

А. В. КЕССЕНИХ

ИМЕНА И БЕЗЫМЯННЫЕ ГЕРОИ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Имена открывателей или изобретателей подчас как иероглифы заменяют длительное объяснение принципов наблюдаемых явлений, применяемых устройств или теоретических подходов. В статье рассказано об ученых, внесших вклад в открытие спинового магнитного резонанса (ЭПР и ЯМР) и обстоятельствах утверждения их идей и имен в науке. Прежде всего это касается открывателей электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) Е. К. Завойского и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) Э. Пёрселла с сотр. и одновременно с ними Ф. Блоха с сотр. Среди других «именитых» и безымянных героев магнитного резонанса выделены «предтечи» (Дж. Лармор; П. Зееман; О. Штерн, К. Гортгер и др.), «открыватели», «классики» (А. Абрагам, С. А. Альтшулер, Б. Блини) и «изобретатели» (творцы наиболее плодотворных прикладных методов магнитного резонанса, например, Р. Эрнст, П. Лотербур, П. Мэнсфилд, А. Оверхаузер).

Ключевые слова: электронный парамагнитный резонанс, ядерный магнитный резонанс, Е. К. Завойский, Э. Пёрселл, Ф. Блох

Вспоминаю один случай, поразивший меня на заре моей научной карьеры. В 1956 г. в Москву впервые после длительного перерыва в научных контактах между советскими и зарубежными учеными на Международную конференцию по магнетизму прибыли крупнейшие иностранные специалисты. Наш профессор сопровождал одного из выдающихся ученых в области исследования статических и динамических явлений в ферромагнетиках по всем лабораторным помещениям своей кафедры. Он привел его, наконец, в комнату, где на составленных в ряд длинных лабораторных столах справа располагалась установка для измерения угла вращения плоскости поляризации волны СВЧ ферритами, а слева – установка для измерения комплексных магнитных и электрических проницаемостей в диапазоне СВЧ в тех же ферритах методом стоячей волны. Профессор, как нам было известно, в молодости блестяще освоил французский и немецкий языки. Но вот с английским начал знакомиться только недавно. Как же он мучился, бедняга, описывая своему американскому гостю назначение и принцип работы сначала левой установки! Я и сам был тогда в английском не силен, но уловил, что профессор вместо *standing wave* сказал *stay wave*. Выслушав долгие и трудноуловимые пояснения хозяина, гость уверенно кивнул и отчеканил «метод Бёркса» (*Birks method*)¹.

¹ *Birks, J. B. The Measurement of the Permeability of Low-Conductivity Materials at Centimeter Wavelength // Proceedings of the Physical Society. 1948. Vol. 60. No. 3. P. 282–292. См. перев.: Биркс Дж. Измерение проницаемости ферромагнитных материалов с низкой проводимостью при сантиметровых волнах // Ферромагнитный резонанс и поведение ферромагнетиков в переменных магнитных полях / Ред. С. В. Вонсовский. М., 1952. С. 229–241.*

Когда же после столь же мучительных объяснений, касающихся установки для измерения эффекта Фарадея (это имя, видимо, все же облегчило понимание гостя) один из первых исследователей ферромагнитного резонанса Р. Бозорт² так же уверенно кивнул и молвил: «метод Хогана» (*Hogan method*)³. В то время я воспринял этот диалог в контексте только что миновавшей кампании по борьбе с низкопоклонством, но теперь вспоминаю о нем совсем в другом аспекте. На таком примере легко понять, зачем мы все же вводим в оборот имена изобретателей даже не слишком изощренных устройств и открывателей довольно тривиальных закономерностей.

Имена в профессиональных беседах и дискуссиях играют роль своего рода иероглифов, заменяющих длинное и детальное объяснение и истолкование наблюдаемых явлений, применяемых устройств и теоретических подходов. Подразумеваются, конечно, только утвердившиеся в науке термины, связанные с именами ученых и изобретателей. С другой стороны, более естественно восхищаться меткостью определений и наименований, которые умеют дать своим открытиям исследователи, не претендующие на подобное увековечение своего имени.

Завершается серия шестидесятих годовщин замечательных открытий в области спинового магнитного резонанса (1944–1949)⁴. Это, прежде всего, открытие Е. К. Завойским, работавшим в то время в Казанском университете, электронного парамагнитного резонанса (ЭПР)⁵. Затем – открытие в США практически одновременно Э. Пёрселом с сотрудниками⁶ и Ф. Блохом с сотрудниками⁷ ядерного магнитного резонанса (ЯМР). И, наконец, открытие других модификаций магнитного резонанса в плотных средах⁸. В этом близком ему контексте автору статьи хотелось бы рассмотреть «роль личности» в истории физики.

² Yager, W. A., Bozorth, R. M. Ferromagnetic Resonance at Microwave Frequencies // Physical Review. 1947. Vol. 72. No. 1. P. 80–81. См. перев.: Ягер В., Бозорт Р. Ферромагнитный резонанс при сантиметровых волнах // Ферромагнитный резонанс и поведение ферромагнетиков... С. 135–137.

³ См. Hogan, C. L. Ferromagnetic Faraday Effect at Microwave Frequencies and Its Applications. The Microwave Gyration // Bell Labs Technical Journal. 1952. Vol. 31. No. 1. P. 1.

⁴ Впервые мы обратились к теме анонсированной в заголовке данной публикации в докладе: Кессених А. В. Имена и безымянные герои магнитного резонанса // IV Международная конференция «Проблемы истории физико-математических наук», посвященная 100-летию со дня рождения доктора физико-математических наук, профессора П. С. Кудрявцева. 14–18 июня 2004 г. Материалы конференции. Тамбов. 2004. С. 90–97.

