска отражает от 70 до 90% падающей на нее световой энергии, и тот остаток, который поглощается ею, уже не представляет опасности...»

Все остальные практически удобные земные источники имеют меньшую яркость, чем Солнце; чтобы их применение могло привести к ощутимому результату, необходимы еще большие размеры оптической системы» [2, с. 30].

В книге Г. Г. Слюсарева рассматриваются еще некоторые «проблемы сжигания». Мы будем кратки. Прежде всего об источниках лучей. Если говорить о стационарном режиме, то по интенсивности свечения с Солнцем сравнивается примерно мощная электрическая дуга<sup>8)</sup>. В лабораторных условиях можно получить, конечно, значительно большие яркости, например, при взрыве проволочки, через которую проходит сильный ток. Но такие вспышки делятся несколько стотысячных секунд и излучают ничтожную энергию. Очень высокие яркости имеют импульсные лампы — в сотни раз превосходящие яркости Солнца. Но они также кратковременны и усредненная яркость невелика.

Разумеется, подчеркнул Г. Г. Слюсарев, сейчас уже существуют атомные и водородные бомбы, яркость их очень велика, но они «действуют» и без оптики.

Техника движется вперед, источники света совершенствуются. Этому совершенствованию нет предела. Но перспектив для сжигания у источников света типа прожекторов все же нет. «Принимая за величину диаметра оптической системы 2 м и 1 км для расстояния до поражаемой цели при условии получения на цели вышеупомянутой освещенности, нам придется усилить яркость источника в квадрат отношения диаметров 500/2, т. е. в  $(250)^2$  или 60000 раз!» [2, с. 32]. Сомневаться в этих рассуждениях могут, по мнению автора (Г. Г. Слюсарева), только те, кто сомневается в основных принципах природы. «Еще не пришло время для таких приборов: оно придет только тогда, когда будут найдены совершенно новые источники света, в десятки и сотни тысяч раз мощнее современных» [2, с. 36].

Так заканчивается первая глава книги: «О возможном и невозможном в оптике». Напомним, что эти рассуждения относятся к 1957 г.

**Возможно ли лазерное оружие?** Прошло более 10 лет, и Г. Г. Слюсарев в своем докладе [3] вновь вернулся к поставленному вопросу. Что же нового возникло за эти годы?

«Прежде всего появились лазеры. Создаваемый популярными журналами шум вокруг этого замечательного открытия привел кое-кого из изобретателей к мысли, что под сомнение поставлены основные положения оптики (особенно относящиеся к энергетике). На самом деле лучи, выходящие из лазеров, обладают такими же свойствами, как и лучи, излучаемые любым источником света, и подчиняются как законам преломления, так и принципу Гюйгенса—Френеля. Необычно большая яркость этих лучей объясняется тем, что световой поток, выходящий из лазера, сам по себе велик и сосредоточи-

<sup>8)</sup> Само Солнце как источник света для рассматриваемых целей мало пригодно, так как оно перемещается по небесному, не светит ночью и т. д.

вается в весьма малом телесном угле порядка квадратных секунд или минут, в то время как для обычных источников света поток рассеивается в весьма значительном телесном угле. Поэтому лазерные пучки обладают яркостью на 5—8 порядков больше, чем обычные. Кроме того, эта яркость концентрируется в весьма узком спектральном интервале<sup>9)</sup>, а это приводит к тому, что спектральная яркость может превышать таковую же самых мощных известных источников на 10—12 и более порядков. Однако «пробивающая» сила или точнее, освещенность, создаваемая лазерами на больших расстояниях, не так уж велика, коэффициент полезного действия их низок, поэтому особо больших надежд в отношении «сжигания на расстоянии» больших объектов возлагать на лазеры нельзя, по крайней мере, до тех пор, пока не будут найдены пути для создания лазеров, обладающих одновременно большой мощностью и чисто дифракционными угловыми размерами выходящих пучков» [3, с. 7].

Г. Г. Слюсарев и прав и неправ. Конечно, лазеры — это источники света, работающие на основе привычных нам законов оптики. Но они действительно совершаются и совершаются чрезвычайно быстро. И даже опасно для судеб человечества.

#### ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 5

1. Слюсарев Г. Г. О возможном и невозможном в оптике. 1-е изд. М.; Л., 1944.
2. Слюсарев Г. Г. О возможном и невозможном в оптике. 2-е изд., перераб. М., 1957. 178 с.
3. Слюсарев Г. Г. // Материалы 22-х чтений им. академика Д. С. Рождественского: Тр. Государственного оптического института им. С. И. Вавилова, 1968. Т. 36, вып. 166. С. 6—17.
4. Мирошников М. М. // Там же. С. 3—4.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., 1973.

---

<sup>9)</sup> Данное утверждение справедливо не для всех лазерных источников.—Б. С.

## 6

## § 1. ОПТИЧЕСКИЕ НЕБЫЛИЦЫ

Здесь мы будем излагать содержание книги Слюсарева значительно короче, так как оно выходит за рамки нашей монографии и связано в основном с проблемами геометрической оптики. Кавычками выделяются цитаты из [1].

Иногда думают, что оптические системы позволяют преобразовать пучок любого строения в другой пучок любого, наперед заданного строения. Этим «грешат» даже высококвалифицированные специалисты. Пучком лучей называется здесь совокупность лучей, заполняющих все конусы, вершины которых лежат на поверхности источника света (или его изображения) и общим основанием которых служит (входной или выходной) зрачок оптической системы. Поток энергии для элементарного пучка равен

$$\Phi = L s \cos \theta \cdot \omega, \quad (6.1.1)$$

где  $L$  — яркость площадки  $s$ ,  $\theta$  — угол между нормалью к площадке и направлением луча,  $\omega$  — телесный угол.

Выпишем также закон Лагранжа—Гельмгольца (5.2.8) при  $n=n'$ :

$$l \sin \varphi = l' \sin \varphi'. \quad (6.1.2)$$

Здесь  $l$  и  $l'$  — геометрические размеры тела и его изображения,  $\varphi$  и  $\varphi'$  — углы, под которыми видна оптическая система из центра предмета и центра изображения. Ту же зависимость можно написать в виде

$$s \sin^2 \varphi = s' \sin^2 \varphi', \quad (6.1.3)$$

где  $s$  — некоторая площадка, а  $s'$  — ее изображение.

При малых  $\varphi$  и  $\varphi'$

$$s \omega = s' \omega'. \quad (6.1.4)$$

Здесь  $\omega$  и  $\omega'$  — телесные углы, ограничивающие сопряженные пучки.

Согласно (6.1.4), закон Лагранжа—Гельмгольца формулируется в виде

$$\frac{\sin^2 \varphi}{\omega} = \frac{\sin^2 \varphi'}{\omega'}.$$

Пусть некоторый световой пучок вырезает на плоскости, перпендикулярной оси пучка, площадку  $s$ , а все другие лучи пучка ограничены телесным углом  $\omega$ . Тогда произведение  $n^2 s \omega$  будет постоянно вдоль всего пучка в любой среде и для любой системы.

Формулы (6.1.1) и (6.1.4) — это выражения закона сохранения энергии. В силу своей общности они позволяют доказать невозможность многих заманчивых и якобы легко достижимых перспектив.

**Параллельные пучки.** «Какие грандиозные возможности вытекают из одного только существования параллельных пучков, несущих хотя бы ничтожную энергию! С помощью телескопических систем (например, астрономических труб) можно было бы концентрировать эти пучки в тонкие, как игла, лучи, и задача о сжигании на расстоянии была бы решена. Принципиальная схема осуществления этой идеи показана на рис. 6.1.1, где с помощью трех телескопических систем можно добиться превращения параллельного пучка в «иглу». Таким образом (в принципе) решают ее немало изобретателей и, в частности, герой известного романа А. Н. Толстого «Гипербо-

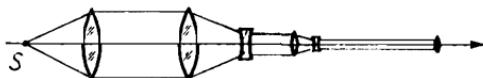


Рис. 6.1.1. Один из проектов «сжигателей на расстоянии»

лоид инженера Гарина». О параллельных пучках так много говорят в курсах оптики, они играют такую видную роль в объяснении свойств оптических систем, что существование таких пучков в реальных условиях может с первого взгляда и не возбуждать сомнений» [1, с. 39—40].

Вот к чему приводит, добавим мы от себя, неправильно организованная система преподавания. Параллельные пучки — это только вспомогательное средство для описания тех или иных свойств оптических систем. Абсолютизация этого средства, разумеется, недопустима и при его неумеренном применении может привести к серьезным ошибкам.

Сказанное относится не только к параллельным пучкам, но и ко многим другим широко распространенным понятиям: точечный источник света, строго монохроматическая волна, однородная среда, фазовая скорость света и т. д. и т. п. В процессе выводов и рассуждений нужно всегда помнить об условности таких понятий, выяснить границы их применимости и связанные с ними погрешности. Этому необходимо учить в высшем учебном заведении. Вряд ли допустимо, чтобы молодые научные работники каждый раз приходили к таким выводам самостоятельно, ценой многих проб и больших ошибок.

Вернемся, однако, к тексту книги Г. Г. Слюсарева, к параллельным пучкам.

Параллельных пучков вообще не существует, но если бы они существовали, то не могли бы нести никакой энергии. Параллельные лучи появляются, если установить светящуюся точку в фокусе оптической системы. Но для этого необходимо соблюдение трех условий.

1. Светящаяся точка не должна иметь размеров. Однако такая точка не имеет энергии и не может ее излучать.

2. Оптические системы должны быть идеальными, т. е. не иметь aberrаций. Такие системы не существуют.

3. Не должны проявляться явления дифракции. Но устранить дифракцию полностью невозможно.

Поток энергии характеризуется формулой (6.1.1). Если лучи параллельны, то  $\omega=0$ . Для них  $\Phi=0$ <sup>1)</sup>.

**Концентрирующий конус.** При конструировании регистрирующих приборов возникает задача максимальной концентрации световой энергии. Для ее решения иногда прибегают к оптическим системам особого рода, не дающим изображения. Примером такой системы служит отражательный конус (рис. 6.1.2).

С первого взгляда кажется, что пучок лучей, падающий на основание конуса  $O$ , после многократных отражений рано или поздно выходит через отверстие  $O'$ , которое может быть как угодно мало.

Анализ показывает, что это иллюзия. На рис. 6.1.3 показан реальный ход лучей. С каждым отражением луч все медленнее приближается к выходу, потом начинает двигаться в обратную сторону и выходит через основание  $O$ . Через отверстие

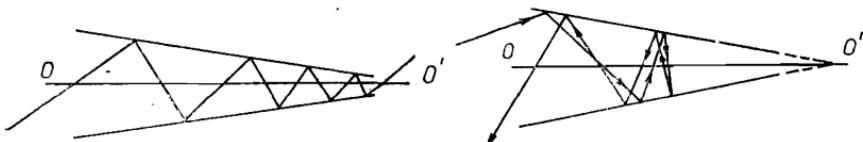


Рис. 6.1.2. Концентрирующий конус

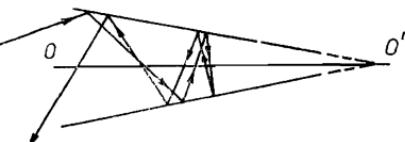


Рис. 6.1.3. Ход лучей внутри меридионального сечения «концентрирующего конуса»

<sup>1)</sup> Эта точка зрения общепринята. Однако у нее имеются и противники. Один из коллег автора, читая рукопись книги, сделал следующее замечание: «Плоская волна несет энергию. Противоположное мнение — надуманный парадокс. В плоской волне яркость есть функция угла  $\omega$ ; это б-функция. Предположение о конечности яркости незаконно. По мере уменьшения  $\omega$  в (6.1.1) яркость увеличивается, значение потока сохраняется неизменным».

Нам кажется, что этот вопрос подлежит специальному обсуждению. Сомнению может подвергаться даже то, что кажется очевидным.

$O'$  выходит только небольшая часть энергии. Чем меньше величина  $O'$ , тем меньше мощность выходящего потока. Существуют, однако, случаи, когда применение концентрирующих конусов целесообразно.

**Оптическое усиление по всем направлениям.** Пусть какое-либо тело (корабль, самолет и др.) испускает электромагнитное излучение. Так как тело находится далеко, а его сигналы слабы, то их необходимо усилить. Эту задачу хорошо решает простая зрительная труба (рис. 6.1.4). На рисунке  $O_1$  — объектив,  $O_2$  — окуляр,  $P$  — выходной зрачок системы, т. е.

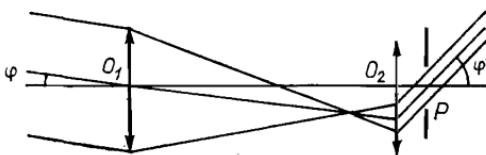


Рис. 6.1.4. Ход лучей в телескопической системе

изображение объектива, создаваемое окуляром. Приемник излучения ставится в выходном зрачке.

Предположим, что телескопическая система  $O_1O_2$  имеет угловое увеличение  $\gamma = \phi'/\phi$ . Линейное увеличение равно  $1/\gamma$ , диаметр выходного зрачка в  $\gamma$  раз меньше диаметра объектива.

Вся энергия, попадающая на объектив, сосредоточивается затем на выходном зрачке, ее плотность в  $\gamma^2$  раз больше. Обычно говорят, что усиление равно

$$Y = \gamma^2. \quad (6.1.5)$$

Однако за достигнутый успех необходимо чем-то расплачиваться. «Усовершенствование в одном отношении в оптике нередко приводит к тому, что мы должны поплатиться ухудшением в другом отношении» [1, с. 52].

В данном случае мы выиграли в усилении за счет другого важного свойства оптической системы — угла ее поля зрения. Это прямое следствие закона Лагранжа—Гельмгольца, закона, ограничивающего возможности оптических систем при преобразованиях световых пучков. Без усиления угол охвата (поля зрения) приемного устройства очень велик, теоретически близок к  $180^\circ$ . Но как только впереди приемного устройства поставлен оптический усилитель, угол охвата резко уменьшается. Простой расчет показывает [1], что

$$\sin \varphi_{\max} = 0,7 / \sqrt{Y}. \quad (6.1.6)$$

Если усиление  $Y$  равно 100, то  $2\varphi_{\max} = 8^\circ$ .

Системы с большим усилением по всем направлениям и одновременно с большим полем зрения невозможны.

**Прохождение световых потоков через узкое отверстие.** Мы уже отмечали, что закон Лагранжа—Гельмгольца есть форма закона сохранения энергии, выраженного с помощью характеристик оптических систем. Его можно назвать законом постоянного потока. Он прост и очевиден. И тем не менее этот закон часто не учитывают даже специалисты. Вот пример —

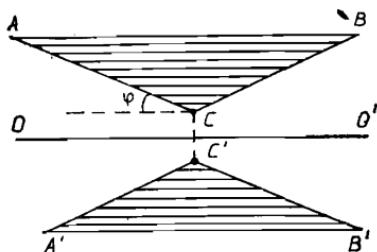


Рис. 6.1.5. Пропускание светового потока через тело вращения

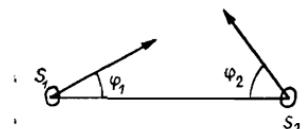


Рис. 6.1.6. Пропускание светового потока через узкое отверстие

попытка решить важную светотехническую задачу о пропускании максимально возможной световой энергии через определенное отверстие.

На рис. 6.1.5  $ABC$  — сечение тела вращения с осью симметрии  $OO'$ . В свободном промежутке (незаштрихованная часть) можно пропустить световой поток. Спрашивается: какова максимально возможная величина потока?

Интересующий нас поток равен произведению площади круга диаметром  $CC'$  на яркость источника  $L$  и на квадрат апертурного угла  $\phi$ :

$$\Phi = \pi L \frac{CC'^2}{4} \phi^2. \quad (6.1.7)$$

Где бы ни располагался источник света, нельзя получить поток, превышающий (6.1.7). Для получения максимального потока нужно обеспечить с помощью конденсора заполнение шейки  $CC'$  изображением источника света и апертурный угол  $\phi$ .

Другая важная светотехническая задача формулируется следующим образом. Источник света (например, круглый) излучает свет в телесный угол с апертурой  $\phi_1$  (рис. 6.1.6). Требуется пропустить весь этот поток с помощью оптической системы через отверстие  $s_2$  (таким отверстием часто бывает рабочая поверхность приемника света).

«У большинства специалистов, сталкивающихся впервые с этой задачей, создается впечатление, что с помощью достаточ-

но сложной системы зеркал и линз всегда можно «пропустить» через  $s_2$  любой поток и что вся трудность задачи сводится к построению такой оптической системы, которая, улавливая все лучи, исходящие из  $s_1$ , направляла бы их через  $s_2$ » [1, с. 52]. (Г. Г. Слюсарев всю жизнь работал со специалистами по вычислительной оптике, и он хорошо знает, что говорит.) «С первого взгляда кажется, что такую систему, хотя может быть и очень сложную, всегда придумать можно. Все прекрасно знают о законе Лагранжа—Гельмгольца, но многие, помня элементарное его доказательство, приведенное в большинстве курсов геометрической оптики, полагают, что закон справедлив для центрированных регулярных оптических систем и при том для сопряженных плоскостей. Таким образом, остается какая-то надежда, что этот закон можно обойти» [1, с. 52—53].

И здесь вновь ссылка на недостатки учебников. В них почему-то не говорится главное: закон Лагранжа—Гельмгольца есть принцип постоянства потока, весьма общий, а не частный закон природы.

Нетрудно показать, что через заданное отверстие нельзя пропустить любой поток. Допустим, что яркость источника во всех направлениях одинакова (закон Ламберта). Поток от источника с площадки  $s$  равен

$$\Phi = Ls \cdot \sin^2 \varphi_1. \quad (6.1.8)$$

Допустим, что оптическая система, проецирующая источник  $s_1$  на отверстие  $s_2$ , не имеет потерь. Тогда поток, проходящий через  $s_2$ , определяется аналогичной формулой:

$$\Phi = Ls_2 \cdot \sin^2 \varphi_2. \quad (6.1.9)$$

Отсюда следует

$$\sin \varphi_2 = \sqrt{s_1/s_2} \sin \varphi_1. \quad (6.1.10)$$

Если при заданной площади  $s_2$

$$\sqrt{s_1/s_2} \sin \varphi_1 > 1, \quad (6.1.11)$$

то угол  $\varphi_2$  не существует. Это означает, что должно удовлетворяться условие

$$\sqrt{s_1/s_2} \sin \varphi_1 \leq 1. \quad (6.1.12)$$

Через отверстие  $s_2$  можно пропустить лишь часть потока, исходящего от источника  $s_1$ .

Как все просто и ясно. Но «специалисты» тем не менее ошибаются.

**«Огнеопасность оптических деталей и стеклянных изделий.** Оптические системы часто наделяют свойствами, которы-

ми они на самом деле не обладают. Одно из них огнеопасность. Довольно распространено мнение (даже среди пожарников), что иногда опасны графины, бутылки..., которые якобы могут вызвать пожары и взрывы. Отсюда излишние, иногда дорогостоящие, предосторожности<sup>2)</sup>.

