

## Из истории физики.

### **Эдвард Майлз Пёрселл, Феликс Блох и открытие магнитного резонанса.**

*А.В. Кессених (ИИЕТ им.С.И.Вавилова РАН)*

Рассмотрена роль выдающихся физиков Э.М. Пёрселла и Ф. Блоха в исследованиях магниторезонансных явлений. Описываются их биографии и оценка результатов их исследований научной общественностью. Статья посвящена 100-летию со дня рождения Пёрселла и 60-летию Нобелевской премии за открытие ЯМР.

#### **Содержание.**

##### **1.Введение.**

##### **2.Жизненный путь и научные достижения Э.М. Пёрселла.**

##### **3. Биография Феликса Блоха.**

##### **4.Вклад Е.К. Завойского, Э.М. Пёрселла и Ф. Блоха в развитие теории, методики и применений магнитного резонанса.**

##### **5. Открытие магнитного резонанса в зеркале Нобелевских премий.**

##### **6. Заключительные замечания**

### **Введение.**

30 августа 2012 г. исполняется сто лет со дня рождения замечательного физика XX столетия Э.М. Пёрселла, лауреата Нобелевской премии «за развитие новых тонких методов измерения магнитных свойств ядер и связанные с этим открытия» [1], разделившего эту премию с Феликсом Блохом\*.

7 марта этого же года исполнилось 15 лет со дня кончины Э.М. Пёрселла, а в октябре – декабре отмечается шестидесятая годовщина присуждения и вручения Нобелевской премии Пёрселлу и Блоху. Добавим, что в сентябре исполняется 105 лет со дня рождения Е.К. Завойского. Последний впервые наблюдал электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) и

---

\* “for their development of new methods for nuclear magnetic precision measurements and discoveries in connection therewith”

тем самым вообще спиновый магнитный резонанс в конденсированном веществе. Такой вот получился знаменательный для истории магнитного резонанса 2012 год.

Затронем несколько сюжетов, связанных с упомянутыми датами. Отметим, что значительная часть информации и иллюстрации для данной публикации заимствованы из имеющихся в свободном доступе в Интернете материалов, ссылки на которые будут приведены в соответственных местах. Автор благодарен Вл.П. Визгину за предложение сделать доклад, посвящённый упомянутым юбилеям на Общественном семинаре по истории физики и механики, и К.А. Томилину и В.М. Березанской за использование открытого доступа к некоторым публикациям Э.М. Пёрселла. Один из сюжетов, касающийся патента Блоха – Хансена, приобретённого фирмой «Вариан», был навеян нашей мимолётной беседой с известным американским историком науки Лореном Грэхемом (см. также интервью с ним в Независимой газете [2]).

## **2. Жизненный путь и научные достижения Э.М. Пёрселла.**



В некрологе Э.М. Пёрселла в «Нью-Йорк Таймс» [3] о нём, прежде всего, сказано, что умер «тот, кто первым сделал слышимым шёпот водорода во

Вселенной»\*\* и лишь потом упоминается, что он разделил с Ф. Блохом Нобелевскую премию «за открытие способа обнаружить чрезвычайно слабый парамагнетизм атомных ядер»\*\*\*.

В краткой биографии [4. С. 724 – 725] упоминаются «исследования в области радиоспектроскопии, ядерного магнетизма, атомной, молекулярной и ядерной физики, радиоастрономии, биофизики, астрофизики» и более конкретно пять – шесть полученных Пёрселлом (Парселлом в транскрипции [4]) совместно с другими авторами выдающихся результатов. Из них свыше половины можно отнести к радиоспектроскопии ядерного магнитного резонанса (см. в разделе 4). Конечно, отмечается, что Пёрселл «независимо от Ф. Блоха открыл ядерный магнитный резонанс (ЯМР)».

Хорошо знавший Э. Пёрселла и весьма авторитетный в кругах советских и российских физиков Анатолий Абрагам высоко ценил его профессиональные и человеческие качества. Абрагам писал [5. С.171]:

«Эдвард Парселл – человек, которого я уважаю больше всех других, как физика и как личность. Я никогда не встречался ни с кем, более настоящим, более далёким от желания показаться не тем, кто он есть».

Характерно, что в русском издании [5] Абрагам сравнил Пёрселла с А.Д. Сахаровым. Если вспомнить, что Пёрселл в 1965 г. подал в отставку с поста советника Президента США в знак протеста против эскалации войны во Вьетнаме, это сравнение покажется ещё более убедительным.

Наталья Евгеньевна Завойская собрала о Пёрселле, Ф. Блохе и их сотрудниках довольно солидный материал в своём исследовании «История одного открытия» [6. С. 113 – 135]. Однако, в [6] собраны фактически лишь сведения о ранних работах Э. Пёрселла, Ф.Блоха и их соавторов, выполненных до публикации пионерских работ по наблюдению ЯМР в веществе.

---

\*\* who made it possible to "listen" to the whisperings of hydrogen throughout the universe...

\*\*\* for discovering a way to detect the extremely weak magnetism of the atomic nucleus

Опишем вкратце замечательный жизненный и научный путь Эдварда Пёрселла, неустанного труженика и талантливое исследователя, выдающегося педагога, сотрудника и идейного лидера, желанного в любом научном коллективе. Благодаря усилиям коллег из Американского института физики, Института инженеров радиоэлектроники, Гарвардского университета, Университета Пердью, Американского философского общества, Нобелевского Архива, Архива и библиотеки Нильса Бора и других учреждений, например, [7– 11] как факты из биографии и личные впечатления Пёрселла, так и воспоминания его близких сотрудников (например, [12]) сохранились для потомков. Пожалуй, можно отметить, что в его судьбе ему, несомненно, сопутствовала удача. Родился Эдвард в маленьком американском городке Тейлорвилль (штат Иллинойс) в полутора сотнях километрах к юго-востоку от Чикаго в пресвитерианской семье. Мать Э.М. Пёрселла Мари была учительницей латинского языка. Отец Эдварда (также Эдвард) работал в местной телефонной компании и для его сына детали электронной аппаратуры и научно-технические журналы, в частности журнал Белл-телефон компани были предметами повседневной жизни. В старших классах школы Эдвард, переехавший с родителями в несколько более крупный городок Матун, поближе к Чикаго, обзавёлся замечательным приятелем, вместе с которым они увлекались химическими опытами. Как вспоминает сам Пёрселл, на него большое влияние оказал и талантливый педагог, преподававший химию. Преподавательница физики, как рассказывал Пёрселл, была не слишком эрудированна в своём предмете, но прививала ученикам благоговейное уважение к нему.

В то же время, как вспоминал Пёрселл [9], для него, выпускника школы, имя знаменитого инженера-электрика Ч. П. Штейнметца значило тогда (в конце 20-х) больше, чем имя Эйнштейна. Эдвард поступил на инженерный факультет университета Пердью в городе Лафайет, штат Индиана. Однако там его склонность к исследовательской деятельности не осталась незамеченной. Его опекал профессор Карл Ларк-Горовиц (1892-1958,

эмигрант из Австрии), имевший тесные связи с великим Гарвардским университетом (Кембридж, штат Массачусетс). После получения звания бакалавра в Пердью (1933) Пёрселл был направлен на стажировку в Европу, в тогдашний центр мировой физики – в Германию, а именно в Высшую техническую школу Карлсруэ. Это случилось, к сожалению, буквально в те самые месяцы, когда к власти в Германии пришли национал-социалисты. Руководитель Пёрселла по стажировке профессор Вальтер Вейцель (1901 – 1982), пытаясь критиковать известные кадровые подходы нацистов, имел соответствующие неприятности с новыми властями. Стажировка продлилась не более года, но и она принесла будущему молодому физики большую удачу и не только в науке. В Мюнхене Эдвард слушал лекции великого физика Арнольда Зоммерфельда, а записывать их ему помогала соотечественница, также находившаяся на стажировке в Германии по специальности германская литература студентка из Гарварда Бетт Буссер.

По возвращении в Штаты (1934) Пёрселл был направлен в Гарвардский университет с подачи К. Ларк-Горовица. Там под руководством последнего Пёрселл занимался сначала дифракцией электронных пучков на тонких плёнках, а затем подключался к другим исследованиям (в том числе и по магнитным свойствам солей при гелиевых температурах [13]). Одна из его работ (фокусировка электронного пучка в сферическом конденсаторе [14]) послужила основанием для получения степени Ph.D. Работы разворачивались на базе циклотрона. Как указано в материалах Института инженеров электриков (ИЕЕ) [8], Пёрселл участвовал в конструировании и изготовлении магнитов.

Незадолго перед тем, как Эдвард Пёрселл стал доктором философии, он с Бетт Буссер поженился и счастливо прожил почти шестьдесят лет до самой смерти Эдварда, воспитав двух сыновей.

Во время второй мировой войны (с ноября 1940) Пёрселл работал в Радиолоборатории Массачусетского технологического института, где проводились в содружестве также с британскими учёными разработки

военной радиолокационной техники. Это было грандиозное инженерно-техническое предприятие с штатом до 400 человек. К концу войны в США на основе его разработок было налажено массовое производство радиолокационного оборудования, отдельные образцы которого, по-видимому, были в конце войны поставлены и в СССР по программе лендлиза для военных целей. Труды лаборатории, в издании которых принимал участие и Э. Пёрселл и его соавторы по созданию первой установки для наблюдения ЯМР, по данным Н.Е. Завойской [6. С. 116 – 117] составили 28 томов! Издания были частично переведены на русский язык и широко использовались в советских лабораториях, работавших в области сверхвысоких частот и радиолокации.

