

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет
Кафедра общей физики

Торохов Тимофей Николаевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Влияние резонансов Ми на исследование микросфер с помощью
сканирующего проточного цитометра и возможности метода дискретных
диполей для их моделирование**

Практикум по физической оптике, 2 курс, группа №17321

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., Юркин М. А.
Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 2019 г.

Преподаватель практикума:

к.ф.-м.н., Гольшев А. А.
Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 2019 г.

Куратор практикума:

к.ф.-м.н., Маслов Н. А.
Итоговая оценка

« _____ » _____ 2019 г.

<i>Рекомендуется к публикации в сборнике избранных курсовых работ</i>	
<i>Научный руководитель</i>	<i>Юркин М. А.</i>
<i>Преподаватель практикума</i>	<i>Гольшев А. А.</i>
<i>Куратор практикума</i>	<i>Маслов Н. А.</i>

Влияние резонансов Ми на исследование микросфер с помощью сканирующего проточного цитометра и возможности метода дискретных диполей для их моделирование

Торохов Тимофей Николаевич

Физический факультет. Практикум по физической оптике. Курсовая работа.

Группа № 17321, 4 семестр, 2019 год.

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. **Юркин Максим Александрович**

Аннотация

В работе исследуются индикатрисы латексных частиц в двух диапазонах диаметров: 4 и 7 микрон. Для получения индикатрис используется уникальный инструмент – сканирующий проточный цитометр (СПЦ). Прибор позволяет исследовать рассеяние света от красного (660 нм) и синего (443 нм) лазеров на микросфере в широком диапазоне углов от 10° до 70° . Целью данной работы является изучение влияния резонансов Ми на полученные индикатрисы. На основе теории Ми было выдвинута гипотеза связи: резонансы Ми приводят к уменьшениям пиков индикатрис.

В работе представлены характерные индикатрисы и распределения латексных частиц по размерам и показателям преломления. Недостаточная точность измерения индикатрис не позволяет делать точные выводы, однако некоторые закономерности позволяют предположить верность гипотезы.

Ключевые слова: резонанс Ми, сканирующий проточный цитометр, метод дискретных диполей.

Оглавление

1. Введение.....	4
2. Экспериментальная установка.....	5
3. Методика обработки данных	6
4. Гипотеза.....	7
5. Результаты.....	9
6. Благодарности.....	12
7. Список литературы	12

1. Введение

Светорассеяние является важнейшим инструментом исследования во многих областях науки от биологии до астрономии. Изучение взаимодействия электромагнитной волны с микрочастицей – зависимости поглощения и отражения – позволяет исследовать внутреннюю структуру частицы и определять ее размеры с высокой точностью. Однако, обратные задачи светорассеяния не имеют некоего универсального решения для частицы произвольной формы, что приводит к необходимости численного моделирования. Что значительно усложняется, если форма сильно отклоняется от шарообразной [1].

Существуют несколько разных методов расчетов, но наибольшее распространением является метод дискретных диполей (МДД), в основе которого лежит принцип объемной дискретизации уравнений Максвелла [2].

В работе исследуются латексные микросферы с диаметрами 4 и 7 микрон с помощью сканирующего проточного цитометра. Данный инструмент позволяет измерять светорассеяние в виде индикатрис на единичной частице в диапазоне углов от 10° до 70° [3]. Индикатрисой рассеяния называется зависимость интенсивности рассеянного поля от угла рассеяния. В качестве источника электромагнитной волны используются красный (660 нм) и синий (443 нм) лазеры.

Рассеяние плоской электромагнитной волны на сфере произвольного размера описывается теорией Ми, разработанной в начале 20 века немецким физиком Густавом Ми. Для анализа данных строится теоретическая индикатриса с помощью теории Ми, основанная на оптической модели частицы (размер и показатель преломления). Путём сравнения теоретических и экспериментальных данных определяются размер и показатель преломления частиц.

