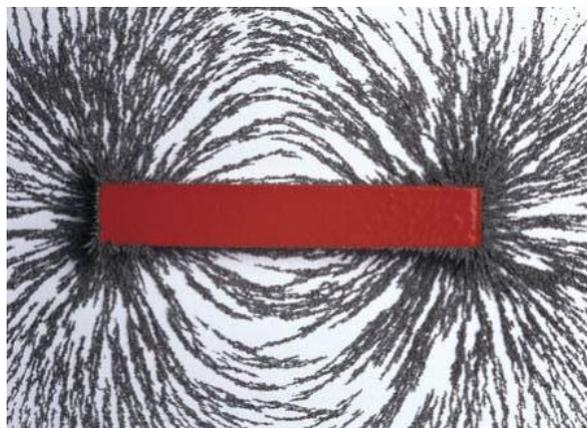




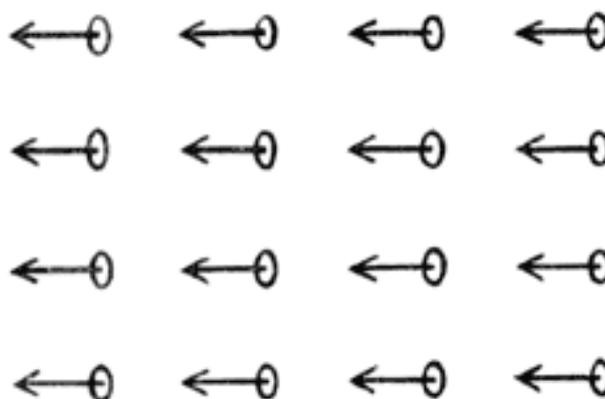
## Ферромагнетизм – универсальное свойство неорганических наночастиц

В.Н. Витер



Как известно, магнитные свойства железа, кобальта, некоторых сплавов и оксидов обусловлены упорядоченной ориентацией магнитных моментов отдельных атомов в узлах кристаллической решетки. Такие материалы называются ферромагнитными. Под действием внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных атомов ориентируются параллельно друг другу - вдоль направления этого поля. Из этого следует два важных вывода.

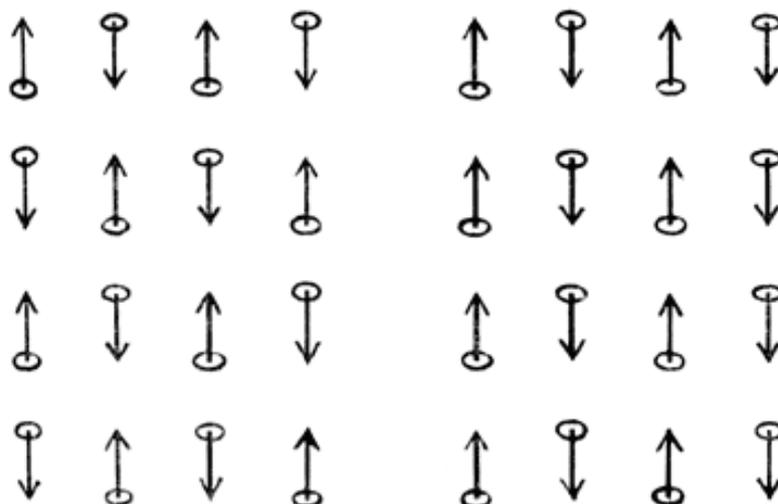
Во-первых, магнитные моменты отдельных атомов усиливают внешнее поле, а поскольку они направлены параллельно, то такое усиление довольно существенно. Во-вторых, ферромагнитный материал может сохранять свою упорядоченность и после снятия внешнего поля. Другими словами он становится постоянным магнитом.