Представим себе правильную картину. Как было показано в главе 5, возгорание наиболее легко воспламеняющихся предметов требует превышения концентрации солнечных лучей по крайней мере в 50—100 раз. Далеко не всякая линза способна к такой концентрации лучей. Требуется относительное отверстие порядка 1/10 и выше; при этом диаметр линзы (или ее фокусное расстояние) должен быть таким, чтобы изображение Солнца было достаточно велико — несколько миллиметров в диаметре. Фокусное расстояние должно быть порядка 20 см и выше.

Необходимо отметить, что в принципе при больших концентрациях лучей (порядка тысяч и десятков тысяч) диаметры изображения Солнца достаточны для воспламенения (хотя чаще всего возникает не загорание, а тление). Но для того чтобы возникла концентрация света, необходимая для возгорания, расстояние между линзой и объектом, могущим загореться, должно быть вполне определенным, равным фокусному расстоянию линзы.

Итак, для возгорания необходимо одновременное выполнение трех условий: наличие положительной линзы с высоким относительным отверстием; наличие вполне определенного расстояния между линзой и объектом; легкая воспламеняемость объекта.

Вероятность того, что все эти условия будут выполняться одновременно, близка нулю. Зажигательные свойства бутылок, графинов... малы. В книге [1] эти выводы подробно пояснены на примере бутылей, наполненных жидкостью, пузырьков в стекле, а также бликов Солнца, возникающих при отражении от стеклянных предметов.

Вместе с тем высказывается мысль о возможном практическом использовании солнечных лучей для нагрева предметов. Такими солнечными печами успешно занимался еще М. В. Ло-

<sup>2)</sup> Слюсарев привел здесь выдержку из распространенного учебника по противопожарной обороне (Шварц. Пожары и взрывы: Пер. с нем.):

«Все сконцентрированные линзой в одном пункте лучи могут в короткое время (несколько минут) вызвать пожар. Такую концентрацию солнечных лучей могут произвести все стеклянные предметы, действующие как оптические линзы, например: стеклянные бутыли, шары, сосуды, наполненные и пустые, водомерные стекла, стекла для очков (надо же додуматься.—Б. С.), линзы оптических и фотографических аппаратов, стеклянная черепица), а также и все стеклянные предметы, содержащие пузырьки воздуха, могут играть такую же роль.

Особенно опасной оказалась стеклянная черепица, содержащая пузырьки воздуха. Вставленная в крышу амбара или кладовой, она может вызвать воспламенение сена, соломы и различного хлама».

моносов. В настоящее время техника гелиоустановок получила большое развитие и она перспективна для решения самых разнообразных задач.

**Превращение рассеянного света в направленный.** Этот вопрос для нас особенно важен; его необходимо осветить подробнее. Дело в том, что точка зрения Г. Г. Слюсарева не выдержала испытания временем. Все сказанное им в работе [1] верно, кроме конкретного вывода. Создание лазеров и открытие явления обращения волнового фронта показали, что в некоторых ситуациях рассеянный свет может превращаться в направленный.

Для начала приведем почти полностью § 6 книги [1]. В данном случае сокращения вряд ли целесообразны. Очень важно, в частности, строгое определение самих понятий: направленный свет и рассеянный свет. С ними мы встречаемся здесь впервые. Во многих учебниках оптики, как правило, описываются свойства направленных световых пучков. Понятие рассеянного света даже не вводится. А в жизни мы встречаемся чаще всего именно с рассеянным светом.

«В большинстве приложений оптической техники приходится иметь дело с источниками света, излучающими рассеянный свет. Если эти источники слабы, то естественно пытаться изменить их излучение таким образом, чтобы увеличить его в каком-нибудь направлении, уменьшая в другом. Такими источниками являются флуоресцирующие экраны, применяемые в телевидении, рентгеноскопии и рентгенографии. Точно так же соблазнительно увеличить яркость проектируемых на экран эпизоптическими приборами предметов, освещаемых посторонними источниками и отражающих более или менее диффузно, а следовательно, с малой яркостью.

Если бы удалось с помощью оптической системы захватить рассеянный свет и затем направлять его в определенный телесный угол, задача была бы решена. И не раз делались предложения покрывать рассеянно-излучающую поверхность сеткой микроскопических линз в надежде на то, что линзы соберут рассеянные лучи в узко направленные яркие пучки. Такие предложения естественны и понятны. С одной стороны, их вызвала аналогия с некоторыми специальными экранами, обладающими направленной яркостью, т. е. отражающими падающую на них световую энергию преимущественно внутри сравнительно узкого телесного угла. С другой стороны, как при других изобретениях из области оптики, сыграло свою роль прилагательное, обычно связываемое со словом «линза» и совершенно неправильно характеризующее её действие — «собирательная». Действие такой линзы обычно представляется таким, как показывает рис. 6.1.7, *a*, и создается впечатление, что после преломления лучи выходят узкими «направленными» пучками.

Определим точнее слова «идеально рассеивающий» и «направленный», так как здесь имеет место некоторая неопределенность.

Идеально рассеивающим источником называется источник, каждая точка которого излучает по закону Ламберта, т. е. по всем направлениям с одинаковой яркостью; кроме того, яркость всех точек его поверхности одинакова. Если поверхность источника не излучает по указанному закону, он является

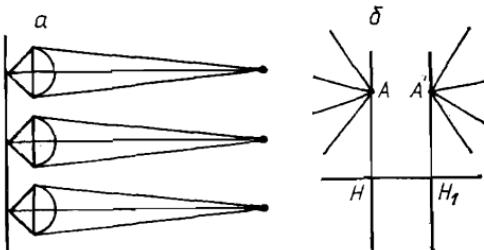


Рис. 6.1.7. Неудачная попытка превращения рассеянного света в направленный

направленным. Эта направленность тем сильнее, чем быстрее происходит падение яркости по мере увеличения угла между направлением луча и направлением нормали к поверхности в данной ее точке.

В вопросе о направленности пучков существенным, даже основным является размер источника и его расстояние до точки  $S$ , по отношению к которой определяется направленность. Если источник мал, а точка  $S$  расположена далеко от него, источник представляет собой по отношению к этой точке точечный источник света, и пучок является предельно направленным, так как из точки  $S$  выходит лишь весьма узкий пучок. Если площадь источника бесконечно велика, предположим для наглядности, что источник плоский, то все пространство с одной стороны источника является идеально рассеивающим, так как на всякую точку этого пространства падают лучи из всех точек источника с одинаковой яркостью, и она сама превращается в идеально рассеивающий источник. Все точки пространства, расположенные на плоскости, параллельной такому источнику, находятся в одинаковых условиях, и поэтому любая плоскость и любая поверхность являются идеально рассеивающими поверхностями.

Рассмотрим теперь воздействие оптической системы на распределение яркости в пучках, на направленность пучков. Пусть  $H$  и  $H_1$  — главные плоскости оптической системы (рис. 6.1.7, б). На произвольную точку  $A$  на главной плоскости  $H$  падают лучи со всех точек источника, следовательно, со всех направлений. Каждой точке  $A$  соответствует точка  $A'$ ,

которая, изображая точку  $A$  с линейным и угловым увеличениями, равными единице, излучает точно так же, как и точка  $A$ . То же происходит со всеми точками плоскости  $H$ ; плоскость  $H_1$  представляет собой такой же идеально рассеивающий источник света, как и плоскость  $H$ . Таким образом, присутствие оптической системы ничего не изменило в структуре излучения источника света; она лишь несколько ослабляет яркость пучков, так как часть световой энергии отражается, часть поглощается.

Этот вывод остается справедливым независимо от типа и сложности оптической системы, так как он опирается на свойства, общие всем оптическим системам» [1, с. 47—50].

Так обстоит дело с идеально рассеянным светом, если источник имеет бесконечно большие размеры. Но этот случай представляет мало интереса. Гораздо важнее случай источников конечной величины, так как он часто встречается на практике.

«Однако легко показать, что последний случай практически сводится к первому. Если источник имеет малые размеры, а оптическая система находится далеко от него, то лишь небольшая часть энергии, излучаемой источником, попадает на оптическую систему, а главная часть рассеивается по всем направлениям. Следовательно, интерес представляет лишь тот случай, когда система находится в непосредственной близости от источника. Если входной зрачок оптической системы значительно больше, чем источник, так что в него попадает большая часть энергии, излучаемой источником, то оказывается возможным получить направленный свет. Оптическая система действует в этом случае как объектив микроскопа с большой апертурой, и на большом расстоянии от источника можно получить его значительно увеличенное изображение, излучающее в сравнительно небольшой телесный угол. Но едва ли такое решение вопроса представляет какой-нибудь практический интерес. Этому препятствуют необходимые в данном случае громадные размеры оптической системы.

Если же оптическая система имеет малые размеры и находится в непосредственной близости от источника, то повторяется с незначительными изменениями то, что происходит с бесконечно большим источником.

Следовательно, никоим образом нельзя превратить рассеянный свет в направленный. Аналогия со специальными киноэкранами, отражающими узко направленный свет, весьма поверхна, так как на эти экраны падают очень узкие пучки света, идущие от объектива проекционного аппарата, находящегося на большом расстоянии от экрана. Эти пучки имеют остро направленный характер, и надо только сохранить этот характер, чего можно легко добиться многими способами» [1, с. 50].

Как мы уже упоминали, Г. Г. Слюсарев, вообще говоря, неправ. Его утверждение, что рассеянный свет *никогда образом* нельзя превратить в свет направленный, не всегда соответствует действительности. Его рассуждения справедливы в рамках линейной оптики. Однако у нелинейной оптики, которая в те годы только зарождалась, свои законы.

Простейшим примером превращения хаотического некогерентного излучения в когерентное и направленное могут слу-

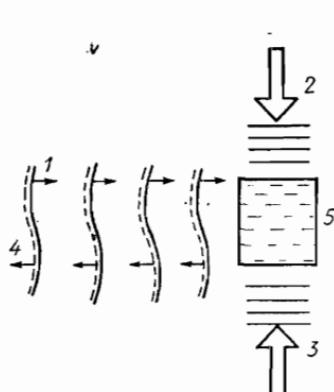


Рис. 6.1.8. Принципиальная схема возбуждения обращенной световой волны при четырехвольновом взаимодействии

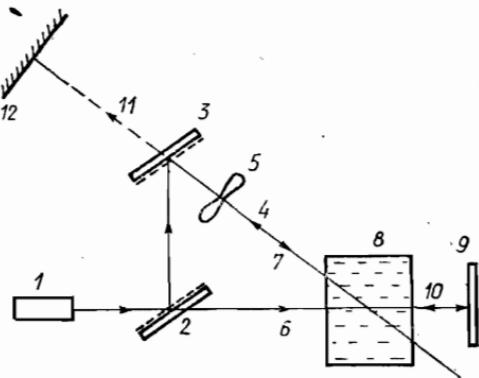


Рис. 6.1.9. Экспериментальная схема осуществления и исследования обращения фазового фронта при четырехвольновом взаимодействии

жить лазеры с мощной оптической накачкой. Свет, испускаемый импульсными лампами, поглощается атомами или молекулами активного вещества. В определенных условиях из зеркал резонатора выходит яркий световой луч с очень малым углом расходимости. Одно из условий возникновения лазерного излучения — образование инверсной заселенности в той или иной паре уровней и преобладание вынужденного испускания над поглощением.

**Обращение волнового фронта.** Другой не менее достоверный пример превращения света рассеянного в свет направленный — явление обращения волнового фронта, открытое белорусскими физиками в 1970 г.

Суть явления очень проста. Рассмотрим слой вещества (рис. 6.1.8), находящийся в поле трех световых пучков: волны 1 со сложным волновым фронтом и двух плоских волн накачки 2 и 3, распространяющихся в слое во встречных направлениях. Запишем падающие волны в виде

$$E_1(r) e^{-i2\pi vt}, \quad E_2 e^{i[kr - 2\pi vt]}, \quad E_3 e^{-i[kr - 2\pi vt]}.$$

Под действием всех падающих волн вещество поляризуется. Обычно в электродинамике рассматривается линейная поля-

ризация. Однако это справедливо только при слабых потоках. В общем случае надо рассматривать и другие слагаемые вектора поляризации  $\mathbf{P}$  и, в частности, учитывать кубический нелинейный член

$$\mathbf{P} = \chi \mathbf{E}_2 \mathbf{E}_3 \mathbf{E}_1^* (r) e^{-i2\pi v t}. \quad (6.1.13)$$

В соответствии с общими положениями электродинамики в нелинейной среде индуцируется волна 4, фазово-сопряжен-

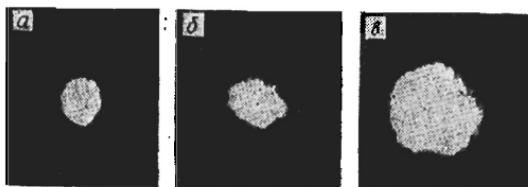


Рис. 6.1.10. Распределение интенсивности излучения в дальней зоне светового пучка при отсутствии (a) и наличии (b) искажающей среды, при замене слоя нелинейного вещества плоским зеркалом (в)

ная с исходной волной 1 и распространяющаяся в противоположном направлении.

Эта идея апробирована экспериментально впервые в работе [2]. В нелинейной среде при взаимодействии волн 1, 2, 3 формируется динамическая дифракционная структура и создается обращенная волна 4. Эксперимент проводился по схеме, изображенной на рис. 6.1.9. Излучение моноимпульсного лазера 1 разделялось с помощью зеркал 2 и 3 на два пучка — пучок накачки 6 и сигнальный пучок 7. Пучки 6 и 7 сводились под углом в объеме 8 нелинейного вещества — просветляющегося раствора фталоцианина хлористого галлия в хлорбензоле. Вторая волна накачки, распространяющаяся в направлении 10, формировалась за счет обратного отражения волны 6 зеркалом 9. Обращенная волна распространялась в направлении 4. Начальное пропускание слоя нелинейной среды толщиной 2 см на длине волны  $\lambda = 694$  нм составляло 10%. В качестве среды, искажающей фронт волны 7, была взята линза 5 с фокусным расстоянием 15 см.

Под действием излучения в растворе красителя создавалась объемная структура, обусловленная резонансным просветлением и тепловой нелинейностью. Картина, наблюдаемая в направлении 11 в плоскости экрана 12 на расстоянии 1 м от зеркала 3 при отсутствии искажающей среды 5, представлена на рис. 6.1.10, а. При наличии искажающей среды обращенный волновой фронт, проходя через среду 5 в обратном направлении, превращался в волновой фронт исходной формы (рис. 6.1.10, б).

Практическое совпадение картин дальней зоны световых

пучков на рис. 6.1.10, *а* и *б* подтверждает исходную идею.

При замене нелинейной среды обычным зеркалом, отражающим световую волну в том же направлении (противоположном сигнальной волне 7) и заставляющим свет дважды пройти через искажающую среду *б*, происходит существенное увеличение угловой расходимости пучка (рис. 6.1.10, *в*). Это наглядно демонстрирует принципиальную разницу действия на падающий световой пучок обычного зеркала и нелинейной среды, облучаемой двумя встречными потоками плоских волн. Такую нелинейную среду можно рассматривать как своеобразное зеркало, отражение от которого приводит к обращению волнового фронта.

В цитированной работе первоначальный плоский волновой фронт искажался линзой. Однако это не обязательно. Точно такой же эффект достигается, если вместо линзы *б* взять какую-либо мутную среду, хаотически рассеивающую падающее на нее излучение. После обращения волновых фронтов на нелинейной среде рассеянное излучение превращается в направленное.

Мы не будем останавливаться здесь на деталях явления. Ограничимся только ссылками на литературу. К 1970 г. относится работа [3], поступившая в редакцию всего на 9 дней позже [2]. В ней также содержится описание обращенного характера волны, дифрагированной назад, и возможности восстановления изображения. Нелинейной средой служила пластина кремния. Детальный анализ полученных результатов в работе отсутствовал.

После работ [2, 3] публикации, связанные с обращением волнового фронта при четырехволновом взаимодействии, отсутствовали до 1977 г. Это по нынешним временам долго, очень долго. Исследования данного профиля интенсивно развивались начиная с 1977 г. американскими учеными [4—7]. Только в 1977—1978 гг. по данному вопросу сделано свыше 30 публикаций. Все они подтвердили выводы работы [2].

Несколько позднее было показано, что обращение волнового фронта мощных световых потоков может возникать и при других нелинейных оптических явлениях, таких, как вынужденное рассеяние Мандельштама—Бриллюэна [8], вынужденное комбинационное рассеяние [9], суперлюминесценция [10].

Явление обращения волнового фронта уже сейчас получает практическое применение для компенсации искажений волнового фронта, вносимых разнообразными фазово-неоднородными, в том числе и рассеивающими, средами.

Рассеянный свет может превращаться в направленный. Таким образом, многое, ранее, казалось бы, невозможное, становится возможным. Это нормальный путь развития науки, познание окружающей нас действительности.

## § 2. ОБРАТИМОСТЬ И НЕОБРАТИМОСТЬ В ОПТИКЕ

**Что такое «обратимость» в оптике?** Ответ на этот вопрос труден, очень важен и не всегда однозначен. В книге Слюсарева ему посвящена отдельная небольшая глава. Мы ограничиваемся цитированием двух параграфов и лишь в конце сделаем несколько, на наш взгляд, существенных замечаний.

«Вопрос об обратимости и необратимости оптических процессов имеет большое значение для интересующей нас темы о возможном и невозможном в оптике. Необратимость процессов ставит ряд пределов некоторым преобразованиям оптических пучков, не противоречащим принципу сохранения энергии и потому кажущимся на первый взгляд вполне осуществимыми.

Прежде всего следует несколько точнее определить, что понимать под обратимым и необратимым процессом. Если процесс обратим, то система, в которой этот процесс происходит сначала в одном, а потом в обратном направлении, должна вернуться в исходное состояние без того, чтобы в окружающих телах произошли какие-либо изменения. Это определение, заимствованное из термодинамики, может с достаточно большим приближением применяться и в оптике.

Наиболее ярким примером обратимого процесса является процесс прохождения луча через непоглощающую среду или оптическую систему, поверхности которых идеально отполированы (отсутствует рассеяние), при условии, что потери на отражение при переходе через границу двух сред пренебрежимо малы (или, что то же самое, если поверхность идеально прозрачна).

Применим описанный выше критерий обратимости к указанному процессу. Для этого поставим на пути луча  $ABC$  (рис. 6.2.1), прошедшего через границу двух непоглощающих сред  $I$  и  $II$ , плоское идеально отражающее зеркало  $M$ . Если зеркало  $M$  ориентировано так, что после отражения от него луч возвращается по старому пути  $CBA$ , то ничего в системе двух сред не изменяется и луч выходит вдоль той же прямой  $BA$ , вдоль которой он и был направлен с самого начала. Если

же при преломлении в точке  $B$  происходит отражение по закону Френеля, обратимость условна: она осуществляется в отношении траекторий, но не в отношении энергии (после возвращения в точку  $A$  энергия пучка стала меньше вследствие потерь в точке  $B$  на

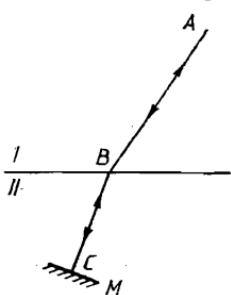


Рис. 6.2.1. Обратимость хода луча

прямом и обратном пути и произошли изменения в энергетическом состоянии двух сред  $I$  и  $II$ ).

Процессы, основанные на чисто геометрических законах (закон преломления, отражения), все обратимы, так как при их рассмотрении пренебрегают потерями вследствие поглощения, рассеяния, френелевого отражения. Если луч описывает в прямом ходе определенную траекторию, то очевидно, что и в обратном ходе он опишет ту же траекторию. Если точка  $A$  изображается некоторой оптической системой точкой  $A'$ , то обратно точка  $A'$  (при обратном ходе лучей) изображается точкой  $A$ , и т. д.

Однако, когда мы рассматриваем более общие законы распространения света с учетом явлений, обусловливаемых физической сущностью световых пучков, вопрос об обратимости значительно усложняется.

При прохождении света через реально существующие среды и оптические системы происходит целый ряд явлений, а именно:

- 1) преломление при изменении показателя преломления среды;
- 2) отражение от поверхностей, разделяющих среды с различными показателями преломления (в том числе и зеркальных поверхностей);
- 3) дисперсия (призмы);
- 4) поляризация;
- 5) поглощение при прохождении через поглощающую среду (светофильтры);
- 6) рассеяние света при прохождении через неоднородные среды (пыль, туман, молочное стекло);
- 7) рассеяние при попадании на прозрачные тела, обладающие весьма мелкой структурой (матовое стекло);
- 8) поглощение на границе двух сред или при попадании света на непрозрачное тело;
- 9) дифракция вследствие ограничения пучков и т. д.» [1, с. 61—63].

**Какие оптические явления необратимы?** «Критерий обратимости, описанный выше, не всегда применим. В качестве примера рассмотрим случай дифракции вследствие ограничения пучков. Пусть световой пучок, излучаемый светящейся точкой  $O$  (рис. 6.2.2), после преломления через безаберрационную линзу  $L$  образует дифракционное изображение  $O'$  на идеально отражающем зеркале  $M$ , направляющем пучок обратно к точке  $O$ . Какова будет структура этого вторичного изображения? Из принципа Гюйгенса—Френеля следует, что в точке  $O$  образуется сложная дифракционная картина, никако не похожая на первоначальную точку  $O$ ; да и здравый смысл подсказывает, что превращение замысловатой дифракционной картины  $O'$  опять в точку невероятно.

Ответы на поставленные выше вопросы об обратимости перечисленных процессов дает отчасти теория, отчасти опыт.

Строго говоря, ни одно из перечисленных оптических явлений не обратимо. Преломление и отражение от оптической поверхности всегда сопровождается поглощением и рассеянием, и никогда не бывает, чтобы энергия падающего потока полностью отразилась или преломилась» [1, с. 63—64].

«То же происходит и при дисперсии света, вызываемой

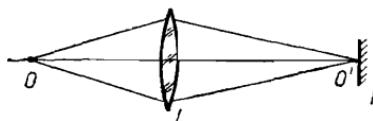


Рис. 6.2.2. Необратимость дифрагированного пучка

преломлением в призме, и при превращении обыкновенного (неполяризованного) света в поляризованный, так как какая-то часть энергии, хотя и небольшая, рассеивается и поглощается.

*Необратимо также и явление рассеяния света* (подчеркнуто мною.—Б. С.), независимо от того, чем оно было вызвано: дифракцией от краев линз, от встречаемых на пути пылинок, водяных капель и т. д., от матовой поверхности стекла или другого тела.

Поглощение света также является необратимым: та часть световой энергии, которая поглощается стеклом или другим телом, нагревает это тело и, естественно, увеличивает его внутреннюю энергию. Однако обратное превращение этой добавочной энергии полностью в световую невозможно.

Поэтому прохождение света через любой фильтр — нейтральный (поглащающий все видимое излучение в одинаковой степени и поэтому не меняющий цвета наблюдаемых через него объектов) или цветной — является процессом необратимым. Например, если пучок белого света после прохождения через фильтр стал зеленым, нельзя его никакими способами опять превратить в белый пучок первоначальной яркости, хотя возможно, с помощью добавочных цветных фильтров, превратить его в белый пучок *пониженной* яркости.

Относительно преломления и отражения следует заметить, что эти явления можно считать с достаточной точностью обратимыми, если приняты определенные меры, такие, как тщательная полировка и просветление поверхностей, сводящие потери до очень малых значений. Принцип обратного хода лучей является частным случаем этих явлений. Он верен поскольку, поскольку можно пренебречь потерями вследствие отражения, поглощения и рассеяния.

Дисперсия, вызываемая призмой, относится к явлениям преломления и, поскольку можно пренебречь поглощением в

материале призм, есть явление обратимое. Еще Ньютон показал, как разложенный призмой белый свет можно с помощью второй призмы сконцентрировать опять в щель, причем через последнюю проходит белый свет такой же яркости, как и первоначальный.

Такие же рассуждения относятся к поляризованному свету при отсутствии потерь. Неполяризованный свет можно превратить в поляризованный в двух перпендикулярных плоскостях, а последний вновь превратить в обыкновенный. Но здесь мы имеем дело с несколько более сложным явлением, на котором подробно останавливаться не будем.

Рассеяние света не может быть объяснено с помощью законов геометрической оптики и должно быть отнесено к физической оптике. Оно вызывается присутствием в средах, через которые распространяется свет, мельчайших частиц (пыль, пузырьки водяных паров, царапины на поверхностях линз, мелкие частые неровности на них, образующие «мат»). Чем меньше частица, находящаяся на пути светового потока, тем сильнее она рассеивает свет. Согласно принципу Гюйгенса—Френеля, эта частица превращается в самостоятельный источник, излучающий в широкий телесный угол: чем меньше частица, тем шире телесный угол, в котором распространяются световые колебания (при величине частицы порядка длины волны она действует приблизительно как светящаяся точка).

В результате появления громадного числа хаотически расположенных вторичных источников световой поток, первоначально исходящий из одного практически точечного источника и представляющий крайнюю степень упорядоченности, превращается постепенно или сразу (в зависимости от ориентации частиц на его пути) в свою противоположность — в совокупность бесконечно большого числа случайно расположенных в пространстве слабых, но широких пучков. Хотя в данном случае потери при поглощении достаточно малы, процесс *рассеяния* все же является необратимым: невозможно представить, каким образом можно было бы опять соединить это бесконечно большое число *раздельных источников*, расположенных в полном беспорядке (подчеркнуто мною.— Б. С.).

Как видно из сказанного выше, общее решение вопроса об обратимости световых процессов пока еще отсутствует. Приведенный в начале [параграфа] критерий не всегда применим. Каждое отдельное явление требует особого подхода, своего специального метода решения. Поэтому в литературе можно обнаружить лишь небольшое число попыток найти общий метод решения задачи об обратимости процессов распространения света. Среди них наибольший интерес представляет работа Дж. Кларка [11], основная идея которой заключается в следующем.

Термодинамика позволяет решать задачи, связанные с теп-

лообменом, и для изучения тепловых процессов разработаны методы, дающие возможность определить, в какую сторону может течь тот или иной процесс. Следовательно, если можно было бы все оптические процессы свести к процессам теплообмена, вопрос об обратимости какого-нибудь оптического явления решался [бы] методами термодинамики. Однако переход от фотометрических понятий светового пучка с учетом таких его свойств, как поляризация, дифракция, поглощение, к термодинамическим сам по себе представляет большие трудности. Автор натолкнулся на ряд препятствий, в частности в отношении рассеяния света, вызываемого дифракцией, которые он не смог преодолеть. Тем не менее путь, по которому он пошел, заслуживает внимания.

Как известно, вопросы об обратимости и необратимости тесно связаны со статистикой и теорией вероятности. Но вся трудность заключается в том, что основы статистики и теории вероятности, так естественно проникающие в учение о газах, не могут с такой же естественностью найти приложение в изучении световых явлений с их сложными и разнообразными проявлениями.

Как известно, обратимые процессы являются исключением или, точнее, каким-то идеалом, недосягаемым на практике; к таким процессам относится прохождение пучков через среды, абсолютно прозрачные и непоглощающие, но совокупность этих условий встречается чрезвычайно редко.

Наоборот, поглощение и рассеяние света происходит постоянно и повсеместно, вероятность осуществления этих процессов неизмеримо больше, чем вероятность распространения пучков по правилам геометрической оптики, требующим точечных источников и других невыполнимых в природе условий.

Однако на таких шатких основаниях трудно создать сколько-нибудь серьезную теорию обратимости световых процессов. Будем надеяться, что такая теория будет создана и принесет пользу для выяснения ряда практических вопросов, связанных с обратимостью, к которым мы сейчас перейдем.

Вопрос об обратимости и необратимости оптических процессов представляет не только теоретический интерес. Не один раз делались попытки «сконцентрировать» рассеянный свет, излучаемый, например, экраном телевизора, и направить его в сравнительно узкий пучок. При этом можно было бы получить большой выигрыш в яркости, так как уменьшение телесного угла в  $k$  раз привело бы к увеличению яркости в такое же число раз. Экран телевизионной трубки излучает в телесный угол, равный  $2\pi$ . Его можно было бы уменьшить до  $\pi/4$ , что позволило бы обслужить достаточное число телезрителей и, следовательно, увеличить яркость в 8—10 раз. Это тем более соблазнительно, что аналогичное усиление яркости

используется в хороших кинозалах благодаря применению специальных экранов, отражающих свет только в полезный телесный угол. Почему то, что возможно для киноэкрана, невозможно для трубы телевизора?

В первом случае свет, падающий на киноэкран, направленный, т. е. он как бы излучается проекционным объективом, размеры выходного зрачка которого малы по сравнению с расстоянием до экрана. Так, если принять, что диаметр объектива 5 см, а расстояние от проекционного аппарата до экрана 40 м, то угол рассеяния светового пучка, достигающего экрана, не более 5', т. е. пучок весьма остр<sup>9</sup> направлен. Падая на специальный экран, обычно покрытый шариками или вогнутыми зеркалами весьма малых размеров (чтобы их границы не были заметны зрителям), эти пучки могут быть направлены в любых заданных направлениях в зависимости от положения и формы элементов экрана.

Свет, излучаемый матовой поверхностью экрана телевизора, оказывается сразу рассеянным, и на его пути никакая оптика не может собрать его в направленные пучки. Более простое доказательство невозможности превратить рассеянный пучок в направленный было приведено выше» [1, с. 64—67].

И далее Слюсарев разбирает один пример неправильного применения принципа обратимости при изучении изображения Солнца, создаваемого кольцеобразной или цилиндрической линзой. Ошибка «изобретателей» была связана здесь с отсутствием учета всех пучков, участвующих в образовании изображения.

**Еще раз об обращении волнового фронта при четырехвольновом взаимодействии.** В цитированном материале хочется подчеркнуть главное. Совершенной теории обратимости световых явлений в настоящее время действительно не существует. Но мы надеемся, что она будет создана.

Для доказательства столь общего положения достаточно вспомнить о явлении обращения волнового фронта, описанном в предыдущем параграфе. В 1968 г., когда был сделан доклад [12], это явление было еще неизвестно. А оно полностью противоречит двум утверждениям, специально подчеркнутым на ми на с. 208, 209.

Да, в данном случае здравый смысл оказался ненадежным средством доказательства. В нелинейной оптике господствуют другие законы, ранее казавшиеся абсурдными, неестественными. Явление рассеяния света в ряде случаев обратимо. Оно действительно совершенно неподвластно геометрической оптике. Но и физическая оптика в ее линейном варианте не справляется с задачей.

Рассеяние света на мелких неоднородностях есть превращение направленного светового потока в поток хаотический.

Оно несомненно сопровождается увеличением энтропии системы. Сам по себе рассеянный свет не может превратиться в направленный. Это противоречило бы второму началу термодинамики.

Но в явлении обращения волнового фронта превращение хаоса и беспорядка в порядок происходит не само по себе, а под действием двух интенсивных волн накачки, т. е. под действием внешнего источника энергии. Больше того, как показывает опыт, интенсивность упорядоченной обращенной волны может значительно превышать исходную волну.

Все это открывает широкие перспективы применения обращения волнового фронта при четырехволновом взаимодействии для точного оптического сопровождения, оптимальной подсветки объективов, находящихся в неоднородной среде (вода, атмосфера, турбулентные течения...). Использование обращенных волн в технике связи позволит увеличить помехозащищенность оптических каналов передачи информации.

Кстати сказать, превращение хаоса в порядок — явление в физике обычное. Но обязательно под действием внешних сил. По этому принципу работает, например, холодильник. Внешние источники энергии приводят не к нагреву объектов, помещенных в холодильник, а к их охлаждению, к передаче тепла от холодного тела к более нагретому.

Или другой пример. При изучении явления люминесценции было доказано, что возможны ситуации, когда квантовый выход люминесценции больше единицы. Это обусловлено тем, что в свет превращается часть тепловой энергии люминесцирующего тела. Энтропия тела и излучения, окружающего его, понижается. Но это происходит опять-таки за счет внешнего светового потока, действующего на систему.

Как мы уже отмечали, существование лазеров дает еще более убедительное доказательство возможности превращения рассеянного излучения в излучение направленное. При накачке активной среды хаотическим, никак не упорядоченным излучением импульсных ламп образуется узкий монохроматический, когерентный, иногда даже поляризованный световой поток.

Таким образом, упорядочение рассеянного света никак не противоречит основным законам физики (и здравому смыслу). Чтобы доказать это, нужно было найти только конкретные формы осуществления такого процесса.

Что касается создания общей теории обратимых и необратимых оптических явлений, то оно еще впереди. Здесь можно ожидать много нового. Во всяком случае уже сейчас установлено, что при четырехволновом взаимодействии проявляются общие закономерности, характерные для различных нелинейных процессов взаимодействия света с жидкими, твердыми и газообразными средами (просветление, тепловая нелиней-

ность, керр-эффект и т. д.). Возможно также обнаружение явления фазового сопряжения в нелинейной акустике.

\*

Рассматриваемый вопрос приобретает в настоящее время принципиальное значение в связи с проблемами неравновесной термодинамики. В течение последних 25 лет физики, химики и биологи добились заметных успехов; на их основе возникла новая наука — синергетика. Речь идет здесь о самоорганизации материи, о формировании структур в открытых системах, т. е. в системах, обменивающихся энергией и веществом с окружающей средой. Именно неравновесность системы и нелинейность процесса служит источником упорядочения.

Число уже изученных явлений этого типа достаточно велико. Одно из них — возникновение лазерного излучения. При малых интенсивностях накачки все оптические центры активного стержня независимы — испускаемое ими излучение хаотично, случайно, некогерентно. При накачках, превышающих пороговую, все возбужденные атомы (или молекулы) начинают работать согласованно — испускать когерентное излучение. При генерации в атомной системе осуществляется типичный пример самоорганизации, упорядочения материи.

Желающим познакомиться с основами синергетики можно рекомендовать популярные издания [13—16].

### **§ 3. ПРЕДЕЛ РАЗРЕШЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ (МИКРОСКОПОВ И ТЕЛЕСКОПОВ)**

**Общие соображения.** Увеличение современных (1957 г.) микроскопов и телескопов порядка 1500—2000. На практике пользуются меньшими увеличениями (400—600). Как известно, за предшествующие полвека тенденция к их росту не проявлялась.

Увеличение — это основное свойство оптических приборов. Они и создаются ради увеличения изображения очень малых и очень далеких предметов. И совсем не случайно, что поиск многих изобретателей был сосредоточен в данном направлении. Путем комбинаций различных оптических приборов стремились получить миллионные увеличения.

К таким поискам были основания. Если оставаться в рамках геометрической оптики, то повышение увеличения телескопа в принципе возможно. И астрономы такие попытки делали. Но, увы, безуспешно.

Что же мешало решению задачи? Влияние атмосферы или уменьшение яркости изображения? С влиянием атмосферы,

движения воздуха бороться можно. Именно поэтому обсерватории строят, как правило, в горах, на большой высоте. Бюраканская обсерватория в окрестностях Еревана находится на высоте 2000 м.

Уменьшение яркости действительно велико, но оно также не всегда вредно. Оценим сперва величину ослабления яркости. Пусть диаметр зрачка глаза  $\Delta$  равен  $\sim 3$  мм. Если перед глазом поставить диафрагму с диаметром  $\Delta_1$  ( $\Delta_1 < \Delta$ ), то освещенность сетчатки уменьшится в  $(\Delta_1/\Delta)^2$  раз. То же самое происходит, если перед глазом находится телескопическая система: роль диафрагмы выполняет выходной зрачок системы. Из геометрической оптики известно, что диаметр выходного зрачка  $\Delta_1$  в  $\gamma$  раз меньше диаметра объектива, где  $\gamma$  — угловое увеличение системы.

Приведем пример — телескоп Пулковской обсерватории. Диаметр его выходного зрачка равен всего 0,015 мм, т. е. в 200 раз меньше зрачка глаза. Световая энергия, достигающая сетчатки глаза, будет в  $(200)^2 = 4 \cdot 10^4$  раз меньше, чем при отсутствии оптической системы. Снижение яркости огромно. Но, как мы уже отметили, во многих случаях это не страшно.

1-й случай — очень далекие звезды. В этом случае поток света от них строго параллелен. Из телескопа он выходит тоже параллельным. Отношение кажущейся яркости звезды  $L'$  к ее истинной яркости  $L$  равно

$$\frac{L'}{L} = \left( \frac{D}{\Delta_1} \right)^2 \left( \frac{\Delta_1}{\Delta} \right)^2 = \left( \frac{D}{\Delta} \right)^2, \quad (6.3.1)$$

где  $D$  — диаметр объектива. Согласно (6.3.1), отношение  $L'/L$  не зависит от выходного зрачка  $\Delta_1$ , не зависит от увеличения, а только от диаметра объектива.

2-й случай — относительно близкие, но очень яркие тела (Солнце и даже Луна, планеты). Расчеты показывают, что их яркости столь велики, что можно допустить создание оптических систем с увеличением в несколько тысяч раз. Лишь для слабых светил (кометы, туманности) яркость недостаточна. Все эти рассуждения приводят к выводу, что для астрономов<sup>3)</sup> сильное ослабление яркости в большинстве случаев не создает серьезных затруднений.

И тем не менее из опыта известно, что сверхбольшие увеличения бесполезны. Это убедительно показал еще в середине прошлого века французский физик Фуко<sup>4)</sup>. Он рассматривал

<sup>3)</sup> То же справедливо и для работающих с микроскопом, так как при ослаблении яркости всегда можно выбрать более мощный источник света.

<sup>4)</sup> Ж. Б. Фуко (1819—1868 гг.) известен своими выдающимися работами в области оптики (а также механики и электромагнетизма). В 1850 г. он разработал метод измерения скорости света при помощи вращающегося зеркала (метод Фуко) и измерил скорость света в воздухе и воде. Скорость света в воде оказалась меньше скорости света в воздухе, и это окончательно

через зрительные трубы специальные тесты — черные полосы на белом фоне. Рисунки рассматривались с разных расстояний. При увеличении расстояния изображение полос сливалось постепенно в сплошной серый фон — труба переставала «разрешать» полосы.

Выводы Фуко: 1) всякой зрительной трубе соответствует наименьший разрешаемый угол  $\alpha$ ; 2) угол  $\alpha$  не зависит от увеличения трубы; 3) угол  $\alpha$  связан только с диаметром объектива трубы ( $\alpha'' = 120/D$  (мм)).

Главный вывод — нецелесообразно повышать увеличение зрительной трубы сверх некоторого предельного значения. Причина нерезкости изображений связана с пока еще неучтеным фактором — дифракцией света в оптических системах.

