

УДК 372.853

## СПІВВІДНОШЕННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ ГЕЙЗЕНБЕРГА У ФОРМУВАННІ ФІЗИЧНОЇ КАРТИНИ СВІТУ

**Клавдія Зикова**

*Бердянський державний педагогічний університет*

*Анотація. Стаття присвячена формуванню поняття кванта, принципу невизначеності, фізичної картини світу на основі співвідношення невизначеностей Гейзенберга. За допомогою побудови графіків залежностей значень похибки координати  $\Delta x$  від імпульсу  $\Delta p$ , координати  $\Delta x$  від швидкості електрона  $\Delta v$ , часу  $\Delta t$  від енергії електрона  $\Delta E$ , учні наочно переконуються у неможливості точного визначення двох параметрів одночасно. Тобто, точність вимірів не залежить від апаратури, а залежить від способу спостереження. Розроблена методика вивчення співвідношення невизначеностей Гейнзеберга показує особливості квантової фізики, формує фундаментальний принцип невизначеності, принцип невизначеності Гейзенберга, співвідношення невизначеностей. Робота учнів в програмі Microsoft Excel сприяє розвитку вмінь аналізувати результати дослідження та наглядно їх відображати. На основі цих понять в учнів завершується формування релятивістської картини світу, мікросвіту, фізичної картини світу.*

**Ключові слова:** *навчання фізики, картина світу, співвідношення невизначеностей, квант, стала Планка, імпульс, координата, енергія, час.*

*Клавдія Зикова*

## СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ГЕЙЗЕНБЕРГА В ФОРМИРОВАНИИ ФИЗИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ МИРА

*Аннотация. Статья посвящена формированию понятия принципа неопределенности, физической картины мира на основе соотношения неопределенностей Гейзенберга. С помощью построения графиков зависимостей значений погрешности координаты  $\Delta x$  от импульса  $\Delta p$ , координаты  $\Delta x$  от скорости электрона  $\Delta v$ ,  $\Delta t$  от энергии электрона, учащиеся наглядно убеждаются в невозможности точного определения двух параметров одновременно.*

*Ключевые слова:* квантовая физика, физическая картина мира, соотношение неопределенностей Гейзенберга, квант, постоянная Планка, импульс, координата, энергия, время.

*Klavdiia Zyкова*

#### *THE HEISENBERG UNCERTAINTY RELATION IN THE FORMATION OF PHYSICAL PICTURE OF THE WORLD*

*Abstract: The article is devoted to the concept of quantum, the uncertainty principle, the physical picture of the world on the basis of Heisenberg's uncertainty principle. Students should generate the following concepts, namely the uncertainty principle, the uncertainty principle of the Heisenberg uncertainty relation. The uncertainty principle – a fundamental premise of quantum theory that States that the characteristics of the system, i.e. additional physical quantities (e.g. position and momentum) cannot simultaneously make the exact values. This principle reflects the wave-particle dual nature of particles of matter (electrons, protons, etc.). Pay attention of pupils that impulse is the product of mass and velocity, that is, when we talk about the uncertainty of momentum we're talking about the uncertainty of the particle velocity.*

*For the assimilation of new material offered to the students to solve the following problem in Excel: to determine the accuracy of the pulse  $\Delta p$  with an error of coordinates  $\Delta x$ . By constructing graphs of the dependencies of the error values of the coordinates  $\Delta x$  from the pulse  $\Delta p$ , the coordinates  $\Delta x$  from the*

*electron velocity,  $\Delta v$ ,  $\Delta t$  of the energy of the electron, the students clearly convinced of the impossibility of a precise definition of the two parameters at the same time. In quantum mechanics it is impossible to specify the positions and velocities of all particles and to obtain the correct results for both parameters. Accurate measurements can be obtained only coordinates or momentum (velocity) of the particle. That is, the measurement accuracy does not depend on the instrument, and depends on the method of observation. It is impossible to exactly measure the kinetic energy of a particle in an infinitely small period of time. This will form the relativistic picture of the world, which is in contrast to Newtonian does not give the exact value of the several parameters of the system. A strict interpretation of the ratio of the uncertainty in the experiments with electrons following: like light waves the electrons resist any attempts to carry out measurements with the utmost precision.*

*The methodology of the study the uncertainty relation of Heinsberg shows the features of quantum physics generates fundamental uncertainty principle, the uncertainty principle of the Heisenberg uncertainty relation. Work in Microsoft Exel develops the analysis of the data, sorting the data and their visual display. On the basis of these concepts the students have completed the formation of relativistic picture of the world of the microcosm, the physical picture of the world.*

***Keywords:** quantum physics, physical world, the Heisenberg uncertainty relation, quantum, Planck's constant, the momentum, the coordinate, energy and time.*

**Постановка проблеми.** Навчальний предмет фізика за своїм змістом має значні можливості для формування в учнів наукового світогляду. Процес його формування при вивченні фізики включає такі елементи, як розкриття матеріальної природи фізичних явищ, що досліджуються, встановлення істотних зв'язків між явищами та їх пояснення, розкриття

об'єктивного характеру фізичних законів, переконання учнів у можливості пізнання законів природи та використання їх для потреб суспільства.

