

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ

Декан радиофизического факультета

_____ В.В. Матросов

“ ____ ” _____ 2021 г.

Рабочая программа дисциплины

Аттосекундная физика

Направление подготовки
03.06.01 "Физика и астрономия"

Направленность подготовки
01.04.21 "Лазерная физика"

Квалификация выпускника
Исследователь. Преподаватель-исследователь

Форма обучения
Очная

Нижний Новгород
2021

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы (ОПОП)

Дисциплина Аттосекундная физика относится к числу профессиональных дисциплин, является дисциплиной выбора и изучается на 2 году обучения, в 4 семестре.

Освоение курса опирается на знания, умения, навыки и компетенции, сформированные на двух предшествующих уровнях образования в результате освоения курсов общей физики, математического анализа, дифференциальных уравнений, колебаний и волн, оптики, электродинамики, квантовой теории, специальной теории относительности, колебаний и волн в плазменных средах и специальных курсов, относящихся к лазерной физике.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОПОП (компетенциями выпускников)

Таблица 1

Планируемые результаты обучения по дисциплине

Код формируемой компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
ПК-1 (базовый этап)	З1 Знать основные принципы получения, измерения и применения аттосекундных световых импульсов В1 Владеть современными теоретическими и экспериментальными методами исследований сверхбыстрых процессов в веществе
ПК-2 (базовый этап)	З1 Знать современное состояние исследований в области аттосекундной физики У1 Уметь определять наиболее актуальные направления исследований взаимодействия ультракоротких световых импульсов с веществом

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 3 зачетные единицы, всего 108 часов, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (18 часов – занятия лекционного типа, 18 часов занятия семинарского типа (семинары и научно-практические занятия)), 72 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

Таблица 2

Структура дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе	
		Контактная работа, часов	Самостоятельная

		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	работа обучающегося, часов
1. Введение	8	2	2			4	4
2. Ионизационные процессы в газах в интенсивном лазерном поле	8	2	2			4	4
3. Генерация высоких гармоник лазерного излучения в газах	8	2	2			4	4
4. Факторы, определяющие свойства высоких гармоник лазерного излучения, генерируемых в газах	12	3	3			6	6
5. Генерация аттосекундных импульсов в газах	8	2	2			4	4
6. Другие методы получения аттосекундных импульсов	8	2	2			4	4
7. Методы измерения аттосекундных импульсов	8	2	2			4	4
8. Измерения сверхбыстрых процессов в веществе с аттосекундным временным разрешением	12	3	3			6	6
Аттестация по дисциплине (зачет)	36						36
Итого	108	18	18			36	72

Таблица 3

Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля*
1.	Введение	Ультракороткие импульсы и зондирование быстрых процессов в веществе. Условия получения ультракоротких импульсов. Генерация и применение фемтосекундных импульсов. Предельно короткие импульсы. Методы генерации и применение когерентного рентгеновского излучения.	Занятия лекционного типа, семинарского типа	Устный опрос
2.	Ионизационные	Многофотонная ионизация. Теория	Занятия	Устный

	процессы в газах в интенсивном лазерном поле	Келдыша. Туннельная и надбарьерная ионизация. Надпороговая ионизация. Многократная ионизация. Экспериментальные методы исследования ионизационных процессов.	лекционного типа, семинарского типа	опрос
3.	Генерация гармоник высокого порядка (ГГВП) лазерного излучения в газах	Спектры гармоник, генерируемых в газах. Полуклассическая модель перерасеяния электрона. Физические процессы при столкновениях электронов с родительскими ионами. Полуклассическая теория ГГВП. Квантовомеханическое описание ГГВП: численные расчеты, аналитическое описание. Частотно-временной анализ ГГВП. «Квантовые траектории» электронов.	Занятия лекционного типа, семинарского типа	Устный опрос
4.	Факторы, определяющие свойства высоких гармоник лазерного излучения, генерируемых в газах	Зависимость характеристик высоких гармоник от свойств частиц газа. Поляризационные эффекты при ГГВП в газах. Генерация и применения циркулярно-поляризованных рентгеновских импульсов. Фазовый синхронизм при генерации высоких гармоник. ГГВП в поле длинноволнового лазерного излучения. Недипольные эффекты в ГГВП.	Занятия лекционного типа, семинарского типа	Устный опрос
5.	Генерация аттосекундных импульсов при ГГВП в газах	Генерация цуга аттосекундных импульсов. Генерация одиночного аттосекундного импульса. Использование предельно коротких лазерных импульсов («амплитудный затвор»). Использование лазерных импульсов переменной эллиптичности («поляризационный затвор»). Использование быстрой ионизации среды («ионизационный затвор»). Использование двухчастотного поля. Использование лазерных пучков с вращающимся волновым фронтом («аттосекундный маяк»).	Занятия лекционного типа, семинарского типа	Устный опрос

