

ГИГАНТСКИЕ СПИНОВЫЕ ФЛУКТУАЦИИ В НОРМАЛЬНЫХ И СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ФАЗАХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ (ОБЗОР)

В.И. Гребенников, гл. науч. сотр., Институт физики металлов Уральского отделения РАН, д-р физ.-мат. наук, greben@imp.uran.ru

А.З. Солонцов, вед. науч. сотр., Центр фундаментальных и прикладных исследований, ВНИИ автоматики (Росатом), д-р физ.-мат. наук, asolontsov@mail.ru

В статье отражены новейшие тенденции в области изучения и создания высокотемпературных сверхпроводников – систем, позволяющих проводить электрический ток без сопротивления – основанные на связи сверхпроводимости и магнетизма и существенной роли гигантских магнитных (спиновых) флуктуаций.

Ключевые слова: высокотемпературная сверхпроводимость, магнетизм, гигантские спиновые флуктуации, магнитная динамика, энергоэффективность, энергосбережение.

GIANT SPIN FLUCTUATIONS IN NORMAL AND SUPERCONDUCTING PHASES OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS (REVIEW)

V.I. Grebennikov, Chief Research of Institute of Metal Physics Ural Branch RAS, Doctor of Physics and Mathematics, greben@imp.uran.ru

A.Z. Solontsov, Leading Researcher of Applied Research Centre, All-Russia Research Institute of Automatics (ROSATOM), Doctor of Physics and Mathematics, asolontsov@mail.ru

The article reflects the latest trends in research and development of high – temperature superconductors systems, which allow to conduct the electric current without resistance based on the communication of superconductivity and magnetism and essential role of gigantic magnetic (spin) fluctuations.

Key words: high-temperature superconductivity, magnetism, giant spin fluctuations, magnetic dynamics, energy efficiency, energy saving.

Со времен открытия Камерлинг-Оннесом в 1911 г. явления сверхпроводимости в ртути – протекания электрического тока без сопротивления – прошло более 100 лет. За последовавшие 75 лет был открыт целый класс «традиционных» сверхпроводников с температурами сверхпроводящих переходов T_c , не превосходящими $\sim 20^\circ$ К. За это время был хорошо понят механизм их сверхпроводимости, связанный электрон-фононным взаимодействием, приводящим к спариванию электронов и к их бесстолкновительной динамике и нулевому электросопротивлению. При этом традиционные сверхпроводники получили широкое практическое применение, требовавшее использования температур жидкого гелия $\sim 4,2^\circ$ К, а в научном сообществе укрепилось мнение об отсутствии сверхпроводимости при более высоких температурах.

Совершенно неожиданно более 25 лет назад было открыто явление высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в соединениях на основе купратов, где были достигнуты температуры сверхпроводящих переходов $T_c \sim 140^\circ$ К, что впервые позволило использовать сверхпроводники при азотных температурах и привело к появлению новых технологий, в частности, в микроэлектронике, медицине, к созданию мощных магнитов и линий бездиссипатив-

ной передач электроэнергии, способствующих энергоэффективности и энергосбережению. В последующие двадцать лет прогресс в области ВТСП практически отсутствовал: механизм ВТСП в купратах установлен не был, хотя, по-видимому, он является нетрадиционным и не обеспечивается простым электрон-фононным взаимодействием. На протяжении этого времени купраты оставались единственным классом ВТСП, несмотря на многочисленные попытки обнаружить новые типы высокотемпературных сверхпроводников. Стремительно росло число физиков, считавших ВТСП на основе купратов уникальным явлением, присутствующим именно этому классу материалов.

Неожиданно в 2008 г. монополия купратов на высокотемпературную сверхпроводимость закончилась: практически одновременно несколькими исследовательскими группами были открыты сверхпроводники на основе пниктидов железа [1] с максимальными температурами $T_c \sim 56^\circ \text{K}$. Это открытие имело фундаментальное значение, продемонстрировавшее, что нетрадиционная (не связанная с фононами) сверхпроводимость не связана с единственным классом материалов на основе купратов и может быть обнаружена и в других классах веществ. Было также найдены общие свойства, присущие этим двум классам ВТСП, связанные с взаимным влиянием магнетизма и сверхпроводимости. Недопированные купраты и соединения железа оказались, соответственно, непроводящими двухмерными и металлическими трехмерными антиферромагнетиками, в которых обнаружены хорошо определенные магны с линейным законом дисперсии. В антиферромагнитных пниктидах железа магны при приближении к границе зоны Бриллюэна сильно затухали, попадая в электрон-дырочный континуум стонеровских возбуждений [2].

