

**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**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Статистика и кинетика критических явлений
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра проблем физики и астрофизики
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 45 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 90 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: С.М. Апенко, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры проблем физики и астрофизики 10.06.2024

Аннотация

Фазовые переходы, когда при малом изменении некоторых параметров происходит радикальное изменение свойств системы, — одно из самых интересных явлений природы. Мы сталкиваемся с ними практически во всех областях физики, от физики низких температур до космологии. Особый интерес при переходах второго рода вызывает сама критическая точка, в которой происходит фазовый переход, и ее малая окрестность. Наблюдаемые здесь особенности поведения, такие как масштабная инвариантность, универсальность, критическое замедление процессов релаксации, делают теорию критических явлений важным разделом современной теоретической физики.

В данном курсе мы познакомимся как с самыми яркими примерами фазовых переходов, так и с разными подходами к изучению критического поведения, начиная с теории Ландау и заканчивая идеями самоорганизованной критичности, играющими важную роль при анализе сложных систем. Основное внимание будет уделено подходу К. Вильсона, основанному на концепции преобразования ренормализационной группы, которое используется также в квантовой теории поля. Теория Вильсона интересна не только своими результатами, но и с методологической точки зрения, как пример необычайно оригинального подхода к решению сложной задачи, для которой не работали стандартные методы.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний в области теории фазовых переходов, изучение примеров построения новых подходов для решения нетривиальных задач теоретической физики, а также их практического применения в научных исследованиях.

Задачи дисциплины

- формирование знаний в области теории фазовых переходов, как дисциплины, играющей важную роль в подготовке физиков-теоретиков и обеспечивающей теоретические основы современных инновационных научных исследований;
- обучение студентов принципам решения задач современной теоретической физики, многие из которых тесно связаны с теорией фазовых переходов;
- формирование подходов к выполнению исследований студентами в области теоретической физики в рамках выпускных работ на степень магистра.

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-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-2.3 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
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-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные примеры фазовых переходов в различных областях физики и смежных дисциплин;
- основные понятия данного курса, такие как масштабная инвариантность, универсальность, критические индексы, преобразование ренормализационной группы, самоорганизованная критичность;
- теоретические модели, используемые для анализа критических явлений в физике;

уметь:

- эффективно использовать на практике изучаемые в курсе понятия и модели;
- абстрагироваться от несущественных влияний и выделять главное при моделировании реальных физических ситуаций;

владеть:

- методологией выбора адекватных методов исследования (наблюдений, теоретических и экспериментальных методов исследований);
- теоретическим аппаратом физики критических явлений.

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	Общее представление о фазовых переходах	2	1		6
2	Теория Ландау фазовых переходов второго рода	2	1		6
3	Одномерная модель Изинга	2	1		6
4	Высокотемпературные разложения	2	1		6
5	Двумерная модель Изинга	4	2		6
6	Преобразование ренормализационной группы	2	1		10
7	Основы теории протекания	4	2		10
8	Ренормгруппа Вильсона и ϵ -разложение	4	2		10
9	Переход Березинского-Костерлица-Таулеса в двумерных системах	2	1		8
10	Введение в SLE	2	1		8
11	Динамика систем вблизи точки фазового перехода	2	1		8
12	Самоорганизованная критичность	2	1		6
Итого часов		30	15		90
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Общее представление о фазовых переходах

Магнитные системы. Критическая точка в жидкости. Теория среднего поля. Критические индексы в теории среднего поля. Магнетики с бесконечным радиусом взаимодействия. Теория Ван-дер-Ваальса перехода жидкость-газ как теория среднего поля.

2. Теория Ландау фазовых переходов второго рода

Параметр порядка, нарушение симметрии, функционал Гинзбурга-Ландау, корреляционная длина. Флуктуации вблизи критической точки, критерий Гинзбурга. Влияние внешнего поля на фазовый переход.

3. Одномерная модель Изинга

Точное решение, поведение корреляционной длины при низких температурах. Метод трансфер-матрицы. Топологические дефекты (кинки) и их роль в разрушении дальнего порядка.

4. Высокотемпературные разложения

Построение высокотемпературных разложений для одномерной и двумерной моделей Изинга. Анализ радиуса сходимости рядов. Паде аппроксимации. Оценка критических индексов из высокотемпературных разложений.

5. Двумерная модель Изинга

Дуальность Крамерса-Ванье, решение Онзагера. Метод трансфер-матрицы в двумерной модели Изинга. Эффективный одномерный гамильтониан и описание критического поведения в терминах безмассовых фермионов.

6. Преобразование ренормализационной группы

Масштабная инвариантность. Ренормгруппа в реальном пространстве для одномерной и двумерной моделей Изинга. Неподвижные точки и критические индексы.

7. Основы теории протекания

Порог протекания, гипотеза скейлинга и критические индексы. Фрактальная размерность кластеров. Преобразование ренормгруппы для одномерной задачи и для двумерной треугольной решетки.