В период работы в радиолоборатории (Radiation Laboratory) Пёрселл непосредственно контактировал с основателем экспериментальных методов магнитного резонанса Исидором Раби и другими участниками первых исследований по магнитному резонансу. Неудивительно, что после возвращения к мирной жизни с конца 1945 г. (примерно с сентября) до 1954 г. основные усилия Пёрселла и его нескольких соавторов были направлены на развитие методов и теории ядерного магнитного резонанса (об этом см. в разделе 4). Тем не менее, в эти же годы были проведены и другие замечательные исследования. Прошое столетие помимо других эпитетов заслуживало также и названия «век радиофизики». И его середина была временем, когда радиоаппаратура, достигнув усилиями своих творцов нового уровня чувствительности, выдвигалась на новые рубежи. ЯМР – относился к новому направлению радиоспектроскопии, но Эдвард Пёрселл сказал своё веское слово и в другом направлении – в создании радиоастрономии. Ему удалось вместе со своим сотрудником Гаральдом Юном (H. Ewen, в обычной британской транскрипции Юн) с помощью рупорной антенны, размещённой на крыше одного из гарвардских корпусов, уловить излучение нейтральных атомов водорода [15]. По современным представлениям средняя концентрация атомов межзвёздного газа составляет менее 1 атома в см<sup>3</sup>.

Основная его масса заключена вблизи плоскости Галактики в слое толщиной несколько сотен парсек. Плотность газа в среднем составляет около  $10^{-21}$  кг/м<sup>3</sup>. О наличии атомов водорода в межзвёздном пространстве и соответственно об ожидаемом излучении на частоте 1420 МГц ( $\lambda \approx 21$  см) уже за несколько лет до этого поговаривали многие астрономы, в частности наш И. С. Шкловский, который в 1948 году произвёл детальный расчёт предсказанной Х. К. ван де Хюлстом (Нидерланды) радиолинии нейтрального водорода и показал, что интенсивность излучения Галактики в этой линии достаточна для обнаружения с помощью имевшегося тогда оборудования.

Это излучение отвечает переходу между уровнями с разными взаимными ориентациями магнитных спиновых моментов протона и электрона в атоме H, обусловленными Ферми-взаимодействиями типа  $F = A\vec{I} \cdot \vec{S}$ , где  $\vec{I}, \vec{S}$  - операторы спинов, соответственно протона и электрона. Наличие этого взаимодействия и его происхождение от непосредственного контакта электрона, находящегося на s-орбитали с протоном в своё время [16] первым предсказал Энрико Ферми, пользуясь уравнением Дирака. За свою относительно малую величину (по сравнению как с кулоновским, так и с «тонким» спин-орбитальным взаимодействиями) оно названо сверхтонким, а за свою природу – контактным. В отсутствие внешнего магнитного поля энергия  $2\pi\hbar A$  соответствует разности между энергиями состояния с параллельными спинами (триплетным) и антипараллельными спинами (синглетным). Наблюдение излучения космических облаков атомарного водорода позволяет судить об их плотности, наличии между ними и нашей планетой пылевых облаков и т.д. Пёрселл впоследствии участвовал ещё в некоторых астрофизических (радиоастрономических) исследованиях [17 – 19].

К началу 1950-х также относится весьма специфическая работа Дж. Смита и Пёрселла, в которой было обнаружено излучение видимого света релятивистским пучком электронов, направленным вдоль поверхности

дифракционной решётки [20]. По некоторым соображениям это излучение аналогично излучению Черенкова – Вавилова. Интересно, что ни в области методов ЯМР, ни в области излучения Смита – Пёрселла (так его теперь часто называют, см., например, [21]) Пёрселлу, по-видимому, не принадлежит ни одного патента. Однако, и в том и в другом случае иные специалисты, с упоминанием Пёрселла или без него такие патенты брали. Мы нашли в Интернете ссылку на патент США, касающийся применения излучения Смита – Пёрселла. Патент выдан на имя К.А. Эхдала (С.А. Ekhdal) в 1986 г. (заявка от 1983 г.). В заявке присутствует ссылка на [20]. О купленном фирмой Вариан патенте на химические применения ЯМР см. ниже в разделе 4.

Пёрселл участвовал в те же годы в исследовании дальнего распространения радиоволн при отражении от неоднородностей ионосферы (в составе большой команды в восемь соавторов из четырёх учреждений, включая Бюро стандартов США, Гарвардский университет и т. д. [22]). Он участвовал и в доказательстве с повышенной точностью отсутствия электрического дипольного момента у нейтрона (совместно с Норманном Рэмси, см., например, [23]).

Пёрселл в 1949 г. стал одним из авторитетнейших профессоров физики Гарвардского университета да, пожалуй, и США в целом [7]. Именно его лекции послужили основой для вышедшего в 1965 г. второго тома Берклеевского курса лекций по физике «Электричество и магнетизм» [24] (русский перевод в 1975 г., второе издание в США в 1984 г.). Этот курс до сих пор рассматривается как один из самых современных, в нём, в частности, наводится порядок в употреблении различных систем единиц (прежде всего новой системы СИ) и обозначений в курсах общей физики и электродинамики сплошных сред. Тексты из курса Пёрселла можно привлечь для анализа разночтений с употреблением обозначений  $H$  и  $B$  в формулах, описывающих эффекты магнитного резонанса (и другие эффекты в магнитном поле) [25. С. 739]. Между прочим, курс Пёрселла был одним из



первых общих курсов электричества и магнетизма, включающих рассмотрение эффектов магнитного резонанса.

В 1962 г. Пёрселл оказался вовлечённым в одну из хитроумных попыток найти магнитный монополю Дирака на этот раз с помощью бомбардировки различных мишеней 30-Мегаэлектронвольтовым пучком протонов Брукхейвенского ускорителя. Загаданная Дираком задача со многими неизвестными, такими как масса и магнитный заряд этого самого монополя, решена была для столкновений протонов с тяжёлыми ядрами отрицательно [26] с точностью до сечений порядка  $10^{-40}$  см<sup>2</sup>. Так в списке многочисленных научных достижений Пёрселла появился и отрицательный результат. Как заметил по этому поводу А. Абрагам, самый замечательный охотник возвращается с пустым ягдташем оттуда, где дичи нет.

В 1967 г. Пёрселл обратил своё внимание на некоторые проблемы биофизики, относящиеся к биомеханике, так началось его сотрудничество с Х. Бергом, которое было отмечено и патентом [27] и рядом статей [28]. Американский физический журнал поместил в 1977 г. текст лекции Пёрселла с репродукцией его оригинальных (выполненных вручную) иллюстраций и занятным названием: «Жизнь при низких числах Рейнольдса» [29]. В лекции рассматривались механизмы движения микроорганизмов. В том же 1977 г. вышла большая статья Эдварда Пёрселла и упомянутого уже биофизика из Гарварда Ховарда Берга [30], посвящённая хемотаксису микроорганизмов.

В 1970 г. Пёрселл возглавлял Американское физическое общество, он продолжал активную педагогическую деятельность вплоть до 1980 г., а в 80-е гг. регулярно выступал с «заметками на оборотной стороне конверта» [31] и другими статьями педагогической направленности в Американском физическом журнале.

### 3. Биография Феликса Блоха.



Соратник Пёрселла по Нобелевской премии 1952 г. гораздо более именитый физик Феликс Блох (23.10. 1905 – 10. 09.1983) родился в Цюрихе (Швейцария), в семье Густава Блоха, оптового торговца зерном, и Агнес Блох (в девичестве Майер). Достаточно краткий и в то же время содержательный биографический очерк о нём можно прочитать в Нобелевском архиве [32]. Из многочисленных материалов Интернета, посвящённых Феликсу Блоху, отметим записи бесед с ним [33 – 35].

Феликс Блох учился в гимназии Цюрихского кантона, которую окончил в 1924 г. Юноша интересовался математикой и астрономией и поступил (как и Э. Пёрселл) сперва на инженерную специализацию в Федеральном технологическом институте в Цюрихе. Однако, прослушав первый физический курс, Блох решил стать физиком-теоретиком, а не инженером. С 1924 по 1927 г. он учился в Федеральном институте, где среди его учителей были Петер Дебай и Эрвин Шредингер. Затем он учился в Лейпцигском университете у Вернера Гейзенберга. Докторскую степень он получил в 1928 г. в Лейпциге за диссертацию, посвящённую проводимости электронов в металлах. В этой диссертации, которая, как сейчас признано, заложила основы ряда разделов физики твёрдого тела, он сформулировал теорему, определявшую вид волновых функций электрона в металлах (функции Блоха).

