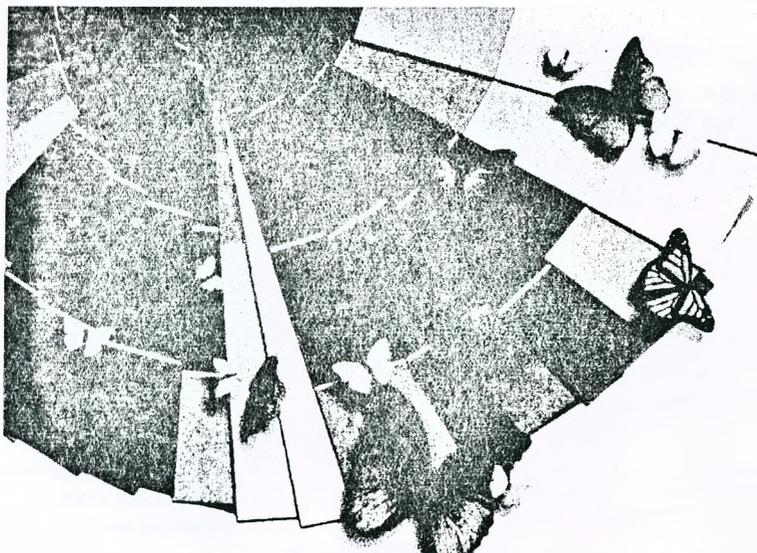


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
"БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"

КАФЕДРА ФИЗИКИ

Методические указания

к выполнению лабораторной работы О4
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ
СТЕКЛЯННОЙ ПРИЗМЫ



Брест 2016

УДК 535.32

С помощью гониометра-спектрометра ГС-5 измеряются положения щели N_0 и наиболее ярких линий N и вычисляются минимальные углы отклонения, которые зависят от длины волны. Вычисляются угловая дисперсия и разрешающая способность прибора

Методические указания к лабораторной работе О4 предназначены для студентов всех технических специальностей и всех форм обучения в БрГТУ.

Составители: А.А. Гладышук, к.ф.-м.н., доцент
Т.Л. Кушнер, к.ф.-м.н., доцент
В.М. Косарев, к.ф.-м.н., доцент
В.Я. Хуснутдинова, к.ф.-м.н., доцент
Е.А. Максимук, лаборант

. теоретической физики

ий университет", 2016

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПРЕССИИ СТЕКЛЯННОЙ ПРИЗМЫ

I. Цель работы: наблюдение линейчатых спектров испускания; определение показателей преломления оптического стекла для различных длин волн и построение кривой дисперсии этого стекла; определение дисперсионных характеристик призмы.

II. Приборы и принадлежности: гониометр – спектрометр ГС-5, ртутная лампа, призма из оптического стекла, вентилятор, миллиметровая бумага.

III. Введение.

Стеклопризма является диспергирующей системой: она разлагает исследуемый свет в спектр по длинам волн, что широко используют в различных спектральных приборах. Это свойство призмы обусловлено тем, что ее показатель преломления n зависит от длины волны λ света, и поэтому свет разных длин волн, отклоняется на разные углы, т. е. пространственно разделяется.

Первые эксперименты по исследованию дисперсии света по способу преломления в призме были выполнены Ньютоном в 1672 году.

Классическая электронная теория объясняет дисперсию света следующим образом. Световая волна, как известно, представляет собой переменное электромагнитное поле высокой частоты, распространяющееся в вакууме с постоянной скоростью $c = 2,9979 \cdot 10^8$ м/с. При распространении света в веществе фазовая скорость (скорость распространения фазы колебаний) зависит от частоты световых колебаний, в то время как в вакууме фазовая скорость для всех частот одинакова. Дисперсия света является результатом взаимодействия электромагнитных волн с заряженными частицами, входящими в состав вещества. Обычно считают, что смещаются наиболее слабо связанные с ядром атома электроны, которые называют оптическими электронами. В процессе вынужденных колебаний электронов с частотой ν падающего на вещество света периодически изменяются дипольные электрические моменты атомов и, следовательно, атомы и начинают излучать вторичные электромагнитные волны, частота которых также равна ν . Средние расстояния между частицами вещества во много раз меньше протяженности одного цуга волн. Поэтому вторичные волны, излучаемые весьма большим числом соседних атомов среды, когерентны как между собой, так и с первичной волной. При наложении, они интерферируют, причем результат интерференции зависит от соотношения их амплитуд и начальных фаз.

Расчеты показывают, что в однофазном изотропном веществе в результате интерференции образуется проходящая волна, фазовая скорость которой зависит от частоты, а направление распространения совпадает с направлением распространения первичной волны.

Следовательно, абсолютный показатель вещества $n = \frac{c}{v}$ зависит от частоты, а значит, и длины волны падающего света.

Для определения зависимости $n = n(\lambda)$ в случае призмы обычно используют метод, основанный на измерении угла наименьшего отклонения. Суть этого ме-

тогда в следующем. Пусть луч света с длиной волны λ падает под некоторым углом i (рис.1) на грань призмы с преломляющим углом Θ . В результате двух преломлений вышедший из призмы луч отклоняется на угол α по отношению к падающему лучу. Угол α зависит от угла падения i , преломляющего угла Θ призмы, а также от сорта стекла и длины волны света λ .

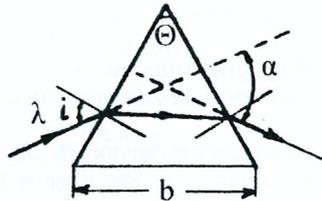


Рисунок 1

Можно показать, что при симметричном прохождении света через призму (как на рис.1) угол отклонения минимален, α_{\min} . В этом случае показатель преломления n определяется формулой

$$n = \frac{\sin[(\Theta + \alpha_{\min})/2]}{\sin(\Theta/2)}, \quad (1)$$

где угол α_{\min} зависит от λ . В данной работе используется призма с $\Theta = 60^\circ$, и формула (1) упрощается:

$$n = 2 \sin\left(30 + \frac{\alpha_{\min}}{2}\right). \quad (2)$$

Таким образом, определение показателя преломления для каждой длины волны сводится к измерению соответствующего угла наименьшего отклонения.

Призма, как и любой спектральный прибор, характеризуется двумя основными параметрами: угловой дисперсией и разрешающей способностью.

