



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

## **ПРАКТИКУМ**

Дифракция фотонов на щели и  
неопределенность Гейзенберга  
по дисциплине

**«ФИЗИКА»**

Авторы  
Жданова Т.П.,  
Кудря А.П.,  
Лемешко Г.Ф.,  
Минасян Л.А.

Ростов-на-Дону, 2025

## Аннотация

В практикуме кратко изложены теоретические вопросы, необходимые для успешного выполнения лабораторной работы, рабочее задание и контрольные вопросы. Предназначен для организации самостоятельной работы студентов всех специальностей, изучающих физику.

## Авторы

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»  
Жданова Т.П.

ведущий инженер кафедры «Физика»  
Кудря А.П.

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»  
Лемешко Г.Ф.

д.ф.н., профессор кафедры «Физика»  
Минасян Л.А.



## Оглавление

<b>Краткая теория.....</b>	<b>4</b>
<b>Экспериментальная часть .....</b>	<b>10</b>
<b>Контрольные вопросы.....</b>	<b>12</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>13</b>

## Лабораторная работа № 036

### Дифракция фотонов на щели и неопределенность Гейзенберга

**Цель работы:** 1) использовать дифракцию Фраунгофера для определения ширины одиночной щели; 2) проверить соотношение неопределенностей на примере дифракции фотонов на одномерной щели.

**Оборудование:** измерительная установка

#### Краткая теория

Дифракция – огибание волной препятствий, соизмеримых с длиной волны. Если источник и точка наблюдения находятся от препятствия настолько далеко, что лучи можно считать параллельными, то это дифракция в параллельных лучах или дифракция Фраунгфера.

В ньютоновской механике состояние частицы, как известно, характеризуется двумя величинами: радиус-вектором и импульсом. При этом считается само собою разумеющимся, что и пространственные координаты, т.е. компоненты радиус-вектора и составляющие импульса по осям одновременно имеют вполне определенные значения.

В микромире же, где резко проявляется корпускулярно – волновой дуализм, положение в корне меняется. Французский учёный Луи де Бройль выдвинул гипотезу об универсальности корпускулярно-волнового дуализма. Он утверждал, что не только фотоны, но и другие частицы материи наряду с корпускулярными обладают волновыми свойствами. О координате имеет смысл

говорить только по отношению к частице. Бессмысленно говорить о координате волны: волна в лучшем случае занимает конечную область пространства (стоячая волна). Монохроматическая же волна безгранична в пространстве и во времени. В то же время определенному значению импульса частицы соответствует, согласно идее де Бройля, определенная волна для которой  $\lambda = h / p$ .

Распространяется эта волна в направлении импульса частицы. В отношении пространственной локализации волна и частица – несовместимые, противоречивые объекты. Тем не менее, квантовая механика исходит из того, что любая микрочастица представляет собой единство противоположностей – волны и частицы.

Чтобы попытаться устранить противоречие волна – частица, один из создателей квантовой механики немецкий физик Вернер Гейзенберг в 1927 г. выдвинул интересную идею, введя так называемый принцип неопределенности (или соотношение неопределенностей). Неопределенность Гейзенберга заключается в том, что две канонически сопряженные величины, такие как координата и импульс частицы, не могут быть точно определены одновременно. Между неопределенностями координаты  $\Delta x$  и проекции импульса  $\Delta p_x$  существует следующее соотношение:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar / 2, \quad (1)$$

где  $\hbar = h / 2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - постоянная Планка.

Соотношение (1) означает, что чем точнее фиксирована координата, т. е. чем меньше  $\Delta x$ , тем больше  $\Delta p_x$ , т. е. тем

больше неопределенность импульса, и наоборот, чем точнее определен импульс, тем больше неопределенность координаты. Такие пары физических величин, для которых неопределенность в значении одной зависит от точности измерения другой, называются *сопряженными величинами*.

Для проекций радиус-вектора и импульса на другие оси координат имеют место аналогичные соотношения:

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar / 2, \quad \Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar / 2. \quad (2)$$

Кроме того, существует соотношение, которое устанавливает предел точности измерения энергии за данный промежуток времени. Оно имеет вид:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar / 2, \quad (3)$$

где  $\Delta t$  – длительность измерения энергии;  $\Delta E$  – ее неопределенность.