После завершения докторской диссертации Блох стал обладателем нескольких стипендий, позволивших ему работать с Гейзенбергом, Нильсом Бором, Энрико Ферми и Вольфгангом Паули; в течение этого периода он сделал свой основной вклад в теоретическую физику. Блох теоретически подтвердил и обосновал эмпирический закон Грюнейзена, касающийся зависимости проводимости металлов от температуры, который ныне известен как соотношение Блоха – Грюнейзена. Благодаря вкладу Блоха в теорию сверхпроводимости и в теоретическое осмысление магнитных систем целый ряд теорем и эффектов названы его именем. Это – теорема Блоха в теории сверхпроводимости, закон Блоха, касающийся зависимости намагниченности ферромагнитных материалов от температуры, стенки Блоха (зоны перехода между областями ферромагнитного материала с различными ориентациями спонтанно возникающих намагниченностей). В 1932 г. Блох развил работу Бора и Г. А. Бете по торможению движущихся заряженных частиц в веществе, получив формулу Бете – Блоха для этого эффекта. В основном эти свои выдающиеся работы, упомянутые выше, он сделал и опубликовал в Германии.

Когда Гитлер в 1933 г. пришел к власти, Блох, который был евреем, покинул Германию. Некоторое время он пытался найти себе место для спокойной работы в Европе, вступал даже в контакты с советскими физиками, работал некоторое время в Париже. По совместной работе у В. Паули Блох был знаком с Л.Д. Ландау. Был у Ландау в гостях в Ленинграде, имел личное знакомство и переписку об устройстве в Уральском физико-техническом институте с Я.Г. Дорфманом (см. об этом в книге Н.Е. Завойской [6. С. 120 – 123]), одна из статей Блоха опубликована в советском журнале [36].

Однако Блох сознавал всю неустойчивость положения в Европе перед лицом назревающей нацистской агрессии и всю опасность пребывания иностранца в советской России. Блох с 1934 г. поселился в Соединенных

Штатах и стал гражданином США в 1939 г. В 1940 г. Блох женился на Лоре К. Миш, физике и тоже беженке из Германии; у них было три сына и дочь.

Он стал в 1934 г. адъюнкт-профессором в Стэнфордском университете, а два года спустя занял там пост полного профессора. В это время Блох выполнил ряд важных работ по квантовой теории электромагнитного поля. Затем он исследовал недавно открытый нейтрон, предсказав, что его магнитный момент можно будет определить по рассеянию медленных нейтронов на железе и что пучок нейтронов окажется поляризованным после рассеяния на железной мишени. Эти предсказания были подтверждены в следующем году. Блох заинтересовался свойствами нейтрона и обратился к экспериментальным исследованиям. В 30-х гг. И.А. Раби разработал резонансную методику измерения ядерных магнитных моментов в молекулярных пучках. В 1939 г. Ф. Блох вместе с Л. У. Альваресом измерил магниторезонансным методом, аналогичным методу Раби, магнитный момент нейтрона, используя циклотрон Калифорнийского университета в Беркли для генерации пучка нейтронов. Таково было первое обращение Феликса Блоха к магнитному резонансу [37]. В 1940 г. совместно с А. Зигертом Блох опубликовал важное для методики магнитного резонанса исследование с расчётом частоты магнитного резонанса в линейно поляризованном переменном магнитном поле [38]<sup>1</sup>.

Таким образом, Ф. Блох в отличие от Э. Пёрселла и Е.К. Завойского, имел уже к началу своих исследований по магнитному резонансу в конденсированной среде некоторый опыт работы в области магниторезонансных явлений.

Во время второй мировой войны, как член Манхэттенского проекта по созданию атомной бомбы, Блох в Лос Аламосе некоторое время исследовал

---

<sup>1</sup> Как известно, наиболее простым является выражение для частоты резонанса  $\nu_0$  в магнитном поле с индукцией  $B_0$  при определённой (допустим, по часовой стрелке при  $\gamma > 0$ ) круговой поляризации резонансного поля:  $2\pi\nu_0 = \gamma B_0$ . Линейно поляризованное поле есть сумма двух противоположно вращающихся поляризованных по кругу полей. К сожалению, в достаточно солидной справке Нобелевского архива [32] работа [38], которая дала имя Блоха ещё одному эффекту – изменению последнего соотношения за счёт вклада поля с противоположно направленной круговой поляризацией (эффект Блоха – Зигерта или «сдвиг Блоха – Зигерта»), не упоминается.

свойства изотопов урана. Позднее он стал помощником руководителя группы, занимавшейся военными разработками по созданию помех радиолокаторам в исследовательской радиолоборатории Гарвардского университета.

После войны Блох вернулся в Стэнфордский университет и сразу приступил к работе над магнитным резонансом атомных ядер (протонов), для чего, естественно, применил радиоволновую технику. Физикам, изучавшим поведение атомных ядер, необходимо было с высокой степенью точности знать магнитные моменты различных типов ядер. В 1946 г. Блох предложил для этого оригинальный метод ядерной индукции (см. раздел 4). Хотя Блох известен многими достижениями в области физики, именно за разработку этой методики он удостоился Нобелевской премии.

Большинство изысканий Блоха после 1946 г. связано с экспериментальными и теоретическими аспектами ЯМР («ядерной индукции»). О них см. в разделе 4. В 1954 – 1955 гг. Блох взял двухгодичный отпуск в Стэнфорде, чтобы стать генеральным директором ЦЕРНа (Европейского центра ядерных исследований) в Женеве (Швейцария). Об этом периоде в жизни и работе Феликса Блоха вспоминает А. Абрагам в [5. С. 191 – 195]. Упомянем здесь лишь то, что, по словам Абрагама, Феликс Блох был не в восторге от своего назначения, не любил административной работы и «тяжёлую физику» (ускорители).

В 1963 г. Блох снова занял пост профессора в Стэнфорде. Уйдя в отставку в 1971 г., Блох вернулся в Цюрих, где и умер 10 сентября 1983 г. Блох был членом американской Национальной академии наук, Американской академии наук и искусств, Швейцарской академии естественных наук и Американского физического общества, президентом которого он был в 1965 г.

#### **4. Вклад Е.К. Завойского, Э.М. Пёрселла и Ф. Блоха в развитие теории, методики и применений магнитного резонанса.**

Вопрос о существовании резонансного излучения при переходе между уровнями энергии, возникающими при различных ориентациях магнитных моментов во внешнем поле, был впервые поставлен П. Эренфестом и А. Эйнштейном [39]. Ориентация протонных спинов молекул водорода в магнитном поле была зафиксирована в опытах О. Штерна и др. [40], что дало основание Нобелевскому комитету наградить О. Штерна в 1943 г. Нобелевской премией в том числе и за «открытие магнитного момента протона»<sup>2</sup>. К. Гортер настойчиво, но безуспешно искал магнитный резонанс атомных ядер в веществе. Первая попытка Гортера [41], предпринятая с помощью старомодного *калориметрического* метода измерения поглощения энергии, дала отрицательный результат. В то же время Гортер и его сотрудники обнаружили дисперсию и абсорбцию электромагнитных колебаний в образцах, обладающих электронным парамагнетизмом при наложении внешнего магнитного поля (см., например, [42]). Тем самым была продемонстрирована частотная зависимость поглощения и рассеяния энергии электромагнитных колебаний, обусловленная зависимостью интенсивности магнитных дипольных переходов. Однако, по каким-то субъективным причинам (видимо, полагая линии магнитного резонанса электронов слишком широкими или не располагая нужным диапазоном доступных магнитных полей и частот) Гортер не искал электронного парамагнитного резонанса.

Группа И. Раби вскоре наблюдала магнитные резонансы атомных ядер в молекулярных пучках [43]. Затем та же группа наблюдала ЭПР в атомных пучках [44]. И, наконец, Ф. Блох и Л. У. Альварес наблюдали магнитный резонанс нейтронов в пучке нейтронов, генерированном с помощью циклотрона [39]. Индикация резонансного поглощения во всех этих опытах

---

<sup>2</sup> 'for his contribution to the development of the molecular ray method and his discovery of the magnetic moment of the proton', то есть «за его вклад в развитие метода молекулярных пучков и открытие им магнитного момента протонов».

проводилась с помощью детекторов частиц при их «перебросе» с помощью резонансного возбуждения из одной ориентации в другую. Череда «открытий» магнитных резонансов началась. Однако для успеха в каждом конкретном случае необходимы были свои специфические условия.

В это же время (1940 – 1941) Е.К. Завойский, С.А. Альтшулер и Б.М. Козырев искали и практически нашли ядерный магнитный резонанс в веществе. Эта группа первой встала на путь применения радиофизических методов регистрации резонансной дисперсии и поглощения, обусловленных собственно магнитным резонансом. Неудача Гортера их не обескураживала, ведь они располагали куда более чувствительным методом, а успехи группы Раби их вдохновляли. Завойский, как следует из его биографии (см. ссылки в [45. С. 10 – 29]) исходил из желания максимально эффективно для науки использовать метод слабого генератора («сеточного тока»). Об этом говорит тематика серии работ Завойского 1935 – 1939 гг., где названная методика применялась для исследования поглощения энергии электромагнитных колебаний в различных объектах (растворах электролитов, кристаллических солях и кислотах и т.д.), что не приводило к интересным или практически важным результатам. Было принято решение применить разработанный метод для наблюдения магнитного резонанса. В работе наметились серьёзные успехи. Однако, трагические привходящие обстоятельства (не станем повторять их описание, данное в [25. С.744 – 745; 6. С. 28 – 29] и в других источниках) привели к остановке исследований по поиску ЯМР. Для их продолжения требовалось «всего лишь» найти другой магнит или усовершенствовать имеющийся. Проявив чудеса научного героизма, Евгений Константинович Завойский при первой же малейшей возможности, а она была в условиях военной Казани действительно самой малейшей, вернулся к поискам магнитного резонанса, но на этот раз электронного парамагнитного резонанса. В отличие от педантичного, но не слишком решительного Гортера Завойский сразу же приступил к исследованиям в той области, где ожидался электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) на объектах, где концентрация

парамагнитных электронов максимальна или близка к максимальной (соли переходных элементов 3d ряда и их концентрированные растворы). Удача, как говорят, сопутствует смелым и умелым. На частотах от 10 до 100 МГц и несколько выше, в начале 1944 г. Завойский наблюдал ЭПР в магнитных полях с индукцией от  $3 \cdot 10^{-4}$  до  $3 \cdot 10^{-3}$  Тл, которые было можно получить с помощью соленоидов без железного сердечника. Высокая концентрация парамагнитных электронов не привела к чрезмерному уширению линии ЭПР, как вероятно боялся Гортер, а, напротив, благодаря эффекту открытого позднее так называемого обменного сужения по Ван Флеку [46], сузила линию ЭПР в центре, оставляя правда широкие крылья. Простейшие парамагнетики – соли переходных элементов оказались наиболее удобными объектами для получения ЭПР.

