

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау  
А.В. Рогачев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Семинары по современной физике конденсированного состояния
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики и технологии наноструктур
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Дифференцированный зачет

2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 60 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: В.М. Пудалов, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и технологии наноструктур 24.05.2022

## Аннотация

Семинарские занятия по физике конденсированного состояния являют собой анализ студентами оригинальных экспериментальных и теоретических основополагающих статей. Курс начинается со знакомства с теорией квантовых осцилляций в невзаимодействующей системе электронов, основами метода измерений в магнитном поле с управляемым векторным полем для определения параметров квазичастиц. Анализируются идеи и результаты термодинамических измерений параметров квазичастиц в Ферми жидкости- спиновой восприимчивости,  $g$ -фактора и эффективной массы, спиновой намагниченности и энтропии на электрон.

Далее разбираются эксперименты по измерению отрицательной сжимаемости взаимодействующей электронной системы, квантовых скачков химического потенциала в магнитном поле, топологическая связь заряда с квантом магнитного потока в режиме квантового эффект Холла.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Ознакомить студентов с ключевыми теориями и экспериментами, которые лежат в основе современной физики электронных свойств твёрдых тел.

### Задачи дисциплины

- освоение студентами навыков чтения и понимания научной литературы по специальности,
- освоение навыков научного доклада по заданной теме,
- знакомство студентов с ключевыми теориями и результатами в области физики конденсированного состояния.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
	УК-2.3 Способен организовать и координировать работу участников проекта, обеспечивать работу команды необходимыми ресурсами
	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.

УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.1 Организует и координирует работу участников проекта, способствует конструктивному преодолению возникающих разногласий и конфликтов
	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
	УК-3.4 Способен планировать командную работу, распределять поручения членам команды, организовать обсуждение разных идей и мнений
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.1 Способен вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и не менее чем на одном иностранном языке
	УК-4.2 Владеет навыками, необходимыми для написания, письменного перевода и редактирования различных академических текстов (рефератов, эссе, обзоров, статей и т.д.)
	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-5 Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	УК-5.1 Способен выявлять специфику философских и научных традиций основных мировых культур
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)

ограничения различных методов решения	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

1. Научные задачи, над которыми работают в лабораториях - партнерах образовательной программы.
2. Новейшие открытия в физике, в т.ч., в квантовой физике твердого тела.
3. О взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.
4. Теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике конденсированного состояния.
5. Принципы симметрии, топологии, и законы сохранения.
6. Природу межчастичных взаимодействий.
7. Теоретические и экспериментальные основы ключевых концепций в физике конденсированного состояния.
8. Научные задачи, над которыми работают в базовых лабораториях образовательной программы.
9. Технику безопасности и правила работы в низкотемпературных физических экспериментах и в экспериментах с сильными магнитными полями.

уметь:

1. Эффективно использовать на практике теоретические знания: понятия, результаты, гипотезы, законы.
2. Представить панораму универсальных методов и законов современной физики конденсированного состояния.
3. Абстрагироваться от несущественных факторов при моделировании реальных физических процессов и явлений.
4. Делать численные оценки масштаба ожидаемых эффектов.
5. Критически анализировать результаты экспериментов и формулировать допущения, делаемые в теории.

владеть:

1. Информацией об актуальных направлениях исследований в области квантовой физики конденсированного состояния.
2. Теоретическими моделями фундаментальных процессов и явлений в физике конденсированного состояния.
3. Методами анализа и обработки экспериментальных данных.

#### **4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий**

##### **4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий**

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Квантовые осцилляции магнитной восприимчивости сопротивления		2		1
2	Методы измерений магнитных свойств немагнитных материалов при низкой температуре		2		1
3	Методы локальных измерений магнитных свойств при низкой температуре		2		1
4	Измерение перенормированных параметров Ферми-жидкости из квантовых осцилляций		2		1
5	Отрицательная сжимаемость двумерной Ферми-жидкости. Предсказание и обнаружение		2		1
6	Прямое измерение квантовых вариаций уровня Ферми		2		1

7	Термодинамическое измерение спиновой намагниченности двумерной системы электронов. Метод, результаты измерений. Теория		3		1
8	Термодинамическое измерение энтропии двумерной системы электронов		3		1
9	Мысленный эксперимент Лафлина		3		1
10	Влияние электрон-электронного взаимодействия на температурную зависимость транспорта. Когерентные эффекты в рассеянии электронов		3		2
11	Экспериментальная проверка теории многочастичных эффектов в транспорте		3		2
12	Охлаждение электронного газа в двумерной системе		3		2
13	Волна спиновой плотности. Индуцированная полем волна спиновой плотности в квазиодномерной системе. Стандартная модель		2		1
14	Квантование вектора нестинга в магнитном поле и экспериментальная проверка		2		1
15	Фазовое расслоение в квазиодномерной системе и анизотропное зарождение сверхпроводимости		2		1
16	Сверхпроводники на основе пниктидов железа класса 1144 с магнитным упорядочением. Измерение реконструкции поверхности и туннельных спектров		2		1
17	Сверхпроводники на основе пниктидов железа класса 1144 с магнитным упорядочением. Измерение зонной структуры и уровней энергии магнитных ионов		2		1
18	Измерение щелей в сверхпроводящем спектре с разрешением по импульсу методами ARPES		2		1
19	Измерение щелей в сверхпроводящем спектре методами андреевской спектроскопии		3		1
20	Высокотемпературная сверхпроводимость в гидридах		3		1
21	Транспорт заряда в топологических полуметаллах		3		1
22	Поверхностная проводимость Вейлевских полуметаллов		3		2
23	Топология электронной зонной структуры		3		2
24	Магнитосопротивление в массивных Вейлевских полуметаллах		3		2
Итого часов			60		30
Подготовка к экзамену		0 час.			

Общая трудоёмкость	90 час., 2 зач.ед.
--------------------	--------------------

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Квантовые осцилляции магнитной восприимчивости сопротивления

Квантование движения и спектра электронов в магнитном поле. Уровни Ландау. Вычисление плотности состояний и термодинамических характеристик (магнитная восприимчивость, намагниченность) в квантующем магнитном поле. Применение теории квантовых осцилляций к двумерным системам. Теория квантовых осцилляций сопротивления для двумерного Ферми-газа.

##### 2. Методы измерений магнитных свойств немагнитных материалов при низкой температуре

Экспериментальные методы измерения квантовых осцилляций электронной намагниченности и восприимчивости. Фарадеевский, торсионный магнитометры, консольные магнитометры, вибрационный магнитометр, СКВИД-магнитометр.

##### 3. Методы локальных измерений магнитных свойств при низкой температуре

Сканирующий СКВИД-магнитометр, сканирующий Холловский магнитометр, сканирующих магнитно-силовой микроскоп, Сканирующий магнитометр с датчиком на NV- центрах в алмазе.

##### 4. Измерение перенормированных параметров Ферми-жидкости из квантовых осцилляций

Теория Ферми-жидкости Ландау. Квазичастицы и перенормировка их параметров. Константы (гармоники) ферми-жидкостного взаимодействия. Методы измерения перенормированных параметров квазичастиц. Анализ методов измерений и экспериментальных результатов измерения перенормированной эффективной массы, спиновой восприимчивости, спиновой намагниченности, энтропии квазичастиц.

##### 5. Отрицательная сжимаемость двумерной Ферми-жидкости. Предсказание и обнаружение

Физическая причина отрицательной электронной сжимаемости. Теоретическое предсказание. Результат в рамках теории ферми-жидкости, численные расчеты. Методы измерений и экспериментальные результаты.

##### 6. Прямое измерение квантовых вариаций уровня Ферми

Квантовые осцилляции химического потенциала в двумерной системе электронов в квантующем магнитном поле. Влияние электрон-электронного взаимодействия на амплитуду квантовых осцилляций и скачков химического потенциала. Методы измерений и экспериментальные результаты.

##### 7. Термодинамическое измерение спиновой намагниченности двумерной системы электронов. Метод, результаты измерений. Теория

Метод измерений термодинамической спиновой намагниченности электронов в двумерной системе. Теоретическое обоснование метода и экспериментальные результаты. Экспериментальное свидетельство присутствия локальных магнитных моментов. Теоретическое описание эффекта.

##### 8. Термодинамическое измерение энтропии двумерной системы электронов

Термодинамический метод измерений энтропии на электрон ( $dS/dn$ ) электронов в двумерной системе. Теоретическое обоснование метода и экспериментальные результаты измерений энтропии в режиме вырожденной Ферми-жидкости. Экспериментальное свидетельство режима невырожденной заряженной плазмы.

#### 9. Мысленный эксперимент Лафлина

Рассмотрение связи изменения магнитного потока с зарядом квазичастиц, переносимых в холловском поле в режиме целочисленного квантового эффекта Холла.

#### 10. Влияние электрон-электронного взаимодействия на температурную зависимость транспорта. Когерентные эффекты в рассеянии электронов

Влияние когерентных эффектов интерференции электронов при рассеянии на флуктуациях потенциала. Фриделевские осцилляции экранирования. Теоретическая температурная зависимость проводимости с учетом вклада одночастичной интерференции и многочастичной интерференции. Влияние магнитного поля на одночастичные и многочастичные эффекты в когерентном рассеянии.

#### 11. Экспериментальная проверка теории многочастичных эффектов в транспорте

Экспериментальные результаты измерений когерентных эффектов в рассеянии. Температурная зависимость проводимости в баллистическом и диффузионном режимах. Методические (технические) проблемы измерений. Проблемы интерпретации результатов.

#### 12. Охлаждение электронного газа в двумерной системе

Проблемы охлаждения электронов в двумерной системе на интерфейсе полупроводников. Рассмотрение теплового баланса. Измерение скорости релаксации энергии электронов и оценка минимально достижимой температуры электронов.

### Семестр: 2 (Весенний)

#### 13. Волна спиновой плотности. Индуцированная полем волна спиновой плотности в квазиодномерной системе. Стандартная модель

Квазиодномерные органические проводники (TMTSF) $2PF_6$  и (TMTSF) $2ClO_4$ . Неустойчивость Ферми-жидкостного состояния. Модельная поверхности Ферми в квазиодномерных органических кристаллах. Фазовая P-T диаграмма состояний.

Нестинг поверхности Ферми.

#### 14. Квантование вектора нестинга в магнитном поле и экспериментальная проверка

Теоретическое рассмотрение “стандартной модели” квантования вектора нестинга. Результаты экспериментальных измерений. Экспериментальная фазовая диаграмма и ее отличие от стандартной модели. Эффекты фазового расслоения вблизи границ перехода между фазами SDW.

#### 15. Фазовое расслоение в квазиодномерной системе и анизотропное зарождение сверхпроводимости

Эффекты фазового расслоения вблизи границ SDW и сверхпроводящей фазы. Обратимое управление беспорядком как инструмент для изучения фазовой диаграммы. Анизотропное зарождение сверхпроводимости и его объяснение в рамках солитонной модели и в рамках представлений о расхождении длины когерентности вблизи критической температуры.



16. Сверхпроводники на основе пниктидов железа класса 1144 с магнитным упорядочением. Измерение реконструкции поверхности и туннельных спектров

Кристаллическая структура слоистых высокотемпературных сверхпроводников ( $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ ) с магнитными слоями атомов Eu в решетке. Кристаллическая структура поверхности. Метод и результаты измерений.

17. Сверхпроводники на основе пниктидов железа класса 1144 с магнитным упорядочением. Измерение зонной структуры и уровней энергии магнитных ионов

Измерение электронной зонной структуры и магнитных уровней энергии. Метод измерения фотоэмиссии с угловым разрешением. Результаты измерений энергии 3d-электронов Fe и 4f-электронов Eu. Измерения спектра методом сканирующей туннельной спектроскопии. Измерение магнитного состояния ионов Eu методом ResPES.

18. Измерение щелей в сверхпроводящем спектре с разрешением по импульсу методами ARPES

Измерение щелей в сверхпроводящем спектре методом ARPES с разрешением по импульсу. Принцип метода. Результаты измерений с железосодержащими сверхпроводниками семейства 122. Анизотропия щелей в импульсном пространстве.

19. Измерение щелей в сверхпроводящем спектре методами андреевской спектроскопии

Измерения щелей в сверхпроводящем спектре методом андреевской спектроскопии. Принцип метода и результаты измерений.

Независимость сверхпроводящего спектра от магнитного упорядочения. Изменение плотности сверхпроводящего конденсата при температуре магнитного упорядочения атомов Eu.

20. Высокотемпературная сверхпроводимость в гидридах

Принцип синтеза полигидридов при высоком давлении в камерах с алмазными наковальнями. Методы и результаты измерений сопротивления в алмазной камере. Детектирование сверхпроводящего перехода по исчезновению сопротивления и магнитными методами. Результаты измерений на  $\text{H}_3\text{S}$ ,  $\text{ThH}_n$ ,  $\text{YH}_n$ ,  $\text{LaYH}_n$ .

21. Транспорт заряда в топологических полуметаллах

Физическая картина переноса заряда по топологически защищенным киральным состояниям. Нелокальный транспорт. Результаты измерений транспорта в топологических изоляторах. Экспериментальное выявление топологической защищенности поверхностных состояний.

22. Поверхностная проводимость Вейлевских полуметаллов

Возникновение Ферми-арк с топологически защищенными поверхностными состояниями. Рассмотрение планарных переходов на поверхности WSM с парой Ферми-арк. Возникновение осцилляций вследствие интерференции типа Фабри-Перо внутри 2D переходов. Возможность определения ориентации Ферми-арк и их анизотропии.

