

## Лабораторная работа №3

### Соотношение неопределенностей для фотонов

**Цель работы:** экспериментальное подтверждение выполнения соотношения неопределенностей для фотонов.

**Приборы и принадлежности:**

1. гелий-неоновый лазер ЛГН-205,
2. щель с регулируемой микрометрическим винтом шириной,
3. экран, оптическая скамья, линейка, миллиметровая бумага.



Общий вид установки

## Теоретическое введение

Пусть плоская волна  $I = I_0 \cos(\omega t - kz)$  падает на щель шириной  $a$ . После щели световые волны распространяются во всевозможных направлениях. Большая часть энергии проходящей волны приходится на сектор углов  $0 < \varphi < \varphi_1$ , где угол  $\varphi_1$ , отвечающий направлению на первый минимум, подчиняется интерференционному условию

$$a \sin \varphi_1 = \lambda \quad (1)$$

Соотношение (1) определяет условную границу  $\varphi = \varphi_1$  спектра плоских волн на выходе из щели. Учитывая, что излучение рассеивается как на меньшие  $\varphi < \varphi_1$ , так и на большие  $\varphi > \varphi_1$  углы, можно записать следующее волновое условие неопределенностей

$$a \sin \varphi \geq \lambda, \quad (2)$$

которому подчиняются углы для большей части плоских волн, рассеянных на щели.

Неравенство (2) относится к волнам любой физической природы. Оно указывает, что сужение щели обязательно сопровождается уширением спектра направлений, в котором сосредоточено дифракционное поле. В качестве примера на рис. 2 показано распределение интенсивности  $I$  по углам для двух щелей разной ширины. Видно, что при увеличении ширины щели в два раза, то есть при  $a_2 = 2a_1$ , интервал значений  $\sin \varphi$ , отвечающий центральному максимуму сокращается в два раза.

Рассматриваемое соотношение можно записать иначе, если представить электромагнитную (световую волну) как поток фотонов с энергией  $E = h\nu = hc/\lambda$  и импульсом  $\vec{p} = \hbar \vec{k}$ . Пусть падающие фотоны имеют только Z-компоненту импульса

$$\vec{p}_0 = \frac{h}{\lambda} \vec{i}_z$$

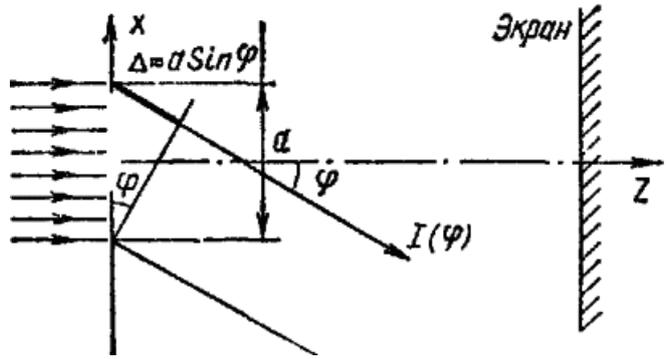


Рис.1

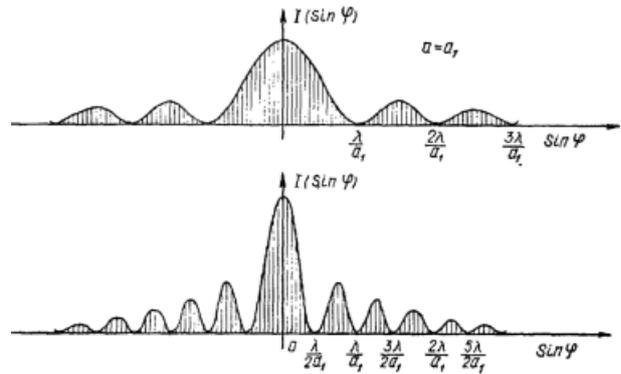


Рис.2

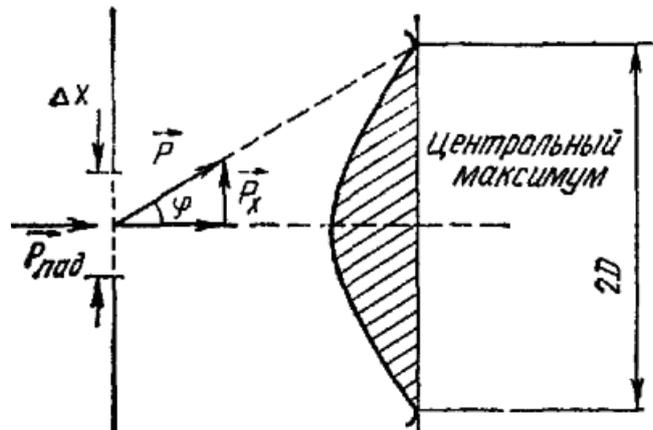


Рис.3

После прохождения через щель у фотонов появляется  $X$  - компонента импульса (рис. 3)