⁵ Zavoisky, E. K. Spin Magnetic Resonance in Paramagnetics // Journal of Physics of the USSR 1945. Vol. 9. No. 2. P. 245; Завойский Е. К. Парамагнитная релаксация жидких растворов в перпендикулярных полях // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1945. Т. 15. № 7. С. 344–350.

⁶ Purcell, E. M., Torrey, H. C., Pound, R. V. Resonance Absorption by Nuclear Magnetic Moments in a Solid // Physical Review. 1946. Vol. 69. No. 1–2. P. 37–38.

⁷ Bloch, F., Hansen, W. W., Packard, M. Nuclear Induction // Physical Review. 1946. Vol. 69. No. 3. P. 127.

⁸ Griffiths, J. H. E. Anomalous High Frequency Resistance of Ferromagnetic Metals // Nature. 1946. Vol. 158. No. 4019. P. 670. См. перев.: Гриффитс Д. Аномальное высокочастотное сопротивление ферромагнитных материалов // Ферромагнитный резонанс и поведение ферромагнетиков... С. 133–135; Dehmelt, H. G. Kernquadrupolfrequenzen in festen Dichloräthylen // Zeitschrift für Physik. 1949. Bd. 126. S. 728.



*Дж. Лармор (J. Larmor). 1857–1942.
Великобритания*



*П. Зеeman (P. Zeeman). 1865–1943. Нидерланды.
Нобелевская премия 1902 г. по физике*

Сделать это интересно на примере терминов и понятий, связанных с именами ученых (отсюда «имена» в названии статьи). Не менее интересно оценить роль выдающихся достижений и трудов других ученых, чьи имена формально не приписаны эффекту, теории или методу, но чьи идеи повседневно присутствуют в профессиональной деятельности научных продолжателей (отсюда «безымянные герои»).

Среди «именитых» и безымянных героев магнитного резонанса (мы рассматриваем историю и практику именно этого направления физики) условно выделим несколько основных групп: *предтечи*, *открыватели*, *классики* и *изобретатели* (творцы наиболее плодотворных прикладных методов магнитного резонанса). Некоторых наиболее известных представителей этих групп и их признанные достижения мы перечисляем ниже.

Предтечи: А.-М. Ампер, Дж. Лармор, П. Зеeman, О. Штерн, К. Гортен, Л. В. Шубников.

Открыватели: И. Раби, Е. К. Завойский, Э. Пёрселл, Ф. Блох, Г. Демельт, А. Кастлер.

Классики: А. Абрагам, Б. Блини, Н. Рэмси, Дж. Попл, Б. Н. Провоторов, Дж. Уо.

Изобретатели: Р. Эрнст, К. Вютрих, П. Лаутербур, П. Мэнсфилд.

Разумеется, ни один из этих четырех списков не претендует на полноту⁹.

⁹ См. статью: Кессених А. В. К Историографии и библиографии магнитного резонанса // Исследования по истории физики и механики. 2005. М., 2006. С. 219–281.

Из предыстории магнитного резонанса пришло имя британского физика Дж. Лармора (*теорема Лармора*, 1896). При наложении магнитного поля спиновые системы, обладающие гиромагнитными свойствами, испытывают «ларморову прецессию», которая происходит с «ларморовой частотой». Лармор не знал ничего о спине, но хорошо осознал закономерности поведения гиромагнитных систем. В одном ряду с этим именем стоят А.-М. Ампер (гипотеза *молекулярных токов*, 1820) и великие исследователи гиромагнитных систем С. Барнетт, А. Эйнштейн и В. Де Гааз (*гиромагнитные эффекты* в ферромагнетиках).

Голландские физики П. Зееман и Х. Лоренц наблюдали (1895–1897) и качественно объяснили гиромагнитные свойства атомов (*эффект Зеемана*) и обусловленные этими свойствами изменения в атомных спектрах при наложении магнитного поля. Взаимодействие магнитного момента с магнитным полем в современной терминологии именуется «*зеемановским взаимодействием*». Не нуждается в комментариях термин «*магнетон Бора*». Контуры спектральной линии магнитного резонанса могут описываться «*лоренцевой функцией*» или «*гауссовой функцией*». Интенсивность сигнала магнитного резонанса при высоких температурах подчиняется «*закону Кюри*». Созвездие имен запечатлелось прямо или косвенно в теории электронного парамагнитного резонанса соединений переходных элементов. Это известное «*правило Хунда*». Это эффект спонтанного нарушения симметрии или «*эффект Яна–Теллера*». Это «*крамерсовы*» и «*некрамерсовы*» (в зависимости от наличия вырождения по спину в отсутствие магнитного поля) подуровни. Это известные в теории электронной парамагнитной релаксации «*рамановские*» процессы двухфононной релаксации и т. д. Полную коллекцию таких именных краугольных камней, или верстовых столбов, можно найти в книге классиков А. Абрагама и Б. Блини¹⁰. Сами же эти классики были настолько деликатны, что сумели практически ни разу не отметить личными именами в своих весьма многочисленных и значительных достижениях.

Из уравнений, имеющих отношение к магнитному резонансу, известны уравнения динамики магнитного момента в ферромагнетиках и других упорядоченных средах («*уравнение Ландау – Лифшица*», 1935) и уравнения для макроскопического ядерного магнитного момента («*уравнения Блоха*», 1945–1946). Также известны «*уравнение Редфилда*» (1955) и «*уравнения Протонова*» (1961).

