

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»
Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана физического факультета МГУ,
профессор, д.ф.-м.н.



/ В.В. Белокуров /

« 21 » марта 2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Физика низких температур

Low temperature physics

Программа (программы) подготовки
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре
Физика низких температур
(103-01-00-1310-фмн)

Москва 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с Приказом по МГУ от 24 ноября 2021 года № 1216 «Об утверждении Требований к основным программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, самостоятельно устанавливаемых Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова».

1. Краткая аннотация:

Название дисциплины: Физика низких температур.

Цель изучения дисциплины – настоящая дисциплина направлена на систематизацию и углубление знаний о современном состоянии и тенденциях развития в области физики и техники низких температур. Основу курса составляют главные разделы физики конденсированного состояния, магнетизма, сверхпроводимости, и физики низких температур.

2. Уровень высшего образования - подготовка кадров высшей квалификации.

3. Научная специальность: 1.3.10 Физика низких температур; область науки: естественные науки.

4. Место дисциплины (модуля) в структуре Программы аспирантуры: дисциплины (модули), направленные на подготовку к кандидатским экзаменам - Дисциплина, совпадающая с наименованием научной специальности.

5. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся:

Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 54 часа составляет контактная работа аспиранта с преподавателем (52 часа занятия лекционного типа, 2 часа мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации), 54 часа составляет самостоятельная работа учащегося.

6. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия.

Для освоения дисциплины необходимы знания высшей математики, общей физики, термодинамики и статистической физики, атомной физики, квантовой теории в объеме курсов, преподаваемых на физических специальностях классических университетов, а также специальных курсов по физике конденсированного состояния вещества, магнетизму и сверхпроводимости.

7. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них						Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка к коллоквиумам	Всего
Тема 1. Техника низких температур (Методы получения сверхнизких температур методами рефрижератора растворения, Померанчука, адиабатического размагничивания. Методы измерения температур: газовый термометр, термопары, металлические, полупроводниковые и угольные термометры сопротивления, магнитная термометрия. Методы получения сильных магнитных полей: стационарные магнитные поля,	12	6					6	6		6

электромагниты, сверхпроводящие соленоиды, импульсные поля. Методы получения высоких давлений)										
Тема 2. Термодинамика и статистическая физика (Абсолютная температура. Первое, второе и третье начала термодинамики. Термодинамические потенциалы. Химический потенциал. Уравнение Клапейрона - Клаузиуса. Понятие функции распределения. Каноническое распределение Гиббса. Распределение Максвелла - Больцмана. Равновесные фазовые переходы. Фазовые переходы первого и второго рода. Изменение симметрии и параметр порядка. Критические индексы. Статистика Ферми - Дирака. Статистика Бозе - Эйнштейна. Бозе- эйнштейновская конденсация, свойства Бозе-конденсата)	12	6					6	6		6

Тема 3. Низкотемпературная физика твердого тела (Трансляционная симметрия кристаллов. Концепция квазичастиц. Теорема Блоха. Элементарная ячейка и зона Бриллюэна. Энергетический спектр электронов в твердых телах. Металлы, полупроводники, диэлектрики. Фононный спектр в кристаллах. Тепловое расширение, теплоемкость, теплопроводность твердых тел. Гальваномагнитные явления. Квантовые осцилляции термодинамических и кинетических величин. Высокочастотные свойства твердых тел. Скин-эффект. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс. Ядерный квадрупольный резонанс. Эффект Мёсбауэра. Целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла.)	24	12					12	12		12
Тема 4. Сверхтекучесть (Жидкий гелий. Сверхтекучесть ^4He и ^3He. Теория сверхтекучести Ландау. Сверхтекучая и нормальная компоненты. Параметр порядка в сверхтекучем ^4He и сверхтекучем ^3He. Фазовые диаграммы ^4He и	12	6					6	6		6

ЗНе. Фононы и ротонны. Квантованные вихри в гелии. Сверхтекучесть в пленках. Твердый гелий, фазовая диаграмма. Антиферромагнетизм ЗНе)										
Тема 5. Сверхпроводимость (Критические температура, ток и магнитное поле. Эффект Мейснера. Уравнения Лондонов. Нелинейная электродинамика сверхпроводников, уравнение Пиппарда. Теория сверхпроводимости Гинзбурга- Ландау. Глубина проникновения и длина когерентности. Сверхпроводники первого и второго рода. Вихри Абрикосова. Модель Бардина-Купера- Шриффера. Спектр элементарных возбуждений в сверхпроводниках. Энергетическая щель. Туннельные эффекты на границе сверхпроводника. Стационарный и нестационарный эффекты Джозефсона. Квантовые интерферометры. Режимы работы СКВИДа. Органические сверхпроводники. Фуллерены, сверхпроводимость фуллеридов. Системы с тяжелыми фермионами. Магнитные	24	12					12	12		12