$$p_x = \frac{h}{\lambda} \sin \varphi$$

Для фотонов, отклонившихся на разные углы, значения  $p_x$  различны. В силу (2) имеем

$$ap_x \geq h, \quad (5)$$

Это соотношение обычно записывают в виде

$$\Delta x \Delta p_x \geq h, \quad (6)$$

где  $\Delta x = a$  - область локализации (неопределенность местоположения) фотонов в плоскости щели  $z=0$ , а  $\Delta p_x = \frac{h}{\lambda} \sin \varphi$  - область значений (неопределенность) компоненты импульса.

Соотношение (6) показывает, что произведение неопределенности координаты на неопределенность соответствующего ей импульса имеет величину порядка  $h = 6,62606957 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. В квантовой физике оно известно, как соотношение неопределенностей Гейзенберга.

Чем точнее определена одна из этих величин, например, чем уже щель, через которую проходят фотоны, тем неопределеннее становится импульс  $p_x$ , и, наоборот, чем шире щель  $\Delta x \rightarrow \infty$ , тем определеннее импульс  $\Delta p_x \rightarrow 0$ . Очевидно, если одна из величин  $\Delta x$  или  $\Delta p_x$  имеет вполне определенное значение, то другая является совершенно неопределенной.

В данной работе соотношение неопределенностей (6) проверяется экспериментально для фотонов.

На опыте измеряется ширина щели, характеризующая неопределенность координаты фотона  $\Delta x$ , и ширина дифракционной картины, характеризующая неопределенность поперечного импульса фотона  $\Delta p_x$ .

#### Описание экспериментальной установки

Установка для проверки принципа неопределенностей (рис.4) состоит из источника монохроматического излучения (гелий-неоновый лазер) 1 и оптической скамьи 2, на которой могут располагаться калиброванная щель 3 переменной ширины, экран со шкалой 4, калибровочный микроскоп 5 (опционально).

Испускаемый гелий-неоновым лазером пучок света проходит через щель и попадает на экран, на котором закреплен лист миллиметровой бумаги, где и наблюдается исследуемая дифракционная картина. Меняя с помощью барабана ширину щели, можно наблюдать изменение вида дифракционной картины.

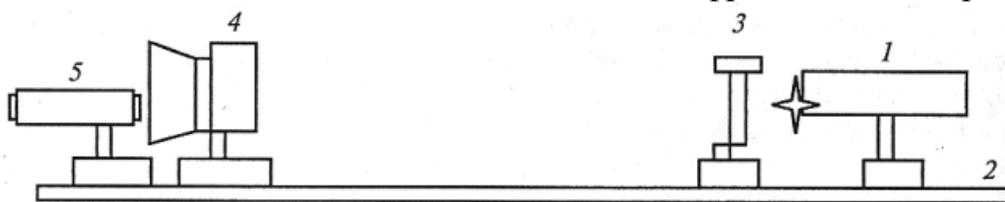


Рис.4

## Лабораторная работа №3 Соотношение неопределенностей для фотонов

Выполнил студент \_\_\_\_\_

Факультет \_\_\_\_\_ Курс \_\_ Группа \_\_\_\_\_

Проверил \_\_\_\_\_

Показания сняты \_\_\_\_\_

Зачтено \_\_\_\_\_

### Методика выполнения работы

Из рисунка 3 очевидно, что для малых углов

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi \approx D/L$$

где  $D$  – полуширина главного максимума дифракционной картины на экране, находящемся на расстоянии  $L$  от щели. Поэтому соотношение (6) принимает вид

$$\Delta x \frac{h}{\lambda} \sin \varphi = \Delta x \frac{h}{\lambda} \operatorname{tg} \varphi = \Delta x \frac{h D}{\lambda L} \geq h, \quad (7)$$

откуда следует, что

$$\frac{\Delta x D}{\lambda L} \geq 1, \quad (8)$$

Неравенство (8) удобно проверять на опыте.

1. Установите щель и экран на оптической скамье согласно рис.4 на расстоянии, около 1,5 м. Включите лазер. Получите на экране дифракционную картину. Для этого, используя салазки, на которых установлена калиброванная щель, добейтесь того, чтобы луч лазера прошел через ее отверстие и попал на экран.

