

Кафедра общей и теоретической физики

В. Судойская¹

Основные физические свойства радуг высших порядков

(научно-исследовательская работа)

Аннотация

С использованием законов геометрической оптики строго обоснованы феномены основной и дополнительной радуги. Вычислены экстремальные значения угла отклонения световых лучей, порождающих радуги первого – седьмого порядков с учетом эффекта дисперсии. Здесь строго обоснована цветовая гамма и расположение цветов радуг первого – седьмого порядков. В частности, здесь показано, что распределение цветов в радугах третьего и четвертого порядков такое же, как в основной и вторичной радугах, но в отличие от последних эти радуги наблюдаются в направлении "на светило". Показано, что с увеличением порядка радуги ее угловая ширина возрастает. Выполнен расчет углового распределения потока света для одиночной капли воды, в случае световых лучей, порождающих радуги первого – седьмого порядков. Показано, что при экстремальных значениях угла отклонения Θ^{extr} существуют острые пики кривых распределений, что является строгим доказательством существования радуги. В случае основной и вторичной радуг показано, что они имеют четкие внутренние границы и "провал", соответствующий александровой полосе. Полученные результаты полностью согласуются с результатами программы-симулятора BowSim, созданной Les Cowley и Michael Schroeder. Здесь предложен новый метод определения расстояния до светила, порождающего радугу.

Комментарии: работа выполнена под научным руководством старшего преподавателя кафедры общей и теоретической физики СамГУ, к.ф.-м.н., Филиппова Ю.П.² и отмечена дипломом победителя второй степени в секции "Теоретическая физика" Самарской областной научно-практической конференции школьников в 2010 г.



Работа выставлена на **ASTRODROME**: 06.04.2010

¹E-mail:

²E-mail:yuphil@ssu.samara.ru

Оглавление

Введение	3
1 Современный статус теории радуги	8
1.1 Эволюция представлений человека о радуге	8
1.2 Физика основной и вторичной радуги	15
2 Моделирование феномена радуги высшего порядка	24
2.1 Элементы фотометрии и теории взаимодействия излучения с веществом	24
2.2 Расчет углового распределения потока излучения, порождаю- щего основную и вторичную радуги	26
2.3 Понятие радуги высшего порядка. Дисперсия света в радугах высших порядков	31
2.4 Угловое распределение потока излучения, порождающего раду- ги высших порядков	36
2.5 Определение расстояния до небесного тела, порождающего ос- новную радугу	38
Заключение	42
Литература	44
Приложения	46
Приложение А. Определение позиционного угла σ	46

Введение

*Тут если солнце блеснет во мгле
непогоды лучами прямо против до-
ждя, из тучи кропящего капли, раду-
ги яркой цвета появляются в облаке
черном.*

Лукреций.

Актуальность работы. Наверное, трудно найти человека, который в те-
чение своей жизни ни разу не любовался радугой. **Радуга** — это яркое атмо-
сферное оптическое и метеорологическое явление, наблюдаемое обычно после
дождя или перед ним, в стороне противоположной по отношению к Солнцу,
при освещении последним завесы дождя. Она выглядит как дуга или окруж-
ность, составленная из цветов спектра видимого света (см. рис. 1).