Угловая дисперсия – характеризует способность прибора пространственно разделять пучки лучей различных длин волн. Мерой угловой дисперсии является отношение $\frac{\Delta\alpha}{\Delta\lambda}$, где $\Delta\alpha$ – разность углов отклонения диспергированных световых пучков с длинами волн, отличающимися на $\Delta\lambda$. Для призмы с преломляющим углом $\Theta = 60^\circ$ угловая дисперсия вблизи угла наименьшего отклонения определяется формулой:

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta\lambda} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{n}{2}\right)^2}} \left| \frac{\Delta n}{\Delta\lambda} \right|, \quad (3)$$

где величина $\frac{\Delta n}{\Delta\lambda}$ называется дисперсией вещества, из которого сделана призма.

Разрешающая способность характеризует способность прибора разделять (разрешать) спектральные линии, мало отличающиеся по длинам волн. За меру разрешающей способности принимают отношение $\frac{\lambda}{\delta\lambda}$, где λ – длина волны спектральной линии, около которой производят измерения, а $\delta\lambda$ – наименьшая разность длин волн двух еще разрешаемых линий. Теоретически установлено, что разрешающая способность призмы ограничена вследствие дифракции света величиной

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} = b \left| \frac{\Delta n}{\Delta\lambda} \right|, \quad (4)$$

где b – основание призмы, вдоль которого распространяется свет (см. рис. 1).

IV. Описание установки.

Работа выполняется на гониометре-спектрометре ГС-5 – приборе, предназначенном для точных измерений углов.

Оптическая схема установки показана на рис. 2. Здесь 1 – коллиматор, в передней фокальной плоскости которого расположена узкая раздвижная щель;

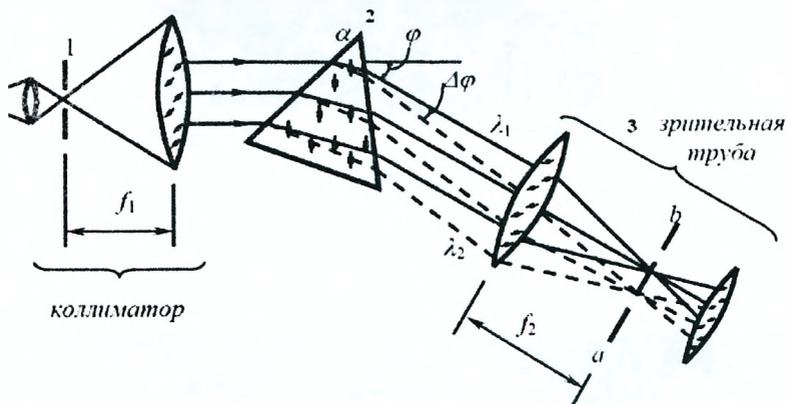


Рисунок 2

2 – исследуемая призма; 3 – зрительная труба – в фокальной плоскости ее объектива образуется изображение входной щели коллиматора. Если свет содержит несколько длин волн, то образуется ряд изображений щели, соответствующих этим длинам волн (линейчатый спектр). Наблюдают спектр через окуляр трубы.

В данной работе для определения дисперсии вещества призмы и её разрешающей способности используется гониометр типа ГС-5 с устанавливаемой на его столике трехгранной призмой. Для наглядности гониометр представлен с двух противоположных сторон (рис. 3а и рис. 3б).

Он состоит из следующих основных частей: основания 1, корпуса 2 с оптической трубой и отсчётным микроскопом 3, столика 4 и скрытого под столиком

отсчётного лимба. На основании укреплены: колонка коллиматора 5 и вертикальная ось прибора, вокруг которой могут вращаться лимб, корпус и столик. Вращение двух последних может осуществляться как грубо от руки, так и плавно с помощью соответствующих микрометрических винтов 6 и 7 при зажатых зажимных винтах. Наклоны столика в двух взаимно перпендикулярных плоскостях осуществляются с помощью винта 8.

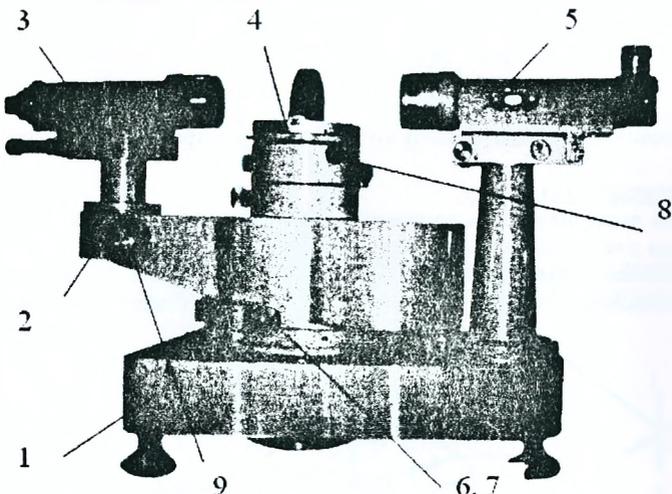


Рисунок 3а

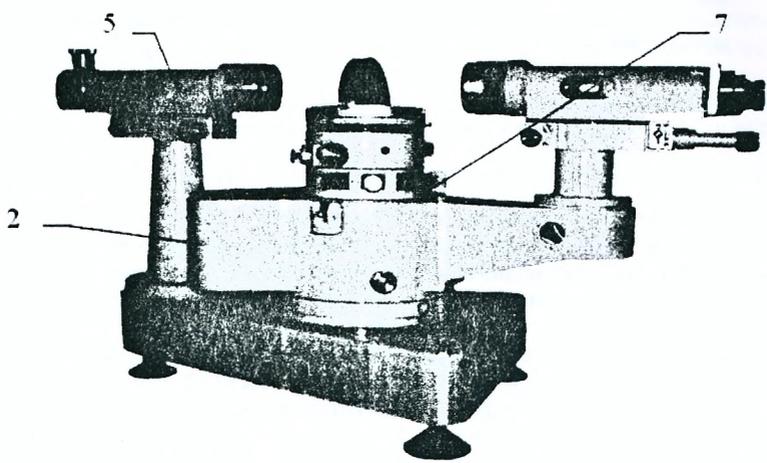


Рисунок 3б

На конце коллиматора имеется щель, ширину которой можно регулировать с помощью микрометрического винта. Коллиматор служит для создания параллельного пучка лучей.

Для этого щель, освещаемая специальным источником, устанавливается в фокальной плоскости объектива коллиматора. Стеклоный лимб с делениями установлен на вертикальной оси прибора в её нижней части. Отсчёт по лимбу ведётся с помощью отсчётного микроскопа 3 и оптического микрометра, управляемого маховиком 9.

Поле зрения микроскопа приведено на рис. 4. В левом окне наблюдается изображение диаметрально противоположных участков лимба и вертикальный индекс, в правом окне – деления шкалы оптического микрометра и горизонтальный индекс.