Эффект магнитного резонанса и его разновидности (ЭПР, ЯМР, ЯКР) не получили «персонального имени». Никто не называет их соответственно «эффектом Завойского», «эффектом Блоха – Пёрселла» и «эффектом Демельта – Крюгера». В магнитном резонансе, если не считать «*эффекта Зеемана*», широкую известность получил лишь «*эффект Оверхаузера*» (о нем см. ниже, «история четвертая»). Это – перенос поляризации с одного сорта спинов на другой в металлах (затем и в жидкостях) при насыщении ЭПР. Он происходит за счет подавляющего преобладания в релаксации, например, ядер совмест-

¹⁰ Абрагам А., Блини Б. Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов. М., 1972. Т. 1. 1973. Т. 2 (Abragam, A., Bleaney, B. Electron Paramagnetic Resonance of Transition Ions. Oxford, 1970).



И. Раби (I. Rabi). 1898–1988. США. Нобелевская премия 1944 г. по физике



Е.К. Завойский. 1907–1976. Россия



Э. Перселл (E. Purcell). 1912–1997. США. Нобелевская премия 1952 г. по физике



Ф. Блох (F. Bloch). 1905–1983. США. Нобелевская премия 1952 г. по физике



А. Абрагам (A. Abragam). Франция



Б. Блини (B. Bleaney). 1915–2006. Великобритания

ных электронно-ядерных переходов и практически мгновенной по сравнению с ядерной релаксацией самих электронов (эффект «царя Соломона» по Абрагаму¹¹). Другие механизмы такого переноса (а их много) не получили «именной» привязки. Неистощимое остроумие нашего классика Анатоля Абрагама кроме вышеупомянутого царя Соломона породило еще несколько мифических персонажей, дающих свои имена эффектам магнитного резонанса (именовать, так именовать). Если в работе *Оверхаузера* предсказывалось усиление интенсивности ЯМР при насыщении ЭПР, то такое же усиление с инверсией сигнала ЯМР, безусловно, можно назвать эффектом «Андерхаузера» (*over* – вверх, *under* – вниз). Если частота ЯМР испытывает при взаимодействии электронов проводимости со спинами ядер «сдвиг Найта» (на слух «ночной сдвиг»), то спины электронов под действием поляризации ядерных спинов должны испытывать «дневной сдвиг» или «сдвиг Дэя» (*Day shift*). Такое научно-юмористическое творчество классика несомненно говорит о его полупрезрительном отношении к любителям славы. Впрочем, обычно имя дают другие, не сам открыватель.

В ЯМР также известны довольно многочисленные «именные» экспериментальные устройства, методики эксперимента и частные (отнюдь не фундаментальные) закономерности. Таковы, например, самая простейшая «схема Роллина» (1946), «автодинные» схемы Гопкинса (1949) и Паунда (1951–1952) для наблюдения ЯМР или ЭПР на радиочастотах¹². Однако наиболее часто в спектроскопии магнитного резонанса (как и в других отраслях спектроско-

¹¹ См.: Абрагам А. Время вспать (или Физик, физик, где ты был?) М., 1991.

¹² См.: Кессених. К историографии и библиографии магнитного резонанса...

пии) упоминается *фурье-преобразование*, играющее совершенно фундаментальную роль в переходе от непрерывных методов наблюдения к импульсным и от последовательного спектрального анализа к параллельному.

Из «именных» явлений и зависимостей напомним в качестве примеров уже упоминавшийся сдвиг частоты ЯМР в металлах за счет взаимодействия с электронами проводимости («*сдвиг Найта*», на самом деле *Knight shift*, а не *Night shift*, 1949); «*фактор Штернхаймера*» (экранирования квадрупольного взаимодействия, 1951); дублетное расщепление линий ЯМР кристаллизационной воды в твердом теле – «*пейковский дублет*» (1948), механизм релаксации электронных спинов в кристаллах через вышележащие уровни – механизм «*Орбаха–Аминова*»¹³.

В. Я. Френкель и Б. Е. Явелов в своей книге¹⁴ остроумно назвали В. де Гааза «эффектным» физиком (его имя употребляется в названии нескольких эффектов). Нам представляется, что скорее упомянутых выше физиков, чьи имена присвоены каким-либо явлениям, уравнениям и устройствам (да и «эффекты» входят сюда как частный случай) уместно назвать «именитыми». Тех ученых, на работы которых приходится часто ссылаться, можно назвать «авторитетными». «Классиками» являются ученые, известные не только своими важными результатами, но и широко цитируемыми публикациями, особенно монографическими. А вот подлинно «прославленными» учеными считаются обладатели престижных международных наград и, прежде всего, Нобелевских премий.

Понятно, что каждый из «именитых» может быть прославленным и авторитетным, хотя какой-то из компонентов может выступать на первый план. Точно так же «открыватель», как правило, является классиком, а некоторые из классиков становятся выдающимися «изобретателями».

Среди предтеч магнитного резонанса несколько лауреатов Нобелевских премий по физике: П. Зеeman с Х. Лоренцем (1902); О. Штерн (1943), один из запоздалых Нобелевских лауреатов Дж. Ван Флек (1977).

Открытия и практические разработки в области магнитного резонанса отмечены Нобелевскими премиями по физике (И. Раби (1944), Ф. Блох и Э. Пёрселл (1952), А. Кастлер, 1966), химии (Р. Эрнст (1992), К. Вютрих (совместно с Дж. Фенном и К. Танакой, 2002)) и физиологии и медицине (П. Лаутербур и П. Мэнсфилд (2003)). Сюда же можно отнести премию Н. Рэмси 1989 г. за водородный генератор на уровнях сверхтонкого расщепления атома водорода в слабом магнитном поле¹⁵.

Особо отметим наиболее цитируемых специалистов из России и бывшего СССР. В области ЭПР и смежных областей магнитного резонанса – это основатель одной из ведущих научных школ С. А. Альтшулер. Его выдающиеся ученики – К. А. Валиев, М. А. Теплов, Б. И. Кочелаев и др.

