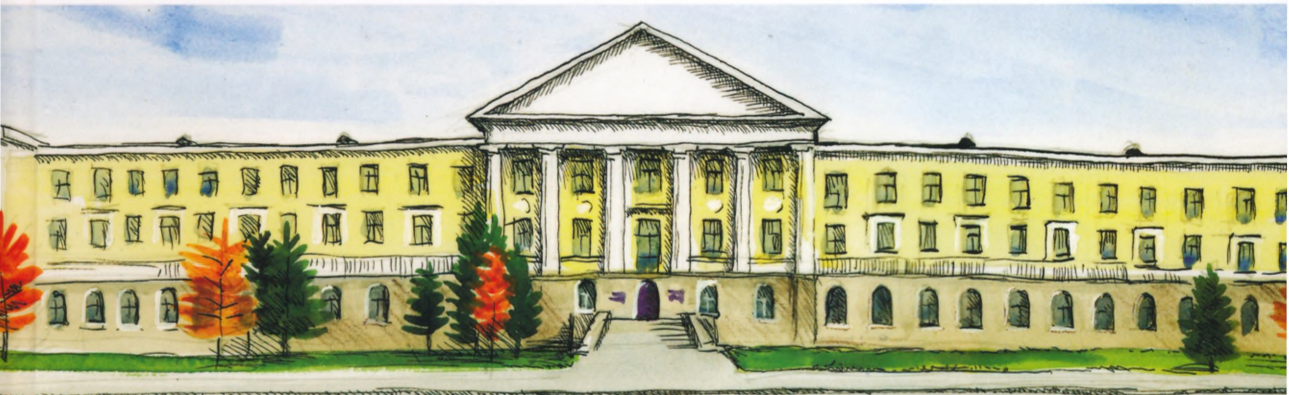




*Институту физики металлов  
85 лет*

# ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ НА УРАЛЕ



История научных направлений  
Института физики металлов

УДК 061.62(470.54)  
ББК 72.4(235.55)712  
Ф 50

*Рекомендовано к изданию ученым советом  
Института физики металлов*

Ф 50 **ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ НА УРАЛЕ. История научных направлений Института физики металлов.** Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2017 – 616 с.  
ISBN 978-5-903359-12-7

В сборнике материалов представлена ретроспектива формирования и развития научных направлений Института и всех его лабораторий от образованного в 1932 году Уралфизтеха до ИФМ УрО РАН образца 2017 года.

*Главный редактор* – академик РАН В.В. Устинов

*Руководитель проекта* – М.В. Дегтярев

*Рецензент* – М.А. Коротин

ISBN 978-5-903359-12-7

© ИФМ УрО РАН, 2017  
© Коллектив авторов

---

# CURRICULUM VITAE

Института физики металлов  
имени М.Н. Михеева УрО РАН

---

**C**urriculum vitae в переводе с латинского – «ход жизни». В научных кругах этот термин обычно применяется для обозначения краткого описания жизни и профессиональных навыков научных работников. Мы же попытаемся составить Curriculum vitae целого научного института – Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, который празднует в 2017 году свой 85-летний юбилей.

Важнейшим элементом жизнеописания научного института является история становления и развития **основных направлений научных исследований**. Термин «Основные направления научных исследований», характеризующий стратегические пути развития научного института, стал употребляться как юридическое понятие лишь с 1970 года, когда Президиум Академии наук СССР впервые официально утвердил основные направления исследований для всех научных учреждений Академии наук СССР. До этого времени основные направления работы либо находили своё отражение в названии самого института и названиях созданных в нём научных подразделений (групп, лабораторий, отделов), либо просто фигурировали в том или ином виде в различных служебных документах.

Ниже вниманию читателя будут представлены два раздела. Первый призван осветить основные направления научных исследований нашего института в целом, тогда как во втором разделе направления научных исследований будут детализированы на уровне лабораторий.

