

Щербак О.А.

(Дніпропетровський національний університет)

*Развитие квантовых представлений и принятие их научным обществом Украины можно проиллюстрировать на примере формирования теории аномального эффекта Зеемана в рамках строй квантовой механики. В данной статье проведен сравнительный анализ теорий Лоренца, Фогта, Роба, Зоммерфельда, Ритца, и Кордыша, показана эволюция основных понятий в историко-физическом контексте. Только так можно показать эволюцию основных идей, и переход к современной неклассической физике.*

*In the given paper the comparative data analysis of Lorentz theory, theory of Voigt, theory of Robb, theory of Sommerfeld, theory of Ritz, theory of Kordisch; theories has been conducted, the evolution of the attitude to the main concepts in historical and physical context has been exposed. Earlier unknown Kordisch's materials have been analyzed for the first time. Only this way the evolution of the attitude to the main ideas, and transition to modern non-classical physics can be shown.*

Квантова механіка, становлення якої почалось на початку двадцятого століття, призвела до формування нового бачення створення та функціонування світу. Нові поняття, які йшли всупереч класичним, потребували часу для осмислення та сприйняття науковою громадськістю. Формування нових ідей та впровадження їх у фундаментальну фізику спочатку ґрунтувалось на уявленнях класичної фізики. Тому, на сьогоднішній момент, ми розрізняємо «стару» квантову механіку та квантову механіку взагалі.

Розвиток квантових уявлень та сприйняття їх науковим середовищем України можна проілюструвати на прикладі формування теорії аномального явища Зеемана у рамках старої квантової механіки. Оскільки саме пошук теорії, за допомогою якої можна б було пояснити це явище, став одним з важливих факторів появи того,

що ми можемо назвати сучасною квантовою теорією.

Перші спроби теоретично описати закономірності у спектроскопі почалися ще у 70 роках XIX століття. Однак вони не мали успішного продовження внаслідок неадекватності фізичних теорій, що стосувалися теорії атома та природи випромінювання. Виникнення теорії атома, поява та визнання теорії Лоренца, праці Бора стали тим поворотним моментом у створенні теорії аномального ефекту Зеемана, що дозволили науковцям наблизитися до сучасної фізики.

Класична стаття Бора, що з'явилась у 1913 р., стала початком того, що ми називаємо старою квантовою механікою. Її вирізняло те, що вона допускала використання класичної механіки для визначення можливих рухів системи. Методологічно підхід старої квантової



теорії полягав у використанні адиабатичного принципу та принципу відповідності. Адиабатичний принцип полягав у тому, що була можливість знаходження стаціонарних станів деформованих систем, адиабатично спряжених з недеформованими системами, квантові умови яких були відомі. Так, за цим принципом «раніше подана квантова умова Бора, згідно з якою “момент імпульсу електрона, що обертається навколо ядра, дорівнює цілому кратному значенню величини  $h/2\pi$ ”, тобто  $2\pi mvr = nh$ , втратило відтінок загадковості: просто величина  $2\pi mvr = 2 \cdot \frac{1}{2}mv^2 \cdot (2\pi/v) = 2\bar{E}_{kin}/v$  - ... є адиабатичним інваріантом». [6, с.108] Відповідно адиабатичного принципу обґрунтовувалась припустимість використання класичної механіки у квантовій теорії, для випадку параметрів, що залежать від часу. Цей принцип був доповнений принципом відповідності, який полягав у тому, що квантова теорія мала граничним випадком класичну механіку. Ідея була запропонована М. Планком у 1906 р., який показав, що квантово-теоретичні результати зводяться до класичних, якщо  $h \rightarrow 0$ .