Это другие представители казанской школы парамагнитного резонанса во главе с Б. М. Козыревым и М. М. Зариповым, Н. С. Гарифьянов,

¹³Этот же механизм обсуждался ранее и независимо в работах А. А. Маненкова и А. М. Прохорова.

¹⁴Френкель В. Я., Явелов Б. Е. Эйнштейн. Изобретения и эксперимент. 2-е изд. М., 1990.

¹⁵Значительный вклад в теорию квантово-химических расчетов параметров спингильто-ниана внес один из лауреатов Нобелевской премии по химии за 1998 г. Дж. Попл.



*Р. Эрнст (R. Ernst). Швейцария.
Нобелевская премия 1991 г. по химии*



*К. Вютрих (K. Wüthrich). Швейцария.
Нобелевская премия 2002 г. по химии*



*П. Лотербур (P. Lauterbur). 1929–2007.
США. Нобелевская премия 2003 г.
по медицине*



*П. Мэнсфилд (P. Mansfield). Великобрита-
ния. Нобелевская премия 2003 г.
по медицине*

Ю. В. Яблоков и др. В области химических приложений ЭПР высоким авторитетом пользуются труды Л. А. Блюменфельда, Я. С. Лебедева, Ю. Н. Молина, Ю. Д. Цветкова, К. М. Салихова и др. Большинство из названных советских (российских) исследователей отмечено международными премиями *IES* и *ISMAR*. Премией европейского научного сообщества исследователей магнитного резонанса *AMPÈRE* отмечен за исследования ЯМР различных ядер в твердом теле выдающийся эстонский физик Э. Липпмаа¹⁶. Первое наблюдение ЯМР в СССР (1947) осуществил К. В. Владимирский, известны последующие работы которого в области теории колебательных систем, взаимодействующих с ядерным магнитным моментом. В области исследований магнитных и спиновых эффектов в химических реакциях методами магнитного резонанса известны работы А. Л. Бучаченко, Ю. Н. Молина, Рен. З. Сагдеева, К. М. Салихова и др.

Известны работами в области магнитного резонанса грузинские физики Г. Р. Хуцишвили, Л. Л. Буишвили, Т. И. Санадзе и их ученики, группа физиков из Института радиоэлектроники АН СССР (РАН): М. И. Родак; В. А. Ацаркин; А. Е. Мефед и др. Подлинно «именитым» стал советский и российский ученый Б. Н. Провоторов¹⁷, ссылки на работы которого благодаря «лоббированию» со стороны школы А. Абрагама¹⁸ и ряда зарубежных экспериментаторов встречаются в литературе гораздо реже, чем упоминание «*уравнений Провоторова*» и «*теории Провоторова*».

Обстоятельства попадания или непопадания имени исследователя в «именитые» бывают иногда интересны и поучительны. Приведем здесь четыре характерные истории из анналов открытия и исследования магнитного резонанса.

Герои первой истории – В. А. Аркадьев, Р. Лоярте и Р. Ганс и, наконец, Я. Г. Дорфман, который позднее уже в 1957 г. претендовал на участие в открытии магнитного резонанса, – «слишком ранние предтечи, которые не смогли стать открывателями». В 1913 г. в Москве Аркадьев, а в 1917 г. в Ла-Плате (Аргентина) Лоярте наблюдали максимумы поглощения энергии электромагнитных колебаний в зависимости от длины тонких ферромагнитных проволок. И российский, и аргентинский авторы прибегали к классическому описанию эксперимента. Между тем в 1922 г. О. Штерн и О. Герлах научились разделять атомный пучок на две компоненты, по-разному отклоняющиеся в неоднородном магнитном поле. По следам этого опыта А. Эйнштейн и П. Эренфест¹⁹ впервые предсказали магнитный резонанс как явление, обусловленное квантовыми переходами между магнитными состояниями ато-

¹⁶ *ISMAR* – Международное общество магнитного резонанса, образовано в 1971, *IES* – Международное общество ЭПР (функционирует с 1989 г.). *AMPÈRE* (франц.) = *Atomes et Molécules Par Étude Résonance Electromagnétique* (или *Radio-Electrique*) функционирует с 1952 г. (с 2002 г. – *EUROMAR*).

¹⁷ Кессених А. В. ЯМР, ЭПР и теория конденсированных систем магнитных диполей (опыт устной истории теории Провоторова) // Научное сообщество физиков СССР. 1950–1960-е гг. Вып. 1. СПб., 2005. С. 380–385.

¹⁸ Goldman, M. The Time When Spin Temperature Was Hot Stuff // Encyclopedia of Nuclear Magnetic Resonance / Eds. D. M. Grant, R. Harris. Chichester; New York, 1996. Vol. 1. P. 338–341.

¹⁹ Einstein, A., Ehrenfest, P. Quantentheoretische Bemerkungen zum Experiment von Stern und Gerlach // Zeitschrift für Physik. 1922. Bd. 11. S. 31–34.



Б.Н. Провоторов. 1931–2001. Россия



С.А. Альцшюлер. 1908–1983. Россия

мов. А в 1923 г. молодой петроградский физик Я. Г. Дорфман²⁰ объявил в своей работе, что магнитный резонанс («фотомагнитный эффект», явление очевидно квантовое) уже наблюдался Аркадьевым и Лоярте. Однако начинающий теоретик не мог предъявить ни однозначных численных оценок для интерпретации уже выполненных экспериментов, ни описания условий для воспроизведения подобных эффектов. Тогда еще не был открыт спин электрона, и не была создана квантовая теория переходов между состояниями. При обсуждении кандидатуры Дорфмана на включение в авторский коллектив на Ленинскую премию 1957 г. совместно с Завойским она была решительно отвергнута авторитетными экспертами (от Вонсовского до Альцшюлера). Однако общий физический кругозор автора и понимание им физических закономерностей никто не отрицал, и Дорфман остался в истории как один из предтеч (пусть и предтеч-неудачников) открытия магнитного резонанса.

