

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации

Кафедра физики с курсом
высшей математики

Л. А. Колубаева, А. Г. Левашкин

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИИ

Методическое пособие к лабораторной работе

для студентов врачебных факультетов

Томск
Издательство СибГМУ
2017

УДК 535.42(075.8)

ББК 22.343.4я73

К 617

Авторы:

Колубаева Л. А., Левашкин А. Г.

К 617 Колубаева Л. А. Изучение явления дифракции: методическое пособие к лабораторной работе / Л. А. Колубаева, А. Г. Левушкин. – Томск: Изд-во СибГМУ, 2017. – 10 с.

В данной лабораторной работе изучается явление дифракции световой волны от круглого непрозрачного препятствия (диска). Описывается процедура измерения диаметра микроскопических частиц круглой формы (эритроцитов) с помощью использования дифракционного метода и лазерной техники.

Методическое пособие предназначено для студентов врачебных факультетов.

УДК 535.42(075.8)

ББК 22.343.4Я73

© Колубаева Л. А., Левашкин А. Г., 2017

© Издательство СибГМУ, 2017

Лабораторная работа

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение дифракции от непрозрачных мелких частиц диаметром несколько микрон (например, эритроцитов), а также измерение их диаметров дифракционным методом. Определение размеров таких мелких частиц является сложной задачей вследствие невозможности применения обычных средств (микроскопа, проектора, контактных приборов), дающих погрешности, соизмеримые с размерами частиц.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: лазер, оптическая скамья, дифракционная решетка, стекла с мазками крови, экран со шкалой.

Дифракцией света называется явление отклонения света от прямолинейного распространения, когда свет, огибая препятствие, проникает в область геометрической тени.

Качественно поведение света за препятствием может быть объяснено с помощью принципа Гюйгенса, который устанавливает способ построения фронта волны в момент времени $t + \Delta t$ по известному положению фронта волны в момент времени t . Согласно принципу Гюйгенса каждую точку на первичном волновом фронте следует рассматривать как источник вторичной сферической волны. Поэтому изобразив ряд сферических волн, исходящих из первичного волнового фронта, а затем построив их огибающую, мы получим форму и положение всей волны в более поздний момент времени (рис. 1А, среда предполагается неоднородной – скорость волны в нижней части рисунка больше, чем в верхней). На рис. 1 Б приведен пример распространения плоской волны через узкую щель.

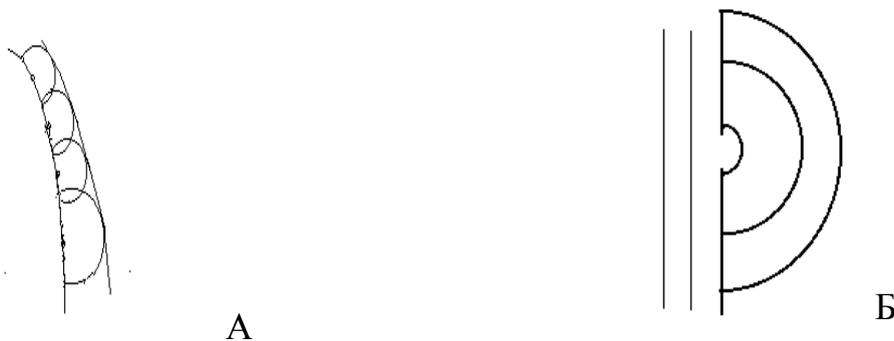


Рис. 1. Примеры применения принципа Гюйгенса

Однако принцип Гюйгенса не дает сведений об амплитуде, а следовательно и об интенсивности волн, распространяющихся в различных

направлениях. Френель дополнил принцип Гюйгенса представлением об интерференции вторичных волн. Учет амплитуд и фаз вторичных волн позволяет найти амплитуду результирующей волны в любой точке пространства, Развитый таким способом принцип Гюйгенса получил название принципа Гюйгенса – Френеля. Согласно принципу Гюйгенса-Френеля:

- а) каждый элемент волновой поверхности служит источником вторичных сферических волн;
- б) амплитуда вторичной волны пропорциональна площади элемента S ;
- в) амплитуда вторичной волны убывает с расстоянием r от источника по закону $1/r$;
- г) все вторичные источники являются когерентными.

При вычислении амплитуды колебания, порождаемого световой волной, распространяющейся от реального источника, можно заменить этот источник совокупностью вторичных источников, расположенных непрерывно вдоль волновой поверхности. Определение результирующей амплитуды колебания от всех вторичных источников может быть осуществлено аналитически, методом графического сложения амплитуд или методом зон Френеля.

