

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.7**

### **СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ДЛЯ ФОТОНОВ**

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

**Приборы и принадлежности:** источник света – лазер, щель переменной ширины, оптическая скамья, экран, линейка, микроскоп.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Соотношение неопределенности является одним из фундаментальных принципов современной физики. Для нерелятивистских частиц его можно сформулировать следующим образом. Неопределенность положения частицы  $\Delta x$  и неопределенность проекции ее импульса в том же направлении  $\Delta p_x$  должны удовлетворять соотношению

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h \quad (1)$$

В данной работе соотношение неопределенности (1) проверяется экспериментально для фотонов. Проявлением принципа неопределенности в оптике может служить явление дифракции. Действительно, при ограничении поперечных размеров светового пучка щелью ширины  $\Delta x$  неопределенность координаты фотонов, из которых состоит пучок, равна ширине этой щели. Тогда будет отличной от нуля и неопределенность проекции импульса фотонов вдоль направления перпендикулярного щели, т.е. в дифрагированном излучении будут присутствовать фотоны, которые движутся не только в прежнем направлении, но и под некоторым углом  $\alpha$  к нему. Проекция импульса таких фотонов на направление, перпендикулярное направлению первоначального пучка будет равна  $p_x = p \cdot \sin \alpha$ . Если при дифракции основная доля излучения будет сосредоточена в диапазоне углов от  $-\alpha$  до  $\alpha$ , то

неопределенность импульса будет составлять  $\Delta p_x = p \cdot \sin \alpha = \frac{h}{\lambda} \sin \alpha$  (где  $\lambda$  - длина волны излучения). Следовательно, произведение неопределенностей координаты и импульса будет равно

$$x \cdot \Delta p_x = \frac{h}{\lambda} \sin \alpha \cdot \Delta x \geq h \quad (2)$$

Из этого неравенства следует, что угловая расходимость светового пучка после дифракции на щели шириной  $\Delta x$  определяется неравенством  $\sin \alpha \geq \frac{\lambda}{\Delta x}$ . Это соответствует классической теории дифракции, в которой угол дифракционной расходимости пучка равен  $\sin \alpha = \frac{\lambda}{\Delta x}$ . Здесь угол  $\alpha$  определяет направления на первые минимумы дифракционной картины.

Как видно из рисунка 4.7.0, для малых углов  $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = D/L$ , где  $D$  – полуширина главного максимума дифракционной картины на экране, находящемся на расстоянии  $L$  от щели. Поэтому

соотношение (2) принимает

$$\text{вид: } x \cdot \Delta p_x = \frac{h}{\lambda} \sin \alpha \cdot \Delta x = \frac{hD}{\lambda L} \cdot \Delta x \geq h,$$

откуда следует, что

$$\frac{D \cdot \Delta x}{\lambda L} \geq 1 \quad (3)$$

Неравенство (3) удобно проверять на опыте.

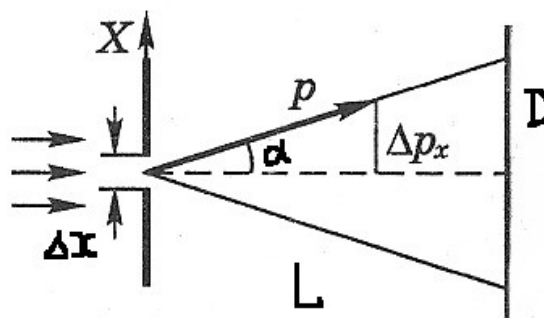


Рис.4.7.0

В работе предлагается измерить ширину щели, характеризующую неопределенность координаты фотона  $\Delta x$ , и полуширину дифракционной картины  $D$ , характеризующую неопределенность поперечного импульса фотона  $\Delta p_x$ , после чего

проверить выполнение неравенства (3) при различных значениях ширины щели.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для проверки принципа неопределенностей (рис.4.7.1) 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.

