

Дифракция света

Темы кодификатора ЕГЭ: дифракция света, дифракционная решётка.

Если на пути волны возникает препятствие, то происходит *дифракция* — отклонение волны от прямолинейного распространения. Это отклонение не сводится к отражению или преломлению, а также искривлению хода лучей вследствие изменения показателя преломления среды. Дифракция состоит в том, что волна *огibt* край препятствия и заходит в область геометрической тени.

Пусть, например, плоская волна падает на экран с достаточно узкой щелью (рис. 1). На выходе из щели возникает расходящаяся волна, и эта расходимость усиливается с уменьшением ширины щели.

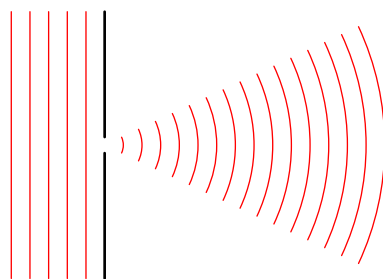


Рис. 1. Дифракция на щели

Вообще, дифракционные явления выражены тем отчётливей, чем мельче препятствие. Наиболее существенна дифракция в тех случаях, когда размер препятствия меньше или порядка длины волны. Именно такому условию должна удовлетворять ширина щели на рис. 1.

Дифракция, как и интерференция, свойственна всем видам волн — механическим и электромагнитным. Видимый свет есть частный случай электромагнитных волн; неудивительно поэтому, что можно наблюдать *дифракцию света*.

Так, на рис. 2 изображена дифракционная картина¹, полученная в результате прохождения лазерного луча сквозь небольшое отверстие диаметром 0,2 мм.

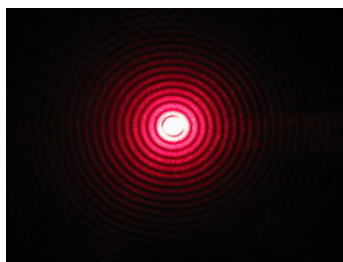


Рис. 2. Дифракция лазерного луча на отверстии

Мы видим, как и полагается, центральное яркое пятно; совсем далеко от пятна расположена тёмная область — геометрическая тень. Но вокруг центрального пятна — вместо чёткой границы света и тени! — идут чередующиеся светлые и тёмные кольца. Чем дальше от центра, тем менее яркими становятся светлые кольца; они постепенно исчезают в области тени.

¹Изображение с сайта en.wikipedia.org.

Напоминает интерференцию, не правда ли? Это она и есть; данные кольца являются интерференционными максимумами и минимумами. Какие же волны тут интерферируют? Скоро мы разберёмся с этим вопросом, а заодно и выясним, почему вообще наблюдается дифракция.

Но прежде нельзя не упомянуть самый первый классический эксперимент по интерференции света — опыт Юнга, в котором существенно использовалось явление дифракции.

Опыт Юнга

Всякий эксперимент с интерференцией света содержит некоторый способ получения двух когерентных световых волн. В опыте с зеркалами Френеля, как вы помните, когерентными источниками являлись два изображения одного и того же источника, полученные в обоих зеркалах.

Самая простая идея, которая возникла прежде всего, состояла в следующем. Давайте проколем в куске картона два отверстия и поставим под солнечные лучи. Эти отверстия будут когерентными вторичными источниками света, поскольку первичный источник один — Солнце. Следовательно, на экране в области перекрытия пучков, расходящихся от отверстий, мы должны увидеть интерференционную картину.

Такой опыт был поставлен задолго до Юнга итальянским учёным Франческо Гримальди (который открыл дифракцию света). Интерференции, однако, не наблюдалось. Почему же? Вопрос это не очень простой, и причина заключается в том, что Солнце — не точечный, а протяжённый источник света (угловой размер Солнца равен 30 угловым минутам). Солнечный диск состоит из множества точечных источников, каждый из которых даёт на экране свою интерференционную картину. Накладываясь, эти отдельные картины «смазывают» друг друга, и в результате на экране получается равномерная освещённость области перекрытия пучков.