Различают два случая дифракции света: дифракцию Френеля - дифракцию в сходящихся лучах, и дифракцию Фраунгофера - дифракцию в параллельных лучах. В первом случае на препятствие падает сферическая или плоская волна, а дифракционная картина наблюдается на экране, находящемся позади препятствия на конечном расстоянии от него. Во втором случае на препятствие падает плоская волна, а дифракционная картина наблюдается на экране, который находится в фокальной плоскости собирающей линзы, установленной на пути прошедшего через препятствие света. Дифракцию Фраунгофера можно наблюдать при использовании в качестве источника света лазера, т.к. излучаемые лазером когерентные световые пучки являются коллимированными.

ДИФРАКЦИЯ ФРЕНЕЛЯ ОТ КРУГЛОГО ДИСКА

Рассмотрим сферическую волну, распространяющуюся в изотропной однородной среде от точечного источника S . Поместим между источником S и точкой наблюдения P непрозрачный круглый диск радиуса r (рис. 2).

Согласно принципу Гюйгенса-Френеля каждая точка волновой поверхности является источником элементарных вторичных волн, распространяющихся во всех направлениях, причем эти вторичные волны интерферируют между собой. Рассмотрим волны, идущие от открытой части волновой поверхности, собирающиеся в точке P экрана. Они являются когерентными и интерферируют. Интенсивность света в точке наблюдения P ,

как результат интерференции, можно легко определить с помощью метода зон Френеля, который заключается в следующем.

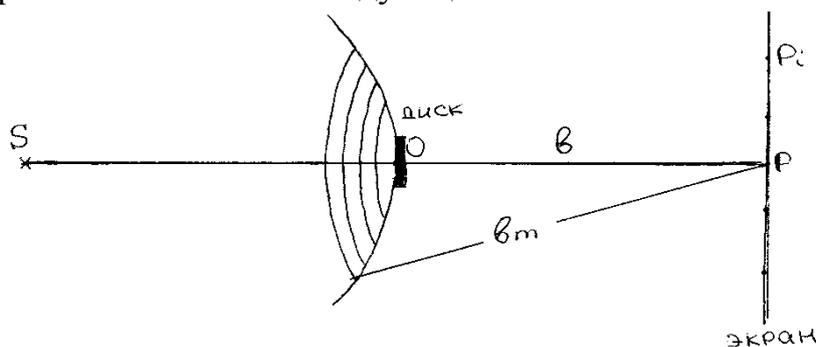


Рис. 2. Дифракция от круглого препятствия – диска

Фронт распространяющейся волны разбивается на области, называемые зонами, так, чтобы разность хода вторичных волн от соответствующих точек двух соседних зон до рассматриваемой точки P была равна половине длины волны. Таким образом, в точку наблюдения волны от соседних зон приходят с противоположными фазами, и при наложении они будут ослаблять друг друга. Задача расчета интерференции вторичных волн фактически сводится к определению количества зон Френеля.

В соответствии с определением зоны Френеля следует, что расстояния b_m от внешнего края m -й зоны до точки P равно

$$b_m = b + m \cdot \lambda / 2 ,$$

где b – расстояние от вершины волновой поверхности O до точки P, m – целое число, соответствующее номеру зоны Френеля.

Волны, приходящие в точку P из двух соседних зон, находятся в противофазе, т.е. их разность фаз в точке наблюдения равна π . Площади зон Френеля примерно одинаковы. Расстояние b_m от зоны до точки P медленно растет с ростом номера зоны m , поэтому (вторичная волна – сферическая) амплитуда A_m колебания, возбуждаемого m -ой зоной в точке P, монотонно убывает.

$$A_1 > A_2 > A_3 > \dots > A_{m-1} > A_m > A_{m+1} > \dots$$

Т. к. фазы колебаний, возбуждаемые соседними зонами, отличаются на π , то амплитуда результирующего колебания в точке P может быть представлена

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots$$

Если диск закроет m первых зон Френеля, амплитуда в точке P будет равна

$$A = A_{m+1} - A_{m+2} + A_{m+3} - A_{m+4} + \dots$$

Запишем это выражение в следующем виде:

$$A = A_{m+1} / 2 + (A_{m+1} / 2 - A_{m+2} + A_{m+3} / 2) + \dots$$

Вследствие монотонного убывания A_m , приближенно можно считать, что

$$A_{m+1} / 2 + A_{m+3} / 2 = A_{m+2} ,$$

тогда все выражения в скобках равны 0, следовательно

$$A = A_{m+1} / 2 .$$

Эта формула дает результирующую амплитуду волн, достигших экрана в точке Р. Так как интенсивность I пропорциональна амплитуде в квадрате, то получается результат парадоксальный с точки зрения геометрической оптики. За непрозрачным диском, на его оси, всегда будет светлое пятно. Его называют пятном Пуассона. Это светлое пятно имеет вид круглого пятнышка, если рассматривалась дифракция на круглом диске и прямой полоски, если рассматривалась дифракция на прямоугольной пластинке. Это значит, что световые волны огибают круглый диск по всему его краю и вследствие симметрии встречаются на оси диска. Это дает возможность получить изображение какого-либо предмета без оптической линзы с помощью круга или шара.