23. Топология электронной зонной структуры

Общее рассмотрение топологии зонной структуры. Переходы Лифшица. "Плоские" зоны. Магнитные Вейлевские полуметаллы. Неравновесные свойства Вейлевских полуметаллов.

24. Магнитосопротивление в массивных Вейлевских полуметаллах

Магнитосопротивление в трехмерных полуметаллах со спин-орбитальным взаимодействием и с “линией нулей” в спектре. Деформация тороидальной поверхности Ферми и переход Лифшица как причина изменения знака магнитосопротивления с магнитным полем. Магнитные Вейлевские полуметаллы.

#### **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

Доска, проектор, экран

#### **6.Перечень рекомендуемой литературы**

Основная литература

Рекомендуемая литература для самостоятельного изучения:

(семестр 9):

к теме 1:

1. I.M. Lifshitz, L.M. Kosevich Theory of Magnetic Susceptibility in Metals at Low Temperature, JETP 2 (4), 636 (1956)
2. I.M. Lifshitz, L.M. Kosevich, On the Theory of the Shubnikov-De Haas Effect JETP, 6, (1), 67 (1958)
3. A.Isihara and L Smrcka, Density and magnetic field dependences of the conductivity of two-dimensional electron systems 1986 J. Phys. C: Solid State Phys. 19 6777

к темам 2 и 3:

4. Пудалов В.М., Измерение магнитных свойств электронов проводимости, УФН 191, 3-29 (2021). <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.05.038771>

к теме 4:

5. V. M. Pudalov, M. E. Gershenson, H. Kojima, et al., Density Spin Susceptibility and Effective Mass of Mobile Electrons in Si Inversion Layers, Phys. Rev. Lett. 88(19), 196404 (2002)
6. M.E. Gershenson, V.M. Pudalov, H. Kojima, N. Butch, E.M. Dizhur, G. Brunthaler, A. Prinz, G. Bauer, Crossed magnetic fields technique for studying spin and orbital properties of 2d electrons in the dilute regime, Physica E, 12 (2002) 585 – 590

к теме 5:

7. M. S. Bello, E. I. Levin, B. I. Shklovskii, and A. L. Efros, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 80, 1596 (1981) [Sov. Phys. JETP 53, 822 (1981)].
8. A. L. Efros, Solid State Commun. 65, 1281 (1988).
9. S.V. Kravchenko, V.M. Pudalov, S.G. Semenchinsky, Phys. Lett. A 141, 71 (1989).
10. J. P. Eisenstein, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, Phys. Rev. B 50, 1760 (1994).

к теме 6:

11. Pudalov V M, Semenchinskii S G, Edel'man V S, ЖЭТФ 89, 1870 (1985). [JETP 62, 1079 (1985)]
12. Pudalov V M, Semenchinskii S G, Edel'man V S, Письма в ЖЭТФ 41, 225 (1985); [JETP Lett. 41, 325 (1985)]
13. Pudalov V M, Semenchinsky S G, Письма в ЖЭТФ, 44, 526 (1986); [JETP Lett. 44, 677 (1986)]
14. Kravchenko S V, Pudalov V M, Rinberg D A, Semenchinsky S G, Phys. Lett. A 146, 535 (1990)
15. Kravchenko S V, Rinberg D A, Semenchinsky S G, Pudalov V M, Phys. Rev. B 42, 3741 (1990)

к теме 7:

16. O. Prus, Y. Yaish, M. Reznikov, U. Sivan, and V. Pudalov, Thermodynamic spin magnetization of strongly correlated two-dimensional electrons in a silicon inversion layer, Phys. Rev. B 67, 205407 (2003)
17. N. Tenen, A. Yu. Kuntsevich, V. M. Pudalov, and M. Reznikov, Spin-Droplet State of an Interacting 2D Electron System, Phys. Rev. Lett. 109, 226403 (2012).
18. Y. Tupikov, A. Yu. Kuntsevich, V.M. Pudalov, I.S. Burmistrov, Temperature derivative of the chemical potential and its magnetooscillations in two-dimensional system, Письма в ЖЭТФ, 101, 131 (2015). [JETP Lett. 101, 125 (2015)]
19. Yevgeny V. Stadnik and Oleg P. Sushkov, Interacting spin droplets and magnetic properties of a low-density two-dimensional electron gas, Phys. Rev. B 88, 125402 (2013)

к теме 8:

- 20 A. Yu. Kuntsevich, Y.V. Tupikov, V.M. Pudalov, and I.S. Burmistrov, Strongly correlated two-dimensional plasma explored from entropy measurements, Nature Commun. 6, 7298 (2015).

к теме 9:

21. R. B. Laughlin, Phys. Rev. B 23, 5632 (1981)
22. R. B. Laughlin, Phys. Rev. Lett. 52, 2034 (1984)

к теме 10:

23. G. Zala, B. N. Narozhny, and I. L. Aleiner, Phys. Rev. B 64, 214204 (2001);
24. G. Zala, B. N. Narozhny, and I. L. Aleiner, Phys. Rev. B 65, 020201R (2001).
25. I. V. Gornyi and A. D. Mirlin, Phys. Rev. B 69, 045313 (2004).

к теме 11:

26. N.N. Klimov, D.A. Knyazev, O.E. Omel'yanovskii, V.M. Pudalov, H. Kojima, M.E. Gershenson, Interaction Effects in Conductivity of a Two-Valley Electron System in High-Mobility Si Inversion

#### Дополнительная литература

1. Основы теории металлов, Электронная версия печатной публикации / А. А. Абрикосов. — Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2010
  2. Введение в теорию нормальных металлов [Текст]/А. А. Абрикосов, -М., Наука, 1972
  3. Электронная теория металлов [Текст]/И. М. Лифшиц, М. Я. Азбель, М. И. Каганов, -М., Наука, 1971
  4. Теория квантовых жидкостей. Нормальные ферми-жидкости [Текст]/Д. Пайнс, Ф. Нозьер, The theory of quantum liquids, пер. с англ. Н. В. Волковой и Л. А. Фальковского, -М., Мир, 1967
- Рекомендуемая литература для самостоятельного изучения:
- P. Coleman, Many body physics (1998)
- N. P. Armitage, E. J. Mele, Weyl and Dirac semimetals in three-dimensional solids, Rev Mod. Phys., 90, 015001 (2018)

#### **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

#### **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Adobe Acrobat, Adobe Reader, Power Point, Zoom

#### **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- самостоятельное изучение и проработка;
- подготовка презентации по разбираемой статье(статьям)

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики и технологии наноструктур
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчик:** В.М. Пудалов, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
	УК-2.3 Способен организовать и координировать работу участников проекта, обеспечивать работу команды необходимыми ресурсами
	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.1 Организует и координирует работу участников проекта, способствует конструктивному преодолению возникающих разногласий и конфликтов
	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
	УК-3.4 Способен планировать командную работу, распределять поручения членам команды, организовать обсуждение разных идей и мнений
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.1 Способен вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и не менее чем на одном иностранном языке
	УК-4.2 Владеет навыками, необходимыми для написания, письменного перевода и редактирования различных академических текстов (рефератов, эссе, обзоров, статей и т.д.)
	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-5 Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	УК-5.1 Способен выявлять специфику философских и научных традиций основных мировых культур

УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Семинары по современной физике конденсированного состояния» обучающийся должен:

### знать:

1. Научные задачи, над которыми работают в лабораториях - партнерах образовательной программы.
2. Новейшие открытия в физике, в т.ч., в квантовой физике твердого тела.
3. О взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.
4. Теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике конденсированного состояния.
5. Принципы симметрии, топологии, и законы сохранения.
6. Природу межчастичных взаимодействий.
7. Теоретические и экспериментальные основы ключевых концепций в физике конденсированного состояния.
8. Научные задачи, над которыми работают в базовых лабораториях образовательной программы.
9. Технику безопасности и правила работы в низкотемпературных физических экспериментах и в экспериментах с сильными магнитными полями.

### уметь:

1. Эффективно использовать на практике теоретические знания: понятия, результаты, гипотезы, законы.
2. Представить панораму универсальных методов и законов современной физики конденсированного состояния.
3. Абстрагироваться от несущественных факторов при моделировании реальных физических процессов и явлений.
4. Делать численные оценки масштаба ожидаемых эффектов.
5. Критически анализировать результаты экспериментов и формулировать допущения, делаемые в теории.

### владеть:

1. Информацией об актуальных направлениях исследований в области квантовой физики конденсированного состояния.
2. Теоретическими моделями фундаментальных процессов и явлений в физике конденсированного состояния.
3. Методами анализа и обработки экспериментальных данных.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлого занятия.



#### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Промежуточная аттестация оценивается на основе представленной презентации. Пример презентации приведен во вложении.

##### **Критерии оценивания**

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

#### **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Дифференцированный зачёт проводится в устной форме на основании сделанной презентации и активного участия в обсуждении презентаций других студентов.

# Тема 17. Electronic structure and coexistence of superconductivity with magnetism in $\text{RbEuFe}_4\text{As}_4$

## Анализ экспериментов:

*Electronic structure and coexistence of superconductivity with magnetism in  $\text{RbEuFe}_4\text{As}_4$ , Phys. Rev. B 103, 174517 (2022)*

Докладчик:

# Сверхпроводимость $\Leftrightarrow$ магнетизм

## Мотивация

- ❖ Дальний порядок локальных магнитных моментов  
 $\Leftrightarrow$   
Сверхпроводящее спаривание электронов
- ❖ Обычно  $T_m > T_c$ . Выживает только  $p$ -СП ( $UGe_2$ ,  $URhGe$ ,  $UCoGe$ )  
(доменная вихревая фаза)

Для IBS  $T_c > T_m$

- ❖ Механизм спаривания ( $s^\pm$ ) и структура параметра порядка
- ❖ AFM межзонное взаимодействие (спиновые флуктуации)
- ❖ FM тенденция (внутризонное взаимодействие)

**EuRbFe<sub>4</sub>As<sub>4</sub> – идеальная стехиометрическая платформа**

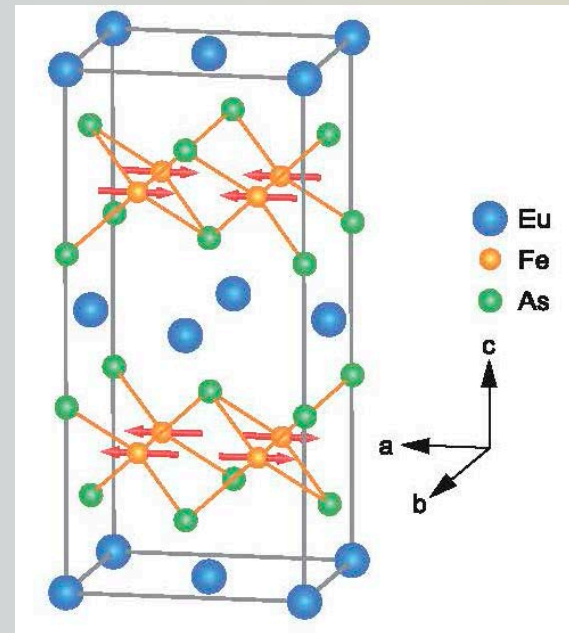
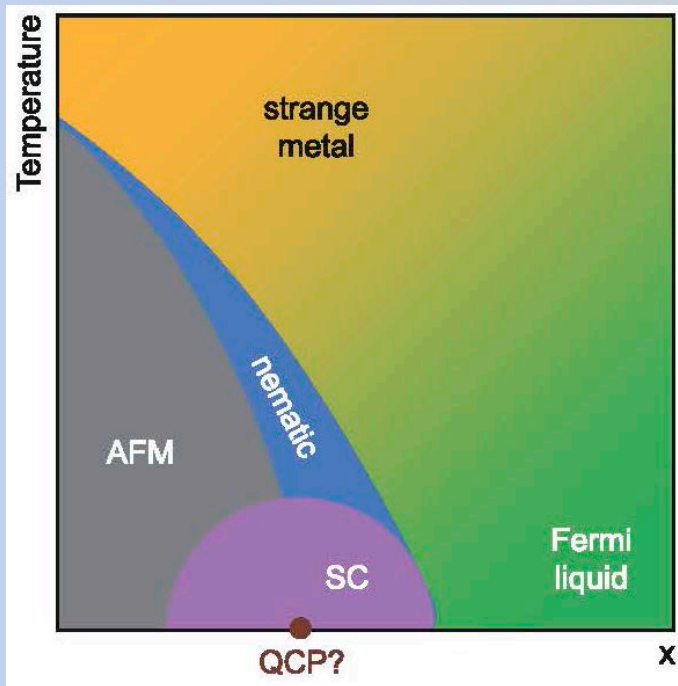
# Дальний порядок локальных магнитных моментов в СП

(1959) P.W. Anderson, H. Suhl – крипто-ФМ порядок

(1980) L. Bulaevskii, A.I. Rusinov, M. Kulić – helix-ФМ

Helix-АФМ ( $REMo_6X_8$ ), Helix-ФМ ( $ErRh_4B_4$ )  $\Rightarrow$  Возвратная СП

