

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 2022г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

**Наименование дисциплины:**

Малоугловое рассеяние нейтронов

**Уровень высшего образования:**

Магистратура

**Направление подготовки:**

03.04.02 Физика

**Направленность (профиль) ОПОП:**

Фундаментальная и прикладная ядерная физика

**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 «Малоугловое рассеяние нейтронов»**

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 «Малоугловое рассеяние нейтронов» 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 фундаментальной и прикладной ядерной физики	<b>ИМПК-2.1</b> Способен ставить, формализовать и решать задачи в области фундаментальной и прикладной ядерной физики	Знать: основные понятия, законы и формулы, используемые в теории рассеяния. Уметь: описывать различные явления с малоугловым рассеянием нейтронов. Владеть: способностью применять математические методы, в том числе различные способы приближения, для описания явлений малоуглового рассеяния нейтронов.

2. **Форма обучения:** очная.

3. **Язык обучения:** русский.

4. **Содержание дисциплины**

*Тема 1. Введение в малоугловую дифракцию.*

Базовые сведения из теории рассеяния нейтронов. Ближний порядок и малоугловое рассеяние. Функция радиального распределения. Понятие неоднородности. Рассеяние на ансамбле неоднородностей. Понятия контраста и малоуглового рассеяния. Формула Дебая. Кривая рассеяния. Установка по малоугловому рассеянию нейтронов. Плотность распределения длины рассеяния. Сравнение нейтронного и рентгеновского экспериментов. Определение формы частицы. Форм-фактор рассеяния. Рассеяние на частицах с высокой анизотропией формы. Анализ сложных форм.

### Тема 2. Инварианты рассеяния.

Асимптотика малых векторов рассеяния. Приближение Гинье. Асимптотика больших векторов рассеяния. Приближение Порода. Фрактальные поверхности. Основы косвенного преобразования Фурье. Характеристическая функция формы. Функция распределение парных расстояний.

### Тема 3. Системы с коррелирующими неоднородностями.

Взаимодействующие частицы. Структурный фактор рассеяния. Корреляционные функции и потенциал взаимодействия. Вириальное разложение. Полидисперсные системы. Приближение развязки. Мицеллярные растворы поверхностно-активных веществ. Безчастичные системы. Флуктуации плотности. Флуктуации в критических точках. Уравнение Орнштейна-Цернике. Критические индексы. Полимеры. Гауссов клубок. Формула Дебая. Показатели скейлинга в растворах полимеров. Гели. Многоуровневые системы. Фрактальные кластеры. Эффекты обрыва в малоугловом рассеянии.

### Тема 4. Сложные и магнитные системы.

Системы многокомпонентных и/или магнитных нанообъектов. Вариация контраста: монодисперсные немагнитные наночастицы. Метод базисных функций. Вариация контраста: полидисперсные и магнитные наночастицы. Магнитное рассеяние нейтронов на атомах. Поляризованные нейтроны. Магнитное малоугловое рассеяние нейтронов.

## 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		
Малоугловое рассеяние нейтронов	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 «Малоугловое рассеяние нейтронов» 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.

№ тем ы		Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Са мо ст оя те ль на я ра бо та	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)			
1	Введение в малоугловую дифракцию	16	4	4		8	Оп	
2	Инварианты рассеяния	16	4	4		8	КР	
3	Системы с коррелирующими неоднородностями	16	4	4		8	КР	
4	Сложные и магнитные системы	18	5	5		8	Оп	
	Промежуточная аттестация	6				6	Экзамен	
<b>ИТОГО:</b>		72	17	17		38		

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

### 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Малоугловое рассеяние нейтронов» 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 «Малоугловое рассеяние нейтронов» проводится в форме экзамена.

Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

### 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 к экзамену
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/ неудовлетворительно	3/ удовлетворительно	4/ хорошо	5/ Отлично
ЗНАТЬ: основные понятия, законы и формулы, используемые в теории рассеяния	Отсутствие знаний основных понятий, законов и формул, используемых в теории рассеяния	В целом успешные, но не систематические знания основных понятий, законов и формул, используемых в теории	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания основных понятий, законов и формул,	Успешные и систематические знания основных понятий, законов и формул, используемых в теории рассеяния

		рассеяния	используемых в теории рассеяния	
УМЕТЬ: описывать различные явления с малоугловым рассеянием нейтронов	Отсутствие умения описывать различные явления с малоугловым рассеянием нейтронов	В целом успешное, но не описывать различные явления с малоугловым рассеянием нейтронов систематическое умение	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение описывать различные явления с малоугловым рассеянием нейтронов	Успешное и систематическое умение описывать различные явления с малоугловым рассеянием нейтронов
ВЛАДЕТЬ: способностью применять математические методы, в том числе различные способы приближения, для описания явлений малоуглового рассеяния нейтронов	Отсутствие/фрагментарное владение способностью применять математические методы, в том числе различные способы приближения, для описания явлений малоуглового рассеяния нейтронов	В целом успешное, но не систематическое владение способностью применять математические методы, в том числе различные способы приближения, для описания явлений малоуглового рассеяния нейтронов	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение способностью применять математические методы, в том числе различные способы приближения, для описания явлений малоуглового рассеяния нейтронов	Успешное и систематическое владение способностью применять математические методы, в том числе различные способы приближения, для описания явлений малоуглового рассеяния нейтронов

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

### *Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся*

#### Вопросы по теории:

1. Понятия контраста и малоуглового рассеяния. Плотность распределения длины рассеяния.
2. Форм-фактор рассеяния. Рассеяние на частицах с высокой анизотропией формы. Анализ сложных форм.
3. Асимптотики кривой малоуглового рассеяния. Приближения Гинье и Порода.
4. Структурный фактор рассеяния. Корреляционные функции и потенциал взаимодействия. Флуктуации плотности и многоуровневые системы.



5. Вариация контраста в многокомпонентных сложных системах. Метод базисных функций.
6. Магнитное рассеяние нейтронов на атомах. Магнитное малоугловое рассеяние с использованием поляризованных нейтронов.

Задачи:

1. Рассчитать плотности длины рассеяния (когерентное рассеяние) тепловых нейтронов для природных Si, Ni, Ti и D<sub>2</sub>O (тяжелая вода) в единицах [см<sup>-2</sup>], [нм<sup>-2</sup>], [Å<sup>-2</sup>]. Длины когерентного рассеяния тепловых нейтронов,  $b$ ,  $\square 10^{-12}$  см: 0.42 (Si); 1.03 (Ni); -0.34 (Ti); 0.667 (D); 0.58 (O).
2. Получить формулу для расчета форм-фактора сферической оболочки с внешним и внутренним радиусами  $R_1, R_2$ , соответственно.
3. Для ориентированного эллипсоида вращения показать что «анизотропия» (длинная ось) форм-фактора повернута на  $\square/2$  относительно «анизотропии» (длинная ось тела) в прямом пространстве.
4. Получить 2D форм-фактор рассеяния  $N$  шаров радиусом  $R$ , объединенных в жесткую линейную цепочку (ориентация в плоскости рассеяния).
5. Получить радиус инерции димера из шаров с одинаковыми радиусами  $R$  и разными радиусами  $R_1, R_2$ . Воспользоваться теоремой Штейнера по определению радиуса инерции в механике для составных тел.
6. Получить вириальное разложение структурного фактора для раствора твердых шаров.
7. Получить формулу для сечения рассеяния для концентрированного раствора шаров с бимодальным распределением по размерам (радиусы частиц:  $R_1, R_2$ ; соответствующие доли частиц:  $v_1, v_2$ ;  $v_1 + v_2 = 1$ ).

Получить приближение развязки для сечения рассеяния для концентрированного раствора твердых шаров с бимодальным распределением по размерам (радиусы частиц:  $R_1, R_2$ ; соответствующие доли частиц:  $v_1, v_2$ ;  $v_1 + v_2 = 1$ ). Сравнить с истинным сечением рассеяния

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

Экзамен проводится в письменной форме с последующим собеседованием.

#### ***Материалы промежуточной аттестации обучающихся***

##### Вопросы к экзамену:

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.

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

##### Основная литература

1. Д. И. Свергун, 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. В.И. Иверонова, Г.П. Ревкевич, Теория рассеяния рентгеновских лучей. М.: МГУ, 1978.

##### Дополнительная литература

1. Л Brumberger H Ed. Modern aspects of small-angle scattering. (Kluwer Acad. Publishers, Dordrecht, 1995).
2. O. Glatter, O. Kratky. “Small-Angle X-ray Scattering”. Academic Press Inc. (London) Ltd, 1982, 515p.
3. Guinier and G. Fournet. “Small-Angle Scattering of X-Rays”. John Wiley & Sons, Inc. (New York), Charman \$ Hall, Ltd. (London), 1955, 268p.
4. А.Ф. Скрышевский. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел. М., Высшая школа, 1980, 328с.
5. И.И.Гуревич, Л.В.Протасов. Физика нейтронов низких энергий. М.: Наука, 1965.
6. М.В.Авдеев, В.Л.Аксенов. Малоугловое рассеяние нейтронов в структурных исследованиях магнитных жидкостей. УФН, т. 180, № 1, с.109 (2010).
7. Pedersen J. S. Analysis of small-angle scattering data from colloids and polymer solutions: modeling and least-squares fitting Adv. Coll. Inter. Sci. 70 171 (1997)

8. Vekas L, Avdeev M V, Bica D, Magnetic Nanofluids: Synthesis and Structure, in: Nanoscience and Its Applications in Biomedicine 25 (Ed. Shi D, Springer Verlag, 2009)
9. Дж. Каули. “Физика дифракции”. Москва, “Мир”, 1979, 432 с.
10. Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. М.: Физматлит, 2007.

При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

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

Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. <http://www.edu.ru> – портал Министерства образования и науки РФ
2. <http://www.ict.edu.ru> – система федеральных образовательных порталов «ИКТ в образовании»
3. <http://www.openet.ru> - Российский портал открытого образования
4. <http://www.mon.gov.ru> - Министерство образования и науки Российской Федерации
5. <http://www.fasi.gov.ru> - Федеральное агентство по науке и инновациям

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

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки 03.04.02 «Физика», курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски.