

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО
решением Ученого совета ННГУ
протокол № 13 от 30.11.2022 г.

Рабочая программа дисциплины
Теория спиновых явлений в полупроводниках

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки / специальность
03.04.02 - Физика

Направленность образовательной программы
магистерская программа «Физика конденсированного состояния»

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2023 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Теория спиновых явлений в полупроводниках» относится к вариативной части Б1.В блока Б1 «Дисциплины (модули)», является дисциплиной по выбору, преподается на втором году обучения, в третьем семестре.

Целями освоения дисциплины «Теория спиновых явлений в полупроводниках» являются:

1. овладение методами многозонной теории полупроводников и теории низкоразмерных систем, оптики и кинетики полупроводников при учете спин-орбитального взаимодействия, способствующей творческому использованию в теоретической и практической деятельности уже известных физических законов, а также восприятию и генерации новых физических идей;
2. освоение студентами основных принципов спиновой физики твердого тела и физических следствий наличия спин-орбитального взаимодействия в твердотельных системах;
3. знакомство с последними достижениями в областях спинтроники и квантовых вычислений;
4. выработка у студентов практических навыков по решению задач теории полупроводников, теории низкоразмерных систем и квантовой теории твердого тела на примере систем со спин-орбитальным взаимодействием.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-3. Способен свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной и проектной деятельности	<i>ПК-3.1. Знание основных законов физики</i> <i>ПК-3.2. Умение решать научно-инновационные задачи в своей инновационной и проектной деятельности</i> <i>ПК-3.3. Навыки применения результатов научных исследований в инновационной и проектной деятельности и зарубежного опыта</i>	(ПК-3) Знать основные принципы использования и области применимости теории спиновых явлений в конкретных задачах физики конденсированного состояния; (ПК-3) Уметь применять в профессиональной деятельности навыки постановки и решения задач, требующих применения теории спиновых явлений в твердых телах; (ПК-3) Владеть навыками теории спиновых явлений при решении задач в области физики конденсированного состояния.	Индивидуальные собеседования	Индивидуальные практические задания, экзамен

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	4
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	34
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
- КСР	2
самостоятельная работа	110
Промежуточная аттестация	54
	экзамен

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе				
		контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) в течение семестра, часы, из них				Самостоятельная работа в течение семестра, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Уравнение Дирака. Природа спин-орбитального взаимодействия. Релятивистская квантовая механика как основа спиновой физики. Уравнение Дирака и уравнение Вейля. Разложение уравнения Дирака по степеням $1/c$: преобразование Фолди-Ваутхайзена. Спин электрона. Эффект Зеемана. Спин-орбитальное взаимодействие и другие поправки $\sim 1/c^2$. Спин-орбитальное взаимодействие в центрально-симметричном поле. Полный момент импульса в уравнении Дирака. Понятие о сложении моментов. Поправки к спектру водородоподобных ионов, связанные со спин-орбитальным взаимодействием.	11	2	2	–	4	7
2. Спин-орбитальное взаимодействие в объемных полупроводниках. Влияние спин-орбитального взаимодействия на электронные состояния в невырожденной зоне. Спин-орбитальное взаимодействие и двойные группы симметрии. Влияние спин-орбитального	11	2	2	–	4	7

