

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72
М99

**Одобрено Научно-редакционным советом корпорации
«Российский учебник» под председательством академиков
Российской академии наук В. А. Тишкова и В. А. Черешнева**

Мякишев, Г. Я.

М99 **Физика : Оптика. Квантовая физика. Углублённый уровень. 11 класс : учебник / Г. Я. Мякишев, А. З. Синяков. — 7-е изд., стереотип. — М. : Дрофа, 2018. — 478, [2] с. : ил. ISBN 978-5-358-17148-0**

В учебнике изложены фундаментальные вопросы оптики, квантовой физики и специальной теории относительности, представлены основные технические применения законов физики, рассмотрены методы решения задач.

Учебник дополнен вопросами и заданиями, направленными на формирование познавательных интересов на основе интеллектуальных и творческих способностей учащихся, на овладение навыками самостоятельного приобретения новых знаний.

Книга адресована учащимся физико-математических классов и школ, слушателям и преподавателям подготовительных отделений вузов, а также читателям, занимающимся самообразованием.

Учебник соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту среднего общего образования.

**УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72**

ISBN 978-5-358-17148-0

© ООО «ДРОФА», 2014
© ООО «ДРОФА», 2016, с изменениями

ОПТИКА

В этом разделе мы продолжим изучение электромагнитных волн, но только более коротких, чем до сих пор. Такие волны называют светом.

РАЗВИТИЕ ВЗГЛЯДОВ НА ПРИРОДУ СВЕТА

Первые представления древних учёных о том, что такое свет, были весьма наивны. Считалось, что из глаз выходят особые тонкие щупальца и зрительные впечатления возникают при ощупывании ими предметов. Останавливаться подробно на подобных воззрениях сейчас, разумеется, нет нужды. Мы проследим вкратце за развитием научных представлений о том, что такое свет.

Два способа передачи воздействий

От источника света, например лампочки, свет распространяется во все стороны и падает на окружающие предметы, вызывая, в частности, их нагревание. Попадая в глаз, он вызывает зрительное ощущение — мы видим. Можно сказать, что при распространении света происходит передача воздействий от одного тела (источника) к другому (приёмнику).

Вообще же действие одного тела на другое может осуществляться двумя различными способами: либо посредством *переноса вещества* от источника к приёмнику, либо посредством *изменения состояния среды* между телами (без переноса вещества).

Можно, например, заставить зазвенеть колокольчик, находящийся на некотором расстоянии, удачно попав в него шариком. Здесь мы имеем дело с переносом вещества. Но можно поступить иначе: привязать шнур к языку колоколь-

чика и заставить колокольчик звучать, посылая по шнуру волны, раскачивающие его язык. В этом случае переноса вещества не происходит. По шнуру распространяется волна, т. е. изменяется состояние (форма) шнура. Таким образом, действие от одного тела к другому может передаваться посредством волн.

Корпускулярная и волновая теории света

В соответствии с двумя возможными способами передачи действия от источника к приёмнику возникли и начали развиваться две совершенно различные теории о том, что такое свет, какова его природа. Причём возникли они почти одновременно в XVII в. Одна из этих теорий связана с именем Ньютона, а другая — с именем Гюйгенса.

Ньютон придерживался так называемой корпускулярной* теории света, согласно которой свет — это поток частиц, идущих от источника во все стороны (перенос вещества).

Согласно же представлениям Гюйгенса свет — это *волны*, распространяющиеся в особой гипотетической среде — эфире, заполняющем всё пространство и проникающем внутрь всех тел.

Обе теории длительное время существовали параллельно. Ни одна из них не могла одержать решающей победы. Лишь авторитет Ньютона заставлял большинство учёных отдавать предпочтение корпускулярной теории. Известные в то время из опыта законы распространения света более или менее успешно объяснялись обеими теориями.

На основе корпускулярной теории было трудно объяснить, почему световые пучки, пересекаясь в пространстве, никак не действуют друг на друга. Ведь световые частицы должны сталкиваться и рассеиваться.

Волновая же теория это легко объясняла. Волны, например на поверхности воды, свободно проходят друг сквозь друга, не оказывая взаимного влияния.

Однако прямолинейное распространение света, приводящее к образованию за предметами резких теней, трудно объяснить, исходя из волновой теории. По корпускулярной же теории прямолинейное распространение света является просто следствием закона инерции.

Такое неопределённое положение относительно природы света длилось до начала XIX в., когда были открыты явления

* От латинского слова *corpusculum* — «частица».

