

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра компьютерной физики и метаматериалов
на базе Саратовского филиала Института радиотехники
и электроники им. В. А. Котельникова РАН

**Моделирование траектории светового пучка
при рассеянии на твердых и жидких частицах
в неоднородной среде**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Алексеевой Кристины Алексеевны
студента 4 курса, 4022 группы,
направления подготовки 03.03.02 Физика
Института физики

Научный руководитель
д.ф.-м.н. профессор

О. А. Черкасова

Заведующий кафедрой
компьютерной физики и метаматериалов
на базе Саратовского филиала Института радиотехники
и электроники им. В. А. Котельникова РАН
д.ф.-м.н. профессор

В.М. Аникин

Саратов 2021 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Актуальность темы выпускной квалификационной работы (ВКР) обусловлена значимостью использования теории рассеяния для определения размеров и форм частиц в моно компонентных и многокомпонентных системах, что важно для исследований в атмосферной оптике, при лабораторных исследованиях дисперсных систем, физических, химических, биологических исследованиях. Спектры рассеянного света позволяют установить молекулярные и атомные свойства веществ, дают информацию об исследуемом объекте.

В качестве источника света может быть лазер, солнечный свет. Светорассеяние используется, например, для диагностики в медицине, для создания линз, для определения рассеяния света здоровыми тканями и раковыми клетками. В промышленности – для изучения свойств отражения материалов и снижения фактора влияния солнечного излучения, для обнаружения концентрации нефти в загрязненных водах и при анализе свойств морского и прибрежного аэрозоля. Зная плотность твердых или жидких частиц, можно заранее установить мощность источника света и получить нужный отклик. То есть все твердые, жидкие и комбинированные среды – это область, где можно использовать рассеяние, отражение. Поскольку данный метод является бесконтактным и не нарушает состава исследуемого вещества, то является предпочтительным для исследования биологических образцов без нарушения структуры частиц.

По этой причине дальнейшее изучение оптических свойств систем, содержащих малые частицы при различной степени их ориентационной упорядоченности, является актуальной задачей, от решения которой зависит развитие новых методов анализа и контроля жидких и газообразных нанодисперсных систем.

Цель работы – компьютерное моделирование траектории светового пучка при рассеянии на твердых и жидких частицах в неоднородной среде.

Задачами работы являются:

- теоретическое изучение рассеяния и преломления света;
- построение математической модели и выбор метода решения;
- разработка программы и практический расчет, с последующим анализом полученных результатов.

Методы исследования – теория рассеяния Ми.

Объект исследования - частицы сферической формы в жидком и твердом состоянии и пучок света, **предмет исследования** – рассеяние света малыми частицами.

Структура ВКР. Выпускная квалификационная работа содержит введение, 2 главы, заключение, список использованных источников (20 наименований) и 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируются аспектные характеристики выпускной работы (актуальность, цель, задачи, методы исследования, объект и предмет исследования, новые результаты и т.д.).

В первой, обзорной по характеру главе, проводится изучение природы процессов рассеяния, теоретических аспектов преломления на капле воды. Рассматривается Рэлеевское рассеяние и рассеяние Ми, модель элементарного рассеивателя.

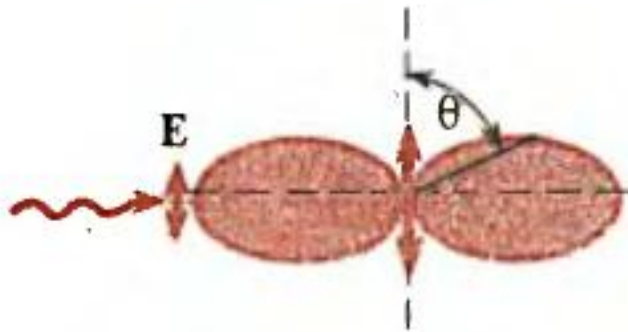


Рисунок 1 – Угловое распределение интенсивности рассеянного излучения от поляризованной волны

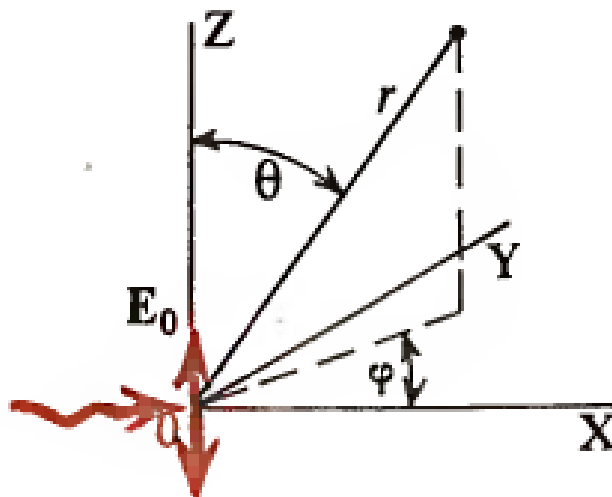


Рисунок 2 – Элементарный рассеиватель света

Рассмотрели теоретические аспекты преломления на капле воды.

Явление радуги заключается в дисперсии света за счет отражения солнечных лучей на каплях воды.

Нижняя радуга обусловлена процессами рассеяния с одним

отражением (рис. 3, а), а верхняя – с двумя отражениями. Фиолетовые лучи являются внешними, а красные – внутренними. Другие цвета размещаются между ними в соответствии со значениями показателей преломления.

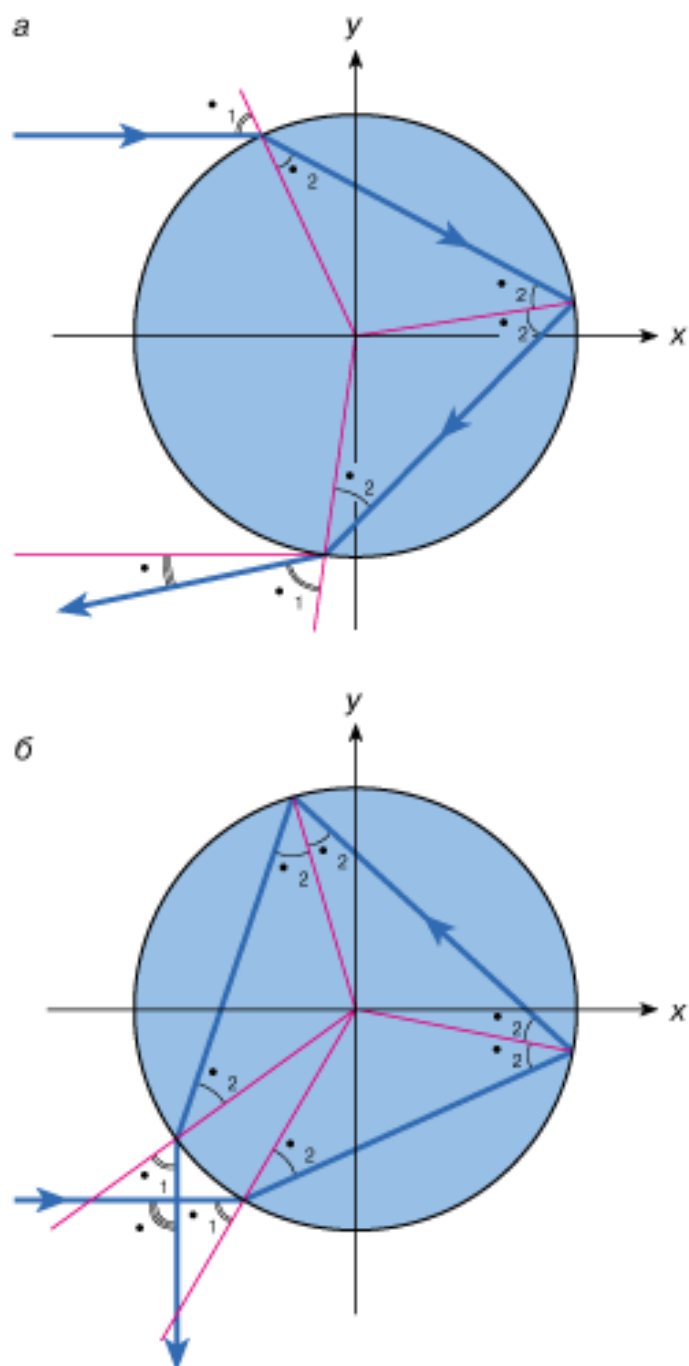


Рисунок 3 – Ход лучей в капле воды:
а - при одном отражении, б - при двух отражениях

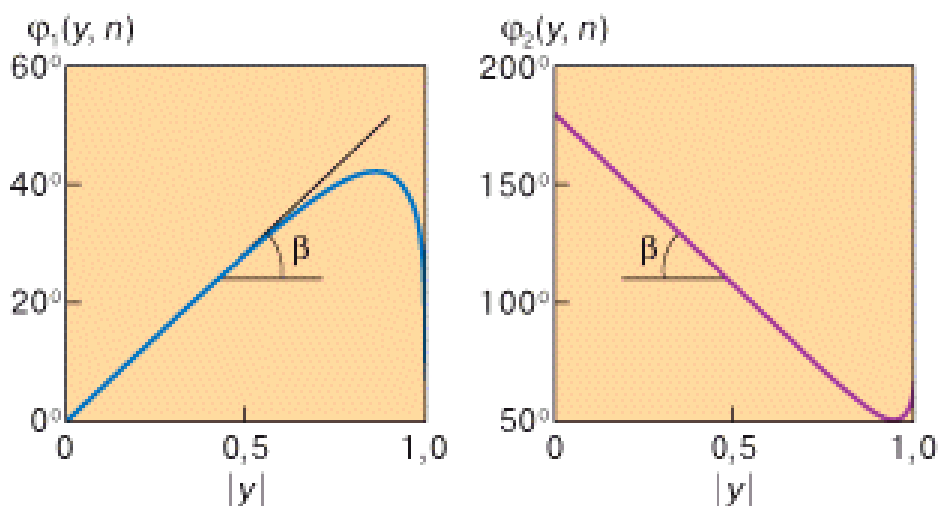


Рисунок 4 – Зависимость угла отражения луча, падающего на каплю, от прицельного параметра

