

**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>	Физика низкоразмерных систем
<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 техники низких температур
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: В.Н. Глазков, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и техники низких температур 01.04.2024

## Аннотация

Курс рассчитан на ознакомление слушателей с различными явлениями, возникающими в системах с пониженной пространственной размерностью.

Понижение пространственной размерности в некоторых случаях упрощает теоретический анализ задачи и даже делает возможным точное решение некоторых задач (например, решение двумерной модели Изинга), невозможное в обычном трёхмерном случае. Кроме того, в системах с пониженной размерностью оказываются возможными новые явления, качественно отличающиеся от физических явлений в случае трёх измерений (например, квантовый эффект Холла). Наконец, сама задача достижения состояния с пониженной пространственной размерностью в исследуемой системе в некоторых случаях оказывается интересной с экспериментальной точки зрения и заслуживает рассмотрения в рамках подготовки студентов на кафедре физики низких температур (например, задача получения двумерного электронного газа).

Курс ориентирован на студентов 5 курса (1 год магистратуры) ЛФИ (ФОПФ) МФТИ.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- ознакомление обучающихся с различными явлениями, возникающими в системах с пониженной пространственной размерностью.

#### Задачи дисциплины

- ознакомление с теорией и экспериментами в области физики низкоразмерных систем.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-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-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-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-5.3 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-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные экспериментальные данные и теоретические подходы для описания низкоразмерных систем.

уметь:

- производить оценки термодинамических величин в различных низкоразмерных системах.

владеть:

- методами вычислений спектров элементарных возбуждений в низкоразмерных системах.

### 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	Модель Изинга в системах различной размерности	10	10		15
2	Низкоразмерные электронные системы	10	10		15

3	Низкоразмерные спиновые системы	10	10		15
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Модель Изинга в системах различной размерности

Особенности физики низкоразмерных систем. Отсутствие дальнего порядка в одно- и двумерных кристаллах с линейным спектром возбуждений, отсутствие бозе-конденсации в двумерном случае.

Точное решение модели Изинга в одном и двух измерениях. Одномерная модель Изинга: свободная энергия и корреляционная функция, элементарное возбуждение одномерной модели Изинга. Двумерная модель Изинга на квадратной решётке: 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. Применение метода Монте-Карло к двумерной модели Изинга.

Двумерная модель Изинга с разными параметрами взаимодействия. Изменение температуры упорядочения при переходе к квази-одномерному случаю.

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.

##### 2. Низкоразмерные электронные системы

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

Пайерлсовская неустойчивость в одномерном металле. Аномалия Кона. Примеры квазиодномерных магнетиков, демонстрирующих пайерлсовский переход.

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. Спектр электронов в графене.

Двумерный электронный газ в магнитном поле. Целочисленный квантовый эффект Холла.

##### 3. Низкоразмерные спиновые системы

Низкоразмерные спиновые системы. Примеры модельных спиновых систем с разной геометрией обменных связей: спиновые цепочки, «спиновые лестницы», двумерные решётки, двумерные решётки с геометрической фрустрацией обменных связей (треугольная и кагоме-решётки, решётка Шастри-Сазерленда).

Формирование квази-низкоразмерных систем в реальных магнетиках. Упорядочение квази-низкоразмерных магнетиков и редукция спина в упорядоченных состояниях квазинизкоразмерных магнетиков.

Гейзенберговская цепочка спинов  $S=1/2$ . Цепочка с взаимодействием ближайших соседей. Анзац Бете, энергия основного состояния и спектр возбуждений.

Гейзенберговская цепочка спинов  $S=1/2$ . Цепочка с альтернированным обменным взаимодействием. Формирование щели в спектре возбуждений. Спин-пайерлсовский переход. Цепочка с взаимодействием соседей следующих за ближайшими.

Гейзенберговская цепочка спинов  $S=1$ . Гипотеза Халдейна. Щель в спектре возбуждений и энергетический спектр халдейновского магнетика.

