

**РОЛЬ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА В
СОВРЕМЕННЫХ КВАНТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ****Коржавов Мустафа Жовлиевич**

Каршинский инженерно-экономический институт

и.о.доцента

E-mail: korjavovmustafa@gmail.com Тел: 97 560-06-24

АННОТАЦИЯ В статье студентам, изучающим электронику и приборостроение предпринята попытка объяснить неточность приборов, измеряющих макроскопические величины, при измерении микроскопических величин, ограниченность применения представлений классической физики с помощью соотношений неопределенностей Гейзенберга. Разъясняется принцип работы измерительных приборов, основанных на законах квантовой физики.

Ключевые слова: недетерминизм, классическая механика, микрометр, неопределенности Гейзенберга, числа фотонов, неопределенность фазы, волны де-Бройля.

ABSTRACT In the article, an attempt is made to students studying electronics and instrumentation to explain the inaccuracy of instruments measuring macroscopic quantities when measuring microscopic quantities, the limitations of using the concepts of classical physics using Heisenberg's uncertainty relations. The principle of operation of measuring instruments based on the laws of quantum physics is explained.

Key words: nondeterminism, classical mechanics, micrometer, Heisenberg uncertainties, photon number, phase uncertainty, de-Broyle waves.

ANNOTATSIYA Maqolada elektronika va asbobsozlik fanini o'rganayotgan talabalarga mikroskopik miqdorlarni o'lchashda makroskopik miqdorlarni o'lchaydigan asboblarning noto'g'riligini, Geyzenbergning noaniqlik munosabatlaridan foydalangan holda klassik fizika tushunchalaridan foydalanish

cheklovlarini tushuntirishga harakat qilinadi. Kvant fizikasi qonunlariga asoslangan o'lchov vositalarining ishlash prinsipi tushuntiriladi.

Kalit so'zlar: nodeterminizm, klassik mexanika, mikrometr, Geyzenberg noaniqliklari, fotonlar soni, faza noaniqligi, de-Broyl to'lqinlari.

Введение. В начале XX века стало ясно, что классическая физика непригодна при анализе явлений атомного масштаба. Какие же черты классического способа описания физических явлений делают его неприменимым для описания микрообъектов, и где проходит граница применимости представлений классической физики? Недетерминизм квантовой физики проявляется ограничениях на точность решения задач классической механики [1-3]. В тех условиях, когда квантовые эффекты становятся существенными (квант энергии становится сравним с характерным масштабом изменения энергии в задаче), возникает другая проблема, называемая проблемой измерения.

Анализ литературы. Классическая механика описывается координатами и импульсами (скоростями) частиц системы. Начальные условия задачи классической механики- это набор координат и импульсов (скоростей) частиц в начальный момент времени. В классической механике нет никакой проблемы в том, чтобы измерить (или что, то же самое, задать) и координаты, и импульсы всех частиц одновременно. Однако в квантовой теории оказывается, что такое измерение невозможно в принципе. Это связано с тем, что в процессе измерения происходит взаимодействие изучаемой частицы с «инструментом», которым производится измерение. Чтобы проиллюстрировать это, рассмотрим задачу об измерении координаты или импульса микрочастицы подробнее. Итак, пусть есть частица и мы хотим определить её координаты в пространстве. Если нужно грубое измерение — мы берём линейку и измеряем координаты частицы. Для более точного измерения мы воспользуемся более точным прибором, например,

микрометром. Но тут в какой-то момент возникает проблема, связанная с тем, что для того чтобы «рассмотреть» нашу частицу, мы должны её осветить, а тогда точность определения её положения ограничивается дифракционными эффектами: приближённо длиной волны используемого излучения. Мы можем уменьшать длину волны, усиливать интенсивность излучения, чтобы сделать определение положения частицы более точным. Но при этом наше излучение начинает взаимодействовать с частицей, как минимум давить на неё (существование давления света следует из классической электродинамики) - возникает сила, действующая на частицу, возникает смещение частицы под действием этой силы. В результате, к тому моменту, когда мы закончили наше измерение частица оказалась в новом положении из-за взаимодействия с прибором, который измеряет её положение - так что результат точных измерений потерял практический смысл.