дифракции света (огибание светом препятствий) и интерференции света (усиление или ослабление света при наложении световых пучков друг на друга). Эти явления присущи исключительно волновому движению. Объяснить их с помощью корпускулярной теории нельзя. Поэтому казалось, что волновая теория одержала окончательную и полную победу.

Такая уверенность особенно окрепла, когда Максвелл во второй половине XIX в. показал, что свет есть частный случай электромагнитных волн. Работами Максвелла были заложены основы электромагнитной теории света.

После экспериментального обнаружения электромагнитных волн Герцем никаких сомнений в том, что **при распространении свет ведёт себя как волна**, не осталось. Нет их и сейчас.

Однако в начале XX в. представления о природе света начали коренным образом изменяться. Неожиданно выяснилось, что отвергнутая корпускулярная теория всё же имеет отношение к действительности.

Оказалось, что **при излучении и поглощении свет ведёт себя подобно потоку частиц**.

Были обнаружены прерывистые, или, как говорят, квантовые, свойства света. Возникла необычная ситуация: явления интерференции и дифракции по-прежнему можно было объяснить, считая свет волной, а явления излучения и поглощения — считая свет потоком частиц. Эти два, казалось бы, несовместимых друг с другом представления о природе света в 30-х гг. XX в. удалось непротиворечивым образом объединить в новой физической теории — квантовой электродинамике.

С течением времени выяснилось, что двойственность свойств присуща не только свету, но и любой другой форме материи.

Глава 1

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

С волновыми и корпускулярными свойствами света мы познакомимся в дальнейшем. Предварительно же рассмотрим законы распространения света, составляющие содержание так называемой геометрической или лучевой оптики.

§ 1.1. СВЕТОВЫЕ ЛУЧИ

Направление распространения любых волн, в том числе и световых, определяется с помощью лучей — линий, перпендикулярных волновым поверхностям и указывающих направление распространения энергии волны.

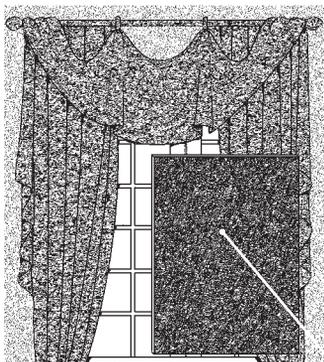


Рис. 1.1

Направление пучка световых лучей можно найти экспериментально. Для этого нужно поставить на пути света непрозрачный экран с небольшим отверстием (рис. 1.1). Тогда в задымлённой комнате мы увидим путь света в виде узкого прямолинейного канала — светового пучка.

Казалось бы, уменьшая отверстие, можно сузить этот пучок до линии и таким образом сколь угодно точно установить направление распространения света. Но в дей-

ствительности с уменьшением отверстия пучок сжимается лишь до тех пор, пока диаметр отверстия остаётся значительно большим длины световой волны. Когда же диаметр отверстия по порядку величины оказывается сравнимым с длиной волны, становится заметным расширение пучка за счёт дифракции. Свет огибает края экрана, подобно тому как это происходит с волнами на поверхности воды. Поэтому получить сколь угодно тонкий пучок света, который можно было бы назвать световым лучом, мы не можем.



Рис. 1.2

Под световым лучом понимают не тонкий световой пучок, а линию, указывающую направление распространения световой энергии. Чтобы определить это направление, мы выделяем узкие световые пучки, диаметр которых всё же должен превосходить длину волны. Затем мы заменяем эти пучки линиями, которые являются осями световых пучков (рис. 1.2). Эти линии и изображают световые лучи. Следовательно, говоря об отражении или преломлении световых лучей, мы имеем в виду изменение направления распространения света.

Основная польза от введения понятия светового луча заключается в том, что поведение лучей в пространстве определяется простыми законами — законами геометрической оптики.

Геометрической оптикой называется раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных средах на основе представления о световом луче.

Эти законы были установлены экспериментально задолго до выяснения природы света. Но они следуют из волновой теории света как приближение, справедливое, если длина волны много меньше размеров препятствий, которые расположены не очень далеко от места наблюдения.

В этой главе мы познакомимся с законами геометрической оптики и их многочисленными применениями для расчёта оптических приборов: очков, фотоаппаратов, микроскопов и др.

К числу основных законов геометрической оптики относятся:

- 1) закон прямолинейного распространения света;
- 2) закон отражения света;
- 3) закон преломления света;
- 4) закон независимости световых пучков.

