



УДК 530.1(07)

ПРОБЛЕМНИЙ ПІДХІД ДО ПИТАННЯ СПІВВІДНОШЕННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ ГЕЙЗЕНБЕРГА

Сусь Б.А., д. пед. н., професор,
професор кафедри фізики

*Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації
імені Героїв Крут*

Сусь Б.Б., к. фіз.-мат. н.,
викладач кафедри нанофізики конденсованих систем
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Традиційні проблемні питання фізики можуть і повинні стати вагомим засобом активізації навчального процесу. Такі проблемні питання є й у квантовій механіці, яка описує хвильові процеси, пов'язані з мікрочастинками, що рухаються з великими швидкостями, – хвилями де Бройля, які є частинками й хвилями водночас. Однак немає пояснення, які коливання відбуваються з частинкою, що рухається рівномірно зі сталою швидкістю v . У роботі аналізується фізичний зміст невизначеності Гейзенберга, яка означає неможливість одночасного точного знання координати частинки й її кількості руху («імпульсу»). Суть проблеми полягає в тому, що частинку до швидкості v треба прискорити, а при дії сили зростає її кінетична енергія. Оскільки між енергією й масою є зв'язок, то це означає, що при зміні енергії тіла змінюється маса. Під час прискорення маса зростає, у результаті чого запускається механізм коливального процесу типу $\Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \dots$, тому вже рухається не просто частинка, а частинка специфічна, яка, переміщуючись поступально, знаходиться в коливальному стані. Оскільки безперервно змінюється маса частинки, то змінюється і її кількість руху («імпульс»), що й зумовлює невизначеність координати й «імпульсу» під час руху частинки.

Ключові слова: мікрочастинки, хвилі де Бройля, дуалізм, кількість руху, невизначеність координати й «імпульсу».

Традиционные проблемные вопросы физики могут и должны стать весомым средством активизации учебного процесса. Такие проблемные вопросы есть и в квантовой механике, которая описывает волновые процессы, связанные с микрочастицами, движущимися с большими скоростями, – волнами де Бройля, которые являются частицами и волнами одновременно. Однако нет объяснения, какие колебания происходят с частицей, которая движется равномерно с постоянной скоростью v . В работе анализируется физический смысл неопределенности Гейзенберга, которая означает невозможность одновременного точного знания координаты частицы и ее количества движения («импульса»). Проблема в том, что частицу до скорости v нужно ускорить, но при действии силы растет ее кинетическая энергия. Поскольку между энергией и массой существует связь, то это значит, что при изменении энергии тела изменяется масса. В результате ускорения и возрастания массы запускается механизм колебательного процесса типа $\Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \dots$, так что уже движется не просто частица, а частица специфическая, которая, перемещаясь поступательно, находится в колебательном состоянии. Поскольку непрерывно меняется масса частицы, то меняется и ее количество движения («импульс»), что и обуславливает неопределенность координаты и «импульса» при движении частицы.

Ключевые слова: микрочастицы, волны де Бройля, дуализм, количество движения, неопределенность координаты и «импульса».

Sus B.A., Sus B.B. A COMPREHENSIVE APPROACH TO HEISENBERG'S UNCERTAINTY PRINCIPLE

The traditional problems of physics can and should become a powerful tool for activating the learning process. Such problematic questions also exist in quantum mechanics, which describes the wave processes associated with microparticles moving at high velocities, de Broglie waves, which are particles and waves simultaneously.

However, there is no explanation of what kind of oscillations occurs with a particle that moves uniformly at a constant velocity v . The paper analyzes the physical meaning of Heisenberg's uncertainty, which means the impossibility of simultaneous exact knowledge of the particle's coordinate and its momentum ("momentum"). The problem is that a particle must be accelerated to a speed v , but its kinetic energy increases with the action of the force. Since there is a relationship between energy and mass, then this means that when the energy of the body changes, the mass changes also. During acceleration, the mass grows. The mechanism of the oscillatory process is triggered as a result. The type is $\Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \dots$. Therefore, not only a particle is simply moving, but a specific particle is moving forward in an oscillatory state. Since the mass of a



particle changes continuously, its momentum (“momentum”) changes accordingly. It causes the uncertainty of a coordinate and “momentum” when the particle moves.

Key words: *microparticles, de Broglie waves, dualism, amount of motion, uncertainty of coordinate and “momentum”.*

Постановка проблеми. Проблемні питання фізики, особливо традиційні, можуть і повинні стати вагомим засобом активізації навчального процесу. Такі проблемні питання є й у квантовій механіці, яка описує хвильові процеси, пов’язані з мікрочастинками, що рухаються з великими швидкостями. Це так звані хвилі де Бройля. Поняття «хвилі де Бройля» за аналогією до світла з’явилося як гіпотеза, що частинці, яка рухається зі **сталою швидкістю v** , **відповідає довжина хвилі $\lambda_D = h/mv$** . Ця гіпотеза знайшла експериментальне підтвердження, що забезпечило розвиток квантової механіки. Хвилям де Бройля властивий дуалізм – це частинки й хвилі одночасно, тобто для таких частинок властивий не тільки механічний поступальний рух, але також і хвильовий процес – **частинка, яка рухається зі сталою швидкістю, є хвилею**. Сумніву в цьому нема, однак близько сотні років нема відповіді на пряме принципове запитання: **що коливається, коли частинка рухається зі сталою швидкістю?** Адже хвиля – це коливання, які поширюються в просторі.

Відповідь повинна бути, а якщо її нема, значить, щось не так уявляється, не так називається. Якщо частинка, що рухається з великою сталою швидкістю, є хвилею, то цей хвильовий рух треба пояснити, що й робиться в цій статті. Причина суперечливої двоїстості хвиль де Бройля має історичні корені, тому важливо прослідкувати розвиток і формування ідей квантової механіки й квантової фізики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ідея, що частинка, яка рухається зі швидкістю v , є хвилею, виникла в де Бройля за аналогією до світла. У той час (1923 р.) ще важко було сприйняти вже тоді експериментально підтверджений факт, що світло – це хвилі й частинки водночас. Тому коли Ейнштейну дали для оцінки дисертацію де Бройля, він, передаючи її Борну, висловився дуже «дипломатично»: «Прочитайте її. Хоч і здається, що писав божевільний, написана вона солідно». Борн теж дуже важко сприймав ідею дуалізму. У 1928 р. він писав: «Було доведено твердження, що світло складається з частинок. Але було також точно доведено зворотне твердження, згідно з яким світло складається з хвиль... Проте одночасне існування корпускули й хвилі для нашого наочного уявлення видається зовсім несумісним.

І все-таки, незважаючи на це, теорія повинна якось сумістити ці два уявлення...» [1; 2].

Справді, якщо теорія правильна, то вона повинна пояснити зрозумілою мовою фізичне явище чи процес. Але проблема в тому, що навіть у наш час пояснити неабстрактно **хвильові властивості** частинки, яка рухається зі **сталою швидкістю** (хвиля де Бройля), не вдається, бо хвиля – це поширення коливань у просторі, а коли частинка рухається рівномірно і є хвилею, то незрозуміло, що коливається. Традиційної зрозумілої відповіді на це запитання нема. Але квантова механіка й фізика незаперечно доводять, що частинці, яка рухається поступально, дійсно властивий дуалізм. Про це досить виразно сказано в праці Л. Ландау: «*Ми можемо розглядати вільне електромагнітне поле як сукупність частинок, кожна з яких має енергію $W = h\nu$ і імпульс $p = nh\nu/c$* » [3, с. 29]. Усе правильно, питання тільки в тому, що ж коливається з частотою ν в цьому «електромагнітному полі як сукупності частинок».

Отже, частинка, яка рухається зі сталою швидкістю, є і хвилею, і частинкою. Відповідно, у квантовій механіці є два підходи – хвильовий і корпускулярний. Хвильовий підхід ґрунтується на хвильовій функції й хвильовому рівнянні Шредінгера, а корпускулярний – на так званому співвідношенні невизначеності Гейзенберга. Обидва підходи описують одне й те саме фізичне явище, але з різних аспектів. Насправді проблема дуалізму виникла тому, що наші уявлення про хвилі неповні. Історично склалися неадекватні уявлення про світло. Три-чотири століття вважалося, що світло – це коливання гіпотетичного середовища – ефіру. Незаперечним підтвердженням хвильових властивостей світла були явища інтерференції й дифракції. Але в кінці XIX століття на основі досліду Майкельсона-Морлі було встановлено, що ефіру нема. Більше того, відкриття фотоефекту й пояснення його Ейнштейном на основі квантових уявлень про світло дало можливість зробити висновок, що світло, будучи хвилями, являє собою ще й потік квантів енергії, які пізніше (1928 р., Г. Льюїс) були названі фотонами вже як частинками. Ці дві властивості світла – бути незаперечно хвилями й у той же час незаперечно бути частинками – виявилися дуже суперечливими й дістали назву «дуалізм». Дійсно, неможливо було уявити, як локалізована в певному малому об’ємі



частинка в один і той самий час може бути хвилею в просторі. Проблема трактування двоїстості природи фотонів чи хвиль де Бройля виявилася складною й не розв'язана й у наш час. Просто в наш час у науковій і навчальній літературі на проблемність питання дуалізму увага не звертається, оскільки, мовляв, це проблема минулого століття. Наприклад, у відомому й поширеному навчальному посібнику Савельєва для вищої школи факт двоїстості не пояснюється, а просто констатується без відзначення його суперечності: «Світло виявляє корпускулярно-хвильовий дуалізм (двоїстість): в одних явищах проявляється його хвильова природа, і воно поводить себе як електромагнітна хвиля, а в інших явищах проявляється корпускулярна природа світла, і воно поводить себе як потік фотонів» [4, с. 41]. Аналогічно й у шкільних підручниках: «Одне з найбільших досягнень сучасної фізики – розуміння помилковості протиставлення хвильових і квантових властивостей світла. Розглядаючи світло як потік фотонів, а фотони – як кванти електромагнітного випромінювання, для якого властиві хвильові й квантові властивості, сучасна фізика зуміла об'єднати, здавалось би, непримиренні теорії – хвильову й корпускулярну. У результаті виникло уявлення про корпускулярно-хвильовий дуалізм, яке знаходиться в основі сучасної фізики» [5, с. 167]. Подібне можна прочитати й в інших навчальних посібниках: «Корпускулярні й хвильові властивості частинки є загальною властивістю природи. Наприклад, потік електронів (та інших частинок) характеризується хвильовими властивостями» [6, с. 1079].

Постановка завдання. Отже, питання дослідження полягає в тому, щоб з'ясувати, що коливається, коли електрон чи інша «квантова» частинка рухається зі сталою швидкістю, і як із цим пов'язане співвідношення невизначеності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Співвідношення невизначеності означає неможливість одночасного точного знання координати частинки (невизначеність Δx) і її кількості руху (невизначеність «імпульсу» Δp_x): $\Delta p_x \Delta x \geq h$.

Така невизначеність впливає із самого стану мікрочастинки, яка рухається зі швидкістю v . Рух тіла (частинки) – це переміщення речовини в просторі й у часі. Характеристикою речовини (тіла, частинки) є маса m , а характеристикою переміщення – швидкість v . Таким чином, **характеристикою руху є те, що переміщується (маса m), і як воно переміщується (швидкість v)**. Такою характеристикою є **кількість руху**:

$$K = m \cdot v. (1)$$

Принагідно зауважимо, що згідно з прийнятою термінологією в радянській науковій літературі кількість руху часто називали «імпульсом». Цей термін навряд чи можна вважати вдалим, оскільки імпульс означає поштовх, удар (лат. *impulsus* – удар, поштовх [7]). Якщо ж тіло рухається вільно зі сталою, тобто незмінною швидкістю, то ніякого поштовху (імпульсу) нема, а тіло має певну **кількість руху**. Поштовх (імпульс) виникає під час взаємодії тіла з іншим тілом. Під час зіткнення відбувається зміна кількості руху тіла dK . Чим більший час триває поштовх, тим більша зміна кількості руху відбувається. Тому можна записати так:

$$dK = F \cdot dt (2)$$

Зміна кількості руху за одиницю часу називається силою, яка діє на тіло:

$$F = \frac{dK}{dt} (3)$$

У результаті дії сили тіло прискорюється, змінюється його енергія. Оскільки між енергією й масою є зв'язок $W = c^2 \cdot m$, то це означає, що під час зміни енергії тіла змінюється маса ($DW = c^2 \cdot \Delta m$), що необхідно враховувати під час визначення сили:

$$F = \frac{dK}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt}. (4)$$

Оскільки під час дії сили на тіло змінюються його швидкість і маса, то робота сили під час переміщення тіла на відстань dx визначається так:

$$dA = F dx = \left(m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} \right) \cdot dx, (5)$$

або

$$dA = m \frac{dv}{dt} dx + v \frac{dm}{dt} dx, (6)$$

Як бачимо, робота сили йде на зміну швидкості ($\frac{dv}{dt}$), а значить, на зміну кінетичної енергії, а також на зміну маси тіла ($\frac{dm}{dt}$). Цю масу, яка виникає в процесі надання енергії тілу, будемо називати **динамічною**. І саме завдяки виникненню динамічної маси створюються умови для коливального процесу. Під час прискорення частинки зростає енергія й зростає маса, але коли швидкість перестає зростати, і тіло вже рухається рівномірно, динамічна маса починає зменшуватися, і таким чином прискорена мікрочастинка переходить у коливальний стан, за якого відбувається пульсація маси й енергії:

$$\Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \dots (7)$$

Таким чином, рухається вже не просто частинка, а частинка специфічна, яка, пе-

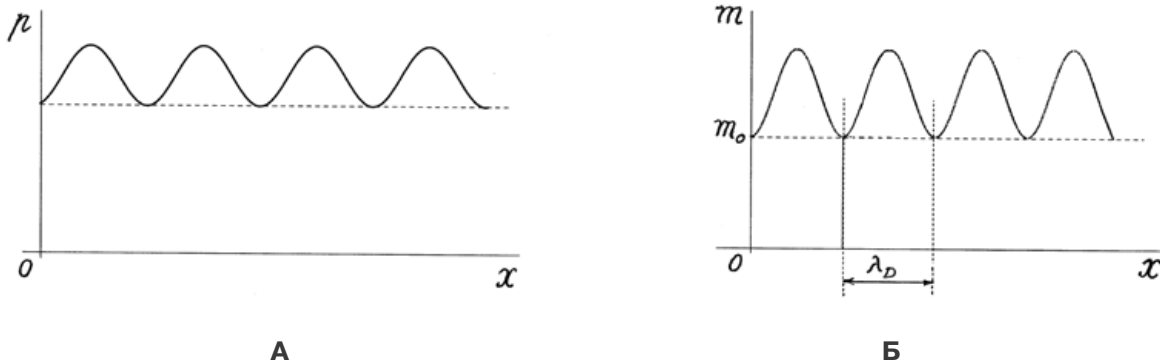


Рис. 1. Залежність «імпульсу» (А) і маси (Б) прискореної частинки під час її рівномірного руху в напрямку x

реміщаючись поступально, знаходиться ще й у коливальному русі [8]. Можна провести аналогію з коливальним процесом механічного маятника: зростання динамічної маси під час прискорення частинки подібне відхиленню кульки маятника під час поштовху й зростанню її потенціальної енергії. Потім потенціальна енергія починає зменшуватися, а зростає кінетична енергія, і т. д.

Така частинка з пульсуючою масою й енергією і є хвилею де Бройля. Оскільки мікрочастинка перебуває в коливальному стані, при якому безперервно змінюється її маса, то змінюється також її кількість руху («імпульс»). Тепер кількість руху («імпульс») частинки виражається як масою спокою m_0 , так і динамічною складовою частиною Δm . Нехай частинка рухається в напрямку x . Якщо вважати, що зміна кількості руху відбувається за гармонічним законом, то якісно залежність $p(x)$ має вигляд, представлений на рис. 1 А.