Вторая наша история о подлинном неудачнике предыстории магнитного резонанса голландском физике К. Я. Гортере. Он первым в 1936 г. пытался наблюдать ЯМР в твердом теле, но не добился успеха. Он подсказал И. Раби в 1938 г., что можно наблюдать ЯМР в молекулярном пучке, разделенном по методу Штерна и соавторов²¹. Далее Гортер невзирая на тяжелые условия не-

²⁰ *Dorfmann, J. Einige Bemerkungen zur Kenntnis des Mechanismus magnetischer Erscheinungen // Zeitschrift für Physik. 1923. Bd. 17. S. 98–111.*

²¹ См. статью в «Энциклопедия ЯМР»: *Becker, E. D., Fisk, J., Cherrill L., Khetrapal, C.L. The Development of NMR // Encyclopedia of Nuclear Magnetic Resonance... Vol. 1. P. 1–158.*

мецкой оккупации совместно с Л. Бруром в 1942 г. повторно и снова неудачно пытался уже другим методом зафиксировать эффект ЯМР в твердом теле. И, наконец, в течение 1936–1943 гг. в его лаборатории выполнялись эксперименты по исследованию электронной парамагнитной релаксации, лишь небольшая модификация условий которых могла бы привести к обнаружению ЭПР. Однако такой модификации не последовало. Не вдаваясь в подробные обсуждения, отметим, что парадигма лейденской школы (где были открыты сверхпроводимость и λ -точка в жидком гелии) обусловила выбор Гортером для работы области сверхнизких температур. Длинные времена релаксации магнитного момента ядер при гелиевых температурах и неизбежный при этом эффект насыщения резонанса оказались, однако, серьезным препятствием для наблюдения ЯМР. А Блох и Перселл открыли ЯМР *при комнатной температуре* и не в чистых кристаллах, а в *обычной воде* и в *обычном парафине*. Свои причины (недостаток информации о свойствах и поведении спинов в твердом теле и отсутствие смелости в постановке экспериментов) были и у того, что Гортер не предвидел возможности наблюдать ЭПР в самых простых соединениях переходных элементов при комнатной температуре, где их и открыл Завойский. Эти причины связаны с тем, что из двух типов взаимодействий между электронными спинами диполь-дипольного и обменного Гортер принимал во внимание лишь первое – уширяющее линии резонанса – и не учитывал второго – сужающего в некоторых условиях эти линии. Узнав о наблюдении ЭПР в концентрированных парамагнетиках, Гортер понял, что он упустил не только открытие ЯМР, но и открытие ЭПР (он выбирал для своих исследований менее концентрированные парамагнетики). Сразу после второй мировой войны Гортер направился на консультацию к выдающемуся теоретику парамагнетизма Дж. Ван Флеку, и они быстро разобрались²², что Завойский, не мудрствуя лукаво, выбрал для поиска ЭПР именно те объекты, в которых благодаря относительно небольшому среднему расстоянию между неспаренными электронами линии ЭПР сужены обменными взаимодействиями.

Третий сюжет касается как раз работы Завойского. Многие обстоятельства замечательного открытия ЭПР, сделанного им в тяжелых условиях Казани военного времени, ставят его вне привычного ряда достижений физики XX в. Сделанное «во дни мытарств, во времена немислимого быта», когда все восставало против исследователя, по экономности средств оно напоминало некоторые открытия Фарадея первой половины и середины XIX в. По его собственным воспоминаниям²³, время для экспериментов Завойский выкраивал между работой по оборонным заказам и многонедельными поездками на хозяйственные работы. Потеряв в самом начале аспирантского срока своего руководителя по Казанскому университету В. А. Ульянина (1863–1931), Евгений Константинович сумел стать опытным радиотехником и радиофизиком, а затем в труднейших условиях ослабленной кафедры физики Казанского университета (см. об этом в сборнике «Чародей эксперимента»²⁴) стать широко эрудированным физиком, талантливым педагогом и инициативным организа-

²² Gorter, C. J., Van Vleck, J. H. The Role of Exchange Interaction in Paramagnetic Absorption // Physical Review. 1947. Vol. 72. No. 10. P. 1128–1129.

²³ Завойский В. К. Минувшее. Казань, 1996. С. 133–134.

²⁴ Чародей эксперимента. Сборник воспоминаний об академике Завойском. 2-е изд. / Ред.-сост. В. Д. Новиков и Н. Е. Завойская. М., 1994. С. 212–222.

тором исследовательской работы. Завойский в середине 1930-х гг. фактически возглавлял кафедру общей физики КГУ и добился создания при ней финансируемой из бюджета лаборатории УВЧ (ультравысоких частот).

В начале 1940 г. на физическом факультете КГУ возник тройственный союз исследователей: физик-экспериментатор Завойский, теоретик Альтшулер и физико-химик Козырев. Вместе с коллегами Завойский пытался выполнить спланированный эксперимент по обнаружению магнитных резонансов. До мая 1941 г. на положительный результат, казалось, не было никаких надежд. Но в это время Завойским, как вспоминали в 1969 г. Альтшулер и Козырев²⁵, был сделан решающий шаг для повышения чувствительности экспериментальной установки.

