



Эта фотография взята из Интернета, её адрес:<http://megalife.com.ua/walpapers/14272-raduga-kakaja-ona-est.html>

## Почему радуги бывают разными?

Конечно, каждый читатель не раз видел на небе радугу. Лучше всего заметна самая яркая так называемая «первая» радуга. Она видна в направлениях, составляющих угол примерно  $42^\circ$  с направлением линии, проходящей через центр Солнца и глаз наблюдателя. При этом Солнце расположено за спиной наблюдателя. Значительно менее яркая радуга видна в направлениях, составляющих угол  $51^\circ$  с той же линией. Порядки расположения цветов в этих двух радугах разные. Внутренняя часть (с меньшими углами) первой радуги фиолетово-синяя, а внешняя красная, а у второй радуги наоборот, внутренняя часть красная, а внешняя фиолетовая. Иногда кроме этих радуг видны и еще многочисленные дополнительные светлые дуги, расположенные внутри самой яркой первой радуги. Они есть и «вне» второй радуги, но малозаметны, так как их яркость мала. Как возникает радуга, и почему не всегда видны дополнительные дуги?

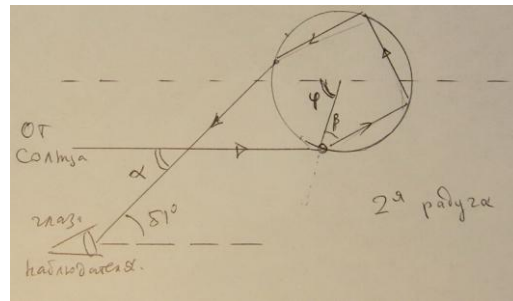
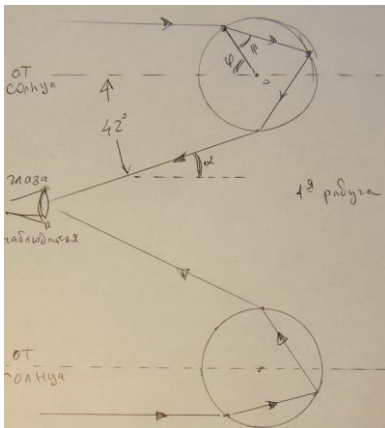
Рассмотрению этих вопросов посвящена данная статья.

Взаимодействие параллельного пучка света и круглой дождевой капли приводит к тому, что свет преломляется, отражается и очень слабо поглощается в капле. Используемые в предыдущей фразе термины понятны и школьникам, закончившим 8 классов, и знающим только о геометрической оптике, и школьникам старшеклассникам, знающим о волновой природе света.

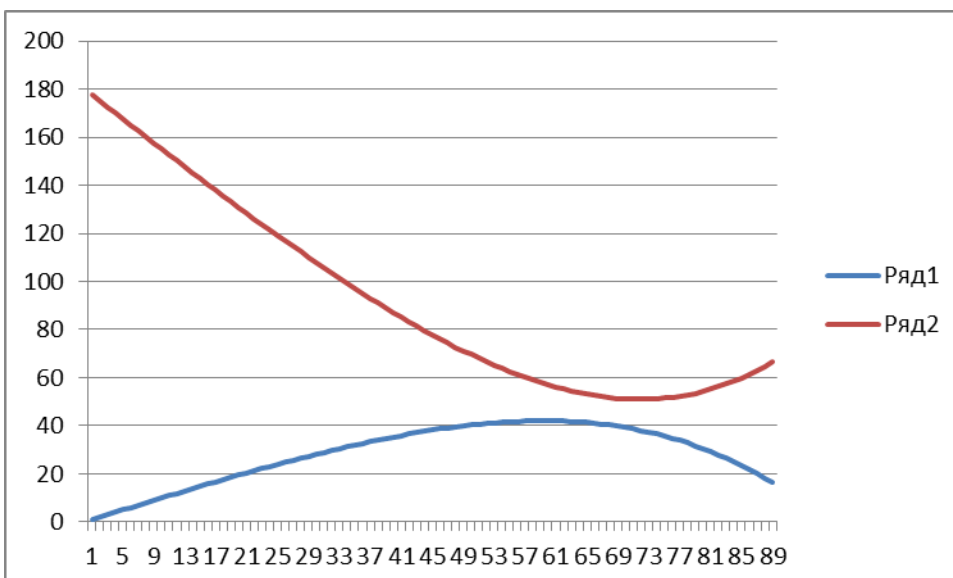
В геометрической оптике рассматриваются три главных «закона», которые описывают поведение лучей света. Это закон прямолинейного распространения лучей света в однородной среде, закон отражения света от границы раздела сред, формулируемый в упрощенной форме так: угол падения равен углу отражения. И закон преломления лучей света на границе раздела, формулируемый так: отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно

отношению скорости света в среде, из которой свет падает на границу раздела, к скорости света в среде, находящейся за границей раздела.

Если пользоваться только законами геометрической оптики, то можно показать, что лучи света прошедшие внутрь капли и отразившиеся внутри нее один или два раза, а затем вышедшие наружу, собираются (группируются или концентрируются) вблизи направлений, которые как раз соответствуют первой и второй радугам. Можно аналогично найти и направление для «третьей» и последующих радуг, но поскольку они настолько слабы, что никогда не наблюдаются на фоне ярких первых двух радуг, то мы их рассматривать не будем (и в прямом и в переносном смысле). Условия концентрации по некоторым направлениям в пространстве лучей, вышедших из капли, соответствуют экстремумам в зависимости угла поворота луча от так называемого «прицельного» угла падения  $\varphi$ .

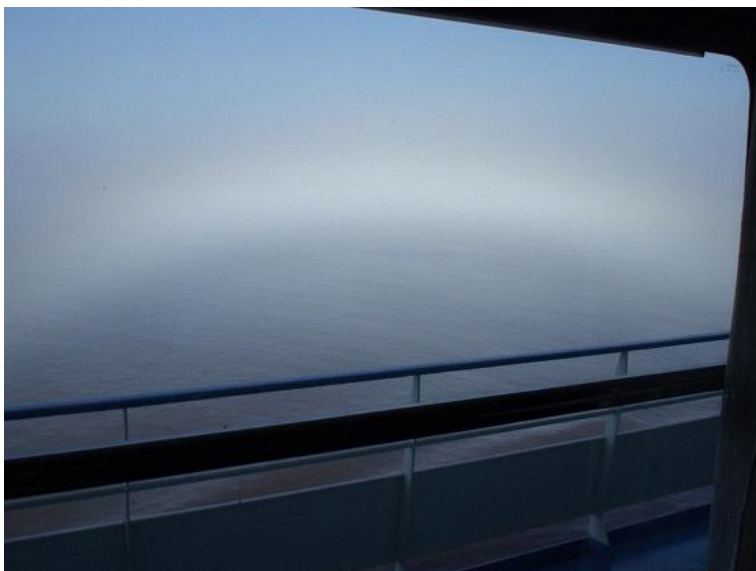


Угол поворота мы будем обозначать так:  $180^\circ - \alpha$ . Для первой радуги  $\alpha_1 \approx 42^\circ$ , а для второй радуги  $\alpha_2 \approx 51^\circ$ . Для света разных цветов (длин волн) соответствующие углы поворота немного отличаются, так как каждой длине волны света (цвету) соответствует свой коэффициент преломления  $n$ . Связь между углами – падения  $\varphi$ , углом преломления  $\beta$  и углом  $\alpha$  – для одного отражения света внутри капли такова:  $\alpha_1 = 4\beta - 2\varphi$ . Для двух отражений луча света внутри капли:  $\alpha_2 = 180^\circ - 2\varphi + 6\beta$ . По закону преломления  $\sin\varphi/\sin\beta = n$ . У воды коэффициент преломления для всех длин волн видимого света близок к величине  $4/3$ . Графики зависимости углов  $\alpha$  от углов  $\varphi$  показаны на рисунке.



