

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау  
А.В. Рогачев**

|                            |  |
|----------------------------|--|
|                            | <b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>   |
| <b>по дисциплине:</b>      | Современная физика рентгеновского излучения  |
| <b>по направлению:</b>     | Фотоника и оптоинформатика   |
| <b>профиль подготовки:</b> | Фотоника, квантовые технологии и двумерные материалы<br>Физтех-школа физики и исследований им. Ландау<br>кафедра электрофизики |
| <b>курс:</b>               | 1  |
| <b>квалификация:</b>       | магистр  |

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Экзамен

2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Подготовка к экзамену: 60 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

Программу составили:

С.С. Гижа, канд. физ.-мат. наук

А.Г. Турьянский, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры электрофизики 14.06.2024

## Аннотация

Курс посвящен основам физики рентгеновского излучения. В курсе изучаются основы взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, методы генерации рентгеновского излучения, методы регистрации рентгеновского излучения.

Особое внимание уделяется новым, активно развивающимся источникам рентгеновского излучения – синхротронам, лазерам на свободных электронах и источникам на обратном комптоновском рассеянии.

В процессе изучения материалов курса студенты знакомятся с основными методиками, применяющимися современной рентгеновской аналитике, области их применения и их предельными возможностями. Таким образом, по итогам курса у студентов формируется понимание перспектив применения подобных методик для собственных научных исследований.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Формирование у студентов понимания принципов взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, принципов генерации и регистрации рентгеновского излучения.

### Задачи дисциплины

Ознакомление студентов с современными источниками рентгеновского излучения. Знакомство с основными методиками, применяемыми в рентгеновской аналитике.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции   | Индикаторы достижения компетенции   |
|--|---|
| ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук   | ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области фотоники и оптоинформатики  |
| ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи   | ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в области фотоники и оптоинформатики   |
|  | ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость   |
|  | ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации |
| ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения                                  | ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения   |
|  | ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)  |
|  | ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений   |
| ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий | ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов  |
|  | ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования   |
|  | ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований  |

|   |   |
|---|---|
| ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты | ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели   |
|   | ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований в области фотоники и оптоинформатики к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты |
| ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области                             | ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)   |
|   | ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов   |

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

Основные типы современных рентгеновских источников, детекторов и их особенности.

уметь:

Подобрать для исследований подходящую экспериментальную методику с использованием рентгеновского излучения, оценить необходимые параметры основных элементов измерительной схемы.

владеть:

Методами оценок эффективности рентгеновских схем для решения прикладных задач в своих научных исследованиях.

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

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

| №  | Тема (раздел) дисциплины                    | Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час. |          |                 |                |
|----|---|---|----------|-----------------|----------------|
|    |   | Лекции  | Семинары | Лаборат. работы | Самост. работа |
| 1  | Введение.                                   | 3   |          |                 | 3              |
| 2  | Рассеяние рентгеновского излучения атомами. | 4   |          |                 | 4              |
| 3  | Поглощение рентгеновского излучения.        | 4   |          |                 | 4              |
| 4  | Рентгеновские трубки.                       | 4   |          |                 | 4              |
| 5  | Обратное комптоновское рассеяние.           | 4   |          |                 | 4              |
| 6  | Синхротронное излучение.                    | 4   |          |                 | 4              |
| 7  | Вигтлеры и ондуляторы.                      | 4   |          |                 | 4              |
| 8  | Лазеры на свободных электронах.             | 3   |          |                 | 3              |
| 9  | Детекторы рентгеновского излучения.         | 3   |          |                 | 3              |
| 10 | Дифракция рентгеновских лучей.              | 4   |          |                 | 4              |
| 11 | Фокусировка рентгеновских лучей.            | 4   |          |                 | 4              |
| 12 | Спектральные приборы.                       | 4   |          |                 | 4              |
| 13 | Рентгенофлуоресцентный анализ.              | 4   |          |                 | 4              |
| 14 | Спектрометрия поглощения.                   | 4   |          |                 | 4              |
| 15 | Рефлектометрия.                             | 4   |          |                 | 4              |
| 16 | Малоугловое рентгеновское рассеяние.        | 3   |          |                 | 3              |

|                       |                     |  |  |    |
|-----------------------|---------------------|--|--|----|
| Итого часов           | 60                  |  |  | 60 |
| Подготовка к экзамену | 60 час.             |  |  |    |
| Общая трудоёмкость    | 180 час., 4 зач.ед. |  |  |    |

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

##### Семестр: 1 (Осенний)

###### 1. Введение.

Дипольное излучение, определение рентгеновского излучения. Рассеяние рентгеновского излучения свободным электроном. Томсоновское и комптоновское рассеяние.

