



Алтынбаев Евгений Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ КУБИЧЕСКИХ
НЕЦЕНТРОСИММЕТРИЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ МОНОГЕРМАНИДОВ
ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ**

**Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

**Научный руководитель:
Д.ф.-м.н., профессор
Григорьев Сергей Валентинович**

**Официальные оппоненты:
Д.ф.-м.н., профессор,
Демишев Сергей Васильевич
Д.ф.-м.н.,**

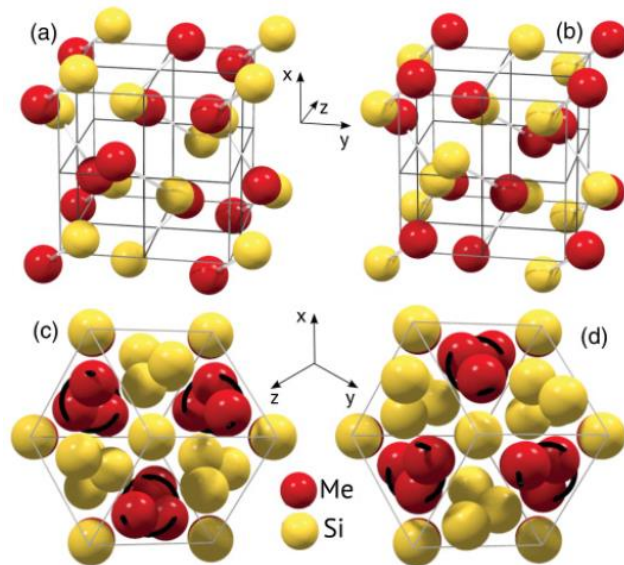
Дмитриенко Владимир Евгеньевич

Ведущая организация:

Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна



Нецентросимметричная структура типа $B20$



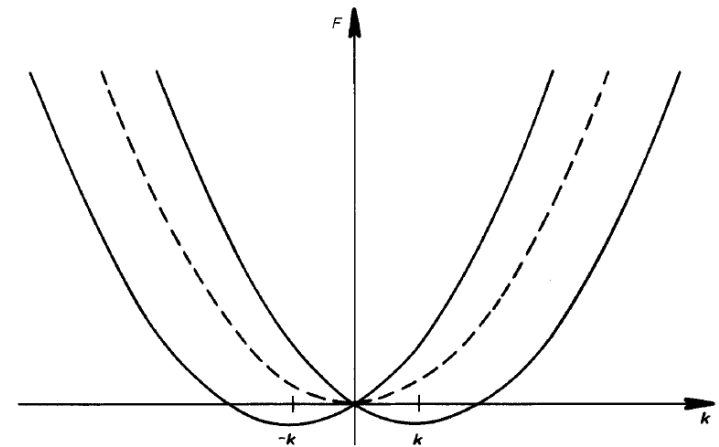
Позиции Уайкофа:

$$R_1 (u, u, u); R_2 (1/2+u, 1/2-u, -u);$$

$$R_3 (-u, 1/2+u, 1/2-u); R_4 (1/2-u, -u, 1/2+u)$$

V. A. Dyadkin, S. V. Grigoriev, D. Menzel, D. Chernyshov,
V. Dmitriev, J. Schoenes, S. V. Maleyev, E. V. Moskvina,
and H. Eckerlebe, Phys. Rev. B **84**, 014435 (2011)

Свободная энергия



$$E = -J \sum \vec{m}_i \cdot \vec{m}_j + D \sum \vec{r}_{ij} \cdot (\vec{m}_i \times \vec{m}_j)$$

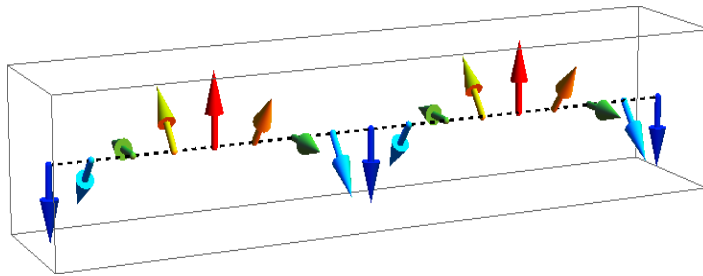
$$F = \left(\frac{1}{2}A - |b|k\right) |S_k|^2 + \left(\frac{1}{2}B + \frac{1}{6}B_2\right) k^2 |S_k|^2$$

P.Bak, M.H.Jensen, J.Phys.C13, L881 (1980)

Тип кристаллографической структуры $B20$ характеризуется отсутствием центра инверсии, что приводит к появлению антисимметричного обменного взаимодействия Дзялошинского-Мория (ДМ), и, как следствие, киральному геликоидальному магнитному упорядочению соединений со структурой типа $B20$.

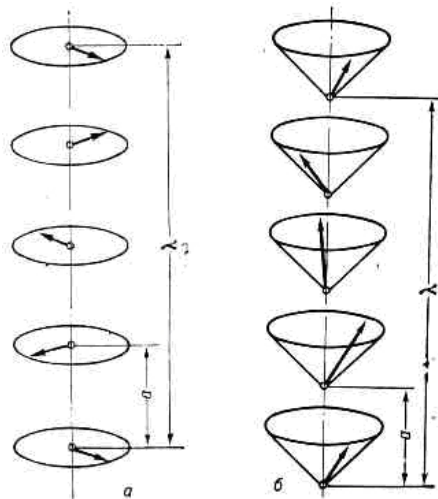


Геликоидальная магнитная структура

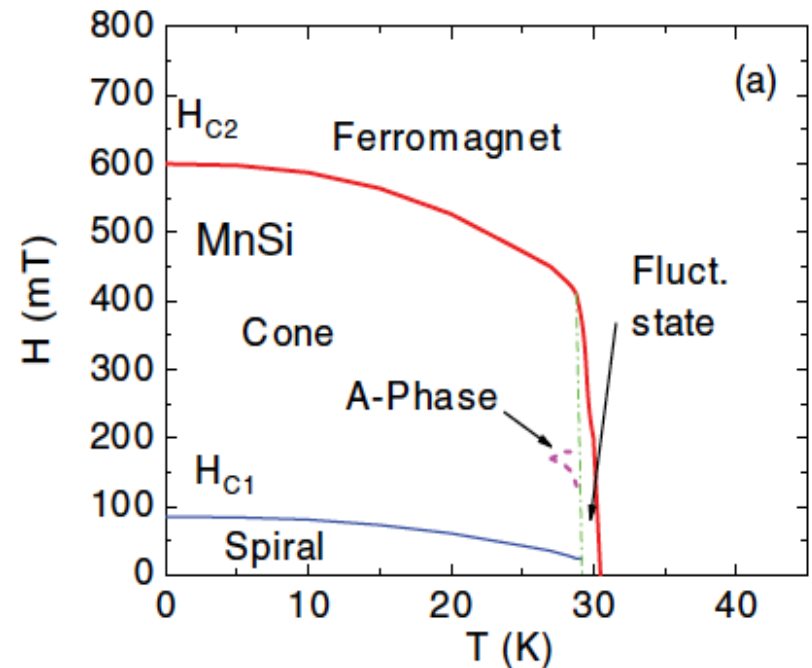


$$S(r) = \alpha_k \cos(k \cdot r) - \beta_k \sin(k \cdot r)$$

P.Bak, M.H.Jensen, J.Phys.C13, L881 (1980)



Фазовая диаграмма соединения MnSi

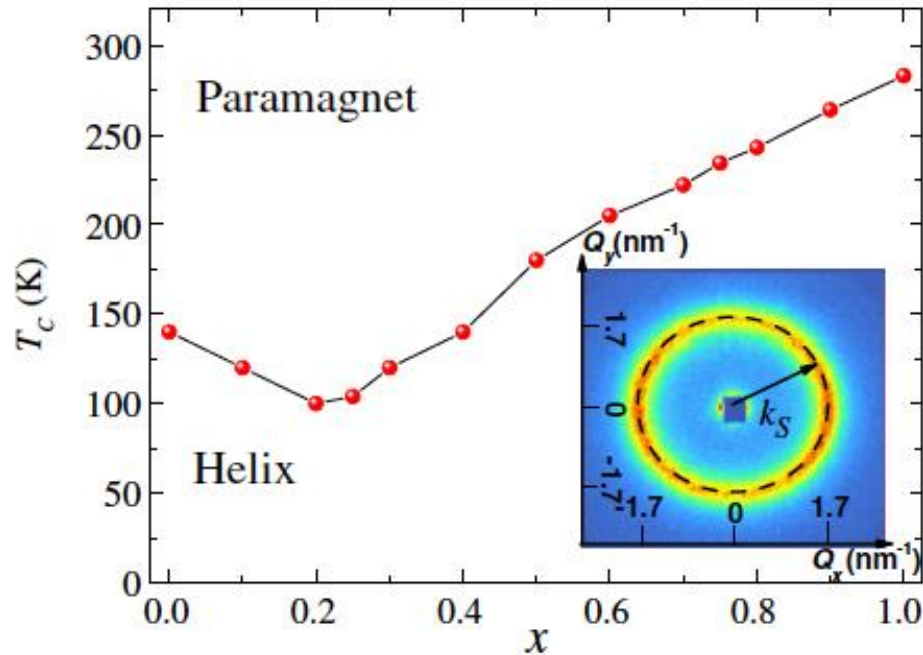


Величина волнового вектора магнитной спирали для соединения MnSi равна $k_s = 0.36 \text{ nm}^{-1}$ при низких температурах. Температура геликоидального магнитного упорядочения соединения MnSi равна $T_C = 29 \text{ K}$.