**Микроструктура изображения, создаваемого оптической системой.** Геометрическая оптика — наука об изображениях, создаваемых оптической системой. Ее можно считать разделом математики, основанным на понятии светового луча, на принципе Ферма о наиболее кратком пути следования луча (см. главу 2, § 9) и постулате о независимом распространении различных лучей. Теория изображений, созданная на этих принципах, хорошо оправдывается на опыте. Однако, как показал Фуко, это справедливо только в некоторых пределах; нельзя увлекаться сверхбольшими увеличениями.

Хотя отклонения от опыта невелики, они указывают на неточность теории, на ограниченность ее основных принципов. Неточно положение о световом луче, неточен постулат о независимом распространении лучей.

«Геометрическая оптика рассматривает луч как математическую линию или бесконечно тонкую трубку, несущую энергию. Такая фикция была необходима для построения теории: без нее возникли бы настолько серьезные трудности, что вряд ли удалось бы их преодолеть, и теория изображения вовсе не увидела бы света. Правильнее строить простую, хотя бы и не вполне строгую теорию, а потом путем добавлений и поправок исправить дефекты, вытекающие из-за неточности основных положений»<sup>5)</sup>.

Если мы рассматриваем предмет с помощью какой-либо

---

подтвердило справедливость волновой теории. При помощи маятника Фуко доказал вращение Земли вокруг своей оси. Изобрел гироскоп. Впервые сконструировал телескоп с посеребренными стеклянными покрытиями. Первый установил связь между линиями поглощения и испускания.

<sup>5)</sup> Здесь и в дальнейшем предмет геометрической оптики сформулирован четко и ясно. Совершенно четко определены границы применимости геометрической оптики, методология исследования. К сожалению, в большинстве учебников оптики этого нет. Геометрическая и физическая оптика излагаются практически независимо, границы применимости геометрической оптики не выясняются.

Появление книги Г. Г. Слюсарева — это событие. Ее надо прочесть в подлиннике и несомненно переиздать. Наше изложение предельно кратко.

оптической системы, то, согласно геометрической оптике, изображение предмета тем резче, чем меньше диаметр входного отверстия системы. В действительности это не так. Вследствие дифракции света происходит обратное: рассеяние лучей с уменьшением зрачка увеличивается. При очень малых отверстиях зрачка изображение точки превращается в большое пятно, окруженное сложной дифракционной картиной.

Приведем для примера изображение точки. Если входной

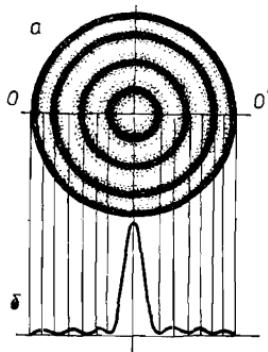


Рис. 6.3.1. Дифракционное изображение точки: *а* — общий вид дифракционной картины, *б* — кривая распределения освещенности вдоль линии  $OO'$ , проходящей через центр изображения

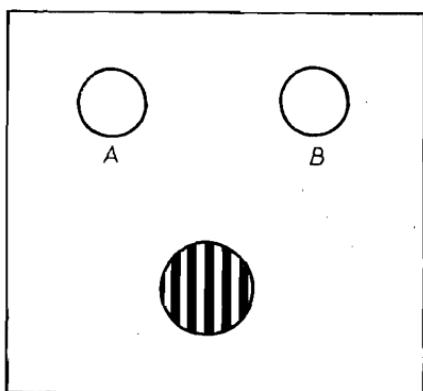


Рис. 6.3.2. Интерференция в случае, когда входной зрачок состоит из двух кругов

зрачок оптической системы круглый, то в этом случае изображение точки имеет вид, приведенный на рис. 6.3.1. Радиус центрального кольца

$$r = \frac{3,8}{2\pi} \frac{\lambda}{\sin \varphi'} = 0,61 \frac{\lambda}{\sin \varphi'}, \quad (6.3.2)$$

где  $\varphi'$  — угол, под которым радиус выходного зрачка виден из изображения точки.

Если входной зрачок оптической системы имеет вид двух кругов *A* и *B*, находящихся на некотором расстоянии друг от друга, то наблюдаемая картина будет иметь вид, изображенный на рис. 6.3.2. Картина такая же, как и для одного круга, но только она испещрена тесно расположеннымми полосами. Здесь проявляются законы интерференции по типу полос в опыте Юнга.

Отсюда вывод — форма изображения точки зависит от формы входного зрачка оптической системы. В этом выводе пока еще не учитываются aberrации оптической системы; они искажают форму изображения дополнительно.

Разрешающая способность оптических систем<sup>6)</sup>. До сих пор мы рассматривали дифракционное изображение точки. Однако всякий предмет есть совокупность светящихся точек и, следовательно, дифракция вносит серьезные искажения и в изображение предмета.

Рассмотрим пример: две некогерентно светящиеся точки (в частности, две звезды). На рис. 6.3.3 представлены кривые распределения суммарной освещенности в зависимости от

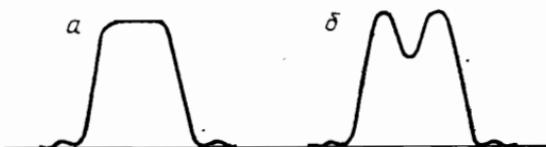


Рис. 6.3.3. Кривые распределения освещенности при различных расстояниях между центрами изображений двух светящихся точек

расстояния между центрами изображений этих точек. Случай *а* реализуется, если расстояние между центрами изображения *d* меньше радиуса светового пятна *r*, случай *б* — при  $d > r$ . При  $r > d$  наблюдателю кажется, что он видит одну звезду, при  $r < d$  — две звезды. В этом случае говорят, что прибор разрешает две звезды. Значение *r* определяется по формуле (6.3.2). Если *D* — диаметр объектива, а *f* — его фокусное расстояние, то

$$\sin \varphi' = D/2f. \quad (6.3.3)$$

С другой стороны,  $d = f\alpha$ , где  $\alpha$  — угловое расстояние между двумя звездами. Итак,

$$d = f\alpha > r; \quad f\alpha \geq 1,22/D.$$

Отсюда следует

$$\alpha \geq 1,22\lambda/D. \quad (6.3.4)$$

Переходя от радиана к секунде и полагая, что  $\lambda = 560$  нм, получим  $\alpha \geq 140/D$ . Объектив, диаметр которого  $D = 140$  мм, разрешает две звезды, если угловое расстояние между ними не более  $1''$  (при примерно одинаковой яркости звезд).

Аналогично можно найти наименьшее разрешаемое линейное расстояние для микроскопа:

$$e = 0,61\lambda/n \sin \varphi = 0,61\lambda/A, \quad (6.3.5)$$

где  $\varphi$  — апертурный угол,  $n$  — показатель преломления среды,  $A = n \sin \varphi$  — численная апертура микроскопа.

<sup>6)</sup> О разрешающей способности призмы и дифракционной решетки мы уже говорили при описании явлений интерференции и дифракции. Но здесь целесообразно повториться, все рассказывается по-другому и, вероятно, более доходчиво.

Эта формула справедлива для исследования самосветящихся объектов. Исследование разрешающей способности микроскопа для объектов, освещаемых внешними источниками света, значительно сложнее (см. [1], с. 91—94).

**Оптимальное увеличение оптических систем.** «Для каждой оптической системы существует оптимальное (полезное) увеличение. Действительно, при слишком малых увеличениях наш глаз не в состоянии различить черезесчур малые подробности объекта; при слишком больших увеличениях мы видим лишь размазанную картину, усложненную добавочными дифракционными фигурами, не имеющими никакого отношения к рассматриваемому объекту» [1, с. 94].

Как найти оптимальное увеличение? При ответе на этот вопрос надо учитывать свойства глаза. Наименьшее угловое разрешаемое расстояние для глаза — одна минута. Рационально только такое увеличение, когда наименьшее разрешаемое расстояние после увеличения окуляром будет видно под углом в одну минуту.

Пусть  $\alpha = 140/D$  — наименьший разрешаемый угол объекта телескопической системы. Увеличение системы, при котором углу  $\alpha$  соответствует угол наблюдения 1 мин, равно

$$\gamma = \frac{60''}{\alpha} = \frac{60D}{140} = \frac{D}{2,3 \text{ мм}}. \quad (6.3.6)$$

Так как  $\gamma = D/D'$ , оптимальное увеличение телескопической системы осуществляется, если диаметр выходного зрачка трубы равен 2,3 мм.

При таком увеличении выходной зрачок телескопической системы равен зрачку глаза. В этом случае достигается максимальное увеличение, при котором дифракционное изображение точки воспринимается еще как точка. Для большого рефрактора Пулковской обсерватории оптимальное увеличение равно  $800/2,3$  раз. Для объектива бинокля с отверстием 30 мм полезное увеличение  $\sim 15$ .

На практике возможно отклонение от оптимального режима. Иногда это дает выгоду. Однако «переоценивая возможности своего прибора, астроном нередко склонен принять за реальность картину, вызываемую дифракцией света и другими оптическими обманами. Многие открытия на поверхности Луны и планет отошли в область преданий, как только появились более мощные, т. е. с большим диаметром объектива, приборы» [1, с. 95].

Так, по ошибке, были «открыты» каналы на Марсе. По мере увеличения диаметров объектива они «исчезали». Так был «открыт» несуществующий вулкан на Меркурии. Было создано много «ультрателескопов».

Аналогично можно рассмотреть увеличение микроскопов. Расчет показывает [1], что их полезное увеличение равно

$$\Gamma_0 = 220n \sin \varphi = 220A$$

$$(6.3.7)$$

и, следовательно, в 220 раз больше численной апертуры  $A$ . Даже в очень хороших микроскопах  $A \sim 1,4-1,5$ . Ввиду этого оптимальное увеличение микроскопов  $\sim 300-350$ . Разумеется, и здесь можно идти на удвоение, даже утроение этих чисел. «Все же увеличения, превышающие 1000, явно бесполезны и даже вредны; в них дифракционные явления ясно выступают, добавляя свой рисунок к контурам рассматриваемых объектов и являясь причиной всяких ошибок и недоразумений» [1, с. 101].

«Вообще плохое знакомство с оптикой приводит не только молодых, неопытных работников, но и ученых с мировым именем к ошибкам, иногда очень крупным. Ряд объектов, имеющих огромный интерес для биологии, зоологии, цитологии (науки о клетке), имеет размеры, лежащие как раз несколько ниже наименьшего разрешаемого расстояния. При умелом обращении с микроскопом эти объекты могут быть обнаружены, но очевидно, что при этом крайне легко стать жертвой оптического обмана. Такие случаи бывали не раз и будут повторяться до тех пор, пока всем работающим с микроскопом не станет ясно, что смотреть изображение в окуляре микроскопа, не зная его теории, так же трудно, как читать книгу на мало знакомом языке» [1, с. 101].

Можно было бы привести множество примеров оптических недоразумений, связанных с переоценкой возможностей микроскопа (см. [1]).

**Что видно с помощью современных приборов?** Для телескопических приборов наименьший разрешаемый угол равен

$$\alpha = 1,22\lambda/D$$

(см. (6.3.4)). Для уменьшения  $\alpha$  есть только один путь — увеличение диаметра объектива и уменьшение длины волны. Именно поэтому по мере совершенствования технологии строят все большие и большие объективы.

При  $D=5000$  мм телескоп позволяет разрешать 0,05" (50 м на поверхности Луны, 8 км на поверхности Марса). Это означает, что изображение объекта данной величины уже не является бесформенным пятном, и можно грубо почувствовать его форму.

Допустим, что мы наблюдаем источники света в виде точки и не ставим вопроса о форме объекта. Возможности здесь весьма велики. В работе [1] приводятся примеры. Спрашивается, на каком расстоянии будет замечен сигнал 2-метрового прожектора, освещенного дугой высокой интенсивности с яркостью  $10^5$  сб. Согласно закону Манжена—Чиколева, сила света такого прожектора равна  $3 \cdot 10^9$  св. Из фотометрии известно, что одна свеча видна простым глазом (в полной тем-

ноте и при адаптации глаза) на расстоянии 27 км.  $3 \cdot 10^9$  свето-чи могут быть видны с расстояния в  $\sqrt{3} \cdot 10^9$  раз большего. Если наблюдение ведется с помощью телескопа, полезное увеличение которого равно  $\sim 300$ , то прожектор может быть замечен с расстояния  $27\sqrt{3} \cdot 10^9 \cdot 300 \approx 5 \cdot 10^8$  км. Это расстояние в 3 раза больше расстояния до Солнца, примерно равно расстоянию от Земли до Юпитера.

Если условия освещения благоприятны, то вполне возможно обнаружение спутника Земли диаметром 50 см на расстоянии несколько сотен километров. Сигнализация с Луны возможна с помощью небольших прожекторов.

Перейдем к микроскопам и оценим их способности. Наименьшее разрешаемое линейное расстояние определяется формулой (6.3.5): при  $\lambda = 560$  нм,  $n = 1,5$ ,  $\epsilon = 0,0005$  мм. С помощью хороших микроскопов можно различать два объекта, находящихся друг от друга на расстоянии 0,5 мкм.

Если нужно только обнаружить предмет, не уточняя его формы, то размер объекта может быть уменьшен в сотни раз. Это делается в микроскопах со специальным способом облучения. Величина  $\epsilon$  зависит от длины волны  $\lambda$ . Поэтому иногда целесообразно пользоваться ультрафиолетовыми микроскопами.

И далее Слюсарев останавливается на некоторых перспективах. Часть из них связывалась с созданием обсерваторий на искусственных спутниках Земли<sup>7)</sup>, обеспечивающих полное устранение влияния атмосферы. Естественно также увеличение диаметра  $D$  и уменьшение длины волны.

Все это не сулит для оптического диапазона значительных успехов «в течение ближайших лет и даже десятилетий».

Однако возможности оптики еще не исчерпаны. Надо научиться лучше оценивать получаемое изображение. В изображения, которые рассматривают астроном или биолог, вложено гораздо больше, чем они видят непосредственно глазом. Но чтобы больше «видеть», нужно хорошее знание теории изображения и вместе с тем совершенствование методов измерения освещенности.

В книге [1] дается ряд ценных советов, но они важны уже для специалистов, занимающихся этими проблемами. Некоторые из них связаны с использованием интерференции. Мы остановимся здесь только на методе «цветной» фотографии в ультрафиолетовых лучах. Метод предложен Е. М. Брумбергом в лаборатории С. И. Вавилова. Так как он весьма неожидан и имеет прямое отношение к другим разделам оптической науки, рассмотрим его несколько подробнее.

<sup>7)</sup> В 1957 г., когда вышла в свет книга [1], Юрий Гагарин еще не совершил своего полета. Это был прогноз. И он оправдался.

Имеется микроскоп, прозрачный для ультрафиолетовых лучей и снабженный монохроматором для той же области спектра. Монохроматор позволяет изменять длину волны излучения, освещавшего исследуемый препарат. В процессе исследования делаются три снимка с одного и того же места изучаемого препарата в трех длинах волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ . Негативы снимков (или отпечатанные с них позитивы) проецируются на одно место экрана тремя проекторами. Перед каждым из

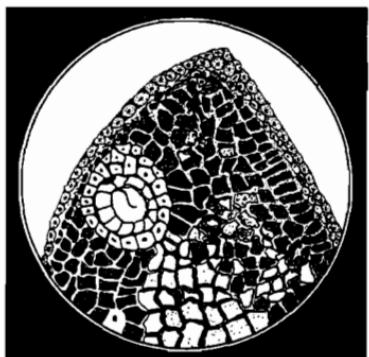


Рис. 6.3.4. Ультрафиолетовая «фотография» поперечного среза хвои сосны

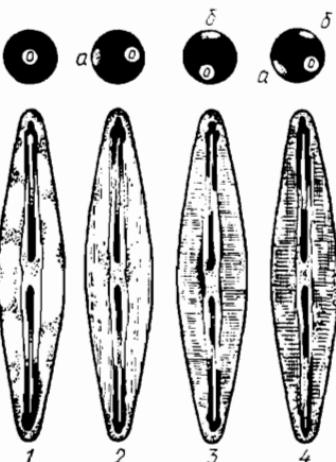


Рис. 6.3.5. Панцирь диатомеи, наблюдаемый в микроскопе при различных положениях диафрагмы конденсора

проекторов устанавливается светофильтр, пропускающий один из трех основных цветов фотометрии (красный, зеленый, синий). На экране появляется цветная картина. Окраска ее элементов определяется разностью почернений соответствующих мест на снимках. Эта окраска, разумеется, условна, не отражает реальных цветов исследуемого препарата. Но она связана с химическим составом его отдельных мест. Цветные фотографии Брумберга обладают значительно большим контрастом, чем обычные черно-белые фотографии. Вместе с тем они позволяют найти распределение в биологическом препарате различных веществ, по-разному поглощающих ультрафиолетовую радиацию длины волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ , и тем самым получить важные сведения о химическом составе отдельных частей препарата.

На рис. 6.3.4 приведена «цветная» ультрафиолетовая «фотография» поперечного среза хвои сосны при  $\lambda_1=400$  нм,  $\lambda_2=300$ ,  $\lambda_3=250$  нм. Как видно из рисунка, контрастность чрезвычайно велика. Путем простых видоизменений качество оп-

тического изображения повысилось во много раз. Существенно отметить, что многие биологические объекты в видимой области вообще прозрачны и ультрафиолетовая микроскопия есть единственно возможный способ их «оптического» изучения<sup>8)</sup>.

Хочется сказать несколько слов и о роли освещения предмета в обычном микроскопе. Этот вопрос был подробно рассмотрен Д. С. Рождественским [17—20], который чрезвычайно удачно сочетал исследования в области спектроскопии и аномальной дисперсии с разработкой теории спектральных приборов и микроскопов.

Точки освещенного предмета посылают к приемнику в поле когерентное излучение, только если угловые размеры источника малы (угол, под которым источник виден от места расположения предмета, меньше  $\lambda/d$ , где  $d$  — расстояние между освещаемыми точками предмета). В противном случае, когда угловые размеры источника велики (по сравнению с  $\lambda/d$ ), свет, приходящий к освещаемым точкам предмета от разных точек источника, будет иметь всевозможные разности фаз и, следовательно, некогерентен. В промежуточных случаях степень когерентности может быть самой различной.

На рис. 6.3.5 внизу изображены четыре микрофотографии одного и того же препарата диатомовой водоросли, полученные с помощью одного и того же микроскопа, но при разных способах освещения. В верхней части рисунка приведено схематическое изображение светового пучка, проходящего через фокальную плоскость объектива при различных положениях диафрагмы конденсора. Анализ всех четырех изображений позволил глубже проникнуть в строение водоросли. Только одно изображение дало бы значительно меньшую информацию.

В книге [1] есть большой параграф, посвященный ограничениям в работе оптических систем, обусловливаемым аберрациями. Приведенные данные свидетельствуют о том, что аберрации оптических систем также ухудшают качество изображения, ограничивают светосилу, поле зрения и разрешающую способность приборов. В принципе аберрации устранимы, но, к сожалению, только в принципе. Реально они всегда существуют.