При этом в нормальных и сверхпроводящих фазах ВТСП на основе купратов и железа с помощью неупругого рассеяния нейтронов были обнаружены сильно затухающие квазиупругие спиновые флуктуации (СФ) [3, 4], указывающие на сильные электронные корреляции, обусловленные взаимодействием электронов, которые можно рассматривать как электронную ферми-жидкость [5]. Расчет средних квадратов амплитуд СФ в ВТСП на основе купратов и железа, основанный на экспериментах по неупругому рассеянию нейтронов [3, 4], указывает на гигантский характер СФ в обоих классах сверхпроводников, квадраты амплитуд которых $\langle m^2 \rangle \sim 3\mu_B^2$ (где μ_B – магнетон Бора), оказываются сравнимыми с величинами локальных магнитных моментов.

Свойства различных классов сверхпроводников

Свойства	Низкотемпературные сверхпроводники	ВТСП купраты	Пниктиды железа
Максимальная T_c	$< 30^\circ \text{K}$	134°K	56°K
Корреляционные эффекты	Отсутствуют	Сильные магнитные корреляции	Сильные магнитные корреляции
Связь с магнетизмом	Магнетизм отсутствует	Непроводящие антиферромагнетики в недопированном состоянии	Антиферромагнитные металлы в недопированном состоянии
Параметр сверхпроводящего порядка	Однозонный s -волновой	Однозонный d -волновой	Двухзонный s -волновой
Механизм сверхпроводимости	Электрон-фононный	Магнитный или (и) электронфононный	Магнитный
Размерность системы	3-мерная	2-мерная	3-мерная с сильной анизотропией

Основные характеристики низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводников иллюстрируются таблице, где также приведены данные о возможной симметрии (s или d) сверхпроводящего параметра порядка, характеризующей его зависимость от импульса электронов [6, 7].

Гигантские амплитуды СФ, в том числе в области низких температур, указывают на их квантовый характер, связанный с эффектами нулевых колебаний, которые вплоть до 90-х годов пренебрегались.

Исследование СФ было начато в 60-х гг., когда под ними имелись в виду парамагноны — сильно затухающие коллективные состояния в электрон-дырочном континууме (см. книгу [6]). Взаимодействие парамагнонов пренебрегалось, и они рассматривались как независимые гауссовы флуктуации. С развитием теории магнетизма оказалось, что модель невзаимодействующих парамагнонов не позволяет описать наблюдаемые температурные зависимости магнитных восприимчивостей, магнитного параметра порядка, температуры магнитных переходов.

Существенный шаг в развитии теории СФ был сделан целым рядом исследовательских групп в 70–80-х гг., и привел к созданию самосогласованной перенормировочной (ССП) теории [8]. Наиболее существенный вклад в ее создание внесли группы Т. Мория (Токийский университет, Япония), которая разработала микроскопический подход на основе гамильтониана Хаббарда [8], и группа Г. Лонзарича (Кавендишская лаборатория, г. Кэмбридж, Англия), предложившей более простой феноменологический подход, основанный на модели Гинзбурга-Ландау [9]. Как было показано сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института автоматики им. Н.Л. Духова (ВНИИА) [5], СПП-теория учла взаимодействие парамагнонов в первом порядке теории возмущений и явилась аналогом теории слабоангармонических кристаллов.

Было отмечено, что нулевые СФ приводят к сильному спиновому ангармонизму и делают подходы [6], основанные на слабодействующих СФ (парамагнонах) непригодными. Сотрудниками ВНИИА совместно с учеными Рурского университета (г. Бохум, Германия) Лаборатории Нееля (г. Гренобль, Франция), Лаборатории Эймса (г. Эймс, США) была построена термодинамика [10–15] и развита нелинейная динамика магнитных металлов [5, 16–22], учитывающая эффекты сильного спинового ангармонизма. Эти работы заложили основу современной теории сильновзаимодействующих СФ и позволяют развить новые подходы в теории ВТСП, связанные с влиянием сильного ангармонизма СФ на сверхпроводимость.

