

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»



Кафедра фізики

Методичні вказівки до лабораторної роботи

«Експериментальне вивчення співвідношення невизначеностей»

для бакалаврів напрямку підготовки 6.050503 «Машинобудування»

Рекомендовано до видання засіданням кафедри фізики
(протокол №10 від 14.03.2012 р.)

Дніпропетровськ
Державний ВНЗ «НГУ»

2012

Фізика. Методичні вказівки (українською та російською мовами) до лабораторної роботи «Експериментальне вивчення співвідношення невизначеностей» для бакалаврів напрямку підготовки 6.050503 та других напрямів. – Автори: М.О. Певзнер, М.Д. Солопов, Л.П. Налбандян. – Д.: Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2012. – 8 с.

Автори:

М.О. Певзнер, канд. фізмат. наук, проф.,

М.Д. Солопов, старший викладач,

Л.П. Налбандян, старший викладач.

Затверджено до видання учбово-методичним управлінням ДВНЗ «НГУ» за поданням методичної комісії напрямку підготовки 6.050503 «Машинобудування» (протокол № 3 від 2.04.2012 р.).

Методичні матеріали призначено для самостійної роботи студентів напрямку підготовки 6.050503 «Машинобудування» та других напрямів під час підготовки до модульних контролів за результатами практичних занять з нормативної дисципліни «Фізика».

Наведено теоретичні відомості про взаємозв'язок між корпускулярними і хвильовими властивостями фотонів при дифракції світла на щілині та спосіб експериментальної перевірки співвідношення невизначеностей для координати та відповідної проекції імпульсу.

Відповідальний за випуск завідувач кафедри фізики проф. І.П. Гаркуша.

Друкується у редакційній обробці укладачів.

Лабораторна робота № 79

Експериментальне вивчення співвідношення невизначеностей

Ціль роботи: вивчення взаємозв'язку між корпускулярними і хвильовими властивостями фотонів при дифракції світла на щілині й експериментальне підтвердження співвідношення невизначеностей для координати та відповідної проекції імпульсу.

Основною у квантовій фізиці є ідея, яка полягає в тому, що корпускулярно-хвильова подвійність властивостей, яка уперше встановлена для світла, має універсальний характер. Це означає, що із часткою, що рухається, зв'язана деяка хвиля. Довжина цієї хвилі λ й імпульс частки p задовольняють співвідношенню де Бройля

$$\lambda = h / p, \quad (1)$$

де $h = 6.625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постійна Планка.

У класичній фізиці всяка частка рухається по певній траєкторії, так що в будь-який момент часу точно фіксовані її координата й імпульс. Корпускулярно-хвильова подвійність властивостей часток приводить до досить важливого питання про *границю застосовності* понять класичної фізики. Особливо це проявляється при розгляді руху мікрочастинок. Одне з основних розходжень полягає в тому, що не можна говорити про рух мікрочастинки по певній траєкторії й неправомірно говорити про одночасні точні значення її координат і відповідних проекцій імпульсу. Ця обставина не пов'язана з недосконалістю виміральної апаратури, а має принциповий характер. Наслідком цих обмежень є *співвідношення невизначеностей* для координат і відповідних проекцій імпульсів, які встановлені Гейзенбергом в 1927 році. Зокрема, для напрямку осі x воно має вигляд

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h. \quad (2)$$

Тут Δx - невизначеність координати x частки, а Δp_x - невизначеність проекції її імпульсу на цю вісь (Δ – середньоквадратичне відхилення). Співвідношення, аналогічне (2), має місце й для інших координатних осей, а також других пар величин. Читається (2) так: добуток невизначеностей координати та відповідної проекції імпульсу не може бути менше величини порядку h . З (2) випливає, що, чим точніше вимірюється координата частки в деякий момент часу, тобто чим менше Δx , тим менш точно може бути обмірювана проекція її імпульсу Δp_x й навпаки. Помітимо, що внаслідок малості постійної Планка співвідношення невизначеностей (2) не грає істотної ролі при описі руху макроскопічних об'єктів.

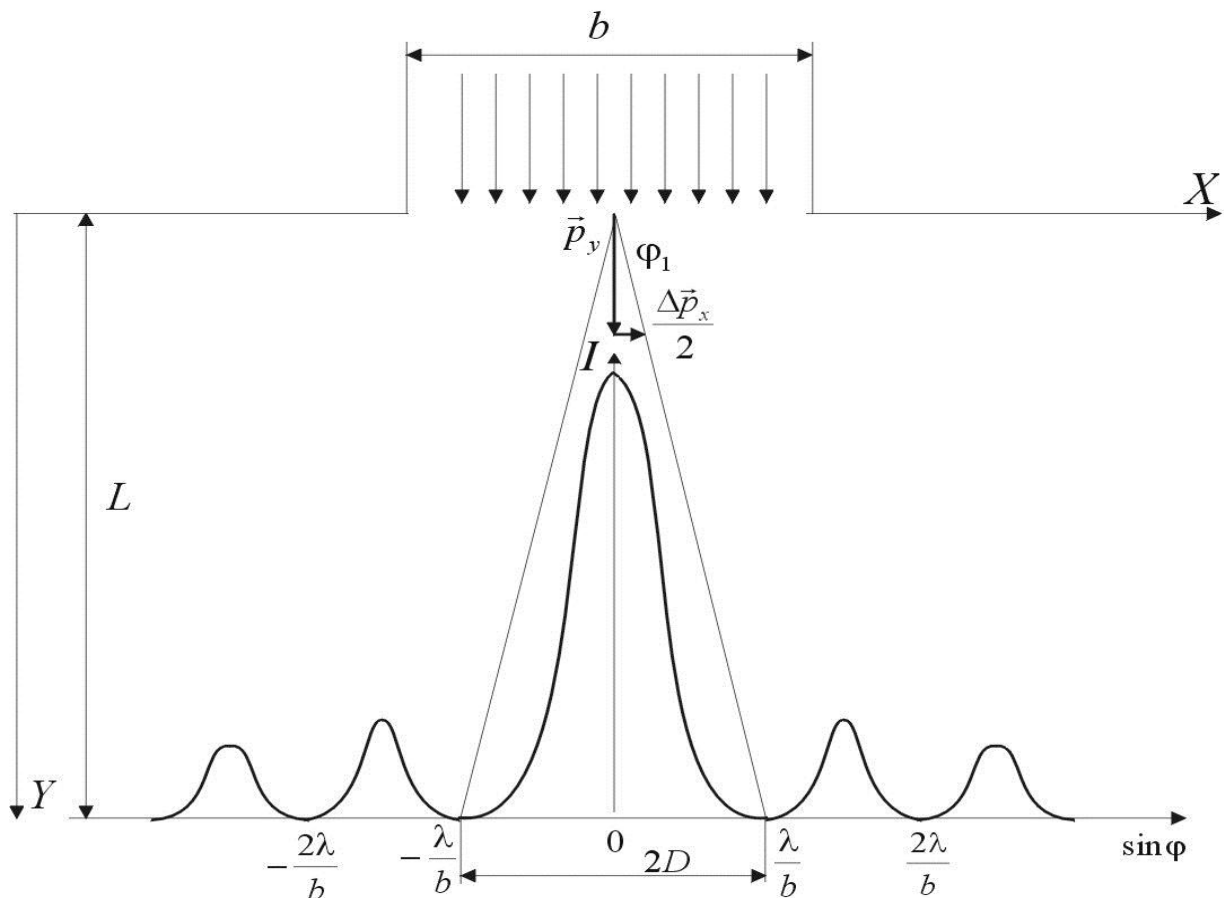
Проілюструємо співвідношення невизначеностей (2) розглядом процесу дифракційного розсіювання світла на щілині. Нехай паралельний пучок монохроматичного світла, який можна розглядати як плоску хвилю з довжиною λ , падає на прямокутну щілину шириною b (див. рис.). При проходженні через щілину спостерігається дифракція світла, яка полягає в тому, що промені відхиляються від прямолінійного поширювання і заходять в область тіні. В наслідок цього на екрані спостерігається чергування максимумів і мінімумів інтенсивностей світла. Можна показати, що інтенсивність випромінювання I_m в

напрямку максимуму порядку m дорівнює

$$I_m = \frac{4}{\pi^2 (2m+1)^2} \cdot I, \quad (3)$$

де I – інтенсивність світлової хвилі, що падає на щілину, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ – порядок максимуму.

Інтенсивність дифракційних максимумів швидко убуває зі збільшенням їхнього номера. Так, інтенсивність першого максимуму $I_1 = 4I/(9\pi^2) \approx 0,045I$, другого – $I_2 = 4I/(25\pi^2) \approx 0,016I$, третього – $I_3 = 4I/(49\pi^2) \approx 0,008I$ і т.д. Таким чином, основна частка інтенсивності випромінювання, що пройшло через щілину, доводиться на центральний максимум. Тому з достатнім ступенем точності можна вважати, що після проходження через щілину випромінювання поширюється в межах тригранної призми з кутом при вершині $2\varphi_1$.