У програмі старшої школи останнім розділом в курсі фізики вивчається «Атомна і ядерна фізика». Він включає квантові властивості випромінювання атомів і елементи ядерної фізики, де також використовуються квантові уявлення. Таким чином, більша частина матеріалу виявляється об'єднаною навколо головної ідеї – квантованості явищ у мікросвіті. Вивчення квантової фізики вносить значний внесок у формування світогляду учнів та фізичної картини світу. Насамперед на ряді прикладів учні розглядають методи проникнення людини в мікросвіт, недоступні безпосередньо сприйняттю нашими органами почуттів, зміцнюється ідея пізнання світу, безмежності процесу пізнання.

Принцип невизначеності є одним з фундаментальних принципів, але в шкільному курсі фізики не достатньо уваги приділяється вивченню співвідношень невизначеностей Гейзенберга. Згідно шкільної програми учні отримують знання про корпускулярно-хвильовий дуалізм, сталу Планка, енергію та імпульс фотону, але це не дає змоги зрозуміти природу похибок у вимірах.

**Аналіз актуальних досліджень.** Становлення та розвиток фундаментальних ідей дискретності та неперервності у курсі фізики середньої школи розглядав М. Садовий. Автором розроблено методичний підхід до наскрізного вивчення в курсі фізики середньої школи ідей, які базуються на усвідомленому формуванні в учнів у процесі навчання наукових методів пізнання фізики: моделювання, симетрії, відносності, відповідності, аналогії, ідеалізації, доповнюваності, обумовленості, імовірності, системності, причинності, подібності тощо. Формування сучасної наукової картини світу в учнів загальноосвітніх навчальних закладів автор пропонує здійснювати поступово узагальнюючи закони та теорії кожної теми [5]. Проблемами [використання комп'ютерного](#)

моделювання при вивченні квантової фізики, графічним методом дослідження природних явищ у навчанні фізики займались С. Величко, Л. Костенко, А. Нечипуренко, І. Сальник. Авторами зазначається, що комп'ютерна графіка робить доступним зображення на екрані дисплею графічних залежностей й співвідношень. Адже відображення процесів, які наочно не спостерігаються в експерименті, дуже важливо для розуміння механізму фізичних явищ, що вивчаються [2-4]. Співвідношенню невизначеностей Гейзенберга, та загальним положенням квантової механіки присвячена праця Л. де Бройля [1].

**Мета статті.** Провести аналіз методики вивчення співвідношення невизначеностей Гейзенберга, що сформує поняття кванта, мікросвіту, фізичної картини світу.

**Методи дослідження.** Нами був проведений аналіз наукової, науково-методичної, педагогічної літератури з проблеми формування понять квантової фізики та фізичної картини світу.

**Виклад основного матеріалу.** Перед вивченням нового матеріалу, було б доречно актуалізувати опорні знання учнів, а саме: поняття кванта, електрона, імпульсу, координати, часу та енергії. Зауважити, що вперше квантові уявлення були введені в 1900 році німецьким фізиком М. Планком, який зробив припущення – світло випромінюється не безупинно, а певними порціями, тобто квантами. Величина кванта енергії залежить від частоти світла  $\nu$  і дорівнює  $E = h\nu$ . Тобто, взаємозв'язок між енергією і частотою виражається за допомогою постійної Планка  $h$  [1].

В учнів необхідно сформулювати наступні поняття, а саме принцип невизначеності, принцип невизначеності Гейзенберга, співвідношення невизначеностей. Адже, принцип невизначеності – фундаментальне положення квантової теорії, яке стверджує, що характеристики системи, тобто додаткові фізичні величини (координата та імпульс, енергія та час) не можуть одночасно приймати точні значення. Цей принцип відображає

подвійну корпускулярно-хвильову природу частинок матерії (електронів, протонів і т. д.). Принцип невизначеності Гейзенберга – закон, що встановлює обмеження на точність (майже) одночасного вимірювання змінних стану, наприклад положення та імпульсу частинки. Співвідношення невизначеностей – фундаментальні співвідношення квантової механіки, що встановлюють межу точності одночасного визначення канонічно спряжених динамічних змінних, що характеризують квантову систему: координата – імпульс, енергія – час.