Иной подход в теории СФ развивался группой В.И. Гребенникова в Институте физики металлов (ИФМ) УрО РАН. Ими была построена теория СФ, локализованных на магнитных атомах, и учтено их взаимодействие, приводящие к магнитным фазовым переходам. В таком подходе СФ не имеют пространственной дисперсии и рассматриваются как внутриатомные флуктуации. Подход локализованных СФ [23–30] взаимно дополняет подход, развиваемый во ВНИИА, где основное внимание уделено пространственной дисперсии СФ, и применим для описания свойств сильных магнетиков типа железа и никеля. Как показывают эксперименты по неупругому рассеянию нейтронов в ВТСП на основе купратов и железа [2–4], в этих системах СФ обладают существенной пространственной дисперсией, которая лучше описывается в подходе группы ВНИИА.

Основной прогресс в описании влияния СФ на механизм сверхпроводящего перехода связан с феноменологическим описанием взаимодействия электронов со СФ и последующим решением уравнений Элиашберга [31]. Наиболее активные группы, связанные с этим направлением, работают в Кавендишской лаборатории (Группа физики конденсированных сред, рук. Г. Лонзарич) и Университете Токио (Факультет физики, группа Т. Мории) (см. обзоры [6, 7, 32]).

Сравнительно недавно в теории высокотемпературной сверхпроводимости стал развиваться подход, основанный на непertурбативных методах квантовой теории поля и, в част-

ности, на методе голографической дуальности [33, 34]. Такой подход позволяет естественным образом учитывать симметрию параметра порядка сверхпроводника [35], вычислять двухточечные корреляционные функции (восприимчивости) и плотности состояний (дисперсионные соотношения квазичастиц) [36], и изучать их зависимости от температуры, внешнего магнитного поля и степени легирования образцов. Это позволяет определять температуру фазового перехода, критическое значение внешнего магнитного поля, глубину проникновения магнитного поля в образец. Получаемые общие закономерности позволяют прогнозировать свойства сверхпроводящих материалов в зависимости от их структуры и могут способствовать поиску новых высокотемпературных сверхпроводников. В настоящее время ведущие научные группы, использующие голографический подход, работают в Массачусетском технологическом институте (США), Гарвардском университете (США), Университете Кембриджа (г. Кембридж, Англия), многочисленные исследовательские группы начинают работать в научных центрах Европы (г. Лейден, Голландия) и др.

Полученные к настоящему времени в нашей стране и за рубежом результаты по теории спиновых флуктуаций и учету влияния спиновых флуктуаций на сверхпроводимость позволяют построить общую теорию спиновых флуктуаций в нормальных и сверхпроводящих фазах высокотемпературных сверхпроводников, учитывающую сильный спиновый ангармонизм, обусловленный гигантскими спиновыми флуктуациями. Такая теория позволит исследовать эффекты влияния спиновых флуктуаций на термодинамику и кинетику этих систем и изучить механизмы сверхпроводящих, магнитных и структурных переходов, связанные со спиновыми флуктуациями. При этом полученные новые теоретические результаты позволят разработать технологии поиска и создания новых высокотемпературных сверхпроводников и их использования для эффективной передачи электроэнергии, достижения энергоэффективности и энергосбережения.