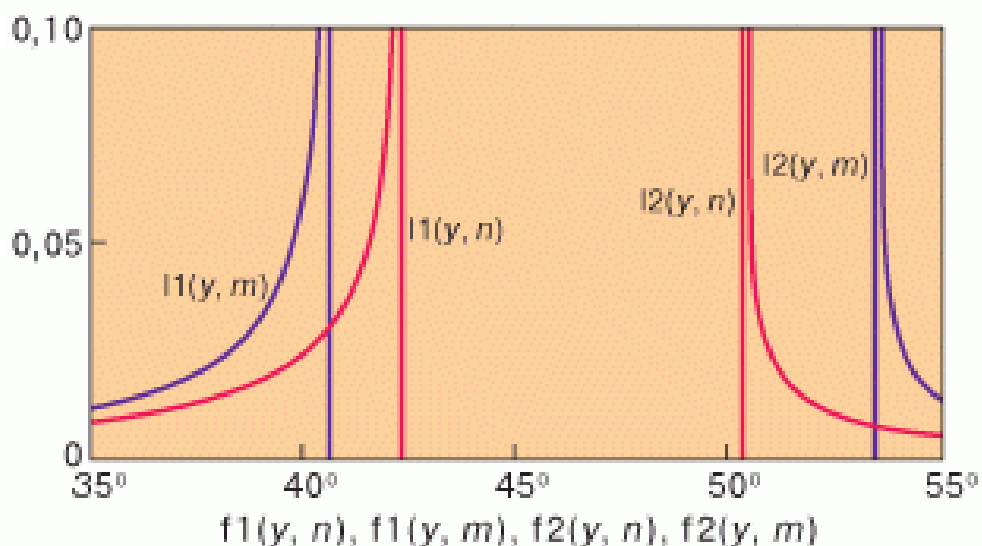


Рисунок 5 – Угловое распределение интенсивности отраженного каплей монохроматического света, полученное с помощью геометрической оптики

Видно, что яркие лучи, окрашенные в эти цвета, в рассматриваемом приближении хорошо разделены: в первом случае – на 1,72, во втором – на 3,11. Таким образом, эффект радуги обусловлен тем, что под определенными углами возникают максимумы интенсивности рассеянного света и для разных цветов положения этих максимумов не перекрываются [2].

Во второй главе решается задача разработки программ моделирования для описания трех случаев: моделирование рассеяния Ми на твердой частице, расчет хода луча света в неоднородной среде (преломление на капле воды) и когда луч попадает на воду, преломляется и попадает на твердую частицу, и наоборот, сначала на твердую частицу, потом на воду, т.е. объединили пер-

вые два случая, и нашли закономерности при рассмотрении изменения таких траекторий.

Общие выражения для безразмерных комплексных амплитуд функции рассеяния для составляющих, перпендикулярной и параллельной плоскости рассеяния, были получены Ми в виде бесконечных рядов:

$$S_{\perp}(m, x, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \cdot (a_n \pi_n + b_n \tau_n)$$

$$S_{\parallel}(m, x, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \cdot (b_n \pi_n + a_n \tau_n)$$

Из теории Ми следует, что угловое распределение света, рассеянного частицами дисперсной среды, однозначно связано с радиусом частицы R . Практически используются результаты теории Ми при некоторых допущениях, получая в зависимости от параметра x различные частные случаи. Поэтому в качестве математической модели рассеяния Ми примем случай аэрозольного рассеяния, индикатриса которого описывается формулой [18]:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{8\pi^4}{z^2 \lambda^4} R^6 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right) (1 + \cos^2(\theta))$$

Для математической модели (33) алгоритм вычислений представили в виде блок-схемы.

Полученные числовые значения результатов моделирования были перенесены в пакет Microsoft Excel и построена индикатриса, представленная на рисунке 6.

