

Савченко Д.В.^{1,2}

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, пр. Берестейський 37,

²Технічний центр НАН України, Київ, вул. Покровська 13

email.: dariyasavchenko@gmail.com

ДО 80-РІЧЧЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНІТНОГО РЕЗОНАНСУ: ІСТОРІЯ ВІДКРИТТЯ ЯВИЩА, МИНУЛЕ ТА СЬОГОДЕННЯ ШКОЛИ М.Ф. ДЕЙГЕНА

Анотація. Наведено у хронологічному порядку появу фундаментальних понять, законів та явищ, що передували відкриттю електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) 21 січня 1944 року Є.К. Завойським. Наведено історію створення та розвитку наукової школи М.Ф. Дейгена.

Abstract. The emergence of fundamental concepts, laws and phenomena that preceded the discovery of electronic paramagnetic resonance (EPR) on July 21, 1944 by E.K. Zavoyskyi. The history of the creation and development of the scientific school of M.F. Deigen.

Ключові слова: ЕПР, радіоспектроскопія, наукова школа.

Key words: EPR, radiospectroscopy, scientific school.

У 2024 р. світова наукова спільнота відзначає 80-річчя відкриття явища електронного парамагнітного резонансу (ЕПР), якому передувала ціла низка наукових робіт відомих учених.

Однією з перших та найважливіших таких робіт є публікація П. Зеємана 1897 р. [1], де він доповів про розщеплення спектральних ліній під впливом магнітного поля. Далі в тому ж році його вчитель Г.А. Лоренц дав теоретичне пояснення спостережуваного ефекту [2]. Таким чином було сформульовано ефект Зеємана, зумовлений тим, що в присутності магнітного поля електрон, який має магнітний момент, набуває додаткової енергії і ця енергія призводить до зняття вироджених атомних станів по магнітному квантовому числу m_j та розщеплення спектральних ліній. У тому ж 1897 р. Дж. Лармор [3] довів, що єдиним наслідком впливу магнітного поля на орбіту електрона в атомі є прецесія орбіти та вектору – орбітального магнітного моменту електрона з кутовою швидкістю ω_L навколо осі, що проходить крізь ядро атома паралельно вектору

індукції магнітного поля. 1902 р. П. Зеєман та Дж. Лармор отримали Нобелівську премію «За видатні заслуги в дослідженнях впливу магнетизму на радіаційні явища».

Далі важливими для відкриття ЕПР стали роботи П. Кюрі [4] та П. Вейса [5], які дали можливість сформулювати закон Кюрі-Вейса для температурної залежності сприйнятливості для парамагнітних речовин. Модель Лармора-Зеємана-Лоренца підтвердила залежність магнітних ефектів у спектрах від напруженості поля та параметра $e/(m_e c)$, а взаємодія спінів із зовнішнім магнітним полем отримала назву Зеєманівської взаємодії. 1920 р. В. Паулі ввів одиницю елементарного магнітного моменту – магнетон Бора, а у своїх роботах у 1921-1934 рр. А. Ланде ввів поняття g-фактора Ланде – множника у формулі для розщеплення рівнів енергії в магнітному полі, що визначає масштаб розщеплення у відносних одиницях.

1922 р. О. Штерн та В. Герлах провели відомий дослід [6], який підтвердив квантування проекції вектору магнітного моменту атомів та існування в електронів власного магнітного моменту та пов'язаного з ним моменту імпульсу – спіна. Згодом у тому ж році А. Ейнштейн та П. Еренфест [7] пояснили теоретично цей дослід і припустили, що якщо є два стани з різними енергіями, то, отже, є і квантові переходи між ними, спонтанні та індуковані. При цьому переорієнтація орбітальних атомних магнетиків у молекулярному пучку у присутності сталого магнітного поля має супроводжуватись поглинанням/випромінюванням радіочастотних квантів. 1923 р. Я.Г. Дорфман [8] висловив думку про можливість резонансного поглинання електромагнітних хвиль парамагнетиками, називаючи це явище фотоманітним ефектом, а манітне резонансне поглинання має спостерігатись за відповідних частот у феромагнітних та парамагнітних тілах у присутності зовнішнього магнітного поля.