Исследование аберрации выходит за пределы данной монографии, и поэтому мы отсылаем читателя к первоисточнику [1], к учебнику Г. С. Ландсберга [21], к монографии М. Борна и Э. Вольфа [22], к двухтомной монографии А. И. Тудо-

<sup>8)</sup> Автор монографии работал с Евгением Михайловичем Брумбергом в соседних лабораториях и хорошо помнит, какое неизгладимое впечатление оставляли его первые снимки. Все было так неожиданно и прекрасно.

ровского<sup>9)</sup>, посвященной теории оптических приборов [23], и ко многим другим изданиям.

**Электронный микроскоп.** Мы уже видели, что разрешение прибора линейно зависит от длины волны. Поэтому хотелось бы работать с рентгеновскими микроскопами ( $\lambda \approx 0,1—10$  нм). Однако создание таких микроскопов — дело трудное. Лучи Рентгена почти не преломляются, отражаются только при скользящем падении. Тем не менее какое-то количество рентгеновских микроскопов было построено. К сожалению, их качество невысоко, разрешающая способность не повысилась. Значительно большую роль играет рентгеновская спектроскопия. Длины рентгеновских волн близки к расстояниям между ионами кристалла. Падая на кристаллы, рентгеновские лучи дифрагируют на отдельных атомах или ионах и, интерферируя между собой, дают характерную картину, позволяющую установить строение исследуемого объекта.

Потребность дальнейшего увеличения познавательной способности микроскопических систем должна была быть удовлетворена, и она действительно была удовлетворена, но качественно другими способами.

И здесь невозможное стало возможным, однако на совершенно других принципах. Проблему решила электронная спектроскопия. При изучении волн де Броиля было установлено, что потоку электронов соответствует своеобразный волновой процесс. Длина волны де Броиля непосредственно связана с кинетической энергией электронов:

$$\lambda = \sqrt{1,5/V}. \quad (6.3.8)$$

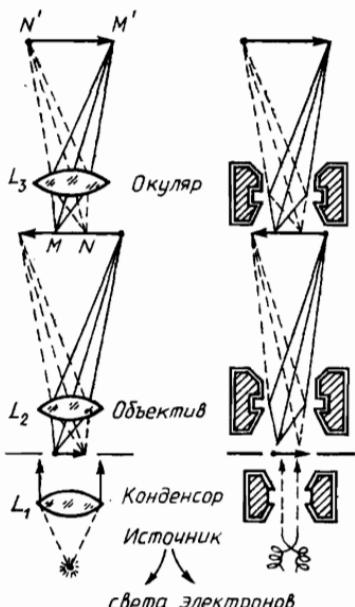
Длина волны  $\lambda$  выражена здесь в нанометрах, а энергия электронов в электронвольтах. Длину волны легко варьировать в широких пределах, изменяя разность потенциалов, ускоряющую электроны перед их выходом за пределы действующего поля. Как правило, значение  $\lambda$  очень мало. В электронных микроскопах разность потенциалов  $V$  порядка  $10^5$ , что соответствует длине волны  $\lambda = 0,004$  нм, т. е. в  $10^5$  раз меньшей, чем в видимом оптическом диапазоне.

Так как электрон обладает волновыми свойствами, то к нему применимы законы обычной волновой оптики. Роль линз играют здесь электрические или магнитные поля. С их помощью можно создать электронный микроскоп. К сожалению, как и обычные оптические системы, он имеет aberrации. Они велики и существенно ограничивают разрешающую способность электронного микроскопа.

<sup>9)</sup> А. И. Тудоровский (1875—1963 гг.) — ленинградский физик, соратник Д. С. Рождественского. Основатель советской школы вычислительной оптики. Разрабатывал теорию aberrаций 3-го порядка. Его капитальный труд [23] сыграл большую роль в воспитании нескольких поколений ученых, специализирующихся в области геометрической оптики.

Расчет электронно-микроскопических систем проводится методами, хорошо известными в вычислительной оптике. Нужно только знать зависимость показателя преломления от свойств среды, т. е. от силовых полей, в которых движется электрон<sup>10)</sup>.

Изображение, которое дает электронный микроскоп, легко зарегистрировать либо с помощью фотопластиинки, либо с помощью флуоресцирующего экрана.



На рис. 6.3.6 дана схема устройства электронного микроскопа. Рядом для сравнения приведена схема обычного микроскопа. Обе схемы похожи. Электронный микроскоп имеет свой объектив и свой окуляр. Объект исследования может быть или самосветящимся, или освещенным (препарата, на который падает поток электронов).

Минимально разрешимое линейное расстояние для электронного микроскопа определяется той же формулой, что и для обычно-го микроскопа (6.3.5):

$$\varepsilon = 0,61\lambda/A.$$

Рис. 6.3.6. Схемы устройства электронного и оптического микроскопов

где  $A$  — численная апертура. Величина  $A$  в существующих конструкциях пока еще мала ( $\sim 0,01$ — $0,1$ ), и тем не менее разрешающая способность электронного микроскопа очень велика (в несколько тысяч раз больше разрешающей способности оптического микроскопа).

Типичные значения  $\varepsilon$ , достигаемые сейчас с помощью электронных микроскопов, равны  $\sim 0,1$  нм. Этого вполне достаточно

<sup>10)</sup> Возможность применения законов оптики к описанию чисто механических движений электронов в силовых полях следует из уравнений Гамильтона и Гамильтона—Якоби. Эти уравнения выведены около 150 лет назад. Уже тогда было показано, что уравнениям механики можно придать вид уравнений геометрической оптики. На этой основе и выводится понятие показателя преломления электронных волн. Для частицы, движущейся в силовом поле  $U$ , эффективный показатель преломления среды  $n = \sqrt{2(E-U)/mc^2}$ , где  $E$  — энергия частицы, а  $m$  — ее масса. В данном случае траектория частицы эквивалентна световому лучу.

но, чтобы «видеть» отдельные атомы и молекулы, а также строение больших молекул. Разумеется, все еще приходится преодолевать многие препятствия. Мы уже говорили о больших aberrациях и малых апертурах. Принципиально неустойчивым недостатком следует считать взаимное отталкивание электронов, и поэтому желательно работать при слабых потоках электронов. При интерпретации изображения, получаемого с помощью электронного микроскопа, нужно учитывать, что в процессе столкновения электрона с изучаемой молекулой он оказывает на нее заметное воздействие. Такое воздействие будет отсутствовать лишь для очень больших молекул.

Электронные микроскопы продолжают совершенствоваться, но уже сейчас ясно, что они стали могучим средством изучения вещества. Их возможности до конца еще не выявлены. Следует вспомнить, что волновыми свойствами обладают не только электроны, но и атомы. Длина волны, характеризующая их, во много раз меньше, что в принципе может быть использовано. Как это сделать, покажет будущее. Хотелось бы напомнить здесь, что в свое время Ньютона говорил о принципиальной невозможности исправления хроматической aberrации оптических микроскопов.

Повторяется. Многое из того, что казалось невозможным, на практике реализуется. Нельзя только преодолеть законы природы, надо разумно использовать их.

#### § 4. ФАЗА, АМПЛИТУДА, ИЗОБРАЖЕНИЕ

**Роль фазы в волновой теории образования изображений.** Действие оптической системы можно объяснить целиком, исходя из волновой теории. Однако никто не идет по этому пути вследствие серьезнейших математических трудностей.

Обычный путь — путь приближенный. Он характерен, разумеется, не только для оптики, но и для других наук. Мы уже об этом говорили неоднократно: сперва задача решается для упрощенной модели и лишь затем на ее основе выявляются свойства более сложной и более реальной системы.

Слюсарев очень четко подчеркивает исходный методологический принцип. Ему, решившему за свою жизнь несметное множество сложнейших проблем вычислительной оптики, такая постановка задачи совершенно ясна.

Приступаем немного к оригиналу. Методологии научного творчества надо учиться и прежде всего на работах крупных ученых.

«Обычно ограничиваются доказательством того, что из волновой теории света, выражаемой с помощью уравнений

Максвелла, вытекают в предельном случае бесконечно малых длин волн световых колебаний известные основные законы геометрической оптики, определяющие ход луча в среде с переменным показателем преломления и, в частности, законы Снелля—Декарта. Дальнейшее развитие теории отображения предметов оптическими системами основано исключительно на последних законах, а работа оптических приборов в свою очередь опирается на общие свойства систем, полученных из законов геометрической оптики. Лишь впоследствии, когда изложение курса доходит до вопроса о разрешающей способности оптической системы, приходится вспомнить о конечной длине волны световых колебаний и определить истинное распределение интенсивности в изображении точки, даваемом идеальной (безаберрационной) оптической системой. При этом геометрическая оптика пока не оставляется в стороне, так как она еще нужна для определения волновых поверхностей — понятия, принадлежащего полностью геометрической оптике, но необходимого и для вычисления дифракционных явлений» [1, с. 141].

Все это разумно и правильно. Но...

«Такой, пожалуй единственным возможный из дидактических соображений, метод изложения приводит к распространенному среди начинающих специалистов-оптиков взгляду, что в общих чертах изображение получается по законам геометрической оптики, а волновая природа света, в данном случае сказывающаяся в дифракционных явлениях, лишь в незначительной степени видоизменяет картину изображения. Причем это изменение практически заметно только тогда, когда рассматриваемый объект обладает весьма тонкой структурой (точка, линия, сетка и т. п.).

Изображение точки, создаваемое безаберрационной оптической системой, по законам геометрической оптики имеет вид точки, а в результате дифракционных явлений это изображение принимает вид очень маленького пятна, окруженного слабыми кольцами. В более общем случае обычной оптической системы, обладающей аберрациями, влияние волновой природы света сказывается только в том, что аберрационная картина, почти не изменяющаяся по своим размерам и общему виду, принимает лишь более замысловатый вид с появлением весьма тонких темных и светлых линий, создающих иногда красивые, сложные узоры. Одним словом, из прямых наблюдений изображений предметов, обладающих тонкой структурой, получается впечатление, что дифракционные явления лишь несколько перераспределяют световую энергию внутри изображения предмета, мало влияя на картину изображения в целом. Можно еще сказать, что волновая природа света вносит лишь незначительные корректизы в картину изображения предметов, обусловливаемую законами геометрической

оптики: этими поправками можно пренебречь во всех случаях, когда не требуется углубленного изучения изображения.

Когда рассматривается изображение не точки или объекта, обладающего тонкой структурой, а равномерных площадей более заметных размеров (зависящих от разрешающей способности оптической системы), та никакой тонкой структуры в изображении уже не обнаруживается, и картина изображения имеет вид, определяемый законами геометрической оптики. В этом случае влияние дифракции практически полностью пропадает.

Изложенными обстоятельствами объясняется общепринятое в курсах геометрической оптики и теории оптических приборов расположение материала, согласно которому самое начало курса посвящено изложению теории изображений, основанной на простых законах геометрической оптики, а лишь много позже, иногда мелким шрифтом или в виде необязательных для чтения дополнений, появляется глава о дифракционном изображении точки.

Легко показать, что вытекающее из такого расположения материала представление о роли волновой природы света в корне неправильно. У читателя создается впечатление, что при незначительном изменении оптической системы, не вносящем никакого изменения в геометрическую картину изображения (например, при изменении толщины части поверхности на величину, не обнаруживаемую глазом), не должно происходить никакого заметного изменения и в картине изображения. В действительности может оказаться, что при этом изображение становится неузнаваемым, в частности, оно может полностью исчезнуть» [1, с. 142—143].

Вот к чему приводит иногда метод слепого моделирования. Научные работники, привыкшие к той или иной модели, нередко забывают о границах ее применимости и тем тормозят познание нового.

Очень часто при решении оптических задач нельзя руководствоваться мнением, что образование изображения можно получить методами геометрической оптики, а учет волновых явлений дает лишь небольшие уточнения. Разумеется, никому не приходит в голову создавать на основе геометрической оптики теорию дифракционной решетки или какого-либо интерферометра. Однако в ряде промежуточных случаев явления дифракции и интерференции кажутся несущественными, а на самом деле они играют ведущую роль. В книге [1] приведен ряд характерных примеров. Остановимся на некоторых из них.

**Амплитудные фильтры.** На изображение точки влияют не только фазы приходящих волн, но и их амплитуды.

Пусть на выходном зрачке оптической системы поставлен

фильтр. Если фильтр нейтральный, то он не изменяет относительного распределения освещенности в изображении и, следовательно, не изменяет его контрастности. Во всех остальных случаях ситуация изменяется. Если фильтр имеет вид диафрагмы, пропускающей свет только через небольшую центральную точку, то первоначальное изображение точки расплывается, центральное пятно расширяется, дифракционные кольца отходят от центра. Разрешающая способность системы существенно ухудшится.

Если поступить наоборот и задиафрагмировать весь входной зрачок, кроме узкого кольца на самом его краю, то диаметр центрального пятна изображения сокращается, но возрастает интенсивность дифракционных колец, приближаясь к интенсивности центрального пятна. Разрешающая способность, определяемая обычным способом, казалось бы, увеличивается. Однако на самом деле из-за увеличения яркости колец диаметр изображения точки фактически растет и, следовательно, контраст падает.

Следующий, особенно характерный пример доказывает сильное влияние амплитудного фильтра. Поставим около входного зрачка зонную пластинку (см. гл. 2, § 2) — совокупность попеременно прозрачных и непрозрачных колец одинаковой площади. На выходе из оптической системы кроме обычного изображения, ослабленного по освещенности в два раза, наблюдается еще ряд вторичных изображений, сильно окрашенных и довольно слабых.

Таким образом, влияя на амплитуды волн, проходящих через различные места входного зрачка, можно существенно трансформировать изображение точки.

**Фазовый контраст в микроскопии.** При микроскопическом исследовании прозрачных и бесцветных биологических препаратов часто вообще ничего не видно. Для получения изображения производят окраску препарата, но иногда она приводит к гибели живых существ.

В сороковых годах нашего века Ф. Цернике<sup>11)</sup> был предложен метод фазового контраста, основанного на введении разности фаз.

Расскажем об этом методе сокращенно, без деталей. Подробности можно найти в [1] и специальной литературе. Суть

---

<sup>11)</sup> Ф. Цернике (1888—1966 гг.) — нидерландский физик. Основные работы посвящены электромагнетизму и оптике. Особое внимание уделялось дифракционной теории изображений при наличии aberrаций. Метод фазового контраста предложен в 1934 г. В 1935 г. создан фазовоконтрастный микроскоп. Несколько позже Цернике разработал методику расчета степени когерентности для света от некогерентного источника, метод расчета функций корреляции флуктуации плотности и формулу для интенсивности рассеянного света в области критической опалесценции.

метода — как можно совсем простыми средствами увидеть невидимое.

На рис. 6.4.1 изображен типичный ход лучей в объективе микроскопа. Здесь  $S$  — источник света,  $CC'$  — линза, создающая параллельный поток света,  $BA$  — плоскопараллельная стеклянная прозрачная пластинка, в центр которой вкраплено исследуемое прозрачное вещество,  $LL'$  — объектив микроскопа. Показатель преломления исследуемого вещества отличается от показателя преломления стекла на небольшую величину  $\Delta n$ . В обычных условиях работы микроскопа вкрапление в точке  $O$  будет не видно.

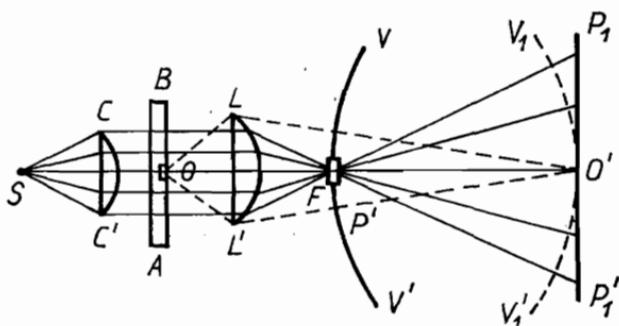


Рис. 6.4.1. Схема фазового контраста

ется от показателя преломления стекла на небольшую величину  $\Delta n$ . В обычных условиях работы микроскопа вкрапление в точке  $O$  будет не видно.

Параллельный пучок света, выходящий из линзы  $CC'$ , проходит пластинку  $BA$  без изменения направления и затем объективом  $LL'$  фокусируется в точке  $F$ . В то же время исследуемое вещество в точке  $O$  становится источником дифрагированных волн  $OL, OL'$ . После прохождения объектива эти волны собираются в точке  $O'$  — изображении точки  $O$ .

Таким образом, ход лучей, проходящих в точке  $O$  через вкрапление, существенно отличается от хода лучей, проходящих все остальные части пластинки  $BA$  и образующих в плоскости  $P_1P'_1$  светлый фон. Однако если точку  $O'$  наблюдать в окуляр микроскопа, то на светлом окружающем фоне изображение вкрапления незаметно.

На рис. 6.4.2 ордината  $O'A$  характеризует амплитуду равномерного фона, а кривая с максимумом  $O'A'$  — распределение амплитуд изображения точки  $O$  вдоль направления  $P_1P'_1$ . Подсчет показывает, что разность фаз между соответствующими волнами мала, и именно поэтому изображение вкрапления очень нечетко.

Идея Цернике проста и эффективна. Он предложил поставить в фокусе  $F$  тонкую стеклянную четвертьволновую пластинку, вносящую разность фаз  $\pi/2$  между лучами фона и

лучами, формирующими изображение точки  $O$ <sup>12)</sup>. Кроме того, пластина должна ослаблять интенсивность фона так, чтобы амплитуда  $O'A$  сравнялась с амплитудой  $O'A'$ . В результате световые векторы становятся равными по величине и обратными по направлению. Но это справедливо только для центра изображения вкрапления. По мере отклонения от него освещенность изображения быстро увеличивается (рис. 6.4.3).

Таким образом, при использовании метода Цернике в месте изображения вкрапления мы получим темную точку на

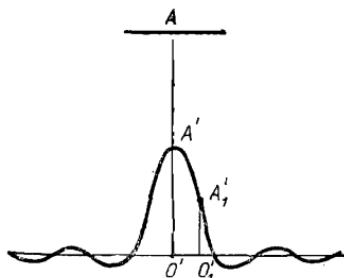


Рис. 6.4.2. Ход амплитуды двух групп колебаний, распространяющихся через микроскоп

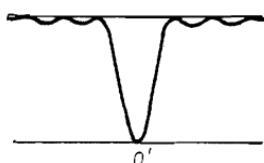


Рис. 6.4.3. Кривая освещенности изображения вкрапления при устройстве, использующем метод фазового контраста

светлом фоне и тем самым зафиксируем существование вкрапления, т. е. предмета, который мы хотим выявить с помощью микроскопа. Так как погруженная в жидкость клетка (или иной биологический объект) может вносить некоторую разность фаз, то при использовании метода фазового контраста желательно иметь устройство, в котором было бы легко изменять и фазу, и амплитуду.

Метод фазового контраста получил в настоящее время широкое распространение. И не случайно за эти работы Цернике был удостоен в 1953 г. Нобелевской премии. Невидимое стало видимым. Стало возможным то, что казалось невозможным. Тут мы встретились еще с одним, более углубленным пониманием свойств материального мира, часто неожиданных и на первый взгляд невероятных.

\*

Так как амплитудно-фазовые фильтры изменяют распределение освещенности в дифракционном изображении любого предмета (и, в частности, точки) в самых широких пределах<sup>13)</sup>, то естественно попытаться использовать их для увеличения разрешающей способности оптических приборов.