Список литературы

1. Kamihara Y., Watanabe T., Hirano T., Hosono H. Iron-based layered superconductor $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ($x = 0.05-0.12$) with $T_c = 26^\circ \text{K}$ // *Journal of American Chemical Society*, 2008, vol. 130.
2. Diallo S.O., Antropov V.P., Perring T.G., et al. Itinerant magnetic excitations in antiferromagnetic CaFe_2As_2 // *Physical Review Letters*. 2009, vol. 102.
3. Hayden S.M., Aeppli G., Mook H.A., et al. Comparison of the high-frequency magnetic fluctuations in insulating and superconducting $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ // *Physical Review Letters*. 1996, vol. 76.
4. Inosov D.I., Park J.T., Bourges P., et al. Normal-state spin dynamics and temperature-dependent spin-resonance energy in optimally doped $\text{Ba}(\text{Fe}_{1.85}\text{Co}_{0.15})\text{As}_2$ // *Nature Physics*, 2010, vol. 6.
5. Solontsov A.Z. Zero-point spin fluctuation effects in anharmonic weak itinerant electron magnets // *International Journal of Modern Physics B*. 1993, vol. 7; Spin fluctuations and anharmonicity in itinerant electron magnetism // *International Journal of Modern Physics B*. 2005, vol. 19.
6. Изюмов Ю.А. Спин-флуктуационный механизм сверхпроводимости и симметрия параметра порядка // *Успехи физических наук*. 1999. Том 169; Изюмов Ю.А., Курмаев Э.З. Высоко-температурные сверхпроводники на основе FeAs-соединений. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009.
7. Plakida N.M. High-temperature superconductivity: experiment and theory. Berlin: Springer, 1995.
8. Moryia T. Spin Fluctuations in Itinerant Electron Magnetism. Berlin: Springer, 1985.
9. Lonzarich G.G. In *Electron*, ed. M. Springford. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
10. Solontsov A.Z. and Wagner D. Spin anharmonicity and zero-point fluctuations in weak itinerant magnets // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 1994, vol. 6.
11. Solontsov A.Z. and Wagner D. Zero-point spin fluctuations and magneto. Vol. effect in itinerant electron magnetism // *Physical Review B*. 1995, vol. 51.
12. Lacroix C., Solontsov A. and Ballou R. Spin fluctuations in itinerant electron antiferromagnetism and anomalous properties of $\text{Y}(\text{Sc})\text{Mn}_2$ // *Physical Review B*. 1995, vol. 54.

13. Solontsov A. and Lacroix C. Specific heat of soft-mode spin fluctuations in itinerant electron magnets // *Physics Letters A*. 1997, vol. 224.
14. Solontsov A., Vasil'ev A. and Wagner D. Soft-mode spin fluctuations in itinerant electron magnetism. Proceedings of the II-nd NATO ARW Workshop on Fluctuation Effects and Critical Phenomenon; In: *Itinerant Electron Magnetism: Fluctuation Effects*, Eds. D. Wagner, W. Brauneck and A. Solontsov, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998.
15. Solontsov A., Silin V.P. Uranium nitride – a spin polarized weak itinerant electron antiferromagnet with strongly correlated electrons // *Physics Letters A*. 2005, vol. 334.
16. Силин В.П., Солонцов А.З. Теория температурной зависимости спектра магнонов в ферромагнитных металлах // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1985. Том 89.
17. Solontsov A.Z. and Vasil'ev A.N. Spin fluctuation damping of magnons in itinerant electron magnets // *Physics Letters A*. 1993, vol. 177.
18. Solontsov A.Z., Vasil'ev A.N. and Wagner D. Longitudinal spin fluctuations in itinerant electron ferromagnets // *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1995, vol. 7.
19. Solontsov A., Brauneck W., Wagner D. and Vasil'ev A. Nonlinear magnetic dynamics of itinerant ferromagnets: «colossal» magnetoresistive manganites // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2001, vol. 236.
20. Solontsov A. and Lacroix C. Linear vs non-linear magnetic and charge relaxation in itinerant ferromagnets: magnetoresistive manganites // *Physics Letters A*, 2002, vol. 298.
21. Solontsov A. and Lacroix C. Nonlinear spin fluctuations in the Fermi liquid of itinerant electron ferromagnets // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2003, vol. 258–259.
22. Solontsov A. and Antropov V.P. Phenomenological model of longitudinal spin fluctuations in itinerant antiferromagnets // *Physical Review B*. 2010, vol. 81.
23. Turov E.A., Grebennikov V.I. Magnetism and transport phenomena of transition metals in spin fluctuation theory of itinerant electrons // *Physica B+C*, 1988, vol. 149.
24. Turov E.A., Grebennikov V.I. The transition metal properties in the spin fluctuation theory // *Physica B: Condensed Matter*, 1989, vol. 159.
25. Reser B.I., Grebennikov V.I., Melnikov N.B. Temperature hysteresis in the dynamic spin-fluctuation theory for strong ferromagnets // *Solid State Phenomena*, 2009, vol. 152–153.
26. Kuznetsova T.V., Grebennikov V.I. Study of the superconducting gap in $\text{Fe}_{0.5}\text{TiSe}_2$ single crystal by ultrahigh-resolution photoemission spectroscopy // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2009, vol. 73.
27. Grebennikov V.I., Melnikov N.B., Reser B.I. Spin-fluctuation theory beyond Gaussian approximation // *Journal of Physics A*. 2010, vol. 43.
28. Reser B.I., Melnikov N.B., Grebennikov V.I. Beyond Gaussian approximation in the spin-fluctuation theory of metallic ferromagnetism // *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, vol. 200.
29. Melnikov N.B., Reser B.I., Grebennikov V.I. Spin-fluctuation theory beyond Gaussian approximation // arXiv:1004.4278.
30. Melnikov N.B., Reser B.I., Grebennikov V.I. Extended dynamic spin-fluctuation theory of metallic magnetism // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2011, vol. 23.
31. Monthoux P. and Pines D. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$: A nearly antiferromagnetic Fermi liquid // *Physical Review B*. 1993, vol. 47.
32. Moriya T. and Ueda K. Spin fluctuations and high temperature superconductivity // *Advances in Physics*. 2000, vol. 49.
33. Sachdev S. Condensed matter and AdS/CFT // arXiv:1002.2947v1.
34. McGreevy J. Holographic duality with a view toward many-body physics // *Advances in High Energy Physics*. 2010, vol. 723.
35. Hartnoll S.A., Herzog C.P., Horowitz G.T. // Building a holographic superconductor // *Physical Review Letters*, 2008, vol. 101.
36. Benini F., Herzog C.P. and Yarom A. Holographic Fermi arcs and a d-wave gap // *Physics Letters B*, vol. 701.

