

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

А.С. Климов, Ю.Г. Юшков

**ПРОВЕРКА СООТНОШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ
ДЛЯ ФОТОНОВ**

Руководство к лабораторной работе по физике

Томск
2023

УДК 531.1
ББК 22.3

Рецензент:

Быков В.И., доцент кафедры физики ТУСУР,
канд. физико-матем. наук

Климов, Александр Сергеевич

К492 Проверка соотношения неопределенностей для фотонов: руководство к лабораторной работе по физике / А. С. Климов, Ю.Г. Юшков – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 12 с.

В настоящей работе на примере дифракции лазерного излучения изучается соотношение неопределенностей Гейзенберга. Представлена краткая теория квантовой механики. Описаны экспериментальная установка для определения дифракции света, методика измерений и обработки результатов.

Методические указания предназначены для использования студентами всех специальностей при подготовке, выполнении и защите лабораторной работы по физике.

Одобрено на заседании каф. физики протокол №104 от 16.04.23

УДК 531.1
ББК 22.3

© Климов А.С., 2023

© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
2 СООТНОШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ.....	4
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СООТНОШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ.....	6
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА.....	9
5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	10
6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	12
7 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	12

ВВЕДЕНИЕ

Одним из фундаментальных положений квантовой механики является принцип неопределенности, сформулированный В. Гейзенбергом в 1927г. Значение этого принципа столь велико, что всего одного из соотношений неопределённостей достаточно для того, чтобы объяснить целый ряд основополагающих закономерностей физики микромира. В частности, оно позволяет объяснить тот факт, что электрон не падает на ядро атома, а также оценить размеры атома и минимально возможную энергию электрона в атоме.

Целью настоящей работы является проверка соотношения неопределенностей для фотонов.

2 СООТНОШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Всякий микрообъект (молекула, атом, электрон, фотон и т.д.) представляет собой образование особого рода, сочетающее в себе свойства и частицы, и волны. Например, фотоэффект и эффект Комптона привели к представлению о свете как о потоке частиц – фотонов, в то время как в явлениях дифракции, интерференции, поляризации свет проявляется в виде волн.

Де Бройль в 1924г. сделал смелое предположение об аналогичной двойственной природе электронов, а затем и других частиц. Это значит, что с движением электрона, также как с движением фотона, следует сопоставить волновой процесс. По де Бройлю электрон, подобно фотону, должен иметь длину волны

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} \quad (2.1)$$

где p – импульс электрона.

Будем называть частицы, обладающие корпускулярными и волновыми свойствами – *микрочастицами*.

Так как для описания свойств одних и тех же объектов приходится им приписывать то волновые, то корпускулярные свойства, то очевидно, этим объектам нельзя приписывать все свойства частиц или все свойства волн. Следовательно, применение к микрочастицам законов классической механики должно быть ограничено.

В классической механике для характеристики частицы в данный момент времени необходимо задать ее координаты (x, y, z) и скорость v (или импульс p). Состояние системы частиц считается заданным, если известны координаты и импульсы всех частиц системы. Наличие у микрочастиц волновых свойств делает невозможным такое описание системы микрочастиц.

Отличие микрочастицы от волны заключается в том, что она всегда обнаруживается как неделимое целое. Никому еще не удавалось наблюдать, например, пол-электрона. Волну же можно разделить на части, например, направив ее на полупрозрачное зеркало, и воспринимать затем каждую часть в отдельности. Отличие микрочастицы от макрочастицы заключается в том, что ей не могут быть приписаны одновременно определенные значения координаты и соответствующей проекции импульса. Вследствие этого, понятие траектории применительно к микрочастицам теряет смысл. Справедливость последнего утверждения подтверждается совокупностью известных в настоящее время экспериментальных фактов, и математически оно выражается следующим соотношением:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \quad (2.2)$$

Где Δx и Δp_x – неопределенности значений координаты x и проекции импульса p_x соответственно; \hbar – постоянная Планка.

Из (2.2) следует, что чем меньше неопределенность одной из переменных (x или Δp_x), тем больше неопределенность другой. Возможно такое состояние микрочастицы, в котором одна из переменных имеет точное значение (ее неопределенность равна нулю), другая переменная при этом оказывается совершенно неопределенной (ее неопределенность равна бесконечности).