Но если Солнце является чрезмерно «большим», то нужно искусственно создать *точечный* первичный источник. С этой целью в опыте Юнга использовано маленькое предварительное отверстие (рис. 3).

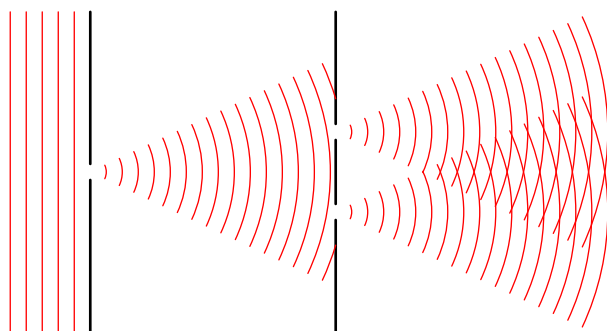


Рис. 3. Схема опыта Юнга

Плоская волна падает на первое отверстие, и за отверстием возникает световой конус, расширяющийся вследствие дифракции. Он достигает следующих двух отверстий, которые становятся источниками двух когерентных световых конусов. Вот теперь — благодаря точечности первичного источника — в области перекрытия конусов будет наблюдаться интерференционная картина!

Томас Юнг осуществил этот эксперимент, измерил ширину Δx интерференционных полос, вывел формулу $\Delta x = \lambda L/a$ (уже известную вам из листка «Интерференция волн») и с помощью этой формулы впервые вычислил длины волн видимого света. Вот почему этот опыт вошёл в число самых знаменитых в истории физики.

Принцип Гюйгенса–Френеля

Напомним формулировку принципа Гюйгенса: каждая точка, вовлечённая в волновой процесс, является источником вторичных сферических волн; эти волны распространяются от данной точки, как из центра, во все стороны и накладываются друг на друга.

Но возникает естественный вопрос: а что значит «накладываются»?

Гюйгенс свёл свой принцип к чисто геометрическому способу построения новой волновой поверхности как огибающей семейства сфер, расширяющихся от каждой точки исходной волновой поверхности. Вторичные волны Гюйгенса — это математические сферы, а не реальные волны; их суммарное действие проявляется только на огибающей, т. е. на новом положении волновой поверхности.

В таком виде принцип Гюйгенса не давал ответа на вопрос, почему в процессе распространения волны не возникает волна, идущая в обратном направлении. Не объяснёнными оставались и дифракционные явления.

Модификация принципа Гюйгенса состоялась лишь спустя 137 лет. Огюстен Френель заменил вспомогательные геометрические сферы Гюйгенса на реальные волны и предположил, что эти волны *интерферируют* друг с другом.

Принцип Гюйгенса–Френеля. *Каждая точка волновой поверхности служит источником вторичных сферических волн. Все эти вторичные волны являются когерентными ввиду общности их происхождения от первичного источника (и, стало быть, могут интерферировать друг с другом); волновой процесс в окружающем пространстве есть результат интерференции вторичных волн.*

Идея Френеля наполнила принцип Гюйгенса физическим смыслом. Вторичные волны, интерферируя, усиливают друг друга на огибающей своих волновых поверхностей в направлении «вперёд», обеспечивая дальнейшее распространение волны. А в направлении «назад» происходит их интерференция с исходной волной, наблюдается взаимное гашение, и обратная волна не возникает.

В частности, свет распространяется там, где вторичные волны взаимно усиливаются. А в местах ослабления вторичных волн мы будем видеть тёмные участки пространства.

Принцип Гюйгенса–Френеля выражает важную физическую идею: волна, удалившись от своего источника, в дальнейшем «живёт своей жизнью» и уже никак от этого источника не зависит. Захватывая новые участки пространства, волна распространяется всё дальше и дальше вследствие интерференции вторичных волн, возбуждённых в различных точках пространства по мере прохождения волны.