Пересекаясь в пространстве, световые пучки не оказывают никакого воздействия друг на друга. Так, когда вы читаете книгу, свет, идущий из окна и пронизывающий пространство между книгой и глазами, ни в коей мере не мешает вам воспринимать свет, идущий от букв.

? Почему геометрическую оптику называют также лучевой? Что понимают под световым лучом?

§ 1.2. ЗАКОН ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА

В однородной среде, как показывают наблюдения, свет распространяется прямолинейно. Другими словами, в однородной среде световые лучи представляют собой прямые линии.*

Прямолинейность распространения света — опытный факт, установленный ещё в глубокой древности. Так, закон прямолинейного распространения света излагался уже в сочинениях Евклида (300 лет до н. э.), но, вероятно, он был известен ещё раньше.

Прямолинейностью распространения света объясняется образование тени, т. е. области, куда не поступает световая энергия. При малых размерах источника (светящаяся точка) получается резко очерченная тень (рис. 1.3). Если бы свет распространялся не прямолинейно, он мог бы обогнуть препятствие и тени не получилось бы.

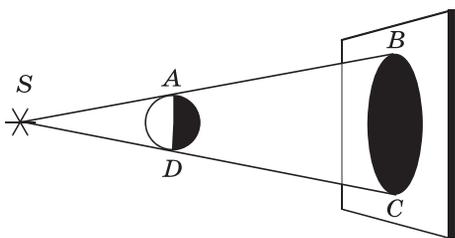


Рис. 1.3

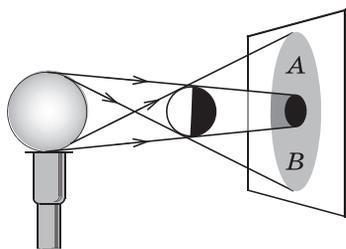


Рис. 1.4

При больших размерах источника создаются нерезкие тени (рис. 1.4). Дело в том, что от каждой точки источника свет распространяется прямолинейно и предмет, освещённый уже двумя светящимися точками, даст две несовпадающие

* Термин «луч» в геометрии, как и понятие прямой линии, возник на основании представлений о световых лучах.

тени, наложение которых образует тень неравномерной густоты. Полная тень при протяжённом источнике образуется лишь в тех участках экрана, куда свет не попадает совсем. По краям полной тени располагается более светлая область — полутень. По мере удаления от области полной тени полутень становится всё более и более светлой. Из области полной тени глаз совсем не увидит источника света, а из области полутени он увидит лишь часть его поверхности (рис. 1.5).

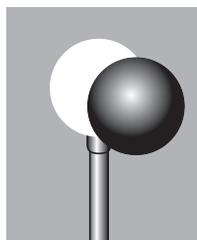


Рис. 1.5

Во многих случаях тень вообще не образуется. Так, в пасмурный день нельзя увидеть тени от столбов, домов и других предметов. При хирургических операциях операционное поле освещают особыми бестеневыми лампами.

Тени и полутени космических масштабов наблюдаются при солнечном и лунном затмениях. На рисунке 1.6 изображена схема затмений Солнца и Луны. Когда Луна занимает положение 1, происходит солнечное затмение. Если она занимает положение 2, наблюдается лунное затмение.

Камера-обскура

Любопытное явление происходит при прохождении света через маленькое отверстие. Наблюдать его очень просто. Возьмите листок плотной бумаги с проколотым в нём отверстием и поместите его между электрической лампочкой и столом. Тогда на столе, покрытом белой бумагой, возникнет

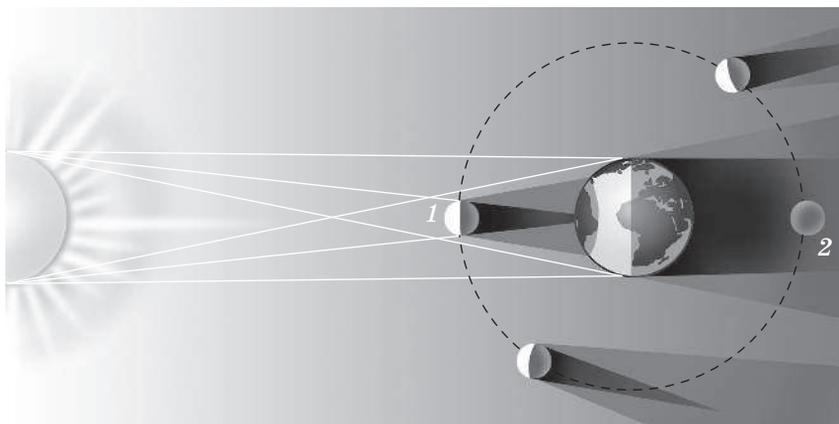


Рис. 1.6

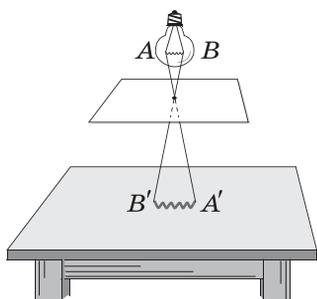


Рис. 1.7

изображение раскалённой нити электрической лампочки. Происходит это вследствие прямолинейного распространения света. От каждой точки нити лампочки через отверстие проходят лучи и дают на столе маленькое светлое пятнышко. Все вместе эти пятнышки сливаются в изображение нити. Изображение получается перевёрнутым (рис. 1.7). Не надо делать отверстие слишком большим, так

как тогда от каждой точки светящейся нити через отверстие пройдёт широкий расходящийся пучок и получится пятно в форме отверстия в бумаге.

Образование изображений с помощью отверстия можно наблюдать в яркий солнечный день в густом лесу. Солнечные лучи пронизывают листву и оставляют на земле яркие светлые блики округлой формы. Промежутки между листьями ограничены прямыми краями листьев и имеют угловатую форму. Ясно поэтому, что не они определяют форму бликов. Блики — это изображения Солнца, полученные при прохождении света сквозь отверстия, образованные листвой деревьев.

Закрытый ящик с отверстием для получения изображений на одной из стенок называется камерой-обскурой*.

Камера-обскура является прототипом современных фотоаппаратов. Отверстие в камере играет роль объектива фотоаппарата.

- ?** 1. Как выглядит для наблюдателя солнечное затмение, когда Земля попадает в область полутени Луны?
2. «Комната, в которую вступил Иван Иванович, была совершенно темна, потому что ставни были закрыты, и солнечный луч, проходя в дыру, сделанную в ставне, принял радужный цвет и, ударяясь в противоположную стену, рисовал на ней пёстрый ландшафт из крыш, деревьев и развешенного на дворе платья, всё только в обращённом виде» (*Н. В. Гоголь*. «Повесть о том, как поссорился Иван Иванович с Иваном Никифоровичем»). Объясните происхождение этого явления.
3. Каким образом явление прямолинейного распространения света стало законом?

* От латинского слова *obscurus* — «тёмный».

§ 1.3. ФОТОМЕТРИЯ

Поток излучения

Свет оказывает действие на тела благодаря тому, что он переносит энергию. Согласно электромагнитной теории света Максвелла световая энергия — это энергия электромагнитных волн. Методы измерения световой энергии составляют раздел оптики, называемый фотометрией. С помощью закономерностей, изучаемых в этом разделе, определяются расположение источников света, концентрация света в заданном направлении для создания освещённости, необходимой для нормальной работы, и т. д. Ряд величин характеризует свет с точки зрения переносимой им энергии.

Вы уже знаете, что энергетической характеристикой электромагнитного излучения является плотность потока излучения. Величина, определяемая энергией, переносимой светом через некоторую поверхность в единицу времени, представляет собой поток излучения (рис. 1.8).

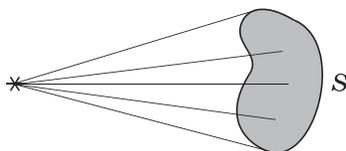


Рис. 1.8

Если за время Δt через поверхность переносится энергия ΔW , то поток излучения равен

$$\Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t}. \quad (1.3.1)$$

Эта величина выражается в ваттах и представляет собой мощность излучения.

Относительная спектральная световая эффективность

Для восприятия световой энергии особое значение, естественно, имеет глаз. Поэтому нас в первую очередь интересует не полная энергия, переносимая электромагнитными волнами, а лишь та её часть, на которую реагирует наш глаз. Очень длинные электромагнитные волны (радиоволны) и очень короткие (например, рентгеновские лучи) глазом не воспринимаются.

Чувствительность глаза к излучениям различных длин волн характеризуют так называемой относительной спектральной эффективностью $V(\lambda)$. Глаз наиболее чувствителен к жёлто-зелёным лучам ($\lambda_3 \approx 0,5$ мкм).