**Ферромагнитное упорядочение.** Параллельные стрелки символизируют магнитные моменты атомов, выстроенные вдоль определенного направления



Далеко не все вещества обладают такими свойствами. Магнитные моменты атомов парамагнитных материалов также ориентируются в направлении внешнего поля. Но такая ориентация является неупорядоченной и лишь частичной. В результате магнитное поле только слегка усиливается, и ни о каком остаточном магнетизме не может быть и речи. Атомы диамагнитных материалов ориентируют свои магнитные моменты в направлении против поля. В результате такие вещества ослабляют внешнее поле. Диамагнитные материалы не притягиваются, а наоборот выталкиваются магнитным полем. Существуют еще и антиферромагнитные вещества – магнитные моменты их атомов также ориентированы упорядоченным образом. Но в отличие от ферромагнетиков они попарно направлены во взаимно противоположные стороны и гасят друг друга. Возникает как бы две ферромагнитные решетки с равным по знаку, но противоположным по направлению магнитным моментом.



Антиферромагнитная структура

До недавнего времени ферромагнитные свойства были известны для сравнительно небольшого числа материалов. Это, прежде всего, элементы триады железа, гадолиний, ферриты и некоторые сплавы. Большинство же материалов обладает пара- или диамагнитными свойствами.

Уже значительное время не ослабевает интерес к магнитным свойствам веществ в нанодисперсном состоянии. Это обусловлено применением таких частиц в магнитных жидкостях, магнитных записывающих устройствах, а также в области медицины. Ученые заметили, что свойства наночастиц магнитных материалов существенно отличаются от свойств макрочастиц. Например, антиферромагнитные частицы приобретали небольшой магнитный момент. Это объясняется тем, что магнетизм



атомов на поверхности частиц уже не полностью компенсируется другими атомами. Вспомните, что для наночастиц доля атомов, которые находятся на поверхности, значительно возрастает.

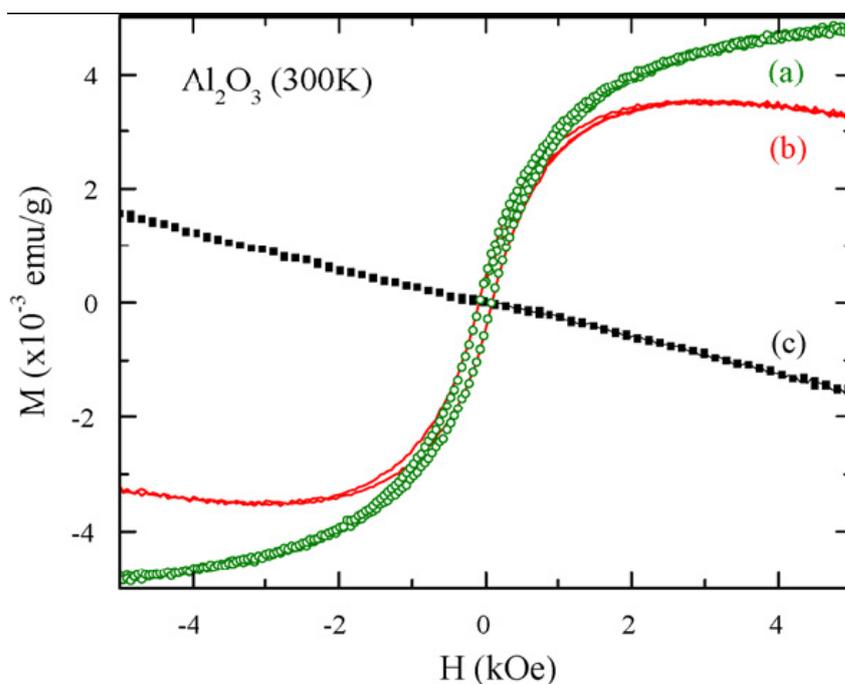
Частицы некоторых материалов (CoO, NiO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) с размерами порядка нескольких нанометров показали очень высокие значения магнитных моментов. Это явление было названо суперпарамагнетизм.

Индийские ученые A. Sundaresan, C.N.R. Rao сообщили об открытии ферромагнитных свойств у наночастиц большой группы соединений самой разнообразной природы. К этой группе принадлежат немагнитные оксиды - CeO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgO, халькогениды - CdS и CdSe, нитриды – GaN, классический сегнетоэлектрик BaTiO<sub>3</sub> и даже сверхпроводящий купрат бария-иттрия YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>.