---

# ОТДЕЛ

теоретической  
и математической  
физики

---

---

# ЛАБОРАТОРИЯ

квантовой теории  
конденсированного  
состояния

---

# Состав лаборатории

## (по состоянию на 1 января 2017 г.)

- Ирхин Валентин Юрьевич, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.
- Анохин Анатолий Олегович, научный сотрудник
- Журавлев Андрей Константинович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Зарубин Александр Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Игнатенко Андрей Николаевич, научный сотрудник
- Игошев Петр Алексеевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
- Кассан-Оглы Феликс Александрович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.
- Прошкин Алексей Игоревич, младший научный сотрудник
- Садовский Михаил Виссарионович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., академик РАН

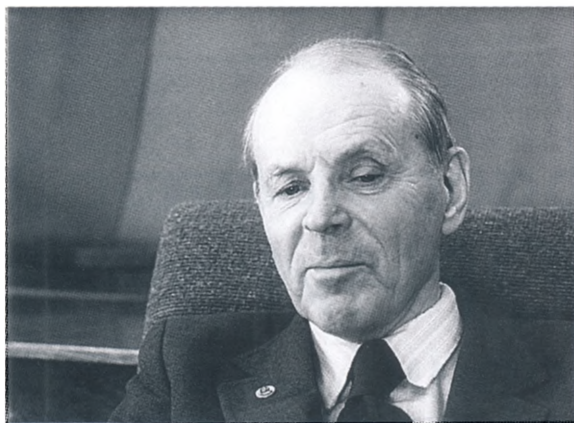
# ИСТОРИЯ ЛАБОРАТОРИИ квантовой теории конденсированного состояния

Лаборатория квантовой теории конденсированного состояния ИФМ УрО РАН является преемником лаборатории теории твёрдого тела, созданной выдающимся российским физиком Юрием Александровичем Изюмовым (1933–2010) в 1974 г., когда его группа выделилась из лаборатории магнитной нейтронографии. Это произошло по инициативе основоположника Сергея Васильевича Вонсовского (1910–1998), который стоял у истоков создания Института физики металлов в Свердловске.

В более общем контексте, лаборатория продолжает богатые традиции научной школы по квантовой теории твёрдого тела, заложенные С.В. Вонсовским и его учителем С.П. Шубиным, которые принесли на Урал традиции российской интеллигенции. С.В. Вонсовский окончил Ленинградский университет в 1932 г. Он благодарно вспоминал В.И. Смирнова, О.Д. Хвольсона, В.А. Фока, П.И. Лукирского и других своих преподавателей в ЛГУ. После окончания учёбы его направили в Свердловск – в Уральский физико-технический институт, где приступил к работе под руководством молодого профессора Семёна Петровича Шубина (1908–1938).

Скоро появились общие статьи Шубина и Вонсовского по полярной модели металлов и полупроводников [1], которая была предложена как синтез гомеоплярной модели Гейзенберга, описывающей систему локализованных моментов, и метода Слэтера для описания электронной системы металла. Этот подход позволял одновременно описывать электрические и магнитные свойства веществ. В кристалле, где на атом приходится один электрон, он означает учет полярных состояний – двоек и дырок, т.е. дважды занятых и пустых узлов, и ведёт к физически наглядной картине.





С.В. Вонсовский



С.В. Вонсовский и Б.Н. Ельцин

В исходной формулировке модели были учтены перескоки электронов с узла на узел, а также все типы межэлектронного взаимодействия.

Эти работы, заложившие основы многоэлектронной физики твёрдого тела, выполнены путём трудных и громоздких вычислений (удобного метода вторичного квантования в то время ещё не было). Они опубликованы в престижном журнале английского Королевского общества и в харьковском журнале «Phys. Zs. UdSSR» на немецком языке. Тем не менее они остались во многом недооценёнными, в каком-то смысле опередив своё время. Идеи, содержащиеся в них, затем переоткрывались и развивались за рубежом (здесь следует отметить знаменитую модель Хаббарда, являющуюся частным случаем полярной модели).

В 1937 г. Шубин был арестован в ходе репрессий и вскоре погиб на Колыме, Вонсовский продолжал развитие общих идей. Работы Вонсовского в области квантовой теории твёрдого тела, особенно многоэлектронной теории металлов и полупроводников, теории ферро- и антиферромагнетизма, сверхпроводимости получили мировое при-

знание. В 1946 г. он предложил  $s$ - $d$ -обменную модель [2, 3], основанную на совместных обсуждениях с Шубиным. В отличие от полярной модели, в  $s$ - $d$ -обменной модели существование локализованных магнитных моментов не выводится, а постулируется; при этом подсистемы, ответственные за магнетизм и электропроводность разделены: коллективизированные « $s$ -электроны» являются подвижными, а локализованные « $d$ -электроны» дают главный вклад в магнитный момент. Исходно модель  $s$ - $d$ -обмена была построена для  $d$ -металлов, где она даёт лишь полуфеноменологическую картину, однако её постулаты оказались даже лучше обоснованы для систем с  $f$ -электронами, обычно хорошо локализованными.