Рассмотрим результат действия открытой волновой поверхности для точки P_1 , смещенной относительно точки Р в любом радиальном направлении (рис. 3). В этом случае диск будет перекрывать часть $(m+1)$ -й зоны Френеля, одновременно откроется часть m -ой зоны. Это вызовет уменьшение интенсивности. При некотором положении точки P_1 интенсивность достигнет минимума. Если сместить точку наблюдения P_1 от центра еще дальше, диск перекроет дополнительно часть $(m+2)$ -й зоны, одновременно откроется часть $(m-1)$ -й зоны. В результате интенсивность возрастет и в точке P_1 достигнет максимума.

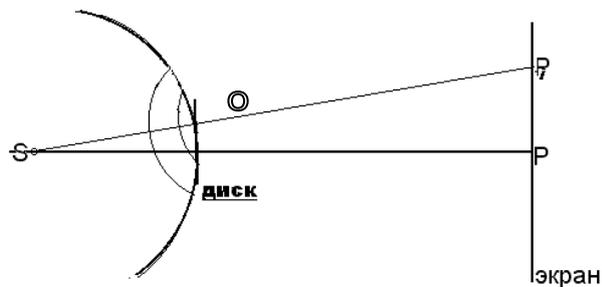


Рис. 3. Дифракция от круглого диска при смещении точки наблюдения в радиальном направлении

Дифракционная картина, которая будет наблюдаться на экране, помещенном за диском, может быть изображена зависимостью интенсивности света I от расстояния R , отсчитываемого от точки Р (рис. 4). Если обозначим интенсивность центрального максимума I_0 , то интенсивность последующих максимумов определяется следующими соотношениями $I_1 = 0,045I_0$; $I_2 = 0,016I_0$; $I_3 = 0,008I_0$ и т.д.

Таким образом, центральный максимум значительно превосходит по интенсивности остальные максимумы; в нем сосредотачивается основная доля светового потока открытой волновой поверхности.

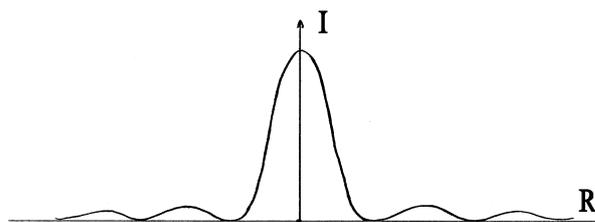


Рис. 4. Распределение интенсивности света в дифракционной картине от круглого диска

Можно найти и аналитическое выражение зависимости I от R . Это достаточно сложное выражение, анализ которого дает возможность найти условия минимума и максимума для данной дифракционной картины. В случае непрозрачного круглого диска дифракционная картина имеет вид чередующихся светлых и темных концентрических колец. Если круглый диск имеет радиус r , то положение минимумов интенсивности определяется следующими выражениями:

$$r \sin \alpha_1 = 0,61 \lambda ; \quad r \sin \alpha_3 = 1,11 \lambda ; \quad r \sin \alpha_5 = 1,62 \lambda \quad (1)$$

максимумов -

$$r \sin \alpha_2 = 0,81 \lambda ; \quad r \sin \alpha_4 = 1,33 \lambda ; \quad r \sin \alpha_6 = 1,86 \lambda \quad (2).$$

Углы α_i — это углы наблюдения соответствующих минимумов и максимумов. Роль круглого диска могут выполнить эритроциты крови. Но один-единственный диск столь малого размера (6–8 мкм) даст крайне слабую дифракционную картину. Картина будет проектироваться на светлый фон, создаваемый прямым недифрагированным пучком света. Только тысячи таких частичек способны дать картину, хорошо видимую глазом. Если взять мазок крови, то мы получим слой беспорядочно расположенных непрозрачных дисков. При одновременном присутствии в сечении светового пучка многих частиц, угловое распределение дифрагированного света, создаваемого каждой частицей в отдельности, не нарушается, если нет интерференционного эффекта между световыми пучками, дифрагировавшими на разных частицах. Если в плоскости поперечного сечения светового пучка частицы расположены хаотично, то разность фаз между дифрагированными пучками от разных частиц будет меняться также хаотично и интерференция будет отсутствовать. Тогда интенсивность дифрагированного в данном направлении света равна сумме интенсивностей световых пучков, дифрагированных на разных частицах. Поэтому дифракционная картина, создаваемая одним эритроцитом будет усилена в N раз (N — число частиц).