Эта установка (восстановленная усилиями И. И. Силкина, хранителя музея Е. К. Завойского, и описанная в его, совместной с Л. А. Трофанчук статье²⁶, а затем в докладе на юбилейной конференции «Новейшие методы магнитного резонанса. ЭПР 60» (см. также замечательную подборку документов и материалов в книге Силкина²⁷)) давала лишь слабую надежду на наблюдение сигнала ЯМР. Очень малы в поперечнике были полюса «кривого магнита» (электромагнита с изогнутым сердечником или магнита Дюбуа). Однако, как вспоминают Альтшулер с Козыревым, время от времени сигнал наблюдался. Оставалось важное препятствие на пути к воспроизводимому наблюдению ЯМР. Неоднородность (вариация) значений поля $H_0 \pm \delta H$ в объеме образца уширяла резонансную линию в соответствии с соотношениями Лармора до значений $\delta\omega \approx \gamma(\delta H)$. Менялась же неоднородность и при сдвиге ампулы с образцом, и при новом включении магнита практически непредсказуемо (размеры образца были одного порядка с размерами зазора магнита). Надо было искать другой магнит. Движение к открытию могло бы продолжиться, но... оно было прервано. Отрывок из конспективного наброска Завойского местами напоминает ремарки драматурга к немой сцене и отрывочные реплики трагедии²⁸:

Война; появление комиссии из Москвы, разгром установки как «кустарного сооружения». Эта комиссия была назначена вице-президентом с целью определить, есть ли в КГУ работы, или оборудование, которые могла бы поддерживать или использовать АН СССР. Комиссия вошла в лаб. № 5 без стука в момент, когда я наблюдал ядерный магнитный резонанс, сидел за установкой и с помощью реостата изменял силу тока в электромагните Дюбуа. Эта установка ничем не отличалась от используемых теперь, но в них применяются электромагниты с существенно более однородным магнитным полем.

Комиссия пересекла луч света от гальванометра до шкалы и остановилась, не обращая внимания на мои жесты; она стояла полминуты и затем прозвучала фраза: «Здесь все самодельное и не имеет никакой научной ценности»

²⁵ Альтшулер С. А., Козырев Б. М. К истории открытия электронного парамагнитного резонанса // Там же. С. 12–17. (Перепечатка из сборника: Парамагнитный резонанс 1944–1969. Всесоюзная юбилейная конференция (Казань, 24–29 июня 1969). М., 1971. С. 25–31.)

²⁶ Силкин И. И., Трофанчук Л. А. Об истории открытия ЭПР (материалы архивов и находки аппаратуры) // Там же. С. 114–118.

²⁷ Силкин И. И. Евгений Константинович Завойский. Документальная хроника научной и педагогической деятельности в Казанском университете. Казань, 2002.

²⁸ Завойский Е. К. Очерк истории ЭПР // Чародей эксперимента... С. 222–225.

(я, очевидно, подпадал тоже под это определение, и в этом была значительная доля истины). Я хотел, было, заговорить, но комиссия уже шла к двери. Всё... Мне было сказано: «Если вы завтра не вытряхнете все из этой комнаты, то будут поставлены у двери часовые с приказом: не пускать вас в эту комнату». Разрушать установку я не мог, так как мы потратили на ее сооружение более полутора лет, а подготовка нашей картины ЯМР продолжалась более двух лет [...] Но угроза была приведена в исполнение, комната разгромлена, оборудование выброшено за дверь, а [...] в комнате № 5 более полутора лет взвешивался и раздавался хлеб для сотрудников ФТИ.

Осенью 1941 г. добровольцем ушел на фронт Альтшулер, уволился из КГУ Козырев. В течение тех же полутора лет Завойскому вменяли в обязанность участие в оборонных работах над «прибором № 1» под руководством эвакуированного из Москвы В. К. Аркадьева. Уже после прекращения работ над «прибором № 1» Завойскому нередко приходилось выполнять задания оборонных предприятий Казани, с 1943 возобновил он и чтение курса общей физики. Но уже в 1943 г. Завойский вернулся к поискам магнитного резонанса. Тогдашний заведующий кафедрой Я. И. Френкель предоставил в распоряжение Завойского небольшую комнату на втором этаже физмата КГУ²⁹. Теперь в этой комнате находится музей Завойского. Можно сказать, что исследователь вернулся к эксперименту с намерением (не отказываясь от поиска в диапазоне резонанса ядерных магнитных моментов) изучить парамагнитную релаксацию в возможно более широком диапазоне частот. Казалось бы, снова повторялся ошибочный алгоритм Гортера: электронная парамагнитная релаксация сама по себе, а ЯМР сам по себе. Однако было два существенных отличия. Во-первых, Завойский постарался расширить (или, пожалуй, изменить) круг исследуемых образцов. В этот круг входили наиболее доступные парамагнетики (простейшие соли переходных металлов 3d-группы, например, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MnSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и др. и их растворы в воде) и отчасти ферромагнетики (мелкодисперсные никель и железо). Во-вторых, не имея подходящего магнита, Завойский выбрал в качестве источника поляризующего магнитного поля катушки Гельмгольца и тем самым перешел к работе в области более низких магнитных полей и, соответственно частот порядка 10^7 Гц (10 МГц).

Снижение доступной напряженности поля автоматически вывело Завойского на путь, облегчающий наблюдение именно электронного парамагнитного резонанса, который при той же частоте электромагнитных колебаний должен для свободного электрона наблюдаться в магнитном поле с напряженностью примерно в 658 раз меньшей, чем магнитный резонанс протонов. Но главным оказалось наличие среди исследуемых образцов некоторых, обладающих узкими линиями электронного парамагнитного резонанса (см. выше об обменном сужении). Уже в начале 1944 г. Завойский уверенно шел к открытию ЭПР. На кривых, отображавших зависимость сеточного тока от магнитного поля при постоянной частоте облучения, наблюдались отчетливо выраженные пики в предполагаемой для ЭПР области. С возрастанием частоты пики смещались в область более сильных полей. Завойский получил моральную поддержку

²⁹ Завойский. Минувшее... С. 137.

