занное с этим повышение чувствительности. Однако работы последнего времени поставили под сомнение эту точку зрения. Наблюдения показали, что чувствительность глаза к свету меняется всего сильнее, когда уменьшение родопсина еще очень невелико. Наоборот, когда концентрация родопсина резко уменьшается, чувствительность уменьшается незначительно. С изложенной точки зрения это понять трудно. Возможно, играет роль перестройка корковых центров головного мозга, воспринимающих свет, т. е. повышение и понижение их чувствительности.

§ 22. Фотометрические понятия и единицы

1. Излучение в пространстве или в прозрачной однородной среде можно характеризовать *интенсивностью*, *спектральным составом* и *поляризацией*. При этом надо иметь в виду, что пучки строго параллельных лучей являются идеализацией и никогда не встречаются в действительности. Конечной энергией могут обладать лучи, направления которых заполняют *конечные телесные углы*, хотя величина этих углов и может быть очень малой.

Заметив это, возьмем в поле излучения произвольную малую площадку ds. Она должна быть настолько мала, чтобы характеристики излучения практически не изменялись при переходе от одной точки площадки к другой. В то же время линейные размеры площадки ds должны быть велики по сравнению с длинами волн излучения, чтобы к излучению можно было применять понятия и законы геометрической оптики. Проведем через площадку ds лучи, заполняющие какой-то телесный угол Ω. Энергия, переносимая этими лучами в единицу времени, называется *лучистым потоком* Φ, проходящим через площадку ds в телесный угол Ω. Если телесный угол $d\Omega$ бесконечно мал, а площадка ds перпендикулярна к его оси, то лучистый поток можно представить в виде $d\Phi = I\,ds\,d\Omega$. Величина I есть лучистый поток, отнесенный к единичной площадке, перпендикулярной к излучению, и к единице телесного угла. Она называется *интенсивностью лучистого потока*, или *лучистостью излучения* в направлении оси телесного угла $d\Omega$. Если нормаль к площадке ds образует с направлением излучения угол ϑ, то

$$d\Phi = I\,ds\cos\vartheta\,d\Omega,$$

так как лучистые потоки через площадку ds и ее проекцию $ds_\perp = ds\cos\vartheta$, перпендикулярную к излучению, одинаковы. Для краткости проекцию $ds\cos\vartheta$ называют *видимой величиной площадки* ds, если ее рассматривать под углом ϑ к нормали. При выполнении принципа суперпозиции лучи, проходящие в данный момент времени через определенную точку среды, совершенно независимы друг от друга. Поэтому для полной характеристики состояния излучения необходимо указать интенсивность лучистого потока по любому из бесчисленного множества направлений, проходящих через каждую точку пространства. При этом надо учитывать отдельно каждое из двух прямо противоположных направлений, поскольку независимость лучей имеет место и для этих направлений.

Энергия, проходящая за время dt через площадку ds в телесный угол $d\Omega$, представится выражением $I\,ds\,d\Omega\,dt\cos\vartheta$. При этом время dt, хотя оно и входит в виде дифференциала, должно быть все же велико по сравнению с периодами колебаний волн, входящих в излучение. Иначе значение мощности, например, монохроматического излучения, как энергии, отнесенной к единице времени, при малом интервале dt, в течение которого измеряется энергия, зависело бы от фазы колебаний в момент начала измерения. Независимость имела бы место только тогда, когда время dt случайно содержало бы целое число колебаний. Если же dt велико по сравнению с периодами колебаний любых волн, входящих в излучение, то измеренная мощность излучения практически не будет зависеть от выбора dt.

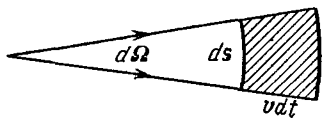

Рис. 83.

2. *Объемной плотностью лучистой энергии* называется энергия, содержащаяся в единице объема пространства. Чтобы выразить ее через интенсивность излучения I, возьмем сначала малый конус лучей с телесным углом $d\Omega$ при вершине (рис. 83). Через площадку ds, перпендикулярную к излучению, за время dt проходит энергия $I\,ds\,d\Omega\,dt$. Если v — скорость распространения излучения, то за время dt эта энергия распространится на расстояние $v\,dt$ и заполнит объем $ds\,v\,dt$, заштрихованный на рис. 83. (Предполагается, что нет дисперсии, так что скорость распространения энергии совпадает с фазовой скоростью v.) Разделив предыдущее выражение на этот объем, найдем $(I/v)\,d\Omega$ — плотность лучистой энергии, создаваемую рассматриваемым элементарным пучком лучей. Полная плотность лучистой энергии u найдется интегрированием этого выражения по всем телесным углам:

$$u=\frac{1}{v}\int I\,d\Omega, \tag{22.1}$$

причем величина I может зависеть от направления лучей. Когда I одинакова по всем направлениям, то

$$u=4\pi I/v. \tag{22.2}$$

3. Величины Φ, I, u можно подвергнуть *спектральному разложению* по частотам или длинам волн. Строго монохроматическое излучение, как и параллельные пучки лучей, никогда не реализуется в действительности. Каждое излучение, обладающее конечной энергией, занимает *конечный интервал частот или длин волн.*

Например, величину u можно представить в виде

$$u = \int_0^\infty u_\nu(\nu)\,d\nu = \int_0^\infty u_\omega(\omega)\,d\omega = \int_0^\infty u_\lambda(\lambda)\,d\lambda. \tag{22.3}$$

Подынтегральные выражения $u_\nu d\nu$, $u_\omega d\omega$, $u_\lambda d\lambda$ имеют смысл объемной плотности лучистой энергии в спектральных интервалах (ν, $\nu + d\nu$), (ω, $\omega + d\omega$), (λ, $\lambda + d\lambda$) соответственно. Ради краткости эти термины обычно применяют к самим функциям $u_\nu(\nu)$, $u_\omega(\omega)$, $u_\lambda(\lambda)$, опуская дифференциалы $d\nu$, $d\omega$, $d\lambda$, хотя это и не совсем логично. При установлении связи между этими функциями надо, конечно, приравнивать друг другу дифференциалы $u_\nu d\nu$, $u_\omega d\omega$, $u_\lambda d\lambda$, поскольку они представляют в различных формах *одну и ту же величину*, если только соответствие между λ, ν и ω устанавливается соотношениями $\lambda = c/\nu = 2\pi c/\omega$. Таким путем находим

$$u_\nu = (\lambda^2/c)\,u_\lambda. \tag{22.4}$$

Говоря о спектральном распределении, надо указывать, идет ли речь о функции u_ν (распределение по частотам) или о функции u_λ (распределение по длинам волн). Так, в спектре излучения Солнца функция u_ν имеет максимум в инфракрасной области приблизительно при $\lambda = 880$ нм, а функция u_λ — в желто-зеленой части приблизительно при $\lambda = 500$ нм.

Далее, интенсивность излучения I в каждой точке пространства можно представить в виде суммы интенсивностей двух излучений, линейно поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Однако для наших целей в этом пока нет необходимости.

4. Все приведенные энергетические характеристики излучения измеряются в *механических единицах*, например по производимому ими тепловому действию. Так, в системе СИ лучистый поток измеряется в *ваттах* (Вт), интенсивность излучения — в *ваттах на стерадиан-квадратный метр* (Вт/ср·м^2), объемная плотность лучистой энергии — в *джоулях на кубический метр* (Дж/м^3). Такие единицы применяются, например, в теории теплового излучения. Однако в видимой области спектра представляет интерес характеризовать излучение по *зрительному* или *световому ощущению*, оцениваемому по действию света на глаз человека. Соответствующие характеристики и их единицы называются *световыми*, или *фотометрическими*, в отличие от *энергетических* величин и единиц, о которых говорилось выше.

Световые измерения, конечно, содержат немалый элемент субъективизма, поскольку световые впечатления, получаемые различными людьми от одного и того же светового потока, не совсем совпадают между собой. Когда указывают количественные соотношения световых единиц с энергетическими, то при этом имеют в виду не индивидуальный, а какой-то *средний человеческий глаз*. Сами названия величин, характеризующих излучение, при световых измерениях несколько изменяют. Вместо лучистой энергии говорят о *световой энергии*, вместо лучистого потока — о *световом потоке*, вместо интенсивности излучения — об *интенсивности света* и т. п Вообще, вместо энергетических величин и единиц вводят *световые* или *фотометрические* величины и единицы. Мы не будем вводить для энергетических и фотометрических величин различные обозначения, так как в каждом отдельном случае будет ясно, в каком смысле следует понимать ту или иную величину.

5. *Силой света источника* $\mathcal{J}$ в заданном направлении называют световой поток, посылаемый им в этом направлении и отнесенный к единице телесного угла. (Когда пользуются энергетическими единицами, то говорят об *энергетической силе источника*, измеряя эту величину в Вт/ср.) Обычно это понятие относят к *точечному источнику света*, т. е характеризуют им источник на расстояниях, больших по сравнению с его линейными размерами. Вообще говоря, величина $\mathcal{J}$ зависит от направления излучения Световой поток, посылаемый точечным источником в телесный угол $d\Omega$, определяется выражением $d\Phi = \mathcal{J}\,d\Omega$. Полный световой поток, исходящий от источника,

$$\Phi = \int \mathcal{J}\,d\Omega,$$

причем интеграл берется по полному телесному углу 4π. Величина $\mathcal{J}_0 = \Phi/(4\pi)$ называется *средней сферической силой света источника.*

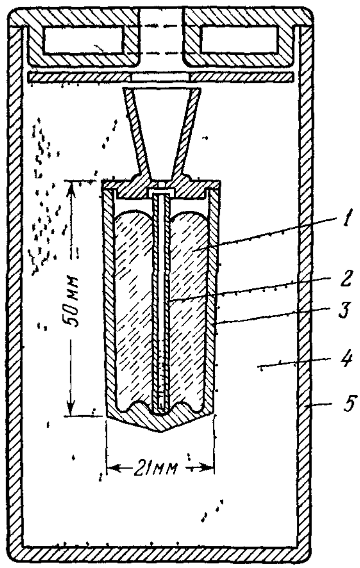

Рис 84

Единицей силы света источника в системе СИ служит *кандела* (старое название — *свеча*). Это — *основная фотометрическая единица.* Она осуществляется с помощью светового эталона в виде абсолютно черного тела при температуре затвердевания чистой платины (2046,6 К) и давлении 101 325 Па. Устройство эталона показано на рис. 84 (*1* — платина, *2* — трубочка из плавленой окиси тория, *3* — сосуд из плавленой окиси тория, *4* — засыпка из окиси тория, *5* — сосуд из кварца). Нагрев и расплавление платины производятся токами высокой частоты. Излучателем света служит трубочка *2*, стенки которой по всей длине имеют одну и ту же температуру, равную температуре окружающей нагретой платины. *Кандела* (кд) *есть сила света, излучаемого в направлении нормали с* 1/60 см² *излучающей поверхности указанного светового эталона.* До введения этого эталона (он был введен с 1 января 1948 г.) единицей силы света источника служила *международная свеча* (м. св.), равная 1,005 кд. Она осуществлялась специально изготовленными электрическими лампочками.

Единица светового потока есть *люмен* (лм) — световой поток, посылаемый источником в 1 канделу внутрь телесного угла в 1 стерадиан.

Лучистый поток, измеренный в ваттах, можно рассматривать и как световой поток, измеряя его в люменах. *Световая эффективность лучистого потока*, или просто *световая эффективность*, есть число люменов, соответствующее мощности в один ватт (лм/Вт). Обратная величина (Вт/лм) называется *механическим эквивалентом света*. Из-за различной чувствительности глаза к различным участкам спектра обе эти величины зависят от длины волны λ. Принято приводить их значения для $\lambda = 555$ нм, где чувствительность глаза максимальна. Для такой длины волны эти величины по новейшим измерениям равны соответственно:

$$625 \text{ лм/Вт и } 0{,}00160 \text{ Вт/лм.}$$

Пользуясь кривой видности среднего человеческого глаза, приведенной на рис. 82, нетрудно найти значения этих величин для любой длины волны видимого спектра излучения.

6. Из закона сохранения энергии следует, что полный световой поток, посылаемый источником, не может быть увеличен никакими отражающими и преломляющими устройствами, по крайней мере пока они остаются неподвижными. Такие устройства могут только *перераспределять световые потоки* по различным направлениям, что и осуществляется, например, прожекторами. Если точечный источник света помещен в прозрачной однородной среде, то на любых расстояниях от него остается постоянным не только полный поток Φ, испущенный источником в какой-либо момент времени, но и световой поток $d\Phi = \mathcal{J}\, d\Omega$ в пределах любого телесного угла $d\Omega$, исходящего из источника. Ввиду того, что телесный угол $d\Omega$ никак не связан с расстоянием r до источника, не будет зависеть от r и сила света источника $\mathcal{J}$. Интенсивность света I на расстоянии r найдется делением $d\Phi$ на площадь $ds = r^2\, d\Omega$ перпендикулярного сечения рассматриваемого элементарного пучка лучей. Это дает

$$I = \mathcal{J}/r^2, \tag{22.5}$$

т. е. *интенсивность света обратно пропорциональна квадрату расстояния до точечного источника.*

7. Световой поток, приходящийся на единицу площади освещаемой поверхности, называется *освещенностью* E этой поверхности. (При энергетических измерениях вместо этого термина пользуются термином *энергетическая освещенность*, или *облученность*, единицей которой служит Вт/м².) Пусть источник точечный, а лучи падают под углом ϑ к нормали к освещаемой поверхности. Тогда $d\Phi = \mathcal{J}\,d\Omega = \mathcal{J} ds \cos\vartheta/r^2$. Разделив на площадь поверхности ds, получим

$$E = \frac{\mathcal{J}}{r^2}\cos\vartheta. \tag{22.6}$$

Таким образом, *освещенность, создаваемая точечным источником в отсутствие поглощения, обратно пропорциональна квадрату расстояния до него и прямо пропорциональна косинусу угла между направлением падающих лучей и нормалью к освещаемой поверхности.* Первая часть этого утверждения, а также формула (22.5) называются *законом обратных квадратов.* Единица освещенности есть *люкс* (лк) — освещенность, создаваемая световым потоком в 1 люмен, равномерно распределенным по площади в 1 м². Освещенность в 1 лк создается точечным источником силою в 1 кд на внутренней поверхности шара радиуса 1 м, если он помещен в центре этого шара и излучает равномерно по всем направлениям.

Чтобы составить конкретное представление о величине люкса, приведем некоторые цифры. Освещенность от Солнца вне земной атмосферы на среднем расстоянии Земли от Солнца $1{,}35\cdot 10^5$ лк. Освещенность в одну-две десятых люкса создает ночью при безоблачном небе полная Луна. Освещенность, создаваемая молодой Луной или Луной на ущербе, порядка нескольких сотых люкса. Безоблачное звездное небо создает ночью освещенность в тысячные доли люкса. Освещенность в десятитысячные доли люкса позволяет с трудом ориентироваться ночью. При освещенности порядка одного люкса можно с трудом читать. Скорость чтения быстро нарастает при увеличении освещенности до 50 лк. При дальнейшем увеличении освещенности до 100—150 лк она растет более медленно, а дальше этого предела возрастание скорости чтения становится малоощутимым. Освещенность 50 лк уже удовлетворительна для чтения и письма. Инструкциями по охране труда установлены определенные нормы минимальной освещенности рабочих помещений. Освещенность рабочей поверхности (стола) ни для каких видов работ не должна быть меньше 10 лк. При очень тонкой работе, связанной с различением мелких деталей, черточек, букв, рисунков (угол зрения меньше 2′), требуется освещенность не менее 200 лк. В классах и аудиториях на столах учащихся и черных досках освещенность должна быть не менее 75 лк.

8. Для протяженных (не точечных) источников света вводится понятие *поверхностной яркости*, или просто *яркости B*. (При энергетических измерениях вместо этого термина употребляют термин *энергетическая яркость* и для нее вводят единицу Вт/(ср·м²).) Понятие поверхностной яркости неприменимо для точечных источников, т. е. источников, угловые размеры которых лежат за пределами разрешающей способности глаза или оптического инструмента, которым он вооружен. Возьмем на поверхности излучающего источника малую площадку ds и проведем от нее световой луч под углом ϑ к ее нормали. При рассмотрении излучения в этом направлении более существенна не сама площадка ds, а ее *видимая величина*, т. е. $ds \cos \vartheta$ (см. пункт 1). Яркостью поверхности в рассматриваемом направлении называется световой поток $d\Phi$, исходящий из площадки ds в этом направлении, отнесенный к единице телесного угла и к единице ее видимой величины:

$$B_\vartheta = \frac{d\Phi}{d\Omega\, ds \cos \vartheta} = \frac{d\mathcal{J}}{ds \cos \vartheta}, \tag{22.7}$$

где $d\mathcal{J} = d\Phi/d\Omega$ — сила света площадки ds в том же направлении (рис. 85). Буква B снабжена индексом ϑ, так как яркость, вообще говоря, зависит от угла ϑ, под которым рассматривается площадка ds.

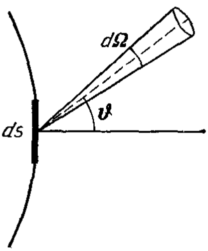

Рис. 85.

Источники света, поверхностная яркость которых B не зависит от направления излучения, называются источниками, подчиняющимися *закону Ламберта* (1728—1777). Для таких источников, как видно из (22.7), сила света $d\mathcal{J}$ элементарной площадки ds пропорциональна $\cos \vartheta$. Однородный светящийся шар, подчиняющийся закону Ламберта, кажется одинаково ярким в середине и по краям. Такие наблюдения и привели Ламберта к формулировке своего закона. В действительности от закона Ламберта наблюдаются большие отступления.

В § 113 будет показано, что при температурном излучении поверхность непрозрачного тела излучала бы по закону Ламберта, если бы коэффициент отражения света от этой поверхности для каждой длины волны не зависел от угла падения. Для гладких поверхностей, отражающих зеркально, это условие не выполняется (см. § 65). Но для матовых поверхностей, отражающих диффузно, оно может выполняться с той или иной степенью приближения. Для таких поверхностей при температурном излучении приближенно соблюдается закон Ламберта. Он строго справедлив при температурном излучении абсолютно черного тела. Матовые поверхности, например освещенная белая поверхность тела, покрытая окисью магния, или наружная поверхность колпака из хорошего молочного стекла, освещенного изнутри, являются источниками, довольно хорошо подчиняющимися закону Ламберта. Однако к этим случаям вывод закона Ламберта, приводимый в § 113, неприменим, так как в них речь идет не о самосветящихся телах и температурном излучении, а о телах, рассеивающих свет от посторонних источников.

Единицей яркости является *кандела на квадратный метр* (кд/м²). Это — яркость плоской поверхности, сила света которой в перпендикулярном направлении составляет одну канделу с каждого квадратного метра. Если при тех же условиях сила света равна одной канделе с каждого квадратного сантиметра, то соответствующая единица называется *стильб* (сб). Очевидно, 1 сб $=$ $= 1$ кд/см² $= 10^4$ кд/м². В табл. 4 приведены значения яркости некоторых светящихся поверхностей.

Таблица 4

Источник света	Яркость, кд/м²	Источник света	Яркость, кд/м²
Ночное безлунное небо	Около $1\cdot10^{-4}$	Кратер обычной электрической угольной дуги	$1{,}5\cdot10^{8}$
Полная Луна, видимая сквозь атмосферу	$1\cdot10^{3}$	Шаровая ртутная лампа сверхвысокого давления (СВДШ)	$1{,}2\cdot10^{9}$
Пламя обычной стеариновой свечи	$2{,}5\cdot10^{3}$	Солнце	$1{,}5\cdot10^{9}$
Ясное дневное небо	$1{,}5\cdot10^{4}$	Импульсная стробоскопическая лампа (ИСШ)	$1\cdot10^{11}$
Газосветная лампа	$5\cdot10^{4}$		
Спираль газонаполненной лампы накаливания	$5\cdot10^{6}$		

9. *Светимостью* K называется полный световой поток, посылаемый единицей светящейся поверхности в одну сторону, т. е. в телесный угол $\Omega = 2\pi$. Ее единица такая же, что и единица освещенности, т. е. лм/м². (При энергетическом рассмотрении вместо этого термина употребляется *энергетическая светимость*, или *излучательность*, а единицей служит Вт/м².) Так как световой поток с единицы поверхности в телесный угол $d\Omega$ равен $d\Phi = B_\vartheta \cos\vartheta\, d\Omega$, то

$$K = \int B_\vartheta \cos\vartheta\, d\Omega = 2\pi \int\limits_0^{\pi/2} B_\vartheta \cos\vartheta \sin\vartheta\, d\vartheta. \tag{22.8}$$

Для поверхностей, излучающих по закону Ламберта, яркость $B_\vartheta =$ $= B$ не зависит от угла ϑ, а потому в этом случае

$$K = \pi B. \tag{22.9}$$

10. Рассчитаем теперь освещенность, создаваемую протяженным источником света с известной поверхностной яркостью B_ϑ. Возьмем на поверхности источника бесконечно малую площадку ds (рис. 86). Пусть ds' — освещаемая площадка, r — расстояние между площадками, ϑ и ϑ' — углы, составляемые нормалями к площадкам с прямой MN, соединяющей их. Телесный угол, под которым из площадки ds видна площадка ds', равен $ds' \cos\vartheta'/r^2$. В него площадка ds посылает световой поток $d\Phi = B_\vartheta\, ds \cos\vartheta\, ds' \cos\vartheta'/r^2$, или $d\Phi =$