Тот факт, что в бедной аппаратурой, кадрами, да и просто бедной Казани был обнаружен новый тонкий физический эффект, шокировал и вызывал недоверие экспертов из Физического института АН СССР. Но факт оставался фактом и проверка, выполненная в Институте физических проблем с помощью А.И. Шальникова, доказала это. Вся эта история подробно изложена, например, в книге Н.Е. Завойской [6]. Первая публикация работы Завойского на английском языке [47] появилась с задержкой, но всё же ещё за полгода до появления работ Пёрселла и Блоха. Она не могла<sup>3</sup>, конечно, повлиять на ход работ Блоха и Пёрселла по поискам ЯМР. Оба будущих лауреата были уже в положении «низкого старта», если будет позволено сравнивать науку со спортом высших достижений, где вечно выясняют, кто быстрее, кто дальше и кто сильнее. Но главное не в этом. Применение радиоаппаратуры для наблюдения искомого эффекта уже не имело альтернативы в глазах Пёрселла и Блоха, непосредственно перед этим проработавших почти пять лет в лучших радиолaborаториях мира. Пёрселл сообщал, что ему стало известно в самом начале работ по поиску ЯМР о

---

<sup>3</sup> А вот на появление первых на западе работ по ЭПР, вышедших годом позже, она явно повлияла и фактически их стимулировала, см. ссылки на неё в [48].



повторной неудаче Гортера и Де Брура [49] в поиске ЯМР уже на радиоаппаратуре (основанной примерно на том же принципе, что у Завойского). Этот принцип (генератор слабых колебаний с образцом в катушке колебательного контура) и впоследствии успешно применялся для экспрессного обнаружения достаточно интенсивных и не слишком узких резонансов, в частности и одним из соавторов Пёрселла по первому наблюдению ЯМР Р.В. Паундом совместно с В. П. Найтом [50].

Надо ещё сказать, что неуспех Гортера с ЯМР во многом определялся не вполне удачным выбором образцов (диамагнитные кристаллические соли) и условий (пониженные температуры) для поиска ЯМР<sup>4</sup>. Но тот, у кого среди наставников были Дж. Ван Флек и И. Раби (Пёрселл) и тот, кто учился у П. Дебая и не менее хорошо знал Ван Флека да и сам изучал теорию твёрдого тела (Блох) такой ошибки повторить не могли, так как хорошо осознавали роль взаимодействия системы спинов с «решёткой» (колебаниями и движениями молекул вещества).

Мораль, которая следует из вышесказанного такова. Нельзя было взять да и открыть магнитный резонанс с одного раза. Соотношение между частотой резонанса и магнитной индукцией  $\nu_0 = \frac{\gamma}{2\pi} B_0$  (условие магнитного резонанса<sup>5</sup>) было к 1945 г. известно (по крайней мере, приблизительно) для протона и электрона, и ещё для нескольких нуклидов. То, что магнитная индукция переменного поля резонансной частоты должна быть перпендикулярна магнитной индукции поляризирующего поля также было хорошо известно. Что же ещё открывать? Иногда надо было определить (измерить) гиромагнитное отношение  $\gamma$  для ЯМР того или иного нуклида или в современных терминах

---

<sup>4</sup> Для наблюдения ЯМР необходимо, чтобы разность населённостей магнитных спиновых уровней не выравнивалась слишком быстро индуцированными полем резонансной частоты переходами, то есть, чтобы не было эффекта насыщения резонанса. Отсутствие последнего требует достаточно интенсивного взаимодействия спинов с колебаниями решётки или с движениями молекул. Такое взаимодействие сильнее при наличии в решётке парамагнитных примесей и при некотором повышении температуры.

<sup>5</sup> В первых работах по ЯМР в условии резонанса употреблялось  $H$  вместо  $B$ . Такое употребление  $H$  вместо  $B$  провоцировалось употреблением гауссовой магнитной системы единиц, где в вакууме индукция в гауссах равна напряжённости в эрстедах. К тому же в трудах Г. Ми и А. Зоммерфельда по мнению Г. Копфермана [51] именно  $H$ , а не  $B$  обозначает индукцию. (См. об этом также в [25]).

ЭПР  $g = \frac{\gamma}{2\pi\beta}$ , где  $\beta$  – магнетон Бора, для той или иной молекулярной или атомной системы с неспаренным электроном. Иногда надо подобрать мощность и процедуру возбуждения сигнала, учитывая те или иные условия взаимодействия спинов с решёткой. Одним словом, уже полученный на опыте Раби магнитный резонанс надо просто наблюдать каждый раз в совершенно новых обстоятельствах или, если хотите, открывать каждый раз заново для новых объектов. Взаимодействие концентрированного электронного парамагнетика с резонансным полем (ЭПР в солях переходных элементов) открыл Завойский. А вот ЭПР малых примесей переходных элементов в диамагнитных кристаллах, причём в широком диапазоне температур впервые изучила группа Блини в Оксфорде [52]. ЭПР стабильного свободного радикала впервые наблюдали сотрудники Завойского Б.М. Козырев и С.Г. Салихов. Их работу, к сожалению, пытались объявить секретной и она [53] появилась уже после аналогичных публикаций западных авторов. В 1949 г. впервые наблюдали ЭПР радиационных повреждений кристаллов [54] и т. д.

И, наконец, совершенно иные сюжеты, наблюдение резонанса ядер – ЯМР в диамагнитных веществах. А это могут быть газы, жидкости, стёкла, кристаллы и т.д., и каждый раз условия для спин-решётчного и спин-спинового взаимодействий различны. Надо признать (на этот раз прибегая к анализу публикаций сразу после первого наблюдения ЯМР), что Пёрселл со всей очевидностью так же как Завойский руководствовался интересом к продвижению в научные исследования уникальных для того времени возможностей радиоаппаратуры. Эти возможности у Пёрселла, Торри и Паунда были не сравнимы с более чем скромным аппаратным арсеналом Завойского 1940-х гг. Конструкция аппаратуры для поиска ЯМР, выбранная Э.М. Пёрселлом, Г.К. Торри и Р.В. Паундом [55], в своей высокочастотной части напоминала конструкцию аппаратуры для радиолокации с поправкой на переход в другой частотный диапазон (30 МГц или  $\lambda=10$  м). Мы имеем в

виду применение в качестве ячейки для образца (свыше 750 г парафина) не просто катушки, а объемного резонатора, хотя и нагруженного ёмкостью.

Обратим внимание на список первых работ по ЯМР с участием Пёрселла. ЯМР протонов наблюдался впервые в парафине [55]. Последовало наблюдение ЯМР протонов в газообразном водороде [56], затем наблюдение анизотропных свойств ЯМР ядер фтора  $^{19}\text{F}$  в монокристалле  $\text{CaF}_2$  [57]. Через три года последовала публикация о ЯМР в жёстких кристаллических решётках, где понятие спектрального момента было введено в практическую спектроскопию [58]. Наконец, был изучен ЯМР в твёрдом водороде [59].

Внимание Пёрселла неоднократно переключалось на изучение особенностей явления ЯМР и взаимодействия системы ядерных магнитных моментов с аппаратурой и веществом (решёткой). Таковы работа Пёрселла и Паунда об отрицательной спиновой температуре в ядерной спиновой системе [60], знаменитая 'VPP' – работа Бломбергера, Пёрселла, Паунда о релаксационных эффектах в жидкости [61]. Последняя работа на долгие годы стала ключевой для анализа проблем уширения линий и насыщения ЯМР в практической спектроскопии жидких растворов. Работа Пёрселла и Пейка о форме линии ЯМР [62] оказала заметное влияние на терминологию спектроскопии ЯМР. Эта работа положила начало классификации функций формы линий ЯМР (в «нулевом приближении» – Лоренцева или Гауссова).