Во всех случаях магнитные свойства наночастиц обусловлены их поверхностью.

Авторы открытия считают, что ферромагнетизм проявляется за счет поверхностных дефектов и это является универсальным свойством неорганических соединений.

В качестве примера на рисунке приведены кривые намагничивания нано- и макрочастиц оксида



Кривые намагничивания наночастиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, снятые при комнатной температуре: (a) с поправкой (b) без поправки на объемный диамагнетизм. Обратите внимание, что большие частицы проявляют диамагнитные свойства.

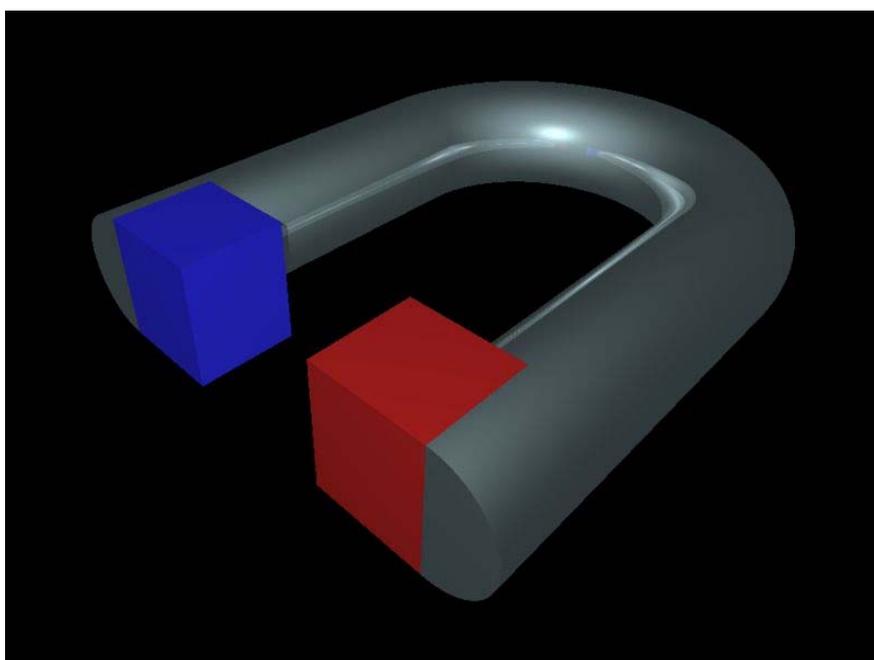
алюминия при комнатной температуре. По оси абсцисс отложена величина внешнего поля, по оси ординат – намагничивание образцов. Кривые намагничивания наночастиц являются типичным для ферромагнетиков. На них четко проявляется явление гистерезиса. Другими словами, кривые намагниченности при увеличении и последующем уменьшении поля не совпадают друг с другом, образуя характерную «петлю». В то же время, обычный Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> гистерезиса не проявляет: он является



типичным диамагнитным материалом.

Случай с  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  заслуживает особого рассмотрения. Как известно, сверхпроводники являются «абсолютными диамагнетиками» т.е. их диамагнитные свойства настолько сильны, что эти материалы полностью «выталкивают» из своего объема силовые линии магнитного поля. Если же предложить достаточно сильное внешнее поле, то его силовые линии смогут «прорваться» в массу образца, но при этом его сверхпроводящее состояние исчезнет. Однако недавно было показано, что точечные дефекты на поверхности, которые обуславливают магнетизм, не являются несовместимыми со сверхпроводимостью в массе образца.

Весьма перспективным с практической точки зрения является возможность объединить сегнетоэлектрические свойства титаната бария  $\text{BaTiO}_3$  с ферромагнитными.



Источник: A. Sundaresan, C.N.R. Rao. Ferromagnetism as a universal feature of inorganic nanoparticles. *Nano Today* (2009) 4, 96—106

Рис. 1 и 2 взяты на сайтах freewebs.com, illustrator.photomotion.ru, Рис. 3, 4 - из статьи Э. Нараев. Намагничивает свет. Наука и жизнь, Рис. 4 – из цитированной статьи, Рис. 5. – Wikipedia.