



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Программа дисциплины «Физика низкоразмерных систем» для направления 03.06.01 «Физика и астрономия»
профиля подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 01.04.09 «Физика низких температур»

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"**

**Программа дисциплины
«Физика низкоразмерных систем»**

для направления 03.06.01 «Физика и астрономия» профиля подготовки научно-педагогических
кадров в аспирантуре 01.04.09 «Физика низких температур»

Автор программы: В.Н.Глазков, с.н.с., e-mail: vglazkov@hse.ru

Одобрена на заседании Академического совета аспирантской школы по физике

Москва – 2017

Настоящая программа не может быть использована другими подразделениями университета и другими вузами без разрешения разработчика программы.



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Программа дисциплины «Физика низкоразмерных систем» для направления 03.06.01 «Физика и астрономия»
профиля подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 01.04.09 «Физика низких температур»

1. Область применения и нормативные ссылки

Настоящая программа учебной дисциплины устанавливает минимальные требования к знаниям и умениям аспиранта по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» для специальности 01.04.09 «Физика низких температур» и определяет содержание и виды учебных занятий и отчетности.

Программа разработана в соответствии с:

- Образовательным стандартом НИУ ВШЭ по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия»;
- Образовательной программой «Физика и астрономия» подготовки аспиранта.
- Учебным планом подготовки аспирантов по специальности 01.04.09 «Физика низких температур», утвержденным в 2016.

2. Цели освоения дисциплины: получение фундаментальных знаний в области физики низкоразмерных систем, знаний о физических свойствах различных низкоразмерных систем (электронных, магнитных), методах получения и экспериментального исследования таких систем, простейших теоретических моделях и численных методах, применяемых для описания таких систем, применении низкоразмерных систем при создании приборов и стандартов (эталонов). Освоение дисциплины должно способствовать формированию профессиональных компетенций, определяемых профилем программы аспирантуры.

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

Знать:

- способы формирования низкоразмерных систем и основные экспериментальные методы, используемые для характеристики таких систем,
- методы описания свойств низкоразмерных систем, в том числе простейшие численные методы,
- методы обработки результатов экспериментальных исследований в задачах, связанных с физикой низкоразмерных систем.

Уметь:

- использовать полученные знания при проведении научных исследований

Иметь навыки (приобрести опыт):

- применять методологию теоретических и экспериментальных исследований в области физики конденсированного состояния и физики низкоразмерных систем.

В результате освоения дисциплины аспирант осваивает следующие компетенции:



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
 Программа дисциплины «Физика низкоразмерных систем» для направления 03.06.01 «Физика и астрономия»
 профиля подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 01.04.09 «Физика низких температур»

| Компетенция (указываются в соответствии с ОС НИУ ВШЭ) | Код по ОС НИУ ВШЭ | Дескрипторы – основные признаки освоения (показатели достижения результата) | Формы и методы обучения, способствующие формированию и развитию компетенции |
|--|------------------------------|--|--|
| Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях | УК-1 | Демонстрирует способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях | Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников. |
| Способность осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки | УК-2 | Демонстрирует способность осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки | Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников. |
| Готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках. | УК-4 | Демонстрирует готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках. | Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников. |
| Способность выполнять теоретические и экспериментальные исследования в области физики конденсированного состояния | ПК-1 | Демонстрирует способность выполнять теоретические и экспериментальные исследования в области физики конденсированного состояния | Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников. |
| Способность выполнять теоретические и экспериментальные исследования в области физики воздействия излучений и плазмы на конденсированные вещества | ПК-2 | Демонстрирует способность выполнять теоретические и экспериментальные исследования в области физики воздействия излучений и плазмы на конденсированные вещества | Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников |
| Способность выполнять теоретические и экспериментальные исследования в области физического и радиационного | ПК-3 | Демонстрирует способность выполнять теоретические и экспериментальные исследования в области физического и радиационного | Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников |



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
 Программа дисциплины «Физика низкоразмерных систем» для направления 03.06.01 «Физика и астрономия»
 профиля подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 01.04.09 «Физика низких температур»

| | | | |
|---|-------|---|---|
| материаловедения | | материаловедения | |
| Способность выполнять теоретические и экспериментальные исследования в области физических процессов при создании микроэлектроники и наноэлектроники на квантовых эффектах | ПК-4 | Демонстрирует способность выполнять теоретические и экспериментальные исследования в области физических процессов при создании микроэлектроники и наноэлектроники на квантовых эффектах | Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников |
| Способность выполнять теоретические и экспериментальные исследования в области физических процессов при создании космической электроники и радиоэлектроники | ПК-5 | Демонстрирует способность выполнять теоретические и экспериментальные исследования в области физических процессов при создании космической электроники и радиоэлектроники | Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников |
| Способность к созданию приборов наноэлектроники, основанных на новых физических принципах, таких как квантовые эффекты | ПК-7 | Демонстрирует способность к созданию приборов наноэлектроники, основанных на новых физических принципах, таких как квантовые эффекты | Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников |
| Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области теоретической и прикладной физики с использованием современных физических методов исследования и информационно-коммуникационных технологий. | ОПК-1 | Демонстрирует способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области теоретической и прикладной физики с использованием современных физических методов исследования и информационно-коммуникационных технологий. | Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников. |
| Способность к разработке новых методов исследования и их применению в самостоятельной профессиональной научно-исследовательской деятельности. | ОПК-2 | Демонстрирует способность к разработке новых методов исследования и их применению в самостоятельной профессиональной научно-исследовательской деятельности. | Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников. |

4. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Настоящая дисциплина относится к дисциплинам вариативной части, обязательной для профиля «Физика низких температур».