сверхпроводники. Оксидные высокотемпературные сверхпроводники. Применение сверхпроводников.)										
Тема 6. Низкотемпературный магнетизм (Атомный магнетизм. Принцип Паули. Диамагнетизм и парамагнетизм. Закон Кюри. Диамагнетизм Ландау. Парамагнетизм Паули. Парамагнетизм Ван Флека. Эффект Кондо. Основные типы магнитного упорядочения. Закон Кюри - Вейсса. Ферромагнетизм. Ферримагнетизм. Антиферромагнетизм. Состояние спинового стекла. Магнитное обменное взаимодействие. Взаимодействие Дзялошинского. Модели Изинга и Гейзенберга. Магнитная анизотропия. Магнитные кластеры, наноразмерные структуры. Низкоразмерный магнетизм)	22	10					10	8	4	12
Промежуточная аттестация: допуск к кандидатскому экзамену	2					2	2			
Итого	108	52				2	54	50	4	54

8. Образовательные технологии

Используемые формы и методы обучения: лекции и семинарские занятия, самостоятельная работа аспирантов.

В процессе преподавания дисциплины преподаватель использует как классические формы и методы обучения (лекции и семинарские занятия), так и активные методы обучения.

При проведении лекционных занятий преподаватель использует при необходимости аудиовизуальные, компьютерные и мультимедийные средства обучения, а также демонстрационные и наглядно-иллюстрационные (в том числе раздаточные) материалы.

9. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы по дисциплине (модулю): аспирантам предоставляется программа курса, план занятий и задания для самостоятельной работы, презентации к лекционным занятиям.

10. Ресурсное обеспечение:

Основная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 1976; Квантовая механика. М.: Наука, 1974; Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.
2. Справочник по физико-техническим основам криогеники/Под ред. М.П. Малкова). М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Каганов М., Цуккерник В. Природа магнетизма «УРСС», М., 2008
4. Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А. Квазичастицы в физике конденсированного состояния. «Физматлит», М., 2016.

Дополнительная литература:

1. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Статистическая физика. Ч. II. М.: Наука, 1978; Физическая кинетика. М.: Наука, 1979.
2. Скотт Р.Б. Техника низких температур. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
3. Методы получения и измерения низких и сверхнизких температур / Под ред. Б.И. Веркина. Киев: Наукова думка, 1987.
4. Халатников И.М. Теория сверхтекучести. М.: Наука, 1971.
5. Попов М.И. Термометрия и калориметрия. М.: Изд-во МГУ, 1954.
6. Заварицкий Н.В. Сверхпроводимость. М.: Изд-во МФТИ, 1985.
7. Брандт Н.Б., Чудинов С.М. Электроны и фононы в металлах. «Издательство МГУ», М., 1990.
8. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.
9. Абрикосов А.А. Основы теории металлов. М.: Наука, 1987.
10. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. М.: Мир, 1979.
11. Шмидт В.В. Введение в сверхпроводимость. М.: Наука, 1982.
12. Тилли Дж., Тилли Дж. Сверхтекучесть и сверхпроводимость. М.: Мир, 1977.
13. Лоунасмаа О.В. Принципы и методы получения температур ниже 1 К. М.: Мир, 1977.
14. Линтон Э.А. Сверхпроводимость. М.: Мир, 1974.
15. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов. «Наука», М., 1972.
16. Ракитин Ю.В., Калинин В.Т., Современная магнетохимия. «Наука», С.-Пб, 1994.
17. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. «Наука», М., 1974
18. Физические свойства ВТСП, том 1, под ред. А.И. Буздина и В.В. Мошалкова, ВНК "Базис", М., 1990.

19. Физические свойства ВТСП, том 2, под ред. А.И. Буздина и В.В. Мошалокова, ВНК "Базис", М., 1991.

11. Язык преподавания – русский.

12. Преподаватели:

К.ф.-м.н., доцент Маркина Мария Михайловна, e-mail: markina@lt.phys.msu.ru, тел.: 8 (495) 939 59 05.

Фонды оценочных средств, необходимые для оценки результатов обучения

Образцы домашних заданий:

1. Дайте определение квазичастицы. Перечислите условия введения квазичастиц.
2. Напишите уравнения Джозефсона. Сформулируйте условия, при которых наблюдается стационарный эффект Джозефсона.
3. Нарисуйте температурную зависимость фононной теплоемкости твердых тел и перечислите особенности этой кривой. В чем различие и сходство моделей Дебая и Эйнштейна?
4. В чем состоит нормальный и аномальный скин-эффект? Какова типичная толщина скин-слоя?
5. Назовите основные постулаты теории Бардина-Купера-Шриффера.
6. Каковы типичные значения энергии Ферми и скорости Ферми для электронов в металлах?
7. Запишите функции распределения Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна. Изобразите зависимость распределения неразличимых частиц по энергетическим состояниям от температуры для этих распределений. Сравните квантовую статистику с классическим распределением Максвелла-Больцмана.
8. Перечислите основные методы получения сверхнизких температур. В чем их специфика? Какие температуры достижимы каждым методом?
9. Чем различаются квантовые модели Изинга и Гейзенберга? Чем обусловлен выбор теоретической модели для системы, содержащей конкретные магнитные ионы? Что является характеристикой модели – подходит она лучше или хуже для данного случая?