<p>взаимодействия на электронные состояния в вырожденной зоне. Спин-орбитальное расщепление. k·p-метод при учете спин-орбитального взаимодействия. Валентная зона кубических полупроводников при учете спин-орбитального взаимодействия. Гамильтониан Латтинджера. Гамильтониан Кейна 8 x 8. Каноническое преобразование гамильтониана Кейна. Спин-орбитальное взаимодействие и симметрия уравнения Шредингера по отношению к обращению времени. Спин-орбитальное взаимодействие в объемных полупроводниках без центра инверсии. Гамильтониан Дрессельхауза в объемных полупроводниках со структурой цинковой обманки. Спиновое расщепление в объемных полупроводниках в нулевом магнитном поле.</p>						
<p>3. Спин-орбитальное взаимодействие в низкоразмерных системах. Приближение огибающей при учете спин-орбитального взаимодействия. Граничные условия. Спин-орбитальное взаимодействие Дрессельхауза в двумерных системах (квантовых ямах). Спин-орбитальное взаимодействие Дрессельхауза в одномерных системах (квантовых нитях). Структурная и интерфейсная асимметрия. Спин-орбитальное взаимодействие в присутствии внешнего поля. Спин-орбитальное взаимодействие Рашба в двумерных системах. Спиновое расщепление в двумерных системах в нулевом магнитном поле.</p>	11	2	2	—	4	7
<p>4. Стационарные состояния электронов во внешнем магнитном поле. Трехмерный электронный газ, помещенный во внешнее однородное магнитное поле: случай неквадрупольного поля. <i>g</i>-фактор электронов проводимости и влияние на него спин-орбитального взаимодействия. Формула Л.М. Рот. Случай сильного спин-орбитального взаимодействия и непараболичности зоны: <i>g</i>-фактор как функция волнового вектора (на примере объемного арсенида индия). Трехмерный электронный газ, помещенный во внешнее однородное магнитное поле: случай квадрупольного поля. Магнитные подзоны. Двумерный электронный газ, помещенный во внешнее однородное магнитное поле: случай неквадрупольного поля. Расчет <i>g</i>-фактора электронов в квантовых ямах. Двумерный электронный газ, помещенный во внешнее однородное магнитное поле: случай квадрупольного поля. Уровни Ландау. Уровни Ландау в присутствии спин-орбитального взаимодействия Рашба.</p>	11	2	2	—	4	7
<p>5. Динамические и кинетические спиновые явления. Оптическая ориентация электронных спинов в объемных полупроводниках и низкоразмерных структурах. Фотолюминесценция с поляризационным разрешением. Спиновая релаксация носителей в полупроводниках. Механизмы спиновой релаксации Эллиотта-Яфета и Дзяконова-Переля. Слабая</p>	11	2	2	—	4	7

антилокализация. Спиновая релаксация за счет неоднородности g-фактора. Спин-зависимый транспорт в полупроводниках. Спиновый эффект Холла. Аномальный эффект Холла.						
6. Динамические и кинетические спиновые явления во внешнем магнитном поле. Поглощение электромагнитного излучения: спиновый (парамагнитный) и циклотронный (диамагнитный) резонанс. Влияние инверсионной асимметрии на спиновый и циклотронный резонансы электронов проводимости. Ширина линии спинового и циклотронного резонанса. Магнетосопротивление. Осцилляции Шубникова-де Гааза и влияние на них спин-орбитального взаимодействия. Детектирование спинового расщепления в объемных полупроводниках и полупроводниковых структурах. Магнитооптические эффекты. Спектроскопия по методу «накачка-зондирование».	11	2	2	—	4	7
7. Обменное и сверхтонкое взаимодействие в полупроводниках и полупроводниковых структурах. Обменное взаимодействие в металлах. Прямой и косвенный обмен. s-d модель. Эффект Кондо. Разбавленные магнитные полупроводники. Осцилляции Рудермана-Киттеля. РККИ-взаимодействие. Спиновая релаксация носителей на магнитных примесях. Электрическая спиновая инжекция из ферромагнетиков в полупроводники. Обменное взаимодействие между электроном и дыркой. Тонкая структура уровней экситона. Спиновая релаксация Бира-Аронова-Пикуса. Сверхтонкое взаимодействие электронных и ядерных спинов. Взаимное влияние электронной и ядерной подсистем кристалла: сдвиги Найта и Оверхаузера, динамическая поляризация ядер. Спиновая релаксация электронов проводимости за счет сверхтонкого взаимодействия.	11	2	2	—	4	7
8. Избранные вопросы современной теории спиновых явлений. Квантовый спиновый эффект Холла в двумерных системах. Двумерные и трехмерные топологические изоляторы. Спиновые кубиты на основе примесей в кремнии. Релаксация и декогеренция кубитов. Модель квантового компьютера Брюса Кейна.	11	2	2	—	4	7
В т.ч. текущий контроль	2	2				—
Промежуточная аттестация — экзамен						

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа студента – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – формирование у студентов способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа студентов подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, решение домашних контрольных работ с последующей проверкой навыков решения задач.

Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных студентам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в

конце данной программы) проводится в период сессии при подготовке к экзамену по дисциплине.