References

1. Kamihara Y., Watanabe T., Hirano T., Hosono H. Iron-based layered superconductor $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ($x = 0.05 - 0.12$) with $T_c = 26^\circ \text{K}$. *Journal of American Chemical Society*, 2008, vol. 130.
2. Diallo S.O., Antropov V.P., Perring T.G., et al. Itinerant magnetic excitations in antiferromagnetic CaFe_2As_2 . *Physical Review Letters*, 2009, vol. 102.
3. Hayden S.M., Aeppli G., Mook H.A., et al. Comparison of the high-frequency magnetic fluctuations in insulating and superconducting $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$. *Physical Review Letters*, 1996, vol. 76.
4. Inosov D.I., Park J.T., P. Bourges, et al. Normal-state spin dynamics and temperature-dependent spin-resonance energy in optimally doped $\text{Ba}(\text{Fe}_{1.85}\text{Co}_{0.15})\text{As}_2$. *Nature Physics*, 2010, vol. 6.
5. Solontsov A.Z. Zero-point spin fluctuation effects in anharmonic weak itinerant electron magnets. *International Journal of Modern Physics B*. 1993, vol. 7; Spin fluctuations and anharmonicity in itinerant electron magnetism. *International Journal of Modern Physics B*. 2005, vol. 19.
6. Izyumov Y.A. (1999) *Spin-fluktuatsionnyi mekhanizm sverkhprovodimosti i simmetriya parametra poryadka* [Spin-fluctuation mechanism of superconductivity and the symmetry of the order parameter], *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Success of Physical Sciences], vol. 169.
7. Plakida N.M. High-temperature superconductivity: experiment and theory. Berlin: Springer, 1995.
8. Moryia T. Spin Fluctuations in Itinerant Electron Magnetism. Berlin: Springer, 1985.
9. Lonzarich G.G. In *Electron*, ed. M. Springford. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
10. Solontsov A.Z. and Wagner D. Spin anharmonicity and zero-point fluctuations in weak itinerant magnets. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1994, vol. 6.
11. Solontsov A.Z. and Wagner D. Zero-point spin fluctuations and magneto. Vol. effect in itinerant electron magnetism. *Physical Review B*. 1995, vol. 51.
12. Lacroix C., Solontsov A. and Ballou R. Spin fluctuations in itinerant electron antiferromagnetism and anomalous properties of $\text{Y}(\text{Sc})\text{Mn}_2$. *Physical Review B*. 1995, vol. 54.
13. Solontsov A. and Lacroix C. Specific heat of soft-mode spin fluctuations in itinerant electron magnets. *Physics Letters A*. 1997, vol. 224.
14. Solontsov A., Vasil'ev A. and Wagner D. Soft-mode spin fluctuations in itinerant electron magnetism. *Proceedings of the II-nd NATO ARW Workshop on Fluctuation Effects and Critical Phenomenon*; In: *Itinerant Electron Magnetism: Fluctuation Effects*, Eds. D. Wagner, W. Brauneck and A. Solontsov, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998.
15. Solontsov A.Z., Silin V.P. Uranium nitride – a spin polarized weak itinerant electron antiferromagnet with strongly correlated electrons. *Physics Letters A*. 2005, vol. 334.
16. Silin V.P., Solontsov A.Z. (1985) *Teoriya temperaturnoi zavisimosti spektra magnonov v ferromagnitnykh metallakh* [Theory of the temperature dependence of the spectrum of magnons in ferromagnetic metals], *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki* [Journal of experimental and theoretical physics], vol. 89.
17. Solontsov A.Z. and Vasil'ev A.N. Spin fluctuation damping of magnons in itinerant electron magnets. *Physics Letters A*. 1993, vol. 177.
18. Solontsov A.Z., Vasil'ev A.N. and Wagner D. Longitudinal spin fluctuations in itinerant electron ferromagnets. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1995, vol. 7.
19. Solontsov A., Brauneck W., Wagner D. and Vasil'ev A. Nonlinear magnetic dynamics of itinerant ferromagnets: «colossal» magnetoresistive manganites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2001, vol. 236.
20. Solontsov A. and Lacroix C. Linear vs non-linear magnetic and charge relaxation in itinerant ferromagnets: magnetoresistive manganites. *Physics Letters A*. 2002, vol. 298.
21. Solontsov A. and Lacroix C. Nonlinear spin fluctuations in the Fermi liquid of itinerant electron ferromagnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2003, vol. 258–259.
22. Solontsov A. and Antropov V.P. Phenomenological model of longitudinal spin fluctuations in itinerant antiferromagnets. *Physical Review B*. 2010, vol. 81.
23. Turov E.A., Grebennikov V.I. Magnetism and transport phenomena of transition metals in spin fluctuation theory of itinerant electrons. *Physica B+C*, 1988, vol. 149.

