

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
ФИЛИАЛ МГУ В Г. ДУБНЕ



УТВЕРЖДАЮ  
И.о. директора  
филиала МГУ в г.Дубне  
/ Э.Э. Боос /  
«14» 09 2022 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Наименование дисциплины:**

Экспериментальная физика наносистем

---

**Уровень высшего образования:**

Магистратура

---

**Направление подготовки:**

03.04.02 Физика

---

**Направленность (профиль) ОПОП:**

Физика элементарных частиц

---

**Форма обучения:** Очная форма обучения

---

Дубна 2022 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки программы магистратуры 03.04.02 «Физика».

Год (годы) приема на обучение \_\_\_\_\_

**Авторы–составители:**

1. доктор физ.-мат. наук, Авдеев Михаил Васильевич, по совместительству профессор физического факультета МГУ

**Руководитель магистерской программы:**

Доктор физ.-мат. наук, академик РАН Г.В. Трубников, по совместительству заведующий кафедрой физического факультета МГУ

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины «Экспериментальная физика наносистем»**

Целью курса является изучение студентами практических и теоретических основ метода малоуглового рассеяния и техники проведения нейтронных экспериментов в области исследования конденсированного состояния. В ходе данного курса студент должен получить представление об основных экспериментальных подходах метода малоуглового рассеяния в решении задач по структуре и динамике конденсированного состояния вещества, ознакомиться с основными методами исследования с помощью нейтронного малоуглового рассеяния, получить информацию об основных компонентах приборно-методологической базы нейтронного эксперимента, с основным упором на современное состояние дел в этой области.

### **Разделы рабочей программы**

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
4. Формат обучения.
5. Язык обучения.
6. Содержание дисциплины.
7. Объем дисциплины
8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.
10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
11. Шкала оценивания.
12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Экспериментальная физика наносистем» реализуется на 1-ом курсе во 2-ом семестре магистратуры и входит в состав вариативной части.

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

Базовые знания в области общей и теоретической физики в объеме классических университетских курсов

## 3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции	Результаты обучения
<b>МПК-2</b> Способен ставить, формализовать и решать задачи в области физики элементарных частиц	<b>ИМПК-2.3</b> Знает основные и перспективные направления физики элементарных частиц	<b>З-1</b> Знать: основные термины и модели в физике наносистем <b>У-1</b> Уметь: описывать характерные явления и процессы физики наносистем <b>В-1</b> Владеть: знаниями физики кристаллов, физики твердого тела, полупроводников и иных разделов, достаточными для решения задач физики наносистем

2. **Форма обучения:** очная.

3. **Язык обучения:** русский.

4. **Содержание дисциплины**

*Тема 1. Введение.*

Конденсированное состояние вещества: твердое тело (кристаллы и аморфные вещества); жидкость; мезоморфное состояние; кластерное состояние. Дальний и ближний порядок. Нанотехнологии. Диагностика наноматериалов.

*Тема 2. Кристаллы.*

Кристаллы. Симметрия кристаллов. Решетки Бравэ. Пространственные группы симметрии. Методы выращивания кристаллов. Методы синтеза нанокристаллов.

*Тема 3. Дифракция на кристаллах.*

Обратная решетка. Зоны Бриллюэна. Дифракция на периодических структурах. Закон Брэгга-Вульфа. Диагностика атомной структуры кристаллов дифракцией рентгеновских лучей и нейтронов. Нанокристаллы. Белковая кристаллография. Квазикристаллы.

*Тема 4. Дифракция на неперiodических структурах.*

Парная радиальная функция распределения. Структурный фактор рассеяния. Дифракция на жидкостях. Малоугловое рассеяние. Плотность длины рассеяния. Контраст. Форм-фактор рассеяния. Функция распределения парных расстояний. Инварианты рассеяния: параметры Гинье и закон Порода. Фрактальные кластеры и поверхности. Малоугловое рассеяние на актуальных наносистемах.