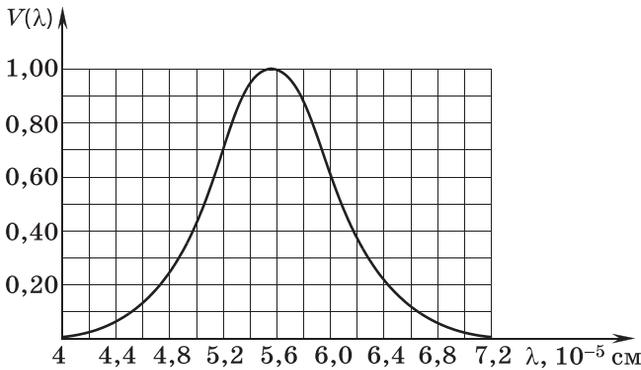


Рис. 1.9

Относительной спектральной световой эффективностью называют отношение мощности излучения на данной длине волны λ к мощности излучения на длине волны λ_3 при условии, что на глаз эти излучения воспринимаются как одинаково яркие. График относительной спектральной световой эффективности (рис. 1.9) имеет максимум при $\lambda = \lambda_3$.

У разных людей чувствительность глаза к излучениям различных длин волн различна. Но в среднем различия оказываются небольшими, и можно говорить о вполне определённой (усреднённой) кривой относительной спектральной световой эффективности здорового глаза.

Глаз как продукт естественного отбора

Глаз воспринимает электромагнитные излучения в сравнительно небольшом интервале длин волн: от $4 \cdot 10^{-7}$ до $8 \cdot 10^{-7}$ м. Кривая относительной спектральной световой эффективности обрывается на этих длинах волн. Почему же природа сделала наш глаз (равно как и глаза животных) чувствительным к определённому интервалу длин волн?

Полоса видимого излучения расположена между ультрафиолетовыми и инфракрасными (тепловыми) лучами. По краям шкалы электромагнитных волн простираются широкие полосы радиоволн и гамма-лучей, испускаемых атомными ядрами. Все эти волны несут энергию и, казалось бы, могли с тем же успехом делать для нас то, что делает свет. Глаз мог бы быть чувствительным и к ним.

Конечно, сразу же можно сказать, что подходят волны не всех длин. Гамма-лучи и рентгеновские лучи излучаются за-

метно лишь при особых условиях, и вокруг нас их почти нет. Это и хорошо. Они (особенно это относится к гамма-лучам) вызывают лучевую болезнь, и долго наслаждаться картиной в гамма-лучах человечество не могло бы.

Длинные радиоволны были бы крайне неудобны. Они свободно огибают предметы метровых размеров, подобно тому как морские волны огибают прибрежные камни. Мы не могли бы рассматривать предметы, видеть которые чётко нам жизненно необходимо. Дифракция волн привела бы к тому, что мы видели бы мир «как рыба в тине». Но есть ещё инфракрасные волны, способные нагревать тела, но невидимые нами. Они, казалось бы, с успехом могли заменить волны тех длин, которые воспринимаются глазом. Или, наконец, глаз мог бы приспособиться к ультрафиолету.

Получается, что выбор узкой полосы длин волн, которую мы именуем светом, именно на данном участке шкалы совершенно случаен. Ведь Солнце испускает как видимые лучи, так и ультрафиолетовые и инфракрасные.

Нет и нет! Этот выбор далеко не случаен. Прежде всего максимум излучения электромагнитных волн Солнца лежит как раз в жёлто-зелёной области видимого спектра. Но не это всё же главное! Излучение в соседних областях спектра тоже достаточно интенсивно.

Мы живём на дне воздушного океана. Земля окружена атмосферой. Мы её считаем прозрачной или почти прозрачной. И она является таковой в действительности, но только для узкого участка длин волн, который как раз воспринимает наш глаз.

Это первое оптическое «окно» в атмосфере. Озон сильно поглощает ультрафиолетовое излучение. Пары воды значительно ослабляют инфракрасное излучение*. Длинные радиоволны отбрасываются назад верхним слоем атмосферы — ионосферой.

Имеется ещё только одно «радиоокно», прозрачное для длин волн от 0,25 см до 30 м. Но эти волны плохо подходят для глаза, да и интенсивность их в солнечном спектре мала. Потребовался большой скачок в развитии радиотехники, вызванный усовершенствованием радиолокаторов во время Второй мировой войны, прежде чем научились уверенно улавливать эти волны.

* Надо отметить, что сам глаз, как нагретое тело, тоже излучает инфракрасные волны. Если бы глаз был к ним чувствителен, то это сильно мешало бы его работе.