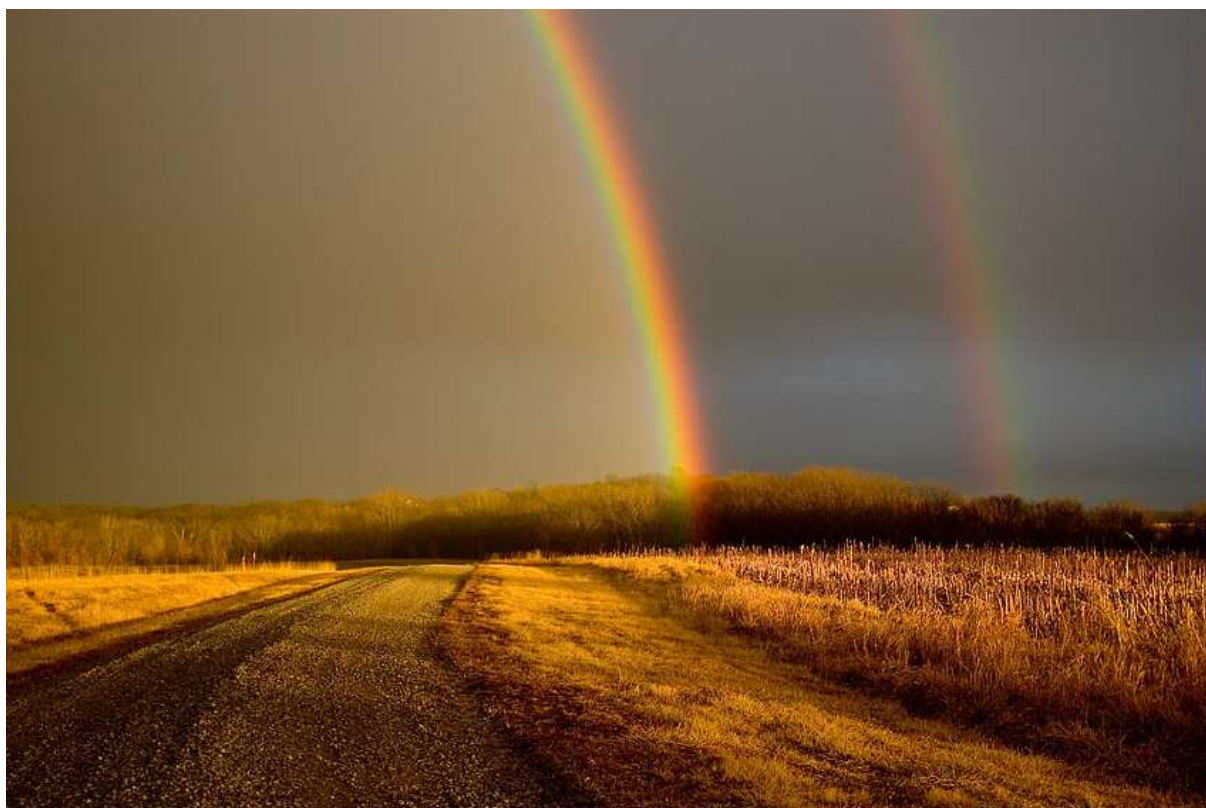


Рис. 1. Основная и вторичная радуга после дождя (фотография получена Dan Bush; взята с сайта http://www.missouriskies.org/rainbow/february_rainbow_2006.html.)

У радуги можно выделить семь основных цветов: красный, оранжевый,

желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый, заполняющих ее в указанном порядке от верхней границы к нижней. В силу непрерывности спектра световых волн, эти цвета в радуге переходят друг в друга с плавным изменением через множество промежуточных оттенков.

Нередко над основной радугой возникает еще одна — *вторичная радуга* — более широкая и размытая. Цвета в дополнительной радуге чередуются в обратном порядке: от фиолетового (внешний край, см. рис. 1) до красного (внутренний край). Между красными краями основной и дополнительной радуг находится относительно темная полоса. Ее называют *александровой полосой* — по имени жившего во II в. греческого философа Александра, подметившего эту особенность двойной радуги [1].

Особенно яркая радуга возникает после шумной летней грозы (или во время грозы). При морозящем дожде цветная окраска радуги становится бледной. В этом случае радуга может превратиться в белесый полукруг. Было замечено, что для наблюдателя, находящегося на относительно ровной земной поверхности, радуга появляется при условии, что угловая высота солнца над горизонтом не превышает 42° [2]. Чем ближе к горизонту расположено Солнце, тем больше угловая высота вершины радуги и тем, следовательно, больше наблюдаемый участок радуги. Дополнительная радуга может наблюдаться, если высота солнца над горизонтом не превышает 53° . Именно по этой причине в наших широтах летом нельзя наблюдать радугу вблизи полудня (она "прячется" за горизонт).