Позже  $s$ - $d$ -модель использовалась для описания ряда  $d$ - и  $f$ -соединений, например, так называемых «систем с тяжёлыми фермионами», которые сейчас интенсивно изучаются. Удивительно плодотворной она оказалась и для магнитных полупроводни-

ков. В дальнейшем близкие представления были использованы для теоретического описания манганитов с гигантским магнитосопротивлением на основе  $\text{LaMnO}_3$ .

Судьба s-d-модели оказалась очень интересной и непростой, в некотором смысле даже драматической. В истории физики она выступала в разнообразных ипостасях. В последнее время в зарубежной физической литературе s-d-модель часто именуется моделью «решёток Кондо». Такая историческая несправедливость связана с исключительной важностью эффекта Кондо – пожалуй, самого красивого явления в физике твёрдого тела. Тем не менее сам Кондо, исследуя аномалии магнитного s-d-рассеяния, исходил из гамильтониана в представлении вторичного квантования, который был предложен Вонсовским и Туровым [4].

Большинство уральских физиков-теоретиков прошлого века считали С.В. Вонсовского своим учителем. Большое внимание ему приходилось уделять и организационной работе. При его активном участии в ИФМ были начаты работы по нейтронографии, физике низких температур, радиационной физике, теории дислокаций...

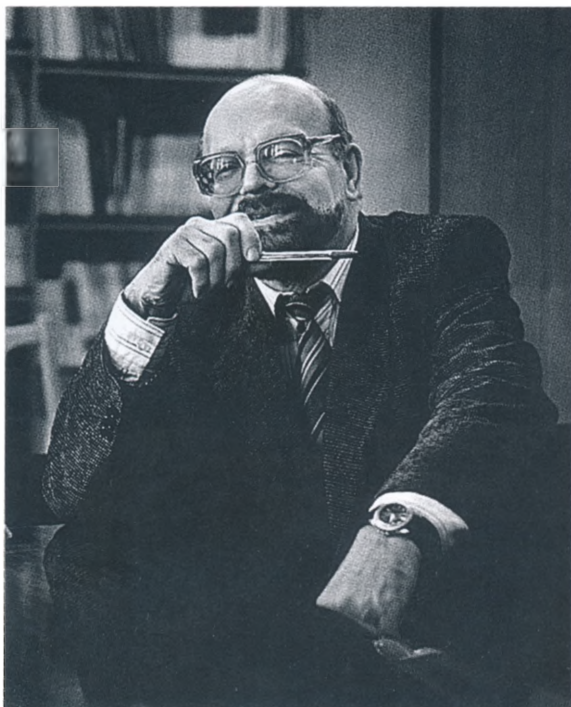
Ю.А. Изюмов поступил в аспирантуру при кафедре теоретической физики УрГУ им. Горького к С.В. Вонсовскому. После её окончания в 1960 г. он защитил кандидатскую диссертацию «Некоторые вопросы спин-волновой теории ферромагнетизма». С 1959 г. и до конца жизни Юрий Александрович работал в Институте физики металлов УрО РАН, куда его пригласил Вонсовский. В 1967 г. защитил докторскую диссертацию, в 1991 г. был избран членом-корреспондентом РАН, а в 2006 г. – действительным членом РАН.

Самостоятельная научная работа Юрия Александровича началась с развития теории рассеяния медленных нейтронов в магнитных кристаллах. Эта тема была одной из основных для созданной в ИФМ по инициативе С.В. Вонсовского лаборатории магнитной нейтронографии, куда был направлен Изюмов. Используя исследовательский реактор ИВВ-2М, сотрудники лаборатории изучали структуру и динамику сверхпроводящих и магнитных материалов, неупорядоченных кристаллов, в том числе после радиационного воздействия.

Эти исследования нуждались в теоретической поддержке. Ю.А. Изюмовым с сотрудниками были разработаны теоретические основы нейтронографии и нейтронной спектроскопии магнетиков: создана теория рас-



Ю.А. Изюмов в костюме доктора Оксфордского университета, 1965 г.