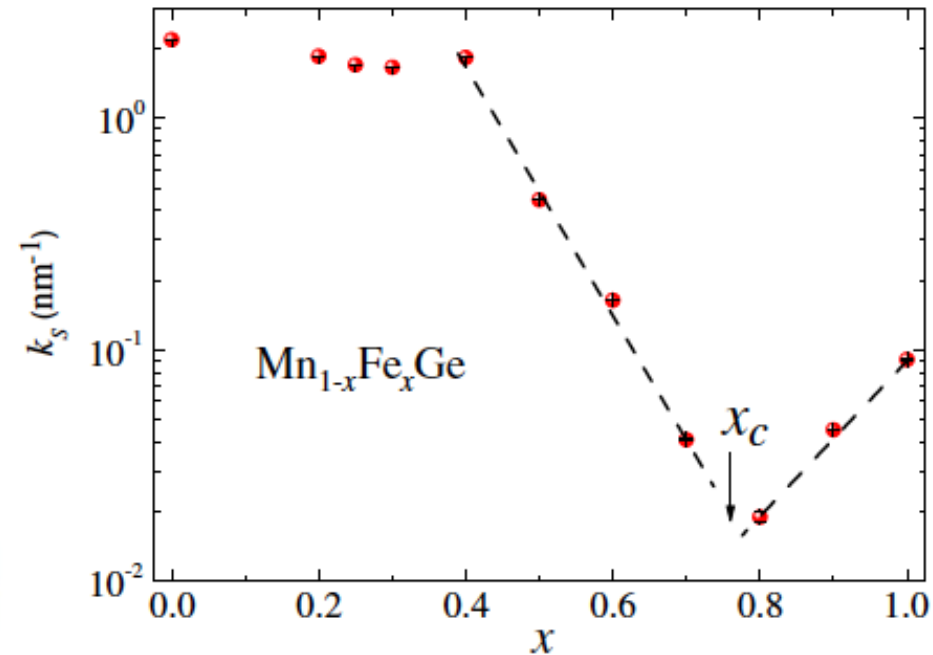
Potapova N., Dyadkin V., Moskvina E., Eckerlebe H., Menzel D., Grigoriev S. Phys. Rev. B 86, (2012) 060406



Зависимость температуры
геликоидального магнитного
упорядочения T_C от концентрации x в
соединении $Mn_{1-x}Fe_xGe$



Зависимость величины волнового
вектора магнитной спирали k_S
при $T = 10$ К от концентрации x в
соединении $Mn_{1-x}Fe_xGe$



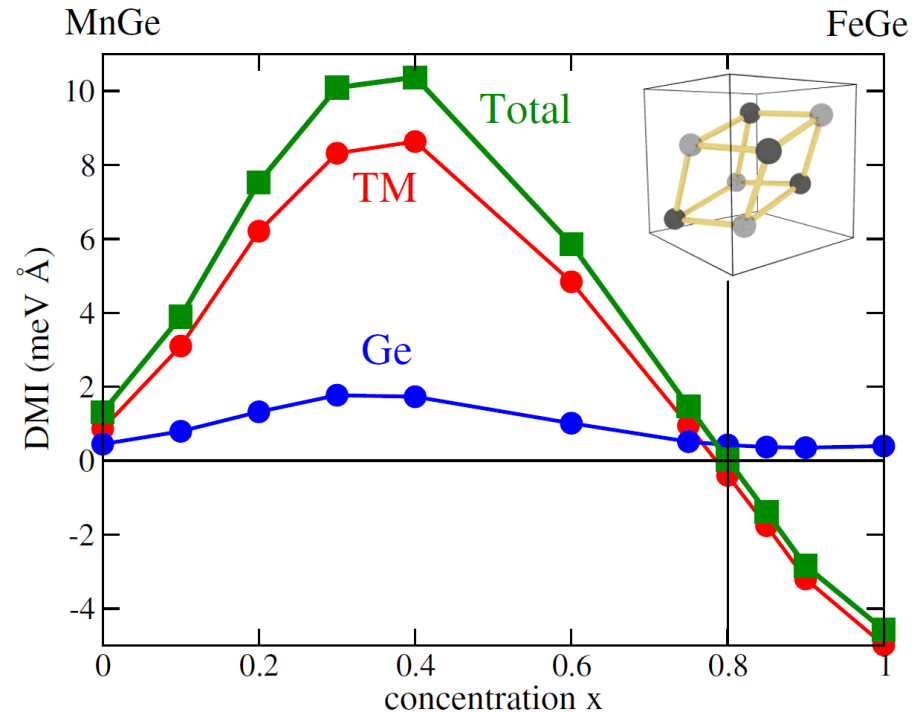
Магнитная система MnGe упорядочивается в геликоидальную магнитную структуру с волновым вектором $k_S = 2.2 \pm 0.05$ nm⁻¹ при низких температурах. Соединение FeGe демонстрирует рекордно высокую температуру геликоидального магнитного упорядочения, $T_C = 278$ К.

S.V. Grigoriev, N. M. Potapova, S.-A. Siegfried, V. A. Dyadkin, E.V. Moskvina, V. Dmitriev, D. Menzel, C. D. Dewhurst, D. Chernyshov, R. A. Sadykov, L. N. Fomicheva, A.V. Tsvyashchenko PRL 110, 207201 (2013)



ab-initio расчёт величины константы взаимодействия ДМ в $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$

Теоретические расчёты показали, что взаимодействие ДМ меняет знак при критической концентрации атомов Fe, $x = x_c$, что и приводит к изменению магнитной киральности. Однако, расчёты, при этом, не объясняют сравнительно большую величину волнового вектора магнитной структуры соединения MnGe.

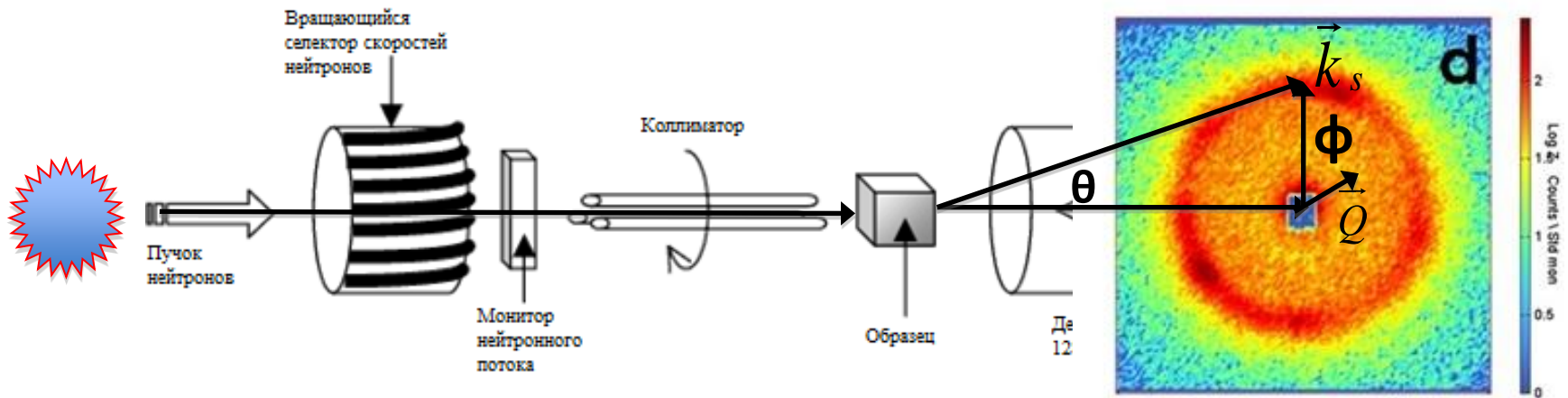




- **Целью работы** является исследование магнитной структуры соединений на основе моногерманида марганца, допированных железом либо кобальтом, и её эволюции с температурой.
- **Объектами исследования** были выбраны соединения MnGe , $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$ с $x = 0.2, 0.25, 0.3, 0.4$ и 0.5 и $\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x\text{Ge}$ с $x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.45, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ и 0.9 с кристаллографической структурой типа $B20$, синтезированные в институте физики высоких давлений имени Л. Ф. Верещагина.
- В соответствии с целью данного исследования были сформулированы следующие **задачи**:
 1. **Исследовать** интегральные характеристики магнитных свойств моногерманидов переходных металлов **методом СКВИД-магнитометрии** и установить магнитную структуру соединений MnGe , $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$ и $\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x\text{Ge}$ **методами малоугловой дифракции нейтронов**.
 2. Исследовать особенности **температурного магнитного фазового перехода порядок-беспорядок** в соединении **MnGe** .
 3. Установить закономерности **трансформации магнитной структуры** в соединениях $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$ и $\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x\text{Ge}$ с **ростом концентрации атомов Fe или Co, x** .
 4. Изучить особенности **температурного перехода порядок-беспорядок** в соединениях $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$ с $x < 0.5$ и $\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x\text{Ge}$ с $x < 0.9$.



Метод малоугловой дифракции нейтронов



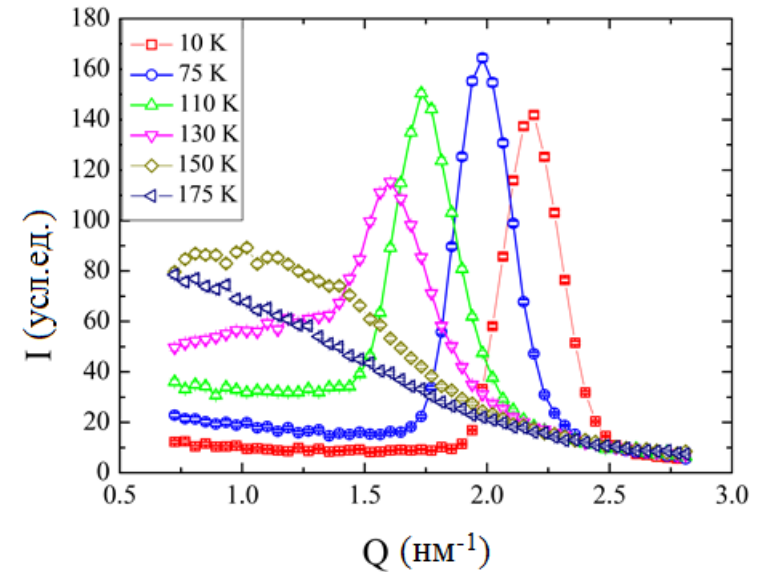
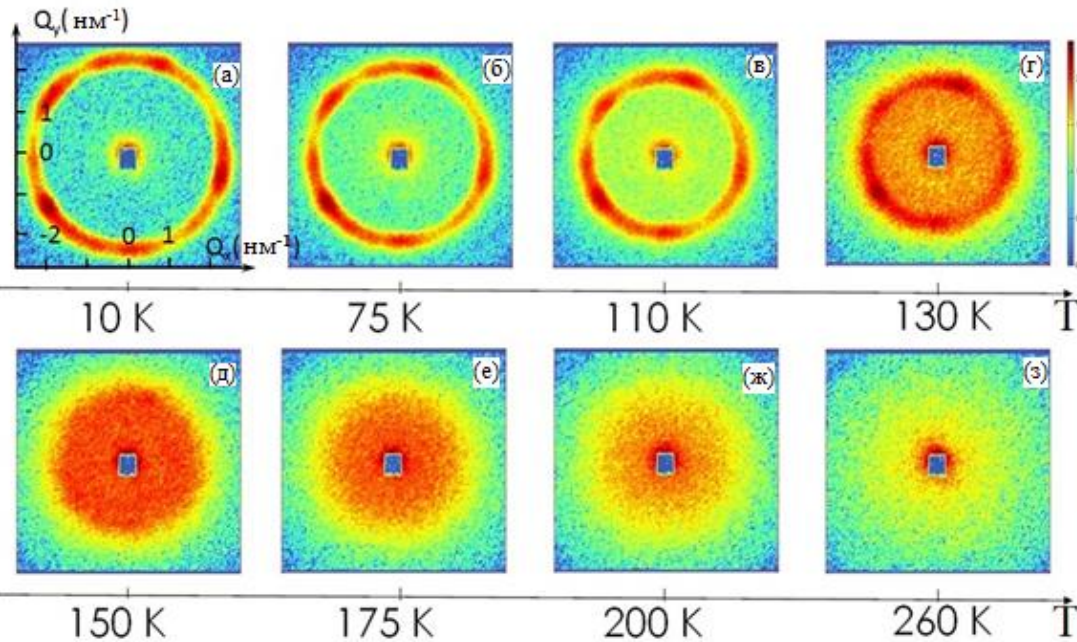
Благодаря тому, что нейтрон обладает высокой проникающей способностью, магнитным моментом и длиной волны от 0.05 до 1.2 нм, метод малоугловой дифракции нейтронов является практически единственным прямым и наиболее информативным способом исследования магнитных наноструктур.



