

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Чубовой Надежды Михайловны на тему **«Магнитная структура кубического моносилицида марганца MnSi и соединений на его основе»**, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Диссертация Н.М. Чубовой посвящена изучению магнитной структуры кубического нецентросимметричного геликоидального магнетика чистого MnSi и соединения MnSi с примесью Ge. Исследована структура и границы А-фазы («скирмионной решетки») в объемной образце моносилицида марганца вблизи критической температуры, а также роль критических флуктуаций геликоидальной структуры в образовании А-фазы. Рассмотрены структура и магнитные свойства соединений MnSi с химически индуцированным отрицательным давлением. Основным методом исследования магнитных свойств было выбрано малоугловое рассеяние поляризованных нейтронов, так как данный метод является наиболее информативным при исследовании сложных магнитных структур. Аттестация магнитных свойств всех образцов предварительно проводилась путём измерения намагниченности с помощью установок типа СКВИД. С помощью этого метода были сделаны оценки температур фазовых переходов и критических магнитных полей.

Проведённые исследования крайне актуальны и востребованы, поскольку изучение геликоидальных кубических магнетиков со структурой B20 без центра инверсии занимает сегодня значительное место в физике магнетизма. Несмотря на многочисленные эксперименты и теоретические расчёты, природа магнитных явлений в геликоидальных кубических магнетиках со структурой типа B20 до сих пор до конца не понята. Особый интерес, в частности, вызывает происхождение А-фазы, свойства которой пытаются объяснить в рамках двух альтернативных подходов, формирования 3k-структуры и скирмионной решетки, соответственно.

Все вышеперечисленное показывает, что исследования, представленные в диссертации, являются **важными и актуальными**.

Во введении к диссертации дается краткий обзор литературы, обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи исследований, формулируются главные результаты диссертации. Рассматривается научная новизна и практическая ценность результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Отмечаются личный вклад автора и приводятся сведения об апробации работы.

В главе 1 рассматриваются магнитные свойства кубических магнетиков типа B20 без центра инверсии. Основное внимание акцентируется на следующих проблемах: сложный характер температурного фазового перехода, появление А-фазы на Н-Т фазовой диаграмме, квантовый фазовый переход, наблюдаемый при приложении давления, связь между кристаллографической киральностью и спиновой киральностью. Приводятся основные свойства теории скирмионов в объемных материалах и пленках. Отмечается, что фазовый переход в MnSi в нулевом магнитном поле в настоящее время хорошо изучен и качественно понят. Однако, преобразование магнитной структуры под действием магнитного поля остается малоизученным вопросом, для разрешения которого предложен метод малоуглового рассеяния нейтронов.

В главе 2 описываются образцы и детали экспериментальных методов исследования. В частности, описывается способ выращивания кристаллов чистого MnSi и твердых растворов $\text{MnSi}_{1-x}\text{Ge}_x$ с минимальным количеством краевых дислокаций. Качество образцов $\text{MnSi}_{1-x}\text{Ge}_x$ дополнительно контролировалось с помощью сканирующего электронного микроскопа с функцией рентгено-флуоресцентного спектрального анализа. Описана теория, лежащая в основе метода малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов. Отмечается, что особенностью метода является тот факт, что измерения можно проводить практически не возбуждая магнитную систему образца. Это оказывается особо полезным при исследовании систем вблизи фазовых переходов. Приводится принципиальная схема установки для малоуглового рассеяния нейтронов. Описан способ оценки температур фазовых переходов и критических магнитных полей с помощью установок типа СКВИД.

В главе 3 представлены исследования малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов, направленные на решение вопроса о происхождении А-фазы кубического геликоидального магнетика MnSi. Все полученные данные сведены в (H-T) - фазовую диаграмму, основываясь исключительно на эксперименте по нейтронной дифракции. Эти данные совместно с фактом об отсутствии рассеяния от отдельных скирмионов исключает теорию, которая настаивает на реальном скирмионном характере А-фазы. Сделан вывод, что соответствующая магнитная структура MnSi должна рассматриваться не как совокупность квазичастиц, а как суперпозиция трех спиралей, чьи волновые векторы образуют равносторонний треугольник.

