

УДК 53.091

Терентьєва Ю.Г.¹, к.ф.-м.н., доц.

До 100-річчя борівських орбіт

Нільс Бор визнаний світовою спільнотою як один із стовпів фізики ХХ століття. Постать Нільса Бора є фундаментальною і завдяки його науковим здобуткам, і через його дбайливе ставлення до численних учнів і їх нових ідей. Він є людиною, яка змогла осягнути велич ідей своїх колег і вчасно на зломі історії розвитку фізики авторитетно об'єднати різні теорії, що замість роз'єднання умів врятувало спричинило неймовірний прогрес. Стаття присвячена саме тому історичному моменту в фізиці, коли Н.Бор висунув поряд з ідеєю колових орбіт ідею квантування моменту кількості руху. В статті показано, що ця не зовсім коректна і нелогічна ідея Н.Бора нашою вухнула Луї де Бройлю на правильну ідею про хвильову природу мікрооб'єктів.

Ключові слова: квантування, Бор..

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03680, м. Київ, пр.-т. Глушкова 4д, e-mail: juliater@i.ua

Статтю представив д.ф.-м.н., проф. Макарець М. В.

5 квітня 1913 року в науковий журнал "Philosophical Magazine" надійшла стаття Нільса Бора "Зв'язування електронів додатнім ядром". Вона стала першою з трьох частин єдиної фундаментальної праці "Про будову атомів та молекул". В цій роботі данський вчений сформулював постулати, їм судилося стати центром кристалізації, на якому за наступні 20 років виросла абсолютно нова наука – квантова механіка. Можна впевнено стверджувати, що стаття Бора спричинила принципово новий поворот в історії пізнання світу. Для осмислення цієї події варто коротко оглянути, що було відомо про будову речовини на той момент.

Пропонувались різні моделі будови атома, кожна мала своїх прибічників, свої вади та переваги, і єдине, з чим всі вчені погоджувались, що в склад електрично нейтральних атомів

Terentyeva Yu.G.¹, RhD.,

Terentyeva Yu.G.¹, RhD.,

To the 100-th anniversary of Bohr's orbites

Niels Bohr recognized by the international community as one of the pillars of twentieth century physics. Figure Niels Bohr is a fundamental and due to his scientific achievements, and because of his respect for the many students and their new ideas. He is a man who could understand the greatness of the ideas of his colleagues and time for hacking into the history of physics authoritatively combine different theories, instead of separation could eventually resulted in incredible progress. Article deals with the historical moment in physics when N.Bohr advanced along with the idea of circular orbits an idea of momentum of movement quantization. Article shows that this not quite correct and illogical idea of N.Bohr prompted Louis de Broglie on the correct idea of the wave nature of microscopic.

Key Words: quantization, Bohr.

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, 03680, Kyiv, Glushkova st., 4d, e-mail: juliater@i.ua

входять електричні заряди двох типів, які умовно називали «позитивними» та «негативними». Доречі, ідея позначити заряди різнознаковими математичними символами виникла як продовження запропонованих математиками від'ємних чисел, що в сумі з додатними утворюють нуль. Але питання про *стійкість системи* залишалось відкритим: чому ці протилежнознакові заряди не зникають, не нейтралізуються? Адже саме це спостерігається в макросвіті – численні досліди з найпопулярнішим приладом тих часів - електроскопом - були дуже переконливі. На початку ХІХ століття Й.Фраунгофер запропонував завершену конструкцію спектроскопу (з вхідною щілиною, призмою або дифракційною ґраткою і зоровою трубою), яка незмінна і по сьогодні. Вчені з ентузіазмом взялися спостерігати всілякі

можливі спектри (полум'я горючих газів, свічка, Сонце...). Зазвичай нагріті тіла мали рівномірно райдужний спектр. Якщо ж в полум'я бунзенівської горілки вводили солі Na, Ca, інших металів, чи пропускали електричний струм через вакуумовану трубку з газоподібною речовиною, спектри набували лінійчатого вигляду. Фраунгофер вперше проаналізував темні смуги на суцільному сонячному спектрі, в 1814-1815 роках опублікував статті, де зробив висновок, що наявність і положення ліній в спектрі не залежить ані від стану атмосфери Землі, ані від особливості оптичної будови реєструючої системи, тобто, ці лінії є притаманною властивістю і характеристикою сонячного світла.