Целью данной работы является получение индикатрис рассеяния и изучение влияния резонансов Ми на пики этих индикатрис. Значительные резонансы Ми были обнаружены только при освещении 7 микронных латексных микросфер

синим лазером. Также в результате исследования частиц получены и построены распределения по размерам и показателям преломления.

2. Экспериментальная установка

В работе используется сканирующий проточный цитометр (СПЦ). Инструмент позволяет исследовать светорассеяние в дистиллированной воде [4] на единичной частице в широком диапазоне углов.

Суспензия микросфер вносится в аппарат. Там под действием насосов совершается движение потока рабочей зоны, в которой благодаря особой форме входной системы происходит гидрофокусировка, которая обеспечивает центральное движение одиночной микрочастицы по капилляру. Триггерный лазер позволяет зафиксировать момент вхождения частицы в рабочую область (рис. 1.)

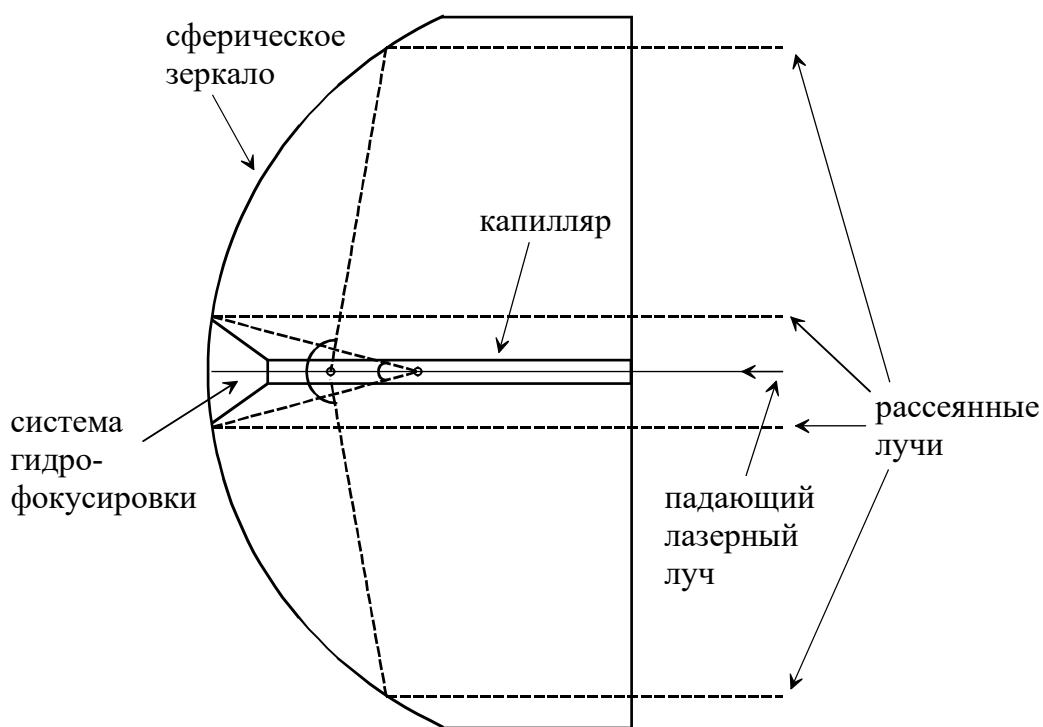


Рис. 1. Схема оптической кюветы СПЦ [...]. Одиночные частицы из пробы двигаются вдоль капилляра из гидрофокусирующей системы и постоянно освещаются лазером. Для примера показаны два положения частицы, соответствующие разным углам рассеяния.

Микросфера освещается двумя лазерами: синим (443 нм) и красным (660 нм), свет от которых рассеивается. За счет сферической аберрации лишь небольшая

часть света, рассеянная под определенным углом, отражается от сферического зеркала параллельно оси капилляра и попадает на другое плоское зеркало, расположенное под углом 45° . Лучи, отражаясь от второго зеркала, попадают на ФЭУ. Для каждой частицы измерено 512 значений интенсивности для 512 углов, которые первично представлены как моменты времени.