Явище розщеплення ліній спектру у магнітному полі, що зараз носить назву «Нормальний ефект Зеемана», було відкрите Зееманом у 1896 р. Але вже «22 грудня 1897 році Престон повідомив Дублінському Королівському товариству результати своїх експериментів з ефекту Зеемана, що були виконані за допомогою барретівського потужного електромагніта Королівського коледжу науки в Дубліні та вгнутої ґратки з радіусом 21,5 футів і 14438 штрихів на дюйм» [6, с.128]. Він спостерігав замість кожної компоненти спектру групи

рівновіддалених ліній, при цьому картина розщеплення залишалась симетричною відносно початкової лінії. Цей ефект зараз носить назву аномального (або складного) ефекту Зеемана. Виявилось, що частіше за все вчені, що досліджували це явище, мали справу не з нормальним, а з аномальним явищем Зеемана. Явище, яке спостерігав Т. Престоном (Т. Preston), незабаром було підтвержене А. Корню (А. Courno).

Починаючи з 1897 року Г. Лоренц намагався пояснити теорію аномального явища Зеемана за допомогою узагальнення своєї теорії, однак на той час ця проблема так і залишилась нерозв'язаною. Теорія нормального ефекту Зеемана, яка була подана у рамках старої квантової теорії, виявилась справедливою лише для синглетних ліній і ця теорія виявилась недієздатною для аномального явища Зеемана.

Якщо навести основні етапи становлення теорії аномального явища Зеемана, то їх можна представити таким чином.

А. Зоммерфельд (Sommerfeld A.) енергетичний рівень визначив двома квантовими числами: перше  $n$  – головне квантове число ввів у 1913 році Бор ( $n$  – збільшується на одиницю при переході від одного терма спектральної серії до іншого). А друге азимутальне квантове число  $k$  у 1915 вводить Зоммерфельд, за ним відрізняють одна від одної різні спектральні серії. Як зазначено в книзі Уїттекера, «у вчених увійшло у звичку використовувати  $l = k - 1$  замість  $k$ ; причина цього є у тому, що при наявності одного активного електрону його орбітальний момент дорівнює  $l\hbar$ » [10, с.203].  $l$  підпорядковується правилу відбору: величина змінюється у межах  $l + 1$  та  $l - 1$ .

Серії енергетичних рівнів атома, для яких  $l = 0, 1, 2, 3$ , були позначені  $s, p, d, f$  ( $s$  – sharp,  $p$  – principal,  $d$  – diffusive,  $f$  – fundamental). Але, як виявилось, двох квантових чисел недостатньо для опису спектрів лужноземельних металів. Зоммерфельд у 1920 році вводить  $j$  – внутрішнє квантове число, яке має різні значення для двох термів дуплету. Але вчені припустили, що поряд з орбітальним кінетичним моментом атома існує ще один кінетичний незалежний момент. За першим припущенням це був кінетичний момент ядра  $s\hbar$ , що для лужних металів дорівнював  $\frac{1}{2}\hbar$ . При поєднанні його з кінетичним моментом  $l\hbar$ , результуючий повний момент атома  $j\hbar$  приймав би одне з двох значень  $(l - \frac{1}{2})\hbar$  та  $(l + \frac{1}{2})\hbar$ .

Спочатку припускали поєднати кінетичний момент  $s\hbar$  з орбітальним кінетичним моментом  $l\hbar$ , з метою створити результуючий повний кінетичний момент  $j\hbar$  ядра атому. Але В. Паулі показав «що, якщо б кінетичний момент  $s\hbar$  належав центру атома, з цього б була певна залежність ефекту Зеемана від атомного номеру, а це не спостерігається» [10, с. 204]. Як писав де Бройль: «Причина цієї загальної невдачі полягала у тому, що в основу пояснення ефекту Зеемана в усіх трьох теоріях (стара квантова теорія, теорія Лоренца, хвильова механіка) був покладений один постулат. Припускали, що магнітні моменти, якими можуть характеризуватися атоми, виникають лише завдяки орбітальному руху внутрішньоатомних електронів. Така точка зору

