

# Кольца Кетле

А.АНДРЕЕВ, А.ПАНОВ

«ОПТИКА» НЬЮТОНА, ИЗДАННАЯ В 1704 ГОДУ, НА ЦЕЛОЕ столетие, вплоть до появления волновой теории света, определила развитие оптической науки. Многие описанные и проанализированные там эксперименты стали хрестоматийными и входят в школьные учебники. К ним относятся, например, и знаменитые опыты по разложению белого света в спектр с помощью призмы, и открытие так называемых колец Ньютона, возникающих в результате интерференции света в тонкой воздушной прослойке между поверхностью стеклянной пластинки и плосковыпуклой линзой, прижатой к пластинке выпуклой стороной.

Мы начнем с другого, может быть менее известного, явления, которое сам Ньютон называл «цветами толстых пластинок»<sup>1</sup>. А сейчас его часто связывают с именем бельгийского ученого Адольфа Кетле и называют, соответственно, «кольцами Кетле».

**Запыленное зеркало.** В своей книге Ньютон рассказывает, как, направив узкий пучок солнечных лучей на сферическое зеркало, после отражения увидел на экране целую систему цветных колец, и детально описывает серию последовавших экспериментов. Ньютон полагает, что это явление возникает из-за рассеяния света на неоднородностях внешней поверхности зеркала и из-за отражения от внутренней поверхности самого зеркала. Первое последовательное объяснение этого эффекта было дано Томасом Юнгом в 1802 году.

На самом деле, в экспериментах Ньютона рассеяние происходило на частицах обычной бытовой пыли, осевших на поверхности зеркала. Чтобы убедиться в этом, достаточно в темное время посветить на запыленное зеркало с расстояния в несколько метров маленьким светодиодным фонариком, расположенным вблизи глаза. Вы увидите те же самые цветные полосы, что наблюдал Ньютон в своих опытах. Если очистить поверхность зеркала от пыли, полосы исчезают.

Есть еще один надежный способ зарегистрировать полосы Кетле – воспользоваться фотоаппаратом со вспышкой. Здесь тоже яркий источник-вспышка и наблюдатель-объектив разнесены на небольшое расстояние, что позволяет уверенно фиксировать цветные полосы, локализованные на поверхности зеркала.

Полосы Кетле – это легко воспроизводимое явление. Если у вас нет под рукой естественно запыленного зеркала, вы можете запылить чистое зеркало любым мелкодисперсным порошком – содой, мукой, пудрой и т.п. или забрызгать водой. В каждом из этих случаев вы сможете наблюдать красивые яркие полосы (рис.1).

**Компьютерная «пыль».** Оказывается, можно не возиться с пылью и водой, а поставить еще более «чистый» эксперимент – использовать искусственную пыль. На компьютере с помощью датчика случайных чисел создайте рисунок, состоящий из случайно расположенных точек, – так называемый стохастический растр (рис.2). Распечатайте его на прозрачной пленке, приклейте пленку к зеркалу и сфотографируйте со вспышкой. В результате вы получите картину, очень похожую на изображенную на рисунке 1.

<sup>1</sup> Именно так называется статья Я.Амстиславского, опубликованная в Кванте №6 за 1989 год.

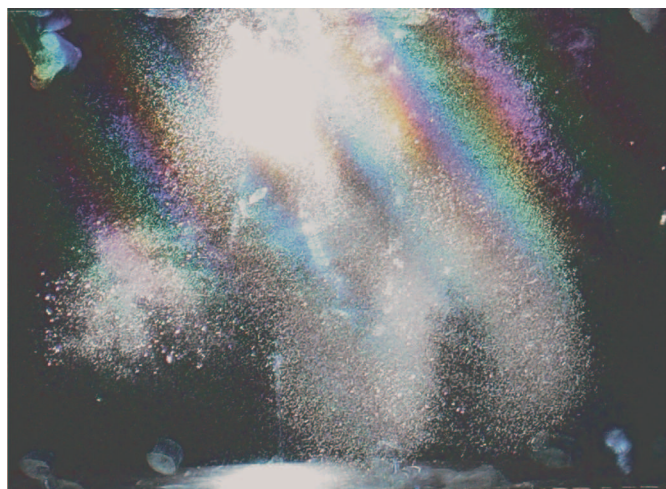


Рис.1. Зеркало, забрызганное спреем, и полосы Кетле

Позже мы еще вернемся к этим экспериментам с пленкой.

**Томас Юнг и интерференция.** Можно сказать, что Юнг заново прочел ньютоновскую «Оптику». Используя созданную им самим интерференционную теорию, Юнг дал последовательное объяснение многим явлениям, описанным в этой книге, чего не мог сделать Ньютон, не владевший сколько-нибудь удовлетворительной волновой теорией света. Это касается и колец Кетле.

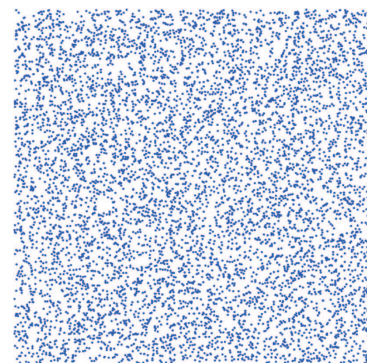


Рис.2. Стохастический растр

Юнг рассмотрел два альтернативных пути взаимодействия световых лучей с частицей, находящейся на поверхности зеркала (рис.3). В первом случае световой луч сначала отражается от зеркала, а потом диффузно рассеивается на частице. Слова «диффузно рассеивается» означают, что после взаимодействия света с частицей возникает целый пучок разнонаправленных лучей. Во втором случае световой луч сначала диффузно рассеивается на частице и только потом отражается от зеркала.

Будем считать, что на зеркало толщиной  $t$  падает пучок параллельных лучей, угол падения обозначим  $i$ . Рассмотрим два параллельных «рассеянно-отраженных» луча с углом рассеяния  $\theta$  (см. рис.3). По Юнгу, эти лучи могут интерферировать, т.е. в направлении  $\theta$  свет может усиливаться или ослабляться – все зависит от соотношения разности хода лучей  $\Delta L(\theta)$  и длины волны  $\lambda$  падающего света. Чтобы найти разность хода, надо провести общие перпендикуляры к обоим падающим и к обоим рассеянным лучам и посчитать разность длин лучей между осно-

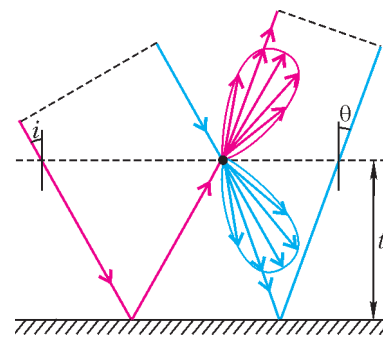


Рис.3. Два пути взаимодействия светового луча с частицей

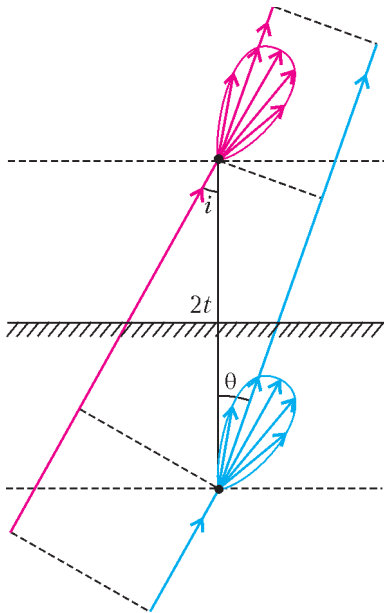


Рис.4. «Выпрямление» световых лучей

Чтобы вычислить разность хода выбранных параллельных лучей, используем следующий искусственный прием. «Выпрямим» все световые лучи, т.е. геометрически отразим относительно зеркала все отрезки лучей еще не испытавших физического отражения в зеркале. Заодно отразим внешнюю поверхность зеркала и частицу, на которой происходит рассеяние. В результате вместо рисунка 3 получим рисунок 4. И здесь уже разность хода вычисляется элементарно как разность катетов двух прямоугольных треугольников с гипотенузой  $2t$ :

$$\Delta L(\theta) = 2t(\cos i - \cos \theta).$$

А условие того, что в направлении  $\theta$  будет наблюдаться интерференционный максимум, приобретает вид

$$2t(\cos i - \cos \theta) = n\lambda.$$

Отметим, что мы не будем дальше использовать эти формулы – мы только хотели показать принципиальную возможность простого расчета интерференционной картины. При этом не было учтено преломление света при переходе из воздуха в стекло и при обратном переходе – из стекла в воздух. Можно считать, что это было сделано для упрощения расчета. Но, с другой стороны, в природе действительно существуют зеркала, внутри которых никакого преломления не происходит. Впрочем, мы еще обсудим, как физически можно реализовать «выпрямление» световых лучей, изображенное на рисунке 4.

**Анимация.** Если запыленное зеркало освещается маленьким фонариком, то здесь речь идет скорее о точечном источнике, а не о пучке параллельных лучей. А тогда наблюдаемая картина сильно зависит от взаимного расположения источни-

вания этих перпендикуляров. Если в разности хода укладывается целое число длин волн, т.е. если  $\Delta L(\theta) = n\lambda$ , то в направлении  $\theta$  свет будет усиливаться, если же  $\Delta L(\theta) = (n + 1/2)\lambda$ , то свет будет ослабляться. Таким образом возникает интерференционная картина.

Для создания ярких колец Кеттле, конечно, недостаточно одной рассеивающей частицы. Необходим целый ансамбль таких частиц, указанным образом взаимодействующих с падающим светом и достаточно плотно покрывающих поверхность зеркала.

ка и наблюдателя. На рисунке 5 изображена серия рассчитанных интерференционных картин в случае, когда источник и наблюдатель находятся близко друг от друга в плоскости, перпендикулярной зеркалу, на расстоянии 5 м от него. В этой плоскости источник делает четверть оборота вокруг наблюдателя, длина волны света равна  $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$  м. На рисунке красным закрашены области, прилегающие к интерференционным максимумам, синим – к минимумам. Первая картина получается, когда источник и наблюдатель находятся на одном и том же расстоянии от зеркала, она обладает вертикальной осью симметрии. Последняя – когда источник располагается непосредственно перед наблюдателем, она центрально симметрична.

Все эти картины, может быть не в полном объеме, вы можете увидеть в запыленном зеркале, перемещая маленький фонарик относительно глаза.

**Ликоподий, корона и кольца Кеттле.** Корона, о которой здесь пойдет речь, – это те самые цветные кольца, которые мы видим, например, вокруг луны, светящей сквозь легкую дымку.

За образование короны отвечает дифракционное рассеяние света на мелких каплях воды или на других частицах, имеющих одинаковые размеры и одинаковую форму. В этом отношении повезло тем, кто носит очки. В вечернее время достаточно подышать на стеклышки очков, и мир волшебным образом преобразуется – все пространство вокруг каждого фонаря, вокруг каждого источника света заполняется разноцветными кольцами.