Методология исследования. Аналогичная проблема возникнет, если мы попытаемся измерить импульс (скорость) частицы. Определить скорость можно измерив два раза положения частицы - но при повышении точности уже первое измерение исказит состояние частицы, как описано выше, так, что полученный результат не будет иметь никакого отношения к реальной скорости частицы. Можно наоборот, измерить импульс частицы, воспользовавшись законом сохранения импульса - но тогда частица передав весь свой импульс «прибору» остановится. Таким образом, оказывается принципиально невозможным измерить координаты или импульсы объекта, не внося изменений в его состояние. И чем точнее желаемое измерение, тем больше отличается состояние объекта (частицы, например) после измерения от состояния до измерения. Это ограничение, впрочем, позволяет определить координаты или импульсы частицы со сколь угодно высокой точностью - просто после измерения состояние частицы будет совершенно другим. Но оказывается, что никакими способами нельзя одновременно точно измерить

координату и проекцию импульса на это направление. Более того, существуют и другие пары величин, которые принципиально нельзя одновременно точно измерить. Поясним ещё раз эту проблему на примере координаты и импульса. Дело в том, что гипотетические «приборы» для измерения координаты и импульса выдвигают несовместимые требования. Для точного измерения координаты нам необходимо остановить частицу. Например, вынудить реакцию частицы с зерном фотоэмульсии. При этом нам не важно, куда уйдёт импульс частицы - передастся атому серебра в фотоэмульсии, излучится в виде света или упругих волн в кристалле. Для измерения импульса нам, наоборот, важно чтобы импульс частицы полностью передался «прибору», без неконтролируемых потерь, для чего частица должна «завязнуть» в «приборе» подобно пуле в баллистическом маятнике. При этом нам совершенно не важно, где остановится частица внутри «прибора». Таким образом, пытаясь получить точную информацию о координате мы теряем информацию об импульсе, и наоборот. Лучшее что возможно - это некоторый компромисс, когда и координата, и соответствующая проекция импульса известны с некоторой неопределённостью.

Пределы применимости представлений классической физики, то есть классического способа описания явлений микромира, устанавливаются так называемыми соотношениями неопределенностей Гейзенберга. Рассматривая различные способы измерения положения и импульса частицы, 1927 году В. К. Гейзенберг пришел к выводу о том, что условия, благоприятные для точного измерения положения частицы, неблагоприятны для точного измерения ее импульса и наоборот. Одно из соотношений Гейзенберга связывает между собой неопределенности в значениях координаты частицы x и соответствующей компоненты импульса p_x в один и тот же момент времени:

$$\Delta x \Delta p_x \geq h/2. \quad (1)$$

Эта невозможность есть проявление корпускулярно-волновой природы материальных микрообъектов. Аналогичные соотношения справедливы и для других координат и компонент импульса:

$$\Delta y \Delta p_y \geq h/2; \quad (2)$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq h/2. \quad (3)$$

При измерениях в микроскопических масштабах даже самая совершенная и точная приборы измерения будет давать результаты, которые принципиально имеют статистическую природу. Повторение измерений в одних и тех же условиях будет давать разные значения измеряемой величины. Каждое значение будет появляться с той или иной вероятностью, зависящей от способа измерения. Сам процесс измерения может воздействовать на физическую систему таким образом, что одновременно определить две сопряженные переменные можно лишь с конечной точностью, которая задается соответствующим соотношением неопределенностей.

Неопределенность физической величины – среднее квадратическое отклонение от среднего значения: $A = \sqrt{\langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2}$. В связи с тем, что постоянная Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{c}$ чрезвычайно мала, то выражение при макроскопических измерениях лишено практического смысла.

Анализ и результаты. Неопределенность координаты и импульса, которая следует из (1-3), лежит далеко за пределами достижимой точности экспериментов. Аналогично выражению (1-3) формулируется соотношение неопределенностей для другой пары сопряженных величин – энергии и времени:

$$\Delta E \Delta t \geq h/2. \quad (4)$$

Это соотношение связывает неопределенность энергии атомной системы ΔE с неопределенностью времени Δt в течение которого измеряется энергия. Если применить соотношение неопределенностей между энергией и временем к

спонтанному распаду в системах, находящихся в квазистационарных состояниях, то экспоненциальное распределение измеренных значений времени распада даст величину стандартного отклонения, который называют Δt - средним временем жизни состояния.

