

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДАЛЬНЕГО МАГНИТНОГО ПОРЯДКА В СИСТЕМЕ МАЛЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ

Г.А.Такзей, Л.П.Гунько, И.И.Сыч, Ю.Н.Троценков, С.В.Черепов, И.Миребо*¹⁾

*Институт магнетизма Национальной Академии наук Украины
252680 Киев-142, Украина*

**Laboratoire Leon Brillouin, C.E.de Saclay
91191 Gif-sur-Ivette Cedex, France*

Поступила в редакцию 24 мая 1996 г.

При помощи рентгеновских, магнитных методов и метода малоуглового рассеяния нейтрона на примере распадающегося сплава $\text{Cu}_{64}\text{Mn}_9\text{Al}_{27}$ показано, что возникновение дальнего ферромагнитного порядка в системе мелких суперпарамагнитных частиц, растворенных в немагнитной матрице, обусловлено кооперативным упорядочением их магнитных моментов.

PACS: 75.50.Tt, 75.90.+w

В модели локализованных магнитных моментов возникновение магнитоупорядоченного, в частности ферромагнитного (ФМ), состояния в металлах и сплавах 3d-переходных металлов обычно связывают со спиновым упорядочением нескомпенсированных атомных магнитных моментов, величины которых не превышают нескольких магнетонов Бора μ_B [1]. Представляет интерес выяснить, возможно ли возникновение дальнего ФМ порядка в системах магнитных моментов, имеющих величины от нескольких сотен до нескольких тысяч μ_B . Используя качественные соображения и результаты магнитных исследований, авторы [2] указали, что такой тип магнитного упорядочения, по-видимому, возможен в плотных системах малых ФМ частиц с магнитными моментами $\mu \approx (10^3 - 10^4)\mu_B$.

В настоящей работе на примере распадающегося сплава $\text{Cu}_{64}\text{Mn}_9\text{Al}_{27}$ этот вопрос решен на основании результатов исследования критического рассеяния нейтронов в сочетании с результатами структурных и магнитных исследований.

Прежде всего рассмотрим магнитные и структурные характеристики сплава $\text{Cu}_{64}\text{Mn}_9\text{Al}_{27}$ после различных режимов термообработки. Согласно результатам рентгеноструктурных исследований, закаленный сплав $\text{Cu}_{64}\text{Mn}_9\text{Al}_{27}$ представляет собой однородный твердый раствор со структурой типа Cu_3Al . При этом атомы Mn хаотически растворены в матрице сплава. Следовательно, можно ожидать, что при низких температурах из-за наличия косвенного РККИ-обмена в сплаве будет возникать состояние спинового стекла (СС), как это имеет место в классической спин-стекольной системе CuMn . Из рис.1а, на котором приведена температурная зависимость вещественной составляющей χ' динамической магнитной восприимчивости сплава в закаленном состоянии, видно, что, действительно, при температуре $T_0 = 402\text{ K}$ он переходит из парамагнитного (ПМ) состояния в состояние СС. Однако в результате отжига при температуре $T = 373\text{ K}$ в течение 5 час происходит распад сплава. При этом его структурные и магнитные характеристики существенно изменяются. Далее речь будет идти именно о таком состоянии.

¹⁾I.Mirebeau

	μ (μ_B)	d (Å)	D (Å)	$n(10^{18} \text{ см}^{-3})$	Объемная доля
Рентгеновские данные	1100 ± 320	30 ± 3	47 ± 3	8.84	1.136
Магнитные данные	1140 ± 150	32 ± 2	51	7.34	0.126

