

**Автономная некоммерческая общеобразовательная
организация «Физтех-лицей»
(АНОО «Физтех-лицей им. П. Л. Капицы)**

**XX научно-практическая
конференция**

«Старт в инновации»

**«Определение размеров наночастиц по их
броуновскому движению»**

Выполнили:

Колинько Кира, 10Б, Митричева Елизавета, 10Б, Горбункова Амелия, 10В

Руководители:

Степовой Константин Сергеевич,

Балясникова Ксения Сергеевна, студенты ФБМФ МФТИ 2 курса

Московская область, город Долгопрудный

2021г.

Оглавление

Введение	3
Теоретическая часть	4
Экспериментальная установка	7
Проведение опыта и обработка результатов	8
Вывод	9
Используемая литература	10

Введение

Цель исследования - определить или оценить размеры наночастиц в коллоидном растворе молока в подсоленной воде по их диффузному поведению.

Задачи:

1. Составить математическую модель диффузного движения частицы
2. Собрать из доступных, подручных материалов установку, позволяющую отследить диффузное движение частицы
3. Найти физические величины, описывающие движение, на опыте
4. Оценить радиус частиц, используя полученные величины

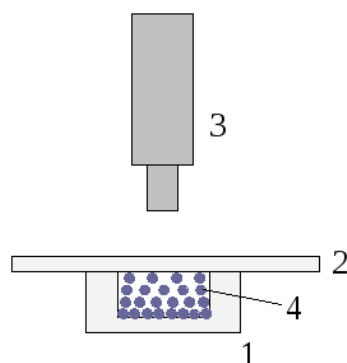
Актуальность этого проекта заключается не в научной новизне, а в простоте проведения эксперимента и доступности теоретических знаний для проведения подобного исследования. Нашим проектом мы хотим показать, что даже в “домашних” условиях, воспользовавшись подручными средствами, можно провести опыт по изучению размеров частиц.

Теоретическая часть

В теоретической части мы, изучив все необходимые опыты, пошагово выведем необходимые для проведения эксперимента расчетные формулы.

Для начала ознакомимся с опытом Перрена, целью которого служило экспериментальное нахождение числа Авогадро. Данный опыт заключался в том, что под микроскопом исследовалось броуновское движение частиц, распределенных по высоте подобно молекулам газа в поле тяготения.

Схема установки:



- 1 – предметное стекло,
- 2 – покровное стекло,
- 3 – микроскоп,
- 4 – эмульсия с шариками диаметром доли микрон (частицы гуммигута – млечного сока деревьев).

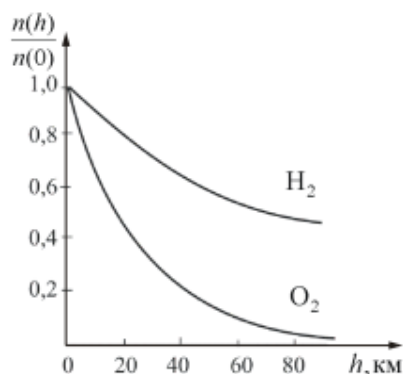
Опыт Перрена проводился следующим образом: микроскоп наводился на верхний слой эмульсии, делалась мгновенная фотография и подсчитывалось число броуновских частиц на ней. Затем тубус микроскопа опускали на 0,01мм и проделывали все то же самое. Именно так выяснилось, что на дне сосуда броуновских частиц больше, чем на поверхности, и распределение броуновских частиц по высоте соответствует распределению Больцмана. При помощи уравнения Больцмана и измеренных концентраций веществ удалось получить число Авогадро. В нашем опыте мы также будем использовать микроскоп, а объектом наблюдений будут частицы в жидкости.

Уточним, что распределение Больцмана определяет распределение частиц в силовом поле в условиях теплового равновесия. Вспомним, что силовое поле – это векторное поле в пространстве, в каждой точке которого, на пробную частицу действует определенная по величине и направлению сила.

Закон распределения частиц по потенциальным энергиям (распределение Больцмана):

$$n = n_0 e^{\frac{U}{kT}}$$

Где n_0 — это число молекул в единице объема там, где U (потенциальная энергия) равна нулю



На графике показана зависимость концентрации газов от высоты. Число более тяжелых молекул с высотой убывает быстрее, чем легких.