Применим соотношение (4) к монохроматическим электромагнитным волнам. Для полного описания волны нужно измерить как ее амплитуду, так и фазу φ , причем $\varphi = \omega t$. Неопределенность фазы $\Delta\varphi$ связана с неопределенностью продолжительности измерения Δt :

$$\Delta\varphi = \omega \cdot \Delta t. \quad (5)$$

При измерении амплитуды нужно определить число фотонов N , прошедших через точку измерения за промежуток времени Δt . Используя соотношение $E = N\hbar\omega$, получим неопределенность энергии

$$\Delta E = \hbar\omega \cdot \Delta N. \quad (6)$$

Отсюда получим соотношение неопределенностей для числа фотонов и фазы электромагнитной волны

$$\Delta N \cdot \Delta\varphi \geq 1/2. \quad (7)$$

Соотношение (7) определяет абсолютную границу точности измерения электромагнитных сигналов, особенно в оптической области, где в отличие от радиочастотного диапазона при той же мощности излучения, из-за большой энергии квантов число фотонов, фиксируемых за характерное время измерения Δt , а значит и неопределенность ΔN ненамного больше единицы. Поэтому неопределенность фазы велика. Состояние когерентных электромагнитных волн определено с максимальной точностью, и для них в соотношении (7) стоит знак равенства [4].

Чтобы полностью достичь нашей цели, мы решим несколько физических задач, связанных с неопределенностями Гейзенберга.

1. Какую энергию необходимо дополнительно сообщить электрону, чтобы его дебройлевская длина волны уменьшилась от 100 до 50 pm ?

Решение. Энергия релятивистского электрона равна $E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$.

Учитывая, что $\lambda_B = \frac{h}{p}$ – длина волны де Бройля для электрона, получим

$$\begin{aligned} \Delta E &= \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} = \sqrt{\frac{h^2 c^2}{\lambda_2^2} + m^2 c^4} - \sqrt{\frac{h^2 c^2}{\lambda_1^2} + m^2 c^4} = \\ &= \sqrt{\frac{(6,63 \cdot 10^{-34} \text{ j} \cdot \text{c})^2 \left(3 \cdot \frac{10^8 \text{ m}}{\text{c}}\right)^2}{(50 \cdot 10^{-12} \text{ m})^2} + (9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})^2 \left(3 \cdot \frac{10^8 \text{ m}}{\text{c}}\right)^4} - \\ &\quad - \sqrt{\frac{(6,63 \cdot 10^{-34} \text{ j} \cdot \text{c})^2 \left(3 \cdot \frac{10^8 \text{ m}}{\text{c}}\right)^2}{(100 \cdot 10^{-12} \text{ m})^2} + (9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})^2 \left(3 \cdot \frac{10^8 \text{ m}}{\text{c}}\right)^4} = \\ &= 7,3 \cdot 10^{-14} \text{ J}; \quad \text{Ответ: } \Delta E = 7,3 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 0,45 \text{ keV}. \end{aligned}$$

2. Параллельный пучок моноэнергетических электронов падает нормально на диафрагму с узкой прямоугольной щелью шириной $b = 1 \mu\text{m}$. .
 Определить скорость этих электронов, если на экране, отстоящем от щели на расстоянии $l = 50 \text{ cm}$, ширина центрального дифракционного максимума $\Delta x = 0,36 \mu\text{m}$.

Решение. Вследствие дифракции с наибольшей вероятностью электрон будет двигаться в пределах угла, 2φ , где φ – угол, соответствующий первому дифракционному минимуму (рис. 1).

он определяется условием $b \cdot \sin\varphi = \lambda_B$,

где, $\lambda_B = \frac{h}{m\vartheta}$ -де-Бройлевская длина волны электрона.

В пределах малых углов $\sin\varphi = \operatorname{tg}\varphi = \frac{\Delta x}{2l}$, $\frac{b\Delta x}{2l} = \lambda_B$;

$$\frac{b\Delta x}{2l} = \frac{h}{m\vartheta}.$$

Тогда $\vartheta = \frac{2lh}{\Delta x mb}$.