Отже, якщо кількість руху під час переміщення частинки в напрямку x коливається, то існує неясність, тобто невизначеність Δp_x величини кількості руху як складника «імпульсу» p_x . А оскільки «імпульс» p коливається, і ми не знаємо його справжнього значення, то змушені прийняти невизначеність Δp_x як рівну величині «імпульсу» p :

$$\Delta p_x = p \quad (8)$$

Невизначеність положення частинки також має цілком виразний фізичний характер. Дійсно, наявність самої частинки визначається її масою, а положення частинки – положенням цієї маси в системі координат. Однак під час руху частинки відбувається коливання маси, і ця змінна маса розосереджена на довжині «хвилі». Отже, є невизначеність координати, де саме знаходиться маса. Ця невизначеність дорівнює довжині хвилі де Бройля (рис. 1 Б). Тому можемо прийняти, що

$$\Delta x = \lambda_D \quad (9)$$

Перемноживши відповідно ліві й праві частини (8) і (9), отримуємо таке:

$$\Delta p_x \cdot \Delta x = p \lambda_D \quad (10)$$

Оскільки за аналогією до світла довжина хвилі де Бройля – $\lambda_D = \frac{h}{p}$, то (10) матиме такий вигляд:

$$\Delta p_x \cdot \Delta x = h \quad (11)$$

Отже, виходячи з актуальних фізичних уявлень, у рамках корпускулярно-коливної теорії матерії приходимо до висновку, що одночасне точне знання координати й «імпульсу» мікрочастинки обмежується співвідношенням (11). Ми не можемо точно знати координати частинки і її кількості руху, оскільки кількість руху безперервно змінюється.

Співвідношення невизначеностей стали темою філософських дискусій і мали різне тлумачення. Одним із таких тлумачень є те, що мікрочастинки ніби мають у кожний конкретний момент певні координати й «імпульси», але ми не маємо способу їх дізнатися. Співвідношення невизначеностей ніби не дозволяє їх дізнаватися, тобто встановлює межу пізнання. Згідно з іншим тлумаченням, зміст співвідношення невизначеностей не в тому, що вони обмежують можливість точно знати координати й «імпульси» (чи інші величини), а в тому, що в мікрочастинках цих точних одночасних значень просто немає. Сам Гейзенберг вважав, що квантова механіка робить неспроможним закон причинності, який вимагає, щоб на основі точного знання стану системи в певний момент часу можна було б передбачити стан для будь-якого майбутнього моменту. Таке цілком можливе в класичній механіці й неможливе в квантовій механіці, оскільки при точному знанні x положення мікрочастинки невідомим є значення p_x , оскільки воно коливається й змінюється в межах довжини хвилі де Бройля. Тому природа невизначеності має цілком



реальний фізичний зміст – невизначеність зумовлена коливальним станом частинки типу $\Delta W \rightarrow \Delta t \rightarrow \Delta W \rightarrow \Delta t \rightarrow \dots$

Висновки з проведеного дослідження. Таким чином, квантова механіка описує рух мікрочастинок як хвильовий процес, у зв'язку з чим наявні суперечності й труднощі в розумінні фізичного змісту такого важливого принципу, як співвідношення невизначеностей Гейзенберга. Однак із погляду корпускулярно-коливної природи матерії співвідношення невизначеностей Гейзенберга набуває конкретного фізичного змісту: точне визначення координати мікрочастинок з погляду квантової механіки неможливе тому, що воно пов'язане з динамічною (релятивістською) складовою частиною маси частинки, яка перебуває в коливальному стані, у результаті чого ця маса розосереджена в часі й просторі в межах довжини хвилі де Бройля.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Шехтер В., Ансельм А. Атомы и квантовая механика. М.: Изд. «Знание». 1984. С. 38.
2. Борн М. Атомная физика. М., Мир, 1965. 492 с.
3. Ландау Л. Теоретическая физика. Квантовая электродинамика. Т. IV / В. Берестецкий, Е. Лифшиц, Л. Питаевский. М.: Наука. 1989. 728 с.
4. Савельев И. Курс общей физики, т. 3. М.: Наука. 1979. 304 с.
5. Касьянов В. Физика. Учебник для общеобразовательных учреждений. Базовый уровень. Москва: «Дрофа». 2009 г. 288 с.
6. Paul A. Tipler, Gene Moska. Physics for scientists and engineers. With modern physics. W.H. Freeman and Company. New York. 2008. 1412 с.
7. Пустовіт Л., Скопненко О., Сютя Г., Цимбалюк Т. Словник іншомовних слів. Київ: «Довіра». 2000. 1017 с.
8. Sus' B., Sus' B., Kravchenko O. Unusual interpretation of traditional physics problems. The third scientific-methodological edition. Kyiv: PC "Prosvita", 2012. 121 p.