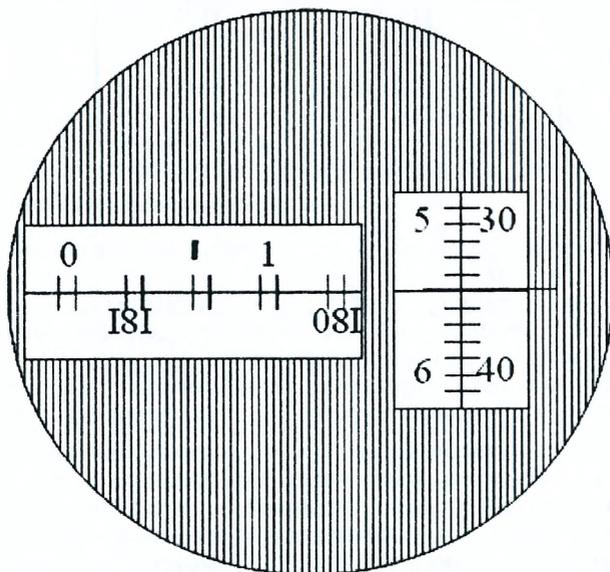


Рисунок 4

Чтобы снять отсчёт по лимбу, необходимо повернуть маховик 9 настолько, чтобы верхние и нижние изображения штрихов лимба в левом окне совместились. В ситуации, показанной на рисунке, полного совмещения штрихов не достигнуто. При совпадении штрихов можно произвести отсчет. Число градусов будет равно ближайшему слева от вертикальной метки числу. Для случая, приведенного на рисунке, это 0° .

Число десятков минут равно числу интервалов, заключенных между верхним штрихом, который соответствует отсчитанному числу градусов, и нижним оцифрованным штрихом, отличившимся от верхнего на 180 градусов. В нашем случае число интервалов между 0° и 180° равно четырем. Число единиц минут

отсчитывается по шкале микрометра в правом окне по левому ряду чисел, т. е. равно пяти минутам. Число единиц секунд – в том же окне по правому ряду чисел. На рисунке это значение равно 35". В целом, положение, показанное на рис. 4, при совпадении штрихов будет соответствовать отсчету: $0^{\circ}45'35''$.

Источник света – ртутная лампа. Ее наиболее характерные спектральные линии указаны на рис. 5.

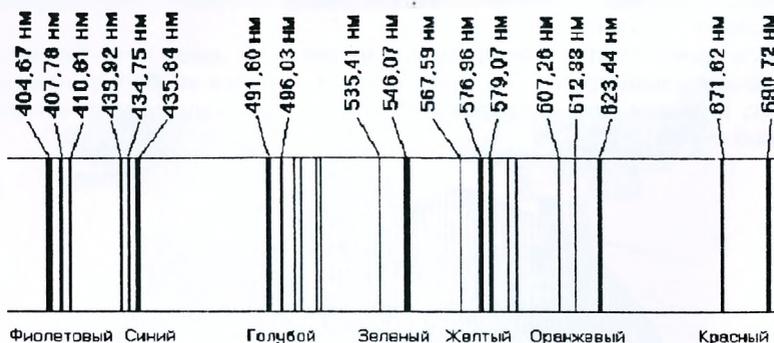


Рисунок 5 – Линейчатый спектр ртути (длины волн в нм)

Для выполнения данной работы следует брать наиболее интенсивные линии, отмеченные на рисунке.

У. Подготовка гониометра к работе и пример измерения.

Прежде, чем приступить к работе с гониометром, внимательно ознакомьтесь с назначением всех регулировок, используя рис. 3.

Внимание! Гониометр – прибор высокой точности. Малейшая неосторожность в обращении с прибором приводит к его разъюстировке или поломке. Все регулировки, обозначенные \otimes , трогать запрещается. Запрещено прикасаться руками ко всем оптическим поверхностям (окуляры, призма, объективы).

Снять крышки с объективов коллиматора и зрительной трубы и убедиться, что зрительная труба и столик вращаются вокруг оси прибора самостоятельно (для этого достаточно легким усилием, не применяя силы, поворачивать руками столик, а затем алидаду со зрительной трубой).

С помощью выключателя, расположенного с левой стороны гониометра, включить осветительную систему прибора.

Внимание! Если шкала лимба видна нечетко, нужно чистой тряпочкой протереть поверхность объектива и, вращая его оправу, сфокусировать изображения шкалы.

Если условия, изложенные выше, не выполняются, следует обратиться к преподавателю.

Вращением накатного кольца окуляра трубы добиться четкого изображения визирного креста в поле зрения окуляра.

Установить зрительную трубу отсчетного микроскопа навстречу коллиматору и убедиться, что в этом положении отсчет по шкале лимба не выходит за пределы интервала углов от 90° до 270° .

Включить вентилятор обдува ртутной лампы.

Включить ртутную лампу, если лампа сразу не загорелась, необходимо нажать несколько раз пусковую кнопку.

Внимание! Ртутную лампу включать без вентилятора запрещается.

Установленную на столике призму с помощью пластинки, к которой она приклеена, вывести из поля зрения зрительной трубы (прикасаться пальцами к поверхностям призмы нельзя).

Убедиться, что по шкале коллиматора – она находится с противоположной стороны винта – ноль установлен против ∞ . Этим самым мы устанавливаем щель коллиматора в фокальной плоскости его объектива.

Убедиться, что входящая щель достаточно освещена. Затем поворотом зрительной трубы ввести изображение щели коллиматора в середину поля зрения и тщательно сфокусировать изображение щели. Оно должно быть достаточно узким и ярким.

Провести более тщательно совмещение вертикального штриха визирного креста с серединой изображения. После этого сделать отсчет по шкале лимба № (см. рис.4). Операцию повторить не менее трех раз, каждый раз сбивая совмещение вертикального штриха с серединой изображения. Все данные занести в таблицу, составленную самостоятельно.

Ввести исследуемую призму в пучок света, идущий от щели коллиматора.

Поворачивая от руки столик с призмой, глазом отыскать цветной спектр и в этом направлении ввести зрительную трубу.

С помощью фокусировочного винта добиться, чтобы линии спектра в поле зрения были достаточно резкими.

Просмотреть в трубу весь спектр – от желтого дублета до яркой фиолетовой линии.

Проследить, чтобы середины линий расположились по горизонтали – горизонтальный штрих визирного креста при повороте трубы должен пересекать их по центрам. Если это не так (спектр перекошен), отрегулировать наклон столика винтами. После этого можно приступить к измерениям.

Наблюдая в неподвижную трубу, например, за желтым дублетом, поворачивать от руки в одном направлении столик с призмой. При этом линии будут перемещаться по полю зрения и в некоторый момент начнут двигаться в обратном направлении, несмотря на то, что вращение столика продолжается в прежнем направлении.