Соотношения, аналогичные (2.2), имеют место для y и p_y , для z и p_z , а также для целого ряда других величин, которые в классической механике называются канонически сопряженными. Обозначив канонически сопряженные величины буквами A и B , можно записать:

$$\Delta A \cdot \Delta B \geq \frac{\hbar}{2} \quad (2.3)$$

Неравенство (2.3) называется соотношением неопределенностей Гейзенберга для физических величин A и B . Оно гласит о том, что произведение неопределенностей значений двух сопряженных переменных не может быть по порядку величины меньше постоянной

Планка.

Соотношение неопределенностей – фундаментальный закон природы, который не выводится, не доказывается теоретически, а должен быть принят как установленный экспериментальный факт.

Величины ΔA и ΔB неправильно было бы понимать только как неточности измерения величин A и B , поскольку сам термин «неточность» как бы предполагает, что существуют и точные значения A и B (например, координаты и импульса), но только они почему-то не могут быть измерены. На самом деле невозможность точного измерения есть следствие того, что микрочастица по своей природе не имеет одновременно точного значения координат и импульса. Чем точнее мы определяем координату микрочастицы, тем менее точно мы определим ее импульс и наоборот.

Таким образом, наличие у микрочастиц волновых свойств делает невозможным описание системы микрочастиц с помощью законов классической механики. Но в некоторых случаях, приближено, можно рассматривать микрочастицу как механическую частицу. Степень пригодности такого представления микрочастиц дается соотношением неопределенностей Гейзенберга (2.3). Для его обоснования рассмотрим пример с дифракцией фотонов на щели, о котором пойдет речь в следующем параграфе.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СООТНОШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Проверить справедливость соотношения неопределенностей можно в опыте по дифракции фотонов.

Рассмотрим поток фотонов, каждый из которых обладает энергией ε . Пусть этот поток падает слева на непрозрачный экран M , в котором имеется щель шириной b (рисунок 3.1).

Как уже говорилось, все микрочастицы представляют собой образования особого рода, сочетающие в себе свойства и частицы, и волны. Поэтому поток фотонов с заданной энергией можно рассматривать как пучок монохроматического света с длиной волны λ или частотой ν . Причем между введенными характеристиками фотона как частицы (ε , p) и как волны (λ , ν) существует вполне определенная связь:

$$\varepsilon = pc = 2\pi\hbar\nu = \frac{2\pi c\hbar}{\lambda} \quad (3.1)$$

где c – скорость света в вакууме.