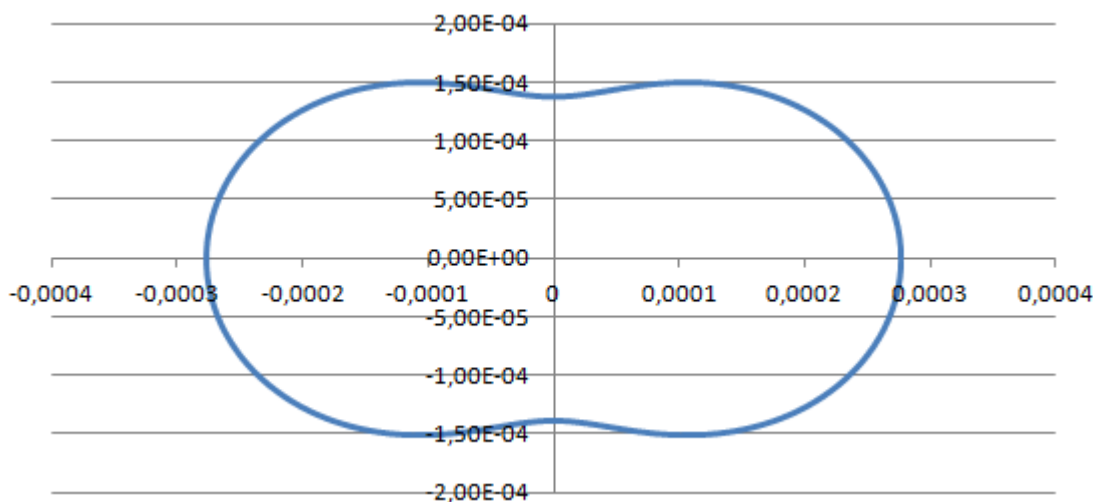


Рисунок 6 – Индикатриса аэрозольного рассеяния

Форма индикатрисы зависит от размера частиц, чем больше размер, тем более вытянутая форма.

В аэрозольных основаниях интенсивность проходящего излучения зависит от размера частиц, из которых состоит аэрозоль и убывает по закону Бугера. Когда можно ограничиться излучением электрического диполя или

первой парциальной волной, тогда общее решение Ми включает теорию Релея как частный случай, рассмотренный в данной работе.

Далее провели расчет хода луча света в капле воды. На шарообразную каплю воды падает параллельный световой пучок. Изучили зависимость угла отклонения световых лучей от прицельного параметра ρ . Объяснили возникновение радуги.

Результат моделирования представлен на рис. 7.

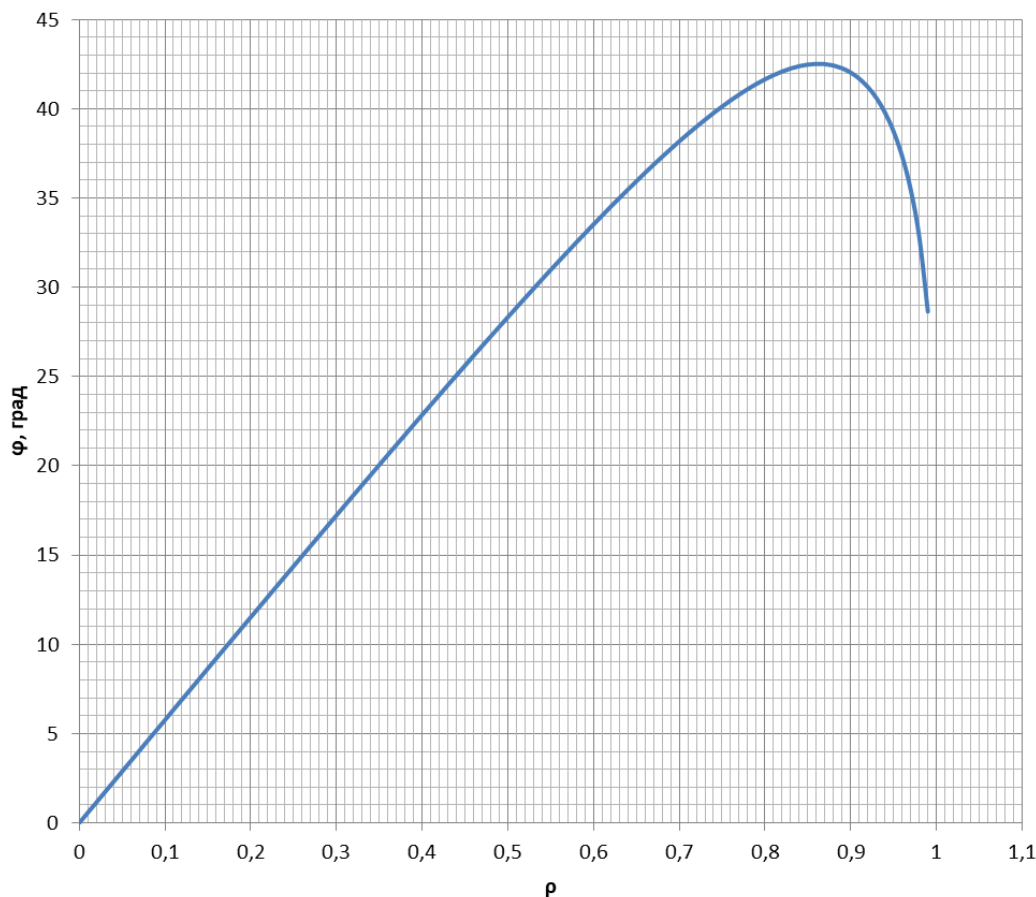


Рисунок 7 – Зависимость угла φ отражения луча, падающего на каплю, от прицельного параметра ρ