Если такой случай не наблюдается, хотя просмотрен в зрительную трубу весь спектр, нужно глазом, вращая рукой столик, отыскать интересующий случай и в данное направление ввести зрительную трубу.

Момент изменения направления движения линии как раз и соответствует углу наименьшего отклонения α_{\min} для этой линии.

Не меняя положения столика, совместить вертикальный штрих визирного креста с серединой линии. Тщательно сфокусировав линию винтом и проведя более точное совмещение вертикального штриха с серединой линии, сделать отсчеты по шкале лимба положения линии N .

Измерения повторить не менее трех раз, каждый раз сбивая настройку, все данные занести в таблицу.

VI. Задания для самостоятельной работы.

1. Определить зависимость $n = n(\lambda)$. Для этого, используя пример определения α_{\min} , произвести отсчеты положения щели N_0 и наиболее ярких линий – N по шкале лимба гониометра (измерение провести не менее чем для семи линий спектра). Каждое измерение проводить не менее трех раз. Из разности отсчетов вычислить $\alpha_{\min} = N - N_0$ для каждой линии спектра.

По формуле (2) $n = 2 \sin(30^\circ + 1/2\alpha_{\min})$ вычислить соответствующие каждой длине волны показатели преломления n .

Все данные занести в таблицу, составленную самостоятельно.

2. По полученным данным на миллиметровке построить график зависимости показателя преломления n от длины волны λ . Обратит внимание при строении графика на выбор масштабов по осям координат.

3. Вычислить угловую дисперсию призмы по формуле (3)

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta\lambda} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{n}{2}\right)^2}} \left| \frac{\Delta n}{\Delta\lambda} \right|$$

в угл. $\frac{\text{мнн}}{\text{нм}}$ вблизи зеленой линии $\lambda_3 = 546 \text{ нм}$. $\frac{\Delta n}{\Delta\lambda}$ – есть дисперсия вещества, из которого сделана призма; величину $\frac{\Delta n}{\Delta\lambda}$, необходимую для расчетов, найти из графика $n = n(\lambda)$, выделив на графике прямолинейный отрезок кривой вблизи зеленой линии.

4. Вычислить разрешающую способность призмы вблизи зеленой линии $\lambda_3 = 546 \text{ нм}$ по формуле (4) $\frac{\lambda}{\delta\lambda} = b \left| \frac{\Delta n}{\Delta\lambda} \right|$, где основание призмы $b = 25 \text{ мм}$. При вычислении $\delta\lambda$ и b выразить их в метрах.

5. Продумайте возможные варианты расчета погрешностей.

Контрольные вопросы.

1. Физические причины дисперсии света.
2. Что характеризует угловая дисперсия спектрального прибора и его разрешающая способность?
3. От чего зависят угловая дисперсия и разрешающая способность призмы?
4. Как установить призму на минимум отклонения для данной длины волны?
5. Как производится отсчет по лимбу гониометра?

Приложение: ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ РАДУГИ

Сколько бывает радуг?

Вряд ли найдется человек, который не любовался бы радугой. Появившись на небосводе, она невольно приковывает внимание. А сколько легенд и сказаний связано с радугой у разных народов! В русских летописях радуга называется "райской дугой" или сокращенно "райдугой". В Древней Греции радугу олицетворяла богиня Ирида ("Ирида" и означает "радуга"). По представлениям древних греков, радуга соединяет небо и землю, и Ирида была посредницей между богами и людьми. В русский язык вошли и другие слова с тем же греческим корнем: ирис — радужная оболочка глаза, иризация, иридий.

Радуга всегда связывается с Дождем. Она может появиться и перед дождем, и во время дождя, и после него, в зависимости от того, как перемещается облако, дающее ливневые осадки. Об этом говорят и народные поговорки: "Радуга-дуга! Перебей дождя!", "Радуга-дуга! Принеси нам дождь!"

Первая попытка объяснить радугу как естественное явление природы была сделана в 1611 г. архиепископом Антонио Доминисом. Его объяснение радуги противоречило библейскому, поэтому он был отлучен от церкви и приговорен к смертной казни. Антонио Доминис умер в тюрьме, не дождавшись казни, а его тело и рукописи были сожжены.

Обычно наблюдаемая радуга — это цветная дуга с угловым радиусом 42° , видимая на фоне завесы ливневого дождя или полос падения дождя, часто не достигающих поверхности Земли. Радуга видна в стороне небосвода, противоположной Солнцу, и обязательно при Солнце, не закрытом облаками. Такие условия чаще всего создаются при выпадении летних ливневых дождей, называемых в народе "грибными" дождями. Центром радуги является точка, диаметрально противоположная Солнцу, — антисолярная точка. Внешняя дуга радуги красная, за нею идет оранжевая, желтая, зеленая дуги и т. д., заканчивая внутренней фиолетовой.

Сколько радуг можно увидеть одновременно?

Неискушенный наблюдатель видит обычно одну радугу, изредка две. Причем вторая радуга, концентрическая с первой, имеет угловой радиус около 50° и располагается над первой. Вторая радуга более широкая, блеклая, расположение цветов в ней обратное первой радуге: внешняя дуга у нее фиолетовая, а внутренняя красная.

Самое удивительное, что большинство людей, наблюдавших радугу много раз, не видят, а точнее не замечают дополнительных дуг в виде нежнейших цветных арок внутри первой и снаружи второй радуг (т. е. со стороны фиолетовых краев радуг). Эти цветные дуги (их обычно три-четыре) неправильно названы дополнительными — в действительности они такие же основные (или главные), как первая и вторая радуги.

Эти дуги не образуют целого полукруга или большой дуги и видны только в самых верхних частях радуг, т. е. вблизи "вершин" ("макушек") основных радуг, когда же последние переходят в вертикальное положение (или близкое к нему), дополнительные дуги пропадают. Именно в этих дугах, сосредоточено

наибольшее богатство чистых цветовых тонов, которое и породило выражение "все цвета радуги".

Радуги можно увидеть около водопадов, фонтанов, на фоне завесы капель, разбрызгиваемых поливальной машиной или полевой поливальной установкой. Можно самому создать завесу капель из ручного пульверизатора и, встав спиной к Солнцу, увидеть радугу, созданную собственными руками. У фонтанов и водопадов случалось видеть, кроме описанных двух основных и трех-четырёх дополнительных дуг к каждой основной, еще одну или две радуги вокруг Солнца.

Как возникает радуга?

Откуда берется удивительный красочный свет, исходящий от дуг радуги? Все радуги – это солнечный свет, разложенный на компоненты и перемещенный по небосводу таким образом, что он кажется исходящим от части небосвода, противоположной той, где находится Солнце.

