

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 /
«01» сентября 2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

Методика нейтронной рефлектометрии

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Фундаментальная и прикладная ядерная физика

Форма обучения: Очная форма обучения

Дубна 2024 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:

кандидат физ.-мат. наук, Жакетов Владимир Дмитриевич, 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

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.

1. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина реализуется на 1-ом курсе во 2-ом семестре магистратуры и входит в состав профессионального блока вариативной части как дисциплина по выбору.

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

Курсы математического анализа, линейной алгебры и дифференциальных уравнений, методов математической физики, раздел оптика из курса общей физики, разделы теоретическая механика, электродинамика и квантовая механика из курса теоретической физики в объеме классических университетских курсов.

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников

| Компетенции | Результаты обучения |
|-------------|--|
| ПК-1 | <p><u>Знать</u> разделы ядерной физики, необходимыми для решения поставленной научной задачи</p> <p><u>Уметь</u> применять экспериментальные и теоретические знания при решении поставленной научной задачи</p> <p><u>Владеть</u> экспериментальными и теоретическими методами исследования при решении научных задач в области современной ядерной физики</p> |
| МПК-3 | <p><u>Знать</u> основные численно-математические методы, применяемые в фундаментальной и прикладной ядерной физики и нейтронографии</p> <p><u>Уметь</u> применять математические методы при решении поставленных научных задач фундаментальной и прикладной ядерной физики и нейтронографии</p> <p><u>Владеть</u> современными численно-математическими методами при решении задач профессиональной деятельности в области</p> |

4. Объем дисциплины (модуля) составляет **2** з.е., в том числе: **34** академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, **38** академических часов, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

5. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

| | | | | | | |
|---|------------------------------|---|----------------------------------|--|--|---|
| Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю) | Всего (ак.ч.) | В том числе | | | | Форма текущего контроля успеваемости, наименование |
| | | Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, академические часы¹ | | | | |
| | | Занятия лекционного типа (лекции) | Занятия семинарского типа | | | Всего |
| Семинары | Лабораторные занятия* | | Практические занятия* | | | |

¹Текущий контроль успеваемости может быть реализован в рамках занятий лекционного и(или) семинарского типа.

| | | | | | | | | |
|--|-----------|---|-----------|--|--|--|-----------|-------|
| Введение в нейтронную оптику | 14 | 2 | 2 | | | | 10 | КР |
| Рефлектометрия неполяризованных и поляризованных нейтронов | 18 | 8 | 2 | | | | 8 | ОП |
| Нейтронная рефлектометрия на жидких границах раздела | 18 | 8 | 2 | | | | 8 | ОП |
| Экспериментальные аспекты нейтронной рефлектометрии | 18 | 8 | 2 | | | | 8 | ОП |
| Промежуточная аттестация | 4 | | | | | | 4 | зачет |
| Итого | 72 | | 34 | | | | 38 | |

*Лабораторные занятия, практические занятия относятся к практической подготовке обучающихся.

6. Фонд оценочных средств для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)

6.1. Типовые задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения:

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 рассеяния 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 D₂O (тяжелая вода). Длины когерентного рассеяния тепловых нейтронов, b , $\square 10^{-12} \text{ см}$: 0.42 (Si); 1.03 (Ni); -0.34 (Ti); 0.667 (D); 0.58 (O).
5. Рассмотреть асимптотику формулы Френеля при больших значениях нормальной проекции вектора рассеяния.

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.

6.2. Шкала и критерии оценивания

| Результат освоения дисциплины | Критерии оценивания знаний, умений и навыков | | | |
|-------------------------------|--|---|--|--|
| | 2/ не зачтено | 3/ зачтено | 4/ зачтено | 5/ зачтено |
| Знания | Отсутствие знаний | В целом успешные, но не систематические знания | В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания | Успешные и систематические знания |
| Умения | Отсутствие умения применять знания фундаментальных и актуальных проблем. | В целом успешное, но не систематическое умение применять знания | В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение применять знания | Успешное и систематическое умение применять знания |
| Навыки | Отсутствие/фрагментарные навыки в решении задач | В целом успешные, но не систематические навыки в решении задач | В целом успешные, но содержащее отдельные пробелы навыки в | Успешные и систематические навыки в решении задач |

| | | | | |
|--|--|--|---------------|--|
| | | | решении задач | |
|--|--|--|---------------|--|

7. Ресурсное обеспечение

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.Сywinski, 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. Программный продукт Java 8 (64-bit) Oracle Corporation
2. Программный продукт Dev-C++ Bloodshed Software
3. Операционная система Microsoft Windows 10 Education академическая лицензия
4. Программный продукт Microsoft Project Professional 2013 академическая лицензия
5. Программный продукт Microsoft Visio Professional 2013 академическая лицензия
6. Программный продукт Microsoft Visual Studio Professional 2013 - RUS академическая лицензия

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 «Физика», курс может быть прочитан в обычной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски.

8. Язык преподавания: русский