$= B_\vartheta\, d\Omega \cos\vartheta'\, ds'$, где $d\Omega = ds \cos\vartheta / r^2$ — телесный угол, под которым из освещаемой площадки ds' видна излучающая площадка ds. Разделив на ds', найдем освещенность dE площадки ds', создаваемую потоком $d\Phi$. Полная освещенность E найдется интегрированием полученного выражения по всей видимой поверхности источника:

$$E = \int B_\vartheta \cos\vartheta'\, d\Omega. \tag{22.10}$$

В качестве примера возьмем источник в виде равномерно светящегося диска с поверхностной яркостью $B_\vartheta = B$, не зависящей от

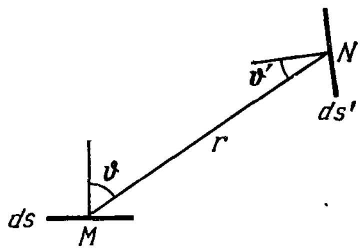

Рис. 86.

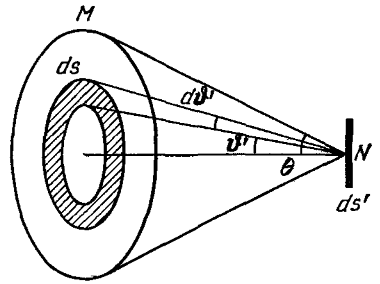

Рис. 87.

угла ϑ. Освещаемую площадку ds' расположим на геометрической оси диска перпендикулярно к ней (рис. 87). Полагая в (22.10) $d\Omega = 2\pi \sin\vartheta'\, d\vartheta'$ и интегрируя, получим

$$E = \pi B \sin^2\theta, \tag{22.11}$$

где θ — угол, составляемый крайним лучом MN с геометрической осью диска. Формула (22.11) справедлива и для шара, а также для источника произвольной формы, видимая граница которого имеет форму окружности.

11. В нашу задачу не входит изложение методов измерения и описание приборов, применяемых в фотометрии. Ограничимся только схематическим описанием одного из наиболее совершенных фотометров, построенных Луммером (1860—1925) и Бродхуном. Наиболее существенной частью этого фотометра является стеклянный кубик, состоящий из двух прямоугольных стеклянных призм A и B (рис. 88). Гипотенузная плоскость призмы A сошлифовывается под шаровую поверхность, так что от этой плоскости остается только резко очерченный участок в виде плоского круга. Затем призмы гипотенузными плоскостями плотно прикладываются друг к другу (на оптический контакт). Между сравниваемыми источниками света L_1 и L_2 ставится белый экран S, обе поверхности которого одинаково диффузно рассеивают свет. Рассеянный свет отражается двумя одинаковыми зеркалами S_1 и S_2 на кубик фотометра. На призму A попадает свет от источника L_1, на призму B — от источника L_2. Из призмы A свет может попасть в зрительную трубу только через плоский круг на ее гипотенузной плоскости. Наоборот, свет из призмы B может попасть в ту же трубу только после полного отражения от гипотенузной поверхности этой призмы, внешней по отношению к тому же кругу. Труба сфокусирована для наблюдения плоскости указанного круга. Наблюдатель видит два поля зрения различной яркости, граничащие друг с другом вдоль окружности этого круга. Передвигая один из источников L_1 или L_2, добиваются исчезновения видимой границы между обоими полями, чтобы все поле зрения получилось равномерно освещенным. Это произойдет тогда, когда освещенности обеих сторон экрана S станут одинаковыми. Если r_1 и r_2 — расстояния (точечных) источников L_1 и L_2 до экрана в этом положении, то для отношения сил света $\mathcal{J}_1$ и $\mathcal{J}_2$ этих источников по закону обратных квадратов можно написать

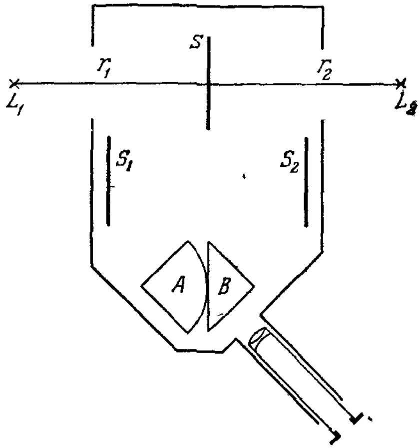

Рис. 88.

$$\frac{\mathcal{J}_1}{\mathcal{J}_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}.$$

ЗАДАЧИ

1. Найти освещенность E площадки, создаваемую бесконечной плоскостью, излучающей свет по закону Ламберта с постоянной поверхностной яркостью B. Площадка и плоскость параллельны между собой.