Научное объяснение радуги впервые дал Рене Декарт в 1637 г. Декарт объяснил радугу на основании законов преломления и отражения солнечного света в каплях выпадающего дождя. В то время еще не была открыта дисперсия – разложение белого света в спектр при преломлении. Поэтому радуга Декарта была белой.

Спустя 30 лет Исаак Ньютон, открывший дисперсию белого света при преломлении, дополнил теорию Декарта, объяснив, как преломляются цветные лучи в каплях дождя. По образному выражению американского ученого А. Фразера, сделавшего ряд интересных исследований радуги уже в наше время: "...Декарт повесил радугу в нужном месте на небосводе, а Ньютон расцветил ее всеми красками спектра".

Несмотря на то, что теория радуги Декарта-Ньютона создана более 300 лет назад, она правильно объясняет основные особенности радуги: положение главных дуг, их угловые размеры, расположение цветов в радугах различных порядков.

Для объяснения радуги мы пока и ограничимся теорией Декарта-Ньютона, которая подкупает своей удивительной наглядностью и простотой.

Лучи радуги

Итак, пусть параллельный пучок солнечных лучей падает на каплю (рис. П1). Ввиду того, что поверхность капли кривая, у разных лучей будут разные углы падения. Они изменяются от 0 до 90°. Проследим путь луча, упавшего в точку А, его угол падения обозначим i . Преломившись под углом преломления i , луч входит в каплю и доходит до точки В. Часть энергии луча, преломившись, выходит из капли, часть, испытав внутреннее отражение в точке 5, идет внутри капли до точки С. Здесь снова часть энергии луча, преломившись, выходит из капли, а некоторая часть, испытав второе внутреннее отражение, доходит до точки О и т. д. В принципе луч может испытывать любое число (n) внутренних отражений, а преломлений у каждого луча два – при входе и при выходе из капли.

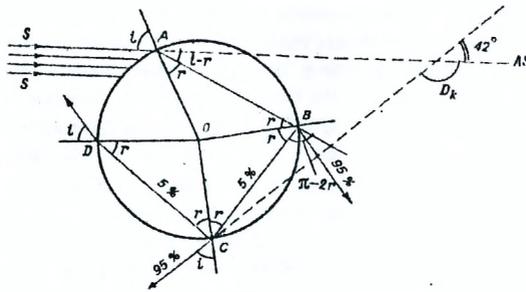


Рисунок П1 – *Ход светового луча в капле при образовании первой и второй радуг*

Обозначим D_k угол отклонения любого луча после прохождения им капли. Тогда из рис. П1 очевидно, что

$$D_k = 2(i - r) + k\pi - 2r, \tag{П1}$$

здесь k – число внутренних отражений луча.

Параллельный пучок лучей, падающий на каплю, по выходе из капли оказывается сильно расходящимся (рис. П2). Концентрация лучей, а значит, и их интенсивность тем больше, чем ближе они лежат к лучу, испытавшему минимальное отклонение. Путь минимально отклоненного луча обозначен на рисунке пунктиром. Только минимально отклоненный луч и самые близкие к нему лучи обладают достаточной интенсивностью, чтобы образовать радугу. Поэтому этот луч и называют *лучом радуги*.

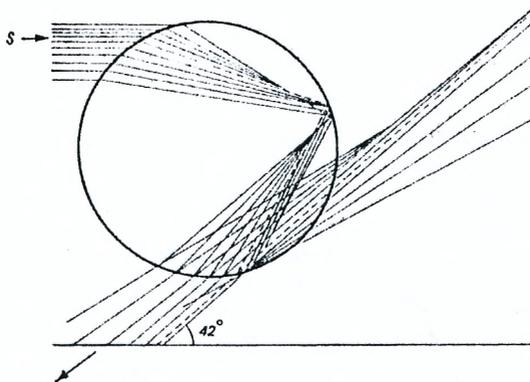


Рисунок П2 – *Преломление пучка световых лучей в капле*

Минимальное отклонение луча, испытавшего одно внутреннее отражение ($k = 1$), по теории Декарта равно:

$$D_1 = \pi + 2(i - 2r). \tag{П2}$$

Каждый белый луч, преломляясь в капле, разлагается в спектр, и из капли выходит пучок расходящихся цветных лучей. Поскольку у красных лучей показатель преломления меньше, чем у других цветных лучей, то они и будут испытывать минимальное отклонение по сравнению с остальными. Минимальные отклонения крайних цветных лучей видимого спектра красных и фиолетовых оказываются следующими: $D_{\lambda} = 137^{\circ}30'$ и $D_{\phi} = 139^{\circ}20'$. Остальные цветные лучи займут промежуточные между ними положения.

Солнечные лучи, прошедшие через каплю с одним, внутренним, отражением оказываются исходящими от точек неба, расположенных ближе к антисолярной точке, чем к Солнцу. Поэтому, чтобы увидеть эти лучи, надо встать спиной к Солнцу. Расстояния их от антисолярной точки будут равны соответственно: $180^{\circ} - 137^{\circ}30' = 42^{\circ}30'$ для красных и $180^{\circ} - 139^{\circ}20' = 40^{\circ}40'$ для фиолетовых.

Почему радуга круглая? Дело в том, что более или менее сферическая капля, освещенная параллельным пучком лучей солнечного света, может образовать радугу только в виде круга. Описанный путь в капле с минимальным отклонением по выходе из нее прodelьывает не только тот луч, за которым мы следили, но и многие другие лучи, упавшие на каплю под таким же углом. Все эти лучи и образуют радугу, поэтому их называют лучами радуги.

Сколько же лучей радуги в пучке света, падающего на каплю? Их много, по существу, они образуют целый цилиндр. Геометрическое место точек их падения на каплю – это целая окружность.

В результате прохождения через каплю и преломления в ней цилиндр белых лучей преобразуется в серию цветных воронок, вставленных одна в другую, с центром в антисолярной точке, с открытыми раструбами, обращенными к наблюдателю. Наружная воронка красная, в нее вставлена оранжевая, желтая, далее идет зеленая и т. д., заканчивая внутренней фиолетовой.

Таким образом, каждая отдельная капля образует целую радугу! Радуга – "как Солнце в малой капле вод". Так образно и предельно лаконично выразил суть радуги Г.Р. Державин.

Конечно, радуга от одной капли слабая, и в природе ее невозможно увидеть отдельно, так как капель в завесе дождя много. В лаборатории же удавалось наблюдать не одну, а несколько радуг, образованных преломлением света в одной подвешенной капельке воды или масла при освещении ее лучом лазера. Подробнее об этом эксперименте рассказано ниже.

