

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

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 неопределенностей является одним из фундаментальных принципов современной физики. Для нерелятивистских частиц его можно сформулировать следующим образом. Неопределенность положения частицы Δx и неопределенность проекции ее импульса в том же направлении Δp_x должны удовлетворять соотношению

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

В данной работе соотношение неопределенностей (1) проверяется экспериментально для фотонов. Проявлением принципа неопределенностей в оптике может служить явление дифракции. Действительно, при ограничении поперечных размеров светового пучка щелью ширины Δx 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 α 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 α , то неопределенность импульса будет составлять $\Delta p_x = p \cdot \sin \alpha = \frac{h}{\lambda} \sin \alpha$, где λ - 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 Δx 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 α определяет направления на первые минимумы дифракционной картины.

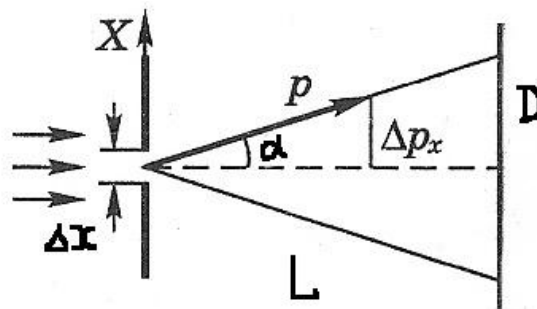


Рис.9.1

Как видно из рисунка 9.1, для малых углов $\sin \alpha \approx \tan \alpha = D/L$, где D – полуширина главного максимума дифракционной картины на экране, находящемся на расстоянии L от щели. Поэтому соотношение (2) принимает 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.

В работе предлагается измерить ширину щели, характеризующую неопределенность координаты фотона Δx , и полуширину дифракционной картины D , характеризующую неопределенность поперечного импульса фотона Δp_x , после чего проверить выполнение неравенства (3) при различных значениях ширины щели.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для проверки принципа неопределенностей (рис. 9.2) 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.

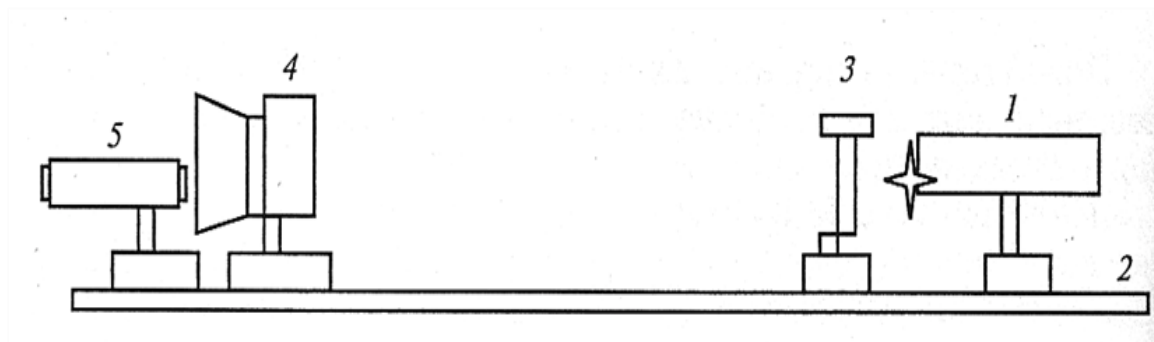


Рис. 9.2.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Испускаемый гелий-неоновым лазером пучок света проходит через щель и попадает на экран, где наблюдается исследуемая дифракционная картина (рис. 9.3). Меняя с помощью барабана ширину щели, можно наблюдать изменение вида дифракционной картины.

З а д а н и е 1 . Измерение зависимости ширины главного максимума дифракционной картины от ширины щели.

1. Снимите с оптической скамьи калибровочный микроскоп, щель и экран установите согласно рис.9.2 на расстоянии, указанном в паспорте установки.
2. Включите лазер.
3. 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.

