

О МАГНИТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И РАДИОСПЕКТРОСКОПИИ АТОМНОГО ЯДРА

В. К. Аркадьев

Несколько более четверти века тому назад нами была выдвинута общая точка зрения¹ на изучение электромагнитных свойств вещества; тогда мы назвали спектрологией учение об активных и о пассивных спектрах вещества, обусловленных его электрическими и магнитными свойствами. Под спектрами мы разумели функции частоты, периода или длины волны, выражающие названные свойства или всякое отношение вещества, а также тела, к лучистой энергии. С этой точки зрения скалу волн нельзя называть спектром.

Под активными спектрами мы разумели спектры испускания, под пассивными — спектры поглощения всех видов, кривые дисперсии, свойств вещества в изолированных колеблющихся электрических и магнитных полях и т. п. Тогда же мы внедряли понятие об электрических и магнитных спектрах. Проверка временем показала, что это было не напрасно. В настоящее время между активными и пассивными спектрами мы должны вставить спектры преобразования, т. е. спектры, возникшие в результате изменения частоты колебаний начального излучения и появления нового частотного состава. Это спектры флуоресценции, комбинационного рассеяния, нелинейных искажений и т. п.²

Рядом с этой систематикой спектроскопии волн и колебаний можно поставить столь же важный вопрос о систематике спектров пучков элементарных частиц. Типичный пример такого спектра мы имеем в масс-спектрографе. Уже более 50 лет исследователи работают с молекулярными пучками: сначала это были катодные «лучи», потом анодные, потоки атомов в опытах Герлаха и Штерна и молекулярные пучки многих других видов.

На фоне этой общей классификации спектров волн, колебаний и пучков мы здесь хотим рассмотреть связь между магнитными спектрами всех видов, от нормальных пассивных спектров вещества до радиоспектров атомных ядер. Можно думать, что систематическая классификация спектров в их взаимной связи поможет осветить положение этих вопросов, в изложении которых иногда встречаются неясности.

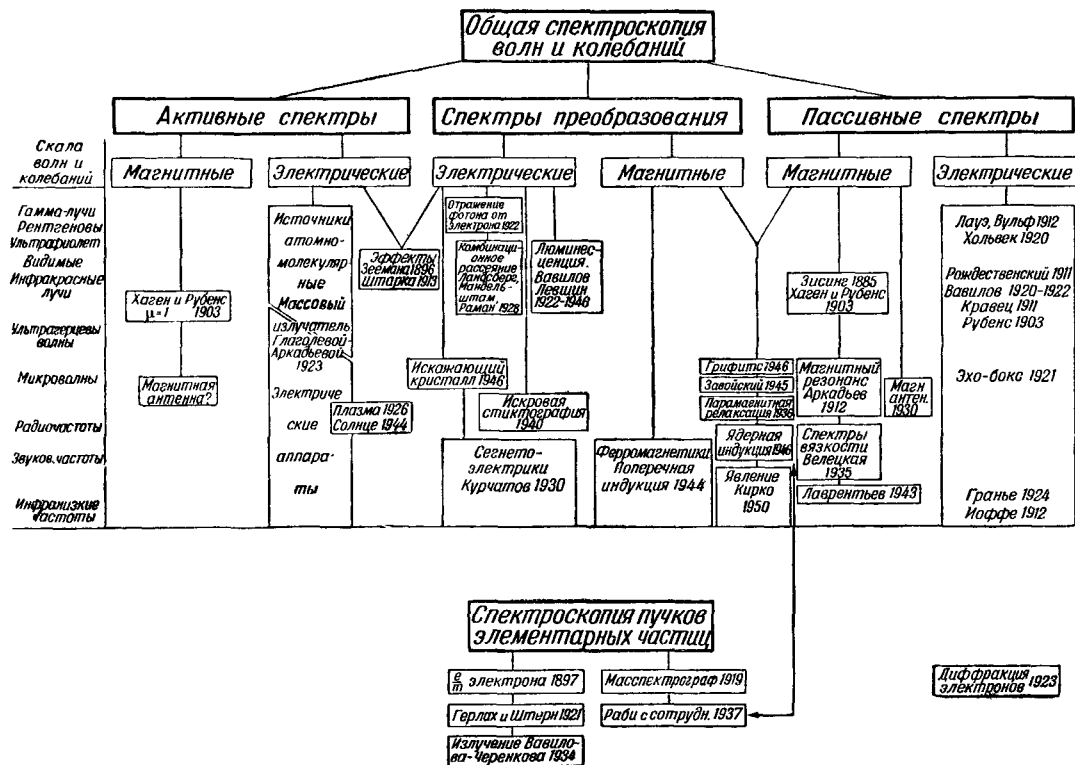
На схеме (стр. 82) представлены обе системы спектроскопии. Более разработанной является старая спектроскопия волн и колебаний, которая занимается спектрами вещества как собрания большого количества элементарных частиц. Она разделяется на спектроскопию активных спектров, спектров преобразования и пассивных спектров.

