

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования**
**«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)**

Физический факультет
Кафедра физических методов исследования твёрдого тела



Рабочая программа дисциплины
СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В СТРУКТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Направление подготовки: **03.04.02 Физика**

Направленность (профиль): **Физика. Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения **Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная ра- бота, не включая пе- риод сессии	Самостоятельная подготовка к проме- жуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные за- нятия			Консультации	Зачет	Дифференциро- ванный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	72	16	16		38				2	
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 34 часа										
Компетенции ПК-1										

Ответственный за образовательную программу
д.ф.-м.н., проф.

С. В. Цыбуля

Новосибирск, 2026

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	5
5. Перечень учебной литературы.	6
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	6
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.....	6
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	7
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	7
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	8

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «Синхротронное излучение в структурных исследованиях» имеет целью предоставить обучающимся информацию о современных методах генерации синхротронного излучения (СИ) и использования его для исследования структуры веществ и материалов, а также об аппаратном и программном обеспечении экспериментов.

Характерные особенности СИ в сравнении с традиционными рентгеновскими источниками обеспечивают его успешное применение в тех областях рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализа, где абсолютно необходимыми являются высокая интенсивность, спектральная чистота, естественная коллимация и поляризация излучения. СИ используется для решения самых важных задач в исследованиях структуры кристаллических и аморфных тел и аккумулирует вокруг себя самые передовые научно-исследовательские методики, инструменты и технологии. Современному специалисту, работающему в области физики конденсированного состояния и физического материаловедения, необходимо иметь представление об источниках СИ, его основных свойствах и тех экспериментальных возможностях, которые дает применение СИ в исследованиях структуры функциональных материалов.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать теоретические основы динамики ультрарелятивистских заряженных частиц в электрических и магнитных полях, принципы генерации излучения ультрарелятивистскими заряженными частицами, характерные особенности излучения из поворотных магнитов и встроенных устройств (вигглеров и ондуляторов), основные элементы структуры источников синхротронного излучения; способы монохроматизации, фокусировки и детектирования рентгеновского излучения; методики исследования структуры веществ и материалов с использованием синхротронного излучения. Уметь выполнить рентгенодифракционный и рентгеноспектральный эксперименты на станциях Сибирского центра синхротронного излучения; обработать полученные данные и проанализировать результаты. Владеть навыками работы на пучках синхротронного излучения в Сибирском центре синхротронного излучения; навыками обработки и

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		анализа полученных данных с использованием теоретических основ метода синхротронного излучения.

Учебный курс «Синхротронное излучение в структурных исследованиях» преподаётся классическим способом – читаются лекции и проводятся практические занятия с постановкой промежуточных вопросов. При подаче материала лекционного курса используется мультимедийная техника. На экран выводятся определения, основные понятия, графические иллюстрации, помогающие наглядно представить материал. Все практические занятия проводятся в интерактивной форме с обсуждением лекционного материала на конкретных примерах. Существенным элементом образовательных технологий является не только умение магистранта найти решение поставленной задачи, но и способность доходчиво донести его до всей аудитории. Умение ответить на вопросы сокурсников и преподавателя развивает навыки, которые будут необходимы в дальнейшей профессиональной деятельности. На контрольные вопросы магистранты отвечают, как у доски, так и письменно. Каждому магистранту предлагается свой вариант вопроса.

Материал лекционного курса увязывается с современными исследованиями, проводимыми в отечественных и мировых центрах СИ. Специально рассматриваются темы, активно обсуждающиеся в текущей профессиональной научной литературе и планах дальнейших работ в институтах, в которых магистранты выполняют свои квалификационные работы.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Синхротронное излучение в структурных исследованиях» требует базовые знания магистрантов по кристаллографии, кристаллохимии, теории рассеяния рентгеновских лучей, а также по математике (дифференциальное и интегральное исчисления, численные методы решения систем нелинейных уравнений и др.). Курс является одной из дисциплин профессионального цикла подготовки по направлению 03.04.02 Физика. Общая и фундаментальная физика. Он должен предшествовать выполнению квалификационной работы магистранта, т.к. даёт ему необходимые знания, навыки и предоставляет инструменты для выполнения структурных исследований наноматериалов в рамках подготовки его квалификационной работы.

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Трудоёмкость дисциплины составляет: 2 зачётные единицы, 72 часа.

Форма промежуточной аттестации: 2 семестр – дифференцированный зачёт

№	Вид деятельности	Семестр
		2
1	Лекции, ч	16
2	Практические занятия, ч	16
3	Лабораторные занятия, ч	-
4	Занятия в контактной форме, ч из них	34

5	аудиторных занятий, ч	32
6	в электронной форме, ч	-
7	консультаций, час.	-
8	промежуточная аттестация, ч	2
9	Самостоятельная работа, час.	38
10	Всего, ч	72

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

Программа и основное содержание лекций (16 часов)

- 1. Классическая теория излучения.** Потенциалы Лиенара-Вихерта и поле точечного заряда. Полная мощность излучения ускоренно движущегося заряда. **(1 час)**
- 2. Излучение произвольно двигающейся ультрарелятивистской заряженной частицы.** Спектральное и угловое распределение излучения, испускаемого ускоренными зарядами. **(1 час)**
- 3. Спектрально-угловое распределение излучения релятивистской заряженной частицы при мгновенном движении по окружности.** Синхротронное излучение. **(1 час)**
- 4. Излучение из вигглеров и ондуляторов.** Специальные методы генерации СИ. Параметр ондуляторности. Лазеры на свободных электронах. **(1 час)**
- 5. Основные формулы для СИ.** Оценки мощности, спектрального и углового распределения излучения. **(1 час)**
- 6. Взаимодействие излучения с веществом.** Формула Томсона для рассеяния электромагнитной волны заряженной частицей. Классический радиус электрона. **(1 час)**
- 7. Рассеяние системой зарядов. Форм-фактор и фактор (амплитуда) рассеяния.** Рассеяние электромагнитной волны свободными зарядами. **(1 час)**
- 8. Атомные факторы рассеяния и дисперсионные поправки.** Рассеяние связанными зарядами. Рассеяние вблизи резонанса (аномальное рассеяние). **(1 час)**
- 9. Дифракция рентгеновского излучения на кристаллической решетке.** Структурный фактор. Определение структуры кристаллов, фазовая проблема. **(1 час)**
- 10. Методы рентгеновской дифрактометрии на СИ.** Дифрактометрия монокристаллов (метод Лауэ, метод качания, метод вращения) и порошковая дифрактометрия (метод Дебая-Шеррера, дифрактометрия на отражение, энергодисперсионная дифрактометрия). **(1 час)**
- 11. Особенности рентгеновской дифрактометрии поликристаллов на синхротронном излучении.** Прецизионная дифрактометрия поликристаллов. Конструкция, режимы работы, технические характеристики дифрактометра. Возможности метода: рентгенофазовый анализ, уточнение структур, определение субструктурных параметров. **(1 час)**
- 12. Резонансное (аномальное) рассеяние.** Применение эффекта аномального рассеяния для структурного анализа поликристаллов. **(1 час)**
- 13. Порошковая дифрактометрия с временным разрешением.** Методы «дифракционного кино». Оценки временного разрешения. Конструкция станции дифрактометрии высокого временного разрешения. Устройство фокусирующего монохроматора. Устройство однокоординатных рентгеновских детекторов типа ОД-3. Двухкоординатные рентгеновские детекторы типа ДЕД-5. Рентгеновские запоминающие экраны Image Plate. Дифрактометрия в условиях реакционной среды. **((1 час)**
- 14. Рентгеноспектральные методы исследования структуры с использованием СИ.** Рентгеновские спектры поглощения. Локальная атомная структура аморфных тел и жидкостей. **(1 час)**
- 15. Околопороговая тонкая структура спектров поглощения (XANES) и ее связь с атомной структурой.** **(1 час)**
- 16. Дальняя тонкая структура спектров поглощения (EXAFS) и ее связь с атомной структурой.** **(1 час)**

Программа практических занятий (16 часов)

Занятие 1. Моделирование излучения релятивистской заряженной частицы, движущейся по произвольной траектории, с использованием программы Radiation2D (2 часа)

Занятие 2. Программный пакет Synchrotron Radiation Workshop (SRW). Моделирование спектрально-углового распределения интенсивности излучения из различных источников. Моделирование оптических элементов каналов СИ (6 часов)

Занятие 3. Проведение экспериментов на станции дифрактометрии высокого разрешения (канал СИ №2 ВЭПП-3) в СЦСТИ (2 часа)

Занятие 4. Обработка полученных результатов с использованием программного комплекса MAUD (2 часа)

Занятие 5. Проведение экспериментов на станции дифрактометрии In Situ и Operando (канал СИ №6 ВЭПП-3) в СЦСТИ (2 часа)

Занятие 6. Обработка полученных результатов с использованием пакета Fityk и программного комплекса MAUD (2 часа)

Самостоятельная работа студентов (38 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	16
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	16
Подготовка к дифференцированному зачёту	6

5. Перечень учебной литературы.

1. Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. Под ред. Л. А. Асланова. Физматлит, Москва, 2007., ISBN 978-5-9221-0805-8 (6 экз.)
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. Серия «Теоретическая физика», т.2. (56 экз.)
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Серия «Теоретическая физика», т.8., ISBN 5-02-014673-0 (69 экз.)

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

1. Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. Под ред. Л. А. Асланова. Физматлит, Москва, 2007.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

Интернет-ресурсы:

1. <http://www.shintakelab.com/en/enEducationalSoft.htm>
2. <http://ssrc.inp.nsk.su>
3. <http://www.esrf.eu>
4. <http://hasylab.desy.de>
5. <http://www.aps.anl.gov>

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются.

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

- комплекс программ ПОЛИКРИСТАЛЛ (разработчики: Цыбуля С.В., Черепанова С.В., Соловьева Л.П.);
- программа моделирования одномерно разупорядоченных структур и 1D наносистем (разработчики Черепанова С.В., Цыбуля С.В.);
- программа DIANNA для моделирования дифракционных картин от ансамбля хаотически разориентированных наночастиц (разработчики: Д.А. Яценко, С.В. Цыбуля, Новосибирск, НГУ).

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.
2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в ходе заслушивания сообщений студентов на занятиях в виде презентаций на выбранные темы.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области синхротронного излучения в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на дифференцированном зачёте. Он проводится в конце семестра по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Таблица 10.1

Код компетенции	Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочное средство
ПК-1	ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать теоретические основы динамики ультрарелятивистских заряженных частиц в электрических и магнитных полях, принципы генерации излучения ультрарелятивистскими заряженными частицами, характерные особенности излучения из поворотных магнитов и встроенных устройств (вигглеров и ондуляторов), основные элементы структуры источников	Заслушивание сообщений, дифференцированный зачёт
	ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные		

	методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования	синхротронного излучения; способы монохроматизации, фокусировки и детектирования рентгеновского излучения; методики исследования структуры веществ и материалов с использованием синхротронного излучения. Уметь выполнить рентгенодифракционный и рентгеноспектральный эксперименты на станциях Сибирского центра синхротронного излучения; обработать полученные данные и проанализировать результаты. Владеть навыками работы на пучках синхротронного излучения в Сибирском центре синхротронного излучения; навыками обработки и анализа полученных данных с использованием теоретических основ метода синхротронного излучения.	
--	--	--	--

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Синхротронное излучение в структурных исследованиях».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
<u>Дифференцированный зачёт:</u> – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий, – наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы. При изложении ответа на вопрос(ы) преподавателя обучающийся мог допустить не принципиальные неточности.	Отлично

<u>Дифференцированный зачёт:</u> – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий при наличии незначительных ошибок, – наличие полных ответов на дополнительные вопросы с возможным присутствием ошибок.	Хорошо
<u>Дифференцированный зачёт:</u> – самостоятельность и осмысленность в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации, а также затруднений при формулировке собственных суждений, – корректность применения терминов и понятий, с множественными ошибками, – наличие неполных и/или содержащих существенные ошибки ответов на дополнительные вопросы.	Удовлетворительно
<u>Дифференцированный зачёт:</u> – отсутствие осмысленности, структурированности, логичности и аргументированности в изложении материала, – грубые ошибки в применении терминов и понятий, – отсутствие ответов на дополнительные вопросы.	Неудовлетворительно

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Примеры тем сообщений

1. Характеристики встроенных устройств (шифтеров, вигглеров и ондуляторов).
2. Рентгеновские лазеры на свободных электронах.
3. Мировые центры СИ, потребительские характеристики источников, экспериментальные возможности исследовательских станций.
4. Аспекты точности в рентгеновской дифрактометрии поликристаллов.
5. Резонансные эффекты в рентгеновской дифрактометрии.
6. Дифрактометрия в нестандартных внешних условиях (температуры, давления, среды).
7. Ближняя и дальняя тонкие структуры рентгеновских спектров поглощения как методы исследования локальной структуры.

Примерные вопросы на дифференцированном зачёте

1. Запаздывающие потенциалы и потенциалы Лиенара-Вихерта. Поле движущегося точечного заряда.
2. Полная мощность излучения ускоренно движущегося заряда. Формула Лармора.
3. Излучение при тангенциальном и центростремительном ускорении.
4. Излучение заряда при произвольном ультрарелятивистском движении.
5. Спектральное распределение энергии, излучаемой ускоренными зарядами.
6. Угловое распределение энергии, излучаемой ускоренными зарядами.
7. Спектрально-угловое распределение излучения релятивистской заряженной частицы при мгновенном движении по окружности.
8. Рентгеновские лазеры на свободных электронах.
9. Комптоновский источник излучения.
10. Формула Томсона для рассеяния электромагнитной волны заряженной частицей.
11. Рассеяние системой зарядов. Форм-фактор и фактор (амплитуда) рассеяния. Атомные факторы рассеяния.
12. Дифракция рентгеновского излучения на кристаллической решетке. Структурный фактор. Определение структуры кристаллов, фазовая проблема
13. Резонансное рассеяние. Дисперсионные поправки.
14. Рентгеновские спектры поглощения. Локальная атомная структура аморфных тел и жидкостей.
15. Синхротронное излучение. Поворотные магниты и супербэнды.
16. Вигглеры и ондуляторы. Особенности ондуляторного излучения.
17. Основные формулы для синхротронного излучения – критическая энергия фотонов, угловая расходимость, мощность пучка СИ, полный поток фотонов в единичный угловой интервал, спектральный поток фотонов.
18. Генерация излучения при движении релятивистских частиц в кристаллах.
19. Линейные ускорители-рекуператоры (Energy Recovery Linacs).
20. Монохроматизация и фокусировка пучков СИ. Рентгеновские зеркала и линзы.
21. Методы рентгеновской дифрактометрии на СИ. Прецизионная дифрактометрия.
22. Методы рентгеновской дифрактометрии на СИ. Дифрактометрия в жестком рентгеновском диапазоне.
23. Методы рентгеновской дифрактометрии на СИ. Дифрактометрия с разрешением по времени.
24. Методы рентгеновской дифрактометрии на СИ. Малоугловое рассеяние.
25. Регистрация дифрагированного излучения. Принципы детектирования. Позиционно-чувствительные детекторы.
26. Методы «дифракционного кино». Дифрактометрия в условиях реакционной среды, высоких температур и давлений.
27. Околопороговая тонкая структура спектров поглощения (XANES) и ее связь с атомной структурой.
28. Дальняя тонкая структура спектров поглощения (EXAFS) и ее связь с атомной структурой.

Пример билета на дифференцированном зачёте

1. Излучение при тангенциальном и центростремительном ускорении.
2. Методы рентгеновской дифрактометрии на СИ. Дифрактометрия с разрешением по времени.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.