Спин-щелевые магнетики. Спектр возбуждений спин-щелевого магнетика. Влияние магнитного поля на спектр возбуждений. Формирование индуцированного магнитным полем антиферромагнитного порядка выше критического поля.

Дефекты в низкоразмерных спиновых системах. Индуцирование примесями дальнего магнитного порядка. Эффективный спин обрыва цепочки в халдейновском магнетике.

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

Учебная аудитория, доска, медиапроектор, экран.

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### Основная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 3 : Квантовая механика. Нерелятивистская теория : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .— 5-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2004, 2002 .— 808 с.
2. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 5, Ч. 1 : Статистическая физика : учеб. пособие для ун-тов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .— 5-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2001, 2002, 2005, 2010 .— 616 с.
1. А.И.Смирнов, «Порядок и беспорядок в спиновых цепочках.», МФТИ 2003
2. L.J de Jong and A.R.Miedema, «Experiments on simple magnetic model systems», Advances in Physics, 50, 247 (2001)
3. Н.-J.Mikeska, A.Kolezhuk, «One-dimensional magnetism», Lect. Notes Phys 645, 1-83 (2004)
4. под ред. Р.Пренджа и С.Гирвина, «Квантовый эффект Холла», 1989

### Дополнительная литература

1. Klaus von Klitzing, “Developments in the quantum Hall effect”, Philosophical Transaction of the Royal Society A, 363, 2203 (2005)
2. J.M.Kosterlitz and D.J.Thouless, “Two-dimensional physics”, Progress in low temperature physics VII B (1978); J.M.Kosterlitz and D.J.Thouless, “Ordering, metastability and phase transitions in two-dimensional systems”, J. Phys. C: Solid State Phys., 6, 1181 (1973)

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

Электронные библиотеки

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

Электронные библиотеки.

## **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;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

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

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**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 техники низких температур
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

<b>Разработчик:</b>	В.Н. Глазков, канд. физ.-мат. наук
---------------------	------------------------------------

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-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-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-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-5.3 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	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



новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физика низкоразмерных систем» обучающийся должен:

### знать:

- основные экспериментальные данные и теоретические подходы для описания низкоразмерных систем.

### уметь:

- производить оценки термодинамических величин в различных низкоразмерных системах.

### владеть:

- методами вычислений спектров элементарных возбуждений в низкоразмерных системах.

## 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 или в конце занятия по пройденной теме.

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

1. Особенности физики низкоразмерных систем.
2. Точное решение модели Изинга в одном и двух измерениях.
3. Фазовый переход в двумерной модели Изинга.
4. Двумерная модель Изинга с разными параметрами взаимодействия.
5. Примеры изинговских систем.
6. Переход Березинского-Костерлица-Таулеса. Вихри в XY-магнетике.
7. Сверхтекучесть тонких плёнок гелия.
8. Пайерлсовская неустойчивость в одномерном металле. Аномалия Кона.
9. Низкоразмерный электронный газ.
10. Низкоразмерный электронный газ в графене.
11. Двумерный электронный газ в магнитном поле.
12. Целочисленный квантовый эффект Холла.
13. Низкоразмерные спиновые системы.
14. Формирование квази-низкоразмерных систем в реальных магнетиках.
15. Гейзенберговская цепочка спинов  $S=1/2$ .
16. Гейзенберговская цепочка спинов  $S=1$ . Гипотеза Халдейна.
17. Спин-щелевые магнетики. Спектр возбуждений спин-щелевого магнетика.
18. Дефекты в низкоразмерных спиновых системах.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Низкоразмерные спиновые системы.
2. Гейзенберговская цепочка спинов  $S=1/2$ .

Билет 2.

1. Спин-щелевые магнетики. Спектр возбуждений спин-щелевого магнетика.

## 2. Точное решение модели Изинга в одном и двух измерениях.

Билет 3.

1. Двумерный электронный газ в магнитном поле.

2. Точное решение модели Изинга в одном и двух измерениях.

### 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

Экзамен проводится по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.