Одной из работ Пёрселла, имевшей общефизическое значение, хотя и основанной на эффекте, легче всего наблюдаемом при возбуждении ЯМР, послужила работа о спонтанном излучении на радиочастотах при взаимодействии системы магнитных моментов с резонансным контуром [63] высокой добротности. Известные соотношения Эйнштейна указывают, что вероятность спонтанного излучения системы осцилляторов  $A_\nu$  с частотой  $\nu$ , пропорциональна  $\nu^3$  или числу осцилляторов поля излучения в единице объема  $8\pi\nu^2/c^3$  умноженному на энергию осциллятора  $h\nu$ . Однако, в резонаторе объемом  $V$  с добротностью  $Q$  первый из названных

сомножителей возрастает в  $\frac{3\lambda^3}{4\pi} \cdot \frac{Q}{V}$  раз, где  $\lambda$  – длина волны. Эту работу Пёрселл обнаружил на заседании Американского физического общества сразу после первых наблюдений ЯМР. Эффекты спонтанного излучения при взаимодействии поляронов с резонансными структурами в кристаллах в одном из недавних литературных источников имеют также название «эффекта Пёрселла» [64].

В 1949 г. Пёрселл опубликовал выполненное им серьёзное метрологическое исследование по измерению магнитного момента протона в магнетонах Бора [65], путём сопоставления частоты диамагнитного (циклотронного) резонанса и частоты протонного магнитного резонанса в одном и том же магнитном поле.

Выдающейся методической работой, которую выполнил Пёрселл совместно с Германом Карром, была работа [66], во многом предвосхитившая технику многоимпульсных последовательностей возбуждения ЯМР («спиновую хореографию» по слову автора работы [67]).

Специально подобранные импульсные последовательности широко применяются ныне для многомерного химического ЯМР (Р. Эрнст и др., например, [68]) и для ядерной магнитной томографии (П. Лотербур и П. Мэнсфилд [69, 70]).

Непосредственным результатом этого исследования было создание метода измерения диффузионной постоянной молекул в жидкости при многократном импульсном возбуждении ЯМР в неоднородном поляризующем магнитном поле.

В дальнейшем это привело также к созданию методов по выделению в спектре ЯМР сигналов тяжёлых (медленно диффундирующих) на фоне быстро затухающих сигналов лёгких (быстро диффундирующих в области образца с другими значениями индукции поляризующего поля и резонансной частоты) молекул (спектроскопия DOSY= Diffusion Ordered SpectroscopY).

Мотивация Феликса Блоха, безусловного лидера стэнфордской группы искателей ЯМР (Ф. Блох, Вильям Хэнсен и Мартин Паккард [71; 72]), была, по нашему мнению, в этой работе двойкой и исходила, во-первых, из его уже имевшегося опыта работы с магнитным резонансом. Во-вторых, интерес Блоха к магнитному резонансу был связан также и с исследованиями магнитных свойств нейтрона (см. об этом в [6. С.125 – 126] цитату из воспоминаний одного из соавторов Ф.Блоха Г. Штауба). Аппаратура для наблюдения магнитного резонанса протонов у группы Блоха была оригинальной. Приёмная катушка имела ось, перпендикулярную оси передающей («скрещенные катушки Блоха», у которого почти всё чего он касался, получало его имя!). Если до появления резонанса наводка электромагнитного сигнала с возбуждающей катушки на приёмную была скомпенсирована (для этого имелись специальные устройства «лопатки») появление сигнала в приёмнике могло происходить только из-за возбуждения прецессии магнитного момента протонов образца (в первом опыте – раствора парамагнитной соли в воде), помещённого в приёмную катушку. Это Блох и назвал ядерной индукцией, что напоминает нам о работе с участием Блоха [38], в которой он изучал особенности возбуждения сигнала магнитного резонанса вращающимся и линейно поляризованным магнитными полями. Блох создал и простой и эффективный теоретический аппарат [73], который позволял феноменологически описать явление ядерного магнитного резонанса макроскопического магнитного момента образца. Это – векторное дифференциальное уравнение или, соответственно три линейных дифференциальных уравнения для компонент магнитного момента, которые... ну, конечно, немедленно получили наименование «уравнений Блоха».

Потребовалось некоторое время, чтобы авторы двух различных схем возбуждения ЯМР пришли к пониманию, что и та и другая схемы хотя и различны по техническому воплощению, но схожи по идее регистрации нарушения фазового и энергетического баланса в определённых частях

аппаратуры. Нарушение происходит за счёт сигнала ядерного магнитного резонанса, а уравнения Блоха одинаково применимы (как показали последующие работы самого Блоха чаще в жидкости) или неприменимы (в зависимости от природы вещества, в котором наблюдается ЯМР) при любом способе возбуждения и приёма сигналов ЯМР. В нулевом приближении поведение магнитного момента почти любого образца можно описать с помощью уравнений Блоха.

Блох не преминул применить новый метод для новых и более точных определений магнитного момента нейтрона в свободном и в связанном состоянии. Магнитные моменты трития (нуклида тяжёлого изотопа водорода, содержащего два нейтрона и один протон) были измерены методом ЯМР [74]. Уточнено было и значение магнитного момента дейтрона [75].

Наконец, по инициативе Ф.Блоха в одном и том же магнитном поле было проведено сравнение резонансных частот нейтрона и протона [76], то есть был осуществлен план, о котором Блох рассказывал в первые месяцы после возвращения в Стэнфорд.

Особняком стояла работа, в которой была изучена релаксация ядер в газе при их взаимодействии с парамагнитными центрами на поверхности сосуда, содержащего газ [77]. Парамагнитные центры (как и в жидкости) по определению Блоха служат «катализаторами ядерной парамагнитной релаксации». Этот термин прижился в лабораторном жаргоне. Замечательным вкладом в технику ЯМР послужила последняя экспериментальная работа Блоха в этой области [78]. В этой работе было предложено устранять влияние азимутальной неоднородности индукции магнитного поля в объёме образца на уширение наблюдаемой линии ЯМР путём быстрого вращения образца<sup>6</sup>. Эта методика быстро утвердилась в лабораторной практике высокого разрешения ЯМР. На то время она

---

<sup>6</sup> Если частота вращения  $\nu_{\text{rot}} \gg (\delta B \cdot \gamma)$ , где  $\delta B$  – максимальная азимутальная неоднородность индукции магнитного поля в объёме образца, спектрометр показывает частоту резонанса, равную среднему значению (усредняет разброс частот и сужает резонансную линию).

способствовала повышению разрешающей способности спектрометров ЯМР почти на порядок.

Феликс Блох вернулся к теоретическим разработкам после 1952 г. Он сосредоточился на обосновании «уравнений Блоха». Область их применимости оценивалась им, исходя из представлений статистической физики [79, 80]. Анатолий Абрагам, впоследствии сумевший включить основные идеи этих работ в свою «Библию ЯМР» (книгу «Ядерный магнетизм» [81]), так изложил своё первое впечатление от них в [5. С.193]:

«Блох запросил моё мнение о работе, и я выразил грандиозность предприятия одним словом “Gottverdämmerung”<sup>7</sup>». Некоторые более поздние работы Блоха также относились к квантово-статистической теории ЯМР [82, 83].

Один из соавторов Блоха по открытию ЯМР Билл Хэнсен, скончавшийся в 1949 г., имел тесные связи с весьма активными и квалифицированными предпринимателями в области электроники братьями Расселом и Сигурдом Варианами. Последние инициировали уже в 1946 г. подачу заявки и оформление патента на «Метод и средства для химического анализа посредством ядерных индукций». Блох сперва не проявил интереса к получению патента (по словам Вестона Андерсона [84]). Однако Рассел Вариан был настойчив и взял на себя подготовку заявки (см. там же). Патент был получен в 1951 г. и, конечно, приобретён фирмой «Вариан», фамильным предприятием упомянутых выше братьев. Первый пункт патента в окончательной редакции объединял все магнитные резонансы, включая и ЭПР. Вестон Андерсон описал историю с патентом в Энциклопедии ЯМР (описание частично цитируется Н.Е. Завойской [6. С.134 – 135]). Из этого описания видно, что изменение заявки с неявным включением ЭПР последовало уже позднее, в процессе разборок с другими претендентами на

---

<sup>7</sup> С нем. «Гибель богов» («Осуждение богов») - опера Рихарда Вагнера, произведение, оставляющее грандиозное впечатление.

аналогичные изобретения. Заподозрить Блоха и даже представителей фирмы «Вариан» в плагиате у Завойского, по данным [6] нельзя.

Фирма «Вариан» более 15 лет была ведущей в приборостроении ЯМР и, конечно, с лихвой окупила свои затраты на патент, в том числе и на лицензионные выплаты Блоху. Так, ядерный магнитный резонанс перестал быть «всего лишь идеей» (“Lonely idea” по Лорену Грэхему [2]) и начал приносить прибыль, а заодно и зарабатывать средства для своего дальнейшего развития<sup>8</sup>.

Фирма «Вариан» до начала XXI века успешно конкурировала за рынок приборов ЯМР и ЭПР именно для химического анализа (какова прозорливость толковых дельцов!) с постепенно набиравшей обороты и, наконец, почти полностью победившей в конкурентной борьбе швейцарско-немецкой фирмой «Брукер Спектроспин». Возникновение и успешное развитие этой новой фирмы (а также некоторых других) показало, однако, что открытые публикации ряда исследователей, в том числе и Пёрселла и, конечно, Е.К. Завойского создавали многочисленные лазейки для обхода патента, чем и пользовались конкуренты «Вариана».