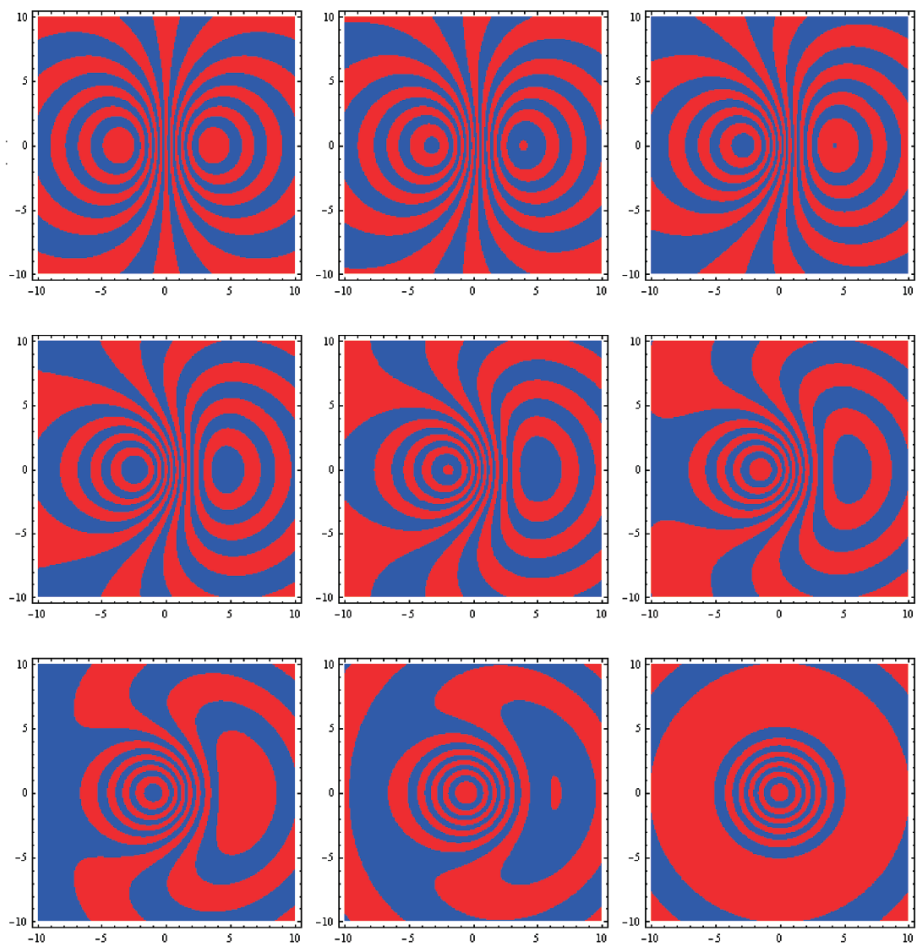


Рис.5. Интерференционные картины, возникающие при перемещении источника относительно наблюдателя



Рис.6. Корона, окружающая источник; вид через стекло, посыпанное лишайником

В оптике для исследования и демонстрации дифракционных явлений традиционно используется лишайник – споры растения «плаун булавовидный». Эти споры имеют сферическую форму и отличаются постоянством диаметра – порядка 30 мкм. Как выглядит источник света, если смотреть на него через стекло, посыпанное лишайником, показано на рисунке 6.

Можно увидеть корону и глядя на изображение источника в запотевшем зеркале. К сожалению, капельки на зеркале испаряются, и поверхность зеркала быстро становится чистой. Но лишайник никуда не испарится, и в запотевшем им зеркале мы сможем увидеть замечательную картину (рис.7), включающую одновременно и кольца Кетле, и корону.

**Вся оптика – в одной луже.** От лишайника перейдем к другому биологическому объекту – к одной из микроскопи-

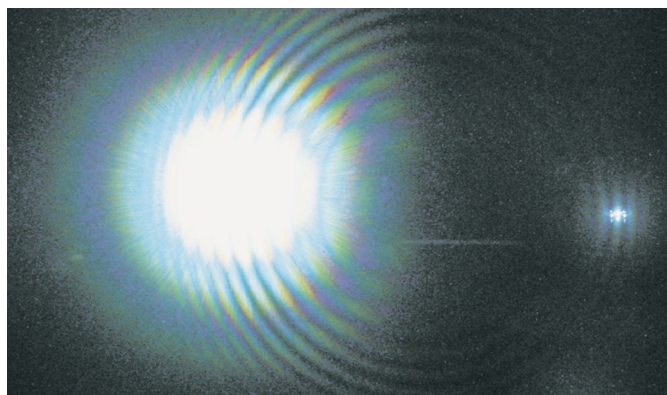


Рис.7. Кольца Кетле и корона в зеркале, запыленном лишайником

ческих водорослей класса хризомонадовых (*Chromophyton Rosanoffii*). Каждая ячейка этих водорослей в одной из фаз своего развития выходит на поверхность воды и располагается над ней в виде прозрачного шарика размером 4–9 мкм, возвышающегося на небольшом стебельке. Такое расположение ячеек полностью соответствует нашему рисунку 3, если в качестве рассеивающей частицы принять эту сферическую ячейку, а в качестве отражающей поверхности – поверхность воды. Да и преломление здесь тоже отсутствует, поскольку между ячейкой водорослей и поверхностью воды нет ничего, кроме воздуха.