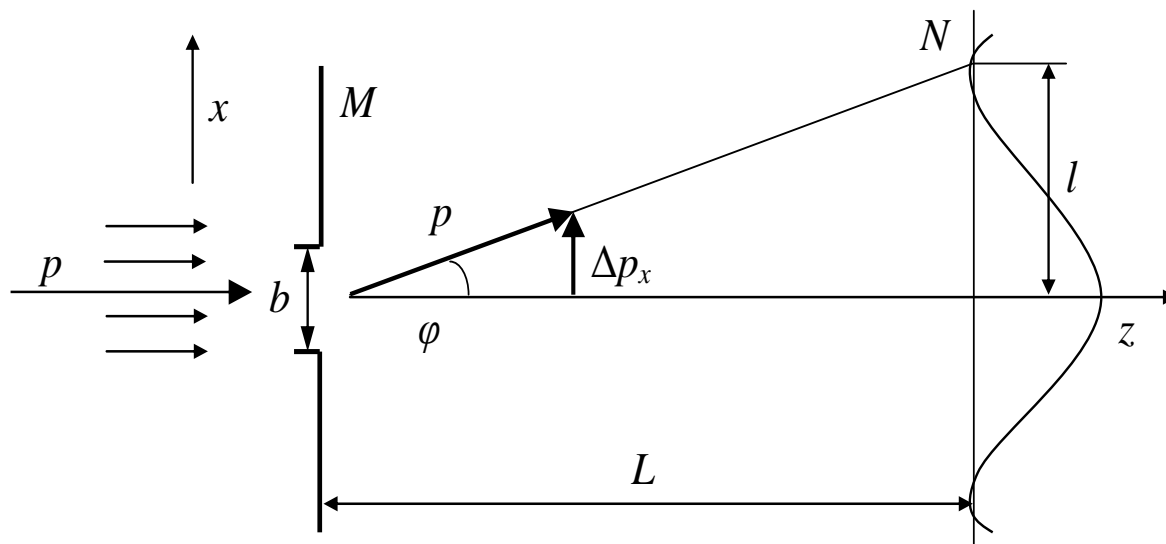


Рисунок 3.1. Схема опыта по дифракции фотонов

Если на расстоянии L ($L \gg b$) от экрана M поместить второй непрозрачный экран N , то, как известно из курса оптики, на этом экране будет наблюдаться дифракционная картина, распределение освещенности для которой показано на рис. 3.1.

С точки зрения волновой оптики явление дифракции объясняется перераспределением светового потока в результате суперпозиции волн.

Рассмотрим теперь эту дифракционную картину с точки зрения представления о свете, как о совокупности световых квантов – фотонов. Если фотоны проходят через щель в экране M поодиночке, то каждый фотон попадает в определенную точку на экране N . Предсказать, в какую именно точку попадет один отдельно взятый фотон, принципиально невозможно. Однако в совокупности большое число попавших на экран N фотонов дает дифракционную картину. Проследим, как происходит движение фотона в рассматриваемой системе. До щели в экране M распространяется плоская монохроматическая волна, т.е. нам точно известен импульс фотонов

$$p = \frac{2\pi\hbar}{\lambda} \quad (3.2)$$

направленный по оси OZ . Составляющий импульса фотона по оси OX равна нулю, т.е. известна точно, но зато совершенно не определена x – координата фотона. При прохождении фотона через щель в экране M ширина щели b будет служить мерой неопределенности Δx значения координаты фотона x . В самом деле, факт появления фотона на экране N позволяет сделать лишь тот вывод, что фотон проник сквозь щель; в какой же именно точке щели это произошло, совершенно неизвестно. Далее, по корпускулярным представлениям возникновение на экране дифракционной картины следует истолковать в том смысле, что каждый отдельно взятый фотон, пройдя через щель, отклоняется либо вверх, либо вниз. Но для этого фотон должен приобрести составляющую импульса Δp_x , перпендикулярную направлению первоначального движения. Величина полного импульса фотона p , как следует из (3.2), при этом не меняется, поскольку остается неизменной длина волны.

Зададимся вопросом: «В результате чего фотоны приобретают составляющую импульса, перпендикулярную направлению первоначального движения?» Ответ может быть только один: «В результате «взаимодействия» со щелью в экране M , поскольку никаким другим воздействиям фотоны не подвергались». А в чем же заключается «взаимодействие» фотона со щелью? Ясно, что это не есть взаимодействие в классическом смысле, т.к. размеры щели много больше размеров фотона. В такой ситуации классическая частица просто «не заметила» бы щели на своем пути и продолжала бы двигаться в прежнем направлении. Квантовая же частица, в силу уже упомянутых выше необычных своих свойств, «чувствует» любые изменения окружающего ее пространства. Поэтому стоило измениться пространству, окружающему рассматриваемые фотоны (появилась пусть и широкая, но щель – пространство вдоль оси OX «сжалось»), как они тут же «отреагировали». Причем, чем уже щель, через которую должны проходить фотоны, тем более вероятным становится их отклонение на большие углы от направления первоначального движения.

Оценим произведение $\Delta x \cdot \Delta p_x$. Выше отмечалось, что в качестве неопределенности в определении координаты фотона в рассматриваемом опыте выступает ширина щели, т.е.

$$\Delta x = b \quad (3.3)$$

Определить значение составляющей Δp_x для каждого фотона

невозможно, т.к. принципиально невозможно предсказать, куда попадет каждый отдельный фотон, но мы знаем, что большая часть фотонов попадает в область главного максимума. (Поскольку освещенность в максимумах дифракционной картины спадает в пропорции 1000:47:17, вероятностью попадания фотонов в побочные максимумы можно пренебречь). Поэтому из рисунка ясно, что мера неопределенности компоненты импульса p_x после прохождения фотона через щель есть

$$\Delta p_x = p \cdot \sin \varphi \quad (3.4)$$

где φ – угол, характеризующий направление на первый минимум дифракционной картины.