Своими исследованиями в области ЯМР известны выдающиеся ученики Э. Пёрселла (Н. Бломберген, Г. Карр, Р. Паунд, Г. Пейк, Г. Торри и др.). Среди них наибольших успехов, правда, уже на другом поприще, достиг Николаас Бломберген (лауреат Нобелевской премии по физике 1981 г. за лазерную спектроскопию). Об их работах, совместных с Пёрселлом мы уже упоминали. Стоит ещё вспомнить знаменитый «пейковский» дублет – характерный фрагмент спектра ЯМР в кристаллогидратах, обязанный своим происхождением дипольному взаимодействию относительно изолированной пары протонов H<sub>2</sub>O [86].

Многие из сотрудников Ф. Блоха продолжили свои исследования в лаборатории фирмы «Вариан». Среди них самый молодой из группы,

---

<sup>8</sup> Например, переход от непрерывного возбуждения и наблюдения ЯМР к импульсному возбуждению с последующим Фурье преобразованием отклика, был основан на патенте Р.Эрнста и В. Андерсона [85], полученного на основе разработок лаборатории фирмы «Вариан». Впрочем, опубликованные результаты других исследователей позволяли конкурентам «Вариана» обойти и этот патент.



наблюдавшей магнитный резонанс Мартин Паккард и весьма успешный исследователь и изобретатель Вестон Андерсон, которого мы уже упоминали выше. Решения уравнений Блоха при быстром прохождении через резонанс нашёл в соавторстве с Б.А. Джекобсоном теоретик Р.К. Вангснесс [87]. Он же участвовал в дальнейшем в квантово-статистическом обосновании уравнений Блоха [79].

Работы Блоха и Пёрселла непосредственно повлияли на развёртывание исследований ЯМР в СССР. Ссылки на них имеются в первой русскоязычной публикации по ЯМР К.В. Владимирского 1947 г. [88]. Сборник рефератов статей по ЯМР, опубликованных в иностранной литературе с 1942 по 1950 г., вышедший в Издательстве иностранной литературы [89], был настольной литературой, например, в лаборатории С.Д. Гвоздовера в МГУ<sup>9</sup>.

Нам известно, что применение ЯМР имело место в 1950 – 1951 гг. , то есть под непосредственным влиянием работ Блоха и Пёрселла, также в таких научно-технических центрах СССР как Лаборатория № 3 (будущий ТТЛ и позже ИТЭФ Средмаша СССР), Сухумский физико-технический институт, завод «Электросила» Ленинград (см. об этом в [91]).

### **5.Открытие магнитного резонанса в зеркале Нобелевских премий.**

Результаты ежегодных конкурсов на Нобелевские премии, которые проходят вот уже более 110 лет с небольшими перерывами на мировые войны и великие депрессии, конечно, не являются абсолютным индикатором сравнительных успехов исследователей в различных областях и в естествознании в целом. И всё же эти результаты позволяют в каком-то приближении оценить если не объективную относительную ценность результатов разных исследователей, то, по крайней мере, отношение определённых авторитетных кругов научного сообщества к этим результатам.

Например, хорошо известно, что вопреки явно выраженному мнению той части научного сообщества, которая непосредственно занималась

---

<sup>9</sup> Первая работа С.Д. Гвоздовера по ЯМР [90] была опубликована как раз в 1950 г.

магнитными резонансами (о чём говорит, например, награждение Завойского премией Международного общества магнитного резонанса (ISMAR) 1977 г.), Е.К. Завойский не получил Нобелевской премии за открытие электронного парамагнитного резонанса. Но ведь за это не получил премии и никто другой, скажем Исидор Раби, который тоже открыл ЭПР, только в атомном пучке (об этом упоминал и сам Завойский на защите своей докторской диссертации). Вообще электронному парамагнетизму с Нобелевскими премиями не повезло. Не получил премию за закон Кюри сам Пьер Кюри (правда он получил свою премию за радиоактивность), не получили премию за утверждение теории спина электрона Дж. Уленбек и С. Гаудсмит. Лишь Дж. Ван Флек практически на склоне лет разделил Нобелевскую премию 1977 г. «за фундаментальные теоретические исследования электронной структуры». Кстати, согласно мнениям, учтённым в вердиктах Нобелевского комитета (что совпадает и с нашим, высказанным выше в разделе 4 мнением), магнитный резонанс невозможно было открыть раз и навсегда, хотя какие-то его открытия в различных средах можно усмотреть. Мы посчитали, что примерно 60% всех Нобелевских премий по физике присуждались с формулировками, включающими слово “discovery”, “discoveries” или “discovering” (открытие или открытия). И. Раби получил свою премию всего лишь «за резонансный метод регистрации магнитных свойств атомных ядер». Блох и Пёрселл получили свою премию, как известно, «за развитие новых тонких методов измерения магнитных свойств ядер и связанные с этим открытия». Итак, они в основном развили методы (разные), но с помощью этих методов нечто открыли (по мнению Нобелевского комитета). Однако в этой формулировке прямо не сказано, что открыт ядерный магнитный резонанс в веществе, тем более вообще магнитный резонанс в веществе, и приоритет Е.К. Завойского никак не подвергнут сомнению. Добавим, что в 1966 г. Нобелевскую премию получил А. Кастлер за открытие двойного оптического-парамагнитного резонанса, что Нобелевский комитет

сформулировал как «за открытие и развитие оптических методов регистрации радиочастотных резонансов в атомах»<sup>10</sup>.

«Запоздалые» Нобелевские премии были вручены за ряд исследований, прямо или косвенно связанных с явлениями или применениями магнитного резонанса. Мы имеем в виду премии, вручённые Ван Флеку в 1977, Норманну Рэмси в 1989 и, возможно Энтони Леггету в 2003. Дальнейшие награждения премиями Нобеля за магнитный резонанс последовали уже в номинации химии (Р. Эрнсту 1991; К. Вютриху в 2002) и медицины (П.Лотербуру и П. Мэнсфилду в 2003). Об этом см. в [25. С. 760]. Премия Э. Леггету (о ней по упущению автора [25] в предыдущей ссылке не упоминалось) была присуждена по всей очевидности за исследования сверхтекучести  $He^3$ , в том числе и методом ЯМР. См. ссылки в книге А. Абрагама и М. Гольдмана [92. Т.1. Гл.4], например, [93].

## **6. Заключительные замечания**

В ходе работы над настоящей публикацией кроме логики развития научного познания, нас интересовали и личностные мотивации первооткрывателей магнитного резонанса, а также исторические обстоятельства и социально-экономические условия в которых эти открытия совершались.

История открытия Завойского несёт на себе трагический отпечаток пренебрежения к судьбе и таланту выдающегося исследователя. Ему не позволили (не то что б просто не помогли, а именно не позволили) открывать ЯМР. Не было создано и условий для систематической работы талантливого исследователя в помощь фронту во время войны. Когда, не взирая на крайне стеснённые обстоятельства, Евгений Константинович всё же сумел первым в мире наблюдать ЭПР, он не получил для дальнейшего развёртывания работ в Казани поддержки оборудованием и кадрами. С этой точки зрения было благом для отечественной науки и самого Завойского, что его вовлекли с

---

<sup>10</sup> С англ. "for the discovery and development of optical methods for studying Hertzian resonances in atoms".

1947 г. в Атомный проект, где он нашёл поле для применения своих талантов физика, экспериментатора и изобретателя. Соратники Завойского по поискам ЯМР С.А. Альтшулер и Б.М. Козырев сумели постепенно создать школы физиков и физико-химиков в Казани, которые внесли в последующем заметный вклад в исследования магниторезонансных явлений.

Условия для поисков ЯМР группами Пёрселла и Блоха, соответственно в Гарварде и Стэнфорде, выглядят просто великолепными. Ещё более удачными можно считать условия для развёртывания ими работ по изучению эффектов, сопутствующих ЯМР, и по применениям ЯМР. Работы Пёрселла по ЯМР пришлись на самый взлёт его таланта и перемежались успешными исследованиями в других областях (радиоастрономии, распространении радиоволн и т.д.), в основе всех этих исследований лежали применения новейших тогда методов радиофизики. Работы группы Блоха были подхвачены приборостроительной фирмой «Вариан» и, можно сказать, легли в основу будущего расцвета приборостроения химической радиоспектроскопии ЯМР. Блоху удалось реализовать свои первоначальные планы в отношении определения магнитных моментов нейтрона и простейших нуклидов (изотопов водорода), а также наметить один из возможных путей построения квантово-статистической теории поведения ядерных моментов в образце.

Уместно ещё раз подчеркнуть, что в настоящей статье мы широко пользовались материалами исследований Н.Е. Завойской [6].

### **Литература.**

1. Эдвард Майлз Пёрселл//Лауреаты Нобелевской премии: Энциклопедия: Пер. с англ.– М.: Прогресс, 1992. [Nobel Prize Winners. New York: The H.W. Wilson Company, 1987. ]. [n-t.ru/nl/fz/purcell.htm]
2. Ваганов А. Технологии в идеологической западне. Интервью с заслуженным профессором в отставке Л. Грэхемом//Независимая газета № 17 (221) от 28. 12. 2011.