24. Turov E.A., Grebennikov V.I. The transition metal properties in the spin fluctuation theory. *Physica B: Condensed Matter*, 1989, vol. 159.
25. Reser B.I., Grebennikov V.I., Melnikov N.B. Temperature hysteresis in the dynamic spin-fluctuation theory for strong ferromagnets. *Solid State Phenomena*, 2009, vol. 152–153.
26. Kuznetsova T.V., Grebennikov V.I. Study of the superconducting gap in $\text{Fe}_{0.5}\text{TiSe}_2$ single crystal by ultrahigh-resolution photoemission spectroscopy. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2009, vol. 73.
27. Grebennikov V.I., Melnikov N.B., Reser B.I. Spin-fluctuation theory beyond Gaussian approximation. *Journal of Physics A*. 2010, vol. 43.
28. Reser B.I., Melnikov N.B., Grebennikov V.I. Beyond Gaussian approximation in the spin-fluctuation theory of metallic ferromagnetism. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, vol. 200.
29. Melnikov N.B., Reser B.I., Grebennikov V.I. Spin-fluctuation theory beyond Gaussian approximation. arXiv:1004.4278.
30. Melnikov N.B., Reser B.I., Grebennikov V.I. Extended dynamic spin-fluctuation theory of metallic magnetism. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2011, vol. 23.
31. Monthoux P. and Pines D. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$: A nearly antiferromagnetic Fermi liquid. *Physical Review B*, 1993, vol. 47.
32. Moriya T. and Ueda K. Spin fluctuations and high temperature superconductivity. *Advances in Physics*. 2000, vol. 49.
33. Sachdev S. Condensed matter and AdS/CFT. arXiv:1002.2947v1.
34. McGreevy J. Holographic duality with a view toward many-body physics. *Advances in High Energy Physics*, 2010, vol. 723.
35. Hartnoll S.A., Herzog C.P., Horowitz G.T. Building a holographic superconductor. *Physical Review Letters*, 2008, vol. 101.
36. Benini F., Herzog C.P. and Yarom A. Holographic Fermi arcs and a d-wave gap. *Physics Letters B*, vol. 701.