

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет математики, фізики та інформаційних технологій

(повне найменування інституту/факультету)

Кафедра теоретичної фізики та астрономії

(повна назва кафедри)

Д и п л о м н а р о б о т а

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: **«Особливості магнітного впорядкування
в системі іонів з цілим спіном»**

«Peculiarities of magnetic ordering in a system of ions with integer spins»

Виконав: студент денної форми навчання
напряму підготовки 6.040203 Фізика

Шаповалов Арсеній Ігорович

Керівник д.ф.-м.н., проф. Адамян В.М. _____

Рецензент к.ф.-м.н., доц. Завальнюк В.В.

Рекомендовано до захисту:
Протокол засідання кафедри
№ ____ від _____.____.2019 р.

Захищено на засіданні ЕК № ____
протокол № ____ від _____.____.2019 р.
Оцінка _____ / _____ / _____
(за національною шкалою, шкалою ECTS, бали)

Завідувач кафедри

Голова ЕК

(підпис) Адамян В.М.

(підпис) Шевчук В.Г.

Одеса – 2019

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Основні моделі в теорії магнетизму.	6
1.1. Модель Гейзенберга	6
1.2. XYZ – модель	7
1.3. Модель Ізінга	8
1.4. Одноіонна анізотропія	9
2. Метод самоузгодженого поля	10
2.1. Магнетики зі спіном $\frac{1}{2}$	10
2.2. Спін-1 магнетики	13
2.3. Спін-2 магнетики	16
2.3.1. Умова $T=0$	16
2.3.2. Випадок скінчених температур	20
3. Чисельні розрахунки та аналіз отриманих результатів	21
3.1. Залежність намагніченості від параметра D	22
3.2. Залежність намагніченості від температури	23
Результати роботи та висновки	25
Список використаних джерел	26

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ККФ – кутова квадрупольна фаза

КФ – квадрупольна фаза

КФМФ – квадрупольно-ферромагнітна фаза

ОКФ – осьова квадрупольна фаза

ПКФ – площинна квадрупольна фаза

ФМФ – ферромагнітна фаза

ФРС – фаза з редукцією спіну

ВСТУП

Ця робота присвячена дослідженню упорядкованих фаз і фазових переходів в однорідноупорядкованих спін-2 магнетиках.

Для магнетиків зі спіном $S=1/2$ виникнення однорідного магнітного впорядкування обов'язково супроводжується появою відмінної від нуля намагніченості. При цьому середні значення $\langle S^\alpha \rangle$ ($\alpha = x, y, z$) виступають в якості компонент параметра порядку. За умови $S>1/2$ в системі можуть виникати фази з рівною нулю намагніченістю і відмінними від нуля середніми значеннями компонент тензора квадрупольного магнітного моменту $\langle Q^\beta \rangle \neq 0$. Це так звані фази з квадрупольною намагніченістю або квадрупольні фази (КФ). Крім того, можливе виникнення квадрупольно-ферромагнітних фаз (КФМФ), в яких відмінні від нуля як $\langle S^\alpha \rangle$, так і $\langle Q^\beta \rangle$.

Спочатку КФ були виявлені в магнетиках з $S=1$ [1-3]. При цьому в спін-1 магнетиках можливо два типи квадрупольного упорядкування: осьове і площинне. Осьове впорядкування індукується біквадратичною обмінною взаємодією $K \cdot (S_1 S_2)^2$ і являє собою стан, в якому за відсутності зовнішніх полів на кожному вузлі спін з однаковою ймовірністю може приймати значення 1 і -1. Площинне впорядкування індукується одноіонною анізотропією виду $D \cdot (S^Z)^2$, при цьому магнітні моменти іонів здійснюють прецесію в площині, що перпендикулярна до осі квантування.

Для магнетиків з $S>1$ КФ виявляють нові властивості. Наприклад, для $S=3/2$ в системі можлива реалізація тензорних нематичної і антінематичної фаз. Прикладами таких систем можуть служити ультрахолодні фермі-гази: ^{132}Cs , ^9Be , ^{135}Ba [4].