3. Dr. E.M. Purcell, 84, Shared Nobel for Work on Hydrogen//The New York Times March 10 1997
4. Храмов Ю.А. Парселл Эдвард Майлз//История физики. Киев: «Феникс». 2006. 1176 с.
5. Абрагам А. Время вспять или Физик, физик, где ты был. Пер. с франц. (С изм.и доп.) автора / под. Ред. А.С. Боровика-Романова. – М.: Наука Гл. ред. физ.-мат. лит. , 1991. 392 с.
6. Завойская Н.Е. История одного открытия. – М.: ООО «Группа ИТД», 2007. 208 с.
7. Edward Mills Purcell /Array of contemporary American physicists/ American Institute of Physics /www.aip.org > Home > Browse/
8. Edward M. Purcell, an oral history conducted in 1991 by John Bryant, IEEE History Center, New Brunswick, NJ, USA. /ghn.ieee.org > ... > Oral Histories /-
9. Interview with Dr. Edward Purcell. By Katherine R. Sopka At Lyman Laboratory of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts June 8, 1977 /www.aip.org/history/ohilist/4835\_1.html/
10. Edward Mills Purcell. Research and Development of the U.S. Department of Energy (DOE R&D Accomplishments). Edward Mills Purcell – eNotes.com Reference //www.osti.gov/accomplishments/purcell.html
11. Ramsay N. Edward Mills Purcell – Honorary. //www. amphilsoc. org/sites /default/.../Purcell.... -
12. Pound R.V. Edward Mills Purcell//Biographical Memoirs. The National Academic Press. //books.nap.edu/html/biomems/epurcell.html
13. Hebb M. H., Purcell E. M. A Theoretical Study of magnetic cooling experiment //J.Chem. Phys. 1937. Vol.5, No 5. P.338 – 350
14. Purcell E. M. The Focusing of Charged Particles by a Spherical Condenser Phys.Rev.1938. Vol. 54, No 10. P. 818-826
15. Ewen H.I., Purcell E.M.. Observation of a Line in the Galactic Spectrum: Radiation from Galactic Hydrogen at 1,420 Mc./sec // Nature 1951. Vol.168. P.356

16. *Fermi E.* Über die magnetischen Momente der Atomkerne //Zschr. F. Phys. 1930. Bd.60. S. 320 – 333
17. *Purcell E. M., Pennypacker C. R.* Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains. Astrophysical Journal 1973. Vol. 186. P. 705.
18. *Purcell E.M.* On the alignment of interstellar dust. //Physica 1969. Vol. 41, No 1. P. 100-127.
19. *Purcell, E. M., Spitzer L., Jr.,* Orientation of Rotating Grains Astrophys. J. 1971. Vol. 167, No 1. P. 31-62
20. *Smith S.J., Purcell E.M.* Visible Light from Localized Surface Charges Moving across a Grating //Phys. Rev. 1953. Vol. 92 P.1069.
21. *Woods K. J., Walsh J. E., Stoner R. E., Kirk H. G., Fernow R. C.* Forward Directed Smith-Purcell Radiation from Relativistic Electrons// Phys. Rev. Lett. 1995. Vol. 74, No 19 P. 3808 – 3811
22. *Bayley D. K. et al.* A New Kind of Radio Propagation at Very High Frequencies Observable over Long Distances //Phys. Rev. 1952. Vol.. 86, No. 2. P. 141 – 145
- 23., *Ramsay N.F.* On the Possibility of Electric Dipole Moments for Elementary Particles and Nuclei//Phys. Rev. 1950. Vol. 78 , No6 . P. 807
24. *Purcell E.M.* Electricity and Magnetism. Berkeley Physics Course, vol. II. New York: McGraw Hill.1965. [Парселл Э.М. Электричество и магнетизм. Берклеевский курс физики. Том 2. Москва: Наука Физматлит. 1975.]
25. *Кессених А.В.* Открытие, исследования и применения магнитного резонанса// УФН. 2009. Т.179, вып. 7. С. 737 – 764 [*Kessenikh A.V.* “Magnetic resonance: discovery, investigations, and applications” Physics-Uspekhi 2009. Vol. 52, No 7. P. 695–722 ]
26. *Purcell E.M., Collins G. B., Hornbostel J., Fujii T., and Turkot F.* Search for the Dirac monopole with 30-BeV protons. Phys. Rev.1963.Vol. 129, No 5. P.2326 – 2336
27. *Purcell, E.M. and Berg, H.C.* Particle separator. U.S. Patent 3,523,610 (1970).

28. *Berg, H.C. and Purcell, E.M.* A method for separating according to mass a mixture of macromolecules or small particles suspended in a fluid, I. Theory. //Proc. Natl. Acad. Sci. USA 1967. Vol. 58, P. 862-869; *Berg, H.C., Purcell, E.M. and Stewart, W.W.* ... , II. Experiments in a gravitational field.// *ibid*,P. 1286-1291. *Berg, H.C. and Purcell, E.M.* ... , III. Experiments in a centrifugal field. // *ibid*, P. 1821 – 1828.

29. *Purcell, E.M.* Life at low Reynolds numbers. //Am. J. Phys. 1977 Vol.45, No 1. P. 3 – 11.

30. *Berg H. C., Purcell, E.M.* Physics of chemoreception. //Biophys. J. 1977. Vol. 20, No 2. P.193 – 219.

31. *Purcell, E.M.* The back of the envelope. //Am. J. Phys. 1983 – 1988 .See vols. 51, 52, 55, and 56.

*For ex.:* *Purcell E.M.*, Editor: The Back Of The Envelope: New Problems.

*Purcell E. M.*, Editor: Solutions to December Problems //American Journal of Physics. January 1984 -- Volume 52, Issue 1, pp. 8

32. Ф. Блох//Лауреаты Нобелевской премии: Энциклопедия: Пер. с англ. с дополнениями. М: М.: Прогресс, 1992. [Nobel prize winners: an H.W. Wilson biographical dictionary. The H.W. Wilson Company, 1987]./n-t.ru/nl/fz/bloch.htm/

33. Interview with Felix Bloch by Thomas S. Kuhn In Palo Alto, California May 14, 1964. Research and Development of the U.S. Department of Energy (DOE R&D Accomplishments) // [www.aip.org/history/ohilist/4509.html](http://www.aip.org/history/ohilist/4509.html)

34. Interview with Felix Bloch by Charles Weiner at Varian Physics Building Stanford University, California August 15, 1968  
//[www.aip.org/history/ohilist/4510.html](http://www.aip.org/history/ohilist/4510.html)

35. Interview with Dr. Felix Bloch by Lillian Hoddeson at Stanford University December 15, 1981// [www.aip.org/history/ohilist/5004.html](http://www.aip.org/history/ohilist/5004.html) -

36. *Bloch F.* Die physikalische Bedeutung mehrerer Zeiten in der Quantenelektrodynamik//Phys.Zsch. der Sowietunion . 1934. Bd.5. S. 302 – 315

37. *Alvarez L.W., Bloch F.* A quantitative determination of the neutron moment in absolute nuclear magnetons //Phys. Rev. 1940. Vol. 57. № 2. P. 111 – 122

38. *Bloch F., Siegert A.* Magnetic resonance for nonrotating fields // *Phys. Rev.* 1940. Vol. 57, № 6. P.522 – 527
39. *Einstein A., Ehrenfest P.* Quantentheoretische Bemerkungen zum Experiment von Stern und Gerlach. // *Zschr. Phys.* 1922. Bd.11. S. 31-34
40. *Frisch R., Stern O.* Über die magnetische Ablenkung der Wasserstoffmolekülen in magnetischen Felder und magnetische Moment des Protons. // *Zs.Phys.* 1933. Bd. 85, H1-2. S. 4-16. ; *Estermann I., Stern O.*, Über die magnetische Ablenkung der Wasserstoffmolekülen in magnetischen Felder und magnetische Moment des Protons. 2.// *ibidem* S. 17 – 26
41. *Gorter C.J.* Negative result of an attempt to detect nuclear magnetic spins// *Physica.* 1936. Vol. 3, № 9. P.995 – 998
42. *Gorter C.J.* Paramagnetic relaxation in a transversal magnetic field//*Physica.* 1936.Vol. 3, No 9. P. 1006 – 1008
- 43.*Rabi I.I., Zacharias J.R., Millman S., Kush P.* A new method of measuring nuclear magnetic moment//*Phys. Rev.* 1938. Vol. 53, № 4. P.318
44. *Kush P., Millman S. Rabi I.I.* Radiofrequency spectra of atoms.Hyperfine structure and Zeeman effect in the ground state of  $\text{Li}^6$ ,  $\text{Li}^7$ ,  $\text{K}^{39}$  and  $\text{K}^{41}$  // *Phys. Rev.* 1940. Vol. 57. P.765 – 780
45. *Яблоков Ю.В, Фанченко С.Д.* Краткий очерк научной, педагогической и общественной деятельности (Е.К. Завойского) // Евгений Константинович Завойский. Материалы к биографии. Казань.: Унипресс. 1998.
46. *Gorter C.J., van Vleck J.* The role of exchange interaction in paramagnetic absorption// *Phys. Rev.* 1947. Vol.72. № 10. P.1128 –1129; *Van Vleck J.H.* Dipolar broadening of magnetic resonance lines in crystals //*Phys. Rev.* 1948. Vol. 74, No 9. P. 1168 – 1183 [См. перев. *Ван-Флек Дж.* Дипольное расширение линий магнитного резонанса в кристаллах // *Ферромагнитный резонанс и поведение ферромагнетиков в переменных магнитных полях.* Под ред. С.В. Вонсовский. М.: ИИЛ. 1952. С. 71 – 87]
47. *Zavoisky E.K.* Spin magnetic Resonance in paramagnetics // *J. Phys. USSR.* 1945. V.9. P. 245.