Больцман доказал, что соотношение справедливо не только в потенциальном поле сил гравитации, но и в любом потенциальном поле, для совокупности любых одинаковых частиц, находящихся в состоянии хаотического теплового движения.

Диффузия – это процесс перемешивания компонентов смесей, возникающий при наличии перепада концентраций. В нашем опыте мы использовали молоко. Массы молекул молока гораздо тяжелее масс молекул воды. Поэтому мы будем рассматривать «диффузию тяжелой примеси».

Основные уравнения диффузии были написаны немецким физиком А. Е. Фиком в 1855г. Исходя из экспериментальных данных, был составлен закон Фика. Этот закон утверждает, что плотность потока вещества при диффузии пропорциональна градиенту концентрации диффундирующего компонента. В одномерном случае он записывается так: $j = -D \frac{dn}{dx}$, где n – концентрация, j – плотность потока, D – коэффициент пропорциональности, который является коэффициентом диффузии. Перенос вещества происходит из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией. Об этом нам говорит знак «минус» в выражении перед градиентом концентрации. Коэффициент диффузии $D = \frac{\lambda^2}{2\tau}$, где λ - пробег частицы. Мы понимаем, что в реальных системах пробег будет совершенно случайной величиной. Поэтому будем представлять λ^2 как средний квадрат смещения $\langle \lambda^2 \rangle$.

Согласно закону Фика хаотичное движение частиц в процессе диффузии приводит к возникновению макроскопических направленных потоков вещества. Между потоками частиц происходит обмен импульсом при столкновениях, то есть происходит трение потоков друг о друга. Отсюда можно сделать вывод, что коэффициент диффузии может быть как-то связан с силами сопротивления среды, которые возникают при направленном движении частиц в ней.

Итак, рассмотрим отдельную частицу, которая движется в вязкой среде с постоянной скоростью V . Пусть коэффициентом пропорциональности между скоростью частицы и силой сопротивления среды будет являться коэффициент b . Он же и будет называться подвижностью частицы.

$$\text{Тогда: } F_{\text{тр}} = -\frac{V}{b}.$$

Перенос примеси в среде происходит под действием поля внешних потенциальных сил $F_{\text{п}}$. Внешняя среда имеет постоянную температуру T . Нам необходимо определить как связан процесс переноса примеси и диффузии. Внешняя сила будет равно силе сопротивления среды: $F_{\text{тр}} = F_{\text{п}}$.

$$\text{Средняя скорость частиц примеси равна } V = bF_{\text{п}}.$$

Тогда добавка к плотности потока будет $nbF_{\text{п}}$, где n – концентрация примеси. Получаем суммарную плотность потока примеси, учитывая диффузию: $j = -D \frac{dn}{dx} + nbF_{\text{п}}$.

В закрытом сосуде поток обращается в ноль в состоянии равновесия. А также в равновесии концентрации примеси происходит согласно распределению Больцмана. Теперь найдем связь между коэффициентом подвижности частицы и коэффициентом диффузии примеси: $n = \text{const} \times e^{-U/kBT}$, где U – потенциальная энергия в поле сил $F_{\text{п}}$, где $F_{\text{п}} = -\frac{dU}{dx}$. Продифференцируем по x : $\frac{dn}{dx} = -\frac{n}{kBT} \times \frac{dU}{dx} = \frac{nF_{\text{п}}}{kBT}$. Подставив $nF_{\text{п}} = \frac{dnkBT}{dx}$ и $j = 0$, мы получим искомую нами связь:

$$D = kBTb.$$

Это соотношение называется соотношением Эйнштейна.

Найдем закон смещения случайно движущейся частицы за время t . Пусть за время t она совершит $N = \frac{t}{\tau}$ скачков. Средний квадрат отклонения составляет $\langle \Delta x^2 \rangle = \frac{\langle \lambda^2 \rangle t}{\tau}$. Подставим

сюда коэффициент диффузии. Получим $\langle \Delta x^2 \rangle = 2Dt$. Это выражение называется уравнением Эйнштейна – Смолуховского.

Рассмотрим диффузию в пространстве как независимое наложение одномерных случайных блужданий на каждой оси. Для плоскости получим: $\langle \Delta r^2 \rangle = \langle \Delta x_2 \rangle + \langle \Delta y_2 \rangle = 2 \langle \Delta x_2 \rangle$. Мы можем представить это так: $\langle \Delta r^2 \rangle = 4Dt$.