Ю.А. Изюмов

сеяния нейтронов в магнитных кристаллах с широким использованием магнитной симметрии (аппарата представлений пространственных групп) и предложены эффективные методы расшифровки магнитных структур и спектров магнитных возбуждений. Эти методы широко применяются в нейтронографических центрах по всему миру. В 1966 г. вышла в свет «Магнитная нейтронография» [5], которая была первой в мире монографией по этой тематике. Она была вскоре переведена на английский и стала настольной книгой для многих экспериментаторов. В дальнейшем Ю.А. Изюмов продолжил исследования по теории симметрии вместе с В.Е. Найшем и В.Н. Сыромятниковым; вместе с соавторами он опубликовал ещё несколько монографий по вопросам рассеяния нейтронов в твёрдых телах. В 1986 г. Ю.А. Изюмов в составе авторского коллектива был удостоен Государственной пре-

мии СССР за создание теории рассеяния поляризованных нейтронов на сложных магнитных структурах.

Ю.А. Изюмовым с коллегами был выполнен также цикл работ по теории фазовых переходов в магнитоупорядоченных кристаллах, который обобщён в монографии [6], изданной в Советском Союзе и за рубежом. В частности, была разработана идея обменных мультиплетов в приложении к переходам в магнитных системах.

Большое внимание Юрий Александрович уделял исследованию сверхпроводимости d-систем. В книге [7], ставшей классической, была в частности проанализирована проблема сосуществования сверхпроводимости и ферромагнетизма. В конце жизни Ю.А. Изюмов вернулся к этой проблеме и совместно с казанскими коллегами развивал теорию F/S-систем, образованных из слоёв ферромагнетика и сверхпроводника.

Важным направлением исследований Ю.А. Изюмова была квантовая теория магнетизма. В 1960-х годах в сотрудничестве с М.В. Медведевым он построил теорию магнитоупорядоченных кристаллов с примесями, предсказал квазилокальное состояние в магнитном спектре кристалла со слабо связанным примесным атомом [8].

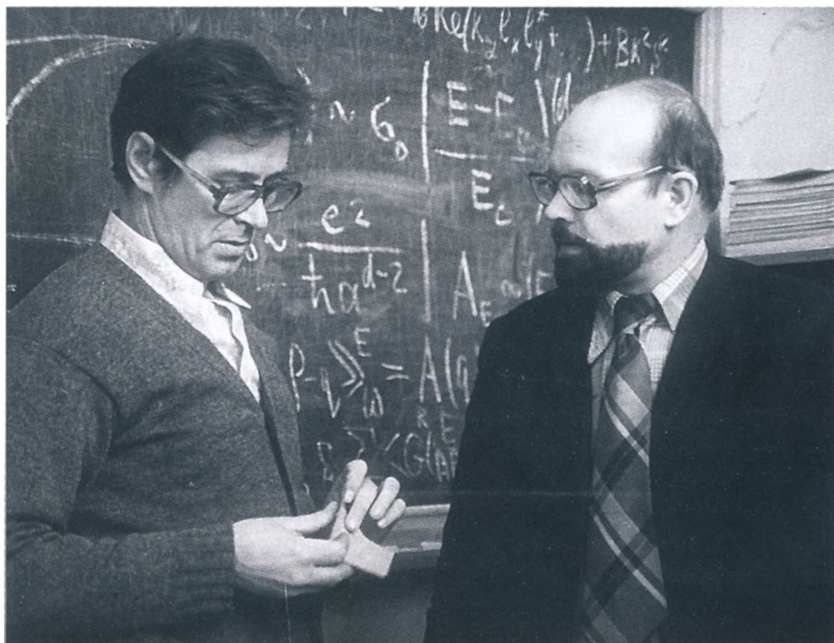
Ю.А. Изюмов внёс большой вклад и в развитие модельной теории магнитных систем. Еще в аспирантских работах под руко-

водством Вонсовского он исследовал спектр взаимодействующих электронов и спиновых волн в d- и f-металлах в рамках s-d-обменной модели [9]. В конце 1960-х годов он с коллегами развил вариант диаграммной техники для спиновых операторов, изложенный в монографии в соавторстве с Ф.А. Кассан-Оглы и Ю.Н. Скрябиным [10], а в дальнейшем (при активном участии Ю.Н. Скрябина) большое внимание уделял развитию и других теоретико-полевых методов [11].