ТЕМПЕРАТУРНЫЙ МАГНИТНЫЙ ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД В СОЕДИНЕНИИ MnGe 1/4

Карты МУРН от MnGe при различных температурах

Азимутальное усреднение интенсивности МУРН



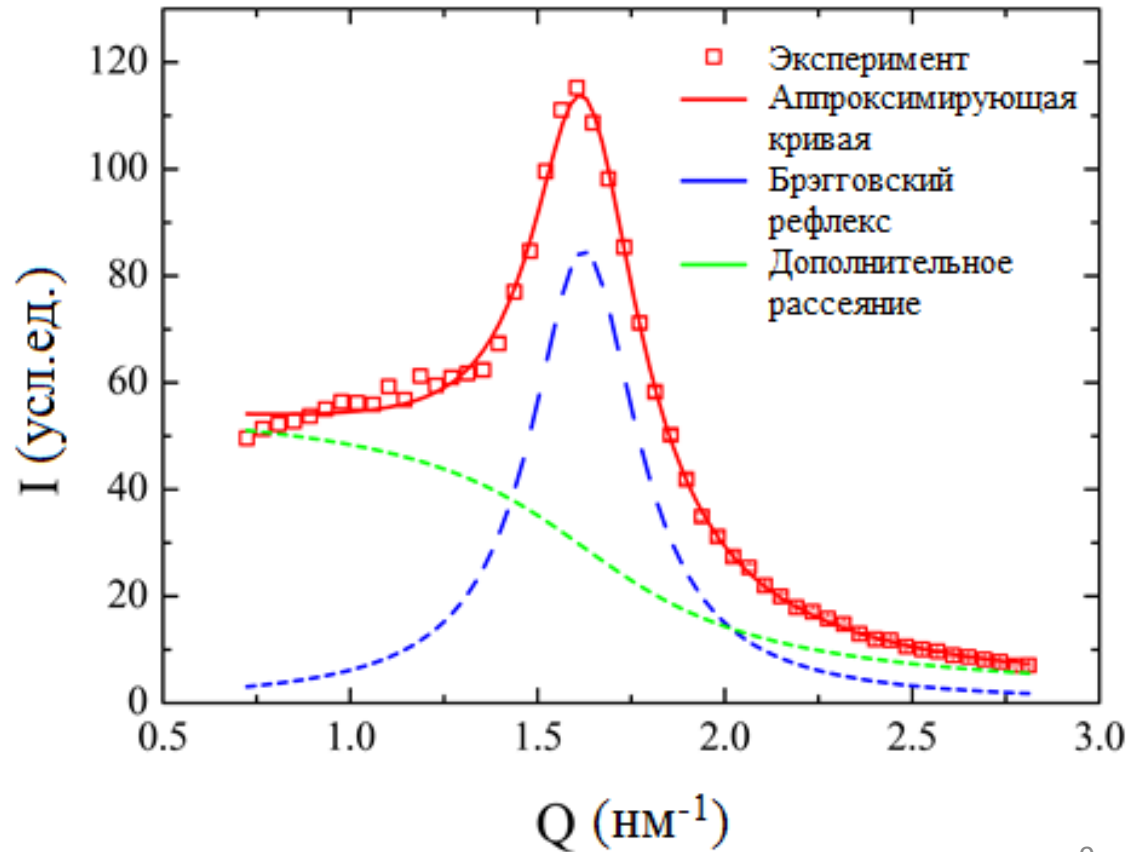
Типичная картина рассеяния от порошкового геликоидального магнитного образца преобразуется в круглое пятно с легко определяемой границей, $Q \approx k_s$, при температурах выше $T_N = 130$ K. Дальнейшее увеличение температуры приводит к уменьшению размера пятна до $k_s = 0$.

E. Altynbaev, S.-A. Siegfried, V. Dyadkin, E. Moskvina, D. Menzel, A. Heinemann, C. Dewhurst, L. Fomicheva, A. Tsvyashchenko, and S. Grigoriev, Phys. Rev. B **90**, 174420 (2014)



Пример аппроксимации профиля рассеяния для образца MnGe, $T = 130$ К

k — волновой вектор магнитной спирали;
 $\kappa = 2\pi/\xi$ — полная ширина на половине высоты (ПШПВ) рефлекса, или обратная корреляционная длина магнитной структуры;
 $I_0 = I(G) + I(L)$ — интегральная интенсивность рефлекса, которая является суммой интегральных интенсивностей вкладов от функций Гаусса $I(G)$ и Лоренца $I(L)$;
 $\alpha = I(L)/(I(G) + I(L))$ — параметр, который позволяет оценить степень нестабильности магнитной структуры исследуемого соединения;
 $I(ab)$ — интегральная интенсивность дополнительного к брэгговскому рассеяния.



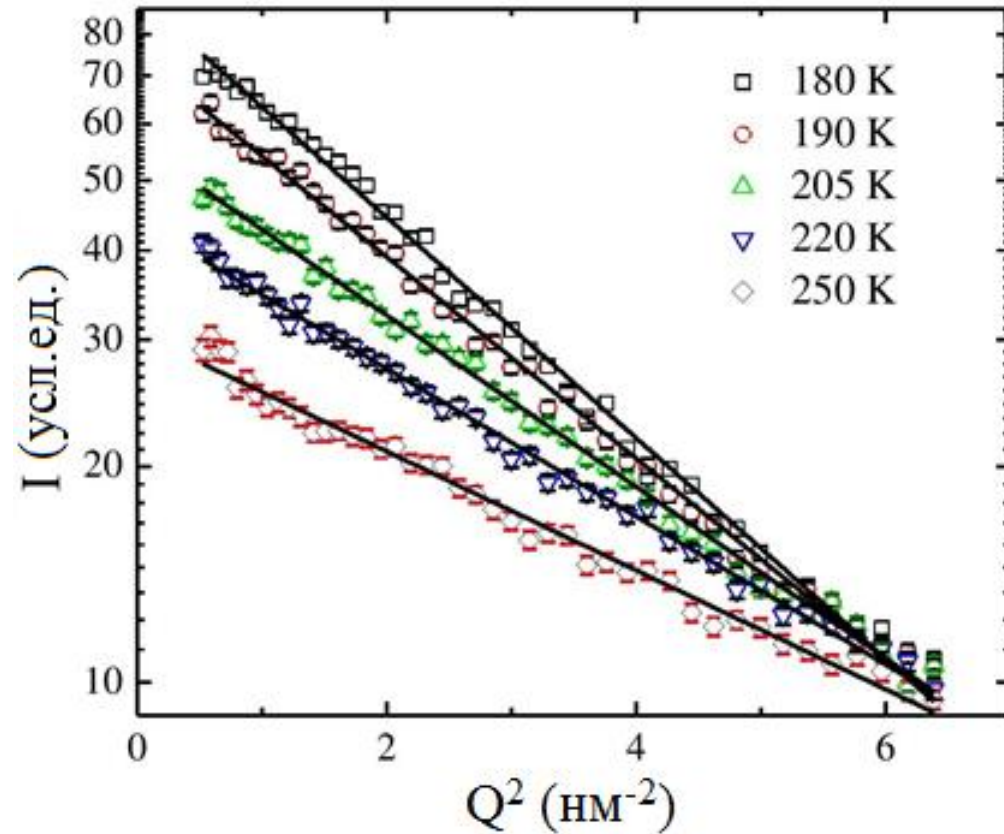


Зависимость $\ln(I)$ vs. Q^2

При температурах выше $T_{SRF} = 170$ К интенсивность нейтронного рассеяния описывается функцией Гаусса с центром при $Q = 0$, или законом Гинье:

$$I(Q) = I_0 \exp(-Q^2 R_g^2 / 3),$$

где R_g — радиус гирации рассеивающего объекта. Это свидетельствует о том, что магнитная система при $T > T_{SRF}$ сформирована из ферромагнитных вкраплений, окружённых парамагнитной фазой.

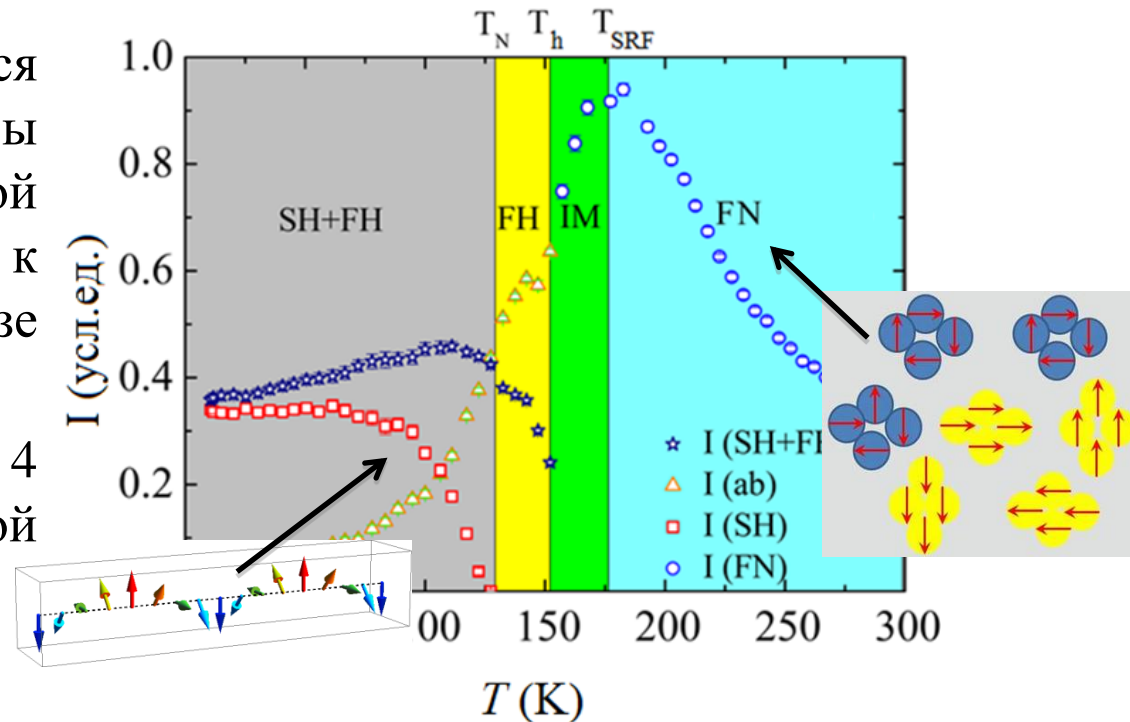




Температурная эволюция магнитной структуры MnGe

Таким образом, наблюдается переход магнитной структуры соединения MnGe от устойчивой геликоидальной структуры к высокотемпературной фазе ферромагнитных корреляций.