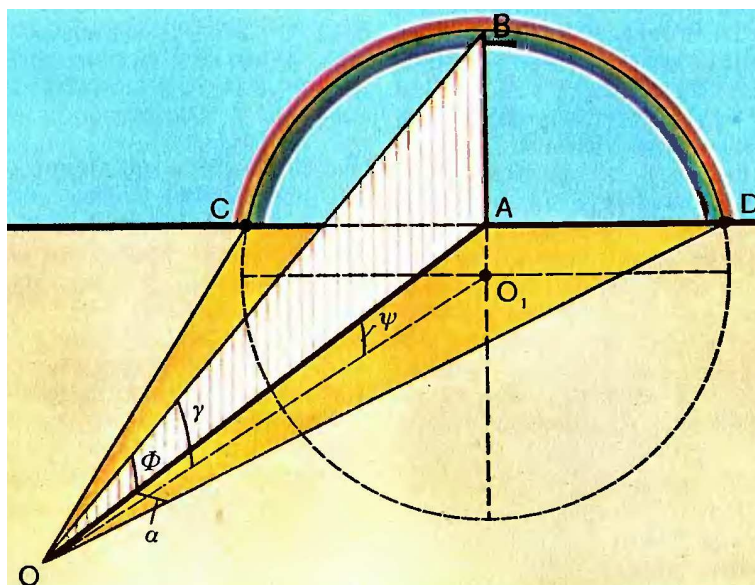


Рис. 2. К определению расположения наблюдателя и основной радуги.

Радугу можно рассматривать как окружность — границу основания гигантского конуса, ось которого проходит через Солнце и наблюдателя. На рис. 2 эта прямая обозначена как прямая OO_1 ; в точке O находится глаз наблюдателя, являющийся вершиной конуса; OCD — плоскость земной поверхности, $\angle AOO_1 = \Psi$ — угловая высота Солнца над горизонтом. Точка O_1 называется противосолнечной точкой; она находится ниже линии горизонта CD .

γ — угол между осью конуса и любой из его образующих (угол раствора

конуса). Разумеется, земной наблюдатель видит не всю указанную окружность, а только ту часть ее (на рисунке участок CBD), которая находится над линией горизонта³. Т.о., положение радуги по отношению к ландшафту зависит от положения наблюдателя по отношению к солнцу, а угловые размеры радуги определяются высотой солнца над горизонтом. При передвижениях наблюдателя указанный конус, а значит, и радуга соответствующим образом перемещаются. Поэтому радугу невозможно догнать и бесполезно пытаться пройти под ней.

Возможны и другие радужные явления о которых будет сказано позже. *Необходимым условием* возникновения любого радужного феномена являются капли жидкой воды, взвешенные в атмосфере, и свет от небесного тела или искусственного источника.

Своими яркими цветами, большой протяженностью по небосводу, и скоротечностью своего пребывания радуга издавна привлекала внимание людей, вызывая позитивные эмоции, положительные ассоциации, рождая сокровенные надежды. О радуге слагались легенды, ей приписывались удивительные свойства. Многие известные поэты слагали стихи о радуге, например, Ф. И. Тютчев так выразил свои мысли о ней:

Как неожиданно и ярко	О, в этом радужном виденье
На влажной неба синеве	Какая нега для очей!
Воздушная воздвиглась арка	Оно дано нам на мгновенье,
В своем минутном торжестве!	Лови его – лови скорей!
Один конец в леса вонзила,	Смотри – оно уж побледнело,–
Другим за облака ушла –	Еще минута, две – и что ж?
Она полнеба обхватила	Ушло, как то уйдет всецело,
И в высоте изнемогла.	Чем ты и дышишь и живешь.

Многие ученые прошлого, начиная с Аристотеля, пытались дать научное обоснование явлению радуги. В настоящее время широко распространено мнение, что научная сторона феномена радуги полностью сводится к простой геометрической оптике, давно уже выяснена и представляет в наши дни разве что исторический интерес [3]. В действительности же все обстоит далеко не так просто: последовательная количественная теория радуги была разработана лишь в самое недавнее время (несколько десятилетий тому назад). Оказалось, что проблема не ограничивается рамками геометрической оптики — ее решение требует привлечения всех наших знаний о природе света. Здесь проявляются и интерференция, и дифракция, и поляризация, и корпускулярные свойства света, например, связанный с ним импульс [4].

³Иное дело, если наблюдатель находится в самолете: в этом случае он может увидеть радугу в виде полной окружности. Но где бы ни находился наблюдатель (на земной поверхности или над нею), он всегда есть центр ориентированного на солнце конуса с углом раствора около 42° для основной радуги и 53° для дополнительной.

Некоторые из самых мощных методов математической физики были разработаны специально для решения вопросов, относящихся к радуге и тесно связанных с нею явлений [4]. Можно сказать, что описание радуги послужило пробным камнем для проверки теоретических конструктов. Наиболее совершенные из них позволили полностью объяснить это явление, т. е. предсказать математически все наблюдаемые свойства радуги. Те же методы применимы для описания аналогичных явлений, таких, как возникновение ореола и даже радуги совершенно другого происхождения, например, атомной и ядерной.

В рамках современной теории рассеяния света помимо основной и вторичной радуг предсказывается существование радуг высших порядков (второго, третьего, четвертого и т.д.) [5]. Проведенный нами обширный литературный обзор по теории радуги показал, что основные физические свойства радуг высших порядков, как правило, не представлены (см. например, [6, 7]). Даже в монографиях мировой известности Ван де Хюльста Г. [8] и Борена К.Ф., Хафмена Д.Р. [9], посвященных феноменам рассеяния света на малых частицах, не представлен подробный анализ их свойств, ссылаясь на малую яркость указанных феноменов (в следствие чего они теряются в фоновом излучении небосвода) и трудность их наблюдения. Однако в специальных лабораторных условиях с использованием капелек других жидкостей возможно наблюдение радуг третьего и более высоких порядков [9]. В работе [10] были описаны результаты наблюдений радуги 17-ого порядка на каплях сахарного сиропа.

В настоящее время Титан — самый большой спутник Сатурна шестой планеты Солнечной системы (по удаленности от Солнца) находится под пристальным вниманием. Прямые исследования его атмосферы и поверхности с помощью посадочного модуля Гюйгенс космического аппарата Кассини, доказали существование жидкого метана на поверхности спутника, а в атмосфере — присутствие метановых облаков [11]. Дело в том, что около поверхности Титана температура составляет около 94 К (-179°C), что весьма близко к тройной точке метана ($T_{CH_4} = 90.7K$, $p_{CH_4} = 0.117$ бар).

Метан конденсируется в облака на высоте нескольких десятков километров. Согласно данным, полученным Гюйгенсом, относительная влажность метана повышается с 45% у поверхности до 100% на высоте 8 км. На высоте 8-16 км простирается очень разреженный слой облаков, состоящих из смеси жидкого метана с азотом, покрывающий половину поверхности спутника. Слабая изморось постоянно выпадает из этих облаков на поверхность, компенсируемая испарением (аналог гидрологического цикла на Земле). Выше 16 км, отделенный промежутком, лежит разреженный слой облаков из кристалликов метанового льда.

Существует и другой тип облачности, обнаруженный еще в 90-е годы прошлого века на снимках телескопа им. Хаббла. Фотографии, сделанные с бор-

та Кассини, а также с наземных обсерваторий, показали наличие облаков у южного полюса Титана. Это мощные дождевые облака, хорошо заметные на фоне поверхности, быстро перемещающиеся и меняющие форму под действием ветра. Обычно они покрывают относительно небольшую площадь (менее 1% диска), и рассеиваются за время порядка земных суток. Вызванные ими ливни должны быть очень интенсивными и сопровождаться ветром ураганной силы. Дождевые капли, по расчетам, достигают диаметра ~ 1 см. Однако несмотря на то, что за несколько часов может выпасть до 25 см метана, общий уровень осадков составляет в среднем за земной год несколько см, что соответствует климату самых засушливых земных пустынь. Спектр облаков, вопреки ожиданиям, отличается от спектра метана. Это может объясняться примесью других веществ (прежде всего, этана), а также перенасыщенностью верхних слоев тропосферы метаном, приводящей к образованию очень крупных капель. Указанные открытия делают актуальным вопрос о возможности наблюдений радуги в атмосфере Титана [12].

В связи со сказанным, главной целью настоящей работы является теоретическое исследование основных физических свойств радуг высших порядков и сравнение их со свойствами основной и вторичной радуг.

Согласно сформулированной цели, основными задачами настоящей работы являются следующие положения:

1. Расчет углового распределения потока света для одиночной капли воды, в случае световых лучей, порождающих основную и вторичную радугу.

2. Расчет экстремальных значений угла отклонения и угла падения световых лучей, порождающих радуги третьего – седьмого порядков с учетом эффекта дисперсии.

3. Расчет углового распределения потока света для одиночной капли воды, в случае световых лучей, порождающих радуги третьего – седьмого порядков.

4. Разработка нового метода определения расстояния до светила, порождающего радугу.

Основными методами решения поставленных задач являются:

1. Метод геометрической оптики.

2. Метод триангуляции.

Данная работа имеет следующую структуру.

Первая глава посвящена современным физическим представлениям о радуге.

Во **второй главе** подробно представлены решения поставленных теоретических задач и их анализ.

Резюме по проделанной работе представлено в **заключении**. Финальная часть работы содержит список использованных источников и приложение.

Глава 1

Современный статус теории радуги

В настоящей главе будут подробно изложена эволюция представлений о радуге. Особое внимание будет уделено современным представлениям о радуге как о физическом явлении. Представлен простейший анализ .

1.1 Эволюция представлений человека о радуге

Радуга и мифология. Радуга — яркий красочный природный феномен, издавна привлекающий к себе внимание человека. С давних пор, люди полагали, что радуга имеет божественное происхождение, ей приписывали удивительные свойства, о ней слагались легенды. Так, в Древней Греции у радуги существовала своя богиня-покровительница — Ирида, она выполняла роль посредника между богами и людьми, передававшая последним волю богов. Древние греки серьезно полагали, что радуга соединяет небо и землю. Схожее представление о радуге можно обнаружить в скандинавской мифологии: здесь радуга — это мост Биврест, соединяющий Мидгард (мир людей) и Асгард (мир богов).

По славянским поверьям, радуга наполняла водой истощенные после дождя облака: вода из земных водоемов по радуге поднималась в небеса, откуда потом проливалась дождем. В древнеиндийской мифологии полагали, что радуга — лук Индры, бога грома и молнии. В мифологии австралийских аборигенов радужный змей считается покровителем воды, дождя и шаманов. Ирландский сказочный персонаж — лепреккон прячет горшок золота в месте, где радуга коснулась земли.

Согласно библии, радуга появилась после всемирного потопа, как символ прощения человечества, и является символом союза Бога и человечества (в лице Ноя) о том, что потопа никогда больше не будет.

Научное обоснование природы радуги. Согласно выше сказанному, описание радуги в летописях народов древности носит преимущественно повествовательный теологический характер. Однако, уже в Древней Греции Аристо-