Много сил Юрий Александрович отдал популяризации многоэлектронной модели Хаббарда, когда она приобрела новую актуальность в связи с открытием высокотемпературной сверхпроводимости [12,13]. Он сам активно работал в этой области: занимался разработкой диаграммной техники для X-операторов Хаббарда в применении к сильно коррелированным электронным системам, в том числе к теории двойного обмена в манганитах (совместно Б.М. Летфуловым, рано ушедшим из жизни).

В последние годы Ю.А. Изюмов успешно сотрудничал со специалистами ИФМ, занимающимися зонными расчётами, особенно в связи с развитием и применением нового подхода для анализа сильно коррелированных систем – динамической теорией среднего поля (DMFT). Результаты этих исследований приведены в монографии [14].

Для стиля научной деятельности Ю.А. Изюмова характерно стремление к обобщению материала во всех областях, где он ра-



В.Е. Найш, Ю.А. Изюмов



Ю.А. Изюмов, В.М. Лаптев, С.Б. Петров



В.В. Дякин, Г.Л. Будрина, Ю.А. Изюмов, Ф.А. Кассан-оглы,  
В.М. Лаптев, В.Н. Сыромятников

ботал. Он автор 15 монографий, многие из которых переведены и изданы за рубежом, большого числа обзорных работ (в том числе 20 обзоров в УФН) и более двухсот научных статей. Разбираясь в какой-то новой для себя проблеме, он стремился передать свой интерес читателю.

Юрия Александрович заражал и увлекал своих сотрудников и коллег своей, казалось, неисчерпаемой энергией. Находясь рядом с ним, было невозможно не работать. Вся лаборатория, штурмуя актуальную проблему, сидела на многочасовых семинарах, которые неоднократно переносились на следующий день. Так «разбиралась» теория симметрии, метод ренормгруппы, новые идеи в физике неупорядоченных систем... «Пройти» через этот семинар было серьезным испытанием для докладчика. Участники задавали трудные вопросы, стараясь понять любую мелочь. Всё это обеспечивало высокую научную продуктивность лаборатории Изюмова.

Ещё в 1965 г. Ю.А. Изюмов прошёл шестимесячную стажировку в Оксфордском университете у профессора Р. Пайерлса, которую называл самым важным и волнующим моментом своей научной карьеры. С тех пор он поддерживал широкие научные связи с зарубежными учёными, много путешествовал. У него были друзья во многих странах, с которыми он успешно совместно работал, о чём рассказал в своих воспоминаниях [15].

В дальнейшем лаборатория расширялась за счёт прихода целого ряда новых сотрудников, многие из которых стали известными учёными. На протяжении многих лет эта лаборатория была одной из ведущих теоретических групп на Урале. В 1988 г., после того, как в неё влилась бывшая лаборатория математических методов, она была преобразована в Отдел математической и теоретической физики. В нём в разное время работали такие известные физики-теоретики, как доктора физико-математических наук М.В. Медведев, В.Е. Найш, М.В. Садовский, Ю.Н. Скрыбин, В.Н. Сыромятников, В.М. Лаптев, В.В. Дякин, Ф. А. Кассан-Оглы, М.И. Кацнельсон, В.Ю. Ирхин, Ю.Н. Горностырев, А.А. Катанин и другие известные специалисты в области теории твёрдого тела.

Лаборатория Изюмова стала своеобразной кузницей кадров для ряда других подразделений. В 1987 г. из её состава выдели-

лась лаборатория теоретической физики Института электрофизики УрО РАН; её возглавил М.В. Садовский, к которому присоединился М.В. Медведев. Ю.Н. Скрябин возглавил отдел работ на атомном реакторе и лабораторию магнитной нейтронографии. Ю.Н. Горностырев руководит Институтом квантового материаловедения.

В 1982 г. по инициативе и при непосредственном участии академика С.В. Вонсовского в составе лаборатории твёрдого тела была организована группа квантовой теории металлов, куда вошел первоначально и сам С.В. Вонсовский, а также М.И. Кацнельсон и В.Ю. Ирхин. Затем эта группа была расширена и реорганизована в лабораторию квантовой теории металлов под руководством профессора М.И. Кацнельсона; она существовала до 2004 г. в составе отдела математической и теоретической физики.