2. Установите размер щели  $\Delta x=30$  делений. Измерьте ширину главного максимума  $2D$  как с помощью линейки, так и путем подсчета числа делений миллиметровой бумаги, которая используется в качестве экрана. Ширину максимума определите по положению темных полос, окаймляющих максимум. Изменяя размер щели от 30 до 100 делений через каждые 5 делений, проведите не менее 12 измерений, Результаты измерения занесите в таблицу.

$$L = \quad \text{м}$$

$$\lambda = 632,8 \text{ нм} - \text{длина волны лазера}$$

3. Градуировка регулируемой щели. (опционально при наличии микроскопа).

Из-за несовершенства конструкции щели число делений, отсчитываемых на ее барабане, не связано линейно с шириной соответствующего отверстия. Поэтому необходимо провести градуировку щели с помощью микроскопа (типа МПБ-2).

Выключите лазер и расположите на оптической скамье щель и микроскоп (рис.4). Измерьте по шкале микроскопа ширину щели (в мм), соответствующую каждому положению шкалы регулировочного барабана, используемому в

задании 1, и занесите результаты измерений в таблицу 1.

*Примечание: при невозможности выполнить этот пункт, приблизительно считать  $1 \text{ дел} = 0,001 \text{ мм}$*

№	$\Delta x$ , дел	$\Delta x$ , мм	$1/\Delta x$ , 1/мм	$2D$ , мм	$D$ , мм	$F = \frac{\Delta x D}{\lambda L}$
1.	30	0.030				
2.	35	0.035				
3.	40	0.040				
4.	45	0,045				
5.	50	0,050				
6.	55	0,055				
7.	60	0,060				
8.	65	0,065				
9.	70	0,070				
10.	75	0,075				
11.	80	0,080				
12.	85	0,085				
13.	90	0,090				
14.	95	0,095				
15.	100	0,100				

4. Для каждого случая вычислите величину  $F$  по формуле (8)

Постройте график зависимости полуширины главного максимума  $D$  от ширины щели  $\Delta x$ .

Постройте график зависимости полуширины главного максимума  $D$  от обратной ширины щели  $1/\Delta x$ .

Постройте график зависимости  $F(\Delta x)$  с учетом погрешности.

5. Сделайте выводы.

## Контрольные вопросы

1. В чем заключается физический смысл соотношения неопределенностей?
2. Выведите соотношение неопределенностей Гейзенберга из условий дифракции света.
3. Какие величины могут быть связаны соотношением неопределенностей?
4. Докажите с помощью соотношения неопределенностей, что электрон не может входить в состав атомного ядра.
5. Какое максимальное пространственное разрешение может обеспечить поток нейтронов с энергией  $E=1$  эВ?
6. Почему электронный микроскоп может обеспечить более высокое разрешение, чем оптический микроскоп?
7. Что такое нулевые колебания? Как объяснить наличие нулевых колебаний с помощью принципа неопределенностей?
8. Какие преимущества обеспечивает анализ величины  $F=\Delta x D/\lambda L$  по сравнению с анализом зависимости  $D=f(\Delta x)$ ?
9. Используя соотношение неопределенностей, оцените: а) энергию электрона в атоме водорода в основном состоянии; б) энергию электронов в атоме гелия в основном состоянии; в) энергию основного состояния квантового осциллятора
10. Почему проверка соотношения неопределенностей при помощи лазерного излучения более надежна, чем при работе с другими источниками света (например, газоразрядной лампой)?

### приложения

#### Физические константы (CODATA<sup>1</sup> 2010)

Скорость света	$c= 2,99792458 \cdot 10^8$ м/с	точно
Постоянная Планка	$h= 6,62606957 \cdot 10^{-34}$ Дж·с	
Масса электрона	$m= 9,10938291 \cdot 10^{-31}$ кг	
Заряд электрона	$e= -1,602176565 \cdot 10^{-19}$ Кл	

### Литература (нужно исправлять и обновлять!!!!)

1. Гершензон Е.М., Малов Н.И. Курс общей физики. Оптика и атомная физика.
  2. Савельев И.В. Курс общей физики. т.3.- М.
  3. Лабораторный практикум по общей физике. Под ред. Гершензона Е.М., Малова Н.И.-М., 1985г.
  4. Физический практикум. Электричество и оптика. Под ред. В.Н. Ивероной.- М, 1968г.
- Лабораторные занятия по физике. Под ред. Гольдина Л.Л.-М

<sup>1</sup> CODATA (англ. Committee on Data for Science and Technology — Комитет по данным для науки и техники) — междисциплинарный комитет Международного совета по науке, учрежденный в 1966 году и ставящий своей целью сбор, критическую оценку, хранение и поиск важных данных для задач науки и техники.

<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/Table/allascii.txt>

<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>