Радуга, которую мы видим на небосводе, мозаична – она образована мириадами капель. Каждая капля создает серию вложенных одна в другую цветных воронок (или конусов). Но от отдельной капли в радугу попадает только один цветной луч. Глаз наблюдателя является общей точкой, в которой пересекаются цветные лучи от множества капель. Например, все красные лучи, вышедшие из различных капель, но под одним и тем же углом и попавшие в глаз наблюдателя, образуют красную дугу радуги, так же и все оранжевые и другие цветные лучи. Поэтому радуга круглая.

Два человека, стоящие рядом, видят каждый свою радугу. Если вы идете по дороге и смотрите на радугу, она перемещается вместе с вами, будучи в каждый момент образована преломлением солнечных лучей в новых и новых каплях.

Далее, капли дождя падают. Место упавшей капли занимает другая и успевает послать свои цветные лучи в радугу, за ней следующая и т. д. Пока идет дождь, мы видим радугу.

Мы пояснили, как образуется первая радуга, наиболее часто наблюдаемая, с ярким внешним красным краем и внутренним фиолетовым.

Найдем ширину первой радуги Δ_1 , т. е. угловое расстояние от ее красной дуги до фиолетовой с учетом поправки на угловую ширину Солнца, диаметр которого равен $32'$: $\Delta_1 = 42^\circ 30' - 40^\circ 40' + 32' = 2^\circ 22'$.

Вторая радуга и следующие

Если повторить предыдущие рассуждения относительно лучей, испытавших в капле два внутренних отражения, получим следующие минимальные углы отклонения крайних цветных лучей. Для красных $D_{\lambda_k} = 230^\circ 54'$ и для фиолетовых $D_{\lambda_{\phi}} = 233^\circ 56'$. Такие лучи так же, как и испытавшие одно отражение внутри капли, лежат ближе к антисолярной точке, чем к Солнцу. Угловые расстояния их от антисолярной точки будут равны: $230^\circ 54' - 180^\circ = 50^\circ 34'$ для красных; $233^\circ 46' - 180^\circ = 53^\circ 56'$ для фиолетовых. Эти лучи образуют радугу, концентрическую с первой, но с обратным расположением цветов. В этой радуге внутренняя дуга красная.

Угловая ширина второй радуги $\Delta_2 = 53^\circ 56' - 50^\circ 34' = 3^\circ 54'$.

Вторая радуга значительно шире первой и выглядит более слабой.

Расчеты для радуг следующих порядков ($k=3, 4, 5, 6, 7, 8$ и т. д.) показали, что 3-я и 4-я радуги располагаются вокруг Солнца, 5-я и 6-я – вокруг антисолярной точки, 7-я и 8-я – снова вокруг Солнца и т. д.

В таблице П1 приведены углы отклонения лучей красного цвета, угловые радиусы соответствующих радуг и положение их на небосводе согласно расчетам К. С. Шифрина по формулам дифракции.

Таблица П1

k	D_k	Угловой радиус радуги	Положение на небосводе
1	$137^\circ 29'$	$42^\circ 31'$	Вокруг антисолярной точки
2	$129^\circ 54'$	$50^\circ 06'$	
3	$42^\circ 53'$	$42^\circ 53'$	Вокруг Солнца
4	$42^\circ 18'$	$42^\circ 18'$	
5	$126^\circ 31'$	$53^\circ 29'$	Вокруг антисолярной точки
6	$149^\circ 46'$	$30^\circ 14'$	
7	$66^\circ 22'$	$66^\circ 22'$	Вокруг Солнца
8	$16^\circ 51'$	$16^\circ 51'$	

Возникает вопрос: почему мы не видим всех радуг? Это происходит потому, что из всей энергии луча, упавшего на каплю в точку А, примерно 7% отражается, 88% – проходит сквозь каплю и только 5% испытывает одно внутреннее отражение в точке В и идет дальше к точке С. Здесь снова происходит аналогичное разделение энергии между лучами, выходящими из капли и дважды от-

раженными от внутренней поверхности капли. Поэтому на радуги всех порядков расходуется менее 5% энергии падающего пучка, при этом "львиная" доля (около 4%) идет на образование первой радуги. Обычно мы и можем видеть только первую радугу и изредка вторую. На остальные радуги остается менее 1% энергии, поэтому радуги высоких порядков не видны.

Почему радуга бывает разной?

По теории Декарта-Ньютона радуга должна быть всегда одинаковой – "застывшей". Ученые правильно объяснили положение радуги на небосводе, размер дуг, расположение цветов в основных радугах любого порядка. В частности, по теории, ширине дуг радуг всегда было "положено" быть одной и той же. Однако радуга содержала еще много секретов. Внимательный наблюдатель видел иногда серию красочных дополнительных дуг, которым совсем "не было места" в теории Декарта-Ньютона. Иногда радуга имела яркие насыщенные тона, а порой была совсем бледной, почти белой. Радуга бывала и широкой и узкой – и всё это "не укладывалось" в теорию Декарта-Ньютона.

Объяснение всего комплекса радуги со всеми неразгаданными ее особенностями, было сделано позже, когда была создана общая теория рассеяния (дифракции) световых лучей в атмосфере. В частности, стало ясно, что дополнительные дуги возникают вследствие интерференции лучей, лежавших по обе стороны от наименее отклоненного луча (луча радуги) и в непосредственной близости от него.

Размер и форма капель. Их влияние на вид радуги

Расчеты по формулам дифракционной теории, выполненные для капель разного размера, показали, что весь вид радуги – ширина дуг, наличие, расположение и яркость отдельных цветовых тонов, положение дополнительных дуг очень сильно зависят от размера капель дождя. Приведем основные характеристики внешнего вида радуги для капель разных радиусов.

Радиус капель 0,5-1 мм. Наружный край основной радуги яркий, темно-красный, за ним идет светло-красный, и далее чередуются все цвета радуги. Особенно яркими кажутся фиолетовый и зеленый. Дополнительных дуг много (до пяти), в них чередуются фиолетово-розовые тона с зелеными. Дополнительные дуги непосредственно примыкают к основным радугам.

Радиус капель 0,25 мм. Красный край радуги стал слабее. Остальные цвета видны по-прежнему. Несколько фиолетово-розовых дополнительных дуг сменяются зелеными.

Радиус капель 0,10-0,15 мм. Красного цвета в основной радуге больше нет. Наружный край радуги оранжевый. В остальном радуга хорошо развита. Дополнительные дуги становятся все более желтыми. Между ними и между основной радугой и первой дополнительной появились просветы.