Ответ. $E = \pi B$.

2. Вычислить освещенность E на горизонтальной площадке, освещаемой небесной полусферой, в предположении, что яркость неба B постоянна.

Ответ. $E = \pi B$.

3. Найти освещенность, создаваемую однородным светящимся шаром радиуса a на расстоянии R от его центра, если освещаемая площадка перпендикулярна к радиусу, а поверхность шара излучает по закону Ламберта с поверхностной яркостью B. Показать, что в этих условиях на любых расстояниях от центра шара строго выполняется закон обратных квадратов, т. е. освещенность площадки меняется обратно пропорционально квадрату R.

Ответ. $E = \pi B a^2/R^2$.

4. Найти освещенность, создаваемую равномерно светящимся диском радиуса a на его геометрической оси, перпендикулярной к плоскости диска, если освещаемая поверхность перпендикулярна к этой оси и находится на расстоянии R от центра диска. Диск излучает по закону Ламберта с поверхностной яркостью

B. С какой относительной точностью будет выполняться закон обратных квадратов, если диск рассматривать как точечный источник света, помещенный в его центре?

Ответ. $E = \pi B a^2/(R^2 + a^2)$. Если $a/R \ll 1$, то

$$E \approx \frac{\pi B a^2}{R^2}\left(1 - \frac{1}{2}\frac{a^2}{R^2}\right).$$

Закон обратных квадратов выполняется с относительной точностью $a^2/(2R^2)$. При $a/R \sim 1/10$ эта точность будет около 1%.

5. Предполагая, что излучение Солнца подчиняется закону Ламберта, определить его поверхностную яркость B при наблюдении с поверхности Земли (т. е. с учетом поглощения и рассеяния света земной атмосферой), если освещенность поверхности Земли, создаваемая солнечными лучами при перпендикулярном падении в тех же условиях, $E \approx 10^5$ лк. Средний телесный угол, под которым солнечный диск виден с Земли, $\Omega = 6{,}8 \cdot 10^{-5}$ ср.

Ответ. $B = E/\Omega \approx 1{,}5 \cdot 10^9$ кд/м².

§ 23. Яркость и освещенность оптического изображения. Нормальное увеличение

1. Во всех дальнейших расчетах, если нет специальной оговорки, не будем учитывать потери света при отражении на границах линз, призм и других отражающих поверхностях. Будем также пренебрегать поглощением и рассеянием света. Потери света на отражение довольно значительны. Так, для призматического бинокля они составляют около 50% (см. § 67). С учетом всех этих потерь яркость и освещенность изображения получились бы несколько меньше вычисленных. Сначала рассмотрим случай, когда размеры предмета заметно превосходят предел разрешения оптической системы. Тогда система дает геометрически подобные изображения, и можно ограничиться точностью геометрической оптики.

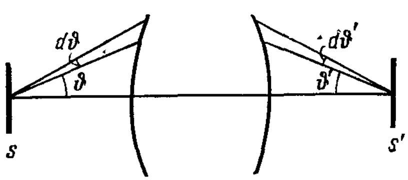

Рис. 89а.

Допустим, что предмет помещен на главной оптической оси центрированной системы и имеет форму малой площадки s, перпендикулярной к этой оси (рис. 89а). Изображением площадки s будет какая-то другая площадка s'. Обозначим через B_ϑ яркость площадки s под углом ϑ к ее нормали, или (что то же) к главной оптической оси системы. Соответствующую яркость изображения обозначим через $B'_{\vartheta'}$. Соответствие означает, что угол ϑ, составляемый падающим лучом с оптической осью системы, после выхода из нее переходит в ϑ'. Будем предполагать, что в образовании изображения участвуют не только параксиальные, но и широкие пучки лучей, так что должно выполняться условие синусов (18.1). Из него следует

$$sn^2 \sin^2 \vartheta = s'n'^2 \sin^2 \vartheta'. \tag{23.1}$$