Проведенные в настоящей работе исследования диффузного рассеяния рентгеновских лучей вблизи брэгговских рефлексов (110) и (200) показывают, что в процессе распада в сплаве выделяется система равноосных частиц, когерентных решетке матрицы, со средним размером $d \approx 30 \text{ \AA}$ и средним расстоянием между их центрами $D \approx 50 \text{ \AA}$ (см. таблицу). Полагая, что в процессе распада образуются частицы стехиометрического состава Cu_2MnAl (сплав Гейслера), зная параметр решетки $a = 5.971 \text{ \AA}$, число атомов Mn на элементарную ячейку $N = 4$ магнитный момент атома Mn $\mu = 4\mu_B$ [3] во вновь образованной фазе, нетрудно найти магнитный момент выделившихся частиц. Отметим, что характер диффузного рассеяния указывает на то, что коллектив выделившихся частиц образует квазирегулярную сверхструктуру, в которой отсутствует дальний, но присутствует ближний порядок в расположении частиц [4]. Исследования статической намагниченности при комнатной температуре в магнитных полях до 20 кЭ показывают, что сплав является типичным суперпарамагнетиком (СПМ). Используя известные соотношения теории СПМ [1] и полагая, что при комнатной температуре спонтанная намагниченность частиц равна таковой $M_s = 500 \text{ Гс}$ для массивного сплава Cu_2MnAl [3], легко оценить их средний магнитный момент, размер, концентрацию и другие параметры. Сравнение полученных рентгеновским и магнитным методами результатов показывает их очень хорошее согласие (см. таблицу).

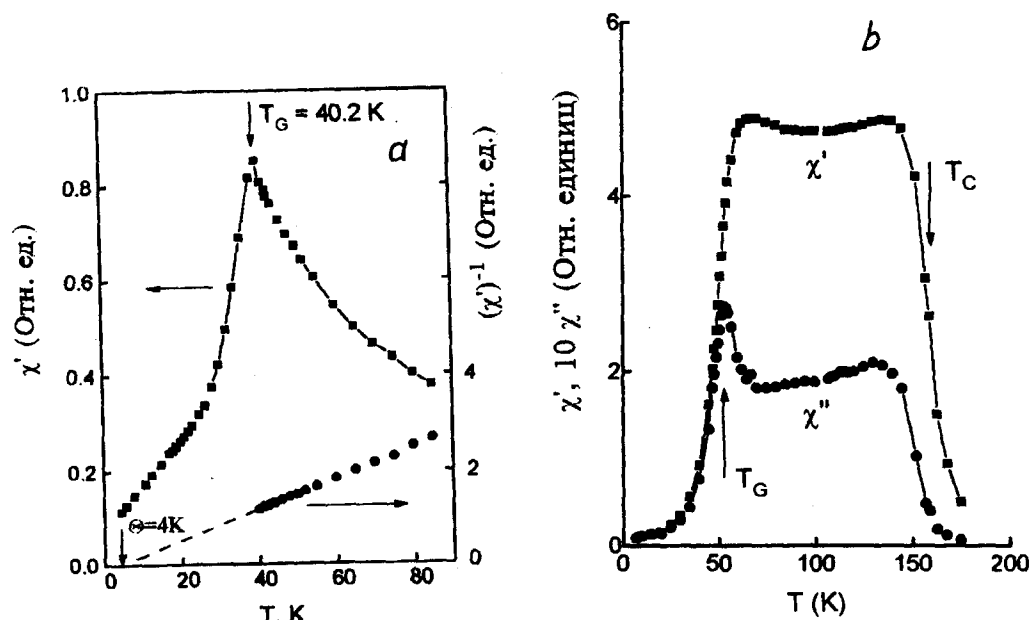


Рис.1 Температурные зависимости вещественной χ' и мнимой χ'' составляющих динамической магнитной восприимчивости сплава $\text{Cu}_{64}\text{Mn}_9\text{Al}_{27}$ после различных режимов термообработки: а - закалка от температуры 1020 К в воду, б - отжиг при температуре 373 К в течение 5 час

На рис.1.б приведены температурные зависимости вещественной χ' и мнимой χ'' составляющих динамической магнитной восприимчивости распавшегося сплава $\text{Cu}_{64}\text{Mn}_9\text{Al}_{27}$. Из приведенных данных видно, что сплав испытывает

двойной температурный переход ПМ-ФМ-СС. В настоящей работе мы, однако, не будем сколько-нибудь подробно рассматривать возвратный переход ФМ-СС при температуре $T_G = 52$ К. Как упоминалось выше, наша главная цель состоит в выяснении природы возникновения дальнего ФМ порядка при температуре Кюри $T_C = 160$ К.