Радиус капель 0,04-0,05 мм. Радуга стала заметно шире и бледнее. Наружный край ее бледно-желтый. Самым ярким является фиолетовый цвет. Первая дополнительная дуга отделена от основной радуги довольно широким промежутком, цвет ее белесый, чуть зеленоватый и беловато-фиолетовый.

Радиус капель 0,03 мм. Основная радуга еще более широкая с очень слабо окрашенным чуть желтоватым краем, содержит отдельные белые полосы.

Радиус капель 0,025 мм и менее. Радуга стала совсем белой. Она примерно в два раза шире обычной радуги и имеет вид блестящей белой полосы. Внутри нее могут быть дополнительные окрашенные дуги, сначала бледно-голубые или зеленые, затем белесовато-красные.

Таким образом, по виду радуги можно приближенно оценить размеры капель дождя, образовавших эту радугу. В целом, чем крупнее капли дождя, тем радуга получается уже и ярче, особенно характерным для крупных капель является наличие насыщенного красного цвета в основной радуге. Многочисленные дополнительные дуги также имеют яркие тона и непосредственно, без промежуточных, примыкают к основной радугам. Чем капли мельче, тем радуга становится более широкой и блеклой с оранжевым или желтым краем. Дополнительные дуги дальше отстоят и друг от друга и от основных радуг.

Вид радуги зависит и от формы капель. При падении в воздухе крупные капли сплющиваются, теряют свою сферичность. Вертикальное сечение таких капель приближается к эллипсу. Расчеты показали, что минимальное отклонение красных лучей при прохождении через сплющенные капли радиусом 0,5 мм составляет 140° . Поэтому угловой размер красной дуги будет не 42° , а только 40° . Для более крупных капель, например радиусом 1,0 мм, минимальное отклонение красных лучей составит 149° , а красная дуга радуги будет иметь размер 31° , вместо 42° . Таким образом, чем сильнее сплющивание капель, тем меньше радиус образуемой ими радуги.

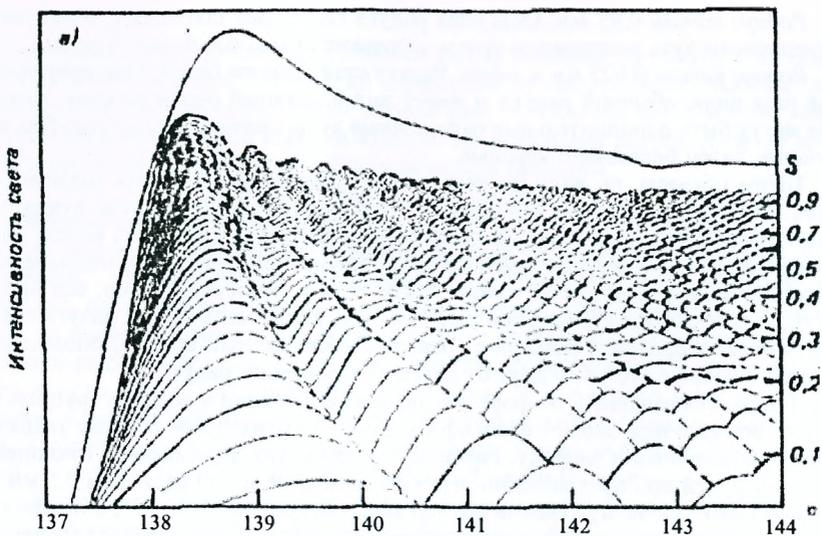
Разгадан "секрет" добавочных дуг!

А. Фразер, рассмотрев одновременно влияние размера и формы капель на вид радуги, сумел раскрыть "секрет" возникновения добавочных дуг. Как только что было сказано, уменьшение размера преобладающих капель и сплющивание крупных действуют в противоположных направлениях. Что же пересилит? Когда и какое влияние будет преобладающим?

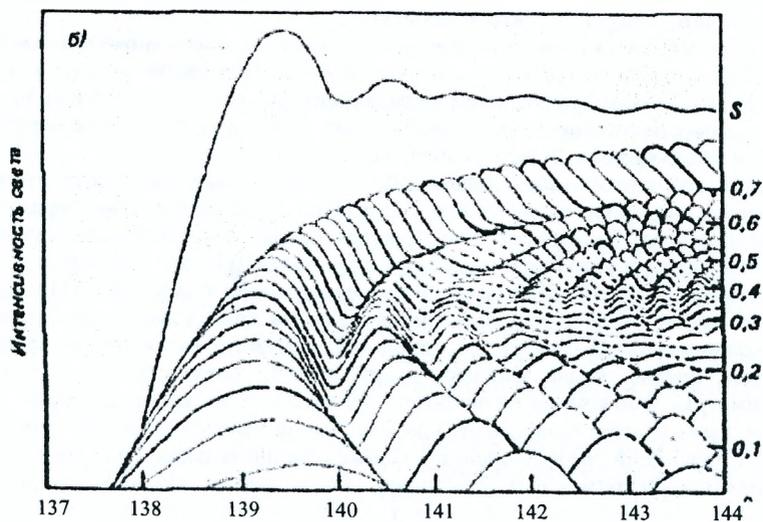
Наглядной иллюстрацией взаимодействия обоих факторов и совместного их влияния на вид радуги являются рис. П3а и П3б, составленные А. Фразером, на основании расчетов. На этих рисунках показано распределение интенсивности света в основной радуге и дополнительных дугах в зависимости от размера капель.

Сложная волнообразная поверхность на переднем плане (рис. П3а) составлена из многих индивидуальных кривых. Каждая кривая дает распределение и интенсивность света в радуге от одной капли. Каждая пятая кривая проведена потолще, цифры справа означают радиус капли, соответствующей кривой, в миллиметрах. Все кривые начинаются слева с очень малой интенсивности (вне радуг), затем быстро поднимаются до максимума между 138° и 139° (первая радуга). Следующий гребень справа – первая дополнительная дуга, за ней вторая дополнительная дуга и т. д. Расстояние между дугами, как видно из рисунка, быстро уменьшается при увеличении радиуса капель. Это действие первого фактора. Радуга становится узкой при увеличении размера капель.

Верхняя кривая S – это результирующая сложения вкладов капель всех размеров. Она характеризует распределение интенсивности света в окончательной радуге, которую мы видим.



Угловое расстояние от Солнца
**Рисунок П3а – Распределение интенсивности света
 в основной радуге и дополнительных дугах без учёта сплющивания капель**



Угловое расстояние от Солнца
**Рисунок П3б – Распределение интенсивности света
 в основной радуге и дополнительных дугах с учётом сплющивания капель**

На рис. П3б показаны те же кривые, но теперь учтено влияние сплющивания капель, тем более сильное, чем крупнее капли. Индивидуальные кривые для крупных сплюснутых капель смещены в сторону больших минимальных углов отклонения от Солнца и в результате вся волнообразная поверхность оказалась изогнутой вправо (индивидуальные максимумы ушли вправо). Это привело к тому, что на результирующей суммарной кривой появились, помимо основной радуги, еще дополнительные дуги, на угловых расстояниях от Солнца: первая – $140,5^\circ$, вторая – $141,3^\circ$, третья – $142,4^\circ$, четвертая – $142,5^\circ$.