Видно, что экстремумы приходятся как раз на значения углов  $\alpha_1 = 42^\circ$  и  $\alpha_2 = 51^\circ$ . Поскольку разным цветам соответствуют и разные коэффициенты преломления  $n$  (это свойство среды называется «дисперсией»), то направления в пространстве вблизи которых концентрируются лучи света, для разных длин волн не совпадают, и мы на Земле видим радугу цветной. Например, первая яркая радуга имеет угловой «размах» около  $3,5^\circ$ . Угловой размер Солнца равен примерно  $0,5^\circ$ . Если разделить эти две величины друг на друга, то получится 7. Забавно! Видно, что для одного отражения внутри капли экстремум = это максимум, а для двух отражений внутри капли = это минимум, поэтому понятно, почему порядок цветов в радугах  $42^\circ$  и  $51^\circ$  обратный.

Если бы космонавт оказался на орбите Меркурия и устроил бы внутри станции туман из капелек воды, то он увидел бы вовсе не такие радуги, к которым мы привыкли. Для него и 1-я и 2-я радуги солнечных лучей были бы белыми! И только края этих радуг были бы слегка окрашены. Это связано с тем, что угловой размер Солнца для наблюдателей на Земле гораздо меньше угловой ширины 1-й и 2-й радуг и составляет около  $0,5^\circ$ , а для наблюдателя, находящегося на таком же расстоянии от Солнца, как Меркурий, этот угловой размер Солнца примерно в 2,5 раза больше. В земных условиях тоже можно увидеть белую радугу.



Фотография № 2 сделана из окна каюты корабля в тумане. Слой тумана обеспечивал существенное угловое расширение источника света – Солнце сквозь туман выглядело отнюдь не маленьким светящимся диском с четкими краями, а большим белым пятном. Если внимательно присмотреться, то можно отметить, что верхний край «белой» радуги имеет красноватый оттенок, а нижний фиолетовый.

Однако для того, чтобы объяснить, почему 1-я и 2-я радуги получаются разными по яркости, законов геометрической оптики недостаточно. На любой границе раздела энергия  $E_R$  отраженного света и энергия  $E_T$  света, прошедшего через границу, в сумме равны энергии  $E_0$  света, который на эту границу упал. Пропорции между этими энергиями (прошедшего и отраженного света) определяются относительным показателем преломления сред по разные стороны от границы, углом падения, и также поляризацией падающего света, (кстати, именно поэтому свет радуги сильно поляризован). Формулы для расчета отношений  $E_R/E_0$  и  $E_T/E_0$  вывел Френель, и заинтересовавшиеся читатели могут отыскать их, например, в учебнике по оптике для студентов. При перпендикулярном к границе раздела ( $\varphi=0$ ) падении света на границу раздела сред с относительным показателем преломления  $n$ , долю энергии отраженного света можно вычислить с

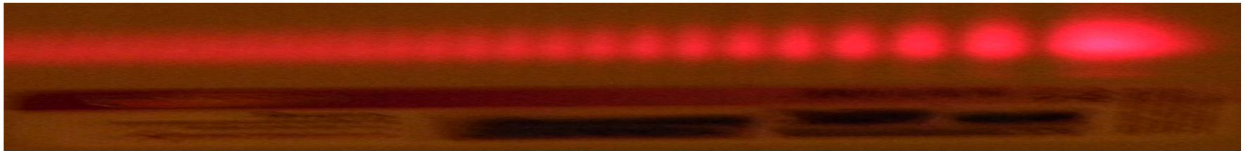
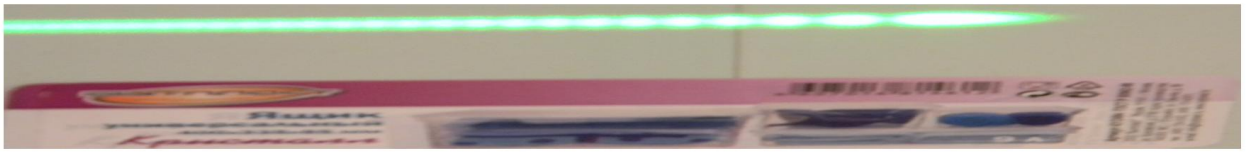
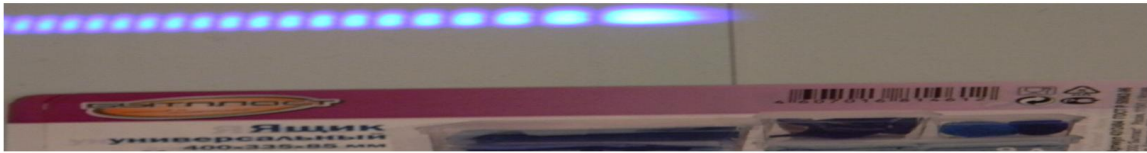
помощью формулы:  $E_R/E_0 = (n-1)^2/(n+1)^2$ . Поскольку свет, образующий 1 радугу, отразился внутри капли только 1 раз, а свет, образующий вторую радугу, отразился внутри капли два раза, то приближенно можно оценить отношение яркостей этих радуг:  $I_1/I_2 \approx (n+1)^2/(n-1)^2 \approx (7)^2 = 49$ . На самом деле это отношение несколько меньше, так как внутренние отражения для больших углов падения, характеризуются и большим коэффициентом отражения.