8. Ренормгруппа Вильсона и эpsilon-разложение

Ренормгруппа в импульсном пространстве для эффективного полевого действия. Зависимость от размерности пространства. Гауссова неподвижная точка. Нетривиальная фиксированная точка в размерности $d < 4$. Вычисление критических индексов в рамках ϵ -разложения.

9. Переход Березинского-Костерлица-Таулеса в двумерных системах

Двумерная XY-модель. Коррелятор спинов в гауссовом приближении. Вихри, взаимодействие вихрей. Переход Березинского-Костерлица-Таулеса. Уравнения ренормгруппы Костерлица. Поведение корреляционной длины вблизи точки перехода. БКТ-переход в сверхтекучей пленке и в двумерном кристалле.

10. Введение в SLE

Уравнение Лёвнера, его решение в простейших случаях. Соотношение между коэффициентом диффузии и фрактальной размерностью критических кривых. Приложение к теории протекания.

11. Динамика систем вблизи точки фазового перехода

Релаксация к равновесию в критической области. Глауберовская динамика и времена релаксации в одномерной модели Изинга.

12. Самоорганизованная критичность

Модель песчаной горки в одном и двух измерениях. Динамика лавин. Идея самоорганизованной критичности и анализ поведения сложных систем.

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. 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.
2. Фазовые переходы и критические явления [Текст] = Introduction to phase transitions and critical phenomena, [монография]/Г. Стенли , -М., Мир, 1973
3. Бэкстер Р. Точно решаемые модели в статистической механике. - М.: Мир, 1985. 486 с.
4. Вильсон К., Когут Дж. Ренормализационная группа и эILON-разложение. - М.: Мир, 1975. 253 с.

Дополнительная литература

1. Квантовая теория поля в физике конденсированного состояния [Текст]/А. М. Цвелик , -М., Физматлит, 2004
2. Поляков А.М. Калибровочные поля и струны. ИТФ им. Л.Д. Ландау, 1995 – 300 с.
3. Березинский В.Л. Низкотемпературные свойства двумерных систем, М. Физматлит, 2007, 227 с. – ISBN 978-5-9221-0807-2.

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

Журналы по теоретической физике (ЖЭТФ, Physical Review Letters, Physical Review и др.), доступные через Internet научные и научно-технические журналы: <http://scitation.aip.org/>, электронный архив <http://arxiv.org/>

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

Для контроля и коррекции знаний обучающиеся могут использовать компьютерное тестирование, в том числе на портале www.i-exam.ru.

В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как Mathcad, Matlab и др.

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 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 к преподавателю.

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

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению: Прикладные математика и физика
профиль подготовки: Общая и прикладная физика
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау
кафедра проблем физики и астрофизики
курс: 1
квалификация: магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: С.М. Апенко, канд. физ.-мат. наук

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-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-2.3 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
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	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Статистика и кинетика критических явлений» обучающийся должен:

знать:

- основные примеры фазовых переходов в различных областях физики и смежных дисциплин;
- основные понятия данного курса, такие как масштабная инвариантность, универсальность, критические индексы, преобразование ренормализационной группы, самоорганизованная критичность;
- теоретические модели, используемые для анализа критических явлений в физике;

уметь:

- эффективно использовать на практике изучаемые в курсе понятия и модели;
- абстрагироваться от несущественных влияний и выделять главное при моделировании реальных физических ситуаций;

владеть:

- методологией выбора адекватных методов исследования (наблюдений, теоретических и экспериментальных методов исследований);
- теоретическим аппаратом физики критических явлений.

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

Перечень контрольных вопросов

1. Критическая точка, корреляционная длина, критические индексы.
2. Параметр порядка, функционал Гинзбурга-Ландау.
3. Низколежащие возбуждения, их роль в разрушении порядка.
4. Трансфер-матрица в спиновых моделях.
5. Ренормгруппа в реальном пространстве, децимация.
6. Одномерная модель Изинга, вычисление статсуммы.
7. Модель Глаубера для эволюции изинговской цепочки.
8. Дуальность Крамерса-Ванье в двумерной модели Изинга.
9. Высокотемпературное разложение в теории фазовых переходов.
10. Явление перколяции. Бесконечный кластер, порог протекания.

Примеры контрольных заданий

1. Построить высокотемпературное разложение для одномерной модели Изинга с периодическими граничными условиями.
2. Методом ренормгруппы найти корреляционную длину одномерной модели Изинга в пределе низких температур.
3. С помощью ренормгруппы оценить порог протекания для двумерной квадратной решетки.
4. Изучить с помощью ренормгруппы критическое поведение одномерной Гауссовой модели.
5. Используя уравнения ренормгруппы Костерлица-Таулеса найти корреляционную длину двумерной XY-модели вблизи перехода Березинского-Костерлица-Таулеса.

Пример билета на дифференцированном зачёте:

Билет 1.

1. Теория среднего поля. Критические индексы в теории среднего поля.
2. Одномерная модель Изинга, вычисление статсуммы.

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 недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо 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 твёрдо 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

При проведении устного дифференцированного зачёта обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном зачёте не должен превышать одного астрономического часа.