Пассивные спектры представляют собой кривые коэффициентов преломления (дисперсии), поглощения или других характеристик вещества. Поглощение может осуществляться при прохождении лучей сквозь тело или при их отражении от его поверхности. Пассивными спектрами являются также кривые диэлектрической и магнитной проницаемости вещества или тела, находящихся внутри конденсатора или катушки. Проницаемость понимается, конечно, как комплексная величина, состоящая из консервативной или действительной части и консумптивной или мнимой части.

Спектры активные, преобразования и пассивные часто могут быть подразделены на электрические и магнитные. Под электрическими мы разумеем спектры, обусловленные электрическими свойствами вещества: диэлектрической проницаемостью и электропроводностью, зависящими от массы и электрического заряда отдельных элементарных частиц, их момента инерции, электрического момента, заторможенности движения, их собственного периода, числа их в единице объема и т. п. Под магнитными спектрами мы разумеем спектры, обусловленные магнитными свойствами: магнитными восприимчивостью или проницаемостью, зависящими от магнитного момента и числа центров в единице объема, от их собственного периода, от структуры ферромагнетика, от магнитных вязкости и гистерезиса и т. п.

Слева этой общей диаграммы нанесена скала волн. В зависимости от длины волны или частоты, при которых наблюдается спектр, в диаграмме на соответствующей высоте мы поместили клетки с наименованием того явления или источника, которые обуславливают спектр и соответствующий вид излучения. Для краткости иногда поставлена связанная с данным явлением или методом фамилия исследователя.

1. Столбец электрических активных спектров в основном представляет собой содержание обычной скалы электромагнитных колебаний и волн, какое дал в 1901 г. П. Н. Лебедев и в 1936 г. развила А. А. Глаголева-Аркадьева. Косой разрез знаменует собой показанное работами А. А. Глаголевой-Аркадьевой перекрытие волн атомно-молекулярного происхождения (длинных инфракрасных) микроволнами, получаемыми при помощи электрических приборов, в данной области — массовым излучателем. Как источники радиоволн отмечены не указывавшиеся ранее на скале плазма и Солнце.



2. В столбце электрической пассивной спектроскопии мы находим спектры, методы и связанные с ними имена, встречающиеся на обычной шкале волн: Лауэ, Хольвека и Вульфа в области гамма-лучей и рентгеновых лучей, Вавилова, Рождественского, Теренина и Кравца в области световых лучей (дисперсия и поглощение); Рубенса в области инфракрасных лучей. Теперь сюда следует включить название аппарата — эхо-бокса, предложенного нами в 20-х годах. Это — метод измерения поглощения микроволн в замкнутой полости. В области дециметровых волн мы встречаем имена многих советских учёных, изучавших свойства жидкостей; в области инфранизких частот диэлектриками занимались весьма многие, в постоянных полях — А. Ф. Иоффе и его школа. Под постоянными полями на шкале периодов мы разумеем поля такой длительности, которая достигает продолжительности манипуляций в лабораторных опытах.

3. В столбце спектров преобразования вполне понятно присутствие явлений изменения спектра под влиянием внешних магнитных и электрических полей (эффект Зеемана и эффект Штарка), а также изменение частоты при столкновении фотона с электроном (1922), при комбинационном рассеянии (эффект Ландсберга, Мандельштама и Рамана, 1928) и явлениях фосфоресценции и флуоресценции, подробно изученных Вавиловым и Левшиным с сотрудниками. Здесь мы находим также кристаллы, искажающие колебания, даваемые клистроном, и порождающие волны до 5 мм длиной (1946), трансформацию сантиметровых волн в световые в экранах Аркадьева и Пеннера (1940) для просвечивания микроволнами, а в более низких частотах встречаем нелинейные искажители электрических полей — сегнетоэлектрики, и магнитных — ферромагнетики. Это — область явлений, в которой у нас немало поработали И. В. Курчатов (1930) и Г. В. Добровольский (1943). В последние годы Бернштейн, Горелик и Жукова объяснили нелинейностью ферромагнетика найденное ими явление «поперечной индукции» (1944). Возникающие при этом э. д. с. разлагались в спектр, который Горелик называет магнитным спектром преобразования².