Вопросы для промежуточной аттестации – зачета:

1. Типы сил связи в конденсированном состоянии, их особенности.
2. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Ячейка Вигнера-Зейтца. Решетка Браве.
3. Устройство кристаллических структур, отвечающих плотным упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, ГПУ.
4. Распространение волн в кристаллах. Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов в кристалле.
5. Закон дисперсии упругих волн в кристаллах. Акустические и оптические колебания.
6. Квантование колебаний кристаллической решетки. Фононы.
7. Теплоемкость твердых тел. Температурная зависимость решеточной и электронной теплоемкости.
8. Квантовая теория теплоемкости твердых тел. Модели Эйнштейна и Дебая. Предельные случаи высоких и низких температур.
9. Тепловое расширение твердых тел. Ангармонические колебания кристаллической решетки.

10. Решеточная и электронная теплопроводность твердых тел. Закон Видемана-Франца
11. Электронные свойства твердых тел: основные экспериментальные факты. Проводимость, эффект Холла.
12. Зонная теория твердых тел. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны.
13. Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний.
14. Зонная теория твердых тел. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Полуметаллы.
15. Намагниченность и восприимчивость твердых тел. Диамагнетики и парамагнетики. Законы Кюри и Кюри - Вейсса.
16. Природа обменного взаимодействия. Знак обмена. Фазовый переход из парамагнитного в ферромагнитное или антиферромагнитное состояние.
17. Природа ферромагнетизма. Поведение намагниченности ферромагнитного вещества в зависимости от температуры и внешнего поля. Ферромагнитные домены.
18. Особенности поведения намагниченности и восприимчивости антиферромагнетиков в зависимости от температуры и магнитного поля. Магнитная структура. Точка Нееля. Анизотропия восприимчивости.
19. Магнитный момент атома в постоянном и переменном магнитных полях. Электронный парамагнитный резонанс.
20. Комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические постоянные. Коэффициенты поглощения и отражения. Соотношения Крамерса-Кронига.
21. Проникновение высокочастотного поля в проводник. Нормальный и аномальный скин-эффекты.
22. Сверхпроводимость. Критическая температура. Эффект Мейснера. Критическое поле и критический ток.
23. Классические и высокотемпературные сверхпроводники.
24. Уравнения Лондонов и уравнение Гинзбурга-Ландау.
25. Микроскопическая теория сверхпроводимости. Куперовское спаривание. Энергетическая щель.
26. Сверхпроводники первого и второго рода. Длина когерентности и глубина проникновения. Вихри Абрикосова.
27. Стационарный и нестационарный эффекты Джозефсона. Применения в электронике.

Методические материалы для проведения процедур оценивания результатов обучения

Зачет проходит по билетам, включающим 3 вопроса. Уровень знаний аспиранта по каждому вопросу на «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». В случае если на все вопросы был дан ответ, оцененный не ниже чем «удовлетворительно», аспирант получает общую оценку «зачтено».

Шкала оценивания знаний, умений и навыков

Результат освоения дисциплины	Критерии оценивания знаний, умений и навыков			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
Знания	Отсутствие знаний о современном состоянии и тенденциях развития в области физики низких температур	В целом успешные, но не систематические знания современного состояния и	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания о современном	Успешные и систематические знания о современном состоянии и

		тенденций развития области физики низких температур	состоянии и тенденциях развития области физики низких температур	тенденциях развития в области физики низких температур
Умения	Отсутствие умения применять основы физики твердого тела, магнетизма и сверхпроводимости для постановки научных задач в области физики низких температур	В целом успешное, но не систематическое умение применять основы физики твердого тела, магнетизма и сверхпроводимости для постановки научных задач в области физики низких температур	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять основы физики твердого тела, магнетизма и сверхпроводимости для постановки научных задач в области физики низких температур	Успешное и систематическое умение применять основы физики твердого тела, магнетизма и сверхпроводимости для постановки научных задач в области физики низких температур
Навыки	Отсутствие/фрагментарное владение навыками решения научных и технических задач в области физики низких температур	В целом успешное, но не систематическое владение навыками решения научных и технических задач в области физики низких температур	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками решения научных задач и технических задач в области физики низких температур	Успешное и систематическое владение навыками решения научных и технических задач в области физики низких температур