

ров с сопротивлениями R_1, R_2 (рис.5). Пусть $E_1 > E_2$, тогда ток I в цепи будет течь против движения часовой стрелки. Изобразим изменение потенциала электрического кулоновского поля при обходе по замкнутому контуру.

Точка 1 имеет наивысший потенциал, а точка 8 – наименьший. Проводник 1–2 не имеет сопротивления (нет силы трения), поэтому уровень потенциала здесь не изменяется. Проводник 2–3 с сопротивлением R_1 будем считать переходим на наш цилиндрический проводник. На этом участке мы спускаемся «под горку», уровень потенциала линейно понижается от точки 2 до точки 3. При этом сила трения равна «скатывающей» силе – силе со стороны кулоновского поля – и вольтметр покажет $U_1 = IR_1$. При движении от точки 3 до точки 4 уровень потенциала не меняется. Точка 4 соответствует на-

хождению на положительной пластине второй батареи с ЭДС E_2 . Когда мы переходим от положительной пластины к электролиту, мы как бы опускаемся в лифте, уровень потенциала понижается, электрическое поле совершает работу против сторонних сил батареи. То же происходит при переходе от электролита к отрицательной пластине. В результате батарея заряжается с мощностью зарядки $-E_2 I$. Движение зарядов внутри батареи связано с преодолением сопротивления r_2 , и уровень потенциала понижается еще на величину Ir_2 . Вольтметр, подсоединенный к пластинам этой батареи, покажет $U_{45} = E_2 + Ir_2$. На участке 5–6 уровень потенциала не изменяется, а на резисторе с сопротивлением R_2 потенциал упадет на IR_2 . И вот мы оказались на отрицательной пластине более сильной батареи с ЭДС E_1 в точке 8. Первый

мощный подъем, затем падение на сопротивлении r_1 и снова мощный подъем от электролита к положительной пластине 1.

Обойдя замкнутый контур, мы вернулись на начальный уровень кулоновского потенциала. При этом сумма «подъемов» равна сумме «падений» кулоновского потенциала, т.е. работа по замкнутому контуру в кулоновском поле всегда равна нулю:

$$-IR_1 - E_2 - Ir_2 - IR_2 - Ir_1 + E_1 = 0,$$

или

$$I(R_1 + R_2 + r_1 + r_2) = E_1 - E_2.$$

Это соотношение называют законом Ома для замкнутой цепи или вторым правилом Кирхгофа. Теперь мы понимаем, что вообще-то оно непосредственно вытекает из свойств электрического кулоновского поля.

Физическая ОПТИКА и два верблюда

А. СТАСЕНКО

На каком расстоянии можно отличить двугорбого верблюда от одногорбого?

Детский вопрос



ЧТО МОЖЕТ ПОМЕШАТЬ этой важной для народного хозяйства процедуре? Оказывается, существуют принципиальные ограничения, налагаемые *физической оптикой*.

Начнем по порядку. Пусть на непрозрачный экран (рис.1) слева падает широкий параллельный пучок света интенсивностью I_0 (это плотность потока энергии, измеряемая в Дж/(с·м²)), а в экране имеется бесконечно длинная щель шириной d . С точки зрения геометрической оптики, за щелью образуется тоже параллельный пучок света, ширина которого на любом расстоянии от щели будет одинаковой и равной d , так что если в каком-то месте поставить перпендикулярную белую пластинку, то на ней будет видна светлая полоска той же ширины d с освещенностью I_0 (как на рисунке 1 справа).

Однако надо вспомнить, что световая волна обладает определенной пространственной структурой. Самым характер-

ным масштабom этой структуры является длина волны λ . И тут Опытный Читатель «Кванта» непременно воскликнет: в таком случае важную роль должно играть безразмерное отношение λ/d ! И он будет совершенно прав.

Действительно, разобьем щель на две светящиеся полуполоски шириной $d/2$. И еще: соберем мысленно всю энергию этих двух полуполосок в две бесконечные светящиеся нити, отстоя-

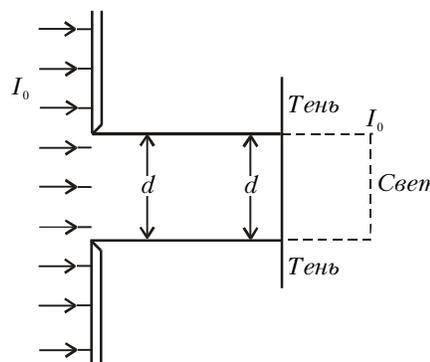


Рис. 1

щие друг от друга на $d/2$ (рис.2, слева). Тогда дело сведется к так называемой *двухлучевой интерференции* (напоминающей известный опыт Юнга). Посмотрим, какая картина возникнет на белой пластинке справа, находящейся на расстоянии x от щели в экране.