В результате, удалось выделить 4 различных состояния магнитной системы соединения MnGe.





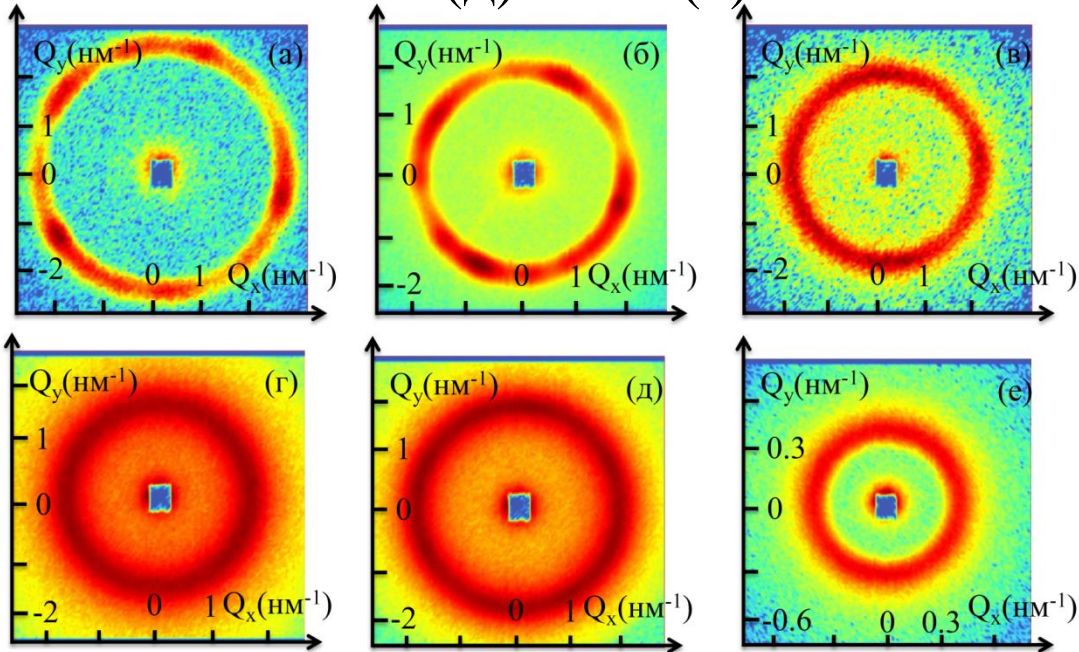
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ 1/3

Магнитный фазовый переход порядок-беспорядок в соединении MnGe имеет сложный многоступенчатый характер. При температурах ниже $T_N = 130$ К наблюдается устойчивая геликоидальная магнитная структура с периодом $d = 2.9$ нм при температуре $T = 10$ К. В диапазоне температур $T < T_N$ наблюдается сосуществование в магнитной системе MnGe ближнего магнитного порядка (геликоидальных флуктуаций) наряду с дальним магнитным порядком. В диапазоне температур $T_N < T < T_h = 150$ К геликоидальная магнитная система флуктуирует. При температурах выше T_h геликоидальные флуктуации разбиваются на ферромагнитные нано-области с характерным размером порядка 1 нм, количество которых максимально при $T_{SRF} = 170$ К.

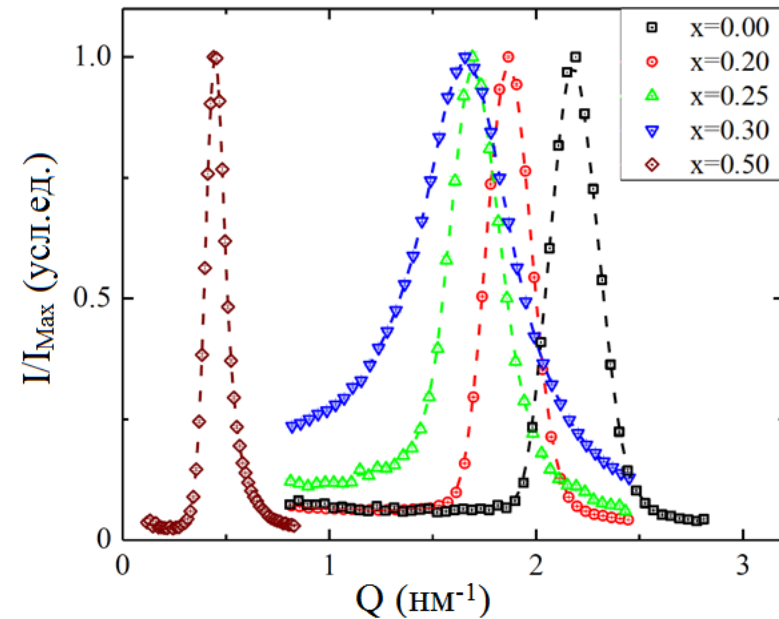


МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА ПСЕВДОБИНАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ $Mn_{1-x}Fe_xGe$ ПРИ $T = 10 K$ 1/2

Карты МУРН для $Mn_{1-x}Fe_xGe$
 $x = 0.0$ (а), 0.2 (б), 0.25 (в), 0.3 (г),
 0.4 (д) и 0.5 (е).



Азимутальное усреднение
интенсивности МУРН



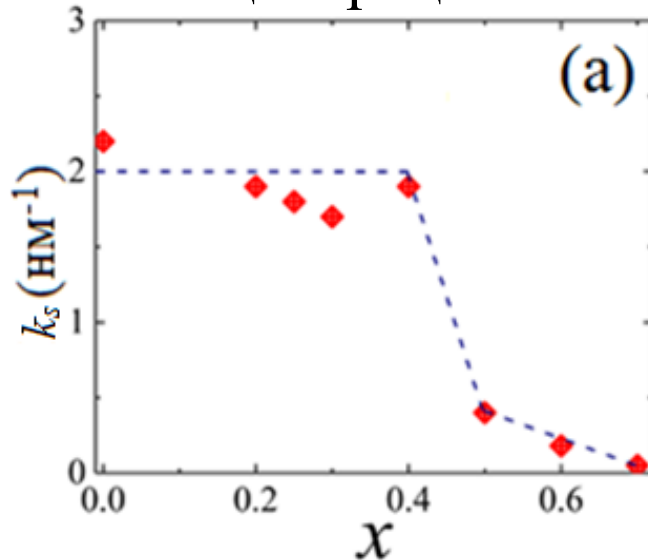
Увеличение концентрации Fe в соединениях $Mn_{1-x}Fe_xGe$ с $x < 0.45$ не оказывает существенного влияния на период геликоидальной магнитной структуры при низких температурах, но приводит к дестабилизации магнитной структуры, что проявляется в уширении магнитного рефлекса с ростом параметра x .

E. Altynbaev, S.-A. Siegfried, E. Moskvina, D. Menzel, C. Dewhurst, A. Heinemann, A. Feoktystov, L. Fomicheva, A. Tsvyashchenko, and S. Grigoriev, Phys. Rev. B 94, 174403 (2016).

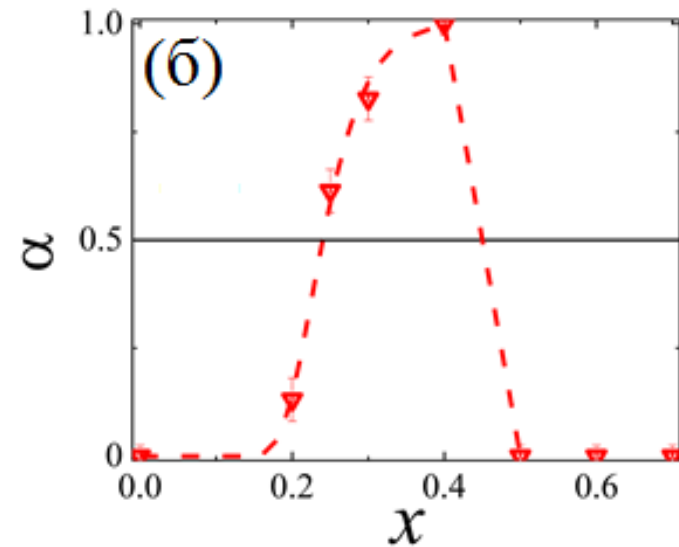


МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА ПСЕВДОБИНАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ $Mn_{1-x}Fe_xGe$ ПРИ $T = 10$ К 2/2

Зависимость волнового вектора магнитной структуры k_s от концентрации x .



Зависимость объёмной доли геликоидальных флуктуаций α от концентрации x .



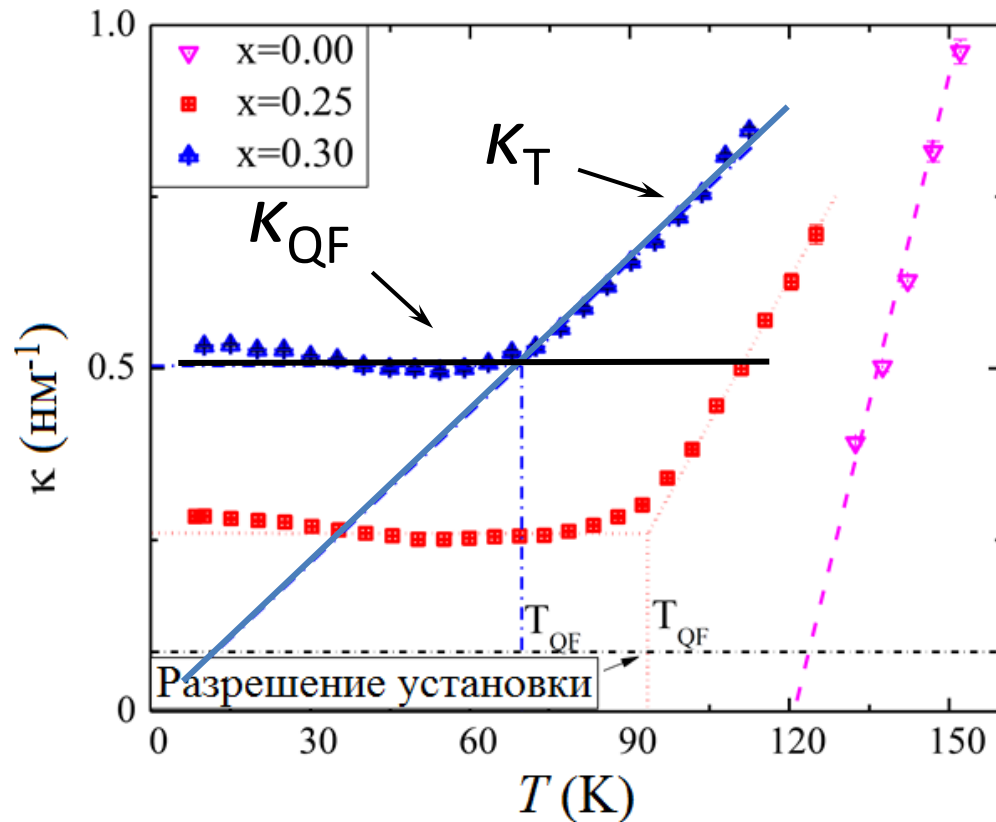
С ростом концентрации x заметно увеличивается объёмная доля геликоидальных магнитных флуктуаций, которую можно определить при помощи параметра $\alpha = I(L)/(I(G) + I(L))$. Также, при концентрации $x = x_{c2} \approx 0.45$, наблюдается переход геликоидальной магнитной системы с малым периодом магнитной спирали, к геликоидальной структуре с большим периодом магнитной спирали.