6.	Другие методы получения аттосекундных импульсов	ГТВП в плазменном факеле при абляции твердотельной мишени. ГТВП при релятивистских взаимодействиях высокоинтенсивного лазерного излучения с поверхностью плотной плазмы. Методы, не использующие ГТВП.	Занятия лекционного типа, семинарского типа	Устный опрос
7.	Методы измерения характеристик аттосекундных импульсов	Автокорреляционные и кросс-корреляционные измерения. RABBITT (Reconstruction of Attosecond Beating By Interference of Two-photon Transitions). Аттосекундная стрик-камера. Метод CRAB-FROG. Метод SPIDER.	Занятия лекционного типа, семинарского типа	Устный опрос
8.	Измерения сверхбыстрых процессов с аттосекундным временным разрешением	Использование кулоновского взрыва молекул. Использование перерасеяния электронов. «Аттосекундные часы». Измерения с использованием аттосекундных импульсов. Измерение динамики электронных процессов методами аттосекундной стрик-камеры и RABBITT. Аттосекундная абсорбционная спектроскопия.	Занятия лекционного типа, семинарского типа	Устный опрос

4. Образовательные технологии

При изучении курса используются современные образовательные технологии. Предусматривается использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (компьютерное моделирование, разбор конкретных ситуаций, тренинги по решению задач) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Предусматриваются участие в семинарах с представителями российских и зарубежных научных организаций, мастер-классы экспертов и специалистов в области физики сверхбыстрых процессов и взаимодействия интенсивного электромагнитного излучения с веществом.

5. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная проработка лекционного и дополнительного материала. Подготовка обучающимися научных сообщений по литературе о новых достижениях в области аттосекундной физики.

Типовые контрольные вопросы:

- 1) Характерные временные и энергетические масштабы различных процессов в микромире.
- 2) Основные условия, необходимые для получения аттосекундных импульсов.
- 3) Методы генерации импульсов когерентного рентгеновского излучения и их применения.
- 4) Формула Келдыша для скорости ионизации в переменном лазерном поле и ее предельные случаи.
- 5) Полуклассическая модель Коркума для возвратных соударений электронов и ее использование для анализа энергетических и угловых распределений электронов в ионизационных процессах.
- 6) Полуклассическая модель Коркума и ее использование для анализа спектральных и частотно-временных характеристик процесса генерации высоких гармоник в газах.
- 7) Приближение сильного поля при квантовомеханическом описании процесса генерации высоких гармоник в газах. Теория Левенштейна.
- 8) Особенности генерации высоких гармоник в молекулярных газах.
- 9) Синхронизация высоких гармоник.
- 10) Влияние поляризации и магнитного поля лазерного излучения на эффективность генерации высоких гармоник в газах.
- 11) Генерация и применения циркулярно-поляризованных рентгеновских импульсов.
- 12) Методы реализации фазового синхронизма и квазисинхронизма при генерации высоких гармоник в газах.
- 13) Использование предельно коротких лазерных импульсов для получения одиночного аттосекундного импульса. Роль фазы заполнения относительно огибающей лазерного импульса.
- 14) Принцип «поляризационного затвора» для получения одиночного аттосекундного импульса.
- 15) Режимы и физические механизмы генерации высоких гармоник при взаимодействии высокоинтенсивного лазерного излучения с поверхностью плотной плазмы.
- 16) Принцип метода RABBITT и его использование для измерения характеристик цуга аттосекундных импульсов.
- 17) Принцип действия аттосекундной стрик-камеры и ее применения.
- 18) Принцип пространственной селекции одиночного аттосекундного импульса с помощью «аттосекундного маяка».
- 19) Использование процессов при перерассеянии электронов на родительских ионах для исследования сверхбыстрых процессов в молекулах.

20) Методы исследования сверхбыстрых процессов в веществе с использованием аттосекундных импульсов.

6. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования

Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования приведено в приложении 1.

6.2. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине. Описание шкал оценивания

Форма аттестации: зачет.