$EuFe_2As_2$  – не-СП /АФМ SDW/.  $EuFe_2(As_{1-x}P_x)_2$  - СП /ФМ/



# Дальний порядок локальных магнитных моментов в СП

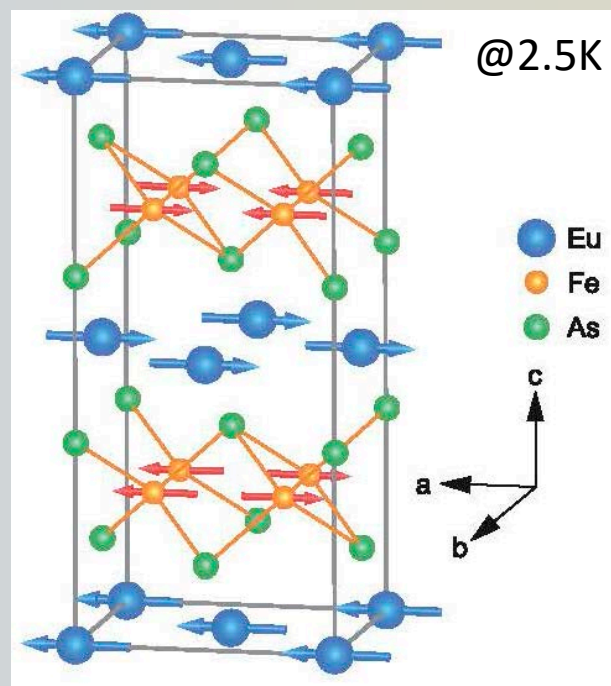
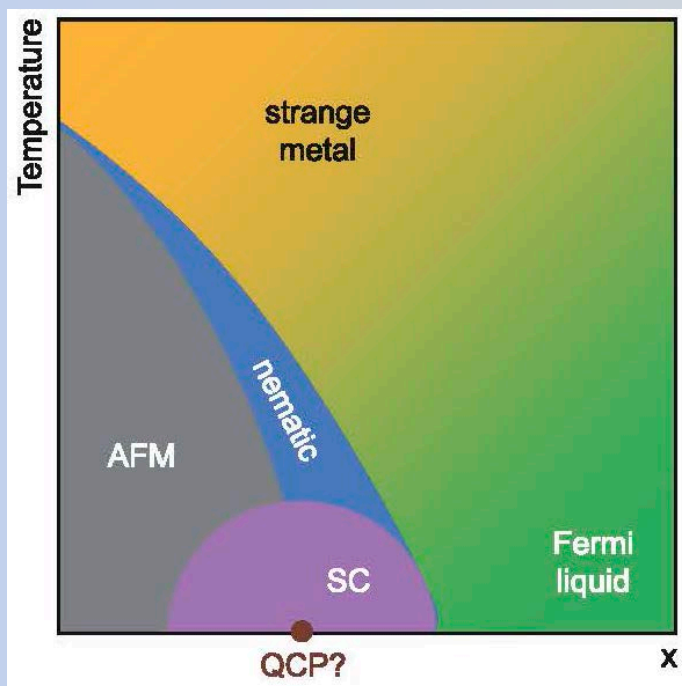
(1959) P.W. Anderson, H. Suhl – крипто-ФМ порядок

(1980) L. Bulaevskii, A.I. Rusinov, M. Kulić – helix-ФМ

Helix-АФМ ( $REMo_6X_8$ ), Helix-ФМ ( $ErRh_4B_4$ )  $\Rightarrow$  Возвратная СП

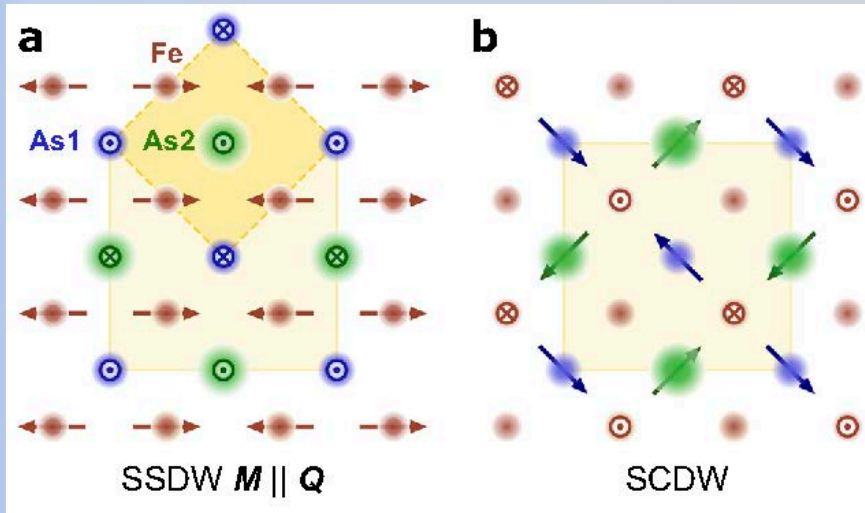
**$EuFe_2As_2$  – не-СП /АФМ SDW/.**

$EuFe_2(As_{1-x}P_x)_2$  - СП /ФМ/

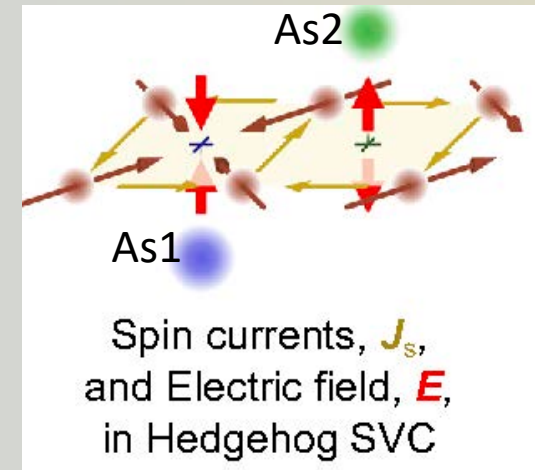


# Дальний порядок локальных моментов в 1144

## ❖ В $\text{CaKFe}(\text{Ni})_4\text{As}_4$



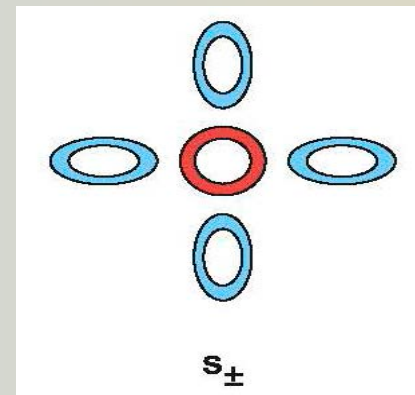
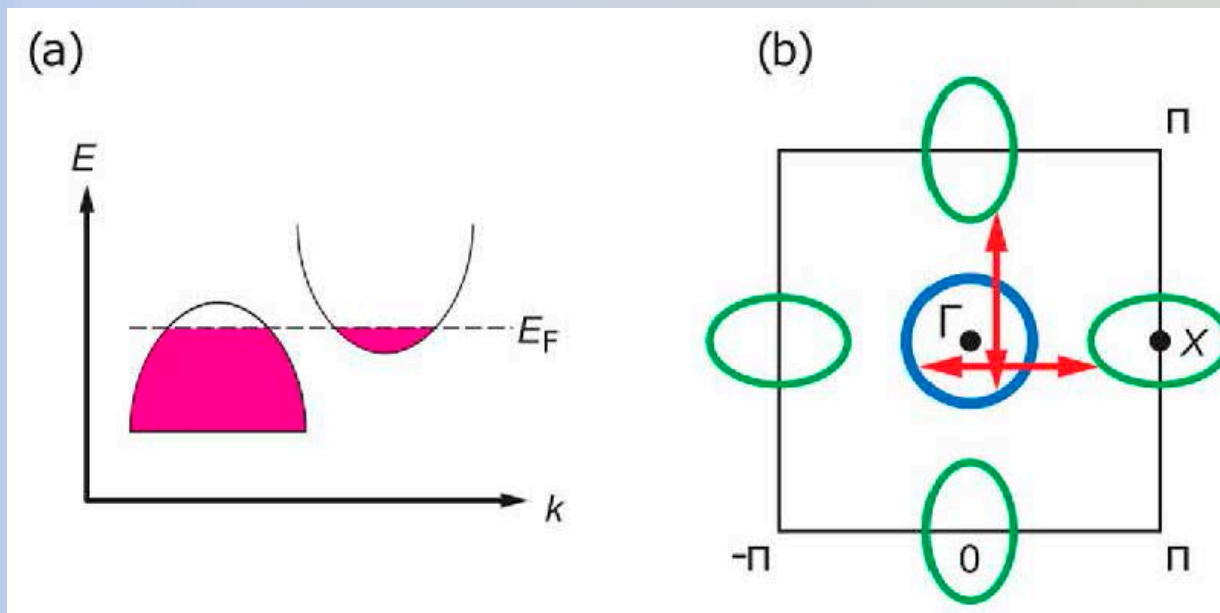
“Spinvortex crystal”



- ❖ AFM межзонное взаимодействие (спиновые флуктуации)
- ❖ FM тенденция внутризонного взаимодействия

**$\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$  – идеальная стехиометрическая платформа**

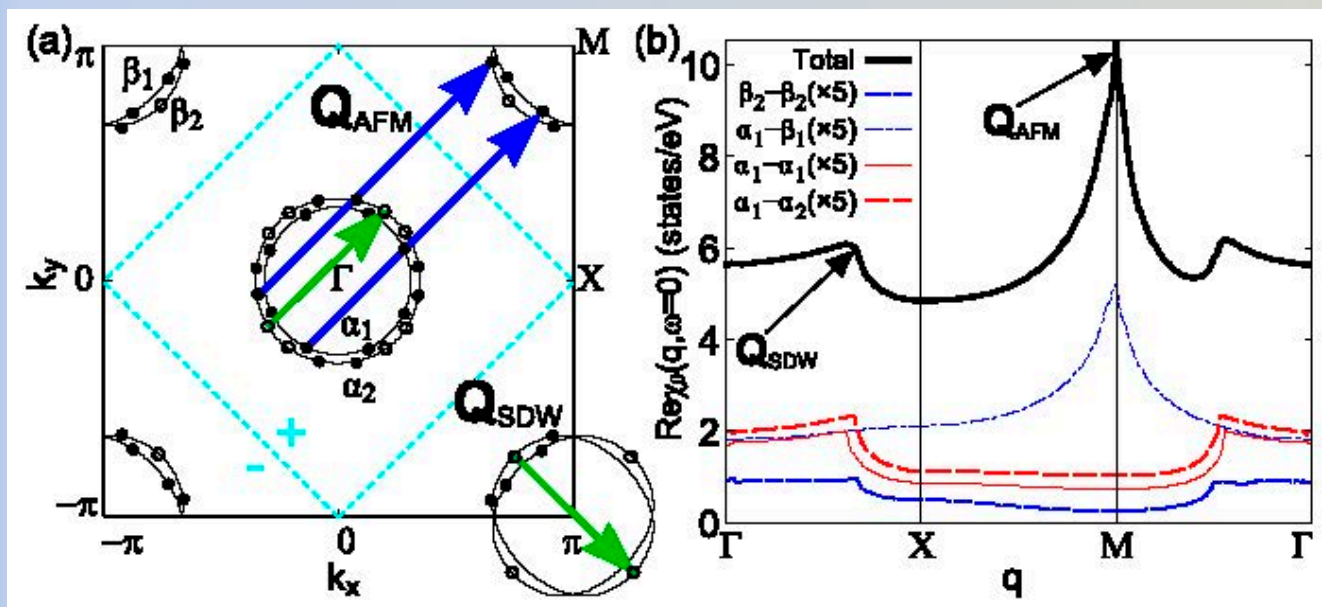
# Механизм спаривания ( $s^\pm$ ) и магнитные флуктуации



- ❖ AFM межзонное взаимодействие (спиновые флуктуации)
- ❖ FM тенденция (EM и RKKY)

