

К восьмидесятилетию антиферромагнетизма

Четко определить дату открытия антиферромагнетизма как физического свойства вещества невозможно. Так сложилось, что экспериментально обнаруженные неожиданные для ферромагнетиков магнитные свойства некоторых кристаллов диэлектриков, металлов и сплавов послужили питательной средой, хотя и далеко не самой благоприятной, для формирования идей о возможности существования новой, антиферромагнитной структуры в твердом теле. Свойства слоистых безводных кристаллов FeCl_2 , CrCl_3 , NiCl_2 , CoCl_2 (H. Kamerlingh Onnes and E. Oosterhuis, *Comm. Leiden* No. 129b (1912); H.R. Woltjer, *Leiden Comm.* No. 173b (1926); H.R. Woltjer and Kammerlingh Onnes, *Leiden Comm.* No. 173b,c (1926); H.R. Woltjer and E.C. Wiersma, *Leiden Comm.* No. 201a (1929)), чистых металлов Cr, Mn и сплавов Mn–Ag, Mn–Cu, Cr–Au, Co–Fe, Fe–Mn, Fe–Cr, Pt–Co (L. Néel, *J. Phys. Radium* **3**, 160 (1932) и др.) в парамагнитной области были близки к свойствам ферромагнетиков, но при охлаждении обычный ферромагнетизм в них не возникал.

Введение ближнего (локального) и дальнего молекулярных полей, противоположно действующих на магнитный ион (L. Néel, *Ann. Phys. (Paris)* **17**, 61 (1932)), построение модели слоистых хлоридов, включающей два вида обменного взаимодействия: положительного (ферромагнитного) между магнитными ионами в слое и отрицательного между ионами из разных слоев, разработка феноменологической теории поведения этой модели в магнитном поле позволило объяснить наблюдаемые свойства и привело к представлению о пространственно разнесенных (L. Landau, *Phys. Z. Sowjet.* **4**, 675 (1933)) и проникающих друг в друга (L. Néel, *Ann. Phys. (Paris)* **5**, 232 (1936)) магнитных подрешетках, а также пониманию неизбежности существования нового вида магнитного упорядочения в твердых телах с противоположно направленными магнитными моментами ионов и нулевым суммарным моментом в упорядоченном состоянии. Фазовый переход

в это магнитное состояние (долго называемое «аномальным ферромагнетиком») был подтвержден наблюдениями характерного пика на температурных зависимостях теплоемкости (O.N. Trapeznikowa and L.W. Shubnikov, *Nature* **134**, 378 (1934)) и магнитной восприимчивости (O.N. Trapeznikowa, L.W. Shubnikov, and S.S. Schalyt, *Phys. Z. Sowjet.* **11**, 566 (1937)). Становление понятия об этом новом магнитном состоянии вещества растянулось на несколько лет.

Годом утверждения представлений о нем можно считать год выхода публикации, где сообщалось о кооперативном характере образования «аномального ферромагнитного» состояния, не имеющего спонтанного магнитного момента, который сопровождался пиком на температурной зависимости теплоемкости. Если исходить из этой даты (конечно, несколько условной, как и большинство дат рождения новых научных представлений в физике), то в 2014 году антиферромагнетизму исполняется 80 лет. Имя «антиферромагнетик», вместо употреблявшихся названий «аномальный ферромагнетик», или «парамагнетик, особенно сильно чувствующий магнитное поле», новое состояние получило несколько позже. Насколько нам известно, первая статья, в которой используется термин «антиферромагнетизм», была опубликована в 1937 году (J.H. Van Vleck, *Phys. Rev.* **52**, 79 (1937)). Луи Неель в своей Нобелевской лекции говорил, что это имя предложил Фрэнсис Биттер.

Темпы последующих исследований антиферромагнетиков продемонстрированы на рис. 1, где представлены результаты библиографического поиска ссылок на опубликованные статьи в научных журналах, в которых упоминаются термины, связанные с антиферромагнетиками. Хотя эти данные, конечно же, отличаются от истинных, но вполне вероятно, что они отражают закономерности эволюции исследований. В специальном выпуске нашего журнала, посвященном семидесятилетию антиферромагнетизма (*ФНТ* **31**, 839 (2005)), была приведена подобная зависимость. Оба набора