Умножая почленно (3.3) на (3.4), получаем, что произведение неопределенностей Δx на Δp_x может быть вычислено по формуле $\Delta x \cdot \Delta p_x = b \cdot p \cdot \sin \varphi$, или, учтя соотношение (3.1),

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = b \cdot \frac{\varepsilon}{c} \cdot \sin \varphi \quad (3.5)$$

Последнее выражение позволяет провести экспериментальную проверку соотношения неопределенностей для фотонов с известной энергией.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для экспериментальной проверки соотношения неопределенностей собирается установка по схеме, изображенной на рисунке 4.1. Установка состоит из гелий-неонового лазера ЛГН-105 (1), рамки со щелью (2), укрепленной в держателе, и экрана (3). Длина волны излучения гелий-неонового лазера $\lambda = 632,8$ нм. Все детали установки расположены на оптической скамье (4). Внешний вид установки показан на рисунке 4.2.

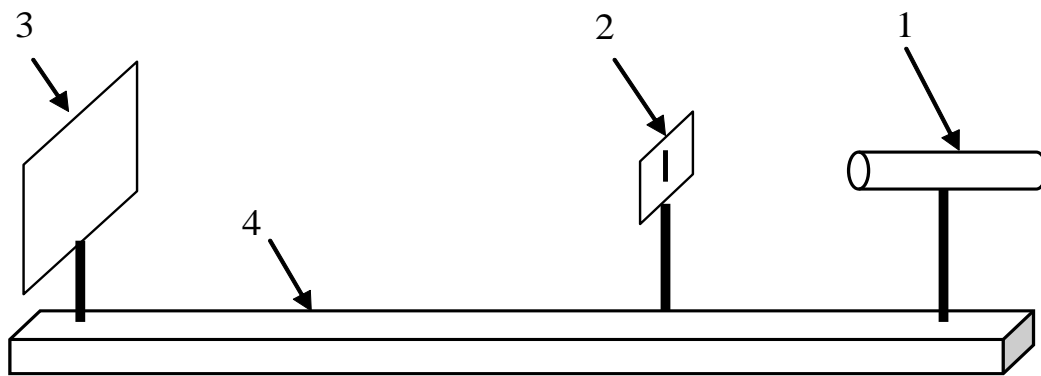


Рисунок 4.1 Схема экспериментальной установки

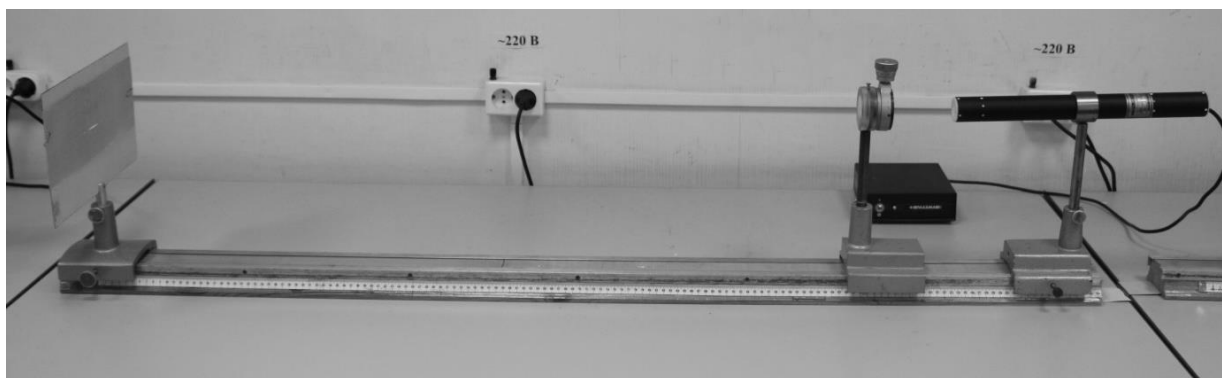


Рисунок 4.2 Фотография экспериментальной установки

5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Установить лазер в начале оптической скамьи и включить его, для чего необходимо включить вилку сетевого шнура в розетку, перевести тумблер СЕТЬ в положение ВКЛ.