**EuRbFe<sub>4</sub>As<sub>4</sub> – идеальная стехиометрическая платформа**

# Механизм спаривания ( $s^\pm$ ) и магнитные флуктуации



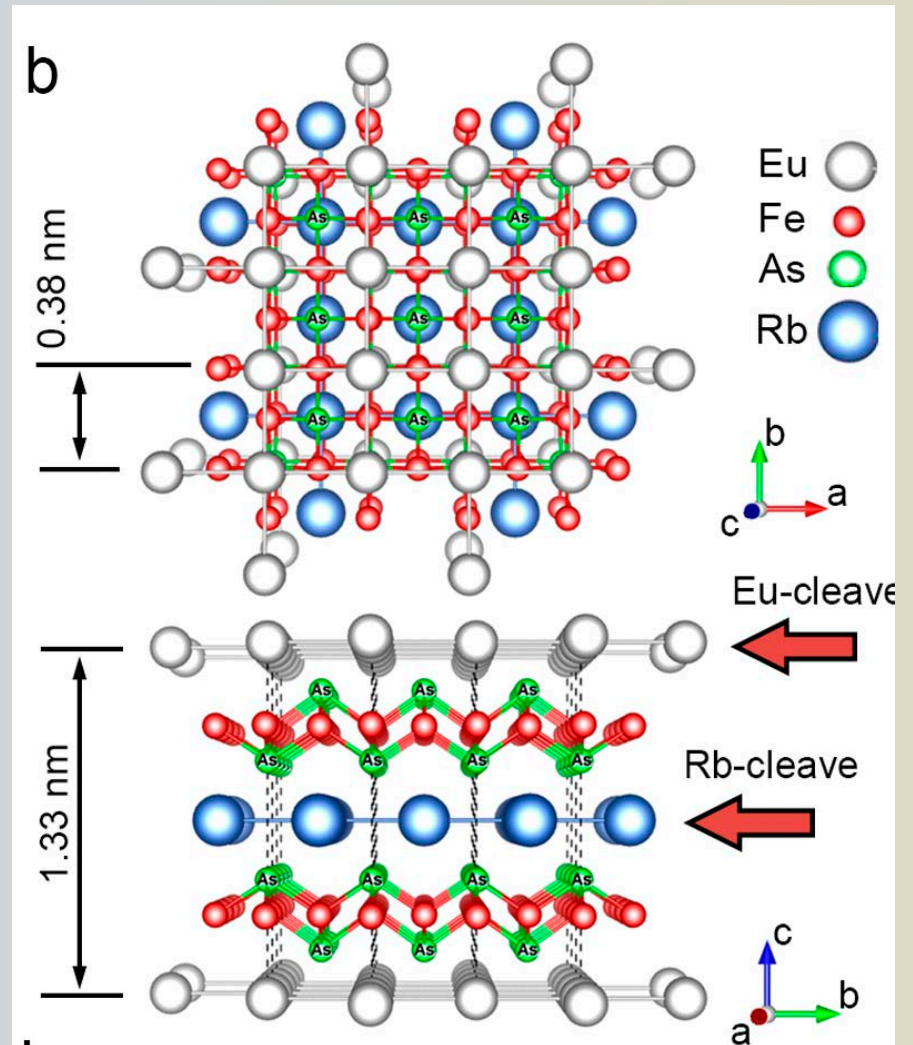
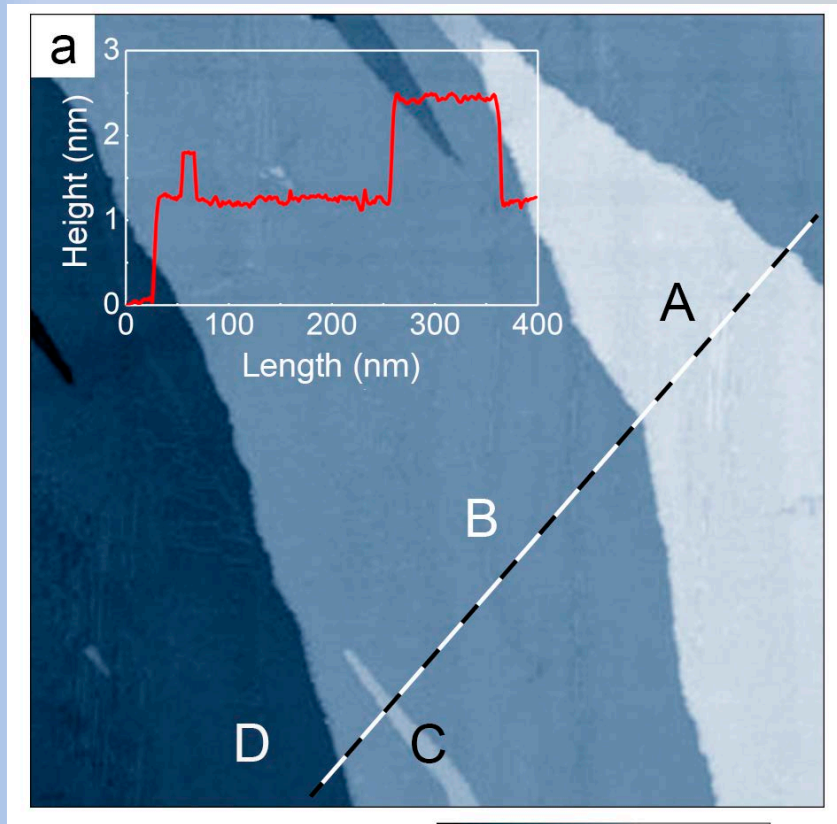
Korshunov, Eremin  
PRB (2008)

- ❖ AFM межзонное взаимодействие (спиновые флуктуации)
- ❖ FM тенденция (EM и RKKY)

**EuRbFe<sub>4</sub>As<sub>4</sub> – идеальная стехиометрическая платформа**

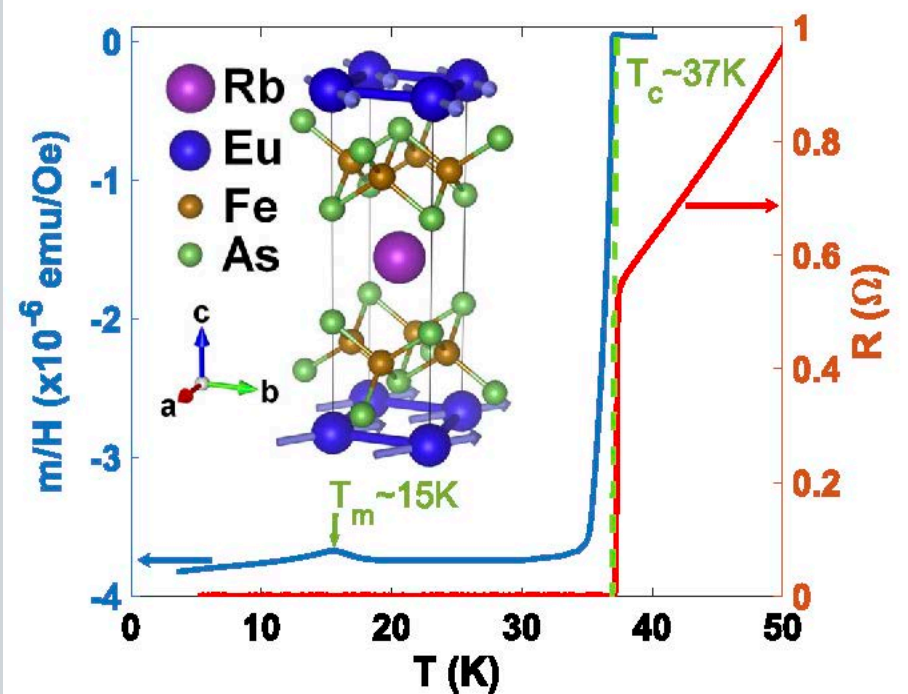
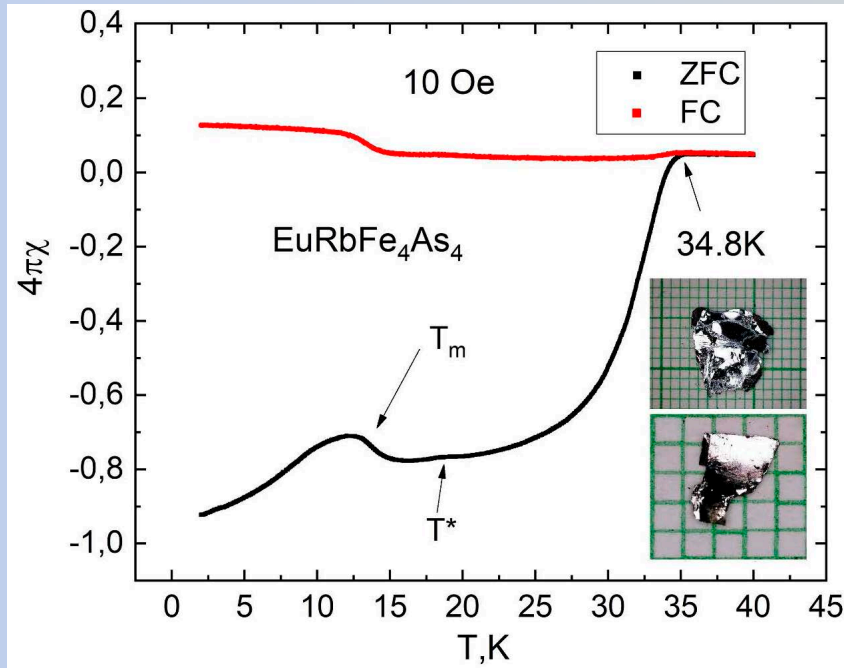


# Структура решетки EuRb-1144



# Магнитное упорядочение Eu в Eu-1144

# Магнитный переход Tm ниже Tc

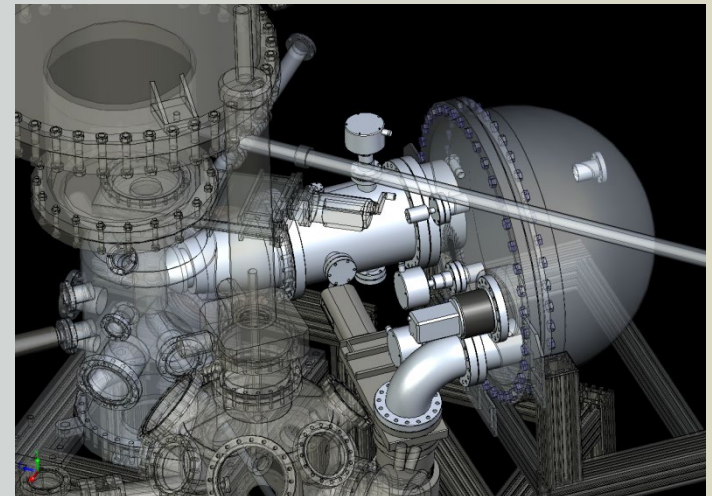
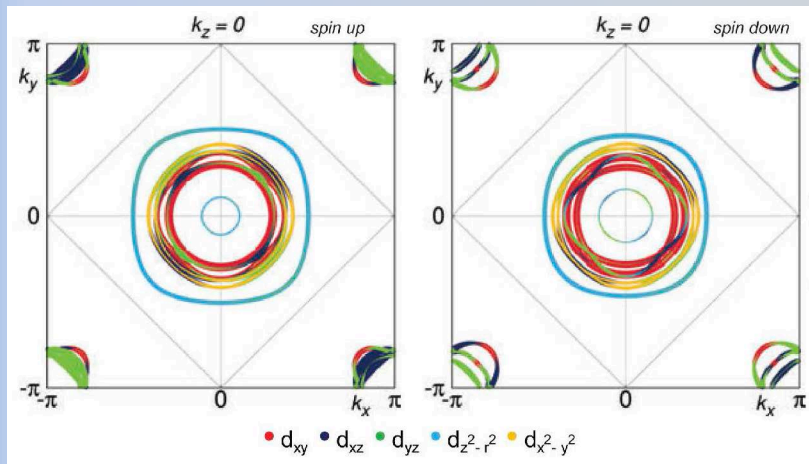
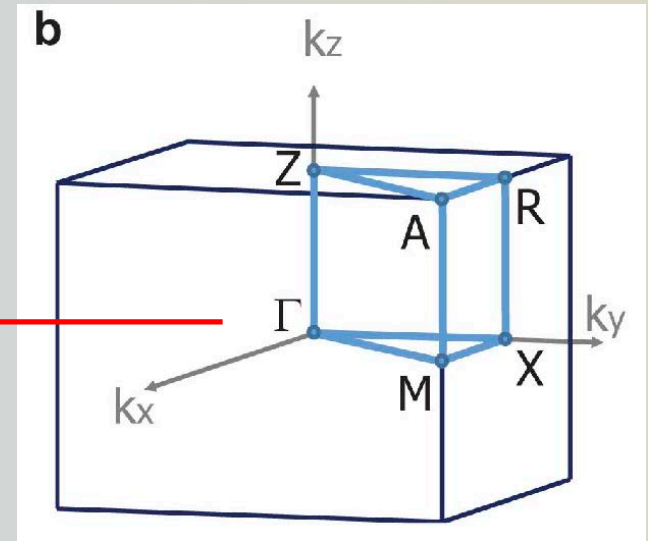
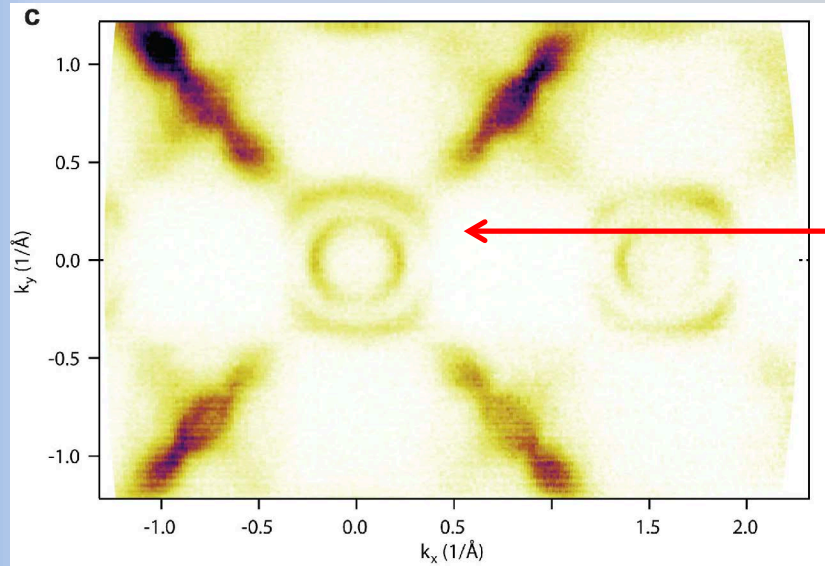


Локальные моменты Eu:

$\theta > 0 \Rightarrow$  FM взаимодействие  
между атомами Eu

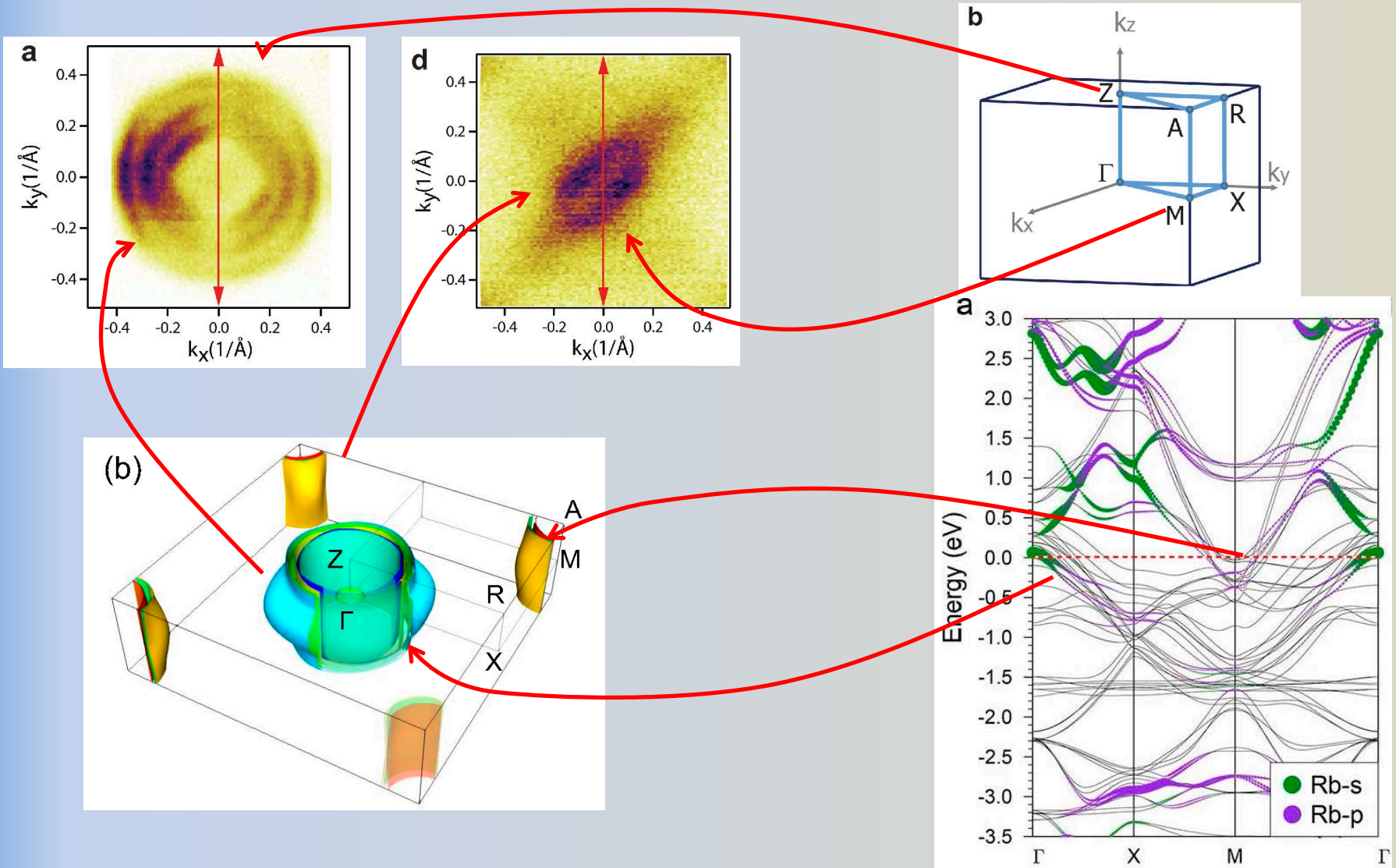
$$\chi \propto \frac{1}{T - \theta}$$

# Поверхность Ферми из ARPES/расчет



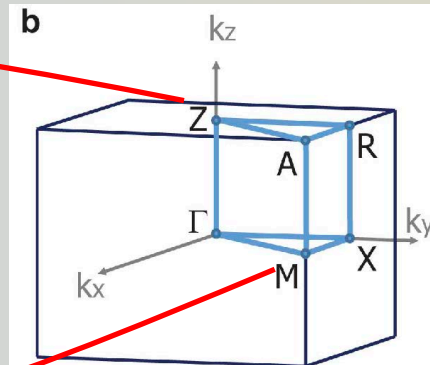
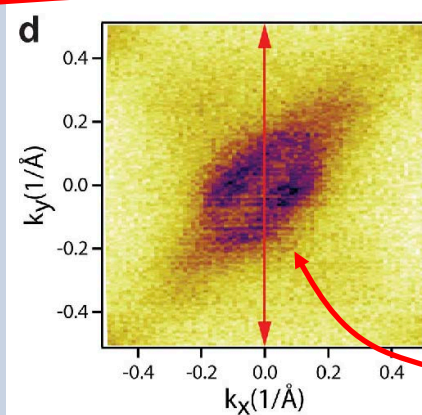
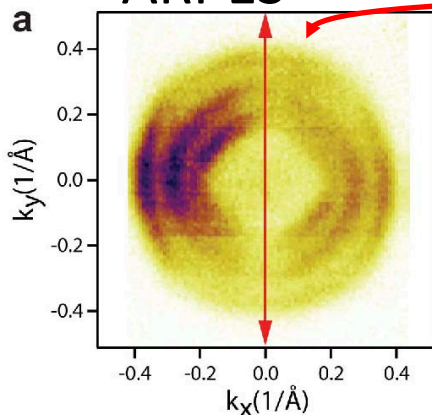


# ПФ и зонная структура (ARPES/расчет)

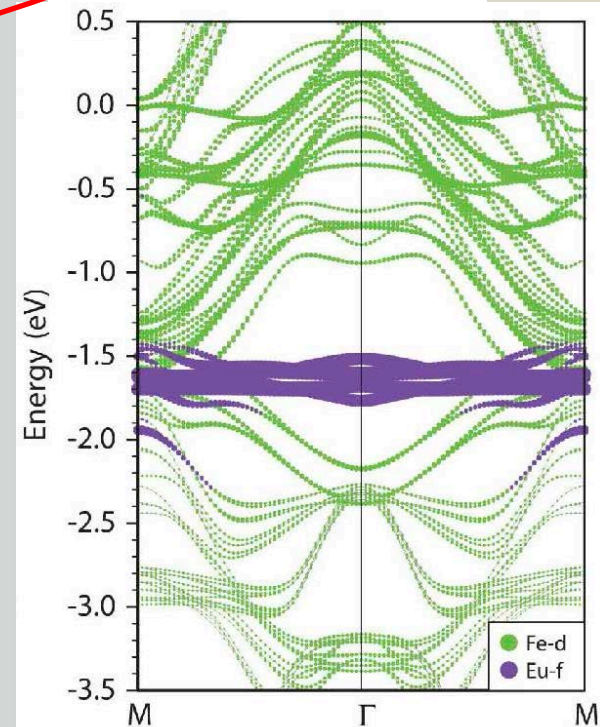
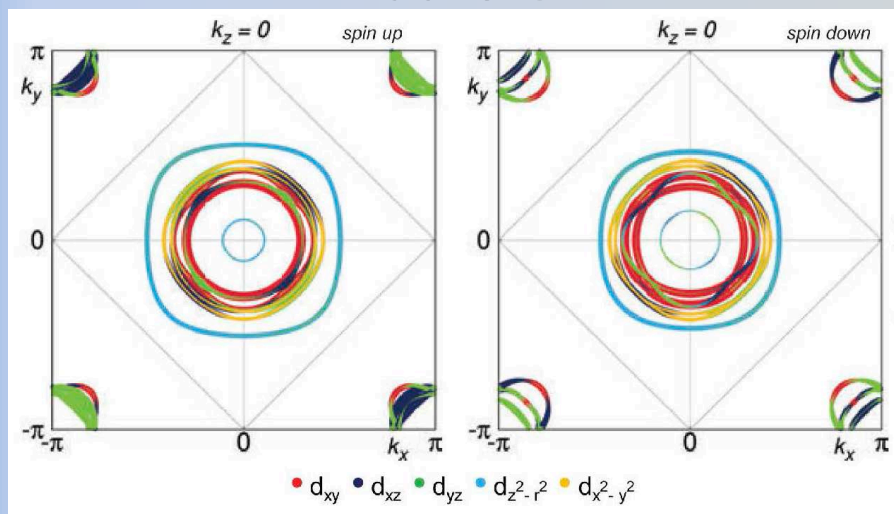