Из рис. 7 видно, что при некотором прицельном параметре ρ' угол φ достигает экстремального (максимального) значения $\approx 42^\circ$. Это означает, что именно под этим углом и будут выходить большинство преломленных лучей, которые окажутся параллельными друг другу. Представим множество капель воды, расположенных в вертикальной плоскости, на которые падает параллельный пучок монохроматического света с длиной волны λ . Если встать спиной к источнику света, то можно увидеть светлое кольцо с угловым размером $\approx 42^\circ$. Если источник испускает белый свет, в котором представлены все цвета от красного до фиолетового, то из-за дисперсии наблюдаются разноцветные кольца, образующие радугу [6].

Следующим этапом рассчитали максимальное значение угла φ_m при

различных показателях преломления, n , и построили зависимость $\varphi_m(n)$. Такое требование исходит из того, что, согласно известным данным [6] (рис. 7), для видимого света показатель преломления воды изменяется в интервале от 1,30 до 1,41.

На рисунке 8 представлен результат моделирования, который имеет экспоненциальный спад и идентичен кривой, приведенный в работе [6].

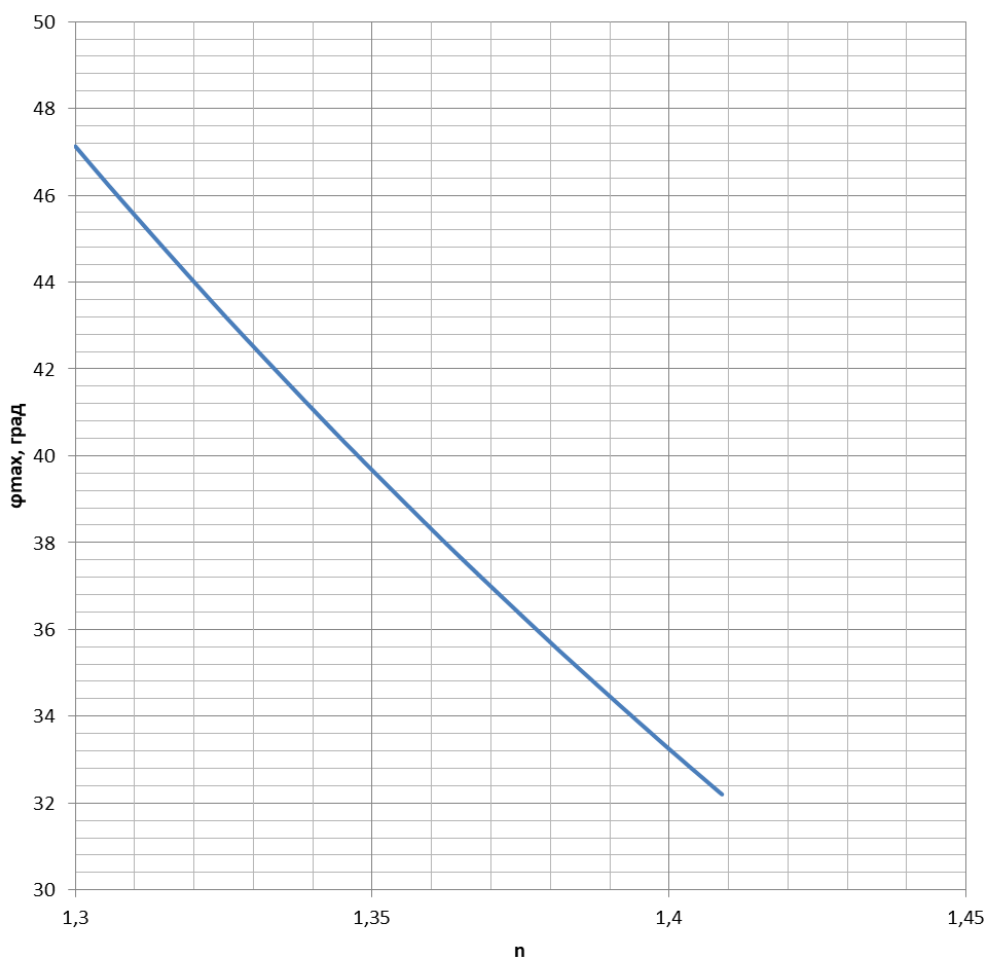


Рисунок 8 – График $\varphi_m(n)$

Из получившейся зависимости максимального угла отклонения светового луча от показателя преломления видно (рис. 8), что по мере увеличения показателя преломления максимальный угол отклонения уменьшается. Следовательно, «красным» лучам, для которых показатель преломления воды меньше, соответствует больший угол φ . Угловой размер красной части радуги будет больше, чем синей, красная часть радуги внешняя [5].