4. Перейдём теперь к более подробному рассмотрению магнитных спектров.

Отсутствие влияния ферромагнитных свойств на оптические спектры веществ впервые было установлено в 80-х годах прошлого столетия Зисингом, а позже Друде. Исследуя отражение света от металлических поверхностей, можно найти, что явления протекают так, как если бы магнитная проницаемость стали и никеля была равна единице. Позже Рубенс продвинул эти исследования в инфракрасную область, производя измерения отражательной способности металлов для волн 4, 8 и 12 микронов. Она зависит от их удельной электропроводности и от их магнит-

ной проницаемости. Так как первая в волнах с длиной волны 12 μ и более не зависит от длины волны, то поглощение при отражении может дать меру магнитной проницаемости. В области более длинных волн коэффициент отражения настолько мало отличается от единицы, что измерения поглощательной способности металлов Рубенсу пришлось заменить измерением их испускательной способности, которая, по законам излучения, должна быть пропорциональна поглощательной. Таким образом, он заменил исследование пассивных электромагнитных спектров исследованием активных спектров. Его измерения испускательной способности всех металлов, в том числе и ферромагнитных, дали такие значения испускательной способности, которая для волн до 25,5 микрона требует принятия магнитной проницаемости, равной единице. Согласно нашей терминологии это пока единственный до сих пор полученный настоящий магнитный активный спектр.

Исследование излучения магнитных антенн *) в области сантиметровых волн может служить методом исследования магнитных свойств их материала. С некоторой натяжкой, а может быть и без натяжки, этот метод может быть рассматриваем как исследование магнитного спектра испускания, т. е. активного магнитного спектра.

5. Весьма многочисленные и разнообразные исследования магнитных свойств вещества были произведены путём наблюдения их пассивных спектров. Мы видели, что в далёкой инфракрасной области проницаемость ферромагнитных металлов равна единице. Однако в 90-х годах прошлого века было твёрдо установлено, что в метровых волнах проницаемость железа и никеля имеет большие значения.

Постепенное возрастание её от инфракрасных в сторону более длинных волн впервые (1908—1912 гг.) было мной обнаружено в сантиметровых волнах путём изучения пассивных спектров железа и никеля в диапазоне волн от 1,3 *см* до 73 *см*. В этой области тогда был найден магнитный резонанс, т. е. резко выраженные дисперсия и поглощение мощности волн длиной в 2—6 *см*, в зависимости от материала и его обработки. Наличие резонанса позже подтвердили исследования Биркса (1947 г.), а значительное снижение проницаемости в дециметровых волнах было подтверждено работами Хоага и Джона (1932 г.), Зенгера и Потапенко (1933 г.) и Линдмана (1938 г.). Падение проницаемости до 1 при длине волны 1,3 *см* наблюдал Э. Максвелл (1946 г.).

*) Магнитной антенной обычно называют впервые нами применённый в 1930 г. стержень из магнитодиэлектрика, намагничиваемый дециметровыми волнами².

Это — нормальные магнитные пассивные спектры, характеризующие вещество (железо, никель) в его естественном состоянии.

На опытах с магнитной антенной, размагничивавшейся в фокусе параболического зеркала, в 1930 г. была показана³ возможность преодоления гистерезиса волнами в 60 см длиной. Размагничивание в волнах до 23 см производила М. М. Чст-верикова.

Исследование пассивных магнитных спектров мягкого железа и пермаллоя в области сверхзвуковых и звуковых частот вплоть до инфранизких обнаруживает здесь спектры магнитной вязкости, предсказанные нами в 1928 г.⁴ Они были обнаружены О. И. Велецкой в 1935 г. и позже изучены В. М. Гойтанниковым, А. И. Пильщиковым и С. С. Лаврентьевым (1940—1945 гг.)⁵. Наша теория магнитных спектров вязкости подтвердилась также в исследованиях ферритов при радиочастотах.