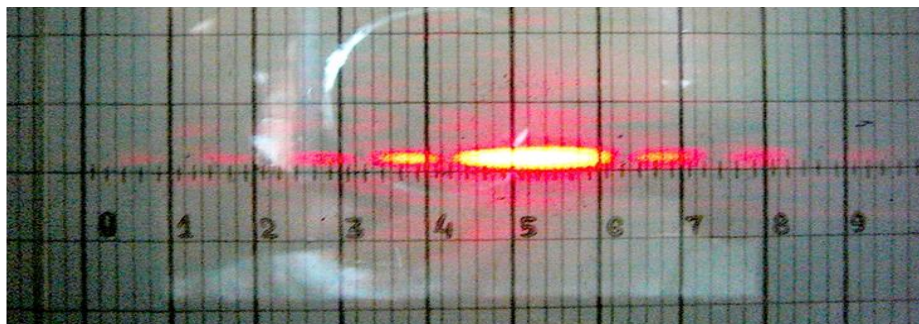


Рис. 9.3.

4. Меняя ширину щели Δx , проведите 6-8 измерений ширины $2D$ главного максимума дифракционной картины. Ширину щели меняйте с шагом в *четыре 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.

5. Измерьте ширину главного максимума, пользуясь шкалой экрана. Для увеличения точности измерений установите экран на расстоянии $L \approx 1,0$ м от калиброванной щели. Ширину максимума определите по положению темных полос, окаймляющих максимум.

6. Результаты измерения Δx (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	Δx , деления	Δx , мм	$2D$, мм	D , мм	L , см	$F = \frac{D \cdot \Delta x}{\lambda L}$
1						
2						
.....						

З а д а н и е 2 . Градуировка регулируемой щели.

Чтобы связать число делений, отсчитываемых на ее барабане, с шириной соответствующего отверстия, необходимо провести градуировку щели с

помощью микроскопа (типа МПБ-2) .

1. Выключите лазер.
2. Расположите на оптической скамье щель и микроскоп согласно рис.9.4.

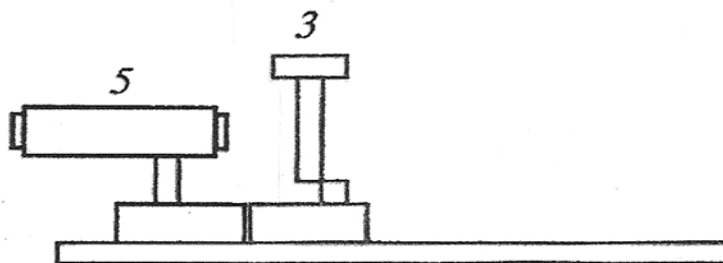


Рис. 9.4.

3. Измерьте по шкале микроскопа ширину щели (в мм), соответствующую каждому положению шкалы регулировочного барабана, используемому в задании 1.
4. Результаты измерений занесите в таблицу 1.

З а д а н и е 3 . Проверка соотношения неопределенностей.

1. Постройте график зависимости полуширины главного максимума D от размера щели Δx .
2. 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 Δx .
3. Проверьте выполнение неравенства (3).

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. В чем заключалась гипотеза де Бройля и какие эксперименты подтвердили данную гипотезу? Чему равны фазовая и групповая скорости волн де Бройля? Что такое дебройлевская длина волны?
2. В чем заключается физический смысл соотношения неопределенностей?
3. Рассмотрите воображаемый опыт по дифракции электронов на двух щелях.

Что наблюдалось бы на экране в случае классических частиц? Классических волн? Что наблюдается на самом деле? Можно ли узнать, в какую щель прошел электрон, сохранив при этом дифракционную картину?

4. Какие преимущества обеспечивает анализ величины $F = \Delta x D / \lambda L$ по сравнению с анализом зависимости $D = f(\Delta x)$?

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

6. Что такое нулевые колебания? Как объяснить наличие нулевых колебаний с помощью принципа неопределенностей?

7. С помощью соотношения неопределенностей оцените: а) энергию основного состояния частицы, «запертой» в одномерном потенциальном ящике длины l ; б) энергию основного состояния одномерного осциллятора; в) размер атома водорода и его энергию в основном состоянии.

8. Что такое естественная ширина спектральной линии? Чем объясняется добавочное уширение линий? Воспользовавшись соотношением неопределенностей, оцените размытость энергетического уровня в атоме водорода: 1) для основного состояния 2) для возбужденного состояния.

9. Почему электронный микроскоп может обеспечить более высокое разрешение, чем оптический микроскоп?