Дифракционные или интерференционные дополнительные радуги.

Откуда берутся дополнительные радуги, которые хорошо видны для 1-й радуги на фотографии в начале статьи? Если какому-то направлению рассеяния солнечного света соответствует экстремум функции распределения по углам для одной капли, то и всем каплям такого же размера соответствует аналогичное направление концентрации энергии рассеянного света. При этом направлениям, расположенным рядом с экстремальным, соответствуют два разных пути лучей света внутри капли. Им соответствуют разные углы  $\varphi$  падения на каплю и, естественно, немного отличающиеся длины этих путей. Если разница длин таких путей для выбранного направления соответствует целому числу волн света с длиной волны  $\lambda$ , то этому направлению соответствует максимум в интенсивности света на этой длине волны. Если же разница длин путей соответствует нечетному числу полуволн, то такому направлению соответствует минимум интенсивности света на этой же длине волны. Самому экстремальному направлению, конечно же, соответствуют почти одинаковые оптические длины путей для разных углов падения вблизи максимума. Такое перераспределение энергии светового потока называется интерференцией. Заметным в природе оно становится только в том случае, если размеры всех капель облака  $D$ , во-первых, очень близки друг к другу, а во-вторых, настолько малы, что выполняется соотношение:  $\lambda/D >$  углового размера радуги. Для крупных капель с диаметром  $> 1$  мм увидеть в природе дополнительные дуги нельзя. Однако, если размеры капель настолько малы, то рассчитать явление без учета дифракции света невозможно. Отсюда и возникает «вилка» в терминологии: некоторые называют дополнительные радуги *дифракционными*, а некоторые *интерференционными*.

Как наблюдать явления аналогичные дополнительным радугам в домашних условиях?

Во-первых, нужно создать условия для рассеяния света не в пространственный конус, как это имеет место в каплях, а только в некоторых направлениях. Это можно сделать, если вместо круглых капель использовать почти цилиндрическую струю воды. Во-вторых, можно использовать источник света, который характеризуется значительно меньшими, чем Солнце, угловыми размерами. И в-третьих, можно выбрать источник, создающий свет близкий по свойствам к монохроматическому. Сейчас доступны лазеры с разными длинами волн. (Далее следует описание домашних экспериментов автора.) При одном и том же расположении лазеров разных цветов (красный  $\lambda = 630-650$  нм, зеленый  $532 \pm 10$  нм и синий 405 нм : это надписи на этикетках, наклеенных на корпуса лазеров) на стене ванной комнаты были получены картинки, соответствующие «радуге» первого порядка ( $42^\circ$ ) от тонкой струи воды (диаметр струи  $d \approx 1$  мм), которая во всех трех случаях сохраняла свои параметры. То есть вода текла из крана непрерывно и равномерно и настройка крана при смене лазеров не менялась.