Убедиться в справедливости принципа неопределенностей (1) можно на примере дифракции фотонов на щели. Когда лазерный луч с длиной волны  $\lambda$  проходит через одиночную щель шириной  $b$ , на экране появляется дифракционная картина (рис. 1).

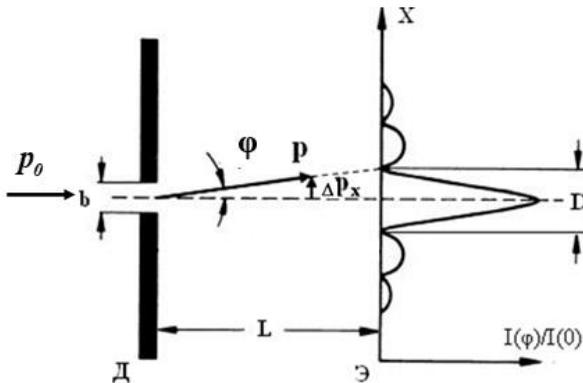


Рис.1. Дифракция Фраунгофера на щели

Условия главных минимумов при дифракции на щели определяется формулой

$$b \cdot \sin \varphi = m\lambda. \quad (4)$$

Так как угол  $\varphi$  мал, то

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{D}{2L}. \quad (5)$$

Зная угловую координату (5) главного минимума и длину волны лазерного излучения ( $\lambda=632,8\text{нм}$ ), можно определить из уравнения (4) ширину щели

$$b = 2L\lambda \frac{m}{D}. \quad (6)$$

В дифракционном поле от одиночной щели наибольшая интенсивность света приходится на максимум нулевого порядка. Если принять интенсивность нулевого порядка за единицу, то относительная интенсивность света в других максимумах составит соотношение:

$$I_0 : I_1 : I_2 : I_3 : \dots = 1 : 0,045 : 0,016 : 0,008 : \dots \quad (7)$$

Теперь представим монохроматический свет как поток фотонов. Энергию фотонов можно выразить через характеристики волны и частицы:

$$E = hc / \lambda; \quad E = m \cdot c^2. \quad (8)$$

Из (8) следует, что масса фотонов и их импульс связаны с длиной волны соотношениями:

$$m = \frac{h}{c\lambda}; \quad p = mc = \frac{h}{\lambda}. \quad (9)$$

**Так как интенсивность света равна энергии, падающей по нормали на единичную** площадку в единицу времени  $I = E / (St)$ , а энергию  $N$  фотонов можно представить через их массу  $E = mc^2 N$ , то интенсивность света равна:

$$I = \frac{mc^2}{St} N = \frac{hc}{\lambda \cdot St} N. \quad (10)$$

Из (10) следует, что интенсивность монохроматического света пропорциональна количеству фотонов, падающих на единицу площади в единицу времени  $I \sim N$ , следовательно, и распределение фотонов по максимумам подчиняется закономерности (7). Если принять число фотонов, приходящихся на максимум нулевого порядка за единицу, то относительное число фотонов в других максимумах составит соотношение:

$$N_0 : N_1 : N_2 : N_3 : \dots = 1 : 0,045 : 0,016 : 0,008 : \dots \quad (11)$$

Более 95% фотонов приходится на максимум нулевого порядка, а это означает, что для простоты проверки принципа неопределенности можно ограничить максимумом нулевого порядка. Если принцип неопределенности окажется справедливым, то с учетом максимумов более высоких порядков будет тем более справедливым.

Пусть падающие по нормали на диафрагму  $D$  фотоны обладают импульсом  $P_0$  (рис.2). До диафрагмы

неопределенность координаты  $\Delta x = \infty$ , а проекция импульса на координату  $Ox$  (неопределенность импульса) равна нулю  $\Delta p_x = 0$ . Проходя диафрагму фотон имеет импульс  $p$ , а его проекция на  $Ox$  (неопределенность импульса) равна

$$\Delta p_x = p \cdot \sin \varphi = p \frac{D}{2L}, \quad (12)$$

где  $\varphi$  – направление на первый главный минимум.

Неопределенность координаты равна ширине

$$\Delta x = b. \quad (13)$$

С учетом уравнений (12) – (13) получаем,

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = b \cdot p \frac{D}{2L}. \quad (14)$$

Соотношение неопределенностей будем считать справедливым, если результаты вычислений произведений неопределенности импульса  $\Delta p_x$  на ширину щели в каждом опыте будут превышать или равны  $\hbar / 2$ , т.е.  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar / 2$ . Следует иметь ввиду, что если соотношение неопределенностей (14) выполняется для минимума 1-го порядка, то тем более будет выполняться для минимумов более высоких порядков.