Членами данной научной группы был решён ряд фундаментальных задач теории твёрдого тела. Среди наиболее важных достижений можно отметить:

- теоретическое исследование электрон-магнонного взаимодействия в ферромагнитных полупроводниках (совместно с М.И. Ауслендером);
- построение теории формирования аномального магнитного упорядочения в решётках Кондо и системах с тяжёлыми фермионами в рамках s-d-обменной модели [16];
- разработка теории корреляционных эффектов а полуметаллических ферромагнетиках с учётом неквазичастичных вкладов, на основе которой дано объяснение аномалий кинетических свойств этих веществ [17, 18];
- развитие метода многоэлектронных операторов Хаббарда в применении к различным задачам теории твёрдого тела [19, 20];
- исследование магнитных фазовых диаграмм и перехода металл-изолятор и в рамках многоэлектронных моделей [21, 22];



М.В. Медведев, М.В. Садовский, В.Н. Сыромятников, В.Е. Найш, Ю.А. Изюмов, О.В. Гурин, 1982



В.Г. Корешков, О.В. Гурин, Б.М. Летфулов, В.Н. Сыромятников, Ф.А. Кассан-оглы, В.М. Лаптев, В.Е. Найш, М.В. Медведев



М.С. Горбачев, М.И. Кацнельсон, В.Ю. Ирхин, 2000



А.И. Лихтенштейн, М.И. Кацнельсон, В.Ю. Ирхин



М.И. Кацнельсон, В.Ю. Ирхин, М.И. Ауслендер

- описание насыщенного и ненасыщенного ферромагнетизма в соединениях переходных металлов с сильными корреляциями [23,24];
- разработка многоэлектронной теории термодинамических и магнитных свойств полупроводников с промежуточной валентностью [25];
- решение задачи о последовательном теоретико-полевом описании термодинамики и магнитного упорядочения слоистых и цепочечных магнетиков, позволяющем проводить количественное сравнение с экспериментальными данными [26].

Кроме модельных исследований, М.И. Кацнельсон (вместе с А.В. Трефиловым из Курчатовского научного центра, А.И. Лихтенштейном, Ю.Н. Горностыревым и другими сотрудниками) интенсивно проводил первопринципные расчёты величин магнетизма и решёточных свойств металлов, развивая соответствующие методы.

В настоящее время М.И. Кацнельсон – профессор Университета Радбауда (Нидерланды, 2004 г.), лауреат премии Спинозы (2013 г.), в 2014 г. избран членом Нидерландской королевской академии наук. Вместе со своей научной группой в Голландии он продолжает исследования в области теории сильно коррелированных систем, магнетизма и особенно физики графена.

В 2011 г. лаборатория квантовой теории конденсированного состояния была воссоздана под руководством академика М.В. Садовского. Основные научные интересы его деятельности связаны с электронной

теорией неупорядоченных систем (локализация Андерсона, псевдощель, фазовые переходы металл-диэлектрик), теорией высокотемпературной сверхпроводимости [27]. Он разработал теоретико-полевой подход в теории локализации, самосогласованную теорию локализации, теорию сверхпроводников, находящихся

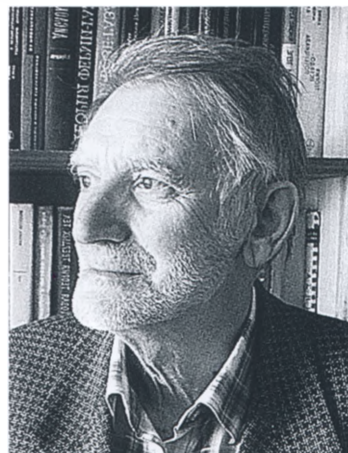
вблизи перехода Андерсона, построил точно решаемые модели псевдощелевого состояния, модели влияния беспорядка на пайерлсовский структурный переход. В последние годы М.В. Садовский разрабатывает обобщения DMFT в теории сильно коррелированных систем, ведёт теоретические исследования новых высокотемпературных сверхпроводников на основе железа [29]. Широко известны также его монографии по квантовой теории поля и статистической физике [30–32].