До магнетиків зі спіном $S=2$ належать конденсати атомів ^{87}Rb і ^{23}Na [5]. Дослідженню таких магнетиків присвячено зовсім невелика кількість робіт ([5-6] та ін.). В [6] показано, що при великих значеннях константи одноіонної анізотропії у порівнянні зі спін-1 магнетиками відбувається

суттєва зміна фазової картини системи. Побудовано фазову діаграму, на якій реалізуються феромагнітна фаза (ФМФ), площинна (ПКФ) та осьова (ОКФ) квадрупольні фази та квадрупольно-феромагнітна фаза. При цьому ФМФ та ПКФ є симетричними фазами щодо дії оператора $\exp(i\phi S^Z)$.

На нашу думку, в системах зі спіном 2 може виникати ще одна симетрична фаза – в якій в основному стані для кожного іона $S^Z = 1$. Це фаза з редукцією спіну (ФРС). Тому фазовий перехід із ФМФ в ПКФ може відбуватися як безпосередньо, так і через ФРС.

Для того, щоб дослідити переходи в ПКФ у «чистому вигляді», нами обрана модель, яка містить одноіонну анізотропію і не містить вищі обмінні інваріанти. Оскільки одноіонна анізотропія може індукувати ПКФ тільки при цілих значеннях спіну, ми вибрали для розгляду випадок $S = 2$. Крім того, для виключення можливості виникнення в системі КФМФ ми урахували обмінну взаємодію в ізінговському вигляді. Ми, також, врахували можливість включення поздовжнього магнітного поля. За цих умов в системі можуть реалізовуватися лише симетричні фази.

В першому розділі роботи коротко розглянуто основні моделі теорії магнетизму та роль одноіонної анізотропії в формуванні магнітного порядку.

Другий розділ присвячений методу самоузгодженого поля для випадків, коли значення спіну дорівнює $\frac{1}{2}$, 1 і 2.

У третьому розділі проведено розрахунки залежності відносної намагніченості від параметра одноіонної анізотропії за скінченних температур. Також побудовано температурну залежність відносної намагніченості.

Головний висновок роботи – за наявності зовнішнього магнітного поля в спін-2 магнетику фазовий перехід із ФМФ у ПКФ відбувається як двоетапний перехід через ФРС.

РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

В результаті роботи було доведено неможливість двоетапних фазових переходів в одновісних спін-2 магнетиках за відсутності зовнішнього магнітного поля. Також показано, що за наявності поля такі переходи відбуваються.

Розраховано залежність відносної намагніченості від параметра одноіонної анізотропії як для одноступеневих, так і для двоступеневих переходів.

Розраховано температурну залежність відносної намагніченості для різних значень параметра одноіонної анізотропії.

Основні висновки роботи такі:

1. В одновісних спін-2 магнетиках з одноіонною анізотропією типу «легка площина» існує три симетричні магнітоупорядковані фази: ФМФ, ФРС та ПКФ.
2. У відсутності зовнішнього магнітного поля ФРС реалізовуватися не може.
3. За наявності поздовжнього магнітного поля фазовий перехід за параметром D із ФМФ у ПКФ відбувається як двоетапний перехід через ФРС.
4. У відсутності поля за малих значень параметра D перехід за температурою із ФМФ у ПКФ є переходом другого роду. Зі збільшенням D , починаючи з певного його значення, перехід стає переходом першого роду.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Онуфриева Ф.П. Низкотемпературные свойства спиновых систем с тензорным параметром порядка // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1985. – Т. 80, № 6. – С. 2270–2287.
2. Нагаев Э. Л. Магнетики со сложными обменными взаимодействиями. – М.: Наука, 1988. – 232 с.
3. Вальков В.В., Мацулева Г.Н., Овчинников С.Г. Влияние сильного кристаллического поля на спектральные свойства магнетиков с биквадратным обменом // Физика твердого тела. – 1989. – Т. 31, №6. – С.60-68.
4. Клевец Ф.Н., Неклюдов, Е.А., Фридман Ю.А. Фазовые состояния негейзенберговского магнетика со спином $S = 3/2$ на треугольной решетке // Физика твердого тела. – 2018. – Т. 60, №10. – С. 1937-1946.
5. Космачев О.А., Фридман Ю.А., Иванов Б.А. Фазовые состояния магнетика со спином $S = 2$ и изотропным обменным взаимодействием // Письма в ЖЭТФ. – 2017. – Т. 105, №7. – С. 444-448.
6. Фридман Ю.А., Космачев О.А., Эйнгорн Б.Л. Фазовые переходы в ферромагнетике с биквадратичным обменным взаимодействием и гексагональной одноионной анизотропией // Физика низких температур. – 2005. – Т. 31, №6. – С. 687-694.
7. Тябликов С.В. Методы квантовой теории магнетизма. – М.: Наука, 1965. – 336 с.
8. Heisenberg W. Zur Theorie des Ferromagnetismus // Zeitschrift für Physik. – 1928. – V. 49, N 9-10. – S. 619-636.
9. Вонсовский С.В. Магнетизм. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.
10. Moriya T. Theory of magnetism of NiF_2 // Phys. Rev. – 1960. – V. 117, N 3. – P. 635–647.

