

Лабораторна робота №3

Експериментальна перевірка співвідношення невизначеностей

Мета: Перевірити справедливості співвідношення невизначеностей Гейзенберга для фотонів.

Прилади та обладнання: лазер ЛГН-109, щілина з мікрометричним гвинтом, екран, рулетка на 2 м, мікроскоп МБП-2.

Теоретичні відомості

На відміну від класичних об'єктів мікрочастинки і фотони у відповідних умовах проявляють або корпускулярні або хвильові властивості, тобто проявляють корпускулярно-хвильовий дуалізм. Математичним вираженням дуалізму є співвідношення невизначеності в імпульсі Δp_x та у координаті Δx , але не може бути меншим за $\hbar = h/2\pi$; $\Delta p_x \Delta x \geq \hbar$.

Світлову (електромагнітну) хвилю у фотоелектричних явищах, люмінесценції, при дослідженні світлового тиску або хімічної дії можна представити потоком фотонів з енергією $E = \hbar\omega$ та імпульсом $p = \hbar k$. Нехай на щілину шириною Δx падає потік світла. В результаті дифракції світло попадає в область геометричної тіні, що також визначає одержання фотоном додаткового імпульсу Δp у напрямі x , тобто Δp_x (рис. 1). До проходження щілини імпульс фотона був точно визначений, оскільки $\Delta p_x = 0$, а його місцезнаходження було зовсім не визначено (фотон точно десь є на Δx).

З рис. 1 дістанемо $\Delta p_x = p \sin\varphi$ або $\Delta p_x = \hbar k \sin\varphi$. Оскільки $k = 2\pi/\lambda$, то

$$\Delta p_x = h \frac{\sin\varphi}{\lambda} \quad (1)$$

Нехай плоска монохроматична хвиля падає на щілину шириною Δx . Внаслідок дифракції на ній хвиля поширюється у всіх можливих напрямках у межах кута від 0 до φ .

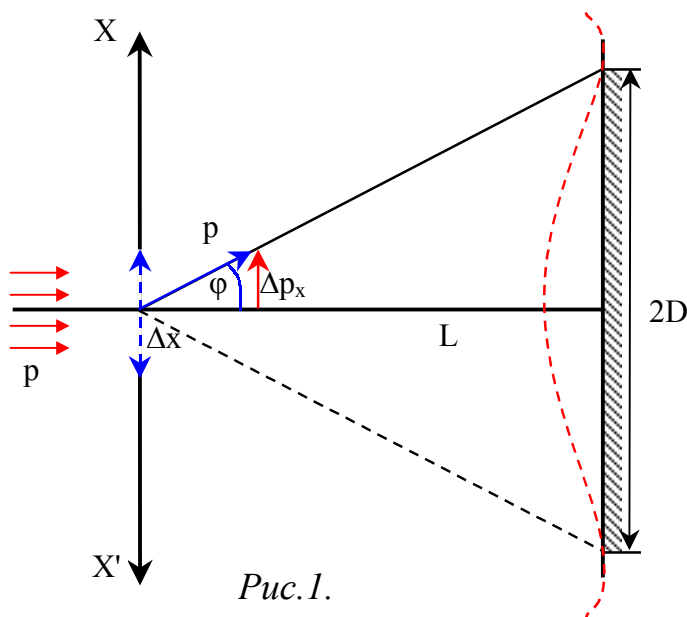


Рис. 1.

Більша частина енергії хвилі після проходження щілини припадає на спектр кутів $0 < \varphi < \varphi_1$ де φ_1 – кут, що відповідає напрямку на перший мінімум. Для цього мінімуму виконується умова інтерференції $\Delta x \sin\varphi_1 = 2 \frac{\lambda}{2}$. Цей вираз визначає умовну межу $U_1 = 2\varphi_1$; $U_2 = 2\varphi_2$; ...; $U_{1n} = 2\varphi_n$ дифракційного спектра плоскої хвилі після проходження щілини. Враховуючи, що падаюча хвиля розсіюється як на більші ($\varphi > \varphi_1$), так і

на менші ($\varphi < \varphi_1$) кути, ніж φ_1 , можна записати наступну хвильову умову невизначеностей

$$\Delta x \sin \varphi \leq \lambda. \quad (2)$$

Цій умові задовільняють хвилі будь-якої природи. Аналіз виразу показує, що зменшення Δx супроводиться розширенням сектора кутів, в якому зосереджене дифракційне поле. На рис. 2 показано розподіл інтенсивності для різних кутів у випадку двох щілин ($\Delta x = a_1$) з шириною $\Delta x - a$ (рис. 2, а) та $2\Delta x - b$ (рис. 2, б). Бачимо, що інтервал значень $\sin \varphi_1$ для щілини $2\Delta x$ зменшиться вдвічі порівняно з щілиною Δx .