Как принцип Гюйгенса–Френеля объясняет явление дифракции? Почему, например, происходит дифракция на отверстии? Дело в том, что из бесконечной плоской волновой поверхности падающей волны экранное отверстие вырезает лишь маленький светящийся диск, и последующее световое поле получается в результате интерференции волн вторичных источников, расположенных уже не на всей плоскости, а лишь на этом диске. Естественно, новые волновые поверхности теперь не будут плоскими; ход лучей искривляется, и волна начинает распространяться в разных направлениях, не совпадающих с первоначальным. Волна огибает края отверстия и проникает в область геометрической тени.

Вторичные волны, испущенные различными точками вырезанного светлого диска, интерферируют друг с другом. Результат интерференции определяется разностью фаз вторичных волн и зависит от угла отклонения лучей. В результате возникает чередование интерференционных максимумов и минимумов — что мы и видели на рис. 2.

Френель не только дополнил принцип Гюйгенса важной идеей когерентности и интерференции вторичных волн, но и придумал свой знаменитый метод решения дифракционных задач, основанный на построении так называемых *зон Френеля*. Изучение зон Френеля не входит в школьную программу — о них вы узнаете уже в вузовском курсе физики. Здесь мы упомянем

лишь, что Френелю в рамках своей теории удалось дать объяснение нашего самого первого закона геометрической оптики — закона прямолинейного распространения света.

Дифракционная решётка

Дифракционная решётка — это оптический прибор, позволяющий получать разложение света на спектральные составляющие и измерять длины волн. Дифракционные решётки бывают прозрачными и отражательными.

Мы рассмотрим прозрачную дифракционную решётку. Она состоит из большого числа щелей ширины a , разделённых промежутками ширины b (рис. 4). Свет проходит только сквозь щели; промежутки свет не пропускают. Величина $d = a + b$ называется *периодом* решётки.

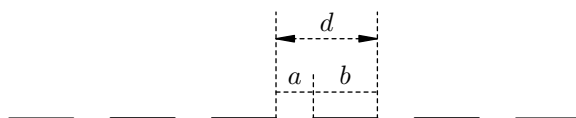


Рис. 4. Дифракционная решётка

Дифракционная решётка изготавливается с помощью так называемой делительной машины, которая наносит штрихи на поверхность стекла или прозрачной плёнки. При этом штрихи оказываются непрозрачными промежутками, а нетронутые места служат щелями. Если, например, дифракционная решётка содержит 100 штрихов на миллиметр, то период такой решётки будет равен: $d = 0,01 \text{ мм} = 10 \text{ мкм}$.

Сперва мы посмотрим, как проходит сквозь решётку монохроматический свет, т. е. свет со строго определённой длиной волны. Отличным примером монохроматического света служит луч лазерной указки (длина волны около 0,65 мкм).

На рис. 5 мы видим такой луч, падающий на одну из дифракционных решёток стандартного набора². Щели решётки расположены вертикально, и на экране за решёткой наблюдаются периодически расположенные вертикальные полосы.

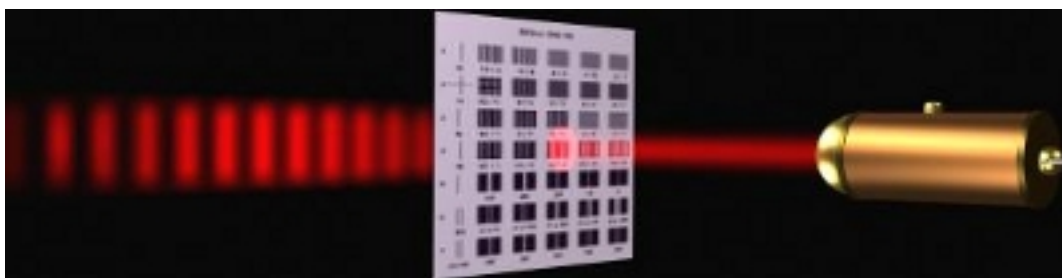


Рис. 5. Дифракция лазерного луча на решётке

Как вы уже поняли, это интерференционная картина. Дифракционная решётка расщепляет падающую волну на множество когерентных пучков, которые распространяются по всем направлениям и интерферируют друг с другом. Поэтому на экране мы видим чередование максимумов и минимумов интерференции — светлых и тёмных полос.