E. Altynbaev, S.-A. Siegfried, E. Moskvina, D. Menzel, C. Dewhurst, A. Heinemann, A. Feoktystov, L. Fomicheva, A. Tsvyashchenko, and S. Grigoriev, Phys. Rev. B 94, 174403 (2016).



Зависимость обратной корреляционной длины магнитной структуры $\kappa = 2\pi/\xi$ от температуры

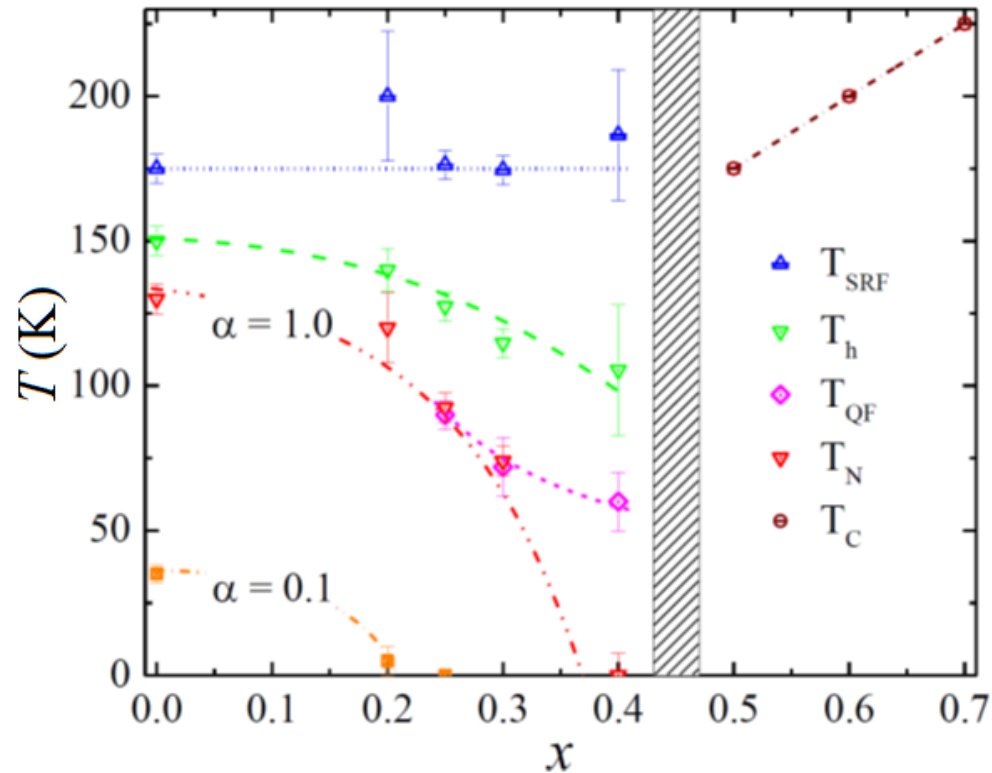
Анализ температурной эволюции магнитной структуры псевдобинарных соединений $Mn_{1-x}Fe_xGe$ показал, что корреляционная длина флуктуаций, обнаруженных в соединениях с $0.25 < x < 0.4$, не зависит от температуры при $T < T_{QF}$. Это позволяет сделать вывод о нетепловой (квантовой) природе этих флуктуаций.





Эволюция магнитной структуры $MnGe$ с ростом концентрации Fe

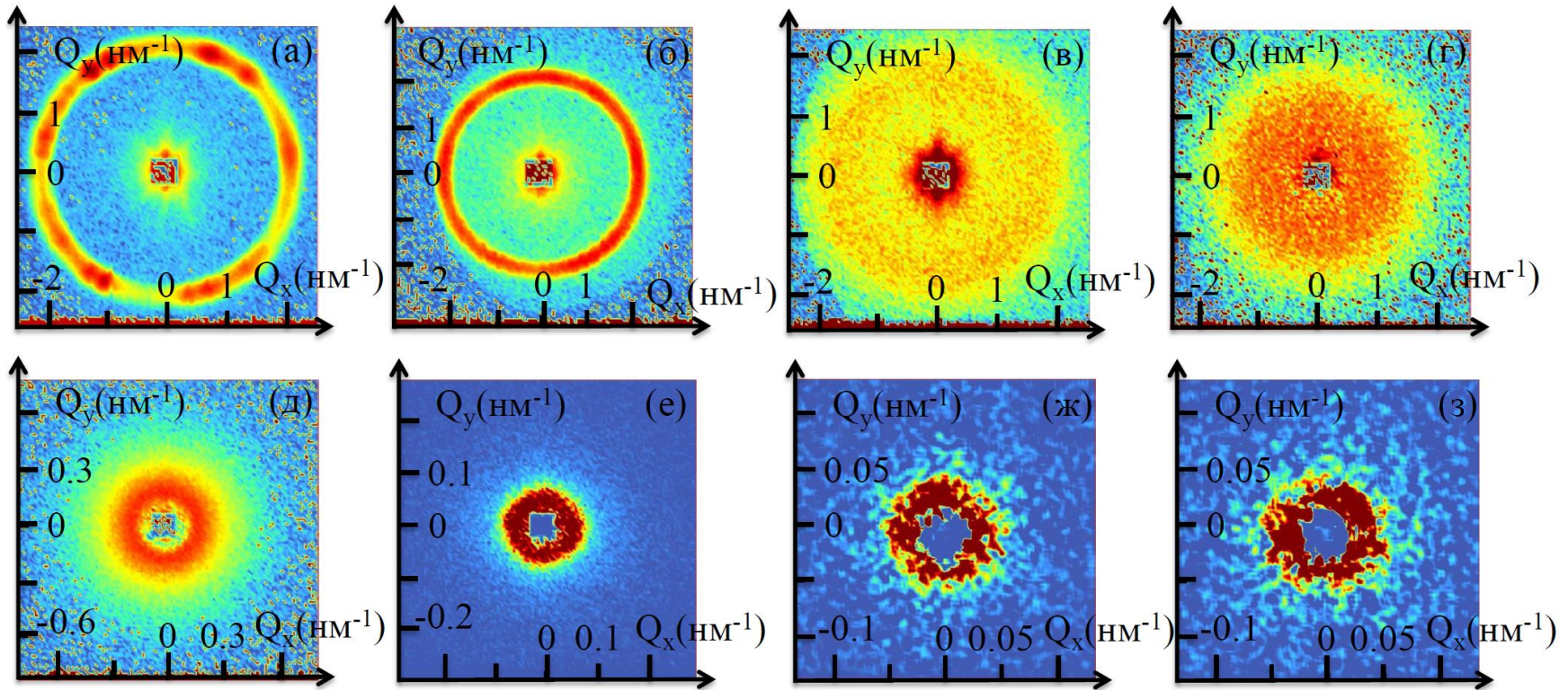
В результате экспериментов по малоугловой дифракции нейтронов на соединениях $Mn_{1-x}Fe_xGe$ с $x < 0.45$, были определены четыре критические температуры T_N , T_h , T_{SRF} и T_{QF} . Для соединений $Mn_{1-x}Fe_xGe$ с $x > 0.45$ была определена температура перехода из парамагнитного в геликоидальное состояние T_C .





Карты МУРН для серии образцов $Mn_{1-x}Co_xGe$

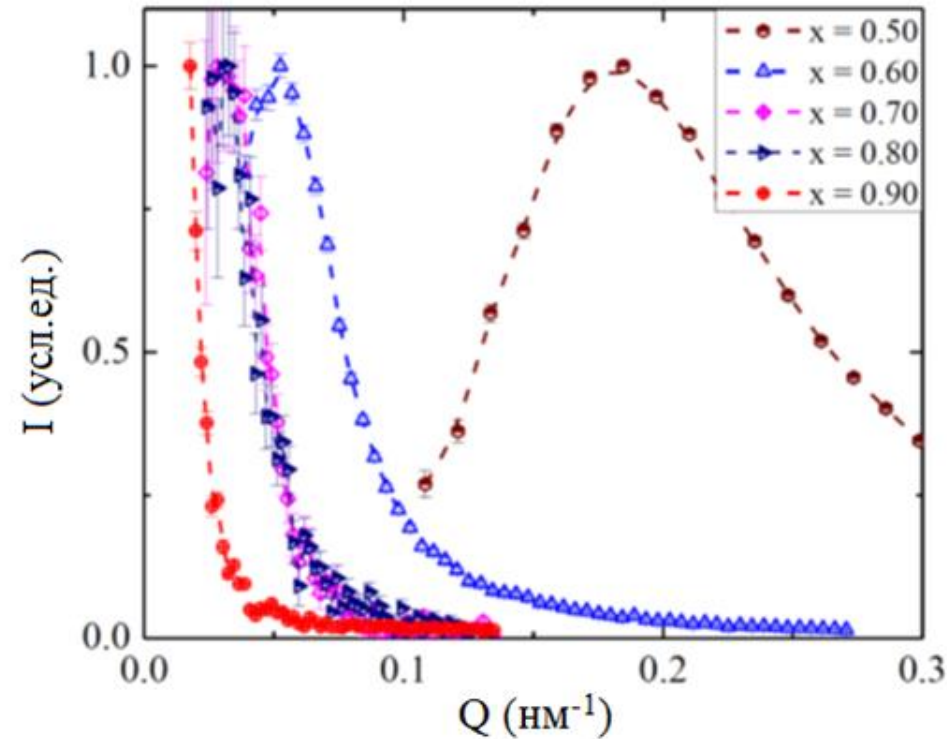
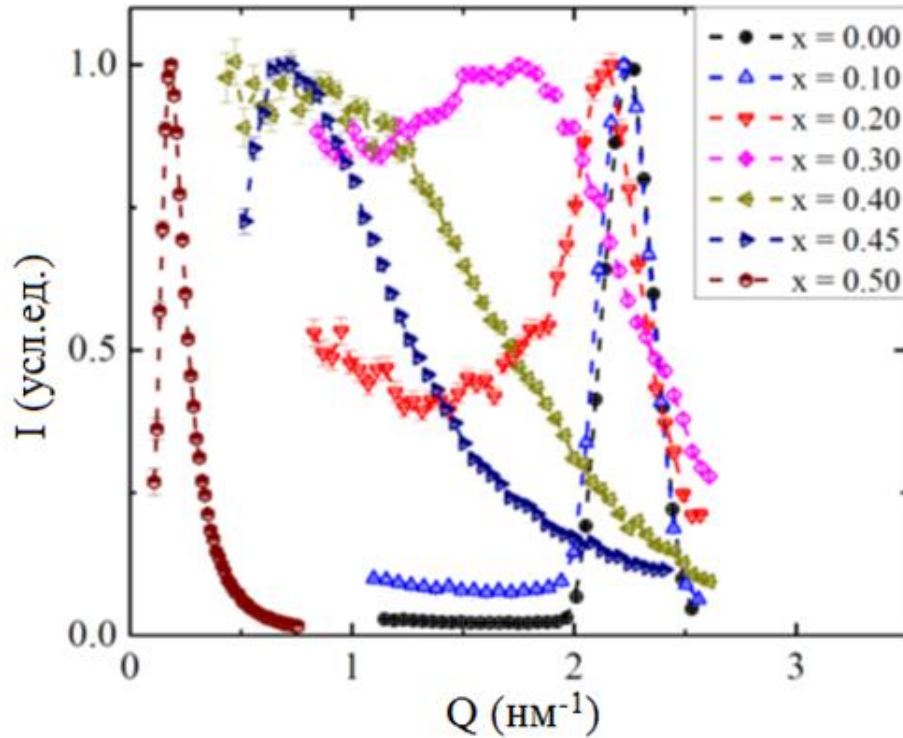
$x = 0.0$ (а), 0.1 (б), 0.3 (в), 0.4 (г), 0.5 (д), 0.6 (е), 0.7 (ж) и 0.8 (з).