1858 року Г.Кірхгоф та Р. Бунзен зробили дуже важливий висновок, що кожен хімічний елемент має свій неповторний лінійчастий спектр.

Сільський вчитель із Швейцарії Йоганн Бальмер винайшов (1885р.) просту, лаконічну формулу у яку вкладаються довжини хвиль спектру атому водню. Через 23 роки В.Рітц запропонував узагальнену форму запису для частоти спектральної лінії у вигляді різниці двох термів. Проте ця чудова формула, як і «магічні» цілі числа, що в неї входять, не мала жодного прийняттого пояснення.

В кінці XIX століття накопичені експериментальні результати про теплове випромінювання нагрітих тіл теж сконцентрувалися в проблему теоретичного його обґрунтування. Намагання теоретично описати експериментальну криву залежності спектральної густини випромінювання від довжини хвилі методами класичної електродинаміки зазнали поразки. Наприкінці 1900 року Макс Планк ввів поняття кванта енергії, базуючись на якому зміг одержати формулу, що ідеально співпадала з експериментальними результатами, проте породила іще більше запитань. Панування ідеї про електромагнітну природу світла було абсолютним, тому фізики постали перед необхідністю її переосмислення.

Першим, хто зреагував на парадоксальну ідею Планка був А.Ейнштейн. Він акумулював та проаналізував усі численні на той момент

експерименти по вивченню зовнішнього фотоефекта. В 1905 році він запропонував просту і зрозумілу формулу фотоефекту, яка по своїй суті представляла закон збереження енергії. Але її неординарність полягала як раз в тому, що поглинання енергії світлової хвилі мусило відбуватися порціями – тими самими квантами, про які говорив Планк. Тоді ставало зрозумілим існування «червоної границі» фотоефекту.

Стосовно безпосередньо будови атомів, було зрозуміло, що до їх складу входять електрони, що вони негативно заряджені. Питання ж про знаходження та розподіл позитивного заряду було розв'язане в 1911 році Ернестом Резерфордом. Результатом серії його експериментів по розсіянню альфа-частинок тонкою фольгою стала гіпотеза про планетарну будову атома. Ця гіпотеза з одного боку була узгоджена з дивовижними результатами експериментів, в яких хоча й зрідка, але впевнено фіксувалися відхилення важких альфа-частинок на великі кути, з іншого поставила нову проблему – як пояснити стабільність атома. Планетарна модель знаходилась в драматичному протиріччі з класичною електродинамікою.

Таким чином, на початок 1912-го року фізика як наука підійшла до межі застосування класичної механіки та електродинаміки, маючи в якості головних проблем – атомну спектроскопію, квант енергії та планетарну модель атома. Слід зауважити, що ніхто з визнаних авторитетів – ні Резерфорд, ані Ейнштейн, не спромігся подивитися на ці питання в комплексі. Зв'язок між ними зміг досягнути Нільс Бор, геніальний данський вчений, фізик-філософ. В трилогії «Про будову атомів та молекул» він зробив неймовірне – йому вдалося не тільки примирити класичну фізику із експериментальними незрозуміlostями, а головне - побудована ним система постулатів навіть незважаючи на свою недосконалість стала відправною позицією для розвитку сучасної квантової механіки. Головний висновок, який був ним зроблений, полягав в тому, що квантування стосується не тільки енергії (за Планком), а й орбіт електронів. Причому, можливо, найнеочікуванішим його висновком було передбачення

квантування моменту імпульсу електрона. В дійсності постулатів, які сформулював Бор, було насправді 5, одержані вони були шляхом досить плутаних і іноді важкозрозумілих міркувань. У сучасних підручниках наводять два, іноді три постулати, які пройшли перевірку часом.

1. Атом може знаходитися *лише* в певних стаціонарних енергетичних станах. Знаходячись в таких станах атом не випромінює.

Разом з тим атом може переходити з одного стаціонарного стану в інший, і тоді

2. При таких переходах між електронними станами різниця енергії випромінюється або поглинається у вигляді кванта світла.

Які саме орбіти мали бути стаціонарними – визначав третій постулат, революційний для розвитку фізики

3. Момент кількості орбітального руху електрона не будь-який, а тільки певний, а саме – кратний константі $\hbar = h/2\pi$.

Фактично, оригінальним був лише останній постулат, інші були відомі і раніше. Бор їх поєднав у вигляді єдиної теорії, основним здобутком якої стало пояснення спектральних закономірностей атома водню. Якщо вважати, що третій постулат – дійсно справедливий, тоді серйозність атомних спектрів стає просто його логічним наслідком.

Кажуть, що Бору вдалося оженити класичну фізику з квантовою, і як це буває в нерівних шлюбах, протиріччя між ними прийшлося врегульовувати декларативним шляхом. Згідно планетарної теорії Резерфорда та класичної електродинаміки Лоренца, електрон, що рухається по коловій орбіті, мусить випромінювати енергію, а, отже, її втрачати – електрон зрештою мусить впасти на ядро. В дійсності цього не спостерігається, атом є стабільною частинкою. Щоби уникнути цього парадоксу Нільсу Бору прийшлося просто *постулювати* стабільність певних станів. Але продовжуючи керуватися звичними класичними законами, Бор, тим не менше, одержав вираз для енергії атома водню

Виявилось, що експериментально вимірне значення енергії іонізації атома та радіус першої орбіти, повністю співпадають з розрахунками

Бора. Більше того, експериментальне значення сталої Рідберга виявилось ідентичним розрахованому Бором. Вираз для енергії електрона включає ціле число n , яке з'явилося з умови квантування моменту кількості руху. Тобто, енергія (якщо гіпотеза правильна) повинна бути теж дискретною, або квантовою. Звичайно, планетарна модель Резерфорда, як і пануюча в той час модель Томсона (модель «пудінга»), являється хибною, і розглядається в підручниках як проміжний етап розвитку науки. Численні спроби Бора узагальнити теорію та сформулювати постулати квантування для більш складних атомів виявилися безрезультатними. Умова квантування моменту імпульсу електрона не мала ніякого фізичного обґрунтування і була вгадана Бором, причому вгадана не зовсім вірно – як виявилось пізніше, квантується з кроком $\hbar = h/2\pi$ не момент, а його проекція, а для самого моменту умова квантування інша. Більше того, в основному стані ($n=1$), який в своїй роботі і розглядав Бор, механічний момент у атома взагалі відсутній. Тим не менш, нам вважається, що цінність моделі Бора слід вбачати в тому, що вона *підвела до ідеї* про дискретність якоїсь величини, пов'язаної з моментом кількості руху.

Придуманий в 1913 році "атом Бора" - це тимчасова модель, весь сенс якої спочатку полягав лише в тому, щоби пояснити спектральні закономірності випромінювання водню. Але де-факто, вона стала значно більшим – за декілька років поспіль вона була перероблена учнями Бора, крок за кроком перетворившись в абсолютно новий продукт колективного розуму.

Друге безперечне надбання теорії Бора - вона надихнула Луї де Бройля поглянути на рух електрона на орбіті як на хвильовий процес. Ідея де Бройля про стоячу хвилю на коловій орбіті була одночасно і хибною і геніальною. Хибність, очевидно, полягає в тому, що в природі взагалі не існує плоских колових електронних орбіт. А геніальність – тому що ідеї про хвильову природу мікрооб'єктів не було звідки взятись, дослідів по дифракції електронів на той момент ще й в проекті не було. Отже, народившись на початку ХХ сторіччя з хибної моделі, можна сказати – завдяки лише геніальному озарінню, хвильова

механіка за півстоліття сформувалася у фундаментальну науку.

Усі наступні досягнення квантової механіки – продукт зусиль великого колективу теоретиків та експериментаторів. І ідейним батьком, вдохновителем, був, безумовно, Нільс Бор, який старанно збирав під своє крило талановиту молодь, надавав можливість випробовувати найсвіжіші ідеї. Він чесно визнавав переваги над собою своїх учнів, зокрема, в математичній підготовці, але сприймав нове з великим ентузіазмом. Було добре відомо, що красиву ідею Бор глибоко зрозуміє, підтримає і полюбить не менше самого автора. Всього за кілька років, між серединою 20-х та початком 30-х років, Бор набув (і вже до кінця життя зберіг) славу лідера всього нового і живого в теоретичній науці, а його копенгагенський інститут залишався фізичною Меккою.

Тим часом, нові ідеї захоплювали уяву науковців, одночасно все більше входячи в протиріччя з класикою, та й одна з одною, теж. Героїчну спробу ввести ці революційні процеси в розумні рамки зробив Бор. У 1918 році він сформулював «принцип відповідності», згідно якого «класичні» та «некласичні» принципи є взаємним логічним продовженням глобальних і універсальних законів при переході від макро- до мікрооб'єктів.

Подальше розгортання подій навколо вивчення атома було бурхливим і захоплювало дух. На початку 1926 року Ервін Шредінгер завершив створення ним *хвильової механіки*: виходячи з гіпотези Луї де Бройля він взагалі відмовився від поняття «частинка», написав основне рівняння нерелятивістської квантової механіки, яка описувала поведінку матерії в термінах лише тільки хвиль. В 1927 році Вернер Гейзенберг разом з Максом Борном побудував так звану *матричну механіку*, взагалі відмовившись від поняття електронної орбіти та проголосив «принцип невизначеності». Гейзенбергівський електрон перетворився на математичну абстракцію – на «щось» розмазане в просторі і часі. Нарешті в 1928 році після

кількох років поглибленого вивчення теорії відносності Ейнштейна юний геній Поль Дірак (у віці 26 років) створив теорію, яка враховувала релятивістські закони і вже як саме собою очевидне – хвильові властивості електрона, та передбачила можливість існування античастинок.

Протиріччя між хвильовою механікою Шредінгера та матричною Гейзенберга знову довелося залагоджувати Нільсу Бору. На цей раз він об'явив, що обидві механіки – і матрична, і хвильова – є абсолютно правильними, оскільки відображають дійсність з двох сторін. Вони доповнюють одна одну, тому електрон (як і будь-яка елементарна частинка) може проявляти в залежності від умов, властивості і частинки, і хвилі. Така позиція ввійшла в розширеному вигляді в історію у вигляді філософського «принципу доповнення». В розширеному формулюванні принцип доповнення трактується так – якщо деяке глибоке твердження є вірним, то й протилежне йому глибоке твердження є також вірне. І, хоча цей принцип був сприйнятий далеко не всіма вченими (Ейнштейн, наприклад, з ним не змирився до кінця життя), для більшості став тією платформою примирення, якої вимагав час. Комфортний психологічний стан було повернуто у загальну свідомість, а Нільс Бор заробив величезну вдячність та безумовний авторитет. Його можна назвати Великим Примирювачем, людиною, яка змогла досягнути велич ідей своїх колег і вчасно (на зломі історії розвитку фізики) авторитетно сказати – «і ти прав, і ти», що замість роз'єднання умів врешті спричинило неймовірний прогрес.

Список використаних джерел

1. Bohr N. On the Constitution of Atoms and Molecules. // Phil. Mag. – 1913. – 26, P. 1-25 (part I), P. 476-502 (part II), P. 857-875 (part III).
2. Louis de Broglie Revolution in physics. – Moscow: Atomizdat, 1965. – 113 p. (in Russian).

Надійшла до редколегії 12.04.13