Поскольку в изучаемом сплаве ФМ упорядочение возникает только в распавшемся состоянии, естественно предположить, что элементарными носителями магнетизма в этом случае являются не отдельные магнитные моменты атомов Mn, а СПМ при температурах $T > T_C$ частицы с эффективным магнитным моментом $\mu \approx 10^3 \mu_B$. Очевидно, в последнем случае при ФМ упорядочении магнитных моментов ансамбля таких частиц для радиуса R_C ФМ критических флуктуаций вблизи T_C должно выполняться условие $R_C \geq \xi \approx D - d$, где ξ - расстояние между поверхностями частиц вдоль линии, соединяющей их центры. Иными словами, на температурных зависимостях малоуглового рассеяния нейтронов в районе температуры $T_C = 160 < T_C^*$, где $T_C^* \approx 600$ К - локальная температура Кюри СПМ частиц, должны наблюдаться пики критического рассеяния лишь для значений волновых векторов нейтронов $q \leq R_C^{-1} = \xi^{-1} \approx 0.05 \text{ \AA}^{-1}$. Отметим, что в обычных [5] и фрустрированных ФМ [6] пик критического рассеяния нейтронов при T_C наблюдается для $q \geq a^{-1} \approx (0.3 \div 0.2) \text{ \AA}^{-1}$, где a - ближайшее расстояние между магнитными атомами.

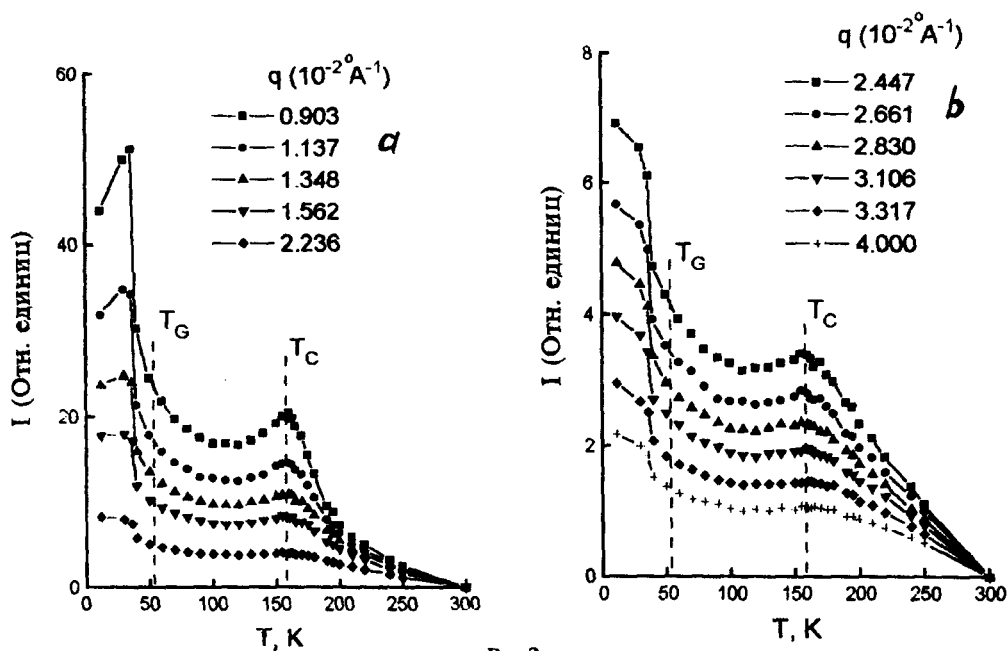


Рис.2

Экспериментальные данные, представленные на рис.2, полностью подтверждают приведенные выше соображения. Действительно, при значениях волнового вектора нейтронов $q \leq 0.05 \text{ \AA}^{-1}$ при температуре $T_C = 160$ К четко фиксируется пик критического рассеяния нейтронов. В то же время для $q > 0.05 \text{ \AA}^{-1}$ заметные аномалии на температурных зависимостях интенсивности рассеянных нейтронов отсутствуют.