*Тема 5. Типы связи в кристаллах и дисперсных системах.*

Энергия связи. Ван-дер-Ваальсово взаимодействие. Ковалентная связь. Обменное взаимодействие. Структуры со смешанными ковалентными и ван-дер-Ваальсовыми связями. Ионная связь. Смешанные ионно-ковалентные связи. Водородная связь. Металлическая связь. Классификация типов связи в твердых телах. Дисперсионное взаимодействие между наночастицами в растворе. Вириальное разложение. Адсорбционные силы.

*Тема 6. Динамика кристаллов.*

Колебательные моды одноатомного кристалла. Акустические ветви. Колебательные моды кристалла с многоатомным базисом. Акустические и оптические ветви.

*Тема 7. Термодинамика кристаллов.*

Нормальные координаты. Фононы. Функция плотности фононных состояний. Фононная теплоемкость. Модели Эйнштейна и Дебая. Температура Дебая. Взаимодействие фононов. Тепловое расширение. Теплопроводность. Неупругое рассеяние нейтронов на фононах.

*Тема 8. Электронные состояния в твердых телах.*

Зонная теория твердых тел. Приближения слабой и сильной связи. Эффективная масса. Заполнение зон. Классификация кристаллов по проводимости с точки зрения зонной теории: проводники, диэлектрики, полупроводники.

*Тема 9. Металлы.*

Модель почти свободных электронов. Термодинамика свободных электронов. Парамагнетизм Паули. Проводимость (модель Зоммерфельда). Закон Ома. Теплопроводность. Закон Видемана-Франца. Эффект Холла. Контактные эффекты. Эмиссионные эффекты. Поверхность ферми в реальных металлах.

*Тема 10. Полупроводники.*

Собственная и примесная проводимость. Термодинамика полупроводников. Контактные явления. p-n переход. Зонная структура полупроводников. Зонная структура графена.

*Тема 11. Магнитные свойства твердых тел.*

Магнитный момент атома. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферромагнетизм. Модель Вейса. Модель Гейзенберга. Спиновые волны. Магноны. Магнитные домены. Антиферромагнетизм. Ферримагнетизм. Магнитная нейтронная дифракция. Рассеяние нейтронов на магнонах.

*Тема 12. Наноструктурные магнитные материалы.*

Суперпарамагнетизм. Способы производства магнитных наночастиц. Магнитные жидкости. Малоугловое рассеяние неполяризованных и поляризованных нейтронов. Синтез и структурные исследования магнитных жидкостей.

## 7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах					Самостоятельная работа студентов
		Общая трудоемкость	в том числе ауд.занятий			Учебно-практические занятия	
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров		
Экспериментальная физика наносистем	2	72	34	17	17	38	

## 8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Экспериментальная физика наносистем» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса; семинарские занятия, предусматривающие углубленное изучение и обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются на семинарских занятиях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

		Вс его ча со в	Л е к ц и и	С е м и н а р ы	Учебно- практичес кие занятия (лаборато рные или практичес кие занятия)	Са мо сто ят ель на я ра бо та	
1	Введение	4	1	1		2	
2	Кристаллы	4	1	1		2	
3	Дифракция на кристаллах	5	1	1		3	
4	Дифракция на непериодических структурах	5	1	1		3	
5	Типы связи в кристаллах и дисперсных системах	5	1	1		3	
6	Динамика кристаллов	5	1	1		3	
7	Термодинамика кристаллов	5	1	1		3	
8	Электронные состояния в твердых телах	7	2	2		3	
9	Металлы	7	2	2		3	
10	Полупроводники	7	2	2		3	
11	Магнитные свойства твердых тел	7	2	2		3	
12	Наноструктурные магнитные материалы	7	2	2		3	
	Промежуточная аттестация	4				4	зачет
<b>ИТОГО:</b>		72	1 7	1 7		38	

ДЗ- домашнее задание, Оп- опрос, КР- контрольная работа, Т- тестирование, Реф - реферат

## 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Экспериментальная физика наносистем» осуществляется на лекциях и семинарских занятиях и заключается в оценке активности и качества участия в опросах и собеседованиях по проблемам, изучаемых в рамках тем лекционных занятий, аргументированности позиции; оценивается широта используемых теоретических знаний.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Экспериментальная физика наносистем» проводится во втором семестре в форме зачета в виде письменной работы.