передбачала, що повний момент кількості руху атома обов'язково повинен мати строго фіксоване відношення до його повного магнітного моменту, причому величина цього відношення залежить від відношення електричного заряду електрона до його маси. Цей висновок, однаковий як в класичній теорії електрона, в старій квантовій теорії, і в хвильовій теорії в її початковій формі, призвів в усіх трьох теоріях до того, що ефект Зеемана завжди повинен бути нормальним» [7]. У 1925 році Дж. Ю. Уленбек та С. Гаудсміт, запропонували розглядати електрон як такий, що має кінетичний момент, рівний  $\frac{1}{2}\hbar$ , тобто

була введена ідея спіну. Як згадував С. Гаудсміт «... мені подобалось, що в нашій схемі, спектр водню став спеціальним випадком лужних елементів і рентгенівських спектрів. Стара релятивістська формула для дуплетів була логічним наслідком нашої схеми. Я особливо задоволений тим, що ми нарешті з'ясували тасмничу компоненту лінії гелію 4686 А, що спостерігалась Пашеном, але заборонялась теорією Зоммерфельда. Уленбек і я опублікував цю роботу у голландському журналі «Physica»...» [5, с. 155]. У зв'язку зі спіном існує і магнітний момент, значення якого за їх твердженням дорівнювало  $\frac{e\hbar}{2mc}$ . Це й був ключ до пояснення аномального явища Зеемана.

З моменту відкриття аномального явища Зеемана до 1925 р. не існувало його однозначного пояснення. Це можна пов'язати з тим, що саме в цей час відбувався процес становлення квантової фізики.

Набір основних теорій, за допомогою яких намагалися пояснити анома-

льне явище Зеємана, можна звести до наступних:

- Теорія Лоренца;
- Теорія Фогта;
- Теорія Робба;
- Теорія Рітца;
- Теорія Зоммерфельда;
- Теорія Кордита.

Можливо, існує інша класифікація теорій до пояснення аномального ефекту Зеємана у рамках старої квантової теорії. Але мені здається, що основні теорії у ній представлені. Розглянемо детальніше фізичні засади, що були використані у цих теоріях.

Узагальнена теорія Лоренца. Теорія розглядає систему не з одним, а з великою кількістю електронів. Для того, щоб описати систему з  $n$  електронів, необхідно мати  $3n$  рівнянь руху типу:

$$m \frac{dv}{dt} = -kp + \frac{e}{c} [vH] + F \quad (1) \text{ де,}$$

$\frac{e}{c} [vH]$  – пондеромоторна сила;

« $-kp$ » – сила, що утримує  $e$  на орбіті;

$F$  – член, що за теорією врахує між-електронний зв'язок. Для того, щоб отримати мультиплетність, необхідно накласти штучно умову, що якщо система має  $n_1$  рівнянь зв'язку, то ступінь свободи дорівнює  $3n - n_1$ . Така система може дати  $N = 3n - n_1$  спектральних ліній.

Але виявилось, що застосовуючи теорією Лоренца, розв'язавши складну систему рівнянь, можна отримати тільки зміщення спектральних ліній, але не їх розщеплення.

Теорія Робба. Система, що випромінює, складається з парного числа електронів, положення рівноваги яких збігається одне з одним. Вони притягуються до цього положення з силами, що пропорційні їх зміщенню. Робб не вводить взаємодію між цими електронами,

але, вводить припущення, що існує залежність між положеннями електронів у атомі, і цю залежність він виявляє у членах другого порядку відносно координат електронів. Теорія Робба за підходом до опису коливальної системи дещо збігається з узагальненою теорією Лоренца.

Для системи, що складається з двох електронів, Робб отримує п'ять коливальних станів (спектральний квінтет), що на той час було добрим результатом. Але формальний характер припущень взаємодії електронів і розбіжності з експериментальними даними був причиною неприйняття цієї теорії.

Теорія Рітца. Рітц намагався побудувати магнітну модель атома. Як він стверджував: «...напрошується гіпотеза suggest itself, що коливання у серіальних спектрах утворюються тільки магнітними силами, і надалі повинно бути показано, що це припущення приводить простим шляхом до розуміння серіальних законів і аномального ефекту Зеємана» [1, с. 472]. Модель Рітца магнітного поля в атомі полягає у тому, що воно складається з аксіально розташованих та з'єднаних один з одним молекулярних магнітів. У площині, що перпендикулярна вісі магнітів, відбувається рух електронів. Електрони у такій моделі рухаються у потужному магнітному полі, при цьому Рітц враховує, що внутрішнє магнітне поле  $H_0$  за порядком величини у  $10^4$  раз більше за зовнішнє магнітне поле  $H$ , що використовувалось при вивченні аномального ефекту Зеємана. Для того, щоб описати явище в цілому, вчений припускає, що існує прецесія внутрішнього поля  $H_0$  навколо зовнішнього поля. Пондеромоторною силою Рітц нехтує. Змінюючи кількість елементарних магнітів, а також положення площини, Рітц отримує різні значення ймовірних коливальних станів, але вказує на те, що у розщепленні спектральних ліній можуть спо-

стерігатись лише ті лінії, що мають визначену мінімальну інтенсивність.

Відмінність теорії Рітца від попередніх полягає у тому, що вона була однією з перших, в якій зроблена спроба пояснити аномальний ефект Зеемана за допомогою процесів, що відбувались усередині атома при дії на нього зовнішнього магнітного поля. І незважаючи на те, що магнітна модель атома зараз має лише історичне значення, не треба забувати, що «вона зіграла важливу роль в загальному контексті дослідницької діяльності Рітца як свого роду теоретична база для обґрунтування комбінаційного принципу.» [1, с.475]

Теорія Фойгта (Voight) полягає у доповненні рівнянь Лоренца (1) невідзначеними коефіцієнтами. Значення коефіцієнтів підбирались за даними спостереження так, щоб вони змогли охарактеризувати визначене явище. Фойгт відмовився від ізотропії в атомі. Теорія носила частковий характер і добре пояснювала лише характер розщеплення ліній D<sub>1</sub> D<sub>2</sub>, але не була загальною теорією аномального ефекту. Недолік цієї теорії полягав у відсутності теоретичних засад для обрання коефіцієнтів, і тому вона носить досить формальний характер.

Теорія Зоммерфельда до 1915. Головною ідеєю цієї теорії є спрощення теорії Фойгта, а фактично удосконалення теорії Лоренца з метою введення у рівняння Лоренца членів, що враховують загасання коливань. При цьому розглядалися рівняння руху електрона в атомі, коли коливання відбуваються повздовжньо та поперечно до зовнішнього поля. На основі цих міркувань було запропоноване пояснення розщеплення для ліній D<sub>1</sub> та D<sub>2</sub> у сильних та слабких магнітних полях.

Математичний підхід використаний у теоретичних побудовах, полягає у наступному. Рівняння Фойгта представлено у вигляді:

$$\left(\frac{d^2}{dt^2} + n_k^2\right)\xi_k = ih \frac{d}{dt} (a\xi_k + b\xi_{k+1} + \bar{b}\xi_{k+2}), \quad (1)$$

де  $h = \frac{e}{m} H$ ,  $H$  – напруженість

магнітного поля,  $\xi_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) – координати  $x, y, z$ ;  $a, b, \bar{b}$  – коефіцієнти зв'язку, які від поля не залежать  $b, \bar{b}$  – комплексно-спряжені коефіцієнти;  $n$  – число коливань.

Зоммерфельд, спостерігаючи розкладення ліній D<sub>1</sub> D<sub>2</sub> у слабкому полі, надав наступні значення коефіцієнтам  $\xi_1 = Ae^{jvt}$ ;  $\xi_2 = Be^{jvt}$ ;  $\xi_3 = Ce^{jvt}$  (2).

$$a = \frac{2}{3}, b = \frac{1}{9}, \quad \text{звідки}$$

$$b = \frac{1}{3} e^{i\beta}; \bar{b} = \frac{1}{3} e^{-i\beta}. \text{ Так що обрання}$$

останніх коефіцієнтів відбулось довільним чином,  $\beta$  була невизначена константа. Після використання вищезазначених коефіцієнтів у рівнянні (1) було отримано рівняння:

$$\left(\frac{d^2}{dt^2} + ih \frac{d}{dt} + n_k^2\right)\xi_k = \frac{ih}{3} \frac{d}{dt} (\xi_k + e^{i\beta} \xi_{k+1} + e^{-i\beta} \xi_{k+2}).$$

Де після підстановки (2) коефіцієнтів виключаючи проміжні константи  $A, B, C$ , таким чином Зоммерфельд отримав систему для отримання  $\beta$ :

$$\begin{vmatrix} p_1 & e^{i\beta} & e^{-i\beta} \\ e^{-i\beta} & p_2 & e^{i\beta} \\ e^{i\beta} & e^{-i\beta} & p_3 \end{vmatrix} = p_1 p_2^2 + 2\cos\beta p_1 - 2p_2, \quad (3)$$

$$\text{де } p_k = 1 + \frac{v^2 + \nu h - n_k^2}{-\nu h/3} \quad (3a).$$

Розв'язок підбирався таким чином, щоб отримати нормальний триплет. Для знаходження  $p_1$  та  $p_2$  у вираз (3a) вчений підставив значення частоти  $\nu$ ,

що він отримав в експерименті, у цьому випадку

$$p_1 = -2 - 2 \frac{n_2^2 - n_1^2}{nh}; p_2 = -2 + \frac{n_2^2 - n_1^2}{nh},$$

$$n^2 = \frac{1}{3}(n_1 + 2n_2^2). \text{ Підставляючи ці}$$

отримані значення у (3) Зоммерфельд приходить до висновку, що

$$\cos 3\beta = 1 \Rightarrow \begin{cases} \beta = 0 \\ \beta = \pm \frac{2\pi}{3} \end{cases} \text{ При}$$

$\beta = 0$  отримуємо загальне рівняння Зоммерфельда для «паралельних» (поздовжніх) коливань. Недоліком теорії було «прилагоджування» коефіцієнтів під задалегідь відомий результат та неможливість передбачення нових результатів. Хоча, за математичним підходом, це вже був вагомий внесок у створення теорії аномального явища Зеємана.

**Теорія Кордиша.** Л. Кордиш – фізик-теоретик, що працював в університетах України, внаслідок історичних обставин менш відомий світовій громадськості. За відгуком О. Хвольсона «Кордиш був одним з найбільш талановитих у нас спеціалістів з теоретичної фізики» {цит. по [11]}. Теорією спектрів вчений почав займатися з моменту стажування його у 1906 р. у М. Планка. Ним було надрукована низка праць, таких як: «Закономірности в спектрах» (1905), «О спектральных полосах» (1906), «О закономерностях в спектральных полосах» (1906). Під час стажування у проф. Зоммерфельда у Фізичному інституті (Мюнхен, 1913 – 1914) Л. Кордиш і почав займатися розробкою теорії аномального явища Зеємана. Слід відмітити, що мабуть існувало листування між цими вченими, бо в осо-

бовій справі Л. Кордиша знаходиться прохання від його імені до міністра освіти СРСР з пропозицією надати йому відрядження на рік за запрошенням проф. Зоммерфельда для подальшої роботи. Але, як відомо, Л. Кордишу було відмовлено.

Теорія аномального ефекту Зеємана, розглянута Л. Кордишем у роботі [8], мала наступні характерні риси.

Для опису руху електрона в атомі Л. Кордиш використовував ідеї квантування Н. Бора, та ввів просторове розташування орбіт електронів в атомі; аналогічно вчинили Вейзенберг (Weisenberg), Ланде (Lande), Паулі (Pauli) в одній з своїх праць 1922-1923 рр., що вийшла друком у «Zeitschrift für Physik». Модель електрона він обирає за Лоренцем, так як «вираз для маси Лоренцівського електрона узгоджується з принципом відносності», а модель атома з моделлю атома «з центральним додатнім ядром типу Резерфордівського».