Магнитный порядок наблюдается во всех исследуемых соединениях твёрдых растворов $Mn_{1-x}Co_xGe$, однако, магнитная структура существенно меняется с концентрацией x .



Азимутальное усреднение интенсивности МУРН

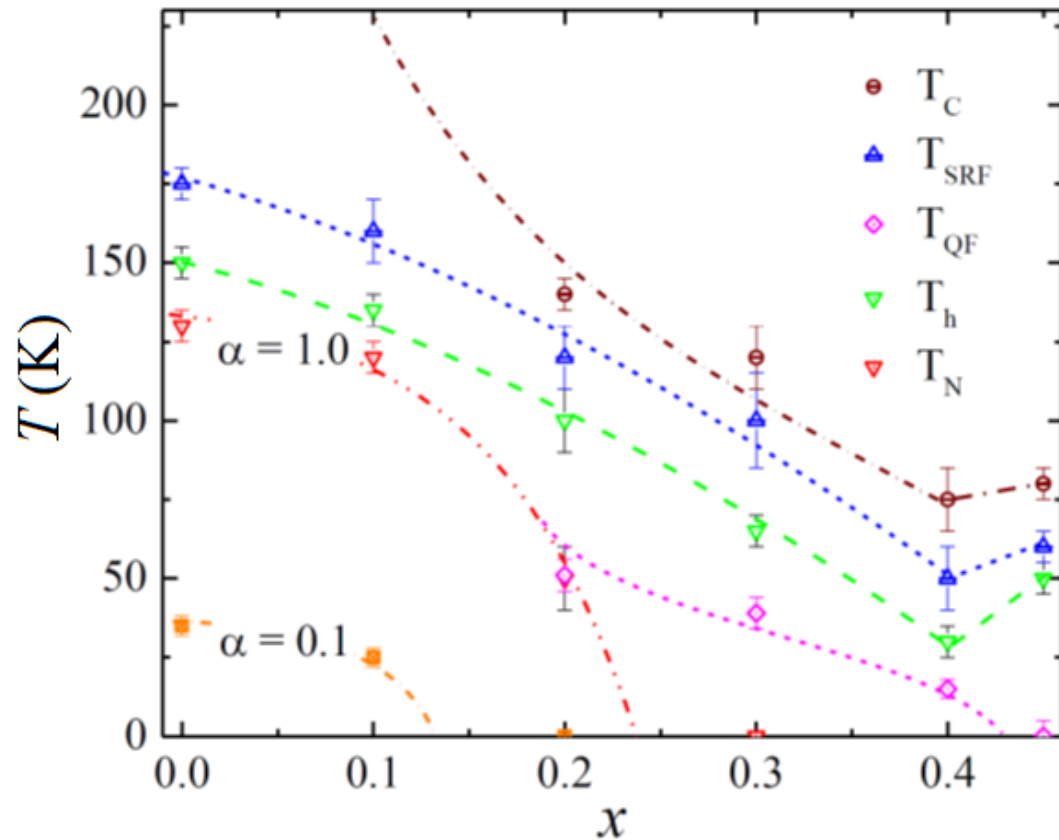


В соединениях $Mn_{1-x}Co_xGe$ с $x < 0.8$ при низких температурах формируется магнитная спираль. Замещение атомов Mn атомами Co приводит к разрушению дальнего порядка магнитной структуры, а также значительному уменьшению волнового вектора магнитной спирали при $x > 0.45$. Для соединения $Mn_{0.1}Co_{0.9}Ge$ наблюдается ферромагнитное упорядочение при низких температурах. 18



Эволюция магнитной структуры $MnGe$ с ростом концентрации Co

В результате экспериментов по малоугловой дифракции нейтронов на соединениях $Mn_{1-x}Co_xGe$ с $x < 0.45$, были определены критические температуры T_N , T_h , T_{SRF} и T_{QF} . Также для соединений $Mn_{1-x}Fe_xGe$ с $0.2 < x < 0.45$ была определена температура перехода из высокотемпературной фазы ферромагнитных нано-областей в парамагнитное состояние, T_C .



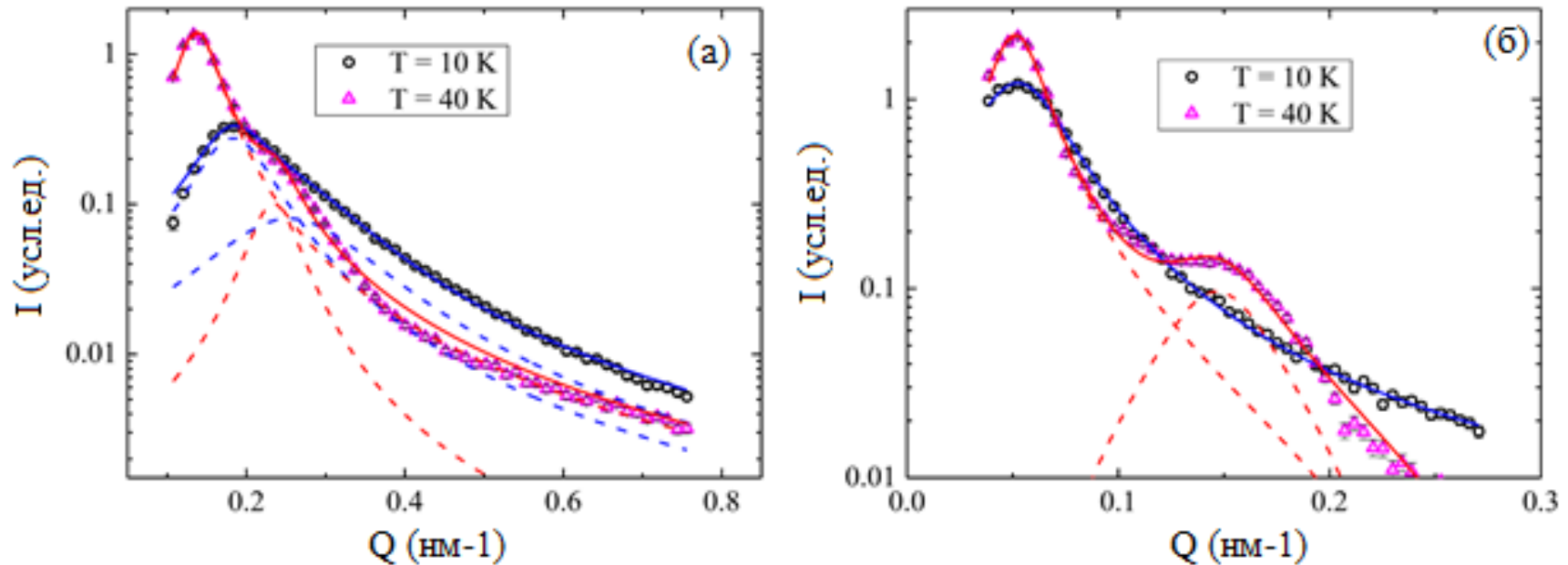


ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ 2/3

При $x = x_{c2} \approx 0.45$ в соединениях $Mn_{1-x}Fe_xGe$ и $Mn_{1-x}Co_xGe$ происходит трансформация геликоидальной магнитной системы с малым периодом магнитной спирали, $2\pi a/d \sim 1$, где a — параметр кристаллической решетки, к геликоидальной структуре с большим периодом магнитной спирали, $2\pi a/d \ll 1$. Магнитный фазовый переход порядок-беспорядок в соединениях $Mn_{1-x}Fe_xGe$ и $Mn_{1-x}Co_xGe$ с $x < 0.45$ происходит по тому же сценарию, что и в случае соединения $MnGe$. При этом магнитная система соединений $Mn_{1-x}Fe_xGe$ и $Mn_{1-x}Co_xGe$ при низких температурах претерпевает фазовый переход с ростом $x \rightarrow x_{c1} \approx 0.35$ и 0.25 , соответственно, из геликоидального состояния с дальним магнитным порядком в геликоидальное состояние с ближним магнитным порядком.



Азимутальное усреднение интенсивности МУРН для образцов соединений $Mn_{0.5}Co_{0.5}Ge$ (а) и $Mn_{0.4}Co_{0.6}Ge$ (б)



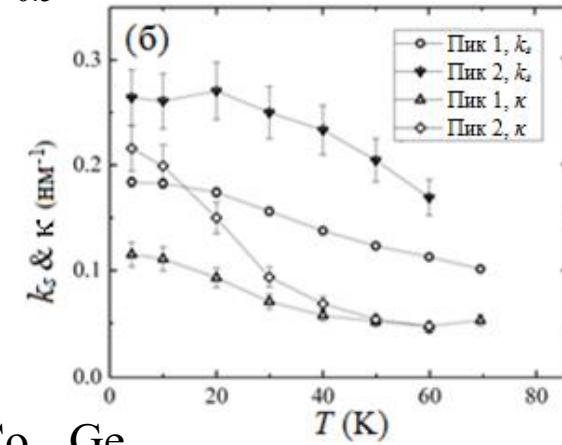
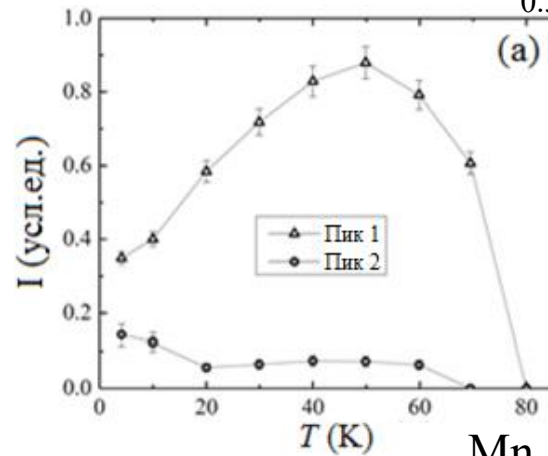
В соединениях $Mn_{1-x}Co_xGe$ с $x = 0.5$ и 0.6 наблюдается смешанное состояние магнитной системы, с двумя различными значениями периода магнитной спирали, в диапазонах температур $T < 70$ К и 20 К $< T < 60$ К, соответственно.