Аналізуючи можливість зміни координати  $\Delta x$  та імпульсу  $\Delta p$  електрона, В. Гейзенберг прийшов до висновку, що умови, сприятливі для вимірювання положення, лише ускладнюють знаходження імпульсу і навпаки [1]. Тобто, неможливо одночасно визначити положення частинки в просторі та її імпульс (швидкість). Принцип невизначеності Гейзенберга встановлює межу одночасного визначення положення частинки та її імпульсу (швидкості). Співвідношення має вигляд:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq h, \quad (1)$$

де  $\Delta p$  – неточність імпульсу  $p$ ,  $\Delta x$  – неточність координати  $x$ ,  $h$  – стала Планка.

Адже постійна Планка передбачає неможливість здійснення дії меншої  $6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с, тобто константа  $h$  – це мінімальний квант дії. Звернемо увагу учнів, що імпульс це добуток маси і швидкості, тобто коли ми кажемо про невизначеність імпульсу ми маємо на увазі невизначеність швидкості частинки, тобто:

$$\Delta(m \cdot v) \cdot \Delta x \geq h, \quad (2)$$

Це співвідношення можна розписати для усіх координат трьохвимірної системи  $(x, y, z)$  і отримуємо:

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq h, \quad (3)$$

$$\Delta p_y \cdot \Delta y \geq h, \quad (4)$$

$$\Delta p_z \cdot \Delta z \geq h. \quad (5)$$

У класичній фізиці завданням координат і швидкості механічної системи однозначно передбачалося її поведінку. У квантовій механіці неможливо задати координати і швидкості всіх частинок, є можливість лише задати в початковий момент хвильову функцію системи. Особливість квантової механіки полягає в тому, що властивості мікроскопічних об'єктів не можна вивчати, не враховуючи способу спостереження. Залежно від цього електрон проявляє себе як хвиля, або як частинка, або як щось проміжне.

Необхідно звернути увагу учнів, що співвідношення невизначеностей відповідають різним вимірам: невизначеність одного вимірювання призводить до появи невизначеності в іншому. Чим точніше проводиться вимір, тим з меншою точністю можна передбачити результат іншого виміру. Невизначеність виникає не внаслідок похибки апаратури: вона лежить в самій природі. Процес вимірювання однієї величини обов'язково погіршує можливості точного вимірювання іншого. Тому не слід говорити, що добуток ( $\Delta x$ ) ( $\Delta mv$ ) точно дорівнює  $h$ , скоріше варто говорити, що воно приблизно дорівнює  $h$  або «порядку  $h$ ».

Подібним же чином це об'єктивно існуючий закон невизначеності працює у випадку енергії і часу. Не можна абсолютно точно виміряти кінетичну енергію частинки за нескінченно малий відрізок часу. Невизначеність величини енергії  $\Delta E$  і інтервалу часу  $\Delta t$  пов'язані наступним чином:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h, \quad (6)$$

де  $\Delta E$  - неточність загальної енергії,  $\Delta t$  – час життя частинки,  $h$  – стала Планка.

Строге тлумачення співвідношення невизначеності в дослідах з електронами таке: подібно світловим хвилям електрони чинять опір будь-яким спробам виконати вимірювання з граничною точністю. Цей принцип змінює картину атома Бора. Можна визначити точно імпульс електрона (а

отже, і його рівень енергії) на який-небудь його орбіті, але при цьому його місцезнаходження буде абсолютно невідомо: нічого не можна сказати про те, де він знаходиться.

Для засвоєння нового матеріалу пропонуємо учням вирішити таку задачу в Excel: визначити значення похибки імпульсу  $\Delta p$ , при похибці координати від  $10 \cdot 10^{-6}$  до  $1 \cdot 10^{-6}$  м з кроком 1, а після від  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $0,91 \cdot 10^{-6}$  м з кроком 0,01 з формули (1). Після чого використовуючи формулу (6) визначити значення похибки швидкості  $\Delta v$  для електрону. Маса електрона дорівнює відповідно  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг. Дані занести у таблицю 1 і 2.