# ПФ и зонная структура (ARPES/расчет)

## ARPES

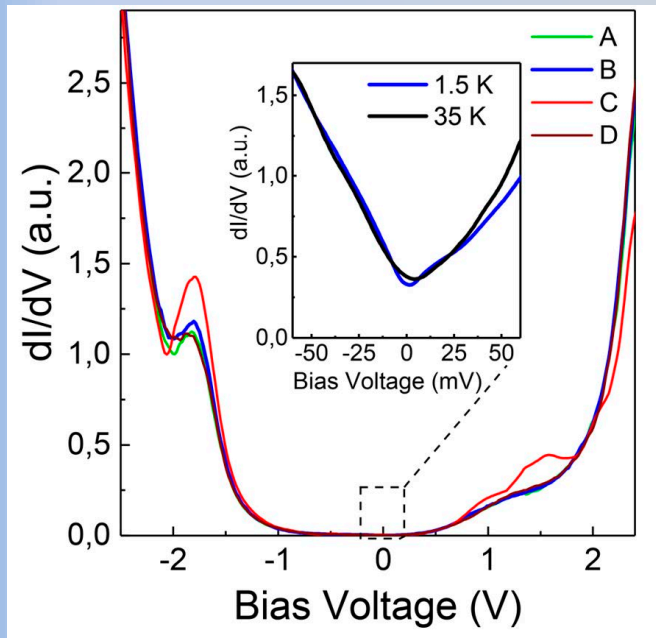


## Расчеты

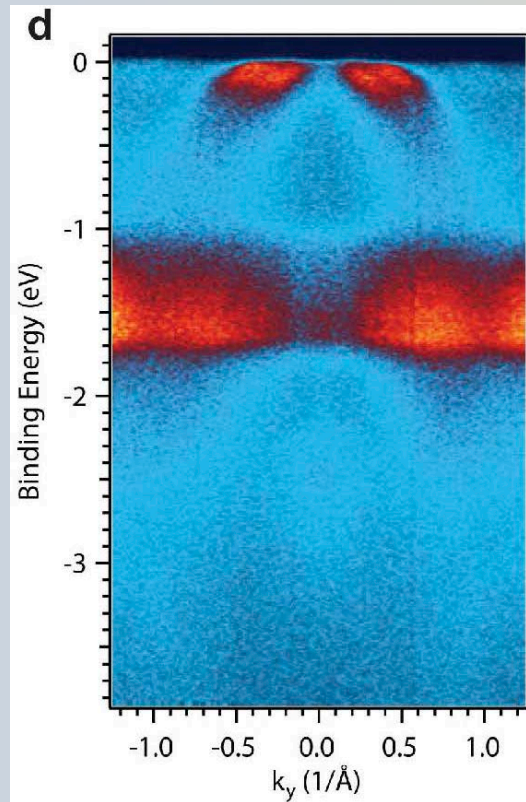


# Уровни Eu и Fe в зонной структуре

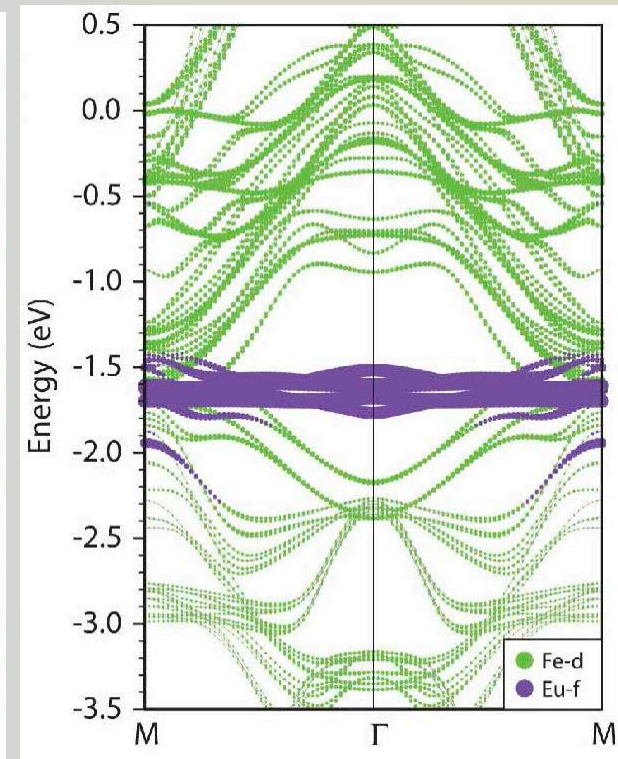
STS



ARPES



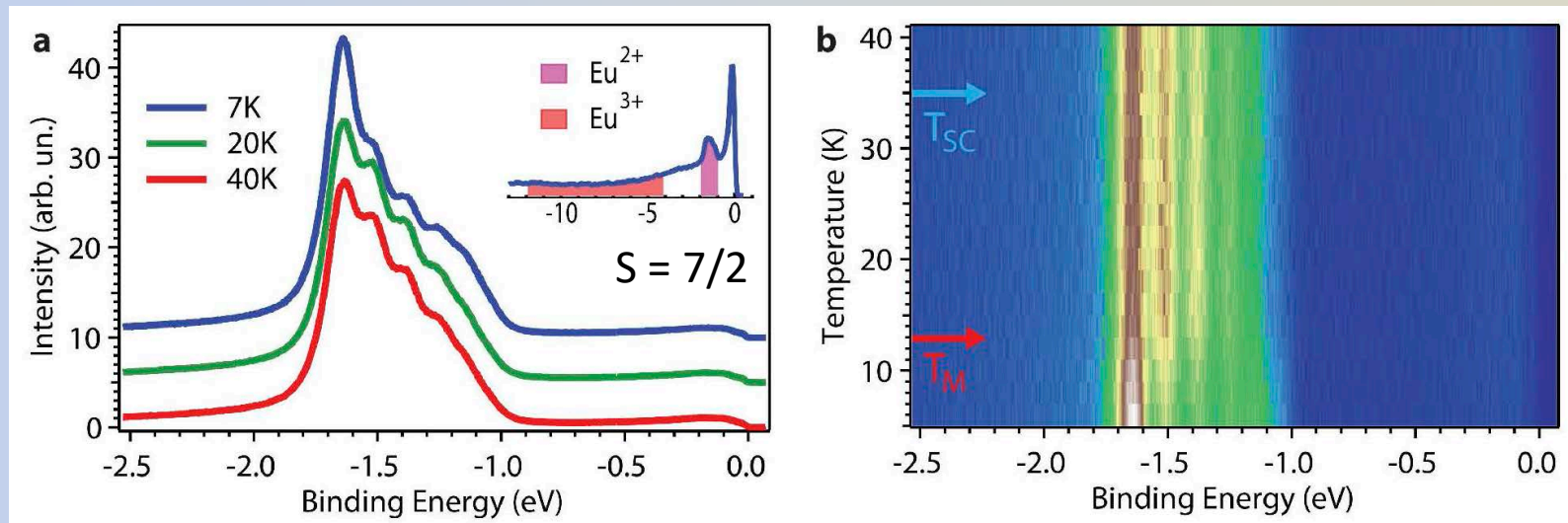
Расчеты





# Мультиплет уровней $\text{Eu}^{2+}$

ResPES @ $h\nu=142\text{eV}$ :  $\text{Eu}$  4f

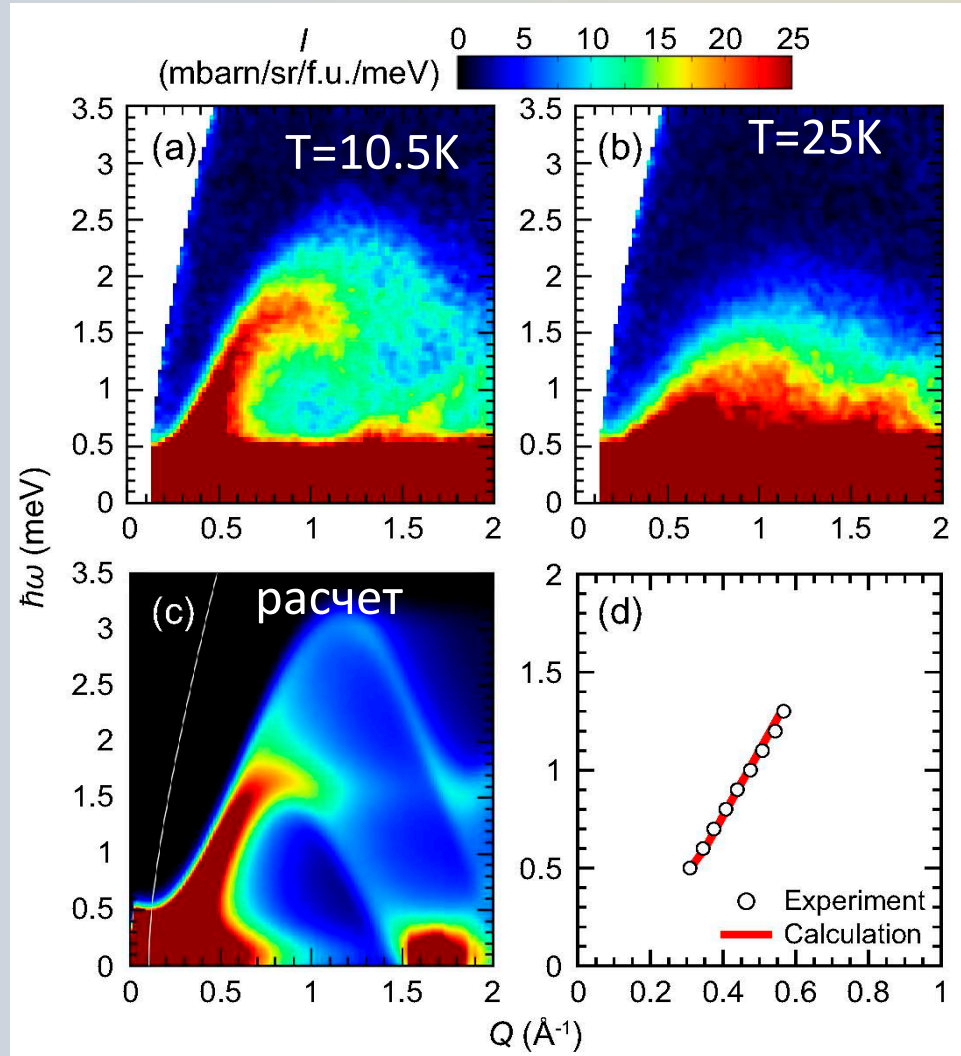




# Магнитное упорядочение из INS

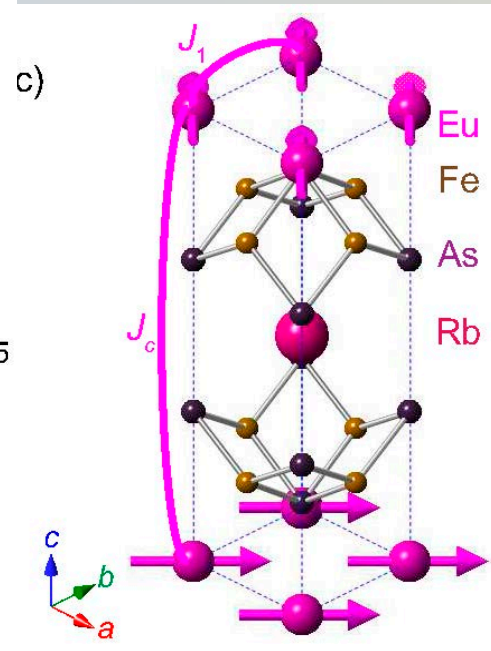
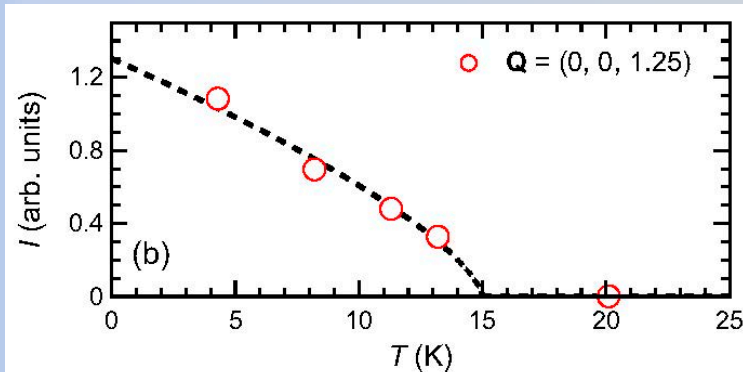
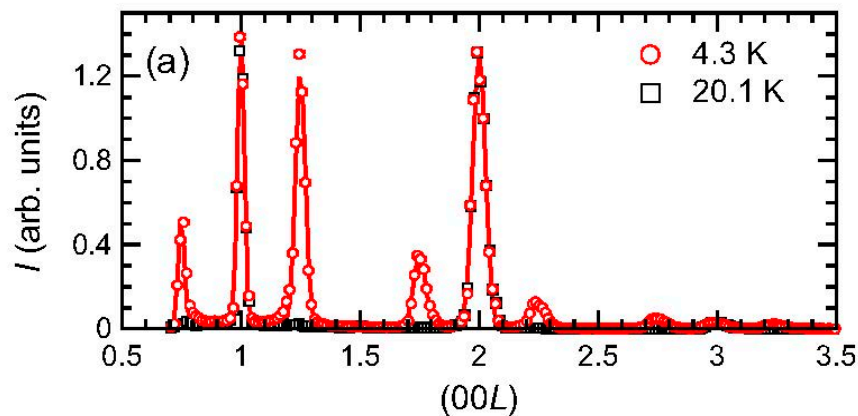
Iida et al., PRB (2019):

Интенсивность INS при  
малой энергии  $n$   
- ФМ упорядочение в  
 $ab$ -плоскости

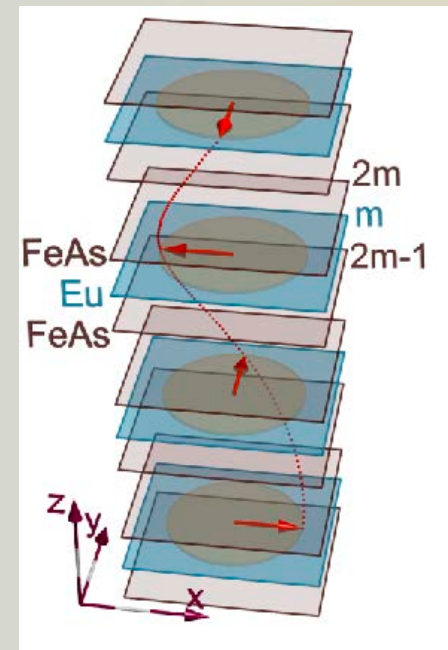


# Магнитное упорядочение между плоскостями

из упругой Брэгговской дифракции нейтронов и  
резонансного рассеяния  $\gamma$ :



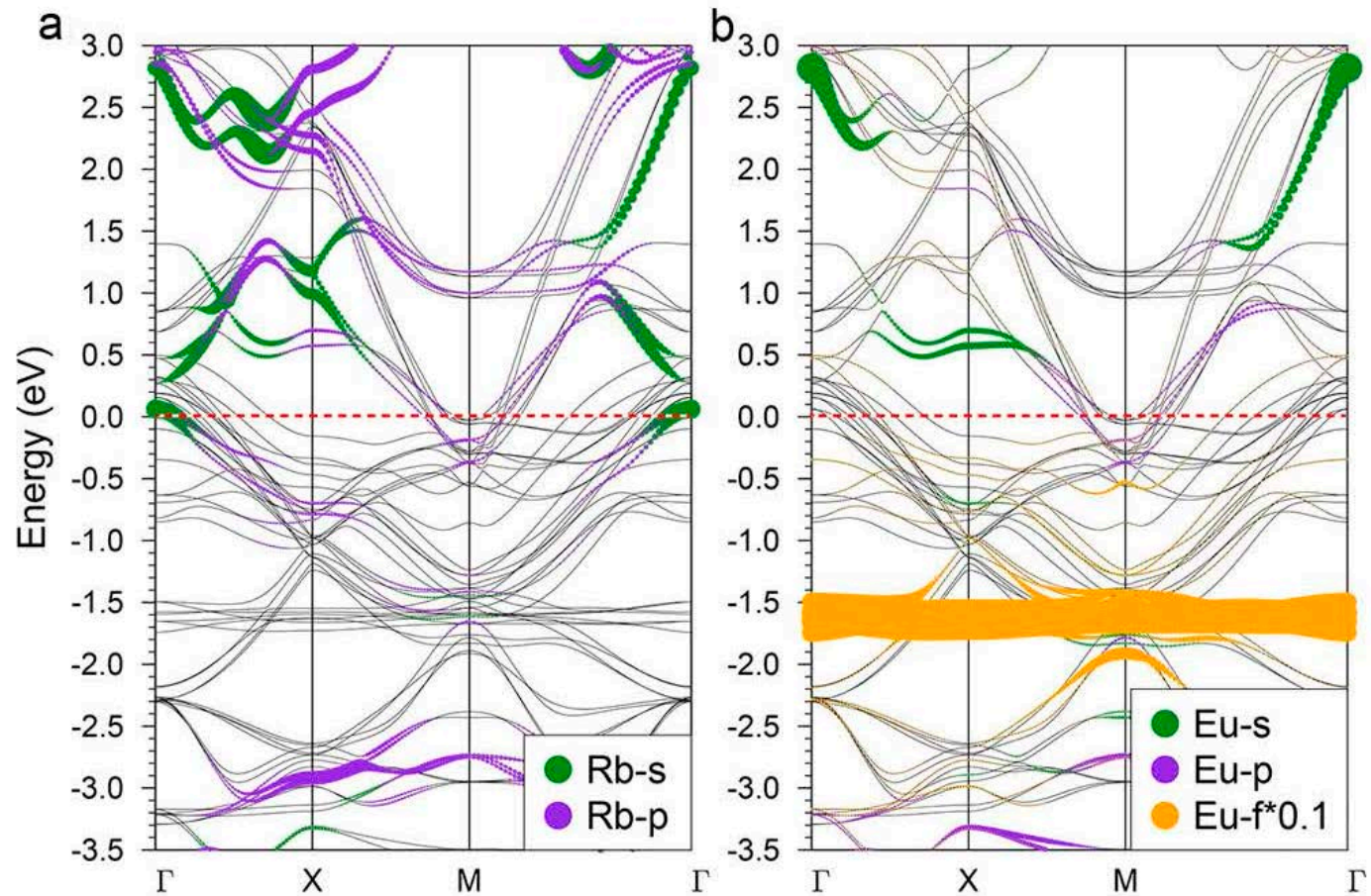
Iida et al, PRB (2019)



Koshelev, PRB (2019)