Теория дифракционной решётки весьма сложна и во всей своей полноте оказывается далеко за рамками школьной программы. Вам следует знать лишь самые элементарные вещи, связанные с одной-единственной формулой; эта формула описывает положения максимумов освещённости экрана за дифракционной решёткой.

²Изображение с сайта physics.nad.ru.

Итак, пусть на дифракционную решётку с периодом d падает плоская монохроматическая волна (рис. 6). Длина волны равна λ .

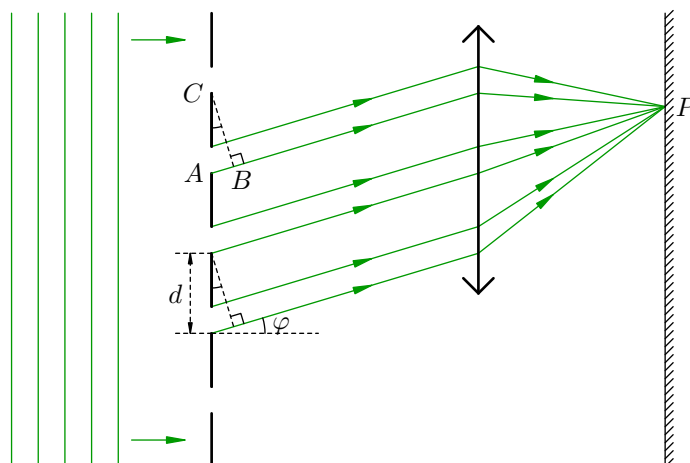


Рис. 6. Дифракция на решётке

Для большей чёткости интерференционной картины можно поставить линзу между решёткой и экраном, а экран поместить в фокальной плоскости линзы. Тогда вторичные волны, идущие параллельно от различных щелей, соберутся в одной точке P экрана (побочном фокусе линзы). Если же экран расположен достаточно далеко, то особой необходимости в линзе нет — лучи, приходящие в данную точку экрана от различных щелей, будут и так почти параллельны друг другу.

Рассмотрим вторичные волны, отклоняющиеся на угол φ . Разность хода между двумя волнами, идущими от соседних щелей, равна маленькому катету прямоугольного треугольника с гипотенузой d ; или, что то же самое, эта разность хода равна катету AB треугольника ABC . Но угол ACB равен углу φ , поскольку это острые углы со взаимно перпендикулярными сторонами. Следовательно, наша разность хода равна $d \sin \varphi$.

Интерференционные максимумы наблюдаются в тех случаях, когда разность хода равна целому числу длин волн:

$$d \sin \varphi = k\lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (1)$$

При выполнении этого условия все волны, приходящие в точку P от различных щелей, будут складываться в фазе и усиливать друг друга³.

Формула (1) позволяет найти углы, задающие направления на максимумы:

$$\sin \varphi_k = \frac{k\lambda}{d} \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (2)$$

При $k = 0$ получаем $\varphi = 0$. Это *центральный максимум*, или максимум *нулевого порядка*. Разность хода всех вторичных волн, идущих без отклонения, равна нулю, и в центральном максимуме они складываются с нулевым сдвигом фаз. Центральный максимум — это центр дифракционной картины, самый яркий из максимумов. Дифракционная картина на экране симметрична относительно центрального максимума.

При $k = 1$ получаем угол:

$$\varphi_1 = \arcsin \frac{\lambda}{d}.$$

³Линза при этом не вносит дополнительной разности хода — несмотря на то, что разные лучи проходят через линзу разными путями. Почему так получается? Мы не будем вдаваться в этот вопрос, поскольку его обсуждение выходит за рамки ЕГЭ по физике.