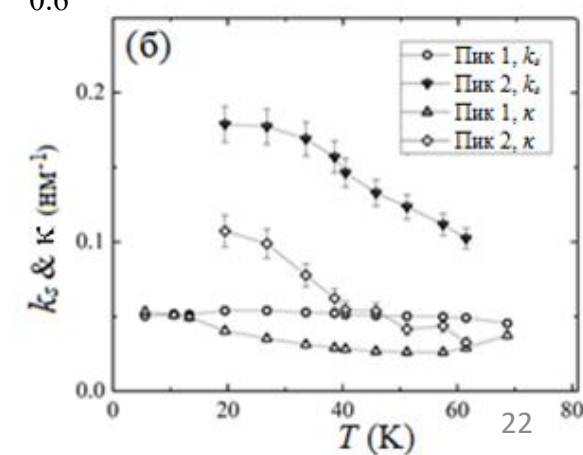
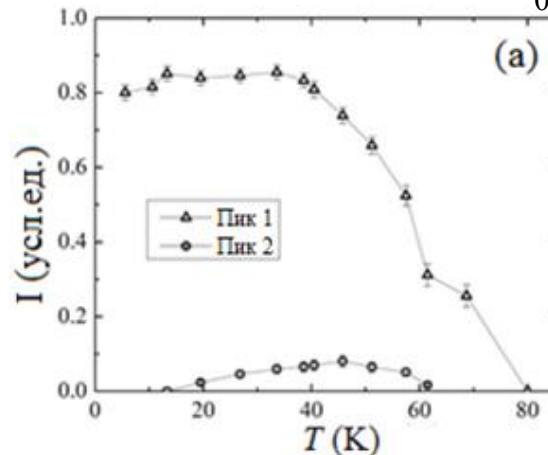
ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ $Mn_{1-x}Co_xGe$, $x > 0.45$ 2/2

Температурная зависимость (а) интегральной интенсивности и (б) позиции и ширины функций Лоренца, использованных при аппроксимации данных малоуглового рассеяния нейтронов на образцах соединений

$Mn_{0.5}Co_{0.5}Ge$



$Mn_{0.4}Co_{0.6}Ge$

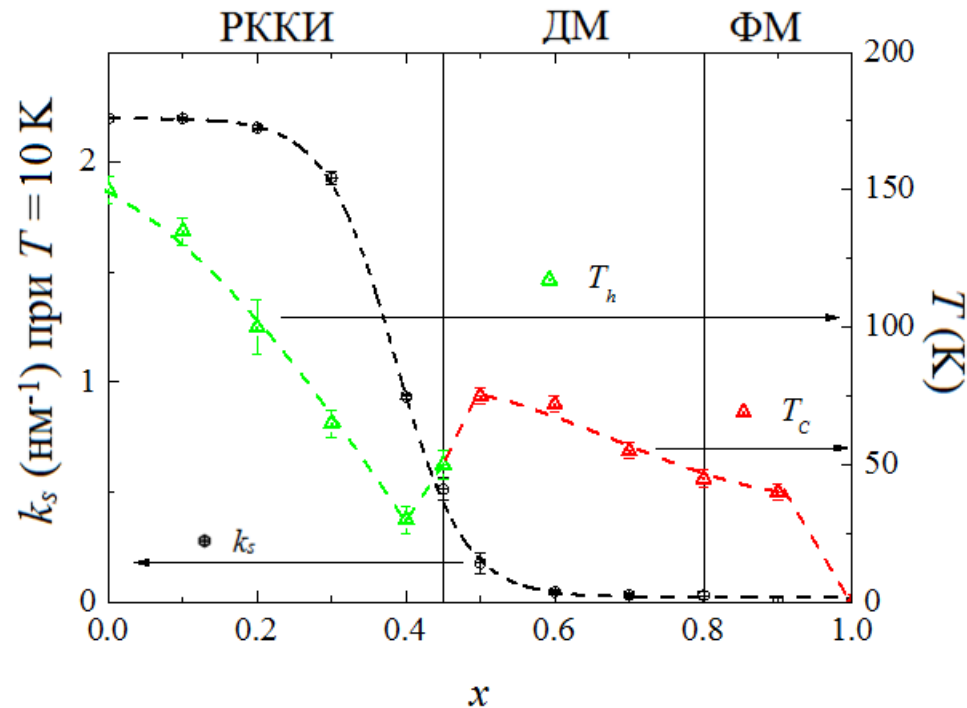


Сосуществование в образце геликоидальных флуктуаций с двумя различными значениями периода спирали предположительно обусловлено присутствием эффективного РККИ взаимодействия.



Эволюция магнитной структуры $MnGe$ с ростом концентрации Co

Относительно большое значение волнового вектора k_s при $0.0 < x < 0.45$ соответствует диапазону концентраций, в котором, при низких температурах, наблюдается геликоидальная структура, предположительно основанная на эффективном РККИ взаимодействии. В диапазоне концентраций $0.45 < x < 0.8$ при низких температурах обнаружена магнитная структура, основанная за счёт конкуренции основного ферромагнитного обменного взаимодействия и взаимодействия ДМ. Область концентраций вблизи $x = 0.9$ соответствует ферромагнитному упорядочению магнитной структуры при $T = 10$ К.





ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ 3/3

Для соединений $\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x\text{Ge}$, обогащённых кобальтом ($0.5 < x < 0.8$), определена температура фазового перехода из парамагнитного в геликоидальное состояние T_C , которая уменьшается с ростом концентрации Co от 75 К при $x = 0.5$ до 50 К при $x = 0.8$. В соединениях $\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x\text{Ge}$ с $x = 0.5$ и 0.6 в диапазонах температур $T < 70$ К и $20 \text{ К} < T < 60$ К, соответственно, установлено сосуществование двух геликоидальных фаз с различными значениями периода магнитной спирали. В соединении $\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.9}\text{Ge}$ магнитная система упорядочена ферромагнитно при $T < 42$ К.



АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты работы были представлены на научных семинарах в ФГБУ ПИЯФ НИЦ КИ (научные семинары ОИКС), СПбГУ, а также на следующих российских и международных конференциях: Совещании «International Workshop on Single-Crystal Diffraction with Polarised Neutrons, Flipper 2013» (Гренобль, Франция, 2013); Летних школах RACIRI—2013, 2014, 2016 (Санкт-Петербург, 2013 и 2016, Стокгольм, Швеция, 2014); Совещании «Polarized Neutrons in Condensed Matter Investigations, PNCMI-2016» (Мюнхен, Германия, 2016); Совещаниях «Dzyaloshinskii-Moriya Interaction and Exotic Spin Structures, DMI» 2013, 2015 (Великий Новгород, 2013, Псков, 2015); 47-й, 48-й, 49-й и 50-й школах ПИЯФ по физике конденсированного состояния, (Санкт-Петербург, 2013-2016); Совещании по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах «РНСИКС 2014», (Санкт-Петербург, 2014); Рабочих совещаниях по малоугловому рассеянию и рефлектометрии нейтронов МУРомец 2013-2016 (Санкт-Петербург, 2013-2016); Рабочих совещаниях по физике поляризованных нейтронов «Школа ФПН» 2013-2016 (Санкт-Петербург, 2013-2016).



1. E. Altynbaev, S.-A. Siegfried, E. Moskvin, D. Menzel, C. Dewhurst, A. Heinemann, A. Feoktystov, L. Fomicheva, A. Tsvyashchenko, and S. Grigoriev. Hidden quantum phase transition in $Mn_{1-x}Fe_xGe$ evidenced by small-angle neutron scattering. // *Phys. Rev. B* 94, 174403 (2016).
2. G. A. Valkovskiy, E. V. Altynbaev, M. D. Kuchugura, E. G. Yashina, A. S. Sukhanov, V. A. Dyadkin, A. V. Tsvyashchenko, V. A. Sidorov, L. N. Fomicheva, E. Bykova, S. V. Ovsyannikov, D. Yu. Chernyshov, and S. V. Grigoriev. Thermal Expansion of Monogermanides of 3d-Metals // *J. Phys.: Condens. Matter* 28, 375401 (2016).
3. E. Altynbaev, S.-A. Siegfried, V. Dyadkin, E. Moskvin, D. Menzel, A. Heinemann, C. Dewhurst, L. Fomicheva, A. Tsvyashchenko, and S. Grigoriev. Intrinsic instability of the helix spin structure in MnGe and order-disorder phase transition. // *Physical Review B* vol. 90 pp. 174420 (2014).
4. Алтынбаев Е.В., Суханов А.С., Siegfried S.A., Дядькин В.А., Москвин Е.В., Menzel D., Heinemann A., Фомичева Л.Н., Цвященко А.В., Григорьев С.В. Влияние допирования на температурную эволюцию геликоидальной спиновой структуры в MnGe // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, vol. 10, N. 8, pp. 5-11 (2016).
5. С. В. Григорьев, Е. В. Алтынбаев, Х. Эккерлебе, А. И. Огороков, Изучение спиновой динамики в ферромагнетике $Fe_{65}Ni_{35}$ методом малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, vol. 1, N. 10, pp. 71-78 (2014).



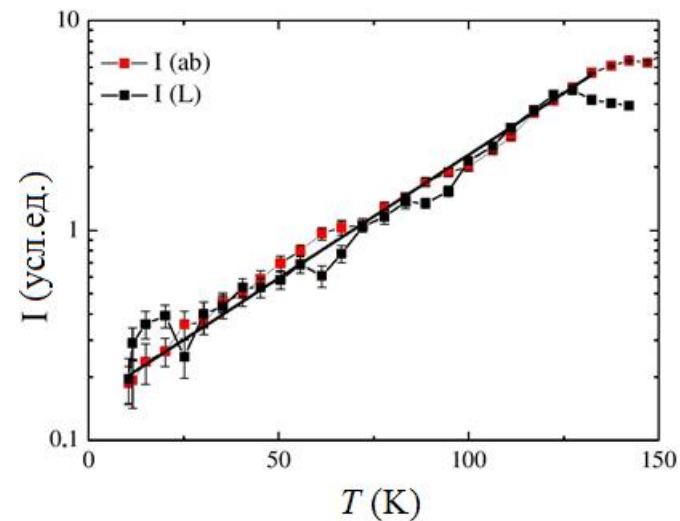
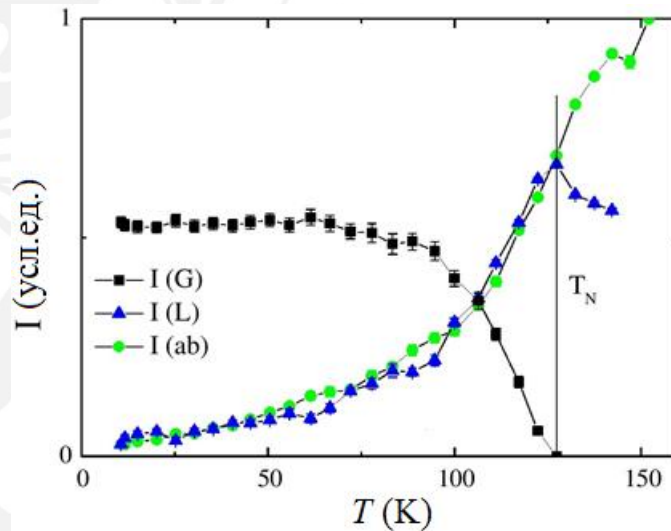
Спасибо за внимание!