48. *Cummerow R. L., Halliday D.* Paramagnetic losses in two manganous salts //Phys. Rev. 1946. Vol. 70, № 5 –6. P. 433
49. *Gorter C. J., Broer L.J.F.* The Negative Results of an Attempt to observe Nuclear Magnetic Resonance. //Physica. 1942. V.9. P. 591 – 596
50. *Pound R.V., Knight W.P.,* A Radiofrequency Spectrograph and Simple Magnetic-Field Meter, Rev.Sci.Instrum. 1950. Vol. 21, P. 219
51. *Конферман Г.* Ядерные моменты. М.: ИИЛ. Изд-ие 2. (Пер. с нем). 1960
52. *Buggley D.M.S., Bleaney B., Griffiths J.H.S., Penrose R.P., Plumpton B.I.* Paramagnetic resonance in salts of the iron group. A preliminary survey. I. Theoretical discussion //Proceedings of the physical society. London. 1948. Vol. 61, No 6. P. 542 – 550; II. Experimental results//ibidem. P. 551 – 561
53. *Козырев Б.М., Салихов С.Г.* Парамагнитная релаксация в пентафенилциклопентадиениле// ДАН СССР. 1947. Т. 58, № 6. С. 1023 – 1025
54. *Hutchison C. A.* Paramagnetic resonance absorption in crystals colored by irradiation// Phys.Rev. 1949. Vol.75. No 5. pp. 1769-1770
- 55.*Purcell E.M., Torrey H.C., Pound R.V.* Resonance Absorption by Nuclear Magnetic Moments in a Solid //Phys.Rev. 1946. Vol. 69. № 1-2. P.37-38
56. *Purcell E.M., Pound R.V., Bloembergen N.,* Nuclear Magnetic Absorption in Hydrogen Gas// Phys.Rev. 70, P. 986-987 (1946).
57. *Purcell E.M., Bloembergen N., Pound R.V.,* Resonance Absorption by Nuclear Magnetic Moments in a Single Crystal of CaF<sub>2</sub>//Phys.Rev. 1946. Vol.70, P. 988.
58. *Gutowsky H.S., Kistiakowsky G.B., Pake G.E., Purcell E.M.,* Structural Investigations by Means of Nuclear Magnetism. I. Rigid Crystal Lattices, //J.Chem.Phys. 1949. Vol.17, P. 972.
59. *Reif F., Purcell E.M.* Nuclear magnetic resonance in solid hydrogen //Phys.Rev. 1953., Vol. 91, No 3. P. 631 - 641
60. *Purcell E.M., Pound R V.,* A Nuclear Spin System at Negative Temperature, //Phys.Rev. 1951. Vol.81, P. 279-280
61. *Bloembergen N., Purcell E.M., Pound R.V.* Relaxation effects in nuclear magnetic absorption//Phys. Rev. 1948. Vol.73, № 7. P. 679 – 691

62. *Pake G.E., Purcell E.M.* Line shape in nuclear paramagnetism // *Phys. Rev.* 1948. Vol. 74, No 9. P. 1184 – 1188
63. *Purcell E.M.*, Spontaneous Emission Probabilities at Radio Frequencies// *Phys.Rev.* 1946. Vol. 69, P.681
64. *Hideo I. , Englund D., Vuckovic J.* Analysis of the Purcell effect in photonic and plasmonic crystals with losses//*Optics Express* 2010. Vol. 18, No 16. 16546  
[/http://www.stanford.edu/group/nqp/](http://www.stanford.edu/group/nqp/)
65. *Purcell E.M.* A Precise Determination of the Proton Magnetic Moment in Bohr Magnetons// *Physical Review*, 1949. Vol. 76, Issue 8: 1262-1263
66. *Carr H.Y., Purcell E.M.* Effects of diffusion on free precession in nuclear magnetic resonance experiments. //*Phys.Rev.* 1954. Vol.94, P.630-638.
67. *Freeman R.*, Spin Choreography. Basic Steps in High Resolution NMR Spektrum. Oxford.: Academic Press. 1997.
68. Эрнст Р., Боденхаузен Дж., Вокаун А. ЯМР в одном и в двух измерениях (пер. с англ.). М.: Мир. 1990. 712 с. [*Ernst R.R. , Bodenhausen G., Wokaun A.* Principles of nuclear magnetic resonance in one and two dimensions. Oxford: Clarendon press. 1987].
69. *Lauterbur P.C.* The image formation by induced local interaction //*Nature.*1973. Vol. 242. P. 190 – 191
70. *Mansfield P.* Multi-planar image formation using NMR spin-echoes// *J.Phys. C. Solid state physics.* 1977. Vol.10. P. 155 – 158
71. *Bloch F., Hansen W.W., Packard M.* Nuclear Induction \\*Phys.Rev.* 1946. Vol. 69. No 3. P.127
72. *Bloch F.* Nuclear induction // *Phys. Rev.* 1946. Vol. 70, No 7/8. P.460 – 474
73. *Bloch F., Hansen W.W., Packard M.* Nuclear Induction Experiments \\*Phys.Rev.* 1946. Vol.70. No 7-8. P.474 - 485
74. *Bloch F., Groves A.C., Packard M., Spence R.W.* Spin and magnetic moment of tritium // *Phys. Rev.* 1947. Vol. 71, No 3. P. 373 – 374
75. *Bloch F., Levinthal E.C., Packard M.E* ,Relative Nuclear Moments of H1 and H2 //*Phys.Rev.* 1947. Vol.72, No . P.1125-1126.

76. *Bloch F., Nicodemus D., Staub H.H.*, A Quantitative Determination of the Magnetic Moment of the Neutron in Units of the Proton Moment, //Phys.Rev. 1948. Vol.74, 1025-1045
77. *Bloch F.*, Nuclear Relaxation in Gases by Surface Catalysis, //Phys.Rev. 1951. Vol. 83, P.1062-1063.
78. *Bloch F.*, Line-Narrowing by Macroscopic Motion, Phys.Rev. 1954.Vol.94, P.496-497.
79. *Wangsness R. K., Bloch F.* The Dynamical Theory of Nuclear Induction//Phys. Rev. 1953.Vol. 89. No. 4. P. 728–739
80. *Bloch F.* Dynamical Theory of Nuclear Induction. II//Phys. Rev. 1956. Vol. 102, No 1. P.104–135
81. *Абрагам А.* Ядерный магнетизм (пер. с англ.) .М.: Издательство иностранной литературы. 1963. 551 с. [*Abragam A.* Principles of nuclear magnetism. Oxford: Clarendon press. 1961]
82. *Bloch F.* Generalized Theory of Relaxation//Phys. Rev. 1957. Vol.105, No 4. P.1206– 1222
83. *Bloch F.* Theory of Line Narrowing by Double-Frequency Irradiation//Phys. Rev. 1958. Vol.111, No 3. P 841–853
84. *Anderson W.A.* Early NMR experiences and experiments//Encyclopedia of NMR. Chichester, New-York, Brisbane, Toronto, Singaporo : John Wiley & Sohns, 1996. Vol. 1. P. 168 – 176
85. *Anderson W., Ernst R.* Patent US-A 3475680 (Impulse Resonance Spectrometer Including a Time Averaging Computer and a Fourier Analyser). 1969. (Submitted May 26 1965)
86. *Pake G.E.* Nuclear resonance absorption in hydrogenated crystals. Fine structure of the proton line//J. Chem. Phys. 1948. Vol.16. P.327 – 336
87. *Jacobsohn B.A., Wangsness R.K.* Shapes of nuclear induction signals//Phys. Rev. 1948. Vol. 73, No 9. P.942 – 946
88. *Владимирский К.В.* О колебательных явлениях в парамагнетизме ядер // ДАН СССР. 1947. Т. 58, № 8. С. 1625 – 1628

89. Научно-реферативный сборник по некоторым вопросам современной физики по материалам иностранной периодической литературы. Серия вторая. Выпуск VIII. Парамагнетизм ядер и бета-распад /Управление научной информации/. М. ИИЛ. 1950. С.5 – 74
90. Гвоздовер С.Д., Магазаник А.А. Изучение парамагнетизма атомных ядер методом магнито-спинового резонанса //ЖЭТФ. 1950. Т. 20. С. 705 – 721
91. Кессених А.В. «Как у нас в СССР покоряли ЯМР» (развитие аналитических методов ЯМР в СССР и России) //Исследования по истории физики и механики. 2007. М.: – Наука 2008 С. 148 – 194
92. Абрагам А. и Гольдман М. Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок (пер. с англ.) М.: Мир. Т.1. 1984. 300 с.; Т.2 . 1984. 360 с. [Abragam A., Goldman M. Nuclear magnetism: order and disorder. Oxford: Clarendon press. 1982].
93. Leggett A. J. Microscopic Theory of NMR in an Anisotropic Superfluid ( $^3\text{HeA}$ ) //Phys. Rev. Lett. 1973. Vol. 31, Iss.6. P.352–355

### **Edward Mills Purcell, Felix Bloch and discovery of magnetic resonance.**

Consider the role of eminent physicists EM Purcell and F. Bloch in studies of magnetic resonance phenomena. We describe their biographies and evaluation results of their research by scientific community. The article is devoted to the 100th anniversary of Purcell and the 60th anniversary of the Nobel Prize for his discovery of NMR.