Выполнение домашних работ осуществляется еженедельно или раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

Задачи для выполнения самостоятельных контрольных работ по каждому разделу дисциплины составляются преподавателем самостоятельно при ежегодном обновлении банка тестовых заданий. Количество вариантов зависит от числа обучающихся.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Экзамен	
Превосходно	Превосходная подготовка с очень незначительными погрешностями. Исчерпывающее и логически строгое изложение всех разделов дисциплины. Владение материалом позволяет быстро справиться с видоизмененным заданием. Успешное решение любых типов практических заданий.
Отлично	Подготовка, уровень которой существенно выше среднего с некоторыми ошибками. Твердое знание всех разделов дисциплины. Допускаются неточности, нарушения в последовательности изложения материала. Владение необходимыми приемами и способами решения практических заданий.
Очень хорошо	Хорошая подготовка с рядом заметных недочетов. Твердое знание основных разделов дисциплины. Владение необходимыми приемами и способами решения основных типов практических заданий.
Хорошо	В целом, хорошая подготовка, но со значительными ошибками. Твердое знание основных разделов дисциплины. Владение необходимыми приемами и способами решения практических заданий.
Удовлетворительно	Подготовка, удовлетворяющая минимальным требованиям. Знания основного содержания разделов дисциплины, допускаются грубые неточности, неправильные формулировки, нарушения в последовательности изложения материала. Имеющихся знаний достаточно для освоения дисциплин последующих курсов. Допускаются значительные ошибки при выполнении практических заданий.
Неудовлетворительно	Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания. Незнание значительной части основного содержания разделов дисциплины. Имеющихся знаний недостаточно для освоения дисциплин последующих курсов.

Плохо	Подготовка совершенно недостаточная. Отсутствуют знания большей части основного содержания разделов дисциплины. Имеющихся знаний совершенно недостаточно для освоения дисциплин последующих курсов.
-------	---

6.2. Процедуры и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

– индивидуальное собеседование (промежуточная аттестация).

Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии: практические контрольные задания. Типы практических контрольных заданий:

– выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация).

Критерии ответа студента на экзамене

Оценка «отлично» – Ответ полный и правильный, на основании изученной теории; материал изложен в определенной логической последовательности, грамотный научный язык; ответ самостоятельный и полностью выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «хорошо» – Ответ полный и правильный, на основании изученной теории; материал изложен в определенной логической последовательности при этом допущены две–три несущественные ошибки, исправленные по требованию преподавателя и правильно; полностью выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «удовлетворительно» – Ответ полный, но при этом допущена существенная ошибка или неполный, несвязный ответ и выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «неудовлетворительно» – Ответ обнаруживает непонимание студентом основного содержания учебного материала или допущены существенные ошибки, которые не могут быть исправлены при наводящих вопросах преподавателя, не выполнены индивидуальные практические задания

6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

6.3.1 Примеры практических заданий для практических занятий, самостоятельной работы обучающихся, проведения текущего контроля и промежуточной аттестации:

1. Уравнение Дирака. Природа спин-орбитального взаимодействия.

- 1.1. Определить спин-орбитальное взаимодействие для электрона, помещенного в поле гармонической электромагнитной волны.
- 1.2. Выполнить разложение уравнения Дирака для релятивистского электрона в статическом электрическом поле вплоть до третьего порядка по степеням $1/c$.
- 1.3. Выполнить каноническое преобразование гамильтониана массивной вейлевской частицы, помещенной в слабое внешнее однородное электромагнитное поле.
- 1.4. Выполнить каноническое преобразование простейшей модели Кейна 4×4 для кристаллов со структурой цинковой обманки: в рассмотрении всего 2 зоны – типа Γ_1 и Γ_{15} , влиянием всех остальных зон пренебрегается, а взаимодействие этих зон учитывается точно в линейных по импульсу слагаемых.
- 1.5. Определить общий вид двухрядной унитарной матрицы – элемента унитарной группы $U(2)$.

2. Спин-орбитальное взаимодействие в объемных полупроводниках.

- 2.1. Определить, по каким неприводимым представлениям преобразуются блоховские функции квантовых состояний, которые смешиваются спин-орбитальным взаимодействием, в точке Γ структуры цинковой обманки; точке Γ структуры алмаза; точке Γ структуры вюрцита; точке L структуры алмаза; точке L структуры цинковой обманки; точке X структуры алмаза.
- 2.2. Получить явное выражение для оператора обращения времени в случае частицы со спином (орбитальным моментом) $3/2$.
- 2.3. Определить поправки к спектру водородоподобного донора в арсениде галлия, обусловленные спин-орбитальным взаимодействием Дрессельхауза.
- 2.4. Используя модель Диммока, определить спин-орбитальное взаимодействие, индуцированное водородоподобной примесью донорного типа в селениде свинца.

