

САМАРСКАЯ ОБЛАСТНАЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ШКОЛА

**ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
РАДУГ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ
В АТМОСФЕРАХ ЗЕМЛИ И ТИТАНА**

(научно-исследовательская работа)

Выполнила:

Судойская Валентина,
11 класс СОФМШ

Научный руководитель:

Филиппов Юрий Петрович,
к.ф.-м.н., старший препода-
ватель кафедры общей и
теоретической физики
Самарского государствен-
ного университета

Самара, 2011 г.

Оглавление

Введение	3
1 Современный статус теории радуги	8
1.1 Эволюция представлений человека о радуге	8
1.2 Геометрическая оптика основной и вторичной радуг	15
1.3 Элементы волновой теории и фотометрии основной и вторичной радуг	20
1.4 Расчет углового распределения потока излучения основной и вторичной радуг	23
2 Моделирование феномена радуги высшего порядка	28
2.1 Понятие радуги высшего порядка. Дисперсия света в радугах высших порядков	28
2.2 Угловое распределение потока излучения, порождающего радуги высших порядков	35
2.3 Количественный анализ парциальных и полного сферических альбедо водяных капель	37
2.4 Физические свойства радуг метаново-этановой атмосферы Титана	40
Заключение	43
Литература	45
Приложения	47
Приложение А. Определение позиционного угла σ	47
Приложение В. Определение расстояния до небесного тела, порождающего основную радугу	49

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 течение своей жизни ни разу не любовался радугой. **Радуга** — это яркое атмосферное оптическое и метеорологическое явление, наблюдаемое обычно после дождя или перед ним, в стороне противоположной по отношению к Солнцу, при освещении последней завесы дождя. Она выглядит как дуга или окружность, 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 дождике цветовая 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).

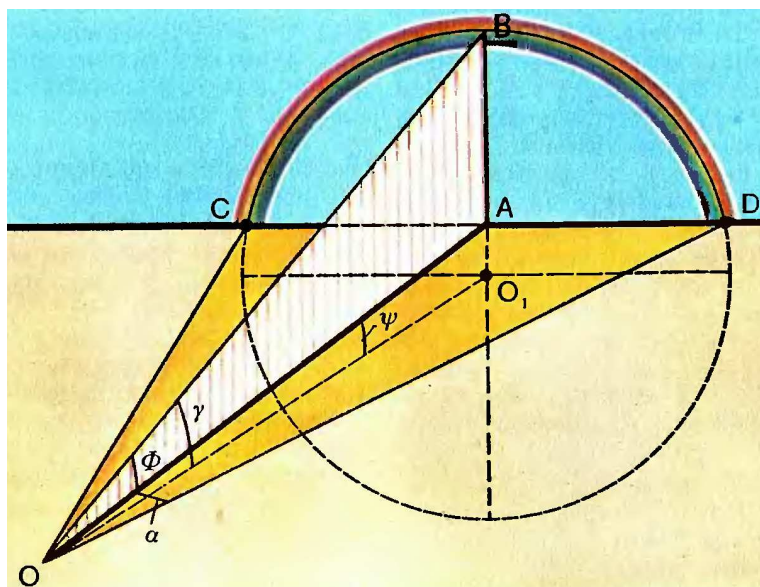


Рис. 2. К определению расположения наблюдателя и основной радуги.

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 горизонта¹. 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.

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].

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 конструкций. 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.,

¹Иное 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.

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.

Важно отметить, что автор настоящей работы в работе [11] уже подробно исследовал свойства радуг 1-7 порядков, образующихся на каплях воды. Однако на эксперименте возможно исследование свойств радуг и более высоких порядков.

Титан — самый большой спутник Сатурна шестой планеты Солнечной системы (по удаленности от Солнца) находится под пристальным вниманием специалистов. 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 [12]. 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 борта 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 в течение одних 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 [13].

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 экстремальных значений угла отклонения и угла падения световых лучей, порождающих радуги восьмого – десятого порядков с учетом эффекта дисперсии на каплях воды. Сравнение с результатами расчетов для радуг 1-7 порядков.

2. Расчет углового распределения потока света для одиночной капли воды, в случае световых лучей, порождающих радуги восьмого – десятого порядков. Сравнение с результатами расчетов для радуг 1-7 порядков.

3. Расчет парциальных и полного сферического альбедо для сферических капель воды, порождающих радугу.

4. Расчет экстремальных значений угла отклонения и угла падения световых лучей, порождающих радуги первого – десятого порядков без учета эффекта дисперсии на каплях метана и этана. Сравнение с результатами расчетов для капель воды.

Основными методами решения поставленных задач являются:

1. Метод геометрической оптики.

2. Элементы фотометрии.

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.

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 физических свойств основной и вторичной радуг.

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 — лепрекон 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 повест-