С 2014 г. М.В. Садовский является научным руководителем отдела теоретической и математической физики ИФМ УрО РАН, а возглавляет лабораторию квантовой теории конденсированного состояния д.ф.-м.н. В.Ю. Ирхин. В сфере его научных интересов квантовая теория магнетизма и различные эффекты электронных корреляций в твёрдых телах. В лаборатории продолжают исследования по многим направлениям теории конденсированного состояния. Вот некоторые из них:

- Многоэлектронное описание коллективизированного ферромагнетизма (А.О. Анохин, А.В. Зарубин).
- Модельное описание низкоразмерных и фрустрированных магнетиков, в том числе магнитокалорического эффекта (Ф.А. Кассан-Оглы, А.В. Зарубин, А.И. Прошкин, А.Н. Игнатенко).
- Модельное и первопринципное исследование магнитных свойств переходных и редкоземельных металлов, их сплавов и соединений, особенно полуметаллический ферромагнетизм. Теория магнитных фазовых переходов и переходов металл–диэлектрик в сильно коррелированных системах (П.А. Игошев, А. В. Зарубин).
- Развитие и применение к задачам теории твёрдого тела методов компьютерного моделирования классических и квантовых многочастичных систем, в том числе динамической теории среднего поля, методов Монте-Карло и численной ренормгруппы (А.О. Анохин, П.А. Игошев, А.К. Журавлев, А.Н. Игнатенко).

Отметим некоторые последние результаты, полученные при участии сотрудников лаборатории в последние годы.

Для гамма-железа (ГЦК-решётка) [33] и альфа-железа (ОЦК-решётка) [34] в рамках представлений о различной локализации  $t_{2g}$  и  $e_g$  состояний [35, 36] были рассмотрены магнитные неустойчивости в рамках динамической теории среднего поля. Путём вычисления локальной восприимчивости была исследована природа магнитных состояний в этих материалах: было показано, что для гамма-железа при низких температурах эти состояния имеют кол-



Ю.Н. Скрябин



М.В. Садовский





Сидят: В.Ю. Ирхин, П.А. Игошев, Ф.А. Кассан-оглы. Стоят: А.О. Анохин, А.В. Зарубин, А.И. Прошкин, М.В. Садовский, А.К. Журавлев, А.Н. Игнатенко

лективизированный характер, тогда как для альфа-железа узкие зоны, имеющие сингулярности ван Хова, демонстрируют проявление эффективных локальных моментов.

В работах [37–39] (некоторые результаты обобщены в монографии [40]) было исследовано формирование коллинеарного ферро- и антиферромагнитного порядка, а также спирального магнитного порядка для квадратной и различных кубических решёток в модели Хаббарда в рамках обобщённого приближения Хартри-Фока и метода вспомогательных бозонов, учитывающего корреляции. Минимизация энергии системы по параметрам магнитной структуры позволяет выбрать тип магнитного порядка, реализующегося в основном состоянии для данных параметров системы (электронная концентрация, величина внутриатомного кулоновского взаимодействия, интегралы переноса). Возникающие переходы первого рода приводят к расслоению на фазы с различным типом магнитного упорядочения.