### Экспериментальная часть



Рис.2. Измерительная установка

1-оптическая скамья; 2-гелий-неоновый лазер; 3-щелевая диафрагма на рейтере; 4-экран

**Внимание! *Остерегайтесь прямого попадания лазерного луча в глаза!***

1. Измерительная установка представлена на рис.1.
2. Перед выходным окном лазера установить щелевую диафрагму
3. Установить экран с миллиметровой шкалой 4 на расстоянии  $L = 80-50$  см от лазера.
4. Включить гелий-неоновый лазер 2.
5. Меняя ширину щели с помощью винта, получить на экране четкое изображение дифракционной картины.
6. Измерить расстояние  $D$  между минимумами  $-1$ -го и  $+1$  го порядка ( $k = 1$ ). Занести в таблицу.

7. Измерить расстояние  $D$  для минимумов 2-го и 3-го порядков, т.е. ( $k = 2$ ) и ( $k = 3$ ). Занести в таблицу.

8. Вычислить ширину щели  $b_1, b_2, b_3$  для  $k = 1, 2, 3$  по формуле

$$b = 2L\lambda \frac{k}{D}.$$

9. Вычислить среднее значение ширины щели  $\langle b \rangle$ .

10. Вычислить абсолютные погрешности ширины щелей  $\Delta b_1, \Delta b_2, \Delta b_3$  и их среднее значение.

11. Вычислить относительную погрешность по формуле  $\delta b = \frac{\langle \Delta b \rangle}{\langle b \rangle}$

12. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

13. Вычислить массу и импульс фотонов лазерного излучения по

формулам:  $m = \frac{h}{c\lambda}$ ;  $p = \frac{h}{\lambda}$ , где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с,

$\lambda = 632,8$  нм. Занести в таблицу.

14. Вычислить неопределенность проекции импульса на ось  $X$  –

$\Delta p_x$  по формуле  $\Delta p_x = p \frac{D}{2L}$  для каждого  $D$ .

15. Вычислить соотношение неопределенностей по формуле

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = b \cdot p \frac{D}{2L} \text{ для каждого } D.$$

16. Убедиться, что  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar / 2$

$$(\hbar = h / 2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}).$$

17. По проделанной работе сделать вывод.

Таблица

$L =$		$\lambda = 632,8 \text{ нм}$			$m =$		$p =$
№	$D$ $10^{-3}$	$k$	$b$	$\Delta b$	$\delta b$	$\Delta p_x$	$\Delta x \cdot \Delta p_x$
	м	-	м	м	-	Н с	Дж с
1							
2							
3							
Средние значения							

18. По заданию преподавателя можно выполнить пункты 3, 5-12, 14-16 для другого расстояния  $L$ .

### Контрольные вопросы

1. Описать ход работы, объясняя смысл всех операций. Знать все обозначения, используемые в таблицах.
2. Что называется дифракцией?
3. В чем состоит идея Луи де Бройля?
4. В чем заключается смысл соотношения неопределенностей Гейзенберга?
5. Как распределяется интенсивность максимумов при дифракции Фраунгофера на одиночной щели?
6. Записать условие главных минимумов при дифракции на щели.
7. Как определить ширину щели по условию минимума в дифракции Фраунгофера.
8. Как определить массу и импульс фотона?
9. Чему равна неопределенность импульса фотона при его прохождении щели?

10. В чем заключается смысл проверки соотношения неопределенностей Гейзенберга? Как объяснить утверждение, что «...если соотношение неопределенностей выполняется для минимума 1-го порядка, то тем более будет выполняться для минимумов более высоких порядков»?

## ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении работы необходимо убедиться, что все токоведущие части электрической схемы изолированы. Категорически запрещается касаться руками или другими предметами зажимов цепи, находящихся под напряжением. По окончании работы обязательно отключить электрическую схему от источника напряжения. ***Остерегайтесь прямого попадания лазерного луча в глаза!***

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Благин А.В. Физика для инженеров / А.В. Благин, Т.С. Беликова, Т.П. Жданова и др. – Ростов-на-Дону.: ДГТУ, 2022. - 601 с.
2. Трофимова, Т. И. Физика. Краткий курс.: учебное пособие / Т. И. Трофимова. - Москва: КноРус, 2020. - 271 с.