Далее рассмотрели случай, когда луч попадает на воду преломляется и попадает на твердую частицу, и наоборот, сначала на твердую частицу, потом на воду, т.е. объединили первые два случая, и нашли закономерности при рассмотрении изменения таких траекторий.

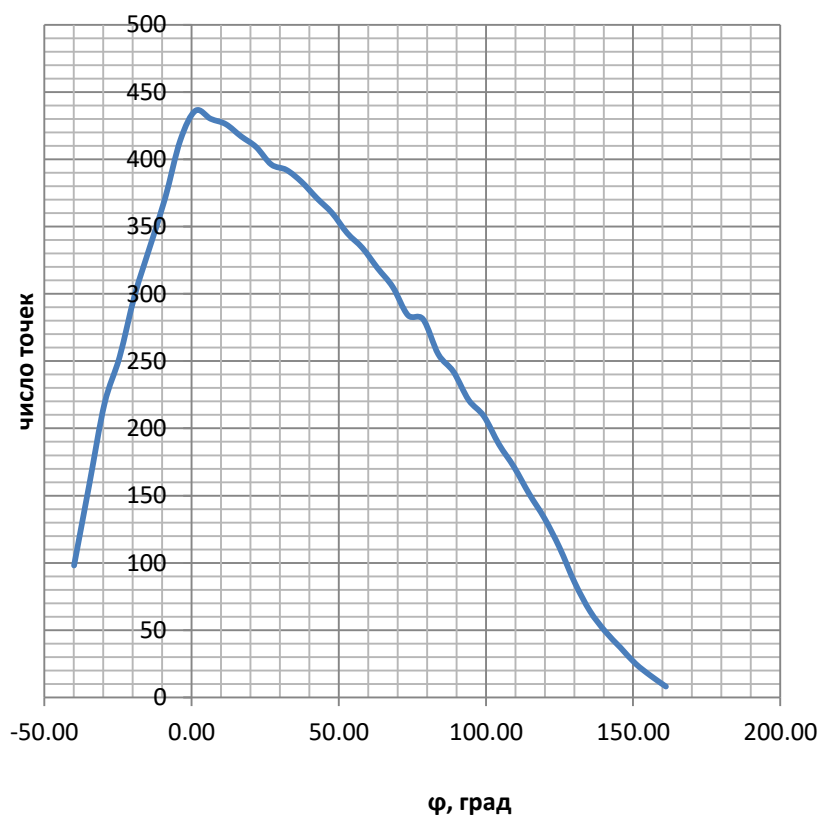


Рисунок 9 – Функция распределения угла отклонения луча $f(\varphi)$ при $\rho_1 > 0$ и $\rho_2 > 0$

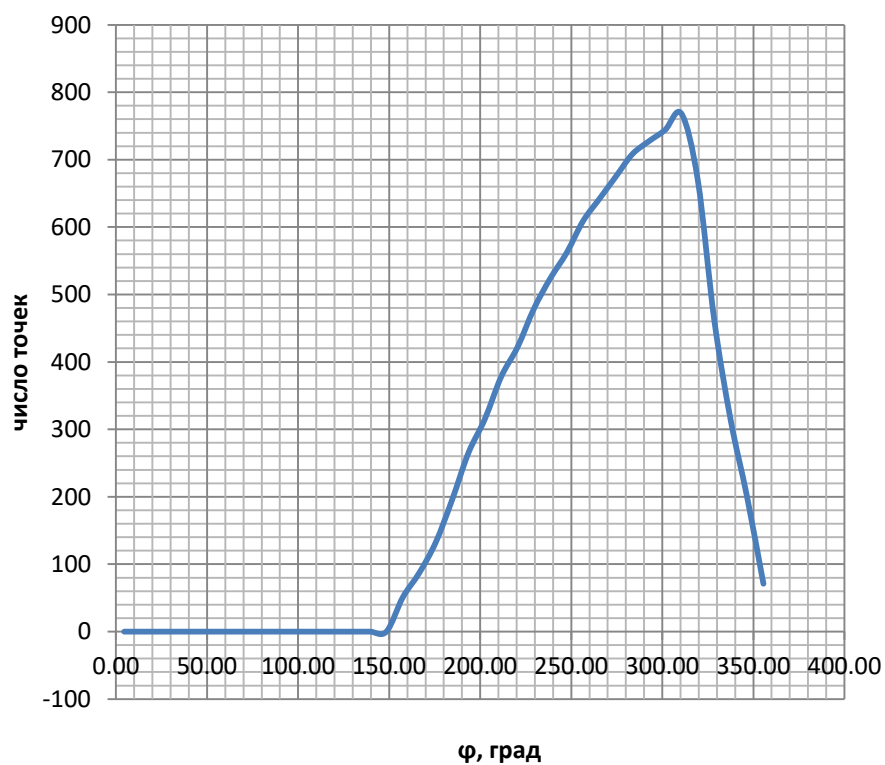


Рисунок 10 – Функция распределения угла отклонения луча $f(\varphi)$ при $\rho_1 > 0$ и $\rho_2 < 0$

Таким образом, наблюдается максимум рассеяния под углом примерно 310° ; будет наблюдаться достаточно широкое кольцо.