от Френкеля и решился публиковать сообщения об открытии «электронно-спинового резонанса», то есть ЭПР. Френкель и сам опубликовал небольшую статью по теории электронного резонанса ³⁰.

В конце 1944 г. Е. К. Завойский представил в Физический институт АН СССР (ФИАН) докторскую диссертацию «Парамагнитная абсорбция в перпендикулярных и параллельных полях для солей, растворов и металлов». На фоне огромного массива исследований парамагнитного поглощения выделялись несколько случаев уверенного наблюдения ЭПР.

Сам по себе объем работы не впечатлил экспертов из ФИАНа, а истолкование пиков поглощения в перпендикулярных полях как спинового резонанса вызвало их недоверие. Может ли такой тонкий эффект наблюдаться на столь «грубой» аппаратуре? Во всяком случае, диссертация в течение нескольких месяцев не была поставлена на защиту. Вот отрывок из заметок Завойского:

Недоверие Г. С. Ландсберга к тому, что может быть найден какой-либо метод более тонкого исследования вещества, чем оптический (когда я ему впервые рассказал об ЭПР – зеемановских переходах в слабых полях. Комичность этой сцены! Я в сапогах и без галстука) ³¹.

Это недоверие побудило Завойского обратиться в другой авторитетный центр физического эксперимента в СССР – Институт физических проблем (ИФП).

С одобрения П. Л. Капицы один из выдающихся экспериментаторов ИФП А. И. Шальников вызвался помочь Завойскому. Быстро, в течение двух недель были собраны две установки. Сначала на сравнительно низкой частоте порядка 10^2 МГц были воспроизведены некоторые из казанских экспериментов Завойского. Затем в намного более сильном поле (с применением для генерации электромагнитных волн частоты порядка тысячи мегагерц уже доступного тогда импортного клистрона) те же резонансные эффекты наблюдались еще отчетливее. И, наконец, на некоторых образцах опыты были воспроизведены при гелиевых температурах.

Так взаимопомощь советских физиков позволила довести первый этап работ по открытию и исследованию электронного парамагнитного резонанса до логического завершения. Кстати говоря, Шальников не претендовал на соавторство в публикации результатов, полученных Завойским в ИФП. Зато он изъявил согласие выступить на защите диссертации официальным оппонентом. 30 января 1945 г. докторская диссертация Завойского была успешно защищена (см. отрывки из стенограммы в воспоминаниях В. К. Завойского ³²).

Ответ на тривиальный вопрос: почему открытие Завойского не получило заслуженной Нобелевской премии также вполне тривиален. Уже в 1948 г. в

³⁰ Вопреки мнению некоторых историков науки работа Френкеля (*Френкель Я. И.* К теории релаксационных потерь, связанных с магнитным резонансом в твердых телах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1945. Т. 15. С. 409–416) носила чисто формальный характер, не содержала сравнения теории с экспериментом и поэтому, как сказано в записках Завойского, «Френкель не может считаться соавтором открытия ЭПР» или создателем его теории.

³¹ Завойский. Очерк истории ЭПР // Чародей эксперимента... С. 224.

³² Завойский. Минувшее... С. 140–143, также см.: *Силкин, Трофанчук.* Об истории открытия ЭПР...

докладах основоположников ЭПР во главе с Б. Блини из Кларендонской лаборатории ³³ на сессии Британского физического общества рассказывалось о результатах экспериментов на более чем 100 солях переходных элементов группы железа. Незадолго до этого в августе 1947 г. Завойский перешел на другую работу, успев все же исследовать ЭПР более десятка таких объектов. В сентябре 1950 г., международная научная общественность, уже сплотившаяся вокруг нового направления, собралась в Амстердаме на международную конференцию «Спектроскопия на радиочастотах», где стало ясно «кто есть кто» в магнитном резонансе ³⁴. В это время первооткрыватель уже завершал работу по подготовке и последовательному проведению испытаний трех образцов советского ядерного оружия в Арзамасе-16, и имя его исчезло со страниц научной периодики. Тем не менее, на первые работы Завойского по ЭПР ссылались на упомянутой конференции и К. Гортер, и Б. Блини, и А. Кастлер. Не стоит напоминать, что на конференции не было ни одного представителя СССР, а некоторые пионерские работы советских ученых по магнитному резонансу подолгу не допускались к публикации даже в отечественных журналах по причине неоправданной секретности. Через два года состоялось награждение Нобелевской премией по физике открывателей ЯМР Пёрселла и Блоха, что же касается открытия ЭПР, то за него награждать надо было либо заодно с открывателями ЯМР (Е. К. Завойского), либо слишком многих (от И. Валлера и К. Гортера до Е. К. Завойского и Б. Блини), либо (как предпочитает в таких случаях Нобелевский комитет) никого. В 1977 г. (посмертно) Завойский был отмечен премией Международного общества магнитного резонанса (*ISMAR*).