Санкт-Петербургский
государственный университет
spbu.ru



ЗАМЕЧАНИЯ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

1. В главе 3 приведены достаточно интересные результаты по эволюции интенсивности нейтронного рассеяния на магнитных возбуждениях и геликоидальных флуктуациях в области температур $T < 150$ К. На Рис. 3.6 видно, что обе интенсивности подчинены одному и тому же степенному закону. Это могло бы послужить дополнительным аргументом в пользу неупругой природы дополнительного к брэгговскому рассеяния. Однако, должного внимания этому факту уделено не было.

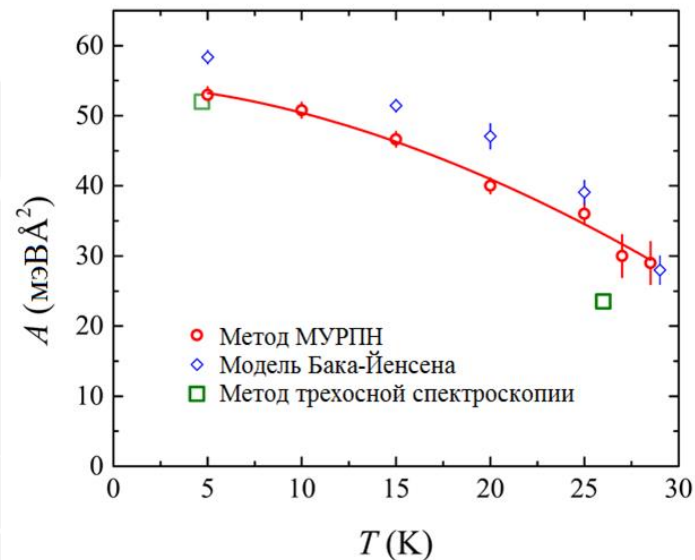


Действительно, на Рис. 3.5 и Рис. 3.6 диссертации показано, что интегральные интенсивности функции Лоренца $I(L)$ и дополнительного рассеяния $I(ab)$ равны друг другу в температурном диапазоне $0 \text{ К} < T < 130 \text{ К}$ и описываются экспоненциальным законом $I \sim \exp(T/T_a)$, $T_a = 80 \pm 1 \text{ К}$. Вопрос о неупругой природе этого рассеяния остался открытым и требует дополнительных исследований. В настоящее время ведутся активные работы по исследованию динамики этого соединения методами неупругого рассеяния нейтронов.



ЗАМЕЧАНИЯ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

2. Требуется пояснить более конкретно, в чем состоят проблемы измерений дисперсионных кривых методом трехосной нейтронной спектроскопии. Кроме трехосной нейтронной спектроскопии дисперсионные кривые можно измерять во времяпролетном режиме. Почему не используется данный режим? На Рис.1.5 представлено сравнение зависимостей константы спин-волновой жесткости от температуры, полученных разными методами. Никак не прокомментированы различия в данных зависимостях.

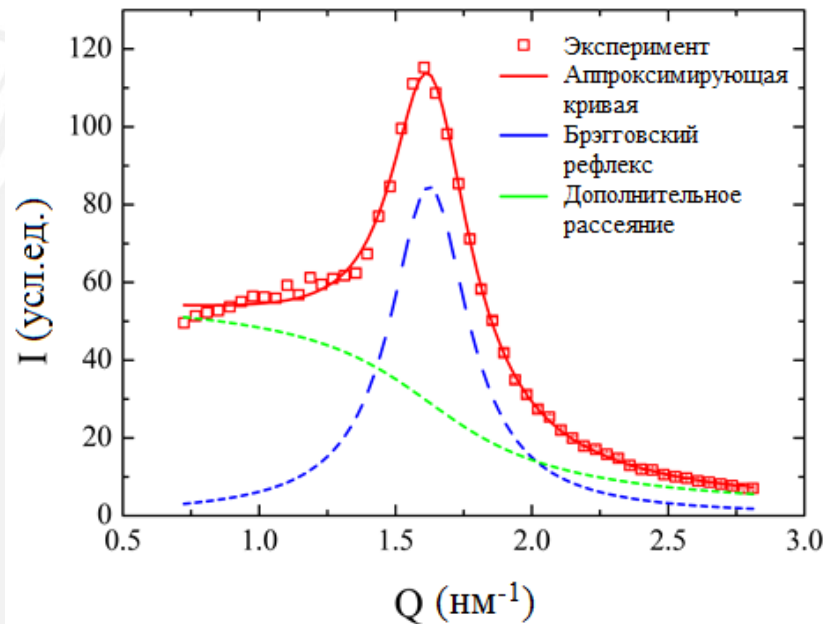


Основными достоинствами метода малоуглового рассеяния нейтронов при исследовании динамических свойств магнитных материалов по сравнению с традиционными методами нейтронной спектроскопии являются скорость измерений, разрешение по переданному импульсу, а также возможность измерения интенсивности нейтронного рассеяния в области малых переданных импульсов, $Q < k_s$. В случае соединения MnSi, эта область совершенно недостижима как для метода трёхосной спектроскопии, так и для метода спектроскопии по времени пролёта. Следует отметить, что возможность исследования анизотропии дисперсии магнонов в геликоидальных магнетиках методом трёхосной спектроскопии стала возможной лишь после и благодаря экспериментальному обнаружению этого факта методом малоуглового рассеяния нейтронов.



ЗАМЕЧАНИЯ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

3. В анализе экспериментальных данных автор использует расчеты для дифференциального сечения когерентного неупругого рассеяния нейтронов. В экспериментах по нейтронному рассеянию всегда имеется дополнительный вклад от некогерентного рассеяния. Учитывался ли данный вклад в обработке данных, и если да, то каким образом?



Поскольку вклад от некогерентного рассеяния не зависит от переданного импульса, его учитывали в выражении для аппроксимации экспериментальных данных добавляя константу.



ЗАМЕЧАНИЯ ОППОНЕНТА ДЕМИШЕВ С. В.

1. Диссертация явно страдает от недостаточно подробного описания исследуемых образцов. Автор приводит лишь оценку концентрации примесей в образцах (~2%), однако, ничего не говорит как о химическом составе примесей, так и о степени стехиометрии образцов. Кроме того, было бы уместно привести данные о морфологии образцов, включающие данные о размере кристаллитов и их ориентации, а также о доле объёма образца, занятого межкристаллитными границами.

Аттестация синтезированных образцов производилась на порошковом рентгеновском дифрактометре STOE-IPDS, расположенном в институте физики высоких давлений имени Л. Ф. Верещагина. Оценка примесей в образцах при этом соответствует максимально достижимому разрешению дифрактометра. При исследовании кристаллической структуры соединений $Mn_{1-x}Co_xGe$ на порошковом дифрактометре синхротронного излучения BM-01 Швейцарско-Норвежских линий, ESRF, Гренобль (Франция), не было обнаружено отклонения концентрационной зависимости постоянной решётки от закона Vegarda. Это свидетельствует о высокой степени чистоты стехиометрического состава исследуемых соединений. Исследования методом малоуглового рассеяния нейтронов показали, что размеры кристаллитов в образцах превышают величину в 3 мкм в каждом из направлений.

2. Наблюдение закона Гинье в парамагнитной фазе однозначно свидетельствует о наличии резкой границы у магнитных неоднородностей... – это типичный спиновый полярон или нагаевский феррон. Таким образом, можно заключить, что в работе Е.В. Алтынбаева содержится ещё один сильный (и может наиболее важный) научный результат... К сожалению, автор не рассмотрел вышеуказанные возможности...

Исследования методом малоугловой дифракции нейтронов показали, что в структуре твёрдых растворов соединений $Mn_{1-x}Fe_xGe$, $x < 0.6$, и $Mn_{1-x}Co_xGe$, $x < 1.0$, присутствует большое количество дефектов. Таким образом, доказательство существования поляронов в высокотемпературной фазе соединений $Mn_{1-x}Fe_xGe$ и $Mn_{1-x}Co_xGe$, $x < 0.45$, требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований и является предметом будущей научной работы.



ЗАМЕЧАНИЯ ОПОНЕНТА ДМИТРИЕНКО В. Е.

1. В главе 4 показано, что корреляционная длина геликоидальных флуктуаций не зависит от температуры при низких температурах и падает с ростом концентрации атомов Fe в соединении $Mn_{1-x}Fe_xGe$ вплоть до значений $x = 0.4$. Данное экспериментальное наблюдение является основополагающим для предположения о близости магнитной системы к точке квантового фазового перехода. Тем не менее не рассмотрены другие возможные причины для ограничения корреляционной длины магнитной структуры сверху. Такие, например, как спинодальный распад и дефектность структуры, проявляющиеся вследствие замещения атомов Mn атомами Fe.

Действительно, в результате исследования моногерманидов переходных металлов методом малоугловой дифракции нейтронов в широком диапазоне переданных импульсов, удалось выявить дефекты структуры соединений $Mn_{1-x}Fe_xGe$, $x < 0.6$, и $Mn_{1-x}Co_xGe$, $x < 1.0$, со сложной пространственной организацией. Тем не менее, наименее стабильным является чистое соединение $MnGe$, что подтверждается наибольшей интенсивностью рассеяния нейтронов на дефектах структуры этого соединения. Кроме того, исследования, выполненные методом малоуглового рассеяния нейтронов и синхротронного излучения не выявили спинодального распада твёрдых растворов $Mn_{1-x}Fe_xGe$, $x < 0.45$, и $Mn_{1-x}Co_xGe$, $x < 1.0$.

2. Конкуренция взаимодействия Дзялошинского-Мории и кубической анизотропии в кристаллах $Mn_{1-x}Co_xGe$ должна приводить к существованию ферромагнитной фазы в некотором интервале концентраций, а не только при $x = 0.9$, но этот вопрос в диссертации не исследован.

Безусловно, исходя из результатов представленных исследований следует ожидать, что магнитная система соединений $Mn_{1-x}Co_xGe$ упорядочивается ферромагнитно в некотором диапазоне концентраций x вблизи $x = 0.9$, что, предположительно, связано с изменением соотношения между энергией взаимодействия ДМ и кубической анизотропией. Однако, поскольку синтез моногерманидов переходных металлов в условиях высоких давлений и температур является новой и крайне трудоёмкой технологией получения материалов, проверка данного утверждения требует значительных усилий и является объектом будущих исследований.