6. Магнитные спектры, возникающие в веществе при воздействии на него внешним сильным магнитным полем,⁶ мы относим к магнитным спектрам преобразования. В 1936 г. такие магнитные спектры в парамагнетиках наблюдал Гортер. Спектры эти чаще всего получают путём изменения напряжённости внешнего поля при постоянной частоте высокочастотного поля, а также путём изменения частоты последнего (от 0,15 до 5 Мгц) при неизменном постоянном поле. Это были спектры вязкости, подчиняющиеся законам наших магнитных спектров вязкости ферромагнетиков, полученным в 1928 г.⁴ Резонанс парамагнетиков впервые наблюдал Е. К. Завойский (1947 г.), использовавший переменное поле сантиметровых волн (16 см).

Пики резонанса в ферромагнетиках в аналогичных условиях наблюдал Гриффитс в 1946 г., которому в англо-американской литературе настойчиво приписывают приоритет в открытии магнитного резонанса ферромагнетиков^{*)}. Налагая поля от 500 до 5000 гаусс, он измерял μr — произведение проницаемости на удельное сопротивление. Его кривые, построенные в произвольных единицах, обнаруживают пики μr при длинах волн в 1,22 и 3,18 см (кобальт, железо, никель).

^{*)} Между тем, статьи по магнитному резонансу ферромагнетиков под заглавием «Колебания и резонанс элементарных магнитов» и «Резонанс магнетонов» были нами опубликованы на русском и иностранных языках в Докл. Ак. Наук СССР (1927 г.) в «Comptes Rendus» (1926) и в сборнике «Современные проблемы электромагнетизма» (М., 1931), не считая ряда наших статей по теории поля в ферромагнетиках, публиковавшихся с 1913 года. Отсюда можно видеть, что теоретическим и экспериментальным изучением магнитного резонанса элементарных носителей магнетизма наша отечественная наука занималась задолго до сроков, указываемых в англо-американской литературе.

Впервые наблюдал действие внешнего поля на нормальные магнитные спектры вязкости ферромагнетика И. М. Кирко в Риге (1950 г.). Налагая на стальные стержни поля от единиц до 156 эрстед, он нашёл, что полосы дисперсии и поглощения закономерно смещаются в область более высоких частот, причём было установлено, что законы вязких спектров, впервые проверенные на ферромагнетиках Велецкой, сохраняют свою силу: высота полосы поглощения равна половине спада проницаемости и лежит на частоте середины спада.

И. М. Кирко и его сотрудники—В. А. Янушковский, Б. О. Гроскауфман и Я. Я. Даубе производили эти измерения на частотах от 50 до 20 000 герц⁶.

К этому разделу мы относим и метод ядерной индукции Блоха (1946), использованный в 1947 г. К. В. Владимирским⁷ и усовершенствованный в Москве С. Д. Гвоздовером⁸ с сотрудниками. Он состоит в том, что на диэлектрик накладывают сильное магнитное поле, которое заставляет прецессировать магнитные оси ядер атомов. Накладывая перпендикулярное переменное поле той же частоты, с какой происходит прецессия, последнюю усиливают и, следовательно, изменяют магнитный поток. Его изменение констатируют в катушке приёмника.

Таким образом, можно определить связь между наложенным постоянным полем и частотой прецессии, откуда вычисляют магнитные характеристики ядра атома.

7. В области спектроскопии молекулярных пучков старое явление—отклонение катодных лучей в электрическом и магнитном полях, позволило впервые изучить электрон и определить отношение его заряда к его массе (1897). На этом приёме основан масс-спектрограф (1919). В этом же разделе мы находим эффект Вавилова-Черенкова (1934)—появление световых волн в результате движения в среде электрона со скоростью, большей чем скорость света в ней. В разделе пассивных спектров молекулярных пучков мы поместили дифракцию электронов и основанную на ней электронографию.

В 1921 г. впервые был сделан опыт измерения отклонения атомов серебра, летящих в сильном неоднородном постоянном магнитном поле, который позволил определить магнитный момент атомов и наблюдать пространственное расположение магнитной оси атома по полю и против поля.