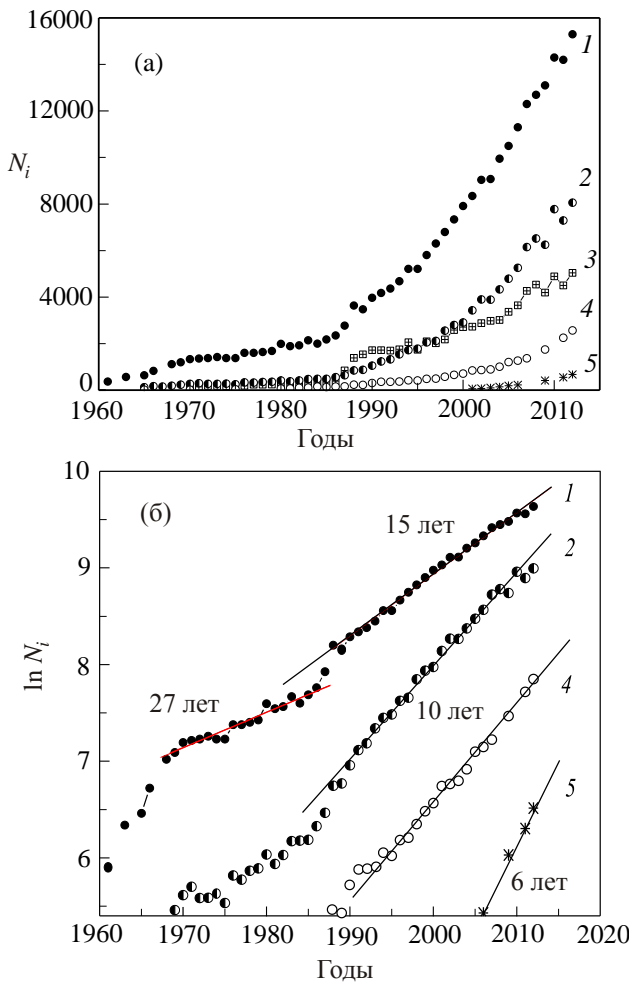


Рис. 1. Результаты поиска числа вышедших за год статей N_i , в которых упоминается хотя бы один из терминов: «antiferromagnetic», «antiferromagnetism» или «metamagnetic» (1); при выполнении первого условия присутствует еще один из терминов: «nanosize», «dot», «wire», «multilayer», «qubit» (2), «superconductivity» (3), «topological» (4), и «spin current» или «spin transfer» (5). Поиск проводился с помощью поисковой системы Google Scholar. Указаны (б) интервалы времени (T), за которые числа публикаций увеличивались в e раз.

данных дают хорошо выраженные экспоненты, но показывают несколько отличающиеся темпы роста (обратный показатель экспоненты за период с 1950 по 2004 г. был немного большим 11 лет, а новый набор за 1960–2012 г. дает 15 лет). Экспоненциальный рост числа работ стал более отчетливым, и хорошо видны изменения показателя экспоненты после 1987 года — года обнаружения высокотемпературной сверхпроводимости. За все последующие годы заметных отклонений от экспоненты не видно. На протяжении более 25 лет увеличение числа работ в e раз происходит за 16 лет. На основании зависимостей увеличения темпов роста публикаций по отдельным темам можно сделать

вывод, что существует несколько наиболее «горячих» направлений, которые и определяют общую эволюцию. Среди них высокотемпературная сверхпроводимость, где выяснение роли антиферромагнитных спиновых корреляций в возникновении сверхпроводимости продолжает оставаться актуальной задачей.

Активно исследуются антиферромагнетики субмикронных размеров, искусственные антиферромагнитные наноструктуры, естественные и искусственные магнитоэлектрики. Они привлекают к себе внимание как потенциально перспективные материалы для спинтроники, с помощью которых возможно повышение чувствительности сенсоров, увеличение на порядки частоты обработки информации. Однако на этом пути имеется множество еще нерешенных как технологических и экспериментальных, так и теоретических задач. Среди них вопросы о статических и динамических магнитных свойствах негладкой в атомном масштабе поверхности антиферромагнетиков, двумерных субатомных антиферромагнитных слоев с доменными стенками или с дефектами структуры, естественных и искусственных антиферромагнетиков, размеры которых сопоставимы с длиной переноса спинового состояния.

Не ослабевает интерес к антиферромагнитным магнитоэлектрикам, имеющим спиральные и другие модулированные магнитные структуры в объеме, на поверхности, в доменных стенках, в окрестности дефектов, в интерфейсах искусственных структур, где взаимосвязь электрической поляризации с параметрами пространственно неоднородной спиновой структуры проявляется особенно ярко. Магнитоэлектрические свойства антиферромагнетиков очень важны для становления той спинтроники, в которой отсутствуют обычные электрические токи, что актуально для решения проблемы уменьшения выделения тепла в устройствах записи и обработки информации. Темп роста исследований спиновых токов наибольший, хотя число исследований еще невелико.

Обращает на себя внимание также ускорение преимущественно теоретических исследований двумерных антиферромагнитных систем, транспортные свойства которых определяются топологией их электронных энергетических поверхностей в пространстве импульсов. Среди них ведутся поиски новых (топологических) степеней свободы для электронов (кроме заряда и спина), успешным развитием которых может стать создание новых электронных технологий для обработки информации.

Мы надеемся, что работы, опубликованные в двух частях этого специального выпуска, дадут представление о теоретических и экспериментальных проблемах, существующих сегодня в области антиферромагнетизма.

Н.Ф. Харченко