З корпускулярної точки зору пучок світла, що випромінює лазер, можна розглядати як сукупність квантів (фотонів), що мають до падіння на щілину однаковий імпульс \vec{p} . Складова цього імпульсу уздовж осі абсцис $\vec{p}_x = 0$. При цьому координата x фотона (описуваного плоскою хвилею) зовсім не визначена. Після проходження щілини фронт хвилі, що описує фотон, деформується, він перестає бути плоским, і фотон здобуває кінцеву невизначеність координати x , причому з достатньою точністю можна вважати, що

$$\Delta x = b \quad (4)$$

З іншого боку, фотон, що пройшов через щілину шириною b , може мати проекцію імпульсу p_x , що лежить в інтервалі від $-p \sin \varphi_1$ до $+p \sin \varphi_1$ (нагадаємо, що випромінюванням, що попадає на екран за межами центрального максимуму, зневажаємо). Ширину цього інтервалу приймемо за невизначеність проекції імпульсу Δp_x , тобто

$$\Delta p_x = p \sin \varphi_1 - (-p \sin \varphi_1) = 2p \sin \varphi_1. \quad (5)$$

Знаючи, що $\varphi_1 \ll \pi/2$, можна записати

$$\sin \varphi_1 \approx \operatorname{tg} \varphi_1 = D/L, \quad (6)$$

де L – відстань від щілини до екрана. Відстань $D = D(b)$ залежить від ширини щілини.

Використовуючи тепер формули (1), (5) і (6), для невизначеності імпульсу одержимо вираження

$$\Delta p_x = \frac{2 \cdot D(b)}{\lambda L} h. \quad (7)$$

Співвідношення зручніше записати у вигляді

$$\Delta x \cdot \Delta p_x / h \geq 1. \quad (8)$$

Таким чином, якщо визначити Δp_x по (7) і взяти до уваги (4), то можна перевірити справедливість нерівності (8), а значить и (2), що і є основним завданням цієї роботи.

Опис експериментальної установки

Установка, яка використовується в даній роботі, збирається на лабораторному столі. Вона складається з гелій-неонового лазера, що дає випромінювання з високим ступенем часової й просторової когерентності, регульованої щілини й екрана, на якому спостерігається дифракційна картина. Пучок фотонів, що випромінюється лазером, проходить через калібровану щілину й попадає на екран з вимірювальною шкалою. Перевірка співвідношення невизначеностей (2) здійснюється шляхом виміру ширини щілини, що характеризує невизначеність координати фотона Δx , і ширини центрального максимуму дифракційної картини $2D$, що характеризує невизначеність імпульсу фотона Δp_x .

Завдання

1. Установити калібровану щілину на відстані 0.5 - 1 метр від екрана. Направити промінь лазера на щілину й, переміщаючи екран, одержати на екрані виразну дифракційну картину.
2. Змінюючи розмір щілини від 0.175 мм (35 поділок) до 0.5 мм (100 поділок), зробити 10 – 12 вимірів ширини $2D$ центрального максимуму дифракційної картини, яка спостерігається на екрані. Ширину центрального максимуму визначити як відстань між дифракційними мінімумами, що облямовують цей максимум.
3. По формулі (7) обчислити для кожного значення ширини щілини b величину Δp_x .
4. Побудувати графік залежності $\Delta p_x = f(b)$

5. Обчислити величину $\Delta x \cdot \Delta p_x / h$ й зробити висновок щодо дотримання співвідношення невизначеностей для координати й відповідної проекції імпульсу.
6. Результати вимірів й обчислень занести в таблицю 1.

Таблиця

№ п/п	λ	L	D	b	Δp_x	$\Delta x \cdot \Delta p_x / h$	Висновки з вимірів й обчислень
1.	$6.33 \cdot 10^{-7}$ м						
2.							
.							
.							

Контрольні питання

1. У чому полягає співвідношення невизначеностей у квантовій фізиці?
2. Чи може бути здійснений дослід, пропонується у цій роботі, якщо взяти не лазерне, а теплове джерело випромінювання?
3. Знайти імпульс фотона, що відповідає довжині хвилі випромінювання гелій-неонового лазера, і зрівняти його із середнім імпульсом молекули кисню при нормальних умовах. Оцінити, при якій температурі кисню ці імпульси приблизно рівні між собою.
4. Знайти масу світлового кванта, що випромінюється гелій-неоновим лазером і зрівняти її з масою спокою електрона. Чи можна виявити прояви цієї маси за допомогою сучасної виміральної техніки.
5. Знайти енергію світлового кванта, що випромінюється гелій-неоновим лазером. Яку прискорювальну різницю потенціалів повинен пройти електрон для того, щоб придбати таку енергію?

Література

1. Савельєв І.В., Курс фізики, т.3. Москва, «Наука», 1990.
1. Трофімова Т.І., Курс фізики, Москва, «Академія», 2005.
2. Сівухін Д.В., Загальний курс фізики, Атомна фізика, М.: «Наука», 1980.

Укладачі

Певзнер М. О., Солопов М. Д., Налбандян Л. П.,