Изучение данной дисциплины базируется на следующих базовых дисциплинах:



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Программа дисциплины «Физика низкоразмерных систем» для направления 03.06.01 «Физика и астрономия»
профиля подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 01.04.09 «Физика низких температур»

- Физика
- Математика
- Иностранный язык

Для освоения учебной дисциплины, аспиранты должны владеть следующими знаниями и компетенциями:

- способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-6).

Основные положения дисциплины должны быть использованы в дальнейшем при изучении следующих дисциплин: -

5. Тематический план учебной дисциплины

1. Термодинамика низкоразмерных систем
2. Одномерная и двумерная модель Изинга
3. Численные методы описания модели Изинга. Примеры систем, описываемых моделью Изинга
4. Переход Березинского-Костерлица-Таулеса
5. Одномерные электронные системы
6. Двумерные электронные системы
7. Квантовый эффект Холла
8. Одномерные спиновые системы 1: Спектр возбуждений изинговской и XY моделей
9. Одномерные спиновые системы 2: Гейзенберговская спиновая цепочка
10. Спиновые цепочки в магнитном поле
11. Низкоразмерные спиновые системы

6. Формы контроля знаний аспирантов

Текущий контроль: контрольные работы

Итоговый контроль: экзамен

6-1. Примеры задач контрольной работы

1. В рамках теории возмущений вычислить спектр возбуждений гейзенберговской одномерной цепочки спинов $S=1/2$, состоящей из слабо связанных димеров
2. Графен - это двумерная форма углерода, атомы углерода занимают места в узлах решётки из правильных шестиугольников с общими сторонами, сторона шестиугольника $a=0.142\text{нм}$. (а) Учитывая только акустические колебания в плоскости (средняя скорость звука 20 км/сек) в рамках дебаевского приближения найти вклад этих колебаний в решёточную теплоёмкость графена при низких температурах. (б) В графене возможны также колебания атомов в направлении, перпендикулярном плоскости. Спектр таких длинноволновых колебаний (аналогичный колебаниям мембраны) оказывается квадратичным $\omega=k^2 \times 5 \cdot 10^7 \text{ м}^2/\text{сек}$. Определить низкотемпературный вклад этой моды в теплоёмкость. При какой температуре эти вклады сравниваются?
3. Электроны над поверхностью жидкого гелия формируют двумерный слой на расстоянии около 100А от поверхности. Притяжение электронов к границе гелия связано с действием



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Программа дисциплины «Физика низкоразмерных систем» для направления 03.06.01 «Физика и астрономия»
профиля подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 01.04.09 «Физика низких температур»

электростатических сил заряда отражения, отталкивание – с отрицательным сродством электрона к гелию. Из-за отталкивания электрона от гелия под электроном деформируется граница раздела. Если приложить к слою электронов переменное электрическое поле, то эта деформация станет центром генерации поверхностных волн (риплов), спектр которых $\omega^2 = \sigma k^3 / \rho$, где $\sigma = 0.36$ дин/см, коэффициент поверхностного натяжения, а $\rho = 0.147$ г /см³ плотность. При достаточно низкой температуре в двумерном электронном газе формируется периодическое состояние вигнеровского кристалла. Оценить поверхностную концентрацию электронов, если в эксперименте наблюдается резонансное поглощение энергии электрического поля при частоте колебаний поля 30 МГц.

6-2. Примеры вопросов экзамена

1. Простейшая реализация метода Монте-Карло для модели Изинга. Вычислить численно зависимости от температуры полной намагниченности изинговского ферромагнетика на двумерной квадратной решётке и на двумерной треугольной решётке. Сравнить оцениваемые из результатов моделирования температуры упорядочения.
2. Переход Березинского Костерлица-Таулеса. Показать, что существование свободного вихря термодинамически выгодно только выше конечной температуры. Переход Березинского-Костерлица-Таулеса в классическом планарном XY-магнетике и в плёнках сверхтекучего гелия.
4. Одномерная цепочка спинов 1/2 в XY-модели. Схема построения волновых функций, энергия основного состояния и спектр возбуждений. Представление в виде безспиновых фермионов.
5. XY-модель в магнитном поле. При $T=0$ вычислить восприимчивость в нулевом поле, найти поле насыщения и закон изменения намагниченности вблизи поля насыщения. Вывести полную кривую намагниченности $M(H)$ при нулевой температуре.
6. Двумерный электронный газ. Характерные значения параметров (полей, температур), необходимых для получения двумерного электронного газа. Поведение двумерного электронного газа в квантующем магнитном поле. Краевые состояния, ток краевых состояний и квантовый эффект Холла.
7. Пайерлсовский переход в одномерном металле: выигрыш и проигрыш в энергии, изменение проводимости при переходе. Методы наблюдения пайерлсовской неустойчивости
8. Электронный спектр графена. В рамках приближения сильной связи показать, что спектр электронов в двумерном графене линеен в окрестности дираковской точки.

7. Содержание дисциплины

Тема 1. Термодинамика низкоразмерных систем

Низкоразмерные системы: характерные длины, возможности формирования низкоразмерных систем. Особенности физики низкоразмерных систем: отсутствие дальнего порядка в одно- и двумерных кристаллах с линейным спектром возбуждений, отсутствие бозе-конденсации в двумерном случае, неустойчивость одномерной системы взаимодействующих фермионов.

Тема 2. Одномерная и двумерная модель Изинга

Одномерная модель Изинга: свободная энергия и корреляционная функция. Элементарное возбуждение одномерной модели Изинга. Двумерная модель Изинга на квадратной решётке.



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Программа дисциплины «Физика низкоразмерных систем» для направления 03.06.01 «Физика и астрономия»
профиля подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 01.04.09 «Физика низких температур»

Свободная энергия двумерной модели Изинга. Элементарное возбуждение двумерной модели Изинга. Фазовый переход в двумерной модели Изинга. Поведение параметра порядка и теплоёмкости при фазовом переходе в двумерной модели Изинга. Двумерная модель Изинга с разными параметрами взаимодействия (без вывода). Изменение температуры упорядочения при переходе к квази-одномерному случаю.

Тема 3. Численные методы описания модели Изинга. Примеры систем, описываемых моделью Изинга

Применение метода Монте-Карло к двумерной модели Изинга. Примеры изинговских систем: отображение задачи о газе на решётке на изинговский гамильтониан, примеры изинговских магнетиков в одно- и двумерном случае и экспериментальные результаты. «Спиновый лёд» как пример необычных свойств изинговского ферромагнетика в трёхмерном случае.

Тема 4. Переход Березинского-Костерлица-Таулеса

Переход Березинского-Костерлица-Таулеса. Вихри в XY-магнетике. Сверхтекучесть тонких плёнок гелия.

Тема 5. Одномерные электронные системы

Пайерлсовская неустойчивость в одномерном металле. Аномалия Кона. Примеры квазиодномерных металлов, демонстрирующих пайерлсовский переход. Квантование проводимости одномерного проводника.

Тема 6. Двумерные электронные системы

Низкоразмерный электронный газ. Двумерный и одномерный электронный газ в полупроводниковых структурах. Двумерный электронный газ над поверхностью гелия. Состояние вигнеровского кристалла в двумерном электронном газе. Низкоразмерный электронный газ в графене и нанотрубках. Спектр электронов в графене.

Тема 7. Квантовый эффект Холла

Двумерный электронный газ в магнитном поле. Целочисленный квантовый эффект Холла, его связь с краевыми состояниями. Условия наблюдения целочисленного и дробного квантового эффекта Холла.

Тема 8. Одномерные спиновые системы 1: Спектр возбуждений изинговской и XY моделей

Цепочка спинов $S=1/2$ в XXZ модели. Основное состояние и спектр возбуждений для цепочки с изинговским гамильтонианом. Цепочка спинов $S=1/2$ в XY модели. Основное состояние и спектр возбуждений для цепочки с XY-гамильтонианом. Фермионное представление возбуждений в спиновой цепочке.



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Программа дисциплины «Физика низкоразмерных систем» для направления 03.06.01 «Физика и астрономия»
профиля подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 01.04.09 «Физика низких температур»

Тема 9. Одномерные спиновые системы 2: Гейзенберговская спиновая цепочка

Гейзенберговская цепочка спинов $S=1/2$. Построение волновой функции основного состояния (анзац Бете), энергия основного состояния и спектр возбуждений (без строгого вывода).

Тема 10. Спиновые цепочки в магнитном поле

Гейзенберговская цепочка спинов $S=1/2$ в магнитном поле, кривые восприимчивости и намагничивания. Примеры экспериментальных исследований гейзенберговских цепочек спинов $S=1/2$.

Тема 11. Низкоразмерные спиновые системы

Цепочки спинов $S=1/2$ с различными геометриями обменных связей. Димеризованная цепочка и спин-пайерлсовский переход. Цепочка с взаимодействием соседей, следующих за ближайшими. Цепочка спинов $S=1$. Гипотеза Халдейна и её экспериментальная проверка. Роль анизотропных взаимодействий в низкоразмерных системах. Дефекты в низкоразмерных магнетиках.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Для преподавания дисциплины требуется лекционная аудитория с проектором и экраном.