

Ярославский государственный педагогический
университет им. К. Д. Ушинского

Лабораторная работа № 3

Соотношение
неопределенностей
для фотонов

Ярославль
2019

Оглавление

1. Краткая теория	3
2. Измерения и обработка результатов	6
3. Контрольные вопросы	7

Лабораторная работа № 3

Соотношение неопределенностей для фотонов

Цель работы: экспериментальное подтверждение выполнения соотношения неопределенности для фотонов.

Приборы: гелий-неоновый лазер ЛГН-205, щель от монохроматора с регулируемой шириной, экран, оптическая скамья.

Литература:

1. Савельев И.В. Курс общей физики. том 3. М., 1979, п.18-20
2. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. вып. 3-4. М., гл. 37.
3. Шпольский Э.В. Атомная физика. том 1. М., 1963.

1. Краткая теория

Пусть плоская волна $\cos(\omega t - kz)$ 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 φ_1 , отвечающий направлению на первый минимум, подчиняется интерференционному условию:

$$a \sin \varphi_1 = \lambda. \quad (1.1)$$

Соотношение (1.1) определяет условную границу $\varphi = \varphi_1$ спектра плоских волн на выходе из щели. Учитывая, что излучение рассеивается как на большие так и на меньшие углы, можно записать следующее волновое условие неопределенности:

$$a \sin \varphi < \lambda, \quad (1.2)$$

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

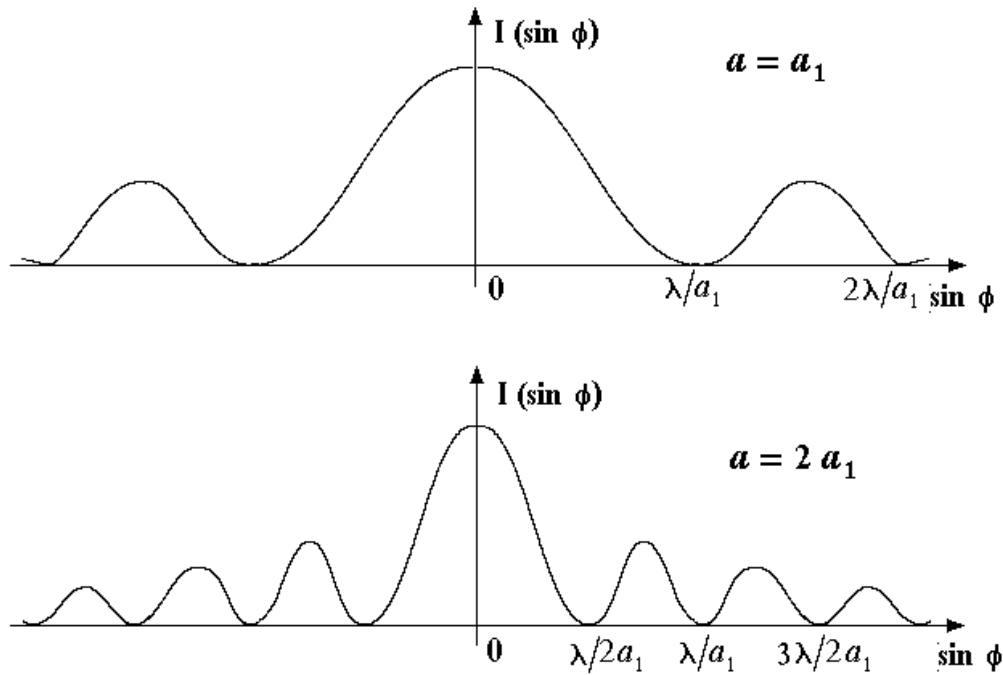


Рис. 1.1

Неравенство (1.2) 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. 1.1 показано распределение интенсивности I по углам для двух щелей разной ширины. Из рисунка 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 $E = \frac{hc}{\lambda}$ и импульсом $p = \frac{h}{\lambda}$. Пусть падающие фотоны имеют только z - компоненту импульса:

$$p_o = \frac{h}{\lambda}. \quad (1.3)$$

После прохождения через щель у фотонов появляется X - компонента импульса (рис. 1.2):

$$p_x = \frac{h}{\lambda} \sin \varphi = \Delta p_x. \quad (1.4)$$

1. Краткая теория

Для фотонов, отклонившихся на разные углы, значения Δp_x различны. В силу (1.2) и, принимая во внимание, что $a = \Delta x$, имеем:

$$\Delta x \Delta p_x \geq h. \quad (1.5)$$

Из рис. 1.2 очевидно, что для малых углов

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{D}{L},$$

поэтому соотношение (1.5) принимает вид:

$$\Delta x \frac{h}{\lambda} \sin \varphi = \Delta x \frac{h}{\lambda} \operatorname{tg} \varphi = \Delta x \frac{h D}{\lambda L} \geq h.$$

Откуда следует, что

$$F = \frac{\Delta x \cdot D}{\lambda L} \geq 1.$$

Это неравенство удобно проверять на опыте.