За математичним підходом, це було, як пише автор, «узагальнення теорії Зоммерфельда». Описуючи спочатку рух ізольованого електрона і враховуючи, що в атомі електрон виконує два виду руху: прецесійний – навколо зовнішнього магнітного поля і нутаційний – навколо вісі, що виконує прецесійний рух, вчений отримує пояснення нормального явища Зеємана. Для пояснення аномального явища Л. Кордишем була запропонована ідея, за якою на рух електрона в атомі впливає, крім зовнішнього поля, ще і «внутрішнє, обумовлене рухом інших електронів» [8, с.133]. Ця гіпотеза була співзвучна ідеї Зоммерфельда та Ланде про так званий внутрішній ефект Зеємана, яка була висунута і розвинута ними у 1919 р.

Але хибні припущення щодо кількості електронів в атомі і засновані на них спроби знайти величину внутрішнього магнітного поля, не дали можливості створити повну теорію аномального ефекту Зеемана.

Характерними рисами вищезазначених теорій є спроба внести уявлення класичної механіки для опису квантових систем. І хоча зараз повна теорія ефекту Зеемана як аномального, так і нормального може бути побудована на основі теорії Дірака, в якій враховуються як релятивістські, так і спінові ефекти, аналіз праць вчених, що працювали у рамках старої квантової механіки, є цінним з точки зору з'ясування процесу усвідомлення фізиками нових квантових уявлень. Так, на момент розвитку «передспінових теорій» не було чітко встановленого уявлення про електрон,

(адже відомо, що само поняття «електрон» не сприймалося як реальне у деяких відомих наукових школах), сприйняття ідей Бора теж не було однозначним, тому ці теорії, що мали місце у «передспіновий період», дозволили усвідомити і органічно ввести у фізику ці ідеї та провести апробацію всіх ідей, що з'явилися на той час. Переходячи від ідей Лоренца, які були ближче до чисто класичних уявлень, до подальших теорій Рітца та Зоммерфельда (пізнього періоду), можна зробити висновок як про спадковість ідей, так і про поступове їх «забарвлювання» у «квантово-механічні кольори». Хоча ці теорії, як і теорія Кордиша, носили проміжний характер, але вони склали необхідний етап, що передувало створенню сучасної квантової картини світу.

### ЛІТЕРАТУРА

1. El'yashevich M A, Kembrovskaya N G, Tomil'chik L M Walter Ritz as a theoretical physicist and his research on the theory of atomic spectra Phys. Usp. –38. – 435. – (1995)
2. Martin A. History of spin and statistics // arXiv:hep-ph/0209068 v1 6 Sep 2002
3. Ritz W. Ann. d. Phys. . – 25 . – 660 (1908) . – (робота VII). –с. 98-136
4. Robb A. A. Beitrage zur Theorie des Zeeman-Effektes. – An. Phys. – 15. – 1904. – с. 107.
5. Гаудсмит С. Открытие спина электрона. – Успехи физических наук. – 1967 г. – т. 93. – вып. 1. – с. 151-158.
6. Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики: Пер. с англ. /

Под ред. Л.И.Пономарева. –М.: Наука. – 1985. –384 с.

7. де Бройль Луи «Революция в физике» (Новая физика и кванты) . – Атомиздат. – Москва. – 1965
8. Кордыш Л. Й. Аномальные явления Зеемана. – 1915 – Киев – с. 171
9. Лорентц Г. Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения. – Гос. изд. тех-теор. литературы. – 1953. – 471с.
10. Уиттекер Э. История теории эфира и электричества. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». —2001. — с. 512.
11. Штрум Л. Я. Леон Иосифович Кордыш [Некролог] // Успехи физических наук – 1933. – т. 13. – вып. 6. – с. 970-975.