В 1937 г. Раби с сотрудниками воздействовал на молекулы, летящие в магнитном поле, переменным радиочастотным магнитным полем, период которого совпадал с периодом прецессии магнитного момента ядра данного изотопа. В таком случае проекция момента ядра изменялась и пучок приходил в другое место на спектре пучка. Это позволило измерить магнитные моменты ядер большого числа атомов.

Здесь дан только примерный набросок систематизации общей спектроскопии пучков. Существующий богатый материал должен быть классифицирован по более глубоким признакам и шире охвачен. Тут он представлен лишь настолько, чтобы можно было показать связь между методами радиоспектроскопии, лежащими в совершенно различных областях исследования (схема, коленчатая стрелка).

8. Основные теоретические представления в области магнитной спектроскопии были даны в нашей работе 1913 года⁹, где впервые была развита теория электромагнитного поля в ферромагнитном металле. Вытекающая из этой теории комплексная магнитная проницаемость немедленно стала неотъемлемым атрибутом всех работ в этой области, так же как и оба вида кажущейся проницаемости μ_k и μ_n или μ_R и μ_L , тогда же нами введенные. Все представления о распространении волн в поликристаллическом веществе, тогда высказанные, получили развитие в последующих работах, в наших и зарубежных.

Тогда, в частности, была высказана гипотеза, что должна возникнуть дисперсия электромагнитных волн в металле, если длина их в металле соизмерима с размерами его кристаллитов, теперь доменов, а следовательно, и других неоднородностей структуры в виде борозд и трещин. В 1930 г. Е. И. Кондорский подтвердил это предположение, показав значительное влияние продольного разреза в ферромагнитном проводнике на его сопротивление переменному току. В 1931 году эта гипотеза нами вновь была выдвинута и было высказано предположение, что микроскопические канавки и царапины на поверхности металла могут быть причиной магнитной дисперсии волн, соизмеримых с глубиной и шириной этих канавок. И. М. Кирко в своих работах, выполненных в Риге, произвёл проверку этой идеи¹⁰ на моделях ферромагнитного тела с такими канавками: он измерял в переменном поле проницаемость стержней, одна половина которых была покрыта винтовой нарезкой. Измерения показали, что действительно нарезанная половина стержня обнаруживает магнитную дисперсию, если глубина канавок сравнима с длиной волны в металле. В этом случае получается падение магнитной проницаемости и максимум магнитного поглощения, как в среде с магнитной вязкостью.

Чтобы объяснить описанные выше магнитные спектры преобразования при намагничивании материала с магнитной вязкостью, Кирко⁶ развил теорию, в основе которой лежит гипотеза об образовании вихревых токов не только в доменах, как предположил ещё в 1918 г. Аркадьев, но также в отдельных кристаллических зёрнах, размеры которых могут быть значительно больше доменных. Вследствие этого явления магнитной вязкости могут наблюдаться при значительно более низких частотах, чем это вычисляли в 1935 г. Аркадьев, в 1938 г. — Бекер, в 1941 г. — К. М. Поливанов и в 1946 г. — Киттель.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Аркадьев, Магнитная спектроскопия, Изд. НТО ВСНХ, Москва (1924).
 2. Г. С. Горелик, Изв. АН СССР, сер. физ. **14**, 174 (1950).
 3. В. К. Аркадьев, Электромагнитные процессы в металлах, ч. II, М.—Л., стр. 246 (1936); Вестн. МГУ **12**, 95 (1947).
 4. В. К. Аркадьев, Современные проблемы электромагнетизма, М.—Л., стр. 55 (1931).
 5. В. К. Аркадьев, ЖТФ **13**, 324 (1943); Journ. of Phys., **9**, 5, 375 (1945).
 6. И. М. Кирко, Труды Инст. физики и математики АН Латвийской ССР, II в. **3**, 9, Рига (1950).
 7. К. В. Владимирский, ДАН **58**, 1625 (1947).
 8. С. Д. Гвоздовер и А. А. Магазаник, ЖЭТФ **20**, 705 (1950).
 9. В. К. Аркадьев, ЖРФХО, ч. физ. **45**, 312 (1913); Phys. Zeits., **14**, 928 (1913).
 10. И. М. Кирко, ДАН **59**, 227 (1948).
 11. Я. Г. Дорфман, Магнитные свойства атомного ядра, Гостехиздат (1948).
-