<sup>12)</sup> На первый взгляд кажется, что надо ввести разность фаз  $\pi$ , а не  $\pi/2$ . Однако это не так (см. [1]).

<sup>13)</sup> Теоретически можно получить все, что угодно, любое желаемое распределение интенсивности.

Начатые исследования привели к формированию целого направления вычислительной оптики (аподизация). Особо серьезных результатов оно не дало. «Применение амплитудных фильтров может принести в некоторых случаях пользу. Но, как правило, всякое насилиственное изменение (в сторону улучшения) одних свойств неизбежно приводит к ухудшению других не менее важных свойств».

Нам кажется, что здесь Слюсарев не совсем прав, слишком категоричен. Ведь он сам только что доказал, что использование фазового контраста в микроскопе дает очень хорошие результаты. Но основная мысль, очевидно, правильна — она непосредственно вытекает из корпускулярно-волнового дуализма материи, света и вещества, из принципа дополнительности. Увеличение точности измерения одной стороны объективного мира всегда сопровождается понижением точности наших сведений о его второй стороне. Это неизбежно. Но верно и то, что этот дуализм точности надо уметь использовать в интересах более глубокого знания.

Один из следующих параграфов книги [1] называется «Интерференционные линзы». Он посвящен прежде всего зонной пластинке, о которой мы уже говорили. Эта пластинка есть удачная реализация возможностей, вытекающих из изменения амплитуд и фаз тонких пластинок.

Как мы помним, зонная пластинка способна фокусировать падающее на нее параллельное монохроматическое излучение. В реальности это обстоятельство можно использовать. Но, как и всегда, сразу же возникают «темные пятна». Зонная пластинка обладает не одним, а бесконечно большим числом фокусов. Их величина равна

$$f_k = \frac{h^2}{2\lambda k},$$

где  $h$  — радиус внешней окружности первого темного кольца, а  $k$  — целое число.

Наличие многих фокусов, конечно, неприятно, приводит к потерям света<sup>14)</sup>. Так же как и в дифракционной решетке, с ними можно бороться. Вуд предложил, в частности, на место непрозрачных слоев наносить слои, создающие разность хода в полволны. Это в четыре раза усилило количество света, собирающегося в первом максимуме, но наличие многих фокусов все же сохранилось.

Если элементы зонной пластинки сложного профиля, то зонная пластинка может давать резкое и единственное изображение.

<sup>14)</sup> Столь же неприятно иногда наличие у дифракционной решетки максимумов многих порядков. Но, как известно, изменяя форму штриха отражательной решетки, удается сконцентрировать большую долю света в одном из максимумов.

**Просветление оптики.** Отражение света от поверхностей линз и призм становится серьезной причиной, существенно ухудшающей эксплуатационные качества оптических приборов. Это относилось прежде всего к фотоаппаратам до тех пор, пока не научились просветлять оптику. Отражение света не только уменьшает светосилу прибора, но и создает внутри прибора большое количество бликов, которые попадают на приемник и резко ухудшают качество изображения.

Отражение света на границе, разделяющей две среды с различными показателями преломления, описывается, как известно, формулами Френеля. При нормальном падении

$$R = \frac{I}{I_0} = \frac{(n-n_0)^2}{(n+n_0)^2}.$$

Если  $n_0=1$  (воздух), а  $n \sim 1,5$  (стекло), то значение  $R$  равно 0,04. Примерно такие же коэффициенты отражения при углах падения от 0 до  $30^\circ$ . «Поскольку из закона Френеля вытекает невозможность уменьшить количество отраженного света ниже определенного предела, неудивительно, что наличие отраженного света при преломлении казалось до последнего времени абсолютно неустранимым. Создание в 20-е годы нашего столетия просветляющих слоев, над которыми успешно работали в СССР И. В. Гребенщиков и А. А. Лебедев<sup>15)</sup>, вызвало удивление.

Возможность просветления оптики оказалась неожиданной, однако ничего удивительного здесь нет; возможность уменьшения отражения даже без применения интерференции вытекает из элементарных соображений.

На рис. 6.4.4, *a* приведены три среды с показателем преломления  $n=1, 1,25$  и  $1,5$ . Потери света на отражение на границе между первой и второй средой равны  $(0,25/2,25)^2=0,012$ . На следующей границе они примерно такие же:  $(0,25/2,75)^2=$

<sup>15)</sup> А. А. Лебедев (1893—1969 гг.)—ленинградский физик. С 1919 г. работал в Государственном оптическом институте. Известен своими работами в области прикладной и электронной оптики. Изучал процесс отжига стекла. Разработал ныне общепринятую кристаллическую теорию стеклообразного состояния. А. А. Лебедев один из первых начал систематические исследования методов просветления оптики. С его именем связано внедрение интерференционных методов в метрологию, атмосферную оптику, оптическую локацию. Еще в 1930 г. А. А. Лебедев начал свои первоклассные работы в области электронной оптики. Им рассчитаны разнообразные электронно-оптические системы, созданы схемы многих приборов этого типа. Первым использовал электронные линзы в электронно-оптических устройствах. Руководил работами по созданию первых в СССР электронных микроскопов.

Здесь отмечено отнюдь не все, сделанное А. А. Лебедевым. Все, работавшие рядом с ним, всегда восхищались его неутомимым творчеством, его оригинальными и неожиданными идеями.

И. В. Гребенщиков (1887—1953 гг.)—ленинградский химик, изучавший химию и технологию варки оптического стекла. Работал в Государственном оптическом институте со дня его основания.

=0,008. Сумма потерь составляет всего 0,020. Если бы промежуточного слоя не было, то они были бы равны 0,04. Введение промежуточного слоя уменьшает потери вдвое.

Если бы мы увеличили число промежуточных слоев, а их показатели преломления были бы равны 1,05; 1,10; 1,15; 1,20, ..., 1,45, то суммарные потери света на отражение уменьшились бы в 10 раз (до 0,004).

Осуществление такой системы технически невозможно вви-

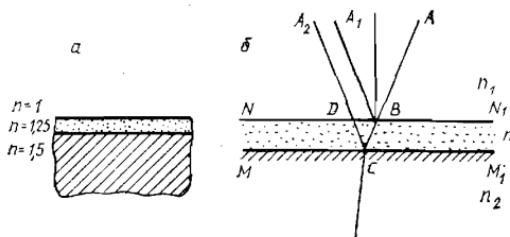


Рис. 6.4.4. Уменьшение потерь на отражение: *а* — без применения явления интерференции, *б* — с применением явления интерференции

ду отсутствия твердых прозрачных тел с показателями преломления, близкими к 1.

Реальное просветление оптики достигается значительно более простым путем даже с одним, очень тонким промежуточным слоем, но с применением явления интерференции. Схема процесса изображена на рис. 6.4.4, б. На практике обычно первая среда — воздух ( $n_1=1$ ), вторая — стекло ( $n_2=1,5$ ). Часть излучения от падающего потока  $AB$  отражается от поверхности  $NN_1$  в направлении  $BA_1$ , часть преломляется по направлению  $BC$  и в точке  $C$  частично отражается, частично преломляется. Яркость отраженного луча  $DA_2$  вычисляется по формулам Френеля. При  $n=\sqrt{n_2}$  яркость луча  $BA_1$  равна яркости луча  $DA_2$ . Если разность хода ( $BC+CD$ ) между лучами  $ABCDA_2$  и  $ABA_1$  равна  $\lambda/2$ , то вследствие интерференции когерентных лучей  $DA_2$  и  $BA_1$  суммарная яркость отраженного света равна нулю; вся энергия преломляется.

Удивительно просто! И тем не менее как долго такая простая мысль никому не приходила в голову.

В настоящее время для просветления оптических аппаратов используется не один, а несколько интерференционных слоев.

Недостаток «интерференционного» способа устранения отраженного света — зависимость интенсивности отраженного потока от длины волны. Полное устранение отраженного света достигается только для одного значения  $\lambda_0$ . Даже при малых отклонениях  $\lambda$  от  $\lambda_0$  лучи заметно отражаются. Это создает в проходящем свете фиолетовый оттенок. Именно по

этой причине пришлось применять двухслойные и трехслойные просветления.

Нанесение тонких слоев на поверхность стекла позволяет решить и обратную задачу — увеличить отражающую способность поверхности. С их помощью удается также увеличить отражательную способность металлических и даже диэлектрических покрытий, которые наносятся на стекло при изготовлении зеркал. В частности, отражающая способность серебра может быть повышена с 92 до 99 %.

Более подробные сведения об оптике тонких слоев можно найти в [24, 25].

**Еще раз о разрешающей способности оптической системы.** В конце своей монографии Слюсарев вернулся к вопросу о разрешающей способности оптической системы. Он считает его ключевым. Многим кажется, что если избавиться от aberrаций и помех атмосферы и если приемник сам не вносит каких-либо изменений в картину изображений, то опытный дешифровальщик по картине изображения сумеет восстановить изображаемый предмет.

«К сожалению, это не так. Весьма сложный математический анализ, основанный на применении формул, вытекающих из принципа Гюйгенса—Френеля, показывает, что одной и той же картине изображения соответствует не один объект (точнее, не одно распределение яркостей в плоскости предмета), а бесконечно большое число. Если предмет имеет периодическую структуру (как, например, дифракционная решетка), более тонкую, чем оптическая система может разрешить согласно элементарной теории Аббе<sup>16)</sup>, то оптическая система как будто «не пропустит» этой структуры через объектив, и как бы подробно ни было изучено распределение энергии в изображении предмета, нельзя однозначно определить его форму» [1, с. 166].

Здесь необходимо заметить: если мы знаем какие-либо дополнительные сведения о предмете из других источников (например, из исследования спектрограмм), то неопределенность в истолковании картины изображения уменьшается. Одно сведение порождает ряд других.

В том же параграфе было замечено, что образование изображений оптической системой можно трактовать как передачу информации. В то время теория информации только начинала развиваться. Однако сейчас достигнут очень большой прогресс. Теория информации позволяет рассматривать оптические

<sup>16)</sup> Э. К. Аббе (1840—1905 гг.) — немецкий оптик. Совладелец предприятия «Карл Цейс Иена», выпускавшего по тем временам лучшие оптические приборы. Разработал теорию образования изображения в микроскопе, построил первый современный микроскоп, создал ряд других оптических приборов (рефрактометр Аббе, конденсор Аббе, ахроматический объектив...). Разрабатывал технологию оптико-механического производства.

ские изображения с новых точек зрения. Благодаря аналогии между различными колебательными процессами теория информации позволяет переносить результаты, полученные в одной области науки и техники, в другие.

Отдавая дань новым возможностям теории информации, Г. Г. Слюсарев тут же проявляет свой столь полезный, хотя и не всегда справедливый скепсис:

«... Следует отметить, что теория информации не открыла и не может открыть новых возможностей ни в улучшении качества изображений, ни в умении извлечь больше пользы из рассматривания картины изображения. Таким образом, эта теория не может передвигать границы «возможного» в оптике, она дает лишь новый язык в распоряжение исследователей» [1, с. 169]. И тут же знаменательная оговорка: «Впрочем, известны случаи, когда новый язык приводит к новым идеям». И теория информации эти новые идеи, разумеется, дала.

В 1968 г. в своем докладе на чтениях имени Д. С. Рождественского «О возможном и невозможном в оптике» [12], Слюсарев вновь вернулся к вопросу о разрешающей способности оптических приборов и попытался выяснить — что же новое можно сказать с учетом работ последующих 11 лет.

«Наиболее достопримечательным в оптике за последнее десятилетие следует считать то направление поисков, которое ставит целью добиться от оптических систем большего объема информации по сравнению с тем, который мы имеем в классических системах. Очевидно, этот объем определяется наибольшим числом деталей предмета, которые мы можем обнаружить, рассматривая изображение предмета через оптическую систему. Этот вопрос — один из самых существенных в теории оптических приборов и имеет большую давность; на нем и следует остановиться подробнее.

Декарт писал, что если бы нашелся мастер, умеющий изготавливать совершенные оптические поверхности из вполне однородного стекла, то на Луне и на планетах можно было бы увидеть живые существа. Выражаясь современным языком, Декарт считал разрешающую способность оптических систем в принципе бесконечной. Это вполне естественно, так как дифракция была открыта Гриимальди значительно позже.

Эри (1831 г.) первый рассчитал распределение энергии в изображении звезды, образованном идеальной зрительной трубой с круглым зрачком. В конце XIX в. Рэлей использовал его расчеты для определения разрешающей способности астрономических труб без учета турбулентности атмосферы. Впрочем, значительно раньше лабораторными экспериментами была установлена связь между разрешающей силой и диаметром зрачка; тест-объектом (т. е. объектом для испытания оптических систем) служила всем известная мириа Фуко, состоящая из равномерно освещенных чередующихся ярких и

темных полос равной ширины. Миры служили для определения качества изображения, даваемого подлежащей исследованию оптической системой, а впоследствии использовались и для определения разрешающей способности.

У микроскопистов был ряд преимуществ по сравнению с астрономами: возможность создания тест-объектов почти любых размеров и любой формы, практическая неограниченность яркости наблюдаемых картин, отсутствие турбулентности. Поэтому со временем накопился огромный материал, на основании которого было показано, в частности, Листером, что разрешающая способность пропорциональна численной апертуре объектива. Однако само понятие разрешающей способности было еще неясным и требовало уточнения.

Строгая формулировка понятия разрешающей способности впервые дана Аббе в 1874 г.; в качестве объекта служила дифракционная решетка, освещенная параллельным когерентным пучком, а в качестве оптической системы — микроскоп. Аббе определил разрешающую способность как предельное число штрихов на миллиметр решетки, изображение которой, даваемое микроскопом, обладает контрастом, отличным от нуля. Если число штрихов при том же микроскопе (при одном и том же способе освещения объекта) больше предельного, то изображение этой решетки сливается в общий равномерный фон.

В случае, рассматриваемом Аббе, существует вполне определенная граница, выше которой изображение вообще отсутствует и никаким образом не может быть восстановлено.

Четверть века спустя Рэлей дал иное определение разрешающей способности. Объектом служили два одинаковых некогерентных точечных источника, например две звезды одинаковой величины, находящиеся на близком угловом расстоянии друг от друга. Согласно Рэлею, этот объект разрешается, если в картине изображения между звездами наблюдается провал освещенности не ниже 20% от максимумов (у Рэлея формулировка несколько иная, но она сводится к сказанному).

Формулировки Аббе и Рэлея в сущности ничего общего не имеют. Первая относится к решетке, освещаемой когерентным светом, вторая — к двум самосветящимся точкам. И тем не менее формулы для разрешающей способности (если их привести к одинаковым оптическим системам, например к микроскопу) получаются одинаковыми, с точностью до некоторого численного коэффициента  $k$ . В случае когерентного освещения этот коэффициент  $k$  может изменяться от 0,5 до 1 в зависимости от положения светящейся точки, а в случае двух некогерентных точек он равен 0,61, т. е. лежит в этих же пределах. Формула имеет вид

$$Z = k\lambda/n \sin \varphi.$$

Здесь  $Z$  — наименьшее расстояние либо между штрихами решетки, либо между двумя самосветящимися точками,  $\lambda$  — длина волны,  $n$  — показатель среды, в которой находится объект,  $\Phi$  — апертурный угол пучка.

Однако, несмотря на такое поразительное, с первого взгляда, совпадение, эта формула приводит к совершенно противоположным выводам, если подойти к вопросу с точки зрения предела разрешающей способности или, точнее, с точки зрения восстановления объекта по его изображению. К этим выводам мы вернемся позже».

Весь следующий параграф посвящен вопросу, возможно ли восстановить объект по его изображению, и связи между предметом и его изображением.

«Всякий плоский некогерентный предмет может быть представлен в виде некоторой функции  $O = f(y, z)$ , где  $O$  — яркость элемента объекта в точке с координатами  $y$  и  $z$ . Распределение освещенности  $I$  на изображении можно получить в виде суммы освещенностей, даваемых каждым из изображений, полученных от различных точек объекта. Пусть  $A$  — функция, представляющая собой распределение освещенности в изображении точки, даваемом рассматриваемой системой (иногда  $A$  называют аппаратной функцией). Аналогичные формулы получаются для когерентного света, но под  $O$  и  $I$  следует понимать распределение комплексных амплитуд.

Предположим, что на протяжении всего объекта  $A$  не меняет своего вида (т. е. оптическая система обладает свойством изопланатизма). Пусть  $O(y, z)$  — распределение яркости в объекте, расположенному в плоскости  $yz$ . Тогда можно написать

$$I(y', z') = \iint O(y, z) A(y' - y, z' - z) dy dz. \quad (*)$$

По этой формуле можно вычислить  $I$ , но, поскольку  $A$  из-за дифракции представляет собой быстро изменяющуюся функцию от  $y$  и  $z$ , эти вычисления требуют большого труда и практически могут быть осуществлены только с помощью ЭВМ. Еще сложнее решение обратной задачи. Предположим, что на основании точных измерений известны распределение  $I(y', z')$  и аппаратная функция  $A$ . Требуется найти распределение яркости  $O$  на объекте. Формально можно рассматривать  $(*)$  как интегральное уравнение, решение которого относительно неизвестной функции дает искомое распределение. На практике же это решение наталкивается на непреодолимые препятствия. Однако свойства преобразований Фурье позволяют упростить решение интегрального уравнения, сводя его к вычислению определенного интеграла весьма сложного вида. Этот интеграл был подробно изучен Хургиным и Яковлевым...

Сложность выражений для функций  $I$  и  $A$  не дает возможности найти простые правила, указывающие, в каких случаях

определенному  $I$  соответствует одно единственное распределение  $O$ , причем такое, что бесконечно малому изменению распределения  $I$  соответствует бесконечно малое изменение  $O$ . Как правило, если  $O$  обладает периодической структурой, частота которой превышает известный предел, его определение становится принципиально невозможным, так как число решений бесконечно велико.

Совсем иначе обстоит дело, когда объект состоит из двух одинаковых некогерентных источников (звезды Рэлея). Здесь объект может быть восстановлен единственным образом при любом расстоянии между точками. Это тот случай, который позволил ряду ученых, в первую очередь С. И. Вавилову, еще в 30-х годах ... утверждать, что дифракция не должна ставить предела возможности различения объектов при условии соответствующей обработки (десифровки, декодировки) результатов измерений изображения.

Какие выводы вытекают из этих прямо противоположных результатов?

О случаях периодических структур объекта при когерентном освещении спорить не приходится. Со временем Аббе известно, что для когерентных периодических структур типа решеток существует предельная частота, после которой изображение превращается в сплошной однородный фон; очевидно, в последнем случае никакое восстановление объекта невозможно. Игнатовский доказал, что то же происходит, если объект состоит из дискретных равноотстоящих бесконечно малых элементов, составляющих сетку, если они освещены когерентным светом. Д. Ю. Гальперн распространил этот вывод на случай некогерентных периодических структур. А если это так, то, поскольку любой объект состоит из наложения периодических структур разных частот, амплитуд и направлений, вывод о невозможности воспроизведения предмета по дифракционному изображению является универсальным.