Таким образом, на примере сплава $\text{Cu}_{64}\text{Mn}_9\text{Al}_{27}$ в настоящей работе показано, что в системах малых СПМ частиц, возникающих в результате изо-

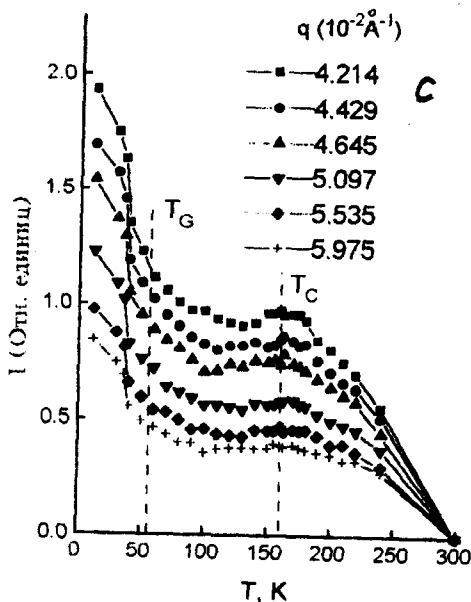


Рис.2. Температурные зависимости интенсивности I малоуглового рассеяния нейтронов для отожженного сплава $\text{Cu}_{64}\text{Mn}_9\text{Al}_{27}$; q – волновой вектор рассеянных нейтронов

морфного распада сплавов, возможно возникновение дальнего ФМ порядка. Относительно взаимодействий, приводящих к такого типа упорядочению, следует отметить следующее. Оценки показывают, что при найденных параметрах системы выделившихся частиц (см. таблицу) дипольное межчастичное взаимодействие дает заниженное значение $T_C \sim (6 \div 100)$ К температуры Кюри по сравнению с экспериментально найденным. По-видимому, из-за квазирегулярного расположения выделений в матрице сплава основную роль в формировании ФМ в рассматриваемом случае играет косвенный РККИ-обмен между частицами, как это происходит в многослойных магнитных структурах типа $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Co}$ или $\text{Fe}/\text{Ag}/\text{Fe}$ [7]. В последнем случае чередующиеся магнитные и немагнитные слои имеют приблизительно те же толщины, что и найденные в настоящей работе d и ξ .

В заключение отметим, что в результате распада исследованного выше сплава лишь 35% атомов Mn принимает участие в формировании стехиометрической ФМ фазы Cu_2MnAl , остальные же остаются растворенными в немагнитной матрице. Как подчеркивается в [8], такие "потерянные спины" также могут играть существенную роль в формировании дальнего магнитного порядка в гетерогенных магнитных системах.

Авторы благодарят В.В.Кокорина и К.В.Чуистова за полезные обсуждения, Н.Г.Такзея за помощь в обработке экспериментальных результатов.

1. С.В.Вонсовский, *Магнетизм*, М.: Наука, 1971.
2. В.В.Кокорин, И.А.Осипенко, *Письма в ЖЭТФ* **29**, 665 (1979); V.V.Kokorin and I.A.Osipenko, *Phys. Stat. Sol.* **74A**, K147 (1982).
3. Б.Бозорт, *Ферромагнетизм*, М.: ИИЛ, 1956.
4. В.В.Кокорин, И.И.Лясковский, Ю.Д.Тяпкин, К.В.Чуистов, *ФММ* **43**, 629 (1977).
5. Ю.А.Изюмов, Р.П.Озеров, *Магнитная нейтронография*, М.: Наука, 1966.
6. I.Mirebeau, M.Hennion, S.Mituda, and Y.Endoh, in: *Recent Progress in Random Magnets*, Ed. D.H.Riyan, World Sci. Publ. Co., Singapore, 1992, p.41.
7. В.Heinrich and J.F.Cochran, *Adv. Phys.* **42**, 523 (1993).
8. J.C.Slonczewski, *J. Appl. Phys.* **73**, 5957 (1993).