3. Методика обработки данных

Для каждой частицы измерено 512 значений интенсивности для 512 углов, которые первично представлены как моменты времени. Для получения настоящего распределения по углам необходимо знать скорость движения латексной микросферы и начальное расстояние до триггера. Эти две величины являются параметрами экспериментальной индикатрисы. Для постройки теоретической индикатрисы необходимы размер частицы и показатель преломления. Данные две величины представляют два параметра теоретической индикатрисы.

Для поиска наиболее подходящих параметров сравниваются две индикатрисы и методов наименьших квадратов ищется глобальный минимум расхождения. В пространстве параметров используется метод оптимизации Левенберга-Марквардта. Выбирается начальная точка: вполне известные средние диаметр, показатель преломления, скорость и расстояние до триггера. Рассчитывается расхождение между данными. Затем считается градиент в пространстве переменных и в этом пространстве совершается шаг против направления градиента. Расхождение считается заново и так далее.

Установка позволяет достаточно быстро набирать большой массив данных (~30 частиц в секунду). Сначала для настройки аппаратных функций использовался достаточно хорошо исследованные латексные частицы с диаметром около 4 мкм и показателем преломления 1.6.

Поскольку построено порядка 10000 индикатрис, то для анализа данных удобно использовать гистограммы распределения по некоторым выбранным углам.

Так как в данных по углам начала немного расходятся начала и плавают шаг между углами, для постройки этих данных использовалась простейшая линейная аппроксимация. Брались два соседние угла, между которыми лежит выбранный угол, и считалось значение в выбранном угле по формуле (1)

$$I(\theta) = I_n + \frac{I_{n+1} - I_n}{\theta_{n+1} - \theta_n} (\theta - \theta_n) \quad (1)$$

4. Гипотеза

Экстинкция — это явление ослабления пучка при его прохождении через вещество, в нашем случае через латексные частицы. В общем случае оно вызывается и поглощением, и рассеянием цвета. Используемые в работе латексные частицы только рассеивают свет и не поглощают. Вводятся два термина сечение экстинкции, равное отношению теряемой мощности к величине вектора Пойнтинга падающей волны, и эффективность экстинкции – отношение сечения экстинкции на геометрическое сечение.

В результате интерференции падающей волны с полем рассеяния частицы появляются максимумы в эффективности экстинкции, которые являются самым наглядным проявлением резонансов Ми. Расчеты по теории Ми (с помощью программы из [5] позволяют предположить связь между резонансными размерами для частиц и изменением поведения индикатрис.

Были выбраны три размера: $d_1 = 6.974$ мк, $d_2 = 6.9852$ мк, $d_3 = 7.000$ мк, размер d_2 был резонансным (Рис. 2.). Затем были построены индикатрисы для этих размеров, показатели преломления были выбраны одинаковыми и равными 1.58 для длины волны 443 нм. В качестве аналога интенсивности используется элемент матрицы Мюллера S_{11} .

Индикатрисы от d_1 и d_3 практически совпали, несмотря на большое различие в размерах и эффективности экстинкции. Индикатрисы от d_2 значительно отличается от других индикатрис. Данный факт был повторно проверен ещё для нескольких троек точек, включая другие резонансы. Что даёт основание предположить, что возможно заметить это при исследовании индикатрис от

других частиц. При 12.8° (первый пик) отклонение между пиками d_1 и d_3 составляет 3%, отклонение пика d_2 порядка 10%