Этот угол задаёт направления на *максимумы первого порядка*. Их два, и расположены они симметрично относительно центрального максимума. Яркость в максимумах первого порядка несколько меньше, чем в центральном максимуме.

Аналогично, при $k = 2$ имеем угол:

$$\varphi_2 = \arcsin \frac{2\lambda}{d}.$$

Он задаёт направления на *максимумы второго порядка*. Их тоже два, и они также расположены симметрично относительно центрального максимума. Яркость в максимумах второго порядка несколько меньше, чем в максимумах первого порядка.

Примерная картина направлений на максимумы первых двух порядков показана на рис. 7.

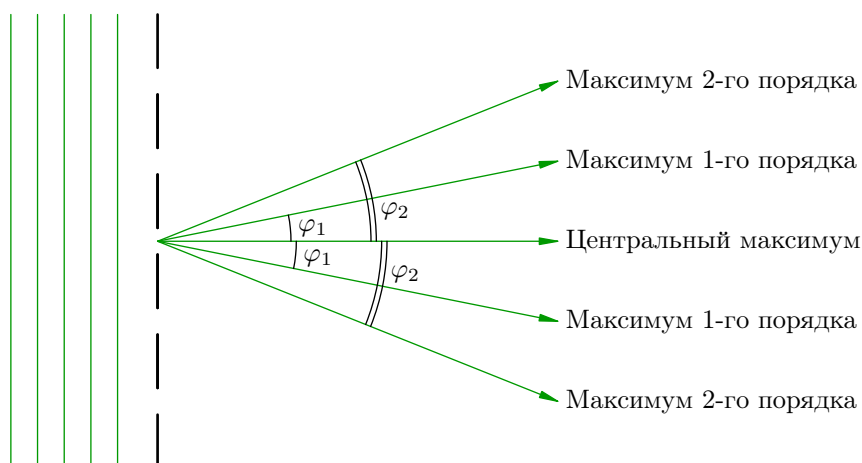


Рис. 7. Максимумы первых двух порядков

Вообще, два симметричных *максимума k -го порядка* определяются углом:

$$\varphi_k = \arcsin \frac{k\lambda}{d}. \quad (3)$$

При небольших k соответствующие углы обычно невелики. Например, при $\lambda = 0,65$ мкм и $d = 10$ мкм максимумы первого порядка расположены под углом $\varphi_1 = \arcsin(0,65/10) = 3,7^\circ$.

Яркость максимумов k -го порядка постепенно убывает с ростом k . Сколько всего максимумов можно увидеть? На этот вопрос легко ответить с помощью формулы (2). Ведь синус не может быть больше единицы, поэтому:

$$k \leq \frac{d}{\lambda}.$$

Используя те же числовые данные, что и выше, получим: $k \leq 15,4$. Следовательно, наибольший возможный порядок максимума для данной решётки равен 15.

Посмотрите ещё раз на рис. 5. На экране мы видны 11 максимумов. Это центральный максимум, а также по два максимума первого, второго, третьего, четвёртого и пятого порядков.

С помощью дифракционной решётки можно измерить неизвестную длину волны. Направляем пучок света на решётку (период которой мы знаем), измеряем угол φ_1 на максимум первого порядка, пользуемся формулой (1) и получаем:

$$\lambda = d \sin \varphi_1.$$

Дифракционная решётка как спектральный прибор

Выше мы рассматривали дифракцию монохроматического света, каковым является лазерный луч. Часто приходится иметь дело с *немонохроматическим* излучением. Оно является смесью различных монохроматических волн, которые составляют *спектр* данного излучения. Например, белый свет — это смесь волн всего видимого диапазона, от красного до фиолетового.

