

**Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики  
Российской академии наук» (ИПФ РАН)**

УТВЕРЖДАЮ:

Зам. директора по научной работе

\_\_\_\_\_ М.Ю. Глявин

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Рабочая программа дисциплины**

**Аттосекундная физика**

---

Уровень высшего образования  
Подготовка кадров высшей квалификации

---

Направление подготовки / специальность  
03.06.01 Физика и астрономия

---

Направленность образовательной программы  
01.04.21 Лазерная физика

---

Квалификация (степень)  
Исследователь. Преподаватель-исследователь.

---

Форма обучения  
очная

---

Нижний Новгород

20\_\_

## 1. Место и цели дисциплины в структуре образовательной программы (ОП)

Дисциплина «Аттосекундная физика» относится к числу профильных дисциплин вариативной части образовательной программы, является дисциплиной по выбору аспиранта, преподается на втором году обучения в четвертом семестре.

**Целями освоения дисциплины являются:**

- формирование у аспирантов целостной системы знаний по основам аттосекундной физики – современной междисциплинарной области исследований, основным предметом которой являются получение и измерение световых импульсов субфемтосекундной (короче  $10^{-15}$  секунд) длительности и применение таких импульсов для зондирования сверхбыстрых процессов в веществе, обусловленных динамикой электронов в атомах, молекулах и конденсированных средах, а также для управления этими процессами.
- формирование профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» и направленностью подготовки 01.04.21 Лазерная физика.

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

Таблица 1:

**Планируемые результаты обучения по дисциплине**

Код и этап формируемой компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине
<b>ПК-2</b> <i>способность проводить научные исследования и решать научно-исследовательские задачи, соответствующие направленности подготовки, используя специализированные знания в области физики и астрономии, современные методы исследований и информационные технологии, с учетом отечественного и зарубежного опыта</i> (этап освоения – базовый)	<i>З1 (ПК-1) Знать основные методы получения и измерения световых импульсов субфемтосекундной длительности и их применения для зондирования и управления сверхбыстрыми процессами в веществе</i> <i>У1 (ПК-1) Уметь применять полученные знания для исследования путей высокоэффективной генерации аттосекундных импульсов с управляемыми характеристиками и их использования для получения информации о динамике процессов в веществе с аттосекундным временным и субнанометровым пространственным разрешением</i> <i>В1 (ПК-1) Владеть приемами целеполагания, планирования, реализации необходимых видов деятельности, оценки и самооценки результатов деятельности по решению профессиональных задач; приемами выявления и осознания своих возможностей, личностных и профессионально-значимых качеств с целью их совершенствования</i>
<b>ПК-3</b> <i>способность свободно ориентироваться в разделах физики, необходимых для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (в соответствии с направленностью подготовки)</i> (этап освоения – базовый)	<i>З1 (ПК-2) Знать основные теоретические подходы и модели, используемые для описания генерации сверхкоротких электромагнитных импульсов и их взаимодействия с веществом</i> <i>У1 (ПК-2) Уметь использовать полученные знания для изучения сверхбыстрых процессов в веществе, анализировать результаты использования простых моделей для описания взаимодействия сверхкоротких импульсов излучения с газовыми и конденсированными средами</i> <i>В1 (ПК-2) Владеть современными теоретическими и численными методами, используемыми в аттосекундной физике</i>

## 3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 38 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (36 часов занятия лекционного типа, в т.ч. мероприятия текущего контроля успеваемости, 2 часа мероприятия промежуточной аттестации), 70 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

## Структура дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Всего	
Тема 1 Ионизация атомов и молекул в световом поле	18	6		6	12
Тема 2 Генерация высоких гармоник лазерного излучения	18	6		6	12
Тема 3. Генерация аттосекундных импульсов	18	6		6	12
Тема 4. Экспериментальная техника аттосекундной физики	18	6		6	12
Тема 5. Аттосекундная метрология	18	6		6	12
Тема 6. Измерения и контроль сверхбыстрых процессов с аттосекундным временным разрешением	16	6		6	10
в т.ч. текущий контроль			4		
Промежуточная аттестация -зачет				2	
Итого		108			

## Содержание разделов дисциплины

**Ионизация атомов и молекул в световом поле.**

Атомный фотоэффект. Однофотонная ионизация с