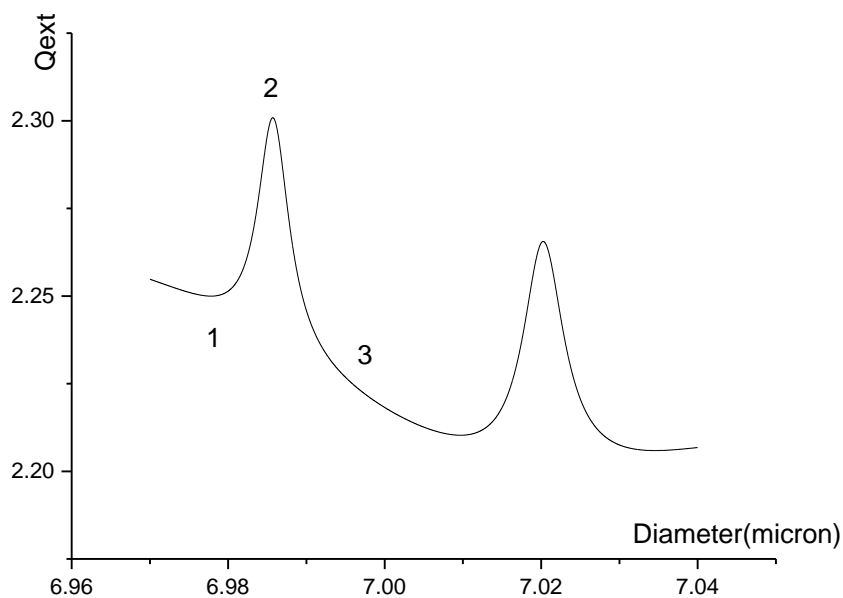


Рис. 2. Резонансы Ми в эффективности экстинкции для 7-микронных частиц, освещенных синим лазером (443 нм)

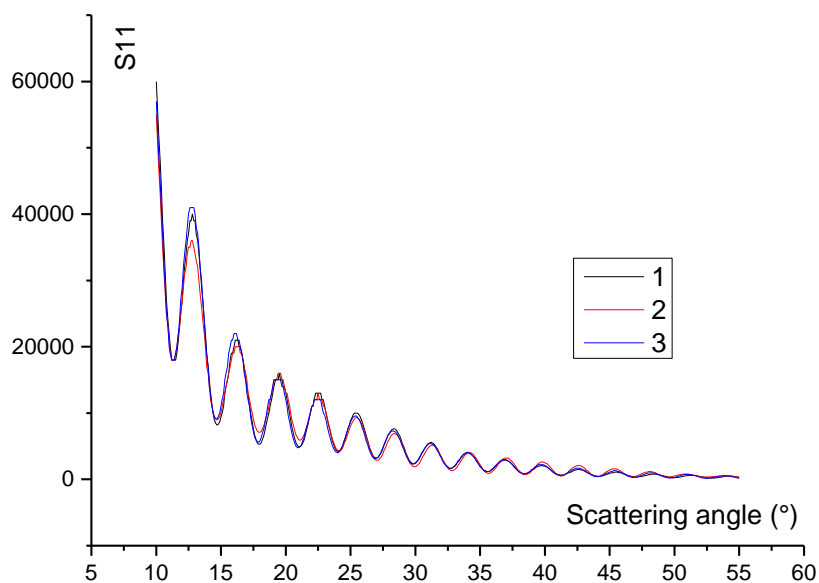


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния для 7-микронных частиц, освещенных синим лазером (443 нм)

5. Результаты

Далее представлены характерные экспериментальные и теоретические индикатрисы (Рис. 4. и 5.). В качестве интенсивности используется элемент матрицы Мюллера S_{11}