11. Furrer A., Purwins H.G. Magnetic excitations of NdAl_2 // Phys. Rev. B. – 1977. – V. 16, No 5. – P. 2131–2140.
12. Holden T.M., Buyers W.J.L., Purwins H.G. Magnetic excitations of DyAl_2 in a magnetic field // J. Phys. F. – 1984. – V. 14. – P. 2701–2718.
13. Anders K., Bucher E., Darack S., Maita J.P. Induced- moment ferromagnetism in Pr_3Tl // Phys. Rev. B. – 1972. – V. 6, N 7. – P. 2716–2724.
14. Doner B., Visser D., Steigenberger U. Magnetic excitations in the quasi one-dimensional antiferromagnetic singlet groundstate system CsFeBr_3 // Z. Phys. B – 1988. – V. 72, No 4. – P. 487–496.
15. Гехт Р.С. Магнитные состояния и фазовые переходы во фрустрированных антиферромагнетиках с треугольной решеткой // УФН. – 1989. – Т. 159, № 2. – С. 261–296.
16. Шаповалов І.П., Сайко П.О. Гістерезисні явища в магнетиках з тензорними взаємодіями // Укр. фіз. журн. – 2011. – Т. 56, № 3 – С. 248–253.
17. Weiss P., Journ. Phys. Red., 6, 667 (1907).
18. Кринчак Г.С. Физика магнитных явлений. – М.: МГУ, 1985. – 336 с.
19. Барьяхтар В.Г. К теории магнитоупорядоченных кристаллов с биквадратичным обменным взаимодействием // ФТТ. – 1975. – Т. 17, № 6. – С. 1744–1748.
20. Onufrieva F.P., Shapovalov I.P. Peculiarities of spontaneous breaking continuous symmetry in magnets with tensor interactions // J. Moscov. Phys. Soc. – 1991. – V. 1. – P. 63–83.
21. Дьяконов В.П., Зубов Є.Е, Онуфриева Ф.П. [и др.] Индуцированные магнитным полем фазовые переходы в синглетных магнетиках с ферромагнитным обменом // ЖЭТФ. – 1987. – Т. 93, № 5(11). – С. 1775–1788.

22. Sayko P.A., Shapovalov I.P. Axial quadrupole phase of a uniaxial spin-1 magnet. //Journal of Magnetism and Magnetic Materials – 2015.- V.392-P.134–138.
23. Сайко П. А., Шаповалов И.П. Магнитное упорядочение мелкодисперсного магнетика во внешнем магнитном поле. // Физика аэродисперсных систем. – 2014. – № 51. – С. 27-32.
24. Шаповалов И. П. Квадрупольные фазы и фазовые переходы в одноосных магнетиках с тензорными взаимодействиями // Физ. низк. темп. – 2013. – Т. 39, № 6 – С. 663–671.