Видно, что расположения главных максимумов (они справа) для разных цветов отличаются, но они располагаются все-таки близко друг к другу, что следует из сравнения размеров пятен и размера наклейки на стене (ее длина 13,5 см). Расстояние от струи воды до стены составляло 150 см, а смещение главного красного пятна по отношению к главному синему пятну составляло 5 см. Это соответствует разнице углов отклонения лучей для синего и красного цветов примерно  $1,9^\circ$ . Такое отличие углов обусловлено дисперсией света в воде. А вот расстояния между минимумами картинок, отсчитываемых от главного максимума, отличаются в количество раз, соответствующее длинам волн. То есть для синего цвета угловое расстояние между соответствующими минимумами меньше аналогичного углового расстояния для красного цвета примерно в 1,4 раза ( $630/405 = 1,55$ ). А для красного и зеленого цветов это отношение равно примерно 1,2 ( $630/532 = 1,18$ ). Если пустить из крана более толстую струю воды, то при тех же расположениях главных максимумов разных цветов расстояния между соответствующими дополнительными максимумами и минимумами уменьшаются. Добиться устойчивого течения струи с диаметром меньше 1 мм не удастся ☹, поэтому получить дифракционные или интерференционные радуги на струе воды с белым светом не получится. Это связано с тем, что полученные в эксперименте расстояния между дополнительными минимумами и максимумами для всех длин волн значительно меньше  $3^\circ$  - ширины первой радуги. На водных капельках в облаках это возможно, если все капли имеют одинаковые размеры значительно меньше 0,1 мм. Вернемся снова к первой фотографии.

Если капельки воды достаточно малы и все примерно одинаковых размеров, то угловые промежутки между соседними максимумами малых порядков ( $N \sim 1-10$ ) могут достигать 2-3 градусов, и поэтому первые несколько «вложенных» дополнительных радуг, расположенных в непосредственной близости от основной радуги, еще различаются, как отдельные. Дело в том, что наиболее ярким воспринимается глазами участок спектра излучения Солнца вблизи желтого цвета. Именно этим длинам волн примерно и соответствуют максимумы интенсивности света в дополнительных (дифракционных/интерференционных) радугах.

Когда угловое расстояние между соседними дополнительными радугами становится меньше  $0,5^\circ$  их в принципе невозможно различить, так как угловой размер Солнца как раз равен этой величине. Угловое расхождение монохроматических лучей света лазера намного меньше  $0,5^\circ$ , поэтому можно увидеть множество максимумов разных порядков дифракции света лазера, возникающих при рассеянии света на тонкой струе воды.

В каждой «вложенной» в основную радугу  $42^\circ$  дополнительной радуге, угловое расположение цветов определяется двумя факторами, действующими в противоположных «направлениях», «рефракционным» и «дифракционным». При этом «рефракционный» поворот лучей *не зависит* от номера, а «дифракционный» поворот зависит от номера порядка дифракции. Поэтому в дифракционных радугах цвета не разложены так же отчетливо, как в основной радуге  $42^\circ$ . С увеличением «номера» светлые дуги разных цветов и разных порядков интерференции/дифракции накрывают друг друга и различить их уже невозможно — они вместе образуют тот светлый фон неба внутри основной радуги, который очень хорошо видно на фотографии радуг над горой. Кстати, также хорошо заметно, что первые две дополнительные радуги «наползли» на сине-фиолетовый участок основной радуги  $42^\circ$ , то есть угловые промежутки даже между первыми дополнительными радугами меньше  $1^\circ$ . Это говорит о том, что в данном случае размеры капелек не настолько малы, чтобы эти дополнительные радуги оказались полностью внутри основной радуги. Очень темный фон неба означает, что радуги, скорее всего, видны на *приближающемся* грозовом облаке с крупными каплями. Недаром радуга на фотографии «прячется» за склоном горы слева, а не видна на его фоне. Если бы облако *уже прошло* над наблюдателем, и была бы видна радуга на *удаляющемся* облаке, то наличие мелких капелек дождя, которые падают гораздо медленнее, чем крупные капли, привело бы к «смазыванию» наблюдаемой картины и, скорее всего, «вложенные» радуги слились бы в один светлый фон внутри основной радуги.

Вот если бы Солнце светило монохроматическим светом, то было бы заметно гораздо больше дифракционных радуг, вложенных в основную радугу, так как каждая из них имела бы угловой размер, равный угловому размеру Солнца. А насколько величественней выглядела бы радуга, если Солнце в дополнение к монохроматичности света характеризовалось бы еще и очень маленьким угловым размером, и все капельки воды в облаке были бы совершенно одинаковых размеров! Такое можно себе только представить: на небе было бы несколько десятков одноцветных дуг!

С. Варламов