## 10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
<b>Оценочные средства текущего контроля</b>		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как специальная беседа по тематике предыдущей лекции и рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Тестирование	Средство контроля, позволяющее получить оценку уровня фактических знаний аспиранта по изученной теме.	Образцы тестов
<b>Оценочные средства промежуточной аттестации</b>		
Письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов
Собеседование	Средство, позволяющее получить экспертную оценку знаний, умений и навыков по для оценивания и анализа различных фактов и явлений в своей профессиональной области.	Требования к порядку проведения собеседования

## 11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
ЗНАТЬ: основные термины и модели	Отсутствие знаний основных терминов и	В целом успешные, но не систематические	В целом успешное, но содержащее	Успешные и систематические знания основных



в физике наностистем ИМПК-2.3	моделей в физике наностистем	знания основных терминов и моделей в физике наностистем	отдельные пробелы знания основных терминов и моделей в физике наностистем	терминов и моделей в физике наностистем
УМЕТЬ: описывать характерные явления и процессы физики наностистем ИМПК-2.3	Отсутствие умения описывать характерные явления и процессы физики наностистем	В целом успешное, но не систематическое умение описывать характерные явления и процессы физики наностистем	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение описывать характерные явления и процессы физики наностистем	Успешное и систематическое умение описывать характерные явления и процессы физики наностистем
ВЛАДЕТЬ: знаниями физики кристаллов, физики твердого тела, полупроводников и иных разделов, достаточными для решения задач физики наностистем ИМПК-2.3	Отсутствие/фрагментарное владение знаниями физики кристаллов, физики твердого тела, полупроводников и иных разделов, достаточными для решения задач физики наностистем	В целом успешное, но не систематическое владение знаниями физики кристаллов, физики твердого тела, полупроводников и иных разделов, достаточными для решения задач физики наностистем	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение знаниями физики кристаллов, физики твердого тела, полупроводников и иных разделов, достаточными для решения задач физики наностистем	Успешное и систематическое владение знаниями физики кристаллов, физики твердого тела, полупроводников и иных разделов, достаточными для решения задач физики наностистем

## 12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

### *Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся*

#### **Пример:**

#### Вопросы по теории:

1. Закон Брэгга-Вульфа.
2. Магнитный момент атома.

## 13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Зачет проводится в форме письменной работы.

### *Материалы промежуточной аттестации обучающихся*

#### Вопросы к зачету:

1. Ближний порядок. Функция радиального распределения.
2. Рассеяние на ансамбле неоднородностей. Контраст. Формула Дебая.
3. Установка по малоугловому рассеянию нейтронов. Основные элементы. Разрешение.
4. Длина ядерного рассеяния нейтронов. Плотность распределения длины рассеяния.

5. Форм-фактор рассеяния. Рассеяние на частицах с высокой анизотропией формы. Полидисперсные частицы.
6. Анализ сложных форм. Субчастичное моделирование. Метод шариков. Метод кубиков.
7. Анализ сложных форм. Метод сферических гармоник. Ab initio моделирование.
8. Асимптотика малых векторов рассеяния. Приближение Гинье.
9. Асимптотика больших векторов рассеяния. Приближение Порода. Фрактальные поверхности.
10. Косвенное преобразование Фурье. Характеристическая функция формы. Функция распределение парных расстояний.
11. Структурный фактор рассеяния. Корреляционные функции и потенциал взаимодействия. Вириальное разложение.
12. Рассеяние на системе полидисперсных взаимодействующих частиц. Приближение развязки. Мицеллярные растворы поверхностно-активных веществ.
13. Безчастичные системы. Флуктуации плотности. Флуктуации в критических точках. Уравнение Орнштейна-Цернике. Критические индексы.
14. Полимеры. Гауссов клубок. Формула Дебая.
15. Полимеры. Показатели скейлинга в растворах полимеров. Гели.
16. Многоуровневые системы. Фрактальные кластеры. Эффекты обрыва в малоугловом рассеянии.
17. Системы многокомпонентных и/или магнитных нанообъектов Моделирование комплексных частиц.
18. Вариация контраста: монодисперсные немагнитные наночастицы. Метод базисных функций.
19. Вариация контраста: полидисперсные и магнитные наночастицы.
20. Магнитное рассеяние нейтронов на атомах. Поляризованные нейтроны.
21. Магнитное малоугловое рассеяние с поляризованными нейтронами.