###### 2. Рассеяние рентгеновского излучения атомами.

Рассеяние рентгеновского излучения атомами. Атомные факторы рассеяния и дисперсионные поправки. Показатель преломления в рентгеновском диапазоне, Зависимость действительной части декремента показателя преломления от атомного номера и от длины волны.

###### 3. Поглощение рентгеновского излучения.

Сечение и дифференциальное сечение взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, истинное поглощение рентгеновских лучей. Массовый и линейный коэффициенты поглощения. Зависимость мнимой части декремента показателя преломления от атомного номера и от длины волны.

###### 4. Рентгеновские трубки.

Генерация рентгеновского излучения. Принцип работы рентгеновской трубки. Виды рентгеновских трубок. Тормозной спектр. Характеристический спектр. Интенсивность, диаграммы направленности и поляризация излучения рентгеновской трубки.

###### 5. Обратное комптоновское рассеяние.

Обратное комптоновское рассеяние. Диаграммы направленности, интенсивность и спектральные характеристики источников на обратном комптоновском рассеянии.

###### 6. Синхротронное излучение.

Синхротронное излучение. История открытия и развития синхротронного излучения. Принцип работы и основные элементы синхротронных источников.

###### 7. Вигглеры и ондуляторы.

1,2 и 3 поколения синхротронных источников. Вставные устройства. Вигглеры и Ондуляторы. Интенсивность и спектральные характеристики различных типов синхротронных каналов. Обзор существующих источников синхротронного излучения.

###### 8. Лазеры на свободных электронах.

Лазеры на свободных электронах. Принцип работы и основные характеристики. Автофазировка в длинном ондуляторе. Возникновение частично когерентного излучения.

##### Семестр: 2 (Весенний)

## 9. Детекторы рентгеновского излучения.

Детектирование рентгеновского излучения. Основные типы детекторов, временные, пространственные и спектральные характеристики детекторов.

## 10. Дифракция рентгеновских лучей.

Дифракция рентгеновского излучения на кристаллах. Условие Брэгга-Вульфа, уравнения Лауэ. Схема Брэгга и Лауэ. Индексы Миллера и обратная решетка. Графическая модель Эвальда. Группы симметрий в кристаллах.

## 11. Фокусировка рентгеновских лучей.

Рентгеновские линзы: поликапиллярная и рефракционная линзы. Особенности, границы применения, расчет параметров. Фокусирующие зонные пластинки. Плоские и фокусирующие рентгеновские зеркала.

## 12. Спектральные приборы.

Абсорбционная рентгеновская спектроскопия. Исследование химических составов по глубине скачков фотопоглощения. XAFS спектроскопия кристаллов. NEXAFS анализ.

## 13. Рентгенофлуоресцентный анализ.

Основы метода рентгенофлуоресцентного анализа EDXRF, WDXRF, TXRF методы. Особенности каждого из методов. Предельные чувствительности перечисленных методов.

## 14. Спектрометрия поглощения.

Абсорбционная рентгеновская спектроскопия. Исследование химических составов по глубине скачков фотопоглощения. XAFS спектроскопия кристаллов. NEXAFS анализ.

## 15. Рефлектометрия.

Отражение рентгеновского излучения от границы раздела двух сред. Рекуррентные соотношения для расчета коэффициента отражения от многослойной структуры. Волноводисперсионная и энергодисперсионная рентгеновская рефлектометрия. Относительная рентгеновская рефлектометрия. Применение призмы для рентгеновской рефлектометрии.

## 16. Малоугловое рентгеновское рассеяние.

Основы малоуглового рентгеновского рассеяния. Методы SAXS, GISAXS. Pump-Probe эксперименты с использованием XFEL и LCLS.

## 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, доска, медиапроектор, экран.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Физика рентгеновских лучей [Текст]/М. А. Блохин, -М., Гостехиздат, 1953
2. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ [Текст] / Г. В. Фетисов - М.Физматлит,2007

#### Дополнительная литература

1. Теория рассеяния рентгеновских лучей [Текст] / В. И. Иверонова, Г. П. Ревкевич - М. МГУ, 1978
2. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 2 : Теория поля : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц .— 7-е изд., испр. — М. : Наука, 1988 .— 509 с.
3. Ed by M. Bass. Handbook of optics. Vol.5. - McGraw hill comp., 2010
4. P. Brower. Theory of XRF. - Panalytical B.V., 2010.
5. Асланов Л. А. Треушников Е. Н. Основы теории дифракции рентгеновских лучей. - МГУ, 1985

#### **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

NIST.gov : X-ray data tables

[https://henke.lbl.gov/optical\\_constants/](https://henke.lbl.gov/optical_constants/) - табулированные данные

#### **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. документов. Типовая комплектация должна включать: мультимедийный проектор и персональный компьютер, оснащенный современными программами для презентаций.

#### **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>по направлению:</b>     | Фотоника и оптоинформатика   |
| <b>профиль подготовки:</b> | Фотоника, квантовые технологии и двумерные материалы<br>Физтех-школа физики и исследований им. Ландау<br>кафедра электрофизики |
| <b>курс:</b>               | <u>1</u>   |
| <b>квалификация:</b>       | магистр  |

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Экзамен
- 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчики:**

С.С. Гижа, канд. физ.-мат. наук  
А.Г. Турьянский, д-р физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции  | Индикаторы достижения компетенции   |
|---|---|
| ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук  | ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области фотоники и оптоинформатики  |
| ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи  | ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в области фотоники и оптоинформатики   |
|   | ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость   |
|   | ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации |
| ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения                                     | ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения   |
|   | ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)  |
|   | ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений   |
| ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий    | ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов  |
|   | ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования   |
| ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты | ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований  |
|   | ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели   |
|   | ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований в области фотоники и оптоинформатики к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты                                     |
| ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области                             | ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)   |
|   | ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов   |

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Современная физика рентгеновского излучения» обучающийся должен:

**знать:**

Основные типы современных рентгеновских источников, детекторов и их особенности.

**уметь:**



Подобрать для исследований подходящую экспериментальную методику с использованием рентгеновского излучения, оценить необходимые параметры основных элементов измерительной схемы.

**владеть:**

Методами оценок эффективности рентгеновских схем для решения прикладных задач в своих научных исследованиях.

**3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия или в конце занятия по пройденной теме.

**4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Перечень контрольных вопросов (9 семестр):

1. Рассеяние рентгеновского излучения свободным электроном и свободным атомом.
2. Принципы генерации синхротронного излучения.
3. Сечение и дифференциальное сечение взаимодействия рентгеновского излучения с веществом. Массовый и линейный коэффициенты поглощения.
4. Зависимость мнимой части декремента показателя преломления от атомного номера и от длины волны.
5. Принцип работы рентгеновской трубки. Виды рентгеновских трубок. Интенсивность, диаграммы направленности и поляризация излучения рентгеновской трубки.
6. Диаграммы направленности, интенсивность и спектральные характеристики источников на обратном комптоновском рассеянии.
7. Вывести формулу дифференциального сечения томсоновского рассеяния.
8. Показатель преломления в рентгеновском диапазоне, Зависимость действительной части декремента показателя преломления от атомного номера и от длины волны.
9. 1,2 и 3 поколения синхротронных источников. Вставные устройства. Вигглеры и Ондюляторы.
10. Лазеры на свободных электронах. Принцип работы и основные характеристики.

Перечень контрольных вопросов (10 семестр):

1. Методы фокусировки рентгеновского излучения.
2. Виды рентгеновских детекторов.
3. Рентгенофлуоресцентный анализ.
4. Дифракция рентгеновских лучей.
5. Абсорбционная рентгеновская спектроскопия.
6. Рассчитать спектральные характеристики поворотного магнита при заданных характеристиках пучка.
7. Рассчитать коэффициенты отражения рентгеновского излучения от многослойной структуры.
8. Рассчитать положения дифракционных максимумов для заданных семейств плоскостей.
9. Рассчитать углы выхода рентгеновского излучения из рентгеновской призмы.
10. Основы малоуглового рентгеновского рассеяния. Методы SAXS, GISAXS. Pump-Probe эксперименты с использованием XFEL и LCLS.

Примеры экзаменационных билетов:

9 семестр

Билет №1

1. Свойства тормозного и характеристического излучения.
2. Показатель преломления в рентгеновском диапазоне.

Билет №2

1. Волновые и корпускулярные свойства рентгеновского излучения.
2. Обратный комптон эффект.

10 семестр

Билет №1

1. Синхротронные источники 3 и 4 поколения.
2. Генерация рентгеновских лучей в рентгеновской трубке.

Билет №2

1. Томсоновское и комптоновское рассеяние свободным электроном.
2. Ондюляторы. Коэффициент ондулятора.

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

#### **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.