Оптический прибор называется *спектральным*, если он позволяет раскладывать свет на монохроматические компоненты и тем самым исследовать спектральный состав излучения. Простейший спектральный прибор вам хорошо известен — это стеклянная призма. К числу спектральных приборов относится также и дифракционная решётка.

Предположим, что на дифракционную решётку падает белый свет. Давайте вернёмся к формуле (2) и подумаем, какие выводы из неё можно сделать.

Положение центрального максимума ($\varphi = 0$) не зависит от длины волны. В центре дифракционной картины сойдутся с нулевой разностью хода *все* монохроматические составляющие белого света. Поэтому в центральном максимуме мы увидим яркую белую полосу.

А вот положения максимумов порядка $k \geq 1$ определяются длиной волны. Чем меньше λ , тем меньше угол φ_k для данного k . Поэтому в максимуме k -го порядка монохроматические волны разделяются в пространстве: самой близкой к центральному максимуму окажется фиолетовая полоса, самой далёкой — красная.

Следовательно, в каждом порядке $k \geq 1$ белый свет раскладывается решёткой в спектр. Максимумы первого порядка всех монохроматических компонент образуют *спектр первого порядка*; затем идут спектры второго, третьего и так далее порядков. Спектр каждого порядка имеет вид цветной полосы, в которой присутствуют все цвета радуги — от фиолетового до красного.

Дифракция белого света показана⁴ на рис. 8. Мы видим белую полосу в центральном максимуме, а по бокам — два спектра первого порядка. По мере возрастания угла отклонения цвет полос меняется от фиолетового к красному.

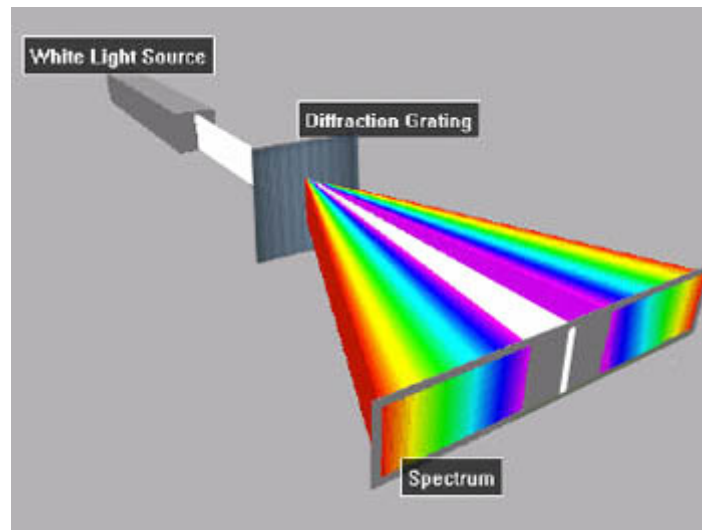


Рис. 8. Дифракция белого света на решётке

Но дифракционная решётка не только позволяет наблюдать спектры, т. е. проводить качественный анализ спектрального состава излучения. Важнейшим достоинством дифракционной решётки является возможность количественного анализа — как уже говорилось выше, мы с её помощью можем *измерять* длины волн. При этом измерительная процедура весьма проста: фактически она сводится к измерению угла направления на максимум.

⁴Изображение с сайта h2physics.org.

Естественными примерами дифракционных решёток, встречающихся в природе, являются перья птиц, крылья бабочек, перламутровая поверхность морской раковины. Если, прищурившись, посмотреть на солнечный свет, то можно увидеть радужную окраску вокруг ресниц. Наши ресницы действуют в данном случае как прозрачная дифракционная решётка на рис. 6, а в качестве линзы выступает оптическая система роговицы и хрусталика.

Спектральное разложение белого света, даваемое дифракционной решёткой, проще всего наблюдать, глядя на обычный компакт-диск (рис. 9)⁵. Оказывается, дорожки на поверхности диска образуют отражательную дифракционную решётку!



Рис. 9. Компакт-диск как отражательная решётка

⁵Изображение с сайта en.wikipedia.org.