#### Темы рефератов

к курсу «Нейтроннография наносистем и материалов» (магистры, III семестр)

1. Симметрия кристаллов.
2. Прямая и обратная решетки. Индексы Миллера. Закон Брэгга.
3. Магнетизм.
4. Сверхпроводимость.
5. Гигантское магнитное сопротивление.
6. Коллоидные системы.
7. Сверхтекучесть.
8. Фазовые переходы.
9. Полимеры.
10. Структура биологической клетки.

#### **14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы**

##### Основная литература

1. Д. И. Свєргун, Л. А. Фейгин. “Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние”. Москва, “Наука”, 1986, 279с.
2. И.Сердюк, Н.Заккаи, Дж.Заккаи. Методы в молекулярной биофизике в 2 т., М.: KDU, 2009.

3. Ю.М.Ципенюк. Квантовая микро- и макро-физика. М.: Физматкнига, 2006.
4. М.Клеман, О.Д.Лаврентович. Основы физики частично упорядоченных сред. М.: Физматлит, 2007 (перевод с англ. M.Kleman, O.D.Lavrentovich. Soft Matter Physics. An Introduction. Springer, 2003).
5. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теоретическая физика в 10 т. Том V . Статистическая физика, ч. I; Том IX Статистическая физика, ч. 2. Теория конденсированного состояния. М.: Физматлит, 2001.

#### Дополнительная литература

1. И.И.Гуревич, Л.В.Протасов. Физика нейтронов низких энергий. М.: Наука, 1965.
2. Нейтроны и твердое тело. В 3-х томах под общей редакцией Р.П.Озерова.  
Том 1. Ю.З.Носик, Р.П.Озеров, К.Хенниг. Структурная нейтронография. М.: Атомиздат, 1979.  
Том 2. Ю.А.Изюмов, В.Е.Найш, Р.П.Озеров. Нейтронография магнетиков. М.: Атомиздат, 1981.  
Том 3. Ю.А.Изюмов, Н.А.Черноплеков. Нейтронная спектроскопия. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. В.Л.Аксенов, Н.М.Плакида, С.Стаменкович. Рассеяние нейтронов сегнетоэлектриками. М.: Энероатомиздат, 1984.
4. Д.И.Свергун, Л.А.Фейгин. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. М.: Наука, 1986.
5. М.В.Авдеев, В.Л.Аксенов. Малоугловое рассеяние нейтронов в структурных исследованиях магнитных жидкостей. УФН, т. 180, № 1, с.109 (2010).
6. В.Л.Аксенов, А.М.Балагуров. Дифракция нейтронов на импульсных источниках. УФН, т. 186, № 3, с. 293 (2016).
7. П.А.Алексеев. Нейтронная спектроскопия и сильнокоррелированные электроны: взгляд изнутри. УФН, т. 187, № 1, с. 65 (2017).
8. А.М.Балагуров. Дифракция нейтронов для решения структурных задач. Saarbrucken: LAP. LAMBERT Ac. Publ., 2017.
9. И.Сердюк, Н.Заккаи, Дж.Заккаи. Методы в молекулярной биофизике в 2 т., М.: KDU, 2009.

При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

1. Операционная система Astra Linux ( <https://astralinux.ru/> ) или аналог, с офисным пакетом, с пакетами разработчика.

Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. База данных РИНЦ (российский индекс научного цитирования) <http://www.elibrary.ru>

#### **Материально-техническое обеспечение**

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика», курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски.