

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:**

Нейтронная рефлектометрия

---

**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, Никитенко Юрий Васильевич, почасовик 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 «Нейтронная рефлектометрия»**

Целью курса является изучение студентами теоретических основ нейтронной оптики, метода нейтронной рефлектометрии и техники проведения нейтронных рефлектометрических экспериментов. В ходе данного курса студент должен получить представление об основных экспериментальных подходах метода рефлектометрии неполяризованных и поляризованных нейтронов в решении задач исследования поверхностей и границ раздела конденсированного состояния вещества, получить информацию об основных компонентах приборно-методологической базы нейтронного рефлектометрического эксперимента.

### **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 «Нейтронная рефлектометрия» 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: методы применения рефлектометрии в экспериментах и ограничения их использования. Уметь: планировать эксперимент, использующий нейтронную рефлектометрию, и оценивать его результаты. Владеть: математическим и физическим аппаратом, достаточным для общего описания процессов отражений и связанных с ними.

2. **Форма обучения:** очная.

3. **Язык обучения:** русский.

4. **Содержание дисциплины**

*Тема 1. Введение в нейтронную оптику.*

Режимы нейтронной рефлектометрии. Зеркальное отражение. Геометрическая оптика нейтронного излучения. Показатель преломления. Плотность длины рассеяния. Коэффициент отражения. Кривая отражения. Случай полубесконечной однородной среды. Эффект полного внешнего отражения. Критический угол скольжения. Формула Френеля. Учет поглощения. Квантомеханический подход. Оптический потенциал. Борновское приближение. Шероховатая граница раздела. Диффузное рассеяние. Борновское приближение искаженных волн. Пики Йонеды. Малоугловое рассеяние под углами

скольжения. Стационарный и времяпролетный режимы эксперимента по нейтронной рефлектометрии.

*Тема 2. Рефлектометрия неполяризованных и поляризованных нейтронов.*

Кривые зеркального отражения для произвольного нормального профиля границы раздела. Случай тонкого слоя. Случай периодического профиля. Коррелирующие шероховатости в многослойных структурах. 3D рефлектометрия тонких полимерных пленок. Оптика поляризованных нейтронов. Случай полубесконечной однородной среды с магнитной составляющей. Кривые отражения для произвольного нормального профиля границы раздела с магнитной составляющей. Поляризация нейтронного пучка. Диффузное рассеяние с переворотом спина. Матрица отражения. Полный поляризационный анализ. 3D рефлектометрия магнитных многослойных структур. Нейтронный рефлектометр с вертикальной геометрией образца.

*Тема 3. Нейтронная рефлектометрия на жидких границах раздела.*

Постановка эксперимента по нейтронной рефлектометрии на границах раздела с жидкими компонентами. Нейтронный рефлектометр с горизонтальной геометрией образца. Вариация контраста. Адсорбция наночастиц из жидких сред на границах раздела с твердым телом. Границы раздела с биологическими мембранами. Рост адсорбционных слоев в режиме *in situ*. Электрохимические границы раздела. Диффузное рассеяние на границах твердого тела с жидкостью. Нейтронная рефлектометрия на свободных поверхностях. Растворы поверхностно-активных веществ.

*Тема 4. Экспериментальные аспекты нейтронной рефлектометрии.*

Нейтроннооптические устройства. Нейтронные зеркала. Прямые и изогнутые нейтронноводы. Суперзеркала. Поляризаторы и анализаторы поляризации. Устройства для поворота и переворота спина нейтрона. Стационарные и времяпролетные рефлектометры. Функция разрешения рефлектометра с вертикальной геометрией образца. Функция разрешения рефлектометра с горизонтальной геометрией образца. Представление данных рефлектометрии. Расчет кривых зеркального отражения. Матричный формализм. Расчет диффузного рассеяния для магнитных слоистых структур.

**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		
Нейтронная рефлектометрия	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 «Нейтронная рефлектометрия» 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					Само 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-практические занятия (лабораторные или практические занятия)			
1	Введение в нейтронную оптику	16	4	4		8	Оп	
2	Рефлектометрия неполяризованных и поляризованных нейтронов	16	4	4		8	КР	
3	Нейтронная рефлектометрия на жидких границах раздела	16	4	4		8	КР	
4	Экспериментальные аспекты нейтронной рефлектометрии	20	5	5		10	Оп	
	Промежуточная аттестация	4				4	Зачет	
<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 «Нейтронная рефлектометрия» осуществляется на лекциях и семинарских занятиях и заключается в оценке активности и качества участия в опросах и беседах по проблемам, изучаемых в рамках тем лекционных занятий, аргументированности позиции; оценивается широта используемых теоретических знаний.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Нейтронная рефлектометрия» проводится 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 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/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
ЗНАТЬ: методы применения рефлектометрии и в экспериментах	Отсутствие знаний методов применения рефлектометрии и в экспериментах	В целом успешные, но не систематически знания методов	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы	Успешные и систематические знания методов применения рефлектометрии в экспериментах

и ограничения их использования	и ограничений их использования	применения рефлектометрии и в экспериментах и ограничений их использования	знания методов применения рефлектометрии и в экспериментах и ограничений их использования	и ограничений их использования
УМЕТЬ: планировать эксперимент, использующий нейтронную рефлектометрию, и оценивать его результаты	Отсутствие умения планировать эксперимент, использующий нейтронную рефлектометрию, и оценивать его результаты	В целом успешное, но не систематическое умение планировать эксперимент, использующий нейтронную рефлектометрию, и оценивать его результаты	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение планировать эксперимент, использующий нейтронную рефлектометрию, и оценивать его результаты	Успешное и систематическое умение планировать эксперимент, использующий нейтронную рефлектометрию, и оценивать его результаты
ВЛАДЕТЬ: математически и физическим аппаратом, достаточным для общего описания процессов отражений и связанных с ними	Отсутствие/фрагментарное владение математически и физическим аппаратом, достаточным для общего описания процессов отражений и связанных с ними	В целом успешное, но не систематическое владение математически и физическим аппаратом, достаточным для общего описания процессов отражений и связанных с ними	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение математически и физическим аппаратом, достаточным для общего описания процессов отражений и связанных с ними	Успешное и систематическое владение математическим и физическим аппаратом, достаточным для общего описания процессов отражений и связанных с ними

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

### *Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся*

#### Вопросы по теории:

1. Режимы нейтронной рефлектометрии.
2. Зеркальное отражение. Геометрическая оптика нейтронного излучения.
3. Квантомеханический подход в нейтронной оптике. Оптический потенциал.



4. Диффузное рассеяние. Борновское приближение искаженных волн.
5. Малоугловое рассеяние под углами скольжения. Стационарный и времяпролетный режимы эксперимента по нейтронной рефлектометрии.
6. 3D рефлектометрия тонких немагнитных пленок.
7. Оптика поляризованных нейтронов. Поляризация нейтронного пучка.
8. Диффузное рассеяние с переворотом спина. Полный поляризационный анализ.
9. 3D рефлектометрия магнитных многослойных структур.
10. Нейтронный рефлектометр с вертикальной геометрией образца.
11. Постановка эксперимента по нейтронной рефлектометрии на границах раздела с жидкими компонентами. Нейтронный рефлектометр с горизонтальной геометрией образца.
12. Адсорбция наночастиц из жидких сред на границах раздела с твердым телом.
13. Границы раздела с биологическими мембранами.
14. Рост адсорбционных слоев в режиме *in situ*. Электрохимические границы раздела.
15. Диффузное рассеяние на границах твердого тела с жидкостью.
16. Нейтронная рефлектометрия на свободных поверхностях. Растворы поверхностно-активных веществ.
17. Нейтронооптические устройства. Нейтронные зеркала. Прямые и изогнутые нейтроноводы. Суперзеркала.
18. Поляризаторы и анализаторы поляризации. Устройства для поворота и переворота спина нейтрона.
19. Стационарные и времяпролетные рефлектометры.
20. Функция разрешения рефлектометров с вертикальной и горизонтальной геометрией образца.
21. Расчет кривых зеркального отражения. Матричный формализм.

#### Задачи:

1. Найти амплитуды отражения  $r$  и прохождения  $t$  перпендикулярной составляющей (импульс  $\hbar k_{0z}$ , энергия  $E_{\square}$ ) одномерной плоской волновой функции для потенциального барьера, соответствующего полубесконечной однородной среде в контакте с вакуумом. Построить кривые отражения  $R(k_{0z}) = |r(k_{0z})|^2$  и прохождения  $T(k_{0z}) = 1 - R(k_{0z})$  как функции  $k_{0z} = 0.01 \square 1 \text{ нм}^{-1}$  для  $U_{\text{opt}} = 2.45 \square 10^{-7} \text{ эВ (Ni)}$  и  $U_{\text{opt}} = 5.4 \square 10^{-8} \text{ эВ (Si)}$ .
2. Найти амплитуды отражения  $r$  и прохождения  $t$  перпендикулярной составляющей (импульс  $\hbar k_{0z}$ , энергия  $E_{\square}$ ) одномерной плоской волновой функции для потенциального барьера, соответствующего тонкому слою на полубесконечной однородной среде в контакте с вакуумом. Построить кривые отражения  $R(k_{0z}) = |r(k_{0z})|^2$  и прохождения  $T(k_{0z}) = k_{1z}/k_{0z} |t(k_{0z})|^2$  как функции  $k_{0z} = 0.01 \square 1 \text{ нм}^{-1}$ , для  $U_0 = 2.45 \square 10^{-7} \text{ эВ (Ni)}$ ,  $U_s = 5.4 \square 10^{-8} \text{ эВ (Si)}$ ,  $d = 50 \text{ нм}$ .
3. Получить выражения для амплитуды отражения и коэффициента отражения в Борновском приближении для полубесконечной однородной среды и тонкого слоя на подложке (полубесконечная однородная среда).
4. Рассчитать критические значения проекции вектора рассеяния на нормаль, при котором наблюдается полное внешнее отражение тепловых нейтронов от

полубесконечной среды из природных Si, Ni, Ti и D<sub>2</sub>O (тяжелая вода). Длины когерентного рассеяния тепловых нейтронов,  $b$ ,  $\text{\AA}$   $10^{-12}$  см: 0.42 (Si); 1.03 (Ni); -0.34 (Ti); 0.667 (D); 0.58 (O).

Рассмотреть асимптотику формулы Френеля при больших значениях нормальной проекции вектора рассеяния.

### **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. Режимы нейтронной рефлектометрии.
2. Зеркальное отражение. Геометрическая оптика нейтронного излучения. Случай полубесконечной однородной среды.
3. Зеркальное отражение. Квантомеханический подход. Оптический потенциал. Борновское приближение.
4. Диффузное рассеяние. Шероховатая граница раздела. Борновское приближение искаженных волн. Пики Йонеды.
5. Малоугловое рассеяние под углами скольжения. Стационарный и времяпролетный режимы эксперимента по нейтронной рефлектометрии.
6. Кривые зеркального отражения для произвольного нормального профиля границы раздела. Случай тонкого слоя. Случай периодического профиля.
7. Коррелирующие шероховатости в многослойных структурах. 3D рефлектометрия тонких полимерных пленок.
8. Оптика поляризованных нейтронов. Случай полубесконечной однородной среды с магнитной составляющей.
9. Кривые отражения для произвольного нормального профиля границы раздела с магнитной составляющей. Поляризация нейтронного пучка. Диффузное рассеяние с переворотом спина. Матрица отражения. Полный поляризационный анализ.
10. 3D рефлектометрия магнитных многослойных структур.
11. Нейтронный рефлектометр с вертикальной геометрией образца.
12. Постановка эксперимента по нейтронной рефлектометрии на границах раздела с жидкими компонентами. Нейтронный рефлектометр с горизонтальной геометрией образца.
13. Нейтронная рефлектометрия на границах раздела с жидкими компонентами. Вариация контраста. Адсорбция наночастиц из жидких сред на границах раздела с твердым телом.
14. Нейтронная рефлектометрия на границах раздела с жидкими компонентами. Вариация контраста. Границы раздела с биологическими мембранами.
15. Нейтронная рефлектометрия на границах раздела с жидкими компонентами. Вариация контраста. Рост адсорбционных слоев в режиме *in situ*. Электрохимические границы раздела.
16. Диффузное рассеяния на границах твердого тела с жидкостью.

17. Нейтронная рефлектометрия на свободных поверхностях. Растворы поверхностно-активных веществ.
18. Нейтронооптические устройства. Нейтронные зеркала. Прямые и изогнутые нейтроноводы.
19. Нейтронооптические устройства. Поляризаторы и анализаторы поляризации. Устройства для поворота и переворота спина нейтрона. Стационарные и времяпролетные рефлектометры.
20. Функция разрешения рефлектометра с вертикальной геометрией образца. Функция разрешения рефлектометра с горизонтальной геометрией образца.
21. Представление данных рефлектометрии. Стационарные и времяпролетные режимы.
22. Расчет кривых отражения. Матричный формализм.
23. Расчет диффузного рассеяния для магнитных слоистых структур.

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

##### Основная литература

1. Ю.В.Никитенко, В.Г.Сыромятников, Рефлектометрия поляризованных нейтронов. М.: Физматлит. 2013. 2018 с.
2. В.К.Игнатович, Нейтронная оптика. М.: Физматлит, 2006.

##### Дополнительная литература

1. В.Л.Аксенов, Исследования поверхностей и тонких пленок с помощью нейтронов, Лекция на 9-й Международной школе по физике конденсированных сред, Варна, Болгария, 9-13 сентября 1996 г.
2. J.F.Anker, C.F. Majkrzak, S.K.Satia, Neutron reflectivity and grazing angle diffraction, J.Res. National Institute of Standards and Technology, v.98, p.47, 1993.
3. V.F.Sears. Neutron Optics. N.Y., Oxford, Oxford Univ. Press, 1989.
4. J.Penfold, R.K.Thomas, The application of the specular reflection of neutrons to the study of surfaces and interfaces, J.Phys.: Condens. Matter, v.2, p.1369, 1990.
5. J.Penfold, Neutron optics, in Neutron Scattering at a pulsed source, eds. R.J.Newport, B.D.Rainford, R.Cywinski, Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1988, 287.
6. А.В.Белушкин, Введение в методику рассеяния нейтронов, М.: МГУ, 2000
7. И.И.Гуревич, Л.В.Протасов. Физика нейтронов низких энергий. М.: Наука, 1965.

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.