В главе 4 обсуждаются результаты малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов при наложении внешнего магнитного поля. Показано, что в этом случае в MnSi наблюдается три магнитных состояния: (i) критические спиновые флуктуации спирали со случайно ориентированным волновым вектором Q (ii) коническая фаза с k параллельным полю H и (iii) гексагональная фаза с $k \perp H$. Установлено, что «скирмионная решетка» и конической фаза не коррелируют, но конкурируют друг с другом и сменяют друг друга при понижении температуры. Показано, что спиновые флуктуации, приводящие к кольцу интенсивности рассеяния в Q-пространстве выше T_C не связаны со структурой «скирмионной решетки». Показано, что «скирмионная решетка» – двумерная модулированная гексагональная спиновая структура. Выше T_C наблюдается коническая структура и структура скирмионной решетки, где они не конкурируют, но сосуществуют и ограничены только корреляционными длинами флуктуаций. Продemonстрировано, что существование «скирмионной решетки» коррелирует с наличием киральных флуктуаций спирали с корреляционной длиной $\xi \geq 2d$, что в два раза больше, чем период спирали. Коническая решетка прослеживается до более высоких температур, и видна, если корреляционная длина $\xi > d$. Сделан вывод, что стабильность двух структур ограничена разными пространственными корреляционными длинами.

В главе 5 показано, что соединение MnSi с химически индуцированным отрицательным давлением демонстрирует увеличение температуры упорядочения T_C . В ходе работ также были обнаружены изменения в значении критического поля H_{C2} и волнового вектора k магнитной системы. Установлено, что эти изменения связаны с изменением среднего значения спина. Эти данные хорошо согласуются с наблюдениями в тонких пленках MnSi на подложке Si. Обнаружены серьезные изменения в области существования А-фазы, а именно, диапазон температур её существования шире для образца MnSi легированного Ge (от 27 К до $T_C = 39$ К), в сравнении с чистым MnSi (с 27 К до $T_C = 29$ К).

Приведенные в диссертации результаты исследований и выводы, безусловно, являются **новыми и актуальными**. Основные результаты следующие:

1. Структура А-фазы в монокристалле MnSi представляет собой не совокупность квазичастиц, а суперпозицию волн, трех спиновых спиралей, чьи волновые векторы образуют равносторонний треугольник. Симметрия структуры А-фазы подразумевает, что расстояние между соседними узлами в реальном пространстве сверхрешетки равно $(2/\sqrt{3})ds$, где ds – период одномерной спиральной структуры. Этот факт означает, что А-фазу решетки определяют не топологически защищенные узлы, а энергетический ландшафт кристаллов B20 , т. е. константы D и J , вместе с магнитным полем B , когда D и J определяют расстояние между узлами, период модуляции, а поле B ориентирует плоскость двумерных модуляций.
2. А-фаза лишь имитирует скирмионную решетку. Сложность структуры подчеркивается двумерным характером ее модуляций, которые отличаются от одномерных модуляций простой спирали или конической фазы. Спиновые флуктуации в MnSi не связаны со структурой скирмионной решетки. Коническая структура и структура скирмионной решетки может наблюдаться выше T_C .
3. Существование скирмионной решетки коррелирует с наличием высоковозбужденных киральных флуктуаций спирали с корреляционной длиной $\xi \geq 2d$, что в два раза больше, чем период спирали (в диапазоне $T_C < T < 30 \text{ K}$). Коническая решетка прослеживается до высоких температур, и детектируется, если корреляционная длина ξ больше, чем d .
4. Увеличение параметра решетки для легированных Ge соединений указывает на действие отрицательного давления, что приводит к увеличению среднего спина образца MnSi , и непосредственно влияет на критическую температуру и критическое поле H_{C2} .
5. Установлено, что температура упорядочения T_C увеличилась на 35% в соединении MnSi за счёт допирования Ge в 1%, что сопоставимо со значениями в тонких пленках MnSi . Значения H_{C2} и k связаны с основными преобладающими взаимодействиями магнитной системы, такими как жесткость спиновых волн (A/a^2) и постоянная Дзялошинского (SD). Рассчитанные энергии основного взаимодействия A/a^2 равны $50 \text{ meV}/\text{\AA}^2$ для легированных германием и идеальных образцов MnSi , в то время как SD/a на 10% больше для легированного соединения.

Наряду с безусловными достижениями, по диссертации могут быть высказаны следующие замечания:

1. Во Введении, в разделе научная новизна, пункт 1, указано «Впервые сформулирована дилемма в интерпретации описания структуры А-фазы: концепция скирмиона, как квазичастицы, и концепция "скирмионной" решётки, как типа экзотической спиновой структуры».

По-видимому, здесь должны быть указаны дилемма скирмионов и суперпозиция трех спиралей, 3к-структура. Это же относится и к первой главе, где 3к-структура иногда называется скирмионной решёткой. Такая путаница, видимо, связана с тем, что в работах, развивающих скирмионный сценарий, при высокой плотности скирмионов, те формируют гексагональную решетку, нейтронная дифракция на которой дает

сигнал, схожий с 3k-структурой.

2. Во введении, основные положения, выносимые на защиту, пункт 2. Фраза «При этом наблюдаются отдельные капли скирмионной решётки, количество которых уменьшается с понижением температуры. При этом не наблюдается плавления скирмионной решётки в отдельные скирмионы или кластеры».

Можно ли говорить в данном случае о фазовом переходе первого рода? Применима ли в этом случае теория Бразовского [А. Бразовский, ЖЭТФ 68, 175, 1975], предсказывающая возникновение такого перехода из-за конкуренции спиральной и 3k-фазы?

3. На стр. 17 указаны критические индексы корреляционной длины и намагниченности. Критический показатель $\nu=0.62$ близок к значению гейзенберговской модели $\nu=0.61$, тогда как значение $2\beta=0.44$ отличается от соответствующего значения $\beta=0.36$.

Чем вызвано такое отклонение?

4. На Рис. 1.6 на фазовой диаграмме не расшифровано обозначение NFL. По-видимому, не ферми-жидкостная фаза. Это же относится к сокращению МУРН, малоугловое рассеяние нейтронов, не расшифрованное в тексте.

5. На стр. 35 упомянут термин мозаичность и указаны соответствующие единицы измерения. Было бы желательно дать расшифровку этого термина.

6. На стр. 72 имеется фраза «Мы приписываем это кольцо интенсивности к каплям скирмионной решетки, где трансляционный порядок фиксирован, но ориентационный порядок полностью теряется».

Скорее здесь имела ввиду обратная ситуация, когда теряется трансляционный порядок, а ориентационный сохраняется.

7. В Заключение, можно было бы объединить пункты 2 и 3, а также 5 и 6.

Высказанные замечания не носят принципиального характера и не ставят под сомнение достижения диссертанта. Следует особо подчеркнуть крайнюю важность результатов Глав 3 и 4. Тот факт, что волновой вектор 3k- структуры совпадает с волновым вектором спиральной структуры, фактически невозможно объяснить в рамках скирмионного сценария. Другим важным фактом является обнаружение критических флуктуаций в области А-фазы со случайно ориентированными волновыми векторами, которые, видимо, играют ключевую роль в объяснении природы А-фазы.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Она обеспечивается использованием современных экспериментальных методов и сравнением с имеющимися теоретическими предсказаниями.

Диссертация Н.М. Чубовой представляет собой законченное научное исследование, проведенное на высоком квалификационном уровне. Ее содержание

соответствует специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Основные ее результаты опубликованы в ведущих международных научных журналах, докладывались на международных конференциях и семинарах. Диссертация полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Чубова Надежда Михайловна, несомненно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

доктор физико-математических наук,
профессор Уральского федерального
университета имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина



Овчинников Александр Сергеевич

13 мая 2016 г.

Служебный адрес:

620002, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

Тел.: +7-343-269-44-31

e-mail: alexander.ovchinnikov@urfu.ru

Подпись Овчинникова А.С.

Заверяю Начальник отдела
документационного обеспечения
управления
Вихренко Т.Е. / Вихренко Т.Е.