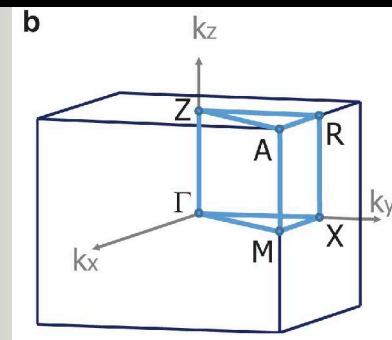
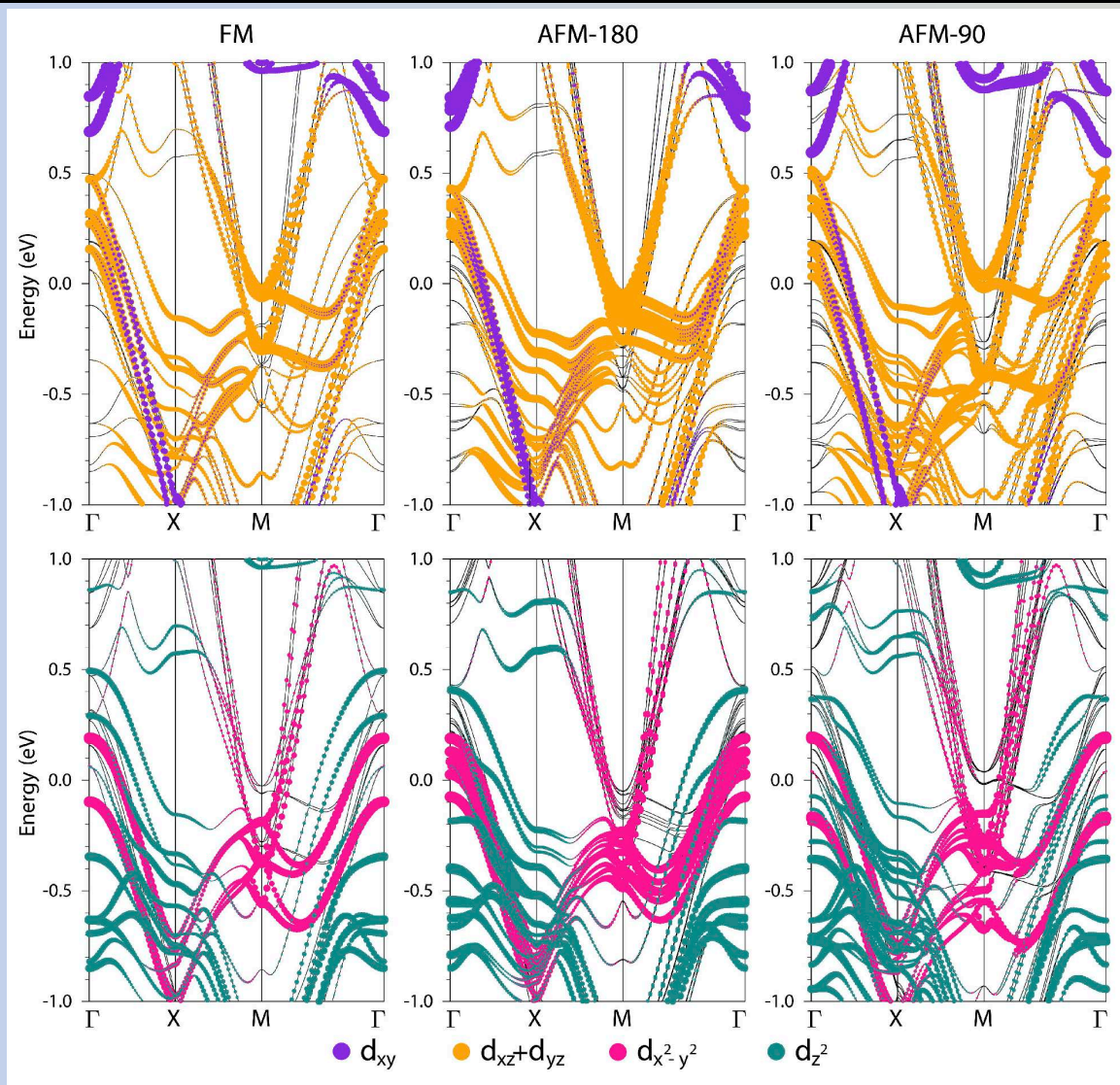
Zh.Devizorova, A.Buzdin  
PRB (2019)

# Уровни Eu и Rb в зонной структуре

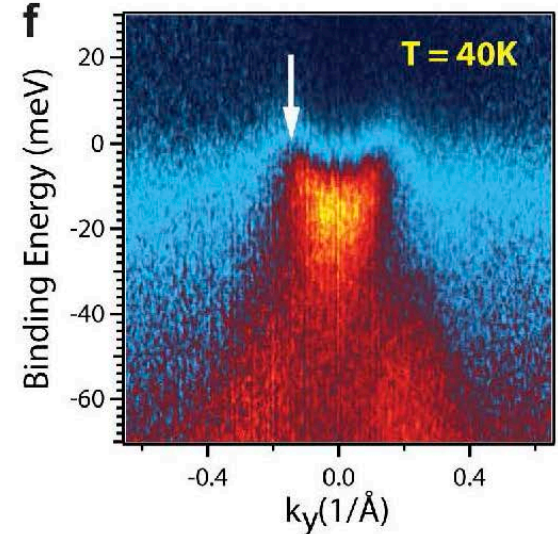
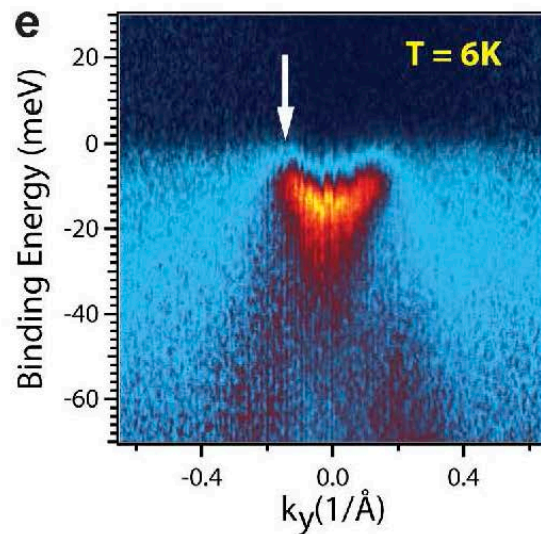
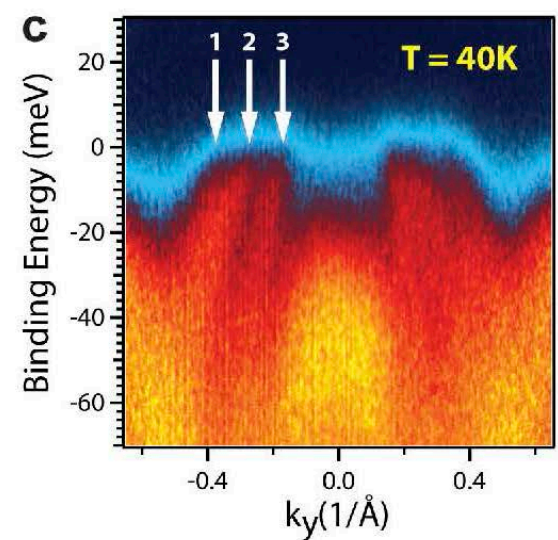
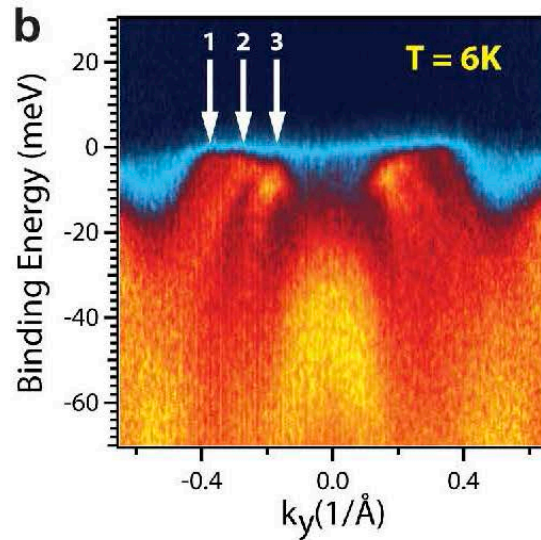
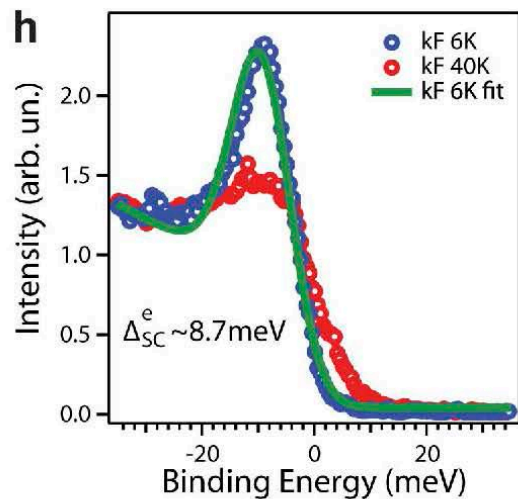
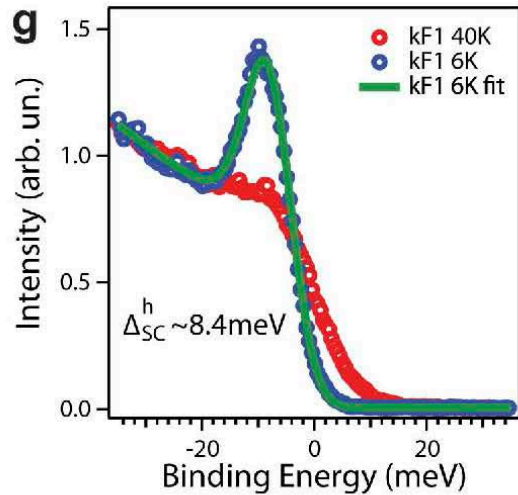




# Зонная структура и магнитный порядок (расчет)

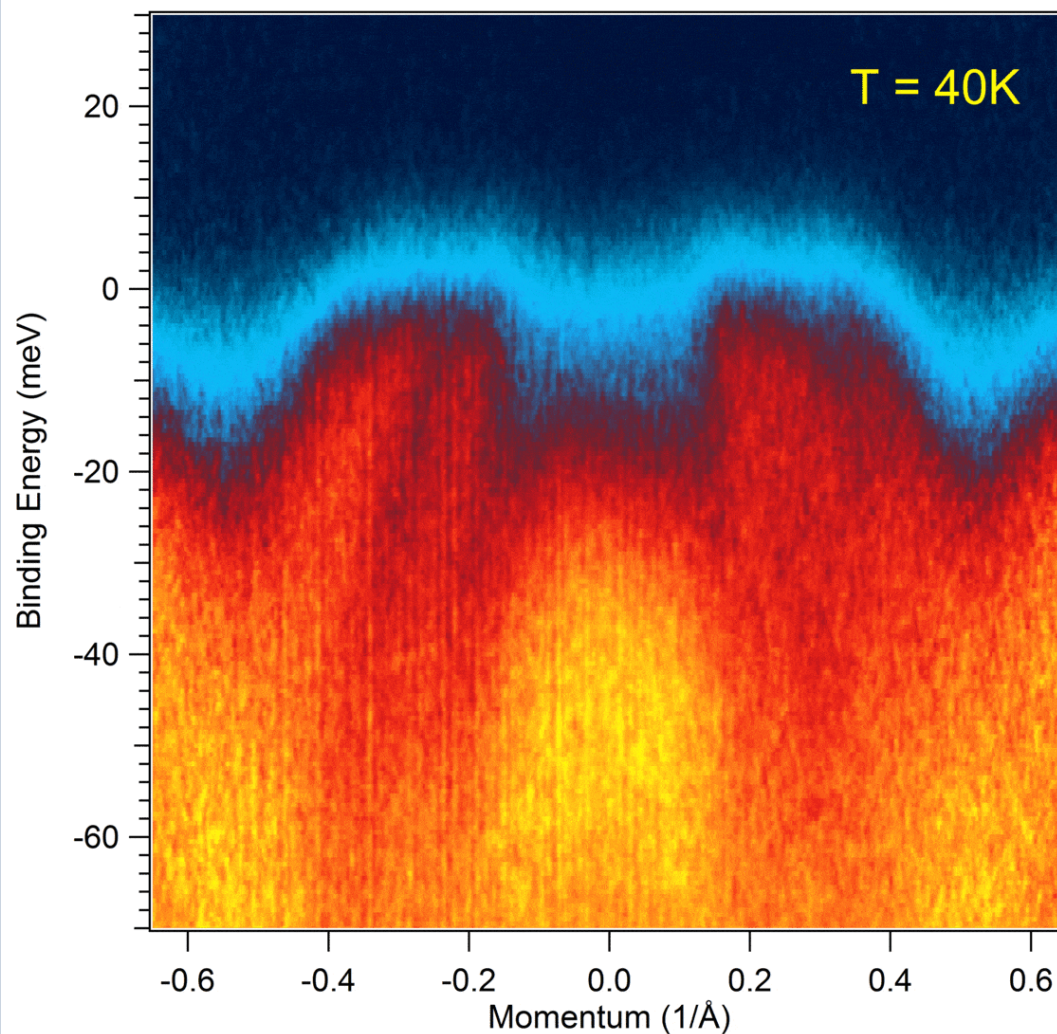
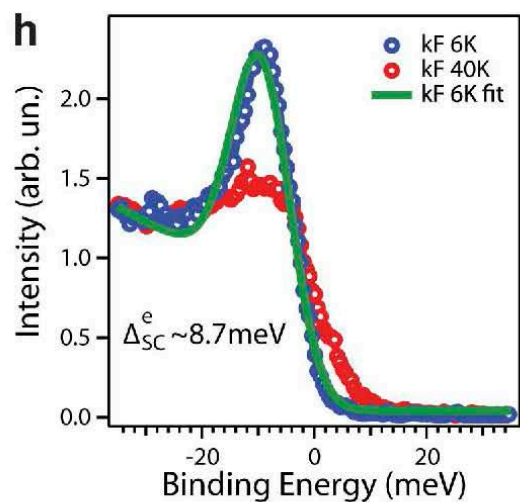
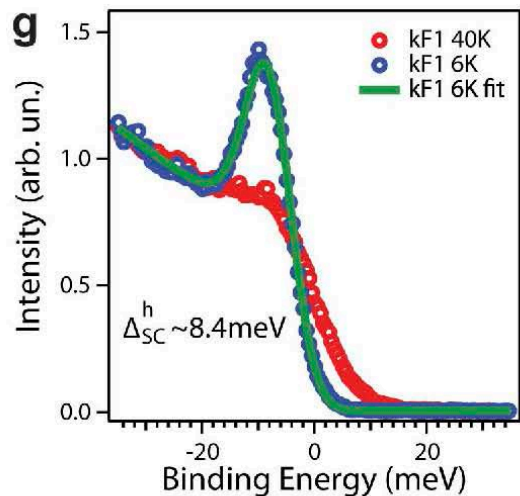