Соотношение (1.5) показывает, что произведение неопределенности координаты на неопределенность соответствующего ей импульса имеет величину порядка $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж/с. 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 Δx или Δp имеет вполне определенное значение, то другая является совершенно неопределенной.

В данной работе соотношение неопределенности (1.5) проверяется экспериментально для фотонов. На опыте изменяется ширина щели, характеризующая неопределенность координаты фотона Δx , и ширина дифракционной картины, характеризующая неопределенность поперечного импульса фотона Δp_x .

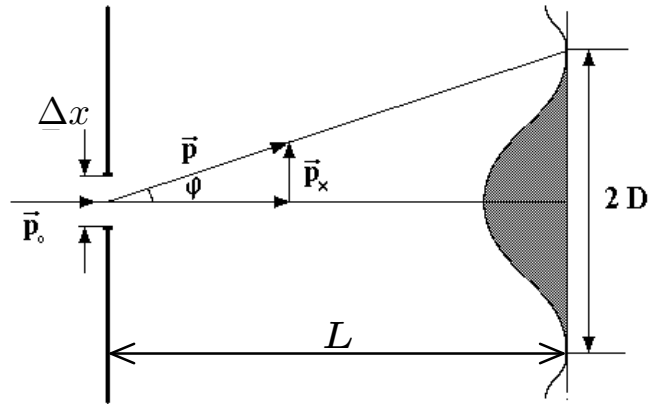


Рис. 1.2

2. Измерения и обработка результатов

Испускаемый гелий-неоновым лазером пучок света проходит через калиброванную щель и попадает на экран, в качестве которого используется лист миллиметровой бумаги. Лист бумаги прикреплен к металлическому основанию с помощью магнитов (рис. 2.1).

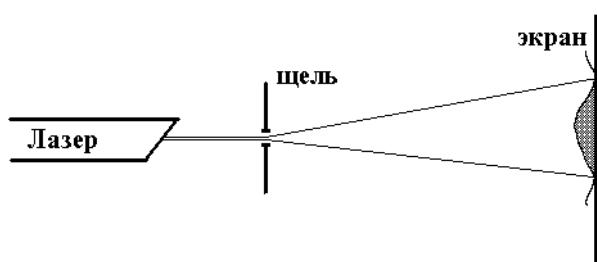


Рис. 2.1

Установить размер щели 0,1 мм. Необходимо добиться попадания нерасширенного луча лазера в щель и получить яркую дифракционную картину.

Изменяя размер щели Δx от 0,03 до 0,10 мм через каждые 0,005 мм, проведите не менее 12

измерений, которые заключаются в определении ширины $2D$ главного максимума дифракционной картины полученной на экране.

Измерьте ширину главного максимума как с помощью линейки, так и путем подсчета числа делений миллиметровой бумаги, которая используется в качестве экрана.

Для увеличения точности измерений установите калибровочную щель на расстоянии не менее 1 м от экрана. Ширину максимума определите по серединам темных полос, окаймляющих максимум.

Результаты измерения Δx , $2D$ и D (половина ширины главного максимума) занесите в таблицу. Постройте график зависимости полуширины главного максимума D от размера щели Δx .

Вычислите величину F по формуле:

$$F = \frac{\Delta x D}{\lambda L},$$

$\lambda = 632,8 \text{ нм}$ – длина волны излучения гелий-неонового лазера,

L – расстояние от щели до экрана.

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

3. Контрольные вопросы

1. Выведите соотношение неопределенностей Гейзенберга из условий дифракции света.
2. Какие величины могут быть связаны соотношением неопределенности?
3. В чем заключается физический смысл соотношений неопределенности?
4. Докажите с помощью соотношения неопределенностей, что электрон не может входить в состав атомного ядра.
5. Почему электронный микроскоп может обеспечить более высокое разрешение, чем оптический микроскоп (сравните Δx для фотона и электрона)?