В 2006 году Марко Рииконен разместил на своем сайте (<http://www.ursa.fi/~riikonen/>) фотографии, сделанные

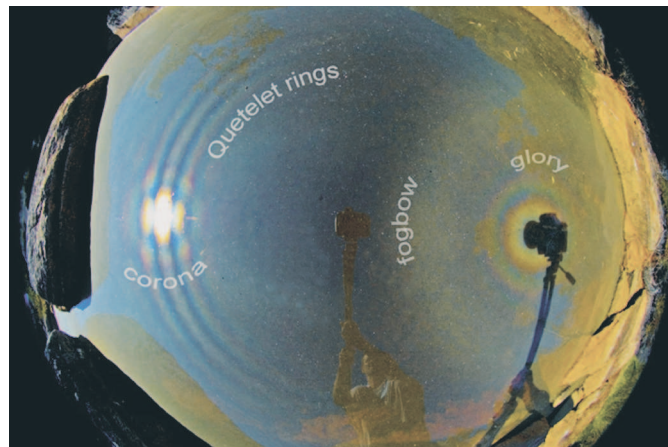


Рис.8. Марко Рииконен: кольца Кетле, корона, глория и радуга

им на небольшом скалистом острове в Балтийском море. И дал зарегистрированным им явлениям общее название – «водорослевая оптика» (*algal optics*). На поверхности небольшого внутреннего водоема площадью в несколько квадратных метров, покрытого пленкой упомянутых водорослей, им были зафиксированы сразу несколько оптических феноменов. Так, на одной из фотографий отчетливо видны кольца Кетле и корона, созданные водорослями, расположенными над поверхностью воды. Эта фотография удивительным образом совпадает с нашей фотографией, представленной на рисунке 7.

На сайте Рииконена имеется и вовсе фантастическая фотография (рис.8), на которой одновременно видны кольца Кетле (*Quetelet rings*), корона (*corona*), глория (*glory*) и радуга (*fogbow*). Заметим, что и глория и радуга образуют концентрические круги с центром в точке, противоположной источнику света относительно наблюдателя. Условие образования глории – это наличие в воздухе капелек воды диаметром менее 20 мкм, а, как мы уже говорили, размер ячейки наших водорослей как раз порядка 10 мкм. Что касается радуги, образованной на каплях такого размера, то она выглядит бесцветной и носит специальное название – туманная радуга (*fogbow*), именно она и видна на последней фотографии.

**Физическое выпрямление световых лучей.** Вернемся к рисунку 4, который мы получили из рисунка 3 с помощью формального приема – геометрического отражения. Между тем, рисунок допускает простую физическую реализацию.

Один и тот же стохастический растр напечатать два раза – на двух прозрачных пленках. Наложив две идентичные пленки друг на друга и добившись точного совмещения двух растров, мы получим полное физическое подобие рисунка 4. Каждой точке-частице будет соответствовать точно такая же точка-частица на другой пленке, расстояние между такими точками будет равно толщине пленки. Поэтому можно попытаться зафиксировать кольца Кетле, наблюдая источник света сквозь две одинаковые пленки, наложенные друг на друга. К сожалению, наши попытки сделать это пока не увенчались успехом.

\* \* \*

В заключение советуем вам посетить гигантскую ежедневно пополняемую энциклопедию атмосферных оптических явлений – сайт <http://www.atoptics.co.uk>, где на многочисленных фотографиях можно увидеть и радугу, и корону, и глорию, и кольца Кетле и много чего другого красивого и интересного.