# Сверхпроводящая щель в ARPES

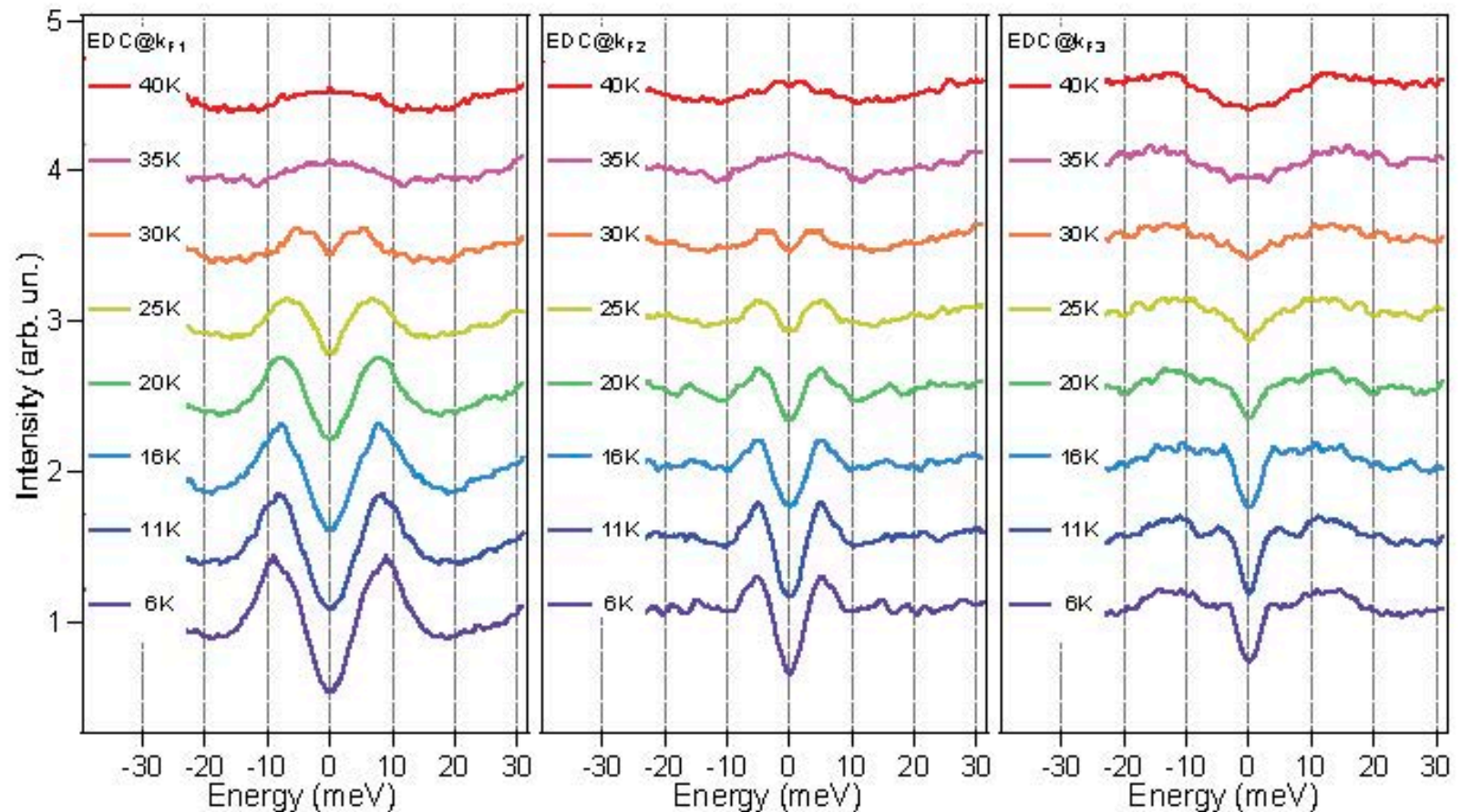




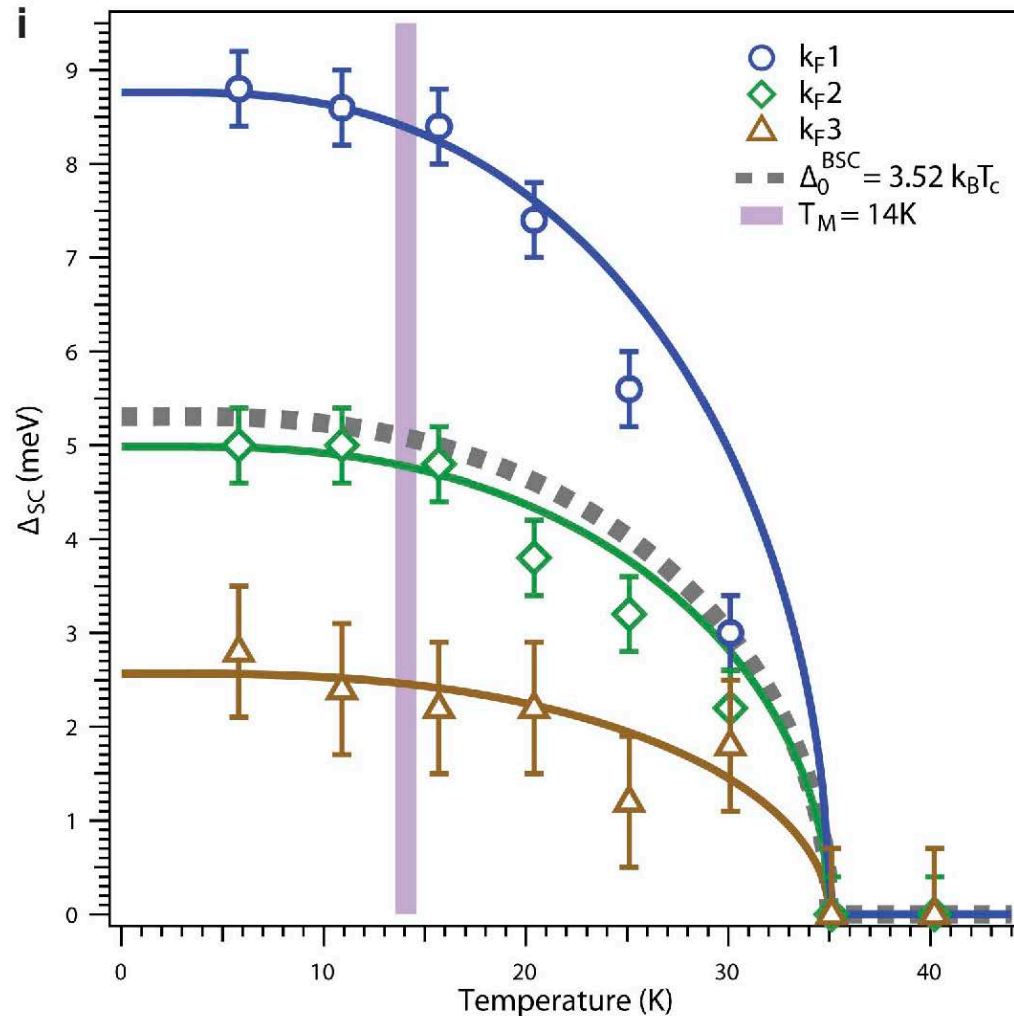
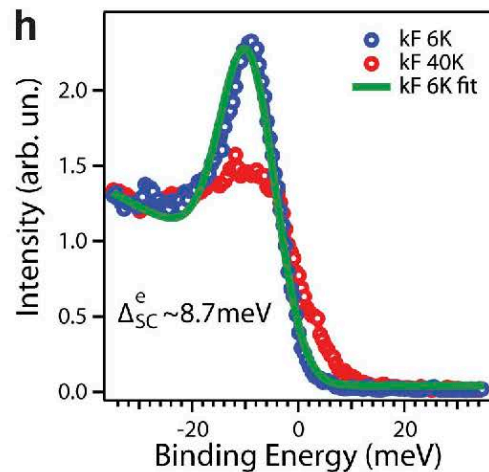
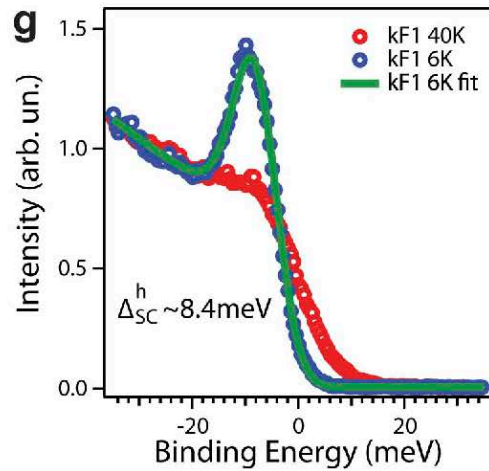
# Сверхпроводящая щель в ARPES



# Открытие СП щели в ARPES спектрах

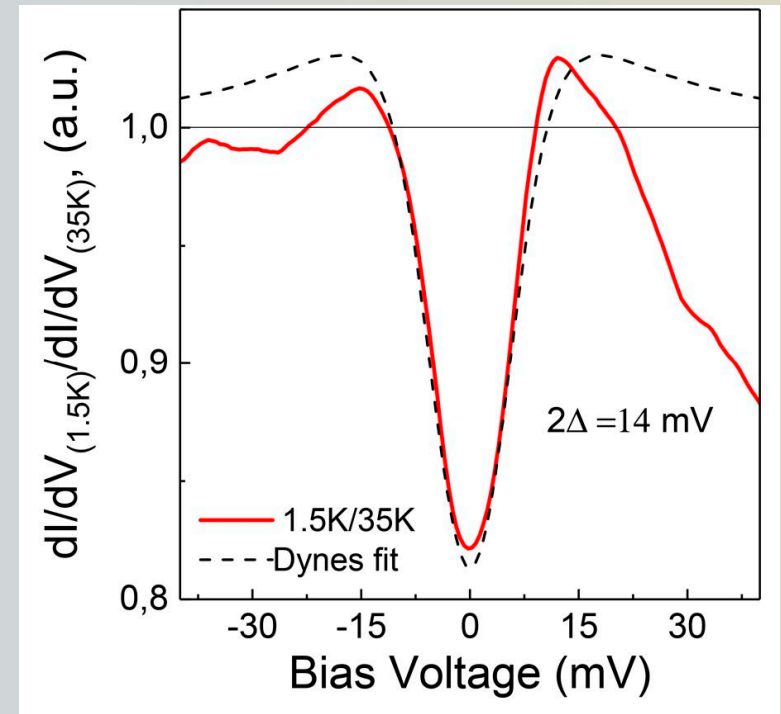
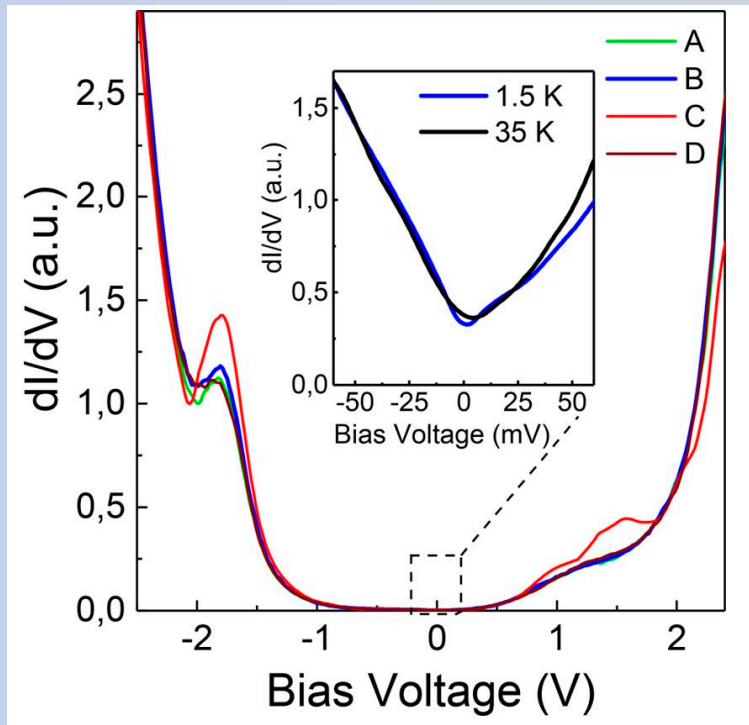


# Сверхпроводящая щель в ARPES





# Сверхпроводящие щели из STS



# Заключение

- Уровни Eu (АФМ) и Fe (СП) разнесены далеко по энергии
- Атомы Eu (АФМ) и Fe (СП) отстоят далеко по  $z$
- Поэтому амплитуда параметра порядка не “чувствует” АФМ



**Спасибо за внимание!**