А в трехмерном пространстве уравнение выглядит так: $\langle \Delta r^2 \rangle = 3 \langle \Delta x^2 \rangle$ и $\langle \Delta r^2 \rangle = 6Dt \rightarrow \langle \Delta r^2 \rangle = 6kTbt$. Заметим, что полученные нами формулы справедливы при временах, значительно больших, чем время торможения частицы в среде.

У нас есть 2 формулы: $\frac{\langle \Delta x^2 \rangle}{2t} = D$ и $\frac{\langle \lambda^2 \rangle}{2\tau} = D$. Заметим, что обозначения одинаковы, но смысл у этих формул различен. При помощи второй формулы мы можем узнать коэффициент диффузии при известной длине свободного пробега и времени, за которое частица его совершает. Первая формула – это связь среднеквадратичного смещения частицы в результате большего числа свободных пробегов и времени, за которое они совершаются частицей. Объединим эти выражения: $D = \frac{\langle \Delta x^2 \rangle}{2st}$. Формула учитывает S-мерный случай. У нас двумерный случай.

Получим итоговую формулу нашей работы:
$$R = \frac{4kT\Delta t}{6\pi\eta\langle \Delta r^2 \rangle}$$

Отметим еще несколько вещей, необходимых для нашего эксперимента. Введем несколько определений.

Дисперсная система – это образования из двух или более тел, которые не смешиваются друг с другом и не взаимодействуют между собой химически.

Коллоидные системы – это дисперсные системы, промежуточные между растворами и взвесьями, в которых частицы, имеющие размер до 1 до 1000 нм, распределены в дисперсионной среде, отличающейся от первой по составу или агрегатному состоянию. Для нас наиболее важными являются основные свойства коллоидных систем:

1. Коллоидные частицы пропускают свет.
2. В прозрачных коллоидных системах можно наблюдать рассеивание луча света, т.е. эффект Тиндаля (наша система вода + несколько капель молока прозрачна)
3. Броуновское движение поддерживает во взвешенном состоянии дисперсные частицы, а значит они не выпадают в осадок.

Это позволяет нам воспользоваться интересным оптическим эффектом. Эффект Тиндаля – это рассеивание света при прохождении светового луча через оптически неоднородную среду. Это явление поможет нам лучше рассмотреть частицы, ведь сделает их визуально заметнее за счет окружностей, образовавшихся от лазерного луча вокруг частиц.

Экспериментальная установка

Для проведения опыта нам понадобились:

1. Микроскоп (с увеличением до 40х)
2. Вода
3. Молоко
4. Соль
5. Кювета
6. Лазерная указка
7. Камера
8. Компьютер
9. Контрольный препарат

Для нахождения коэффициента диффузии мы исследовали движение частиц молока в воде. Выбор такого вещества, как молоко, обусловлен тем, что его частицы достаточно крупные и массивные вследствие коагуляции (свертывания) молока в подсоленной воде, также молоко дешевый и доступный продукт.

Для отслеживания треков частиц воспользуемся школьным микроскопом с увеличением до 40х, камерой и приложением Tracker, которое позволяет отслеживать выбранный объект на видео и записывает его положение на экране.

Воду немного подсолим (для лучшего сворачивания молока) и нальем в кювету. Затем капнем туда молока.

Мы обнаружили, что школьный микроскоп не позволяет рассматривать столь малые частицы. Решим эту проблему следующим образом: возьмем лазерную указку и расположим ее под прямым углом к грани кюветы. Лазерную указку установим так, чтобы луч проходил примерно посередине высоты кюветы, потому что частицы молока со временем распределятся по вертикали по Больцману: у дна их будет слишком много, а у поверхности - недостаточно. Так как раствор коллоидный, луч лазера при прохождении сквозь него рассеивается (это явление называют "конус Тиндаля"), а в микроскопе мы видим множество групп концентрических окружностей, которые образуются вокруг каждой отдельной частицы. Радиусы окружностей света гораздо больше, чем радиусы частиц, следовательно, их видно в микроскоп.

Мы будем наблюдать за движением центра обнаруженной окружности.

Заметим, что глубина слоя, попадающего в фокус микроскопа сопоставима с радиусом исследуемой частицы. Если на видео частица вдруг пропадает с экрана, это значит, что она двинулась выше или ниже фокусного слоя. В процессе обработки видео необходимо следить за движением тех частиц, которые не пропадают и не появляются "из ниоткуда" тогда движение можно считать двумерным, как указано выше в теоретической части. Перед началом эксперимента необходимо отключить внешние источники света и отрегулировать камеру так, чтобы картинка в окуляре была наиболее четкой.