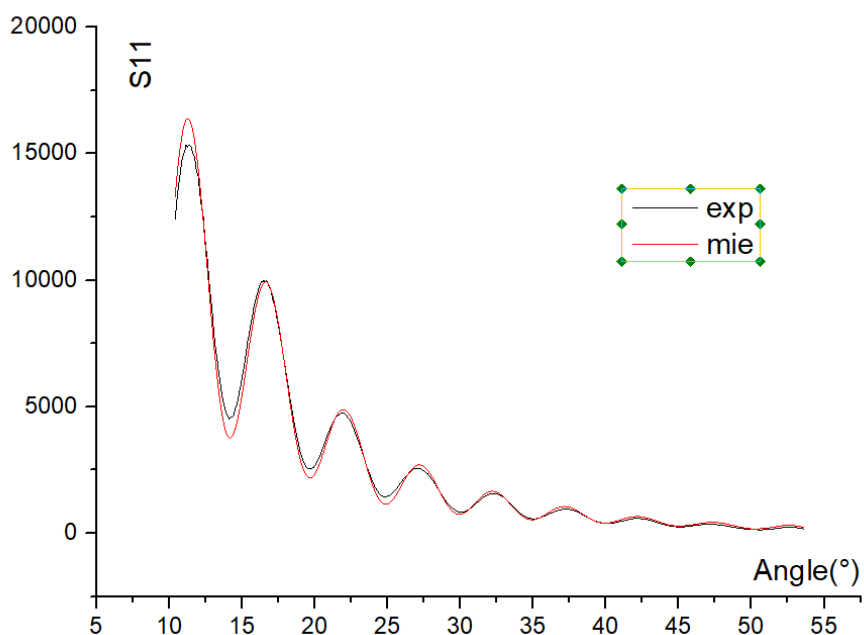


Рис. 4. Характерное сравнение теоретических и экспериментальных индикатрис для 4-микронных частиц, освещенных синим лазером (443 нм)

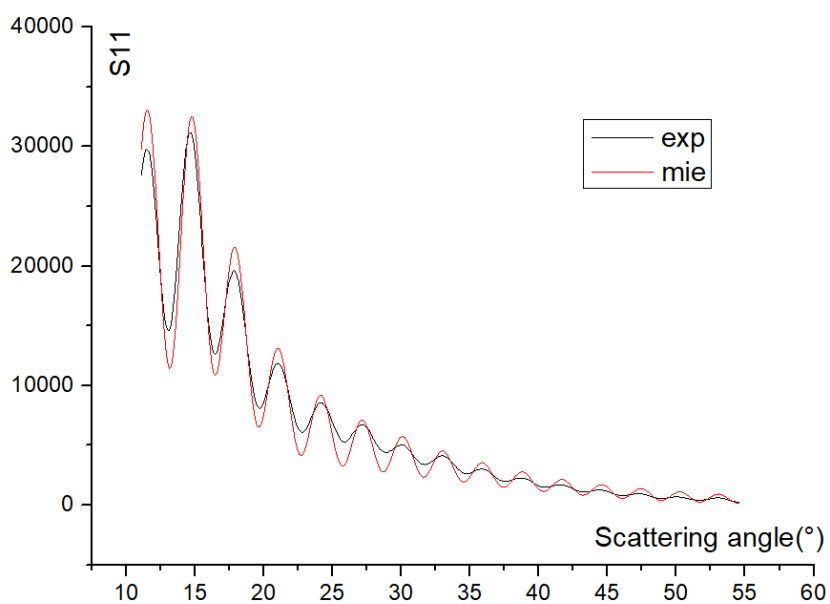


Рис. 5. Характерное сравнение теоретических и экспериментальных индикатрис для 7-микронных частиц, освещенных синим лазером (443 нм)

Из данных видно, что у теоретических и экспериментальных индикатрис хорошо совпадают положения максимумов и минимумов, однако для 7-микронных частиц теоретических пиков менее выражены. Более хорошее совпадения индикатрис для 4-микронных частиц данные вызвано меньшим размерным параметром x :

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda}, \quad (2)$$

где r – радиус частицы, λ – длина волны.

Также построены гистограммы распределения по размерам и показателям преломления (Рис. 6. и 7.), полученные подгонкой экспериментальных индикатрис по теории Ми, варьируя как характеристики частиц, так и их скорость в проточной системе (немного варьируется от частицы к частице).