Оба вида рассеяния будут наблюдаться одновременно, поэтому точечный источник излучения будет виден как размытое пятно, окружённое размытым кольцом. Это явление действительно наблюдается в атмосфере и называется ореол, или гало. Из-за дисперсии, рассмотренной выше, края центрального пятна и ореол в случае белого света будут окрашены.

Рассмотрели теперь случай, когда луч сначала падает на отражающую частицу, а затем на сферическую каплю воды (рисунок 11).

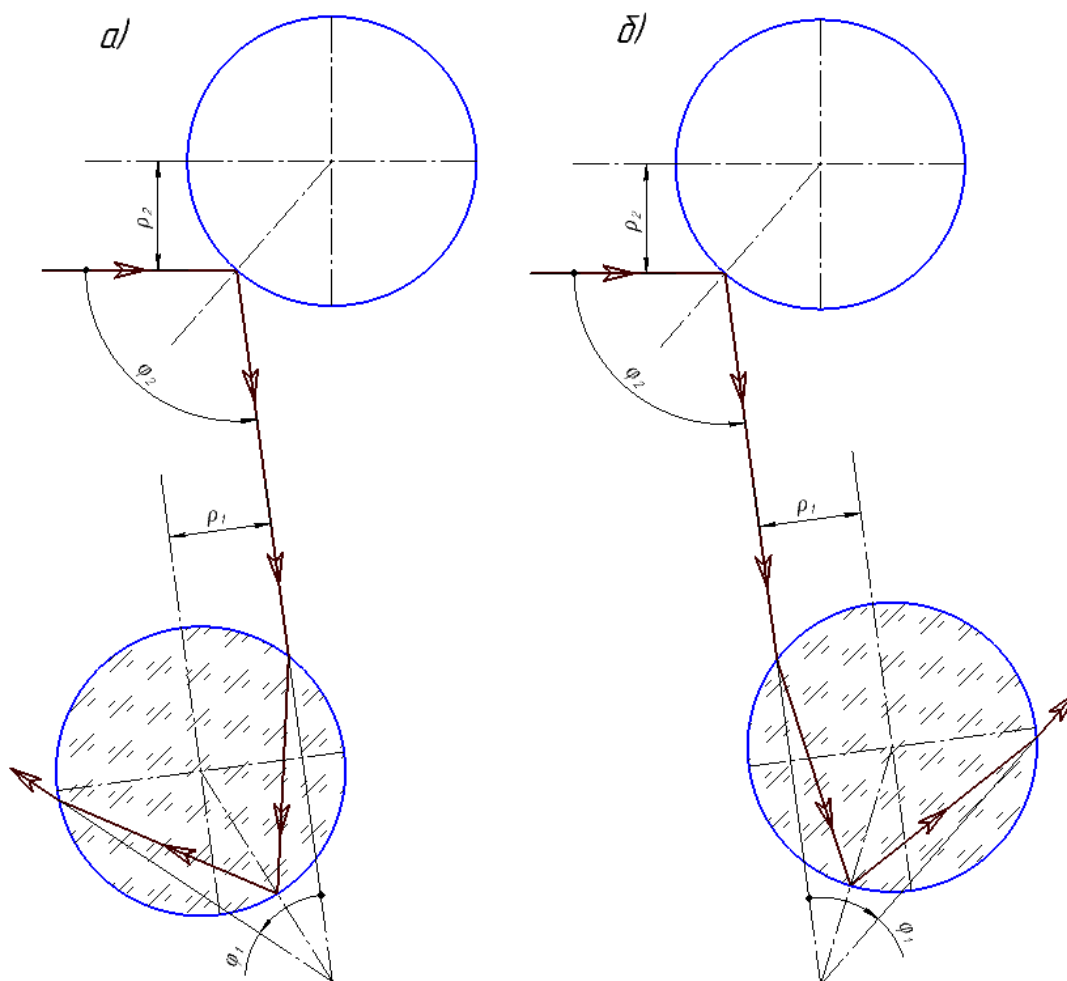


Рисунок 11 – Схема преломления отражённого луча

Угол поворота луча в радианах для случая на рисунке 24 а равен

$$\varphi = \pi - \varphi_2 + (\pi - \varphi_1) = 2\pi - \varphi_2 - \varphi_1$$

для случая на рисунке 24 б равен

$$\varphi = \pi - \varphi_2 - (\pi - \varphi_1) = \varphi_1 - \varphi_2$$

Изменение порядка прохождения луча от «преломление-отражение» к «отражение-преломление» не влияет на характер рассеяния – в любом случае точечный источник будет наблюдаться как размытое центральное пятно с ореолом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе рассмотрено три случая рассеяния света. Первый – это рассеяние Ми на твердой сферической частице. Получили индикатрису – зависимость интенсивности от угла рассеяния.

Второй случай – преломление пучка света на жидкой сферической частице. Получили два графика: зависимость угла φ от прицельного параметра ρ . То есть при некотором прицельном параметре ρ' угол φ достигает экстремального (максимального) значения $\approx 42^\circ$. Это означает, что именно под этим углом и будут выходить большинство преломленных лучей, которые окажутся параллельными друг другу. А также зависимость максимального значения угла φ_m светового луча от n . Из нее видно, что по мере увеличения показателя преломления максимальный угол отклонения уменьшается. «Красным» лучам, для которых n воды меньше, соответствует больший угол φ . Угловой размер красной части радуги будет больше, чем синей, красная часть радуги внешняя.

И третий случай, когда луч попадает на воду преломляется и попадает на твердую частицу, и наоборот, сначала на твердую частицу, потом на воду, т.е. объединили первые два случая, и нашли закономерности при рассмотрении изменения таких траекторий.

Различные схемы взаимного расположения преломляющего и отражающего шара по ходу луча дают результаты либо вместо светящейся точки будет наблюдаться круглое размытое пятно, либо наблюдается максимум рассеяния под углом примерно 310° ; будет наблюдаться широкое кольцо.

И рассмотрели этот же случай в обратном порядке, когда луч сначала падает на отражающую частицу, а затем на сферическую каплю воды. Изменение порядка прохождения луча от «преломление-отражение» к «отражение-преломление» не влияет на характер рассеяния – в любом случае точечный источник будет наблюдаться как размытое центральное пятно с ореолом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. [Web-сайт]. URL: <https://www.sites.google.com/site/kolloidnaahimia/opticeskie-svoystva-dispersnyh-sistem-a-znau-kak-organizovat-lazernoe-sou/rasseanie-mi> (дата обращения 15.03.2021) Рус. Яз.
2. Mie G. Beitrage zur Optik truer Medien speziell kolloidaler Goldloesungen (contributions to the optics of diffuse media, especially colloid metal solutions). Ann. Phys., 1908. 25:377 – 445.
3. Windows.h – Википедия [Web-сайт]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Windows.h> (дата обращения 04.06.2021) Рус. Яз
4. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 664 с.
5. Борн М, Вольф Э., изд 2-е. Перевод с английского. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1968 г., 720 с.

6. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами / Пер. с англ.: Под ред. В.В. Соболева. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. – 536 с.
7. Иванов А. П. Оптика рассеивающих сред–Минск: Наука и техника, 1969. –592 с.
8. Ландсберг Г. С. Оптика. Учеб. Пособие: Для вузов. – 6-у изд., – М.: Физматлит, 2003. – 848 с.
9. Лобанова М.А., Васильев А.В., Мельникова И.Н. Зависимость параметра индикатрисы рассеяния от характеристик среды. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2010. – Т. 7. - №4. – С. 147-157.
10. Сапронов М. В., Скорнякова Н. М.. Научная Визуализация. Электронный журнал открытого доступа. Компьютерная визуализация индикатрис рассеяния Рэлея в динамике [Электронный ресурс]. URL: <http://sv-journal.org/2017-3/04/> (дата обращения 09.04.2021) Рус. Яз.
11. Майер В. В. Свет в оптически неоднородной среде: учебные исследования. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 232 с.
12. Майер Р. В. Компьютерное моделирование физических явлений: Монография. – Глазов: ГГПИ, 2009. – 112 с.
13. Майер Р. В. Компьютерное моделирование: учеб.-метод. пособие для студентов педвузов. Глава 13 Оптические и квантовые явления [Электронный ресурс]. URL: http://maier-rv.glazov.net/KM/Mayer_Komp_mod13.pdf (дата обращения 02.04.2021) Рус. Яз.
14. Мак-Картни Э. Оптика атмосферы /Пер. с англ. – М.:Мир, 1979. –421с.
15. Матвеев А.Н. Оптика. – М.: Высшая школа, 1985. – 351с
16. Савельев, И. В. Курс общей физики: в 3 т. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика: учеб. пособие для вузов /И.В. Савельев. 3-е изд., испр. М., 1987. 496 с.
17. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том IV Оптика. – М.: Физматлит, 2005. – 791с.
18. Спектроскопия комбинационного рассеяния света [Электронный ресурс] Jeol Электронные микроскопы. – Режим доступа: URL: <http://emicroscope.ru/microscopes/microanaliz/raman.html> (дата обращения 26.03.2021) Рус. Яз.
19. Трифонов Е.Д. Еще раз о радуге // Соросовский образовательный журнал, 2000. – Т. 6. - №7. – С. 53-58.
20. Файлы заголовков стандартной библиотеки C++ / Microsoft [Web-сайт]. URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/cpp/standard-library/locale?view=msvc-160&viewFallbackFrom=vs-2017> (дата обращения 03.03.2021) Рус. Яз.