Однако выше было показано, что исследование объекта Рэлея приводит к противоположному выводу и что, по Рэлею, разрешающая способность оптической системы бесконечна. Этот парадокс объясняется тем, что объект Рэлея, по определению, состоит из двух точек равной яркости и на него наложено весьма существенное (и незаконное с точки зрения общей теории) ограничение. Если, как это предполагается в общей теории, структура объекта совершенно произвольна и заранее неизвестна, он может состоять или из двух точек различной яркости, или даже из любого числа звезд различной яркости; среди них могут оказаться и звезды ненулевого углового диаметра и т. д. В общем случае число неизвестных параметров системы становится бесконечно большим, и единственность решения даже в теоретическом аспекте становится более чем сомнительной.

Приведенные выше рассуждения являются интуитивными, но они могут служить отправной точкой для объяснения тех противоречий, которые возникают при сравнении метода воспроизведения объекта по Аббе и по Рэлею.

В настоящее время вопрос о возможности или невозможности воспроизведения предмета по изображению потерял свою остроту. После того, как в оптике появилось заимствованное из теории связи понятие шума (помех), вызванного флуктуациями числа фотонов, образующих изображение, рассеянием света в оптической системе, турбулентной атмосферы, структурой приемников и другими причинами, влияющими на контраст деталей изображения, стало ясно, что пределы разрешающей способности оптических приборов определяются преимущественно последними причинами» [12, с. 9—11].

Концовка здесь не совсем понятна. Ведь и раньше, когда возникал вопрос о связи изображения с его предметом, всегда знали о рассеянии света в оптической системе, о влиянии атмосферы, о влиянии типа приемника... Разумеется, эти причины существенны, но и основной вопрос об определении вида функции  $O(y, z)$  по значению  $I(y', z')$ , полученной на опыте, полностью сохраняет свое значение. Вопрос, поставленный выше, пока еще ждет своего решения<sup>17)</sup>.

**Косвенные способы распознавания объектов и спектров.** И здесь много интересных исторических фактов, так что мы снова обратимся к работе [12]:

«Прямые способы распознавания объектов наталкиваются на серьезные ограничения, обусловливаемые в первую очередь такими недостатками оптических систем, как аберрации, искажения, вызываемые дифракцией и всякого рода помехами. Поэтому не остается другого выхода, как использование косвенных методов изучения тех или иных свойств рассматриваемых объектов.

Одним из первых примеров такой косвенной обработки может послужить выполненное в 1869 г. Флегелем определение структуры диатомей по спектру, создаваемому ими при освещении параллельным пучком и наблюдаемому в зрительную трубу. Результаты этой работы, полученные еще до опубликования статей Аббе по теории микроскопа, были подтверждены лишь в последние годы, и то только с помощью электронных микроскопов.

Другим примером может служить восстановление Л. Брэг-

<sup>17)</sup> В последнее время широко разрабатывается новое направление, связанное с превышением классического предела разрешения путем аналитического продолжения световой волны за пределы рабочей апертуры оптической системы с использованием теоремы отсчетов и других способов. По этим вопросам недавно опубликована монография [28]. Возможности данного направления, по-видимому, еще не выяснены; авторы не дают четкого ответа на вопрос, достигнуты ли здесь какие-либо реальные успехи.

том (1942 г.) кристаллической решетки на основании дифракционной картины, создаваемой рентгеновскими лучами. Эта работа Брэгга побудила Д. Габора к исследованиям, породившим голограмию...

Наиболее впечатляющие результаты в области косвенных методов были получены Майкельсоном с помощью его интерферометра. Установка для определения угловых диаметров звезд была разработана Майкельсоном после того, как ему стали известны от астрономов предполагаемые величины угловых диаметров наиболее близких звезд. Оказалось, что для обнаружения наблюдаемого эффекта необходимо располагать телескопом с диаметром 10—15 м, что было явно неосуществимо в те времена, когда диаметр наибольших телескопов не-намного превышал 1,5 м. Но именно Майкельсону было не-трудно сообразить, что эффект обнаружения отличного от нуля диаметра звезд еще точнее можно установить и даже измерить, используя интерференцию, создаваемую двумя не-большими зеркалами, удаленными друг от друга на расстояние 10—15 м и направляющими свет от звезды в фокус большого зеркала. Эта установка, не требующая зеркал больших размеров, дает возможность вместе с тем получить значительно более четкую и доступную измерению картину круга, пересеченного большим числом резких интерференционных линий, контраст которых позволяет определить диаметр звезды. Таким образом, метод, предложенный Майкельсоном в обход прямого пути, привел к значительному упрощению измерительного прибора и уточнению измерений.

Второй идеи Майкельсона, являющейся развитием только что изложенной, суждено было осуществить переворот в методике спектрального анализа.

Исторически сложилось так, что спектральный анализ основывался на изучении картины, представляющей развертку щели дисперсионной системой (призмой или решеткой). Эта картина носит название спектра, и со времен Бунзена и Кирхгофа применялись почти исключительно спектральные приборы этого типа. Однако классическая схема не отличается ни высокой разрешающей способностью, ни светосилой и в отдельных случаях, например при изучении тонких структур и слабо светящихся объектов, оказывается мало пригодной.

Майкельсону в процессе работы над измерением нормального метра в длинах волн спектральных линий понадобились источники тончайших линий, для изучения которых обычные спектральные приборы не давали достаточного разрешения. Он применил для этой цели недавно построенный им интерферометр, создававший не спектр в обычном понимании этого слова, а довольно сложную интерференционную кольцевую картину. Если эту картину рассматривать при различных

положениях перемещающегося зеркала и оценивать хотя бы на глаз (как вынужден был поступить Майкельсон из-за отсутствия приемников) изменение контраста между видимыми в приборе линиями в зависимости от перемещения зеркала, то можно получить точное представление о структуре спектральной линии (по крайней мере, когда структура симметрична). Для перехода от кривой изменения контраста к спектральному распределению Майкельсон использовал гармонический анализ и даже построил остроумный прибор, решающий задачу отыскания коэффициентов ряда Фурье по ординатам анализируемой функции. Однако малая точность измерений контраста, сложность вычислений и неоднозначность их результатов в общем случае привели к тому, что метод Майкельсона был надолго забыт.

Лишь полвека спустя (1952 г.) Фелджет обратил внимание на то, что интерферограмма, т. е. кривая зависимости величины потока, выходящего из интерферометра, от разности хода в обеих ветвях интерферометра, связана преобразованием Фурье со спектрограммой — кривой зависимости потока от частоты колебаний.

Основное преимущество метода Майкельсона заключается в том, что при одной и той же площади зрачка используемый размер источника света значительно больше, чем в обычных схемах спектрографов; это преимущество связано с тем, что в первом случае могут применяться источники круглой формы вместо узких и коротких щелей, которые используются в спектрографах. Доказано работами Жакино, Коня, Паршина и др., что при одинаковых величинах разрешения и площади входного зрачка приборов методика Майкельсона приводит к меньшему времени регистрации, что оказалось особо ценным при спектральном исследовании таких слабых объектов, как ночное небо.

Новый метод спектральной регистрации получил широкое распространение, и появился ряд приборов, основанных на использовании схемы Майкельсона. Новое направление получило название фурье-спектроскопии.

Обработка интерферограммы с целью получения спектрограмм требует довольно сложного вычислительного процесса, но современные электронно-вычислительные машины и другие специальные машины позволяют выполнять этот процесс в достаточно короткие сроки» [12, с. 11—12].

**Некоторые итоги.** Далее в статье Г. Г. Слюсарева говорится о голограмии, о сверхразрешении, о вмешательстве в структуру изображения.

Здесь хочется подчеркнуть два момента.

1. После второго издания книги Г. Г. Слюсарева (1957 г.) до его доклада на ту же тему [12] прошло всего 10 лет. Но как много нового произошло в оптической науке, фундамен-

тального, принципиально важного, серьезно изменившего наши представления как о свойствах света и вещества, так и о методах познания законов окружающего мира. Это — лазеры и связанные с ними новые отрасли науки и техники (о нелинейной оптике Слюсарев еще не говорит). Это — голограммия. Это — фурье-спектроскопия. Это — волоконная оптика. Всего за 10 лет. Подлинные перспективы новых отраслей знания выявились не сразу. Когда был создан первый мазер, столь бурное последующее развитие лазерной физики еще не предполагалось. Об истоках фурье-спектроскопии было только что сказано. Она базируется на методе Майкельсона, предложенном за полвека до этого и незаслуженно забытом.

Стоит сказать предварительно несколько слов и об истории голограммии. Она родилась сперва как новый метод повышения разрешающей способности в обход классических способов достижения той же цели. В 50-х годах английский оптик Габор поставил себе целью довести разрешающую способность электронного микроскопа до теоретического предела. Как писал сам Габор, он попытался обойти возникший барьер, не преодолевая его. Для этого Габор предложил двухступенчатый процесс, в котором предмет регистрируется с помощью пучка электронов, а восстанавливается с помощью светового потока.

С точки зрения оптических свойств объект полностью определяется, если известно распределение на нем амплитуд и фаз. Габор создавал практически точечный источник когерентных электронов, который «освещал» исследуемый объект. После прохождения объекта пучок электронов расщеплялся дифракцией, а лучи, проходящие мимо объекта, образовывали опорный пучок, который интерферировал с дифрагированным и образовывал на фотопленке, находящейся на довольно большом расстоянии от объекта, сложную картину. На этой картине, названной голограммой, были зашифрованы все свойства объекта<sup>18)</sup>. Польза от голограмм была бы мала, если бы для ее расшифровки требовались сложнейшие расчеты. Однако, как показал Габор, восстановление голограммы может происходить с помощью оптических устройств по схеме, напоминающей условия ее записи. Главная цель Габора в то время — компенсация aberrаций, которые в электронных устройствах очень велики.

Но, справившись с этой частной задачей, Габор создал одновременно новую важнейшую науку, позволяющую решать множество других технических задач и, в частности, найти способы получения объемного изображения.

<sup>18)</sup> Для читателей, не знакомых с голограммой, суть первых опытов Габора вряд ли понятна. Мы описываем их здесь только для выяснения истории этого выдающегося открытия.

2. Когда говорится «о возможном и невозможном в оптике», надо быть осторожным. Ведь до Габора получение объемных изображений считалось невозможным. Такой вопрос даже не ставился. Получение лазерного луча тоже не ожидалось, это было предметом фантастики. (Ю. Н. Денисюк, Е. В. Ивакин, А. С. Рубанов и Б. И. Степанов показали, что обращение волнового фронта и превращение рассеянного света в направленный не противоречит «принципу необратимости». Принцип необратимости, хотя и был во многих случаях полезным, в данном, конкретном случае оказался несостоятельный.— Ред.)

Г. Г. Слюсарев также приводит много интересных примеров, когда косвенные методы распознавания объектов дают реальные и значительные результаты. Только почему эти методы названы им «косвенными»? Ведь они помогают решать важную задачу и во многих случаях однозначно.

Правда, пределы все же есть. Но это пределы, связанные с самой природой вещей, а не с недостатками нашего способа познания. Закон сохранения энергии нарушить нельзя. Но бесполезные затраты энергии устранять можно и нужно. Второе начало термодинамики применительно к замкнутым системам справедливо строго. Но мы живем в незамкнутом мире и процессы, сопровождающиеся уменьшением энтропии, и соответствующим упорядочением системы, вполне реальны.

Прав Г. Г. Слюсарев, когда пишет: «...Нужно подчеркнуть, что никакого повышения разрешающей способности выше теоретического предела голограмма не дает» [12, с. 14]. Но она дает много других ценных сведений о свойствах изображения, она обогащает наше знание мира, многое невозможное стало возможным.

Слюсарев отмечает, что ни одним из косвенных способов нельзя повысить значение разрешающей способности, установленное формулой Аббе

$$R_{\max} = \alpha A / \lambda,$$

где  $A$  — численная апертура, а  $\alpha$  — коэффициент, близкий к 2. Но он же привел описание ряда работ (мы их здесь опускаем), где достигнуто «сверхразрешение». В частности, оказалось, что понижением разрешающей способности в одном направлении можно повысить ее в другом, что очень существенно, когда объект обладает лишь одним измерением (штрихи). Практическое значение таких объектов велико, с ними связана точность наводки измерительных приборов. И здесь реализовано, казалось бы, невозможное.

Как мы видели, вопросу о возможном и невозможном в оптике были посвящены три публикации Г. Г. Слюсарева, относящиеся к 1944, 1957 и 1968 гг. Эта проблема систематически уточнялась и совершенствовалась, а иногда по некоторым

вопросам и изменялась в корне. Это было связано с развитием самой науки, техники эксперимента, с выявлением ее новых граней и возможностей. После 1968 г. процесс не остановился, не мог, разумеется, остановиться.

В следующем параграфе будет рассмотрен еще один аспект проблемы, связанный с применением соображений термодинамики. Новая методика анализа и снова новые важные следствия.

### § 5. НЕКОТОРЫЕ СЛЕДСТВИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ

**Справедливо ли уравнение Лагранжа—Гельмгольца?** В книге Г. Г. Слюсарева есть такие резюмирующие строки: «Закон Лагранжа — Гельмгольца справедлив для любой оптической системы, как угодно составленной из любого числа оптических частей, как отражающих, так и преломляющих. Никакими комбинациями оптических систем нельзя нарушить правильность этого закона, в котором таится гибель для всех надежд на идеальную концентрацию лучевой энергии».

Выражения, применяемые здесь, предельно категоричны. Однако в них можно и необходимо сомневаться. Как мы уже не раз отмечали, многое, ранее казавшееся невозможным, по мере дальнейшего развития науки становится не только возможным, но и реально осуществимым. Закон Лагранжа—Гельмгольца (5.2.8), разумеется, справедлив, но и он имеет определенные границы применимости. Этую мысль высказал в 1974 г. И. И. Собельман в статье «Еще раз о возможном и невозможном в оптике» [26].

Он пишет, что «речь идет не о какой-либо ревизии теории оптических приборов, а о том, можно ли ограничения на возможность преобразования световых пучков, типа закона Лагранжа — Гельмгольца, распространять на оптику вообще, т. е. придавать им универсальный характер» [26, с. 701].

И действительно, возникает вопрос, справедлив ли закон (5.2.8) вне пределов геометрической оптики Г. Г. Слюсарев считает, что справедлив. Он так и пишет: «Закон Лагранжа—Гельмгольца играет особо важную роль в фотометрических расчетах и является не чем иным, как одним из видоизменений принципа сохранения энергии»<sup>19)</sup> [1, с. 24].

Есть ли все-таки основания для столь широкого обобщения? Чтобы ответить, следует проанализировать способы обоснования Лагранжа—Гельмгольца. Понимая важность пробле-

<sup>19)</sup> Эта мысль повторяется многократно. Так, на с. 39 автор пишет: «Могло создаться впечатление, что закон Лагранжа—Гельмгольца верен только для обычных оптических систем, обладающих осью симметрии и для которых соблюдаются законы параксиальной оптики... На самом деле закон Лагранжа—Гельмгольца, поскольку он выражает закон сохранения энергии, имеет более общее значение».

мы, в приложении к монографии [1] дано два независимых вывода (5.2.8).

Оба вывода достаточно громоздки, и приводить их здесь не имеет смысла. Первый вывод основан на изучении хода светового потока вдоль световой трубы. На пути лучей — внутри световой трубы — может встречаться множество поверхностей, ограничивающих среды с разными показателями преломления. В процессе вывода используются только основ-

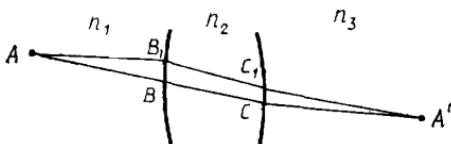


Рис. 6.5.1. Иллюстрация к выводу закона Лагранжа—Гельмгольца

ные положения фотометрии и закон преломления света. Закон сохранения энергии содержится неявно в определении понятия световой трубы — поток энергии через боковую поверхность такой трубы равен нулю.

Второй вывод (5.2.8) основан на принципе Ферма (см. [28, глава 2, § 9]). Согласно этому принципу, оптическая длина между двумя точками  $A$  и  $A'$  (рис. 6.5.1) равна

$$(AA') = n_1 AB + n_2 BC + n_3 CA',$$

где  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  — соответствующие показатели преломления,  $AB$ ,  $BC$  и  $CA'$  — пути, проходимые светом в первой, второй и третьей средах. Из принципа Ферма следует, что оптические пути для двух лучей  $ABCA'$  и  $AB_1C_1A'$ , исходящих из точки  $A$  и сходящихся в точке  $A'$ , равны друг другу. Такой же вывод, замечает Слюсарев, следует и из волновой теории Гюйгенса. Если считать, что точка  $A'$  есть изображение точки  $A$  в соответствующей оптической системе, то можно показать справедливость (5.2.8).

Приведенные в работе [1] доказательства всеобщности закона Лагранжа—Гельмгольца вряд ли убедительны, и Собельман, по нашему мнению, прав. Развитие оптики за последние 25 лет никак не укладывается в схемы геометрической оптики или даже элементарной волновой теории. В рамках голографии, квантовой электроники и нелинейной оптики предсказаны и затем обнаружены многие преобразования световых потоков, которые никак не описываются ни законом Лагранжа—Гельмгольца, ни формулой Манжена—Чиколева (5.2.17)..

Это особо проявляется при таких преобразованиях, которые сопровождаются изменением спектрального состава излучения, например, при формировании лазерных пучков. Ведь

рубиновый стержень с соответствующими зеркалами (а иногда и без зеркал) есть также оптический прибор, который преобразует хаотическое свечение ксеноновых ламп в мощный лазерный поток почти монохроматического излучения. Теорию генерации нельзя создавать на базе закона Лагранжа—Гельмгольца и обычных феноменологических соотношений фотометрии.

И тем не менее основное содержание книги Слюсарева, описанное нами в главах 5 и 6, остается справедливым, но только, повторяемся, в определенных пределах.

**Расчеты И. И. Собельмана.** В работе [26] для анализа законов преобразования световых пучков привлекаются более общие законы термодинамики. Световой поток характеризуется, как известно, определенной энтропией<sup>20)</sup>. Плотность энергии линейно поляризованного потока в интервале частот  $\Delta\nu$  в телесном угле  $\Delta\omega$  и в единице объема равна

$$u(\nu) \Delta\nu \Delta\omega = \Delta g \Delta\omega \hbar \nu n. \quad (6.5.1)$$

Здесь  $n$  — среднее число квантов на один осциллятор,

$$\Delta g = \frac{\nu^2}{c^3} \Delta\nu \quad (6.5.2)$$

— число осцилляторов поля на единичный телесный угол, единицу объема и интервал частот  $\Delta\nu$ . Плотность энтропии этой световой энергии [27]

$$\Delta S = \Delta g \Delta\omega f_n, \quad (6.5.3)$$

где

$$f_n = (n+1) \ln(n+1) - n \ln n. \quad (6.5.4)$$

С помощью (6.5.3) нетрудно получить достаточно общие ограничения на возможные преобразования световых пучков. Рассмотрим замкнутый объем. Согласно второму началу термодинамики, энтропия этого объема либо возрастает, либо сохраняется неизменной. Разделим световой поток внутри объема с помощью прозрачной плоскопараллельной пластиинки на две части так, что

$$u(\nu) = u_1(\nu) + u_2(\nu), \quad (6.5.5)$$

$$n = n_1 + n_2. \quad (6.5.6)$$

Так как  $f_{n_1} + f_{n_2} > f_n$ , то

$$\Delta S_1 + \Delta S_2 > \Delta S \quad (6.5.7)$$

и, следовательно, при таком делении энтропия возрастает.