Таблиця 1

$\Delta x, 10^{-6}$ м	10	9	8	7	6	5	4	3	2
$\Delta p, 10^{-28}$ кг*м/с	0,663	0,736	0,828	0,947	1,105	1,326	1,6575	2,21	3,315
$\Delta v, 10^3$ м/с	0,072	0,08	0,091	0,104	0,121	0,145	0,182	0,242	0,364

$\Delta x, 10^{-6}$ м	1	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91
$\Delta p, 10^{-28}$ кг*м/с	6,63	6,696	6,765	6,835	6,906	6,978	7,053	7,12	7,206	7,28
$\Delta v, 10^3$ м/с	0,72	0,735	0,743	0,751	0,758	0,766	0,775	0,78	0,791	0,80

Таблиця 2

$\Delta t, 10^{-8}$ с	3	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3
$\Delta E, 10^{-26}$ Дж	2,21	2,286	2,367	2,455	2,55	2,652	2,7625	2,88

$\Delta t, 10^{-8}$ с	2,2	2,1	2	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5
$\Delta E, 10^{-26}$ Дж	3,0136	3,1571	3,315	3,4894	3,6833	3,9	4,1437	4,42



$\Delta t, 10^{-8} \text{ c}$	1,4	1,3	1,2	1,1	1
$\Delta E, 10^{-26} \text{ Дж}$	4,73571	5,1	5,525	6,02727	6,63

На основі даних таблиці 1 побудувати графіки залежності похибок значення координати  $\Delta x$  від імпульсу  $\Delta p$ , та координати  $\Delta x$  від швидкості електрона  $\Delta v$ , часу  $\Delta t$  від енергії  $\Delta E$ .

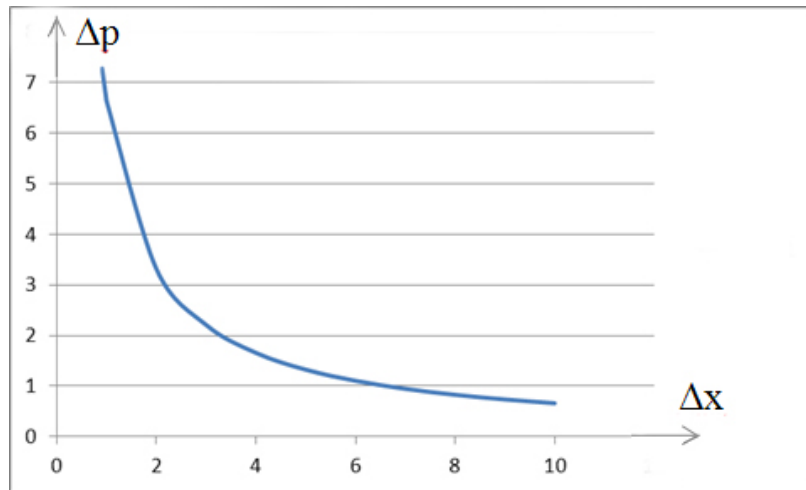


Рис. 1. Залежність значення похибки координати  $\Delta x$  від імпульсу  $\Delta p$

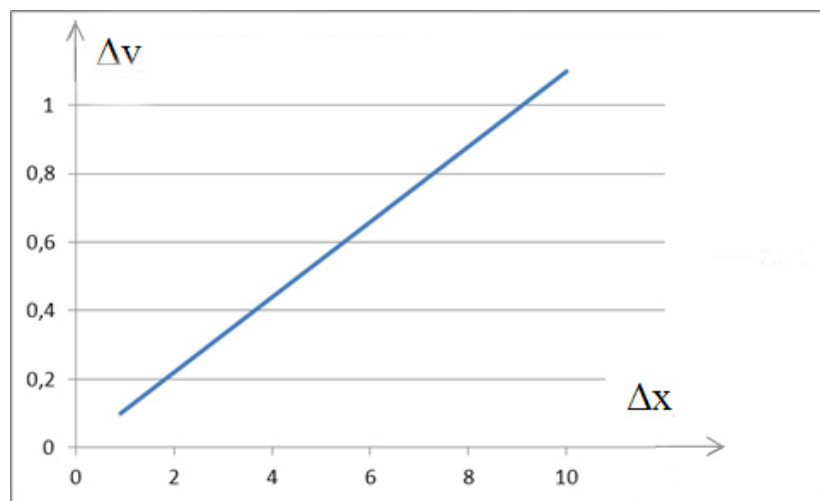


Рис. 2. Залежність значення похибки координати  $\Delta x$  від швидкості електрона  $\Delta v$

Учні наочно переконуються, що у квантовій механіці неможливо задати координати і швидкості всіх частинок та отримати точні результати обох параметрів. Точні виміри можливо отримати лише для координати, або імпульсу (швидкості) частинки.

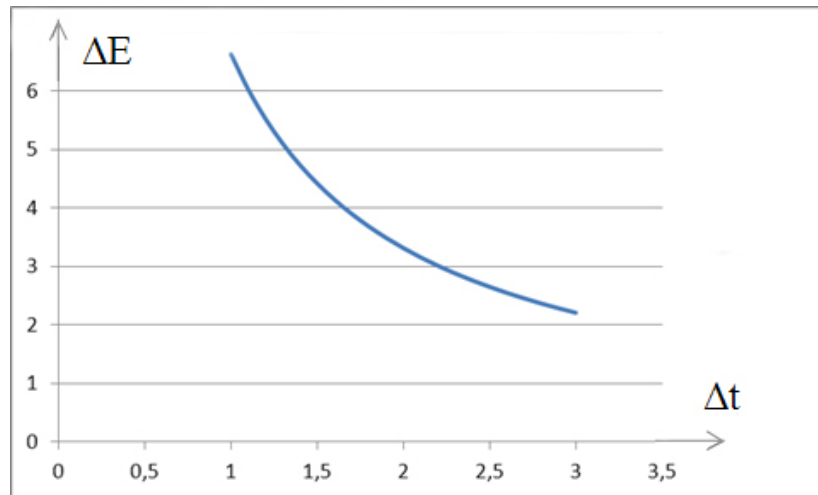


Рис. 3. Залежність значення похибки часу  $\Delta t$  від енергії електрона  $\Delta E$

Дивлячись на рис. 3 можна зробити висновок, що не можна абсолютно точно виміряти кінетичну енергію частинки за нескінченно малий відрізок часу. Це сформує релятивістську картину світу, яка на відміну від Ньютонівської не дає точне значення декільком параметрам системи.

Зроблені розрахунки та графіки підводять учнів до висновку: одним з понять квантової механіки є те, що не усі фізичні величини можуть одночасно мати точні значення (принцип невизначеності). Точність вимірів не залежить від апаратної похибки, а залежить від способу спостереження.

#### **Висновки та перспективи подальших наукових розвідок.**

Розроблена методика вивчення співвідношення невизначеностей Гейзенберга свідчить про особливості квантової фізики, формує фундаментальний принцип невизначеності, принцип невизначеності Гейзенберга, співвідношення невизначеностей. На основі цих понять в учнів завершується формування релятивістської картини світу, мікросвіту, фізичної картини світу.

Подальших досліджень потребує вдосконалення та розробка методики наочних засобів демонстрації співвідношення невизначеностей, взаємозв'язку корпускулярно-хвильового дуалізму та принципу

невизначеності Гейзенберга. Такий підхід спрямовано на формування уявлення про релятивістську картину світу, фундаментальний характер сталої Планка та її роль у розвитку світогляду учнів.

## БІБЛІОГРАФІЯ

1. Бройль де Л. Соотношения неопределенностей Гейзенберга и вероятностная интерпретация волновой механики. (С критическими замечаниями автора.) / Луи де Бройль; [пер. с франц. Н. В. Самсоненко]. – М.: Мир, 1986. – 344 с.

2. Величко С. П. Вивчення основ квантової фізики. Навч. посібн. для студ. вищих навч закладів / С. П. Величко, Л. Д. Костенко. – Кіровоград: РВЦ КДПУ ім. В. Винниченка, 2002. – 274 с.

3. Величко С. П. Графічні методи дослідження природних явищ у навчанні фізики: навч. посіб. / С. П. Величко, І. В. Сальник. – Кіровоград: РВЦ КДПУ ім. Володимира Винниченка, 2002. – 167 с.

4. Нечипуренко А. [Особливості використання комп'ютерного моделювання при вивченні квантової фізики](#) / А. Нечипуренко, С. Величко // Наукові записки. Випуск № 60. Серія: Педагогічні науки. – Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В. Винниченка. – 2005. – С. 210-215.

5. Садовий М. І. Формування сучасної наукової картини світу засобами системи наскрізних понять / М. І. Садовий, О. М. Трифонова, С. М. Стадніченко // Наукові записки КДПУ. Серія: Педагогічні науки / ред. кол.: В. В. Радул [та ін.]. – Кіровоград: КДПУ ім. В. Винниченка, 2014. – Вип. 132. – С. 65-70.

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

**Зикова Клавдія Миколаївна** – аспірантка кафедри фізики та методики навчання фізики Бердянського державного педагогічного університету.

*Коло наукових інтересів:* формування світогляду учнів при вивченні фізики, методика формування фундаментальних знань, міжпредметні зв'язки в шкільному курсі фізики.