Прежде всего найдем разность хода $\Delta = r_2 - r_1$ от двух нитей A и B до точки с координатой y на пластинке. Из двух треугольников на рисунке 2, с учетом узости щели, имеем

$$r_1^2 = r^2 + \left(\frac{d}{4}\right)^2 - 2r \frac{d}{4} \sin \theta,$$

$$r_2^2 = r^2 + \left(\frac{d}{4}\right)^2 + 2r \frac{d}{4} \sin \theta.$$

Вычитая первое равенство из второго, получим

$$r_2^2 - r_1^2 = rd \sin \theta.$$

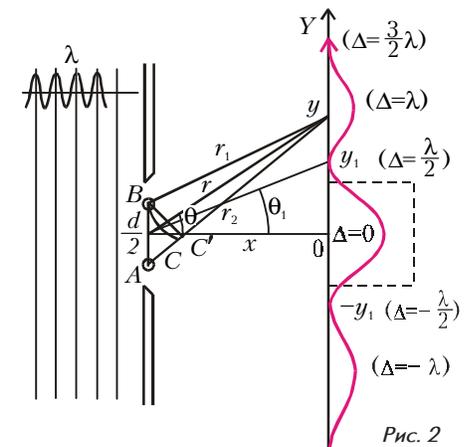


Рис. 2

Но левую часть (разность квадратов) можно представить в виде $(r_2 - r_1)(r_2 + r_1)$. Первый множитель и есть искомая разность хода, а второй можно приближенно записать так: $r_2 + r_1 = 2r$. Тогда

$$\Delta = \frac{d}{2} \sin \theta,$$

что можно было бы найти и сразу, если «кривоугольный» треугольник ABC приближенно заменить прямоугольным треугольником ABC' .

А теперь вспомним основную идею интерференции: если разность хода двух волн от двух источников света до одной и той же точки равна целому числу длин волн λ , то волны усилят друг друга, а если она равна нечетному числу полуволн, то эти две интерферирующие волны ослабят друг друга. Значит, на правой пластинке должна получиться вовсе не «ступенька» освещенности, изображенная на рисунке 1 приверженцем геометрической оптики, а более сложная картина чередующихся светлых и темных полос – как на рисунке 2 справа. Самая большая освещенность будет в середине пластинки, на линии, противоположающей середине щели ($y = 0$). Яркость других полос будет убывать с удалением от середины пластинки – ведь они все дальше отстоят от светящейся щели.

Для наших целей самым интересным является положение темных полос, ограничивающих центральную светлую полосу. Из вышесказанного следует, что в этом месте

$$\frac{d}{2} \sin \theta_1 = \pm \frac{\lambda}{2},$$

или

$$\sin \theta_1 = \frac{\pm y_1}{\sqrt{y_1^2 + x^2}} = \pm \frac{\lambda}{d}.$$

Вот тут и сбывается предвидение Опытного Читателя: действительно, распределение освещенности пластинки оказалось зависящим от важнейшего параметра – безразмерного отношения длины волны света к размеру отверстия, пропускающего свет! Это распределение называют *дифракционной картиной* от щели.

Но вернемся к нашим верблюдам. В этом случае «щелью» служит зрачок глаза (который вовсе не бесконечная щель, а круглое отверстие), а роль пластинки играет задняя внутренняя поверхность глаза – сетчатка. Оказывается, на ней возникнет дифракционная картина, очень похожая на изображенную на рисунке 2 справа. Только теперь, конечно, это уже не параллельные полосы, а темные и светлые кольца, окружающие центральное светлое

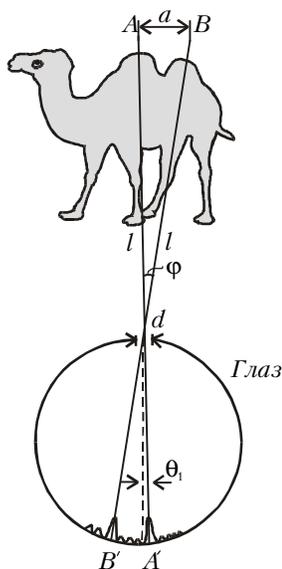


Рис. 3

пятно. И радиусу первой темной окружности соответствует несколько другой (большой) угол – такой, что

$$\sin \theta_1 = 1,22 \frac{\lambda}{d},$$

где d – это уже диаметр зрачка.