Проведение опыта и обработка результатов

Соберем установку и начнем опыт. Для начала, капнем молоко в воду и подождем некоторое время. Это необходимо для того, чтобы частицы распределились в поле тяжести и потеряли кинетическую энергию от падения из пипетки.

Измерим температуру в помещении, запишем данные.

Затем, снимаем видео с движением частиц, выбираем в программе те из них, которые движутся наиболее долго в фокусном слое (у нас таких частиц три). Убеждаемся в том, что температура в комнате неизменна. Программа отследит движение этих частиц и выдаст три таблицы: в каком пикселе экрана на каком кадре находился центр той или иной окружности. По теореме Пифагора для каждого кадра вычисляем уже не координату, а изменение расстояния от начального положения для каждого кадра.

Далее смотрим частоту кадров в секунду в ТХ камеры, и заменяем колонки с номерами кадров на реальное время. Затем строим графики по этим таблицам (ось абсцисс - время, ординат - расстояние от начального положения до нынешнего) и по ним находим скорость частиц, причем получаем столько значений, сколько кадров мы сняли, и ищем среднее из них.

Обратим внимание на то, что программа измеряет расстояния в видео в пикселях, следовательно, размерность полученной скорости - пиксели в секунду. Для решения этой проблемы введем новый параметр - метр квадратный на пиксель, который позволит нам перевести скорость в привычные величины. Для нахождения этого параметра был взят препарат крыла мухи. Препарат поместим на то же расстояние от линз микроскопа, на котором был луч лазера. Фотографируем крыло, затем вынимаем его из-под микроскопа и измеряем реальный размер штангенциркулем. Определим количество пикселей на фотографии с помощью программы Photoshop, и делением величин получим требуемый коэффициент. Подставив все найденные величины и теоретические данные в формулу $R =$

$\frac{4kT\Delta t}{6\pi\eta\langle\Delta r^2\rangle}$, получим оценочный радиус частицы молока для каждого из трех измерений, и находим среднее из трех - примерно 300 ангстрем. Самым ошибочным измерением в нашем опыте является измерение крыла мухи штангенциркулем, поэтому, взяв половину цены деления штангенциркуля как ошибку измерений, а также ошибку термометра (незначительный вклад, но всё же), по стандартной формуле вычисления погрешностей $\Delta x = \sqrt{\Delta x_{сл}^2 + \Delta x_{пр}^2}$,

где $\Delta x_{сл} = t \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}}$ вычислим погрешность найденной величины - примерно 40 ангстрем.

Таким образом, мы получили (оценили) радиус частицы:

$$R = (300 \pm 40) \text{ ангстрем}$$

Вывод

В ходе работы удалось определить размер частиц молока в коллоидном растворе по их диффузному поведению. Полученное значение входит в границы возможных полученных значений для данных частиц (размер варьируется в зависимости от свёртывания). Опыт был проведён в домашних условиях, с использованием только подручных средств. Данный эксперимент демонстрирует, что возможно повторить сложные измерения (с меньшей точностью, но с попаданием в порядок величины и сохранением физического смысла) с использованием знаний только из курса общей физики. Измерение размеров различных частиц — важный элемент многих исследований в области фармакологии, биохимии и других наук. Данный опыт может быть использован в качестве лабораторной работы по общей физике, так как дает качественное представление диффузии микропримесей и не требует серьезных затрат.

Используемая литература

1. П. В. Попов Учебно-методическое пособие по курсу Общая физика «Диффузия» - Москва, МФТИ, 2016
2. Морозова Э.Я. Коллоидная химия. Конспект лекций. — Витебск: ВГМУ, 2003
3. Алешкевич В.А. Курс общей физики. Молекулярная физика. — Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2016
4. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей – Москва, 1961
5. 5. Зубарев Д. Н. Броуновское движение // Физическая энциклопедия — Москва, Советская энциклопедия, 1988
6. Тамм И. Е. Яков Ильич Френкель // Успехи физических наук. — 1962.
7. Кикоин А. К., Кикоин И. К. Молекулярная физика - Москва, Наука, 1976.
8. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей – Москва, Наука, 1975