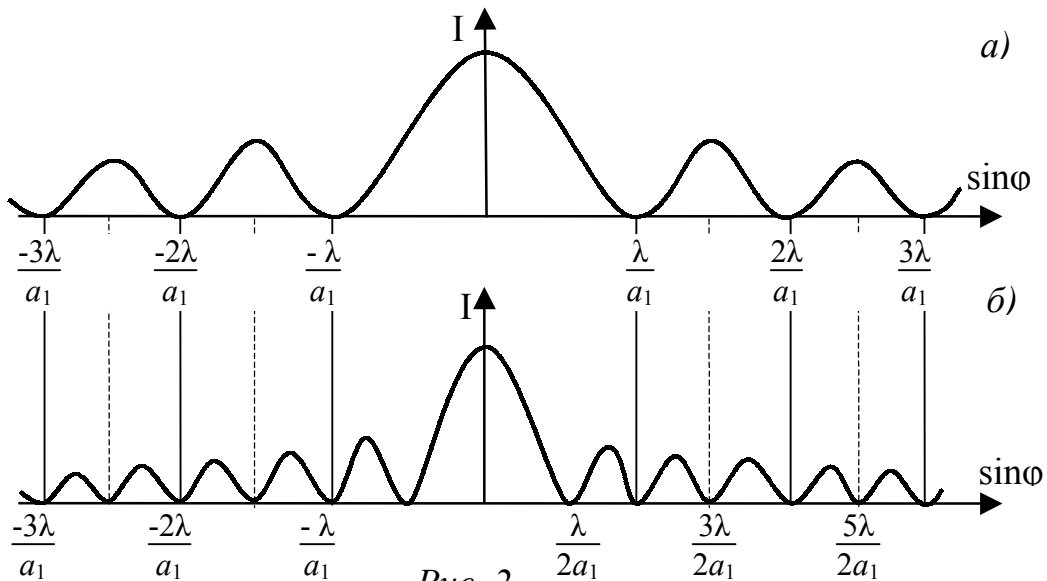


Рис. 2.

Порівнюючи ці два підходи до тлумачення картини на екрані, можна твердити, що мінімуму дифракції відповідає мінімум імовірності попадання фотонів в дане місце при сталих умовах спостереження.

Це також означає, що вирази (2) і (1) описують поведінку одного і того ж об'єкта. Виразимо в (2) кут дифракції $\sin \varphi \leq \frac{\lambda}{\Delta x}$ і підставимо його у (1), маємо

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar. \quad (3)$$

В роботі експериментальне перевіряється вираз (3) для фотонів. При дослідженні вимірюється ширина щілини, яка характеризує невизначеність координати фотона Δx , а також ширина дифракційного максимуму, який характеризує невизначеність поперечного імпульсу фотона Δp_x . Джерелом світла у роботі є гелій-неоновий лазер. При користуванні лазером слід дотримуватись правил техніки безпеки, берегти очі від попадання прямого та відбитого випромінювання.

При освітленні лазерним променем каліброваної щілини на екрані можна дістати дифракційний спектр. Тепер вираз (3) можна записати так;

$$\Delta x D \geq \text{const}. \quad (4)$$

Цей вираз і буде робочою формулою дослідження співвідношення невизначеностей Гейзенберга.

Порядок виконання роботи

1. Для перевірки показів мікрометричного гвинта щілини, користуючись мікроскопом МБП-2, здійснити його градуювання. Поверхню щілини освітлювати слабким боковим світлом. Побудувати градуювальну криву $\Delta x = f(n)$.

2. Розташувати на оптичній лаві лазер, щілину та екран. Віддаль між щілиною та екраном 1,5 – 2,0 м.

3. Змінювати отвір щілини від 0,05 до 0,4 мм через кожні 0,03-0,05 мм. Для кожного значення Δx виміряти ширину головного максимуму $2D$. Побудувати графік залежності $D = f(\Delta x)$.

4. Змінити віддаль між щілиною та екраном L . Переконатись, що для нових значень D добуток $\Delta x D$ дорівнює добутку $L\lambda$, де $\lambda = 6,33 \cdot 10^{-7}$ м (для лазера ЛГН-109).

Контрольні запитання

1. У чому полягає фізичний зміст співвідношень невизначеностей Гейзенберга?
2. Де використовуються хвильові властивості потоків частинок?
3. Чому для виконання даної роботи доцільно використовувати лазер?
4. Наведіть приклади фізичних явищ, які знаходять своє пояснення на основі співвідношення невизначеності.

Література

1. Белый М.И., Охрименко Б.А. Атомная физика. К., Высшая школа, 1984.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 5. М., Наука, 1976.
3. Загальна фізика. Лабораторний практикум / Під редакцією І.Г. Горбачука. К., Вища школа, 1992.