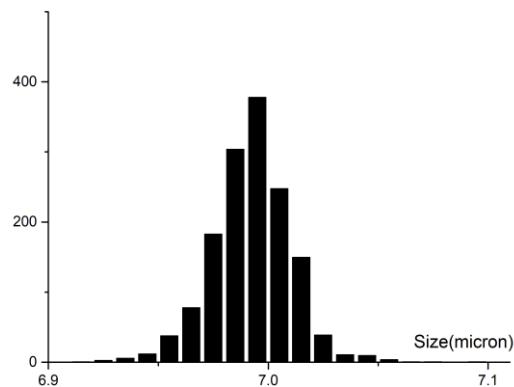


Рис. 6. Гистограмма распределения по размеру для 7-микронных частиц, освещенных синим лазером (443 нм)

Обычно распределение для 7-микронных частиц получается точнее для красного лазера (660 нм), однако в распределении для 4-микронных частиц произошел сплиттинг, то есть вместо одной вершины было две вершины.

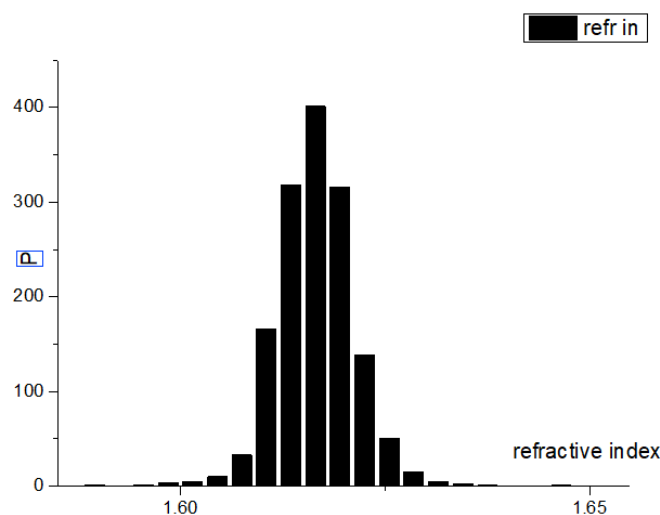


Рис. 7. Гистограмма распределения по показателю преломления для 7-микронных частиц, освещенных синим лазером (443 нм)

6. Заключение

В ходе эксперимента были определены индикатрисы рассеяния для 4 и 7 микронных латексных микросфер в диапазоне углов от 10° до 55° от электромагнитных волн длиной 443 нм и 660 нм на основе теории Ми. Получены гистограммы распределения по размерам и показателям преломления.

Особенностью индикатрис рассеяния от синего лазера (443 нм) для 7 микронных частиц является достаточно низкая точность результатов эксперимента и значительно более слабое согласование между теоретическими и практическими индикатрисами. Обнаружено, что именно в этом диапазоне размеров и длины падающего света находятся значительные резонансы Ми в эффективности экстинкции от размера при среднем показателе преломления.

Была выдвинута гипотеза связи между резонансами Ми пиками в индикатрисах рассеяния. Однако, низкая точность измерения индикатрис для 7 микронных частиц не позволила достоверно подтвердить или опровергнуть её. Возможно, что низкая точность может частично объясняться влиянием резонансов Ми. Для более точного исследования гипотезы необходимо более точные данные для рассеяния света.

7. Благодарности

Строкотову Д.И. и Коноховой А.И. за помощь в проведении экспериментов и переводе исходных экспериментальных данных в индикатрисы светорассеяния.

8. Список литературы

1. Romanov A.V., Maltsev V.P., Yurkin M.A. Estimating particle non-sphericity from the Fourier spectrum of its light-scattering pattern // PIERS 2018 Toyama Abstracts. Toyama, Japan: The Electromagnetics Academy, 2018. P. 1309.
2. Yurkin M.A., Hoekstra A.G. The discrete dipole approximation: an overview and recent developments // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2007. Vol. 106, № 1–3. P. 558–589.
3. Semyanov K.A., Maltsev V.P. Analysis of sub-micron spherical particles using scanning flow cytometry // Part. Part. Sys. Charact. 2000. Vol. 17, № 5–6. P. 225–229.
4. Daimon M., Masumura A. Measurement of the refractive index of distilled water from the near-infrared region to the ultraviolet region // Appl. Opt. 2007. Vol. 46, № 18. P. 3811–3820.
5. Bohren C.F., Huffman D.R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. New York: Wiley, 1983. 544 p.