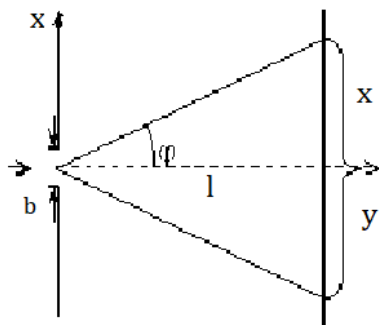


рис.1.

Откуда, $\vartheta = \frac{2 \cdot 0,5m \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{c}}{10^{-6} \text{ m} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 0,36 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 2 \cdot 10^6 \text{ m/c}$.

Ответ. $\vartheta = 2 \cdot 10^6 \text{ m/c}$.

3. Оценить неопределенность скорости частицы, неопределенность координаты которой $\Delta x = \frac{\lambda}{2\pi}$,

где λ – ее дебройлевская длина волны.

Решение. При решении задачи будем считать, что

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Запишем соотношение неопределенностей в виде $\Delta x \cdot \Delta \vartheta_x \geq \frac{\hbar}{m}$.

Тогда $\frac{\lambda}{2\pi} \cdot \Delta \vartheta_x \geq \frac{\hbar}{m}$. Учитывая, что $\lambda_B = \frac{h}{m\vartheta_x}$,

получим $\frac{h}{m\vartheta_x} \cdot \Delta \vartheta_x \geq \frac{\hbar}{m}$. Откуда $\Delta \vartheta_x \geq \vartheta_x$ или $\Delta \vartheta_x \sim \vartheta_x$.

Ответ: $\Delta \vartheta_x \sim \vartheta_x$.

Заключение. Таким образом, корпускулярно-волновой дуализм присущ всем видам материи. Согласно двойственной корпускулярно-волновой природе частиц вещества для описания микрочастиц используют то волновые, то корпускулярные представления. Поэтому приписывать им *все* свойства частиц и *все* свойства волн нельзя. Например, в классической механике любая частица движется по определенной траектории так, что в каждый момент времени четко фиксированы ее координата и импульс. В квантовой механике говорить о движении частицы по определенной траектории нельзя. И хотя к атомному объекту одинаково применимы понятия «частица» и «волна», однако определить их строго можно только порознь [5-8].

Соотношение неопределенностей – строгий закон природы, который никак не связан с несовершенством измерительных приборов.

Список литературы

1. Korjavov M. J. Kvant fizikasida determinizm tamoilini rad etish //Results of National Scientific Research International Journal. – 2022. – Т. 1. – №. 8. – С. 220-229.
2. Коржавов М. Ж. Проблемы классической физики конца XIX века. Возникновение квантовой теории // " England" Modern psychology and pedagogy: problems and solution. – 2023. – Т. 10. – №. 1.
3. Korjavov M. J. Some Methodological Methods Of Solving Issues From Quantum Physics //Texas Journal of Multidisciplinary Studies. – 2022. – Т. 5. – С. 188-192.
4. В.В. Чесноков. Физические основы измерений: учеб. пособие / – Новосибирск : СГГА, 2008. – 101 с.
5. Jovliev S.M. Specialty of technological processes and production automation – profession of the XXI century //ResearchJet Journal of Analysis and Inventions. – 2021, May. –Т.2. №.05. –С. 15-19.

6. Korjavov M. J. Kvant mexanikasi bo‘limi masalalarini yechishning ayrim metodolik jihatlari. Fizika, matematika va informatika ilmiy-uslubiy jurnali. 2022 yil 2-son. 19-28 betlar.

7. Коржавов М. Ж. Исследование вероятности электрического E2-перехода в изотопах вольфрама. Modern Scientific Research International Scientific Journal 2023 Volume 1 Issue 7, 31-35 pages.

<https://academicsresearch.ru/index.php/MSRISJ/issue/view/99>

8. Jovliyev Sarvar Mustafo o'g'li. Mahsulot sifatini boshqarish va taxlil qilish statistik usullarining yetti instrument usullari // Eurasian journal of academic research, (2022). 2(6), 41–45. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6616058>

<https://www.in-academy.uz/index.php/ejar>