5.2. Установить экран в конце оптической скамьи перпендикулярно оси лазерного луча.

5.3. На расстоянии 1,0-1,5 м от экрана установить оправу со щелью. На экране должна появиться дифракционная картина. Поскольку поперечное сечение пучка падающих лучей невелико, дифракционные максимумы будут представлять собой вертикальные черточки, разделенные минимумами.

5.4. Закрывать щель полностью и снять при этом отсчет по шкале микровинта. Точность нулевого отсчета ширины щели имеет важное значение для качественного выполнения всей работы. Поэтому необходимо тщательно определить момент полного закрытия щели, несколько раз открывая и закрывая щель и наблюдая появление и исчезновение дифракционной картины на экране.

ВНИМАНИЕ! Запрещается смотреть через щель в выходное окно лазера и таким образом фиксировать момент закрытия щели. Это опасно для зрения!

5.5. Медленно открывая щель, измерить зависимость ширины центрального максимума дифракционной картины $2l$ от ширины щели b . Полученные результаты занести в табл.5.1.

Таблица 5.1 – Результаты эксперимента и расчетов.

$L = \dots, \text{ м}$			$L = \dots, \text{ м}$			$L = \dots, \text{ м}$		
$b, \text{ м}$	$2l, \text{ м}$	$\Delta x \cdot \Delta p_x,$ Дж·с	$b, \text{ м}$	$2l, \text{ м}$	$\Delta x \cdot \Delta p_x,$ Дж·с	$b, \text{ м}$	$2l, \text{ м}$	$\Delta x \cdot \Delta p_x,$ Дж·с

5.6. Измерить расстояние L от экрана до щели.

5.7. Выполнить п.п. 5.4-5.6 для нескольких значений L .

5.8. Вычислить энергию фотона ϵ , используя выражение (3.1) и учитывая, что $\lambda = 632,8 \text{ нм}$.

5.9. Вычислить произведение $\Delta x \cdot \Delta p_x$ с помощью формулы (3.5), учитывая, что при $l \ll L$ можно считать, что

$$\sin \varphi \approx \text{tg} \varphi \approx \frac{l}{L}$$

Вычисленные значения $\Delta x \cdot \Delta p_x$ занести в таблицу 5.1.

5.10. Сравнить полученные значения произведений $\Delta x \cdot \Delta p_x$ с величиной постоянной Планка. Убедиться в справедливости соотношения неопределенностей: $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$, для всех без исключения измеренных значений Δx и Δp_x .

5.11. Сделать выводы.

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Почему принцип неопределенности считается одним из основополагающих принципов квантовой механики?

6.2. Почему в квантовой механике неприменимо понятие траектории микрочастицы?

6.3. Какие экспериментальные факты подтверждают справедливость принципа неопределенности?

6.4. Как объясняется с квантомеханической точки зрения увеличение ширины дифракционных максимумов с уменьшением ширины щели?

6.5. Как определяется в данной работе энергия фотона?

6.6. С какой целью в данной работе рекомендуется проводить измерения при нескольких значениях L ?

7 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

7.1. Савельев, И. В. Курс физики : учебное пособие : в 3 томах / И. В. Савельев. — 7-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, [б. г.]. — Том 3 : Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц — 2019. — 308 с.

7.2. Иродов, И.Е. Задачи по общей физике: Учебное пособие [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2018. — 420 с.

7.3. Мухачев, В. А. Оценка погрешностей измерений: Методические указания к лабораторной работе [Электронный ресурс] / В. А. Мухачев. — Томск: ТУСУР, 2012. — 24 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1099> (дата обращения: 10.04.23).

7.4 Зенин, А. А. Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе по физике: Методические указания [Электронный ресурс] / А. А. Зенин. — Томск: ТУСУР, 2019. — 20 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/8957> (дата обращения: 10.04.23).