В.Ю. Ирхин

## Список литературы

1. S. Schubin, S. Wonsowsky, Proc. Roy. Soc. A **145**, 159 (1934); Zs. Sow. Phys. **7**, 292 (1935); **10**, 348 (1936).
2. С.В. Вонсовский, ЖЭТФ **16**, 981 (1946).
3. С.В. Вонсовский, *Магнетизм*, Наука, Москва (1971), 1032 с.
4. С.В. Вонсовский, Е.А. Туров, ЖЭТФ **24**, 419 (1953).
5. Ю.А. Изюмов, Р. П. Озеров, *Магнитная нейтронография*, Наука, Москва (1966), 532 с.
6. Ю.А. Изюмов, В.Н. Сыромятников, *Фазовые переходы и симметрия кристаллов*, Наука, Москва (1984), 245 с.
7. С.В. Вонсовский, Ю.А. Изюмов, Э.З. Курмаев, *Сверхпроводимость переходных металлов, их сплавов и соединений*, Наука, Москва (1977), 287 с.
8. Ю.А. Изюмов, М.В. Медведев, *Теория магнитоупорядоченных кристаллов с примесями*, Наука, Москва (1970), 271 с.
9. С.В. Вонсовский, Ю.А. Изюмов, УФН **77**, 377 (1962); **78**, 3 (1962).
10. Ю.А. Изюмов, Ф.А. Кассан-оглы, Ю.Н. Скрябин, *Полевые методы в теории ферромагнетизма*, Наука, Москва (1974), 224 с.
11. Ю.А. Изюмов, Ю.Н. Скрябин, *Статистическая механика магнитоупорядоченных систем*, Наука, Москва (1987), 254 с.
12. Ю.А. Изюмов, УФН **165**, 403 (1995).
13. Ю.А. Изюмов, Н.М. Плакида, Ю.Н. Скрябин, УФН **159**, 621 (1989).
14. Ю.А. Изюмов, В.И. Анисимов, *Электронная структура соединений с сильными корреляциями*, РХД, Ижевск (2008), 376 с.
15. Ю.А. Изюмов, *Из настоящего – в прошлое и будущее...*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2000), 296 с.
16. V.Yu. Irkhin, M.I. Katsnelson, Phys. Rev. B **56**, 8109 (1997).
17. В.Ю. Ирхин, М.И. Кацнельсон, УФН **164**, 705 (1994).
18. M.I. Katsnelson, V.Yu. Irkhin, L. Chioncel, A.I. Lichtenstein, R.A. de Groot, Rev. Mod. Phys. **80**, 315 (2008).
19. V.Yu. Irkhin, Yu.P. Irkhin, Phys. stat. sol. (b) **193**, 9 (1994).
20. В.Ю. Ирхин, Ю.П. Ирхин, *Электронная структура, физические свойства и корреляционные эффекты в d- и f-металлах и их соединениях*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург (2004), 472 с.; Ижевск (2008), 476 с.
21. M.I. Katsnelson, V.Yu. Irkhin, J. Phys. C: Solid State Phys. **17**, 4291 (1984).
22. V.Yu. Irkhin, A.V. Zarubin, Eur. Phys. J. **B38**, 563 (2004).
23. M.I. Auslender, V.Yu. Irkhin, M.I. Katsnelson, J. Phys. C: Solid State Phys. **21**, 5521 (1988).
24. V.Yu. Irkhin, A.V. Zarubin, Phys. Rev. B **70**, 035116 (2004).
25. В.Ю. Ирхин, М.И. Кацнельсон, ЖЭТФ **90**, 1080 (1986).
26. А.А. Катанин, В.Ю. Ирхин, УФН **177**, 639 (2007).
27. М.В. Садовский, УФН **171**, 539 (2001).
28. Э.З. Кучинский, И.А. Некрасов, М.В. Садовский, УФН **182**, 345 (2012).
29. М.В. Садовский, УФН **178**, 1243 (2008); **186**, 1035 (2016).
30. М.В. Садовский, *Лекции по статистической физике*, «ИКИ», Москва–Ижевск (2003), 336 с.
31. М.В. Садовский, *Лекции по квантовой теории поля*, «ИКИ», Москва–Ижевск (2003), 480 с.
32. М.В. Садовский, *Диagrammatика*, «ИКИ», Москва–Ижевск (2004), 376 с.
33. P.A. Igoshev, A.V. Efremov, A.I. Poteryaev, A.A. Katanin, V.I. Anisimov, Phys. Rev. B **88**, 155120 (2013).

34. P.A. Igoshev, A.V. Efremov, A.A. Katanin, Phys. Rev. B **91**, 195123 (2015).
35. V.Yu. Irkhin, M.I. Katsnelson, A.V. Trefilov, J. Phys.: Condens. Matter. **5**, 8763 (1993).
36. A.A. Katanin, A.I. Poteryaev, A.V. Efremov, A.O. Shorikov, S.L. Skornyakov, M.A. Korotin, V.I. Anisimov, Phys. Rev. B **81**, 045117 (2010).
37. P.A. Igoshev, M.A. Timirgazin, A.A. Katanin, A.K. Arzhnikov, V.Yu. Irkhin, Phys. Rev. B **81**, 094407 (2010).
38. P.A. Igoshev, M.A. Timirgazin, V.F. Gilmutdinov, A.K. Arzhnikov, V.Yu. Irkhin, J. Phys.: Condens. Matter **27**, 446002 (2015).
39. M.A. Timirgazin, P.A. Igoshev, A.K. Arzhnikov, V.Yu. Irkhin, J. Phys.: Condens. Matter **28**, 505601 (2016).
40. А.А. Катанин, В.Ю. Ирхин, П.А. Игошев, *Модельные подходы к магнетизму двумерных зонных систем*, Физматлит, Москва (2013), 175 с.