Таким образом, в процессе борьбы за существование живые организмы приобрели орган, реагирующий как раз на те излучения, которые были наиболее интенсивны и очень хорошо подходили для своего назначения.

То, что максимум излучения Солнца приходится на середину «оптического окна», следует, вероятно, считать дополнительным подарком природы.

Световой поток

Практически важно знать не просто мощность излучения, регистрируемую соответствующими измерительными приборами, а мощность светового потока, оцениваемую непосредственно нашим глазом. Для оценки световой энергии введена особая физическая величина — *световой поток* (обозначается буквой Φ).

Световым потоком называют отношение протекающей через некоторую поверхность за время Δt световой энергии, оцениваемой по зрительному впечатлению, ко времени Δt . Другими словами, световой поток — это мощность светового излучения, оцениваемая непосредственно нашим глазом.

Как в принципе осуществляется эта оценка? Выбирают некоторый эталонный источник света. Световой поток этого источника сравнивают со световыми потоками всех остальных источников. Сравнение осуществляется с помощью глаза.

Световой поток создаётся источником света и действует на окружающие предметы. Соответственно вводят ещё две световые величины: одну для характеристики источника света — *силу света* источника, а другую для характеристики действия света на поверхность тел — *освещённость*.

§ 1.4. СИЛА СВЕТА

Понятие силы света проще всего ввести для так называемого точечного источника света.

Точечный источник

Источник света считается точечным, если его размеры много меньше расстояний, на которых оценивается его действие. Так, например, расстояния до звёзд настолько превос-

ходят их размеры, что именно звёзды являются лучшей моделью точечного источника, несмотря на то что их размеры огромны. Вводя понятие точечного источника света, мы выделяем лишь существенные для фотометрии свойства реальных источников, отвлекаясь от второстепенных свойств. Точечный источник является идеализацией, как и другие модели, принятые в физике, — материальная точка, абсолютно твёрдое тело, идеальный газ и т. п.

Сила света

Силой света I источника называется отношение светового потока $\Delta\Phi$ к телесному углу $\Delta\Omega$, в котором этот световой поток распространяется от источника:

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega}. \quad (1.4.1)$$

Точечный источник света создаёт равномерный по всем направлениям световой поток, поэтому и сила света точечного источника одинакова по всем направлениям; она равна

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}, \quad (1.4.2)$$

где Φ — полный световой поток источника, т. е. мощность светового излучения, распространяющегося по всем направлениям от источника, оцениваемая по зрительному ощущению.

Для характеристики источника излучения вместо силы света говорят о *силе излучения* источника и выражают её в ваттах на стерадиан.

Единица силы света

В системе единиц световых величин за основную принята *единица силы света*. В СИ эта единица называется кандела* (кд). Дело в том, что проще всего создать эталон именно для силы света, а не для светового потока.

В качестве единицы силы света принята сила света некоторого эталонного источника. В разное время использовались различные эталонные источники: свеча, пламенная

* От латинского слова *candela* — «свеча».

лампа, электрическая лампа накаливания, поверхность расплавленной платины. В настоящее время принято следующее определение канделы: *кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $5,4 \cdot 10^{14}$ Гц ($\lambda \approx 5 \cdot 10^{-7}$ м), сила излучения которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср.*

Все остальные световые единицы, в том числе и единица светового потока, являются производными.

Единица светового потока

За единицу светового потока принимается люмен* (лм).

Люмен — это световой поток, испускаемый точечным источником, сила света которого 1 кд, в телесном угле, равном 1 ср.

Из определения канделы следует, что световой поток в 1 лм соответствует потоку энергии излучения в 1/683 Вт при частоте $5,4 \cdot 10^{14}$ Гц.

§ 1.5. ОСВЕЩЁННОСТЬ. ЯРКОСТЬ

Источник света почти всегда освещает поверхности предметов неравномерно. Так, лампа, висящая над столом, лучше всего освещает центр стола. Края стола освещены значительно хуже. И дело здесь не только в том, что сила света электрической лампы различна по различным направлениям. Даже в случае точечного источника на площадку в центре стола придёт большая световая мощность (световой поток), чем на такую же площадку на краю.

Освещённость

Освещённостью E называется отношение светового потока $\Delta\Phi$, падающего на некоторый участок поверхности, к площади ΔS этого участка:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}. \quad (1.5.1)$$

* От латинского слова lumen — «свет».