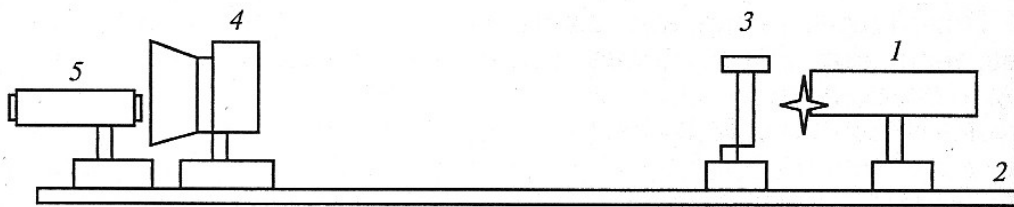


Рис. 4.7.1

### ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

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

**Задание 1. Измерение зависимости ширины главного максимума дифракционной картины от ширины щели.**

Установите щель и экран на оптической скамье согласно рис.4.7.1 на расстоянии, указанном в паспорте установки. 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.

Меняя ширину щели, проведите не менее 10 измерений ширины  $2D$  главного максимума дифракционной картины. Ширину

щели меняйте с шагом в два деления по шкале барабана от значения, когда на экране уже отчетливо наблюдается дифракционная картина, до значения, при котором еще можно наблюдать изменение ширины главного максимума. Измерьте ширину главного максимума, пользуясь шкалой экрана. Для увеличения точности измерений установите калиброванную щель на расстоянии не менее 1,0 м от экрана. Ширину максимума определите по положению темных полос, окаймляющих максимум.

Результаты измерения  $\Delta x$  (в делениях шкалы барабана),  $2D$  и  $D$  (в мм) (половина ширины главного максимума), а также расстояния  $L$  между экраном и щелью занесите в таблицу 1.

**Таблица 1**

№ опыта	$\Delta x$ , делений	$\Delta x$ , мм	$2D$ , мм	$D$ , мм	$L$ , см	$F = \frac{D \cdot \Delta x}{\lambda L}$
<b>1</b>						
<b>2</b>						

**Задание 2. Градуировка регулируемой щели.**

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. 4.7.2). 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.

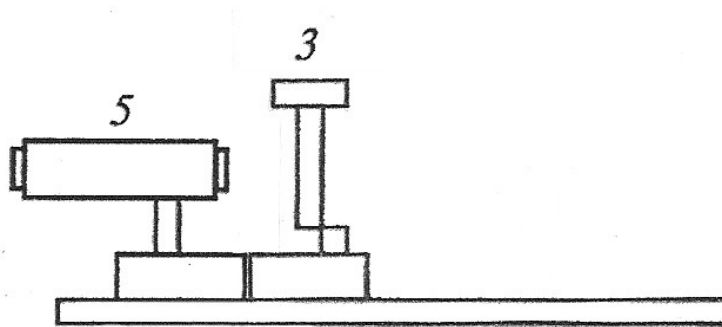


Рис. 4.7.2

### Задание 3. Проверка соотношения неопределенностей.

Постройте график зависимости полуширины главного максимума  $D$  от размера щели  $\Delta x$  и вычислите безразмерную величину  $F = \frac{D \cdot \Delta x}{\lambda L}$ , где  $\lambda = 6,33 \cdot 10^{-7}$  м – длина волны излучаемого света. Убедитесь, что эта величина практически не меняется при изменении  $\Delta x$ . Проверьте выполнение неравенства (3).

### ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. В чем заключается физический смысл соотношения неопределенностей?
2. Какое максимальное пространственное разрешение может обеспечить поток нейтронов с энергией  $E = 1$  эВ?
3. Почему электронный микроскоп может обеспечить более высокое разрешение, чем оптический микроскоп?
4. Что такое нулевые колебания? Как объяснить наличие нулевых колебаний с помощью принципа неопределенностей?
5. Какие преимущества обеспечивает анализ величины  $F = \Delta x D / \lambda L$  по сравнению с анализом зависимости  $D = f(\Delta x)$ ?
6. 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

7. Почему проверка соотношения неопределенностей при помощи лазерного излучения более надежна, чем при работе с другими источниками света (например, газоразрядной лампой)?