Наблюдая дифракционную картину от N эритроцитов на экране и используя соотношения (1) и (2), можно определить размеры частиц, на которых наблюдалась дифракция.

Практическая часть

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ МЕЛКИХ ЧАСТИЦ

Для определения размеров мелких частиц составим следующую схему эксперимента (рис. 5.)

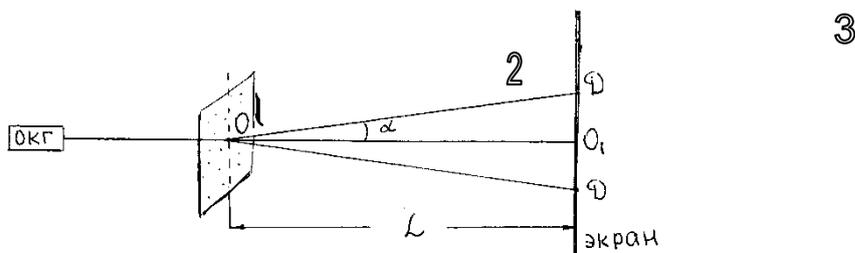


Рис. 5. Схема установки для измерения диаметра эритроцитов

На рисунке цифрами обозначены: 1 – лазер непрерывного излучения; 2 – стеклянная пластинка с мазком крови, которую вставляют в рейтер, легко перемещающийся вдоль оптической схемы; 3 – непрозрачный экран с миллиметровой шкалой.

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Включить лазер с помощью тумблера «Сеть» на панели блока питания лазера.
2. Установить экран так, чтобы пучок света лазера был направлен точно в центр экрана.
3. На расстоянии примерно 0,5 м от экрана установить рейтер со стеклянной пластинкой. На экране должна быть видна дифракционная картина, представляющая собой яркое пятно, окруженное concentрическими темными и светлыми окружностями. Дифракционная картина должна быть симметрична относительно перекрестия шкалы экрана.
4. Измерить диаметры темных и светлых дифракционных колец D. Измерения производятся по серединам колец.
5. Измерить расстояние L от плоскости стеклянной пластинки с мазком крови до экрана по шкале оптической скамьи.
6. Результаты измерения занести в таблицу 1.
7. Поскольку диаметры дифракционных колец, наблюдаемых на экране много меньше расстояния L, можно считать что

$$\sin \alpha_n = \operatorname{tg} \alpha_n = \frac{D_n}{2L} \quad (3)$$

и, используя условия минимумов и максимумов получим соотношения для нахождения радиуса эритроцитов

$$D_1 / 2L = 0.61 \lambda / r; \quad D_2 / 2L = 0.82 \lambda / r; \quad D_3 = 1.11 \lambda / r \quad (4)$$

D_1, D_3, D_5, \dots – диаметры темных дифракционных колец;

$D_0, D_2, D_4, D_6, \dots$ – диаметры светлых дифракционных колец.

Длина волны излучения лазера $\lambda = 633$ нм. Найдём по формулам (4) радиус эритроцитов, а затем средний радиус.

Номер кольца	интенсивность	D	L	Радиус частиц (м)	$r_{\text{ср.}}$ (м)
0.	Светлое				
1.	Темное				
2.	Светлое				
3.	Темное				
4.	Светлое				
5.	Темное				

8. Переместить пластинку с мазком крови вдоль оптической скамьи.

9. Повторить пункты 4–7 при трех положениях пластинки с мазком крови относительно экрана.

10. Сравнить полученные результаты и сделать вывод зависит ли диаметр дифракционных колец от размеров частиц, от расстояния от частиц до экрана.

11. Оценить погрешность измерения радиусов эритроцитов для любого опыта.

12. Записать конечный ответ в форме $r \pm \Delta r_{(м)}$ при $\alpha = 0.95$

13. Найти относительную погрешность.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление дифракции света?

2. Как зависит характер дифракционной картины от числа частиц, падающих в пучок лучей?

3. С помощью метода зон Френеля оцените результат действия неограниченной сферической волны на экране в точке Р.

4. Почему размеры очень маленьких частиц порядка нескольких (мк) нельзя измерять микроскопом?

5. Изобразите зоны Френеля на плоском фронте волны.

6. Можно ли изменяя расстояние L, получить в центре дифракционной картины темное пятно?

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Колубаева Л. А., Левашкин А. Г.

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИИ

Методическое пособие к лабораторной работе

Издательство СибГМУ
634050, г. Томск, пр. Ленина, 107
тел. 8(3822) 51–41–53
E-mail: otd.redaktor@ssmu.ru

Издано в электронном виде