Отсюда общий вывод: не существует оптической системы, которая могла бы восстановить первоначальный пучок, так

<sup>20)</sup> Смотри подробности в монографии [27].

как при таком преобразовании энтропия должна уменьшиться. Этот результат полностью совпадает с точкой зрения Слюсарева, описанной в § 2 этой главы.

Однако в работе [26] сразу же сделана оговорка, что такой вывод справедлив только в предельном случае, если  $\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2$ , т. е. если пучки 1 и 2 некогерентны и не могут интерферировать. Если же они когерентны, то обратимость светового потока вполне возможна и действительно осуществляется, например, в схеме интерферометра Майкельсона.

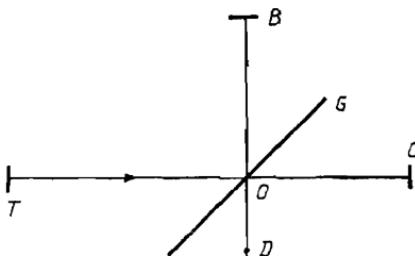


Рис. 6.5.2. Схема преобразования световых потоков

На рис. 6.5.2 мы приводим наглядную иллюстрацию этого утверждения. Плоская монохроматическая волна  $TO$  с энергией  $\Delta E$  падает слева от плоскости  $T$  на полупрозрачную пластинку  $G$ . Здесь она раздваивается, часть энергии  $\Delta E_1$  отражается от пластиинки  $G$ , идет в направлении  $OB$ , полностью отражается от зеркала  $B$  и возвращается обратно к пластиинке  $G$ . Другая часть исходного потока  $\Delta E_2$  проходит через пластиинку  $G$  в направлении зеркала  $C$ , полностью отражается от него и также возвращается к пластиинке  $G$ . Здесь каждый из потоков снова раздваивается. Часть первого потока энергии  $\Delta E_1$  отражается от пластиинки  $G$  в направлении  $OT$ , другая часть ( $\Delta E_{1''}$ ) проходит через нее в направлении  $OD$ . Второй поток ( $\Delta E_2$ ) частично проходит через пластиинку  $G$  в направлении  $OT$  ( $\Delta E_{2'}$ ), частично отражается от нее в направлении  $OD$  ( $\Delta E_{2''}$ ). Лучи  $1'$  и  $2'$  совпадают по направлению, когерентны и поэтому интерферируют. То же относится к лучам  $1''$  и  $2''$ . Если зеркала установлены так, что длины оптических путей световых потоков 1 и 2 одинаковы (разность хода равна нулю), то интерференция пучков  $1''$  и  $2''$  приводит к их взаимному гашению, а интерференция пучков  $1'$  и  $2'$  — к полному восстановлению первоначального потока  $TO$  (точнее, к его обращению). При расчете используются формулы Френеля для отражения (см. главу 2, § 1) и предполагается, что какие-либо потери энергии отсутствуют. Этот результат справедлив для любых длин волн (любого спектрального состава). Если же разность хода не равна нулю, то взаимное гашение пучков  $1''$  и  $2''$  осуществляется только для тех длин

волн, для которых разность хода равна четному числу полуволн. В противном случае только часть света будет возвращаться по направлению  $OT$ , другая часть пойдет по пути  $OD$ ; оба потока станут цветными.

Все эти результаты никак не вытекают из законов геометрической оптики и никак не связаны с законом Лагранжа — Гельмгольца. Преобразование световых потоков осуществляется по более сложным законам волновой оптики. Следует заметить, что в рассматриваемом случае весь расчет ограничен линейным приближением, законы нелинейной оптики, рассмотренные в § 1 и 2, не используются. Все это еще раз свидетельствует о многосторонних аспектах проблемы обратимости; в различных конкретных случаях нужно специальное исследование. Закон (5.2.8) представляет собой лишь частный случай реально осуществляющихся закономерностей.

**Существуют ли ограничения яркости пучков?** В типичной установке, используемой на практике, поток излучения исходит из площадки  $\Delta s$ , проходит через оптический прибор и падает на площадку  $\Delta s'$ . Для простоты положим, что площадки  $\Delta s$  и  $\Delta s'$  перпендикулярны осям соответствующих пучков. Из закона сохранения полного потока энергии следует

$$u(v) \Delta v \Delta \omega \Delta s = u'(v) \Delta v \Delta \omega' \Delta s' \quad (6.5.8)$$

или

$$\Delta \omega \Delta s n = \Delta \omega' \Delta s' n'. \quad (6.5.9)$$

Энтропия выходящего пучка  $\Delta s' \Delta s'$  не может быть меньше чем  $\Delta s \Delta s$ . Поэтому, используя (6.5.1), получим

$$\Delta s' \Delta \omega' f_{n'} \geq \Delta s \Delta \omega f_n. \quad (6.5.10)$$

Подставим сюда значение  $f_n$  из (6.5.4). Тогда

$$\begin{aligned} \frac{1}{n'} [(n'+1) \ln (n'+1) - n' \ln n'] &\geq \\ &\geq \frac{1}{n} [(n+1) \ln (n+1) - n \ln n]. \end{aligned} \quad (6.5.11)$$

Неравенство (6.5.11) выполняется при

$$n' \leq n. \quad (6.5.12)$$

Яркость светового пучка определяется формулой

$$B = c h v \Delta g n, \quad (6.5.13)$$

где  $c$  — скорость света. Из (6.5.12) и (6.5.13) следует

$$B' \leq B. \quad (6.5.14)$$

Неравенство (6.5.14) полностью соответствует следствиям

закона Лагранжа—Гельмгольца: никакая оптическая система не может увеличить яркость светового пучка.

Но, обращает внимание Собельман, в рассмотренном случае мы сделали весьма существенное, неявное предположение — мы исходили из полного отсутствия обмена, энергией между световыми пучками и оптической системой. Соотношение (6.5.14) справедливо только в этом частном случае; именно такие случаи рассматривались в монографии [1].

Будем теперь исходить из обратного варианта — допустим, что при преобразовании светового пучка часть его энергии  $\delta E$  выделяется в системе

$$\Delta E = \Delta E' + \delta E, \quad (6.5.15)$$

где  $\Delta E$  — плотность энергии исходного, а  $\Delta E'$  — плотность энергии образующегося пучка. Предположим, не ограничивая общности рассуждений, что  $\Delta s' = \Delta s = 1$ . Тогда вместо неравенства  $\Delta S' \geq \Delta S$  будет справедливо неравенство

$$\Delta S' + \delta S \geq \Delta S, \quad (6.5.16)$$

где  $\delta S$  — приращение энтропии системы ввиду выделения в ней дополнительной энергии. Условие (6.5.16) есть конкретная запись второго начала термодинамики и имеет общее значение.

Исходя из (6.5.16), автор [26] делает чрезвычайно важное заключение: если допустить, что  $\delta S \geq \Delta S$ , то на величину  $\Delta S'$  никаких ограничений вообще не накладывается и, следовательно, выходящий пучок может иметь сколь угодно большую яркость.

И снова наш неоднократный вывод: многое из того, что ранее казалось невозможным, на самом деле иногда возможно, реально, осуществимо.

В конце работы [26] доказывается, что в обычных условиях

$$\delta E / \Delta E = T_0 / T, \quad (6.5.17)$$

где  $T_0$  — температура оптической системы, а  $T$  — температура преобразуемого светового пучка. В оптической области спектра температура излучения, как правило, весьма высока (для ксеноновой лампы  $T \approx 10000$  К) и, следовательно, отношение  $T_0 / T$  очень мало.

«Таким образом, потери энергии, которые принципиально необходимо допустить, чтобы сделать возможным формирование светового пучка сколь угодно большой яркости, практически ничтожны». И далее: «Из сказанного отнюдь не следует, что любое поглощение света должно способствовать решению этой задачи. Общие термодинамические соображения не могут подсказать конкретные пути реализации соответствующих

систем. Представляется, однако, крайне важным, что если имеется возможность обмена энергией между световыми пучками и оптической системой, то термодинамика не накладывает никаких ограничений на увеличение яркости световых пучков» [26, с. 704].

В лазерах с оптической накачкой процесс формирования оптических пучков высокой яркости осуществляется реально. При этом общее уменьшение энтропии исходного и конечного световых потоков компенсируется возрастанием энтропии оптической системы. Возможно множество конкретных механизмов таких преобразований; важно только, чтобы значение  $T_0/T$  было много меньше единицы. Разумеется, в разных случаях могут быть получены самые различные коэффициенты полезного действия:

$$\eta = \frac{\Delta E'}{\Delta E} = \frac{\Delta E - \delta E}{\Delta E}, \quad (6.5.18)$$

совместимые с неравенством  $\Delta S' \geq \Delta S$ .

В современной нелинейной оптике можно найти множество методов повышения яркости световых пучков; они уже широко применяются.

## ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 6

1. Слюсарев Г. Г. О возможном и невозможном в оптике. 2-е изд. М., 1957. 178 с.
2. Степанов Б. И., Ивакин Е. В., Рубанов А. С. // ДАН СССР. 1971. Т. 196, № 3. С. 567—569.
3. Woerdman J. P. // Opt. Commun. 1970. Vol. 2, N 5. P. 212—214.
4. Jariv A., Pepper D. M. // Opt. Lett. 1977. Vol. 1, N 1. P. 16—18.
5. Jariv A. // IEEE. Quant. Electron. 1978. Vol. 14, N 9. P. 650—660.
6. Bloom D. M., Bjorklund G. C. // Appl. Phys. Lett. 1977. Vol. 31, N 9. P. 592—594.
7. Jonnen B. M., Helwarth R. W. // Appl. Phys. Lett. 1978. Vol. 32, N 3. P. 166—168.
8. Зельдович Б. Я., Поповичев В. И., Рагульский В. В., Файзуллов Ф. С. // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 15, вып. 3. С. 160—167.
9. Зельдович Б. Я., Мельников И. А., Пилипецкий Н. Ф., Рагульский В. В. // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 25, вып. 1. С. 41—44.
10. Коптев В. Г., Лазарук И. М., Петрович И. П., Рубанов А. С. // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 28, вып. 7. С. 468—471.
11. Clark J. R. // Opt. Soc. Amer. 1953. Vol. 43. P. 138—144.
12. Слюсарев Г. Г. // Труды Государственного оптического института им. С. И. Вавилова. 1968. Т. 36, вып. 166. С. 5—17.
13. Осипов А. И. Самоорганизация и хаос. М., 1986.
14. Приожин И. От существующего к возникающему. М., 1985. 327 с.
15. Климонтович Н. Ю. Без формул о синергетике. Мн., 1986. 223 с.
16. Ребане К. К. Энергия, энтропия. Среда обитания. М., 1985.
17. Рождественский Д. С. // Избр. труды. М.; Л., 1964. С. 170—196.
18. Рождественский Д. С. // Там же. С. 197—225.
19. Рождественский Д. С. // Там же. С. 226—229.
20. Рождественский Д. С. // Там же. С. 325—337.

21. Ландсберг Г. С. Оптика. 5-е изд. М., 1976. 926 с.
22. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., 1973. 720 с.
23. Тудоровский А. И. Теория оптических приборов. I. Общая часть. М.; Л., 1948; 2. Часть прикладная: Оптические системы. М.; Л., 1952.
24. Розенберг Г. В. Оптика тонкослойных покрытий. Л., 1958. 572 с.
25. Крылова Т. Н. Интерференционные покрытия. Л., 1973.
26. Собельман И. И. // УФМ. 1974. Т. 113, вып. 4. С. 701—705.
27. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. И. Статистическая физика. М., 1964. 567 с.
28. Аблеков В. К., Колядин С. С., Фролов А. В. Высокоразрешающие оптические системы. М., 1985. 176 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

От редактора . . . . .	5
<b>1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ФОТОМЕТРИИ</b>	
<b>§ 1. Световой поток . . . . .</b>	7
Место фотометрии в оптике (7). Основные фотометрические величины (8). Поглощение света (17). Реабсорбция (21). Закон Ламберта—Бера (23)	
<b>§ 2. Фотометрические величины с учетом свойств глаза . . . . .</b>	23
Функции видности (23). Единицы измерения фотометрических величин (25). Несколько слов об истории фотометрии (26)	
<b>§ 3. Приемники излучения . . . . .</b>	28
Тепловые приемники излучения (28). Фотоэлектрические приемники излучения (31). Усилительные системы (35). Фотографическая пластина (37)	
<b>§ 4. Абсолютно черное тело . . . . .</b>	41
Постановка задачи (41). Закон Кирхгофа (42). Введение понятия абсолютно черного тела (45). Формула Планка (46). Исследование функции Планка (48). Распределение энергии равновесного излучения в шкале длии волн (53). Тепловое излучение, испускаемое реальными телами (55)	
<b>§ 5. Источник излучения . . . . .</b>	56
Солнце (56). Классификация искусственных источников излучения (57). Тепловые источники излучения (58). Люминесцентные источники излучения (59). Лампы сверхвысокого давления (62). Оптическая пирометрия (64)	
<b>§ 6. О границах применимости фотометрии . . . . .</b>	67
Что изучает фотометрия? (67). Фотометрия и наблюдаемость (69)	
Литература к главе 1 . . . . .	71
<b>2. ГЛАЗ ЧЕЛОВЕКА</b>	
<b>§ 1. Из истории офтальмологии и физиологической оптики . . . . .</b>	73
Строение глаза (80). О работе сетчатки (84). Оптическая система глаза (88). Характер зрения (91). Цветное зрение (92). Развитие зрительных ощущений во времени (100). П. П. Лазарев (101). Физиологическое доказательство квантовой природы света (104)	
<b>§ 2. Работа зрительного аппарата . . . . .</b>	80

<b>§ 3. О сущности и иллюзиях зрения . . . . .</b>	105
Зрение — сложный психологический процесс (105). Ошибки и иллюзии зрения (109). Эволюция глаза (113)	
<b>Литература к главе 2 . . . . .</b>	118
<b>3. ЦВЕТОВЕДЕНИЕ</b>	
<b>§ 1. Смешение цветов . . . . .</b>	119
Цветовое уравнение (121). Трехмерность цвета (125). Цветовой треугольник (125). Международная система классификации цветов ( $X, Y, Z$ ) (128)	
<b>§ 2. Измерение цвета . . . . .</b>	130
Основные типы колориметров (130). Аддитивные колориметры (130). Субтрактивные колориметры (132). Объективные колориметры (133). Цветные атласы (134). Спектрофотометрия (134)	
<b>§ 3. Цветная фотография . . . . .</b>	135
Краткие исторические сведения (135). Аддитивный способ получения цветных изображений (137). Субтрактивный способ получения цветных изображений (138)	
<b>§ 4. Из истории науки о цвете . . . . .</b>	140
Древний мир (141). Средние века (146). Эпоха Возрождения (148). Семнадцатый век (150). Восемнадцатый век (152). Девятнадцатый век (155)	
<b>Литература к главе 3 . . . . .</b>	155
<b>4. ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ СВЕТОВЫЕ ПОТОКИ</b>	
<b>§ 1. Влияние фона теплового излучения на показания приемников радиации . . . . .</b>	156
Еще раз о законе Кирхгофа (156). Зависимость показаний приемников излучения от температуры источника света, приемника, поглощающего слоя и окружающей среды (158). Измерение поглощения слоя с учетом теплового фона (163)	
<b>§ 2. Испускание и поглощение отрицательных световых потоков . . . . .</b>	164
Отрицательные потоки лучистой энергии (164). Измерение поглощения отрицательных световых потоков (170)	
<b>§ 3. Измерение температуры по методу самообращения спектральных линий . . . . .</b>	173
Существо метода (173). Расчетные формулы (173)	
<b>Литература к главе 4 . . . . .</b>	175
<b>5. СЖИГАНИЕ НА РАССТОЯНИИ</b>	
<b>§ 1. К истории возникновения книги Г. Г. Слюсарева «О возможном и невозможном в оптике» . . . . .</b>	177
Рассказывает Г. Г. Слюсарев (178). Точка зрения С. И. Вавилова (179). Еще раз о цели книги (180)	

<b>§ 2. Световая энергетика . . . . .</b>	182
Возникновение идеи о сжигании на расстоянии (182). Основные положения (182). Общий случай облучения (186). Формула Манжена—Чиколева (187). Некоторые итоги и выводы (189). Возможно ли лазерное оружие? (191)	
Литература к главе 5 . . . . .	192
<b>6. ЧТО МОЖНО И ЧЕГО НЕЛЬЗЯ?</b>	
<b>§ 1. Оптические небылицы . . . . .</b>	193
Параллельные пучки (194). Концентрирующий конус (195). Оптическое усиление по всем направлениям (196). Прохождение световых потоков через узкое отверстие (197). «Огнеопасность» оптических деталей и стеклянных изделий (198). Превращение рассеянного света в направленный (200). Обращение волнового фронта (203)	
<b>§ 2. Обратимость и необратимость в оптике . . . . .</b>	206
Что такое «обратимость» в оптике? (206). Какие оптические явления необратимы? (207). Еще раз об обращении волнового фронта при четырехволновом взаимодействии (211)	
<b>§ 3. Предел разрешения оптических систем (микроскопов и телескопов) . . . . .</b>	213
Общие соображения (213). Микроструктура изображения, создаваемого оптической системой (215). Разрешающая способность оптических систем (217). Оптимальное увеличение оптических систем (218). Что видно с помощью современных приборов? (219). Электронный микроскоп (223)	
<b>§ 4. Фаза, амплитуда, изображение . . . . .</b>	225
Роль фазы в волновой теории образования изображений (225). Амплитудные фильтры (227). Фазовый контраст в микроскопии (228). Просветление оптики (231). Еще раз о разрешающей способности оптической системы (234). Косвенные способы распознавания объектов и спектров (239). Некоторые итоги (241)	
<b>§ 5. Некоторые следствия термодинамики . . . . .</b>	244
Справедливо ли уравнение Лагранжа—Гельмгольца? (244). Расчеты И. И. Собельмана (246). Существуют ли ограничения яркости пучков? (248)	
Литература к главе 6 . . . . .	250

Научное издание

Степанов Борис Иванович

**ВВЕДЕНИЕ В СОВРЕМЕННУЮ ОПТИКУ**  
**ФОТОМЕТРИЯ. О ВОЗМОЖНОМ**  
**И НЕВОЗМОЖНОМ В ОПТИКЕ**

Заведующая редакцией

*Л. Ю. Бельзацкая*

Редактор

*Е. Г. Волкинд*

Художник

*А. А. Кулаженко*

Художественный редактор

*В. В. Савченко*

Технический редактор

*В. А. Витенко*

Корректор

*Е. В. Будько*

ИБ № 3505

Печатается по постановлению РИСО АН БССР.  
Сдано в набор 15.11.88. Подписано в печать  
04.04.89. АТ 13 301. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бум. тип.  
№ 1. Гарнитура литературная. Высокая печать.  
Усл. печ. л. 16,0. Усл. кр.-отт. 19,13. Уч.-изд. л.  
15,97. Тираж 2 500 экз. Зак. № 15. Цена 3 р. 50 к.

Издательство «Наука и техника» Академии наук  
БССР и Государственного комитета БССР по де-  
лам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
220072. Минск, Ленинский проспект, 68. Типогра-  
фия им. Франциска Скорины издательства «Наука  
и техника». 220072. Минск, Ленинский проспект, 68.