3. Спин-орбитальное взаимодействие в низкоразмерных системах.

- 3.1. Показать, что в двумерном электронном газе со спин-орбитальным взаимодействием хорошим квантовым числом является проекция полного момента на ось, перпендикулярную плоскости газа.
- 3.2. Определить параметры Дрессельхауза в электронных подзонах в симметричной квантовой яме, выращенной в направлении $[113]$, на основе прямозонного полупроводника со структурой цинковой обманки.
- 3.3. Рассчитать квантовые состояния в одномерной системе на основе двумерного электронного газа со спин-орбитальным взаимодействием Рашба. «Стенки» считать непроницаемыми.
- 3.4. Рассчитать квантовые состояния в одномерной системе на основе двумерного электронного газа со спин-орбитальным взаимодействием Дрессельхауза. «Стенки» считать непроницаемыми.
- 3.5. Рассчитать квантовые состояния в цилиндрической квантовой точке на основе двумерного электронного газа со спин-орбитальным взаимодействием Рашба. Границу квантовой точки считать непроницаемой.
- 3.6. Рассчитать квантовые состояния в цилиндрической квантовой точке на основе двумерного электронного газа со спин-орбитальным взаимодействием Дрессельхауза. Границу квантовой точки считать непроницаемой.

4. Стационарные состояния электронов во внешнем магнитном поле.

- 4.1. Определить однозонный g -фактор из двухзонной модели Диммока для халькогенидов свинца.
- 4.2. Рассчитать уровни Ландау для двумерного электронного газа в симметричной квантовой яме $[001]$ на основе полупроводника со структурой цинковой обманки, помещенного в перпендикулярное к плоскости ямы магнитное поле. Принять во внимание только одну подзону размерного квантования.
- 4.3. Рассчитать квантовые состояния в цилиндрической квантовой точке на основе двумерного электронного газа со спин-орбитальным взаимодействием Рашба, помещенной в перпендикулярное однородное магнитное поле. Границу квантовой точки считать непроницаемой.

5. Динамические и кинетические спиновые явления.

- 5.1. Рассчитать скорость спиновой релаксации электронов проводимости по механизму Эллиотта-Яфета при рассеянии на короткодействующих ионизованных донорах в полупроводнике со структурой цинковой обманки в рамках модели Кейна 8×8 .
- 5.2. Рассчитать разницу в вероятностях рассеяния электронов со спином «вверх» и спином «вниз» при взаимодействии с короткодействующим ионизованным донором в объемном полупроводнике со структурой цинковой обманки.

- 5.3. Рассчитать скорость спиновой релаксации электронов проводимости по механизму Дьяконова-Переля при взаимодействии с длинноволновыми акустическими фононами в асимметричной кремниевой квантовой яме с ориентацией $[1\ 1\ 1]$. Принять во внимание только одну подзону размерного квантования.
- 6. Динамические и кинетические спиновые явления во внешнем магнитном поле.**
- 6.1. Рассчитать коэффициент циклотронного поглощения в зоне проводимости асимметричной кремниевой квантовой ямы с ориентацией $[1\ 1\ 0]$ в перпендикулярном к плоскости ямы магнитном поле. Принять во внимание только одну подзону размерного квантования.
- 6.2. Определить частоту биений осцилляций Шубникова-де Гааза электронов в «одноподзонной» двумерной системе со спин-орбитальным взаимодействием, сформированной в симметричной квантовой яме арсенида индия, выращенной в направлении $[1\ 1\ 3]$. Учесть вклад в эффективный гамильтониан слагаемых не выше второго порядка по квазиволновому вектору.
- 7. Обменное и сверхтонкое взаимодействие в полупроводниках и полупроводниковых структурах.**
- 7.1. Определить поправки к энергии электрона, локализованного в сферической квантовой точке арсенида галлия с непроницаемой границей за счет сверхтонкого взаимодействия с ядрами. Рассмотреть случай как поляризованной, так и неполяризованной системы ядерных спинов.
- 7.2. Определить сдвиг частоты спинового резонанса для электрона, локализованного на водородоподобном доноре в 29 кремнии, за счет взаимодействия со спинами ядер. Рассмотреть случай как поляризованной, так и неполяризованной системы ядерных спинов.
- 8. Избранные вопросы современной теории спиновых явлений.**
- 8.1. Рассчитать топологически защищенные краевые состояния, формируемые на границе квантовой ямы HgTe/CdTe , используя модель Берневига-Хьюза-Жанга (BHZ). При расчете пренебречь асимметрией «частица-дырка».
- 8.2. Рассчитать квантовые состояния в цилиндрической квантовой точке на основе поверхности трехмерного топологического изолятора. Считать, что частица полностью локализована внутри точки.
- 8.3. Показать в явном виде, что взаимодействие с фононами нарушает топологическую защищенность краевых состояний в режиме квантового спинового эффекта Холла.
- 8.4. Оценить скорость декогеренции кубитов на основе локализованных на примесях электронных спинов в результате обменного взаимодействия между различными кубитами.