Дополнительные дуги видны только вблизи вершины основной радуги, так как они образованы только вертикальными или близкими к ним лучами, прошедшими через эллиптические сечения капель.

Расчетами показано, но это можно проследить и по рис. 3б, что дополнительные дуги создаются в основном каплями размером от 0,2 до 0,3 мм. Более крупные и более мелкие капли дают максимумы, накладывающиеся друг на друга и слишком далеко отстоящие от основной радуги (они уходят вправо). Радуги капель диаметром 0,2–0,3 мм находятся в преимущественном положении, поскольку их максимумы никуда не сместились. Таким образом, можно сделать вывод, что дополнительные дуги видны, если в ливневом дожде присутствуют в значительном количестве капли радиусом 0,25 мм, и мало более крупных капель, смазывающих картину. Поэтому дополнительные дуги чаще видны и наиболее красочны не в очень интенсивных летних ливневых дождях. Они появляются также на фоне завесы из мельчайших капель, образующихся при разбрызгивании воды в поливальных установках.

Можно ли видеть целый круг радуги? С поверхности Земли мы можем наблюдать радугу в лучшем случае в виде половины круга, когда Солнце находится на горизонте. При поднятии Солнца радуга уходит под горизонт. Первую радугу можно видеть при высотах Солнца более 42° , а вторую – более 50° . С самолета, а еще лучше с вертолета (больше обзор) можно наблюдать радугу в



виде целого круга! Описание такой круговой радуги (ее и радугой, т. е. дугой, уже неудобно называть!) было помещено в журнале "Природа". Ее видели пассажиры самолета, летевшего в районе Новосибирска на высоте 1000 м.

Поляризация света радуг. Свет радуги характеризуется необычайно высокой степенью поляризации. В первой радуге она достигает 90%, во второй – около 80%. В этом легко убедиться, если посмотреть на радугу через поляризационную призму Николя. При небольших углах поворота призмы радуга полностью пропадает.

Радуга без дождя?

Бывают ли радуги без дождя или без полос падения дождя? Оказывается, бывают – в лаборатории. Искусственные радуги создавались в результате пре-

ломления света в одной подвешенной капельке дистиллированной воды, воды с сиропом или прозрачного масла. Размеры капель варьировали от 1,5 до 4,5 мм. Тяжелые капли вытягивались под действием силы тяжести, и их сечение в вертикальной плоскости представляло собою эллипс. При освещении капельки лучом гелий-неонового лазера (с длиной волны 0,6328 мкм) появлялись не только первая и вторая радуги, но и необычайно яркие третья и четвертая, с центром вокруг источника света (в данном случае лазера). Иногда удавалось получать даже пятую и шестую радуги. Эти радуги, как первая и вторая, снова были в стороне, противоположной источнику.

Итак, одна капелька создала столько радуг! Правда, эти радуги не были радужными. Все они были одноцветными, красными, так как образованы не белым источником света, а монохроматическим красным лучом.

Туманная радуга

В природе встречаются белые радуги, о которых говорилось выше. Они появляются при освещении солнечными лучами слабого тумана, состоящего из капелек радиусом 0,025 мм или менее. Их называют туманными радугами. Кроме основной радуги в виде блестящей белой дуги с едва заметным желтоватым краем наблюдаются иногда окрашенные дополнительные дуги: очень слабая голубая или зеленая дуга, а затем белесовато-красная.

Аналогичного вида белую радугу можно увидеть, когда луч прожектора, расположенного сзади вас, освещает интенсивную дымку или слабый туман перед вами. Даже уличный фонарь может создать, хотя и очень слабую, белую радугу, видимую на темном фоне ночного неба.

Лунные радуги

Аналогично солнечным могут возникнуть и лунные радуги. Они более слабые и появляются при полной Луне. Лунные радуги явление более редкое, чем солнечные. Для их возникновения необходимо сочетание двух условий: полная Луна, не закрытая облаками, и выпадение ливневого дождя или полос его падения (не достигающих Земли). Ливневые дожди, обусловленные дневными конвективными движениями воздуха, значительно реже выпадают ночью. Лунные радуги могут наблюдаться в любом месте земного шара, где осуществляются перечисленные два условия.

Дневные, солнечные радуги, даже образованные самими мелкими каплями дождя или тумана, довольно белесые, светлые, и все же наружный край их хотя бы слабо, но окрашен в оранжевый или желтый цвет. Радуги, образованные лунными лучами, совсем не оправдывают своего названия, так как они не радужные и выглядят как светлые, совершенно белые дуги.

Отсутствие красного цвета у лунных радуг даже при крупных каплях ливневого дождя объясняется низким уровнем освещения ночью, при котором полностью теряется чувствительность глаза к лучам красного цвета. Остальные цветные лучи радуги также теряют в значительной степени свой цветовой тон из-за ахроматичности (неокрашенности) ночного зрения человека.

Литература.

- 1 Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М., 1979. – Т. 3.
- 2 Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. – М., 1976.
- 3 Иродов, И.Е. Физический практикум / И.Е. Иродов. – М.: МИФИ, 1975. – 156 с.
- 4 Гайдай, Л.И. Элементарная теория радуги / Л.И. Гайдай – Владивосток: ДВГТУ, 2001.
- 5 Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М.: Физматлит, 1996. – Т. 2.
- 6 Сивухин, Д.В. Общий курс физики / Д.В. Сивухин. – М.: Физматлит, 2006.

Содержание

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПРЕССИИ СТЕКЛЯННОЙ ПРИЗМЫ.....	3
Приложение: ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ РАДУГИ	11
Литература.....	21

Учебное издание

Составители:

*Анатолий Антонович Гладыщук
Татьяна Леонидовна Кушнер
Валерий Михайлович Косарев
Венера Ямалетдиновна Хуснутдинова
Елена Александровна Максимук*

Методические указания
к выполнению лабораторной работы **О4**
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ
СТЕКЛЯННОЙ ПРИЗМЫ

Ответственный за выпуск: Гладыщук А.А.
Редактор: Боровикова Е.А.
Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П.
Корректор: Никитчик Е.В.

Подписано в печать 27.01.2017 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага «Performer».
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 1,4. Уч. изд. л. 1,5. Заказ № 1302. Тираж 50 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.