Шкала оценивания: зачет-незачет

Критерии оценивания

Зачтено	Превосходная, отличная, хорошая или удовлетворительная подготовка. Обучаемый не менее чем удовлетворительно отвечает на вопросы программы – минимум и основной вопрос, а также на большинство дополнительных вопросов.
Не зачтено	Обучаемый показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий, допускает значительные ошибки при ответах на большинство дополнительных вопросов. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.

6.3. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, необходимых для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций.

Типовые контрольные вопросы:

- 1) Основные условия, необходимые для получения аттосекундных импульсов (ПК-1).
- 2) Методы генерации когерентного рентгеновского излучения и его применения (ПК-1).
- 3) Особенности генерации высоких гармоник в молекулярных газах (ПК-1).
- 4) Режимы и физические механизмы генерации высоких гармоник при взаимодействии высокоинтенсивного лазерного излучения с поверхностью плотной плазмы (ПК-1).
- 5) Современное развитие теории нелинейной ионизации атомов и ионов (ПК-2).
- 6) Современные достижения в области генерации импульсов когерентного рентгеновского излучения (ПК-2).
- 7) Современные достижения в области получения аттосекундных импульсов и управления их характеристиками (ПК-2).
- 8) Современные достижения в исследованиях сверхбыстрых процессов в веществе с использованием аттосекундных импульсов (ПК-2).
- 9) Основные принципы генерации ультракоротких световых импульсов (ПК-1, ПК-2).
- 10) Основные принципы измерения ультракоротких световых импульсов (ПК-1, ПК-2).

11) Генерация и применения циркулярно-поляризованных рентгеновских импульсов (ПК-1, ПК-2).

12) Формула Келдыша для скорости ионизации в переменном лазерном поле и ее предельные случаи (ПК-1, ПК-2).

13) Полуклассическая модель Коркума для возвратных соударений электронов и ее ограничения. Классические и квантовомеханические аспекты задачи о генерации аттосекундных импульсов (ПК-1, ПК-2).

14) Приближение сильного поля при квантовомеханическом описании процесса генерации высоких гармоник в газах. Теория Левенштейна и ее ограничения (ПК-1, ПК-2).

15) Электродипольное приближение и его нарушения при взаимодействии высокоинтенсивного лазерного излучения с атомами и ионами (ПК-1, ПК-2).

16) Проблема фазового синхронизма при генерации высоких гармоник в газах и пути ее решения (ПК-1, ПК-2).

17) Характерные временные и энергетические масштабы различных процессов в микромире и методы их экспериментального исследования (ПК-1, ПК-2).

18) Основные методы получения одиночных аттосекундных импульсов, их преимущества и недостатки (ПК-1, ПК-2).

19) Численные и аналитические методы интегрирования нестационарного уравнения Шредингера для решения задач нелинейного преобразования частот интенсивного лазерного излучения в газах (ПК-1, ПК-2).

20) Методы аттосекундной метрологии и области их применения (ПК-1, ПК-2).

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. П.Г. Крюков, Фемтосекундные импульсы. Введение в новую область лазерной физики, М., Физматлит, 2008, 208 с.

2. Н.Б. Делоне, В.П. Крайнов, Нелинейная ионизация атомов лазерным излучением, М., Физматлит, 2001, 312 с.

3. F. Krausz, M. Ivanov, Attosecond physics, Rev. Mod. Phys., v. 81, No. 1, pp. 163-234 (2009).

б) дополнительная литература:

1. А.В. Коржиманов, А.А. Гоносков, Е.А. Хазанов, А.М. Сергеев, Горизонты петаваттных лазерных комплексов, УФН, т. 181, вып. 1, с. 9-32 (2011).

2. Б.М. Карнаков, В.Д. Мур, С.В. Попруженко, В.С. Попов, Современное развитие теории нелинейной ионизации атомов и ионов, УФН, т. 185, вып. 1, с. 3-34 (2015).

3. М.Ю. Емелин, М.Ю. Рябикин, Основы аттосекундной физики (электронное пособие), Учебное пособие, Н. Новгород, ННГУ, 2014, 52 с.

4. Проект «Международный центр исследований экстремальных световых полей (ЦИЭС)»
<http://www.xcels.iapras.ru/>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Аудиторный фонд ННГУ. Оборудование для мультимедийных презентаций, компьютерное оборудование для поиска информации и численного моделирования. Библиотечный фонд ННГУ.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО с учетом рекомендаций ОПОП по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации) и направленности 01.04.21 Лазерная физика.

Автор _____ Рябикин М.Ю.

Рецензент _____ Бодров С.Б.

Заведующий кафедрой общей физики _____ Бакунов М.И.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от _____ 2021 года, протокол № ____.

Приложение 1

Карты компетенций, в формировании которых участвует дисциплина

ПК-1 Способность выполнять научно-исследовательские работы и получать новые научные результаты в области лазерной физики в составе научной группы

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПЕТЕНЦИИ

Тип КОМПЕТЕНЦИИ: Профессиональная компетенция выпускника программы аспирантуры.
 ПОРОГОВЫЙ (ВХОДНОЙ) УРОВЕНЬ ЗНАНИЙ, УМЕНИЙ, ОПЫТА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ТРЕБУЕМЫЙ ДЛЯ
 ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИИ

Для того, чтобы формирование данной компетенции было возможно, обучающийся, приступивший к освоению программы аспирантуры, должен:

ЗНАТЬ: базовые разделы высшей математики, теоретической и лазерной физики.

УМЕТЬ: проводить основные математические преобразования, пользоваться основными измерительными приборами.

ВЛАДЕТЬ: базовым уровнем английского языка, навыками программирования и использования ресурсов интернета.

Планируемые результаты обучения*(показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
ЗНАТЬ: Основные концепции современной лазерной физики	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления об основных концепциях лазерной физики	Неполные представления об основных концепциях лазерной физики	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы, представления об основных концепциях лазерной физики	Сформированные систематические представления об основных концепциях лазерной физики

УМЕТЬ: Работать на современном оптическом и измерительном оборудовании	Отсутствие умений	Частично освоенное умение работать на современном оптическом и измерительном оборудовании	В целом успешное, но не систематическое умение работать на современном оптическом и измерительном оборудовании	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение работать на современном оптическом и измерительном оборудовании	Успешное и систематическое умение работать на современном оптическом и измерительном оборудовании
ВЛАДЕТЬ: Современными теоретическими и экспериментальными методами исследований	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение современных теоретических и экспериментальных методов исследований	В целом успешное, но не систематическое применение современных теоретических и экспериментальных методов исследований	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение современных теоретических и экспериментальных методов исследований	Успешное и систематическое владение современными теоретическими и экспериментальными методами исследований
ВЛАДЕТЬ: Навыками чтения и восприятия научной литературы на английском языке	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков чтения и восприятия научной литературы на английском языке	В целом успешное, но не систематическое применение навыков чтения и восприятия научной литературы на английском языке	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков чтения и восприятия научной литературы на английском языке	Успешное и систематическое владение навыками чтения и восприятия научной литературы на английском языке

ПК-2 Способность самостоятельно ставить научные задачи и формулировать новые идеи в области лазерной физики

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПЕТЕНЦИИ

Тип КОМПЕТЕНЦИИ: Профессиональная компетенция выпускника программы аспирантуры.

ПОРОГОВЫЙ (ВХОДНОЙ) УРОВЕНЬ ЗНАНИЙ, УМЕНИЙ, ОПЫТА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ТРЕБУЕМЫЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИИ

Для того, чтобы формирование данной компетенции было возможно, обучающийся, приступивший к освоению программы аспирантуры, должен:

ЗНАТЬ: основы лазерной физики.

УМЕТЬ: выделять и систематизировать основные идеи в научных текстах.

ВЛАДЕТЬ: базовым уровнем английского языка, навыками использования ресурсов интернета.

Планируемые результаты обучения*(показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
ЗНАТЬ: Современное состояние исследований в области лазерной физики	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о современном состоянии исследований в области лазерной физики	Неполные представления о современном состоянии исследований в области лазерной физики	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы, представления о современном состоянии исследований в области лазерной физики	Сформированные систематические представления о современном состоянии исследований в области лазерной физики
УМЕТЬ: Определять наиболее актуальные направления исследований	Отсутствие умений	Частично освоенное умение определять наиболее актуальные направления	В целом успешное, но не систематическое умение определять наиболее актуальные направления	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение определять наиболее актуальные направления	Успешное и систематическое умение определять наиболее актуальные направления исследований

		исследований	исследований	исследований	
ВЛАДЕТЬ: Навыками формулирования задач для членов исследовательской группы	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков формулирования задач для членов исследовательской группы	В целом успешное, но не систематическое применение навыков формулирования задач для членов исследовательской группы	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков формулирования задач для членов исследовательской группы	Успешное и систематическое владение навыками формулирования задач для членов исследовательской группы