Примеры индивидуальных задач повышенной сложности для самостоятельной работы:

1. Используя метод эмпирического псевдопотенциала, определить зонную структуру арсенида галлия при учете спин-орбитального взаимодействия.
2. Используя метод эмпирического псевдопотенциала, определить структуру блоховских функций в кремнии при учете спин-орбитального взаимодействия.
3. Определить параметр Рашба в электронных подзонах в квантовой яме $\text{GaAs}/\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$.
4. Определить коэффициент непрямого поглощения правополяризованного электромагнитного излучения в германии.
5. Рассчитать скорость спиновой релаксации электронов проводимости в германии по механизму Эллиотта-Яфета при рассеянии на фононах, принимая во внимание только внутримолекулярные процессы рассеяния.

6. Рассчитать туннельный ток спин-поляризованных электронов через металлическую гранулу в условиях обменной блокады.
7. Рассчитать двумерную зонную структуру на поверхности трехмерного топологического изолятора со структурой теллурида висмута.

6.3.2. Вопросы для итогового контроля сформированности компетенции:

1. Природа спин-орбитального взаимодействия.
2. Волновые функции в невырожденной зоне при учете спин-орбитального взаимодействия.
3. Вырожденная зона при учете спин-орбитального взаимодействия. Спин-орбитальное расщепление. Гамильтониан Латтинджера.
4. Спин-орбитальное взаимодействие Дрессельхауза в трехмерных кристаллах.
5. Спин-орбитальное взаимодействие Дрессельхауза в двумерных системах.
6. Спин-орбитальное взаимодействие Рашба в двумерных системах.
7. Фактор Ландэ электронов проводимости в объемных полупроводниках. Формула Л.М. Рот.
8. Уровни Ландау в двумерном электронном газе со спин-орбитальным взаимодействием Рашба.
9. Оптическая ориентация электронных спинов.
10. Механизм спиновой релаксации Дзяконова-Переля.
11. Механизм спиновой релаксации Эллиотта-Яфета.
12. Спиновый эффект Холла.
13. Электронный парамагнитный резонанс. Спиновый резонанс электронов проводимости.
14. Циклотронный резонанс.
15. Методы детектирования спинового расщепления в двумерных системах.
16. Прямое и косвенное обменное взаимодействие в металлах. s-d модель.
17. Разбавленные магнитные полупроводники. Взаимодействие Рудермана-Киттеля.
18. Сверхтонкое взаимодействие. Сдвиги Найта и Оверхаузера. Спиновая релаксация, связанная со сверхтонким взаимодействием.
19. Квантовый спиновый эффект Холла. Топологические изоляторы.
20. Кубиты на примесях в кремнии. Релаксация и декогеренция кубитов.

6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 №55-ОД.

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Материально-техническое обеспечение дисциплины обусловлено наличием учебных аудиторий для проведения занятий, оборудованных специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории. Ресурс мела и маркеров для доски в учебных аудиториях регулярно возобновляется.

Учебные аудитории могут быть при необходимости оснащены демонстрационным оборудованием для сопровождения учебных занятий презентациями.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся (на базе Фундаментальной библиотеки ННГУ) оснащены компьютерной техникой с подключением к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ.

Программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

Автор(ы):

доцент кафедры теоретической физики физического факультета, к. ф.-м. н., А.А. Конаков.

Рецензенты(ы):

зав. кафедрой теоретической физики физического факультета, д. ф.-м. н., доцент В.А. Будров.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 17.11.2022, протокол № б/н.