1924 р. В. Паулі [9] висловив гіпотезу про наявність спіна у ядер у зв'язку з надтонкою структурою оптичних спектрів. А у 1925 р. С.А. Гоудсміт та Дж.Ю. Уленбек [10] сформулювали, що спін – це внутрішній момент (кількості руху – імпульсу) частинки.

1936 р. Я.К. Гортер [11] повідомив про чергову невдалу спробу спостереження поглинання електромагнітних хвиль у парамагнетиках, проте це не зупинило вчених продовжувати дослідження у цьому напрямі. І у 1938-1940 рр. І.А. Рабі [12, 13] повідомив про перше застосування резонансного методу для вимірювання магнітних моментів протона та дейтрону, який міг бути

застосований лише до обмеженого числа ядер. За ці роботи він отримав Нобелівську премію 1944 року “За резонансний метод вимірювань магнітних властивостей атомних ядер”.

Всі ці наукові праці надихнули Є.К. Завойського на відкриття фундаментального явища ЕПР. Офіційною датою відкриття явища вважається 21 січня 1944 р. коли під час досліджень парамагнітної релаксації парамагнітних солей на частотах від 10^7 до 10^8 Гц за паралельної та перпендикулярної орієнтації змінного та постійного магнітних полів, ним було виявлено інтенсивне резонансне поглинання височастотної енергії при строго визначених відношеннях напруженості постійного магнітного поля до частоти [14, 15].

У 1960 р. М.Ф. Дейген, майбутній чл.-кор. АН УРСР, один із видатних учнів акад. АН УРСР С.І. Пекаря, який на той час був талановитим молодим фізиком-теоретиком, що вже зробив перші кроки в галузі радіоспектроскопії [16, 17], отримав запрошення від акад. АН УРСР В.Є. Лашкарьова очолити лабораторію радіоспектроскопії в Інституті напівпровідників АН УРСР, дібрати кадри та розробити наукову програму досліджень. Відділ радіоспектроскопії, у якому успішно співпрацювали теоретики та експериментатори, став основою започаткованої М.Ф. Дейгеном Київської школи радіоспектроскопії, яка широко відома в наукових колах до цього часу. Семінар відділу, де доповідали провідні вітчизняні та закордонні вчені та обговорювалися найновітніші наукові досягнення у спектроскопії ЕПР, став загальноміським.

Під керівництвом М.Ф. Дейгена було створено перший в СРСР спектрометр подвійного електронно-ядерного резонансу (ПЕЯР) з показниками набагато кращими ніж у світових аналогів на той час. На цьому спектрометрі було проведено унікальні дослідження ПЕЯР далеких від парамагнітного центра ядер, динамічних та електропольових ефектів. На основі одержаних результатів було розроблено новий метод розрахунку структури енергетичних зон у кристалах по даних ПЕЯР. М.Ф. Дейгеном був запропонований принципово новий радіоспектроскопічний метод дослідження – подвійний електронно-ядерний магніто-акустичний резонанс, який через декілька років був втілений у дослідницьку практику.

Серед важливих результатів школи М.Ф. Дейгена протягом 1956-1995 рр. можна виокремити:

- розвиток теорії форми ліній ЕПР локальних центрів у неметалічних кристалах;

- дослідження електропольових ефектів в ЕПР, що дало можливість виявити новий механізм розширення ліній ЕПР в кристалах;
- розробку теорії локальних електронних станів на поверхні неметалічного кристала;
- розробку нового методу розрахунку структури енергетичних зон у кристалах за даними ПЕЯР;
- відкриття і з'ясування негативного ефекту ПЕЯР;
- відкриття явища інверсної заселеності спінових станів під впливом неполяризованої оптичної радіації;
- з'ясування моделі носій-домішкової взаємодії у твердих тілах;
- встановлення відмінності у характері хвильової функції основного стану донорів, пов'язаної з різницею у величині долин-орбітального розщеплення для атомів азоту, що заміщують нееквівалентні позиції у ґратці карбїду кремнію;
- відкриття впливу мікрохвильового відгуку на властивості високотемпературних надпровідників.