Итак, каждая «точка» удаленного объекта (верблюда), пославшая в глаз почти параллельный пучок рассеянного ею солнечного света, изобразится на сетчатке в виде светлого пятнышка, окруженного системой колец. (Не напоминает ли это вам картину волн от камешка, брошенного в пруд?) Но нам нужно различить – физики говорят «разрешить» – две точки. Дифракционная картина от них качественно представлена на рисунке 3. И тут сразу понятно условие их разрешимости: если максимум освещенности от второй точки (B) попадет в первый минимум от первой точки (A) или будет дальше от него, то эти две точки можно рассмотреть как отдельные. В противном случае они сольются в одну.

Заметим, что наиболее четкое изображение на сетчатке глаза получается при диаметре зрачка $d = 3$ мм. При этом угловая разрешающая способность глаза, определяемая законами физической оптики, имеет порядок

$$\varphi = \frac{1,22 \cdot 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{3 \cdot 10^{-3} \text{ м}} \approx 50''$$

(здесь использована характерная длина волны $\lambda = 5000 \text{ \AA} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$). Когда человек хочет хорошенько рассмотреть какой-либо объект, он поворачивает глаз так, что изображение проецируется на так называемое желтое пятно сетчатки, в котором 15000 колбочек (чувствительных клеток)

выстилают площадку с угловым размером порядка $1,5^\circ$. Таким образом, на каждую колбочку приходится угол порядка

$$\varphi_1 = \frac{1,5^\circ \cdot 3600''/\circ}{\sqrt{15000}} \sim 50''.$$

Можно сказать, что, создавая глаз, «природа знала дифракцию на отлично». Это еще один яркий пример поразительной целесообразности живых организмов.

В этой связи интересно обсудить фантастический рассказ Гулливера: «Лилипуты обладают несравненно лучшим зрением, чем мы... Природа приспособила зрение лилипутов к окружающим их предметам: они хорошо видят, но только на близком расстоянии... Мне большое удовольствие доставляло наблюдать повара, ощипывающего жаворонка величиной не больше нашей мухи, и девушку, вдевавшую шелковинку в ушко невидимой иголки». Между тем, Гулливер утверждает: «Я в двенадцать раз выше лилипута», и все предметы в Лилипутии во столько же раз меньше наших (в том числе и зрачок глаза). Таким образом, дифракционный угол для лилипута в 12 раз больше, так что диаметр изображения точки на сетчатке маленького глаза растягивается во столько же раз больше. Целесообразно ли при этом природе создавать клетки лилипутского глаза меньше, чем у Гулливера? И будет ли при этом их зрение «несравненно лучше», даже на «близком расстоянии»?

Таким образом, для разрешимости двух точек нужно потребовать выполнения приближенного соотношения

$$\varphi \geq \theta_1, \text{ или } \frac{a}{l} \geq 1,22 \frac{\lambda}{d},$$

откуда получаем

$$l \leq \frac{ad}{1,22\lambda}. \quad (*)$$

Остается провести численные оценки. Пусть расстояние между горбами верблюда $a \sim 0,5$ м, диаметр зрачка $d \sim 1$ мм (в пустыне яркий свет!), средняя длина волны солнечного света $\lambda \sim 0,5$ мкм. Тогда

$$l \leq \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{1,22 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} \text{ м} \sim 800 \text{ м}.$$

Но разве дело только в верблюдах? А телескопы? Ведь объектив телескопа – тоже «зрачок», только очень большой. И теперь ясно, почему его стараются сделать как можно больше: наименьшее угловое расстояние на небесной сфере между двумя звездами φ , которые мы хотим разрешить, должно быть

не меньше чем θ_1 . (Ясно также, почему у орла должен быть большой зрачок, если он хочет с высоты полета разглядеть мышшь на земле.)

А что если привинтить к телескопу микроскоп? Казалось бы, если каждый из этих приборов увеличивает в тысячу раз, то такое устройство могло бы увеличивать в миллион раз, так что можно было бы рассматривать камешки на Марсе? Увы, дифракция света на объективе телескопа уже безнадежно испортит дело, так что информация об объектах более мелких, чем определяемые *условием Рэлея* (*), будет навсегда потеряна. А дифракция на объективе микроскопа? Она ведь тоже приводит к тому, что не удастся разрешить две точки, если расстояние между ними меньше длины волны излучения, освещающего наблюдаемый объект (например, микроб).

Что же получается? Выходит, эти замечательные приборы созданы для того, чтобы на их входных зрачках происходила дифракция света? Конечно, нет. Когда человечество изобретало эти приборы, оно совсем не думало о волновой природе света. Казалось, картины хода лучей, нарисованные по законам геометрической оптики, открывают неограниченные возможности для увеличения микроскопов и телескопов – подберите лишь нужные отношения фокусов объектива и окуляра и расположите их должным образом. Но, как всегда случалось в истории физики, более развитая теория (физическая оптика) указала пределы возможностей, скрытые от более простой теории (геометрической оптики).

А верблюды – это просто для интереса.