Наша четвертая история касается не столь принципиального, сколько занятого вопроса, почему только одному эффекту Оверхаузера присвоено имя его открывателя (скорее предсказателя), а другие эффекты двойных магнитных резонансов и динамической поляризации ядерных спинов «имени не имеют». В 1953 г. вышло обширное теоретическое исследование А. Оверхаузера ³⁵ из Иллинойского университета (ныне в университете Пёрдью), посвященное скрупулезному анализу нескольких механизмов спиновой парамагнитной релаксации электронов проводимости. Среди таких механизмов пара страниц в статье Оверхаузера оказалась посвященной механизму совместной релаксации ядерных и электронных спинов. Легко убедившись, что влияние ядер на электронную релаксацию в металлах ничтожно, Оверхаузер обратил внимание на то, что для ядер такая совместная релаксация (спин ядра и спин электрона переворачиваются в противоположных направлениях, обмениваясь энергией с тепловым резервуаром) может быть, напротив, преобладающим механизмом установления теплового равновесия в магнитном поле. Выполненный автором

³³ Buggley, D. M. S., Bleaney, B., Griffiths, J. H. S., Penrose, R. P., Plumpton, B. I. Paramagnetic Resonance in Salts of the Iron Group. Preliminary Survey, I. Theoretical Discussion // Proceedings of the Physical Society of London. 1948. Vol. 61. No. 6. P. 542–550; II. Experimental Results // Ibid. P. 551–561.

³⁴ Proceedings of International Conference on Spectroscopy at Radiofrequencies. Amsterdam. September. 1950 // Physica. 1951. Vol. 17. No. 3–4. P. 169–387.

³⁵ Overhauser, A. W. Paramagnetic Relaxation in Metals // Physical Review. 1953. Vol. 89. No. 4. P. 689–700.

расчет показал, что принудительное выравнивание заселенностей магнитных подуровней электрона (насыщение ЭПР) автоматически приведет к возрастанию разности заселенностей ядерных магнитных подуровней, а тем самым и к росту сигналов ЯМР в идеале во столько раз, во сколько магнитный момент электрона превышает магнитный момент ядра (для протона в 658 раз).

Предсказание вызвало удивление и недоверие у «научной общественности». Это был побочный результат работы, которая, в сущности, не достигла объявленной цели. Механизм спин-орбитального взаимодействия электронов проводимости с электронными оболочками атомов металла, хорошо согласующийся с данными эксперимента, был значительно позже рассмотрен Р. Эллиотом ³⁶. Еще до выхода повторной статьи Оверхаузера ³⁷, посвященной специально поляризации ядерных спинов, ученые из Иллинойского университета Т. Карвер и Ч. Слихтер сумели проверить предсказание теоретика на образце лития, диспергированного в масле ³⁸. Качественно предсказание блестяще подтвердилось, а количественный результат было легко объяснить разными побочными эффектами. Название «эффект Оверхаузера» прогремело и утвердилось в литературе по магнитному резонансу и оказалось приложимо также к некоторым эффектам перекачки поляризации между спиновыми системами в жидкостях ³⁹. Оверхаузер считал, что предсказанное им «чудо» возможно лишь в металлах, и в этом ошибся. Оказалось, что в системах с взаимодействующими ядерными и электронными спинами или ядерными спинами двух разных сортов эффект Оверхаузера проявляется, если время корреляции взаимодействия между спинами (как скалярного, так и дипольного) много меньше периода колебаний резонансной частоты для спина с наибольшим гиромагнитным отношением (А. Абрагам, И. Соломон и др.).



А. Оверхаузер (A. Overhauser). США

³⁶ Elliot, R. J. Theory of the Effect of the Spin-Orbit Coupling on Magnetic Resonance in Some Semiconductors // *Physical Review*. 1954. Vol. 96. No. 2. P. 266–279.

³⁷ Overhauser, A. W. Polarization of Nuclei in Metals // *Physical Review*. 1953. Vol. 92. No. 2. P. 411–415.

³⁸ Carver, T. R., Slichter, C. P. Polarization of Nuclear Spins in Metals // *Physical Review*. 1953. Vol. 92. No. 1. P. 212–213.

³⁹ Solomon, I. Relaxation Processes in a System of Two Spins // *Physical Review*. 1955. Vol. 99. No. 2. P. 559–565.

Все другие эффекты перекачки поляризации уже не были столь неожиданными, сколь эффект, предсказанный Оверхаузером. Изрядное чувство юмора открывателей «солид-эффекта» при насыщении «запрещенных переходов» ЭПР или вынужденной поляризации ядер (1958), когда электрон «тащит» за собой привязанный к нему дипольным взаимодействием ядерный спин непосредственно под воздействием внешнего электромагнитного поля, не допустило появления в литературе, скажем, «эффекта Абрагама–Проктора»⁴⁰.

А ведь именно солид-эффект обеспечил замечательные результаты в получении почти 100% поляризованных по спине ядерных мишеней и достижения в квази-изолированной спиновой системе эффективной спиновой температуры порядка 10^{-6} К, обеспечивающей в этой системе фазовый переход в ферромагнитное или антиферромагнитное состояние⁴¹.

Между тем популярность понятия «эффект Оверхаузера» весьма велика. Применения эффекта в практике химических лабораторий и медицинских учреждений и вознаграждение автора за заслугу открытия эффекта хорошо отражены в монографиях и сайтах Интернета.

В связи с ограниченностью объема публикации за ссылками на другие оригинальные работы отсылаем в основном к нашему обзору историографической литературы и библиографии магнитного резонанса в «Исследованиях по истории физики и механики. 2005»⁴².

⁴⁰ *Abragam, A., Proctor W.* Une nouvelle méthode de polarisation dynamique des noyaux atomiques dans les solides // *Comptes Rendus de l'Académie des sciences.* 1958. Vol. 246. No. 14. P. 2253–2255.

⁴¹ См. в книге: *Абрагам А., Гольдман М.* Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок. М., 1984. Т. 1–2; *Abragam, A., Goldman M.* Nuclear Magnetism: Order and Disorder. Oxford, 1982.

⁴² *Кессених.* К историографии и библиографии магнитного резонанса...