Сучасні представники наукової школи М.Ф. Дейгена, в т.ч. безпосередньо його учні, працюють в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (д.ф.-м.н., проф. Б.Д. Шанїна, д.ф.-м.н. К.М. Калабухова, д.ф.-м.н. А.А. Кончиць, д.ф.-м.н. І.П. Ворона, д.ф.-м.н. В.Я. Братусь, д.ф.-м.н. І.С. Головіна, к.ф.-м.н. В.В. Носенко, С.В. Красновид), Інституті матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України (чл.-кор. НАН України, д.ф.-м.н., проф. М.Д. Глинчук, д.ф.-м.н., В.В. Лагута) та КПІ ім. Ігоря Сікорського (д.ф.-м.н. Д.В. Савченко, асист., асп. М.О. Голяткіна).

Також у Центрі колективного користування науковим обладнанням «ЕПР спектроскопія» НАН України (Технічний центр НАН України) та в Інституті магнетизму НАН України та МОН України функціонують сучасні спектрометри ЕПР світового рівня від фірми Bruker.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Zeeman, P. On the influence of magnetism on the nature of the light emitted by a substance // Philos. Mag. Ser. 5. – 1897. – Vol. 43, № 262, – P. 226-239.
- [2] Lorentz, H. A. Über den Einfluss magnetischer Kräfte auf Lichtemission // Ann. Physik – 1897. – Vol. 299, №. 13. – S. 278-284
- [3] Larmor, J. The Influence of a Magnetic Field on Radiation Frequency // Proc. R. Soc. Lond. – 1897. – Vol. 60. – P. 514-515

- [4] Curie, P. Lois expérimentales du magnétisme. Propriétés magnétiques des corps à diverses températures // Ann. Chim. Phys. – 1895. – Vol. 5. – P. 289-405.
- [5] Weiss, P. L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique // J. de Phys. – 1907. – Vol. 6, № 1. – P. 661-689
- [6] W. Gerlach, O. Stern Der experimentelle Nachweis des magnetischen Moments des Silberatoms // Z. Phys. A: Hadrons Nucl. – 1922. – Vol. 8, № 1. – S. 110-111.
- [7] A. Einstein, P. Ehrenfest Quantentheoretische Bemerkungen zum Experiment von Stern und Gerlach // Z. Phys. A : Hadrons Nucl. – 1922. – Vol. 11, № 1. – S. 31-34.
- [8] Dorfmann, J. Einige Bemerkungen zur Kenntnis des Mechanismus magnetischer Erscheinungen // Z. Phys. A: Hadrons Nucl. – 1923. – Vol 17, № 1. – S. 98-111.
- [9] Pauli, W. Zur Frage der theoretischen Deutung der Satelliten einiger Spektrallinien und ihrer Beeinflussung durch magnetische Felder // Naturwissenschaften. – 1924. – Vol. 12, № 37. – S. 741-743.
- [10] G.E. Uhlenbeck, S. Goudsmit, Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons // Naturwissenschaften 13(47) (1925) 953.
- [11] Gorter, C. J. Negative result of an attempt to detect nuclear magnetic spins // Physica. – 1936. – Vol. 3, № 9. – P. 995-998.
- [12] I. I. Rabi, J. R. Zacharias, S. Millman, P. Kusch A New Method of Measuring Nuclear Magnetic Moment // Phys. Rev. – 1938. – Vol. 53, № 4. – P. 318.
- [13] P. Kusch, S. Millman, I. I. Rabi The Radiofrequency Spectra of Atoms Hyperfine Structure and Zeeman Effect in the Ground State of Li6, Li7, K39 and K41 // Phys. Rev. – 1940. – Vol. 57, № 9. – P. 765-780.
- [14] Zavoisky, E. The paramagnetic absorption of a solution in parallel fields // J. of Phys. USSR. – 1944. – Vol. VIII, № 6. – P. 377-380.
- [15] Zavoisky, E. Paramagnetic relaxation of liquid solutions for perpendicular fields // J. of Phys. – 1945. – Vol. IX, № 2. – P. 211-216.
- [16] Дейген, М.Ф. К теории примесных центров в анизотропных гомео-полярных кристаллах. // Оптика и спектроскопия. – 1957. – Т. 2, № 5.
- [17] Дейген, М.Ф. Теория парамагнитного резонанса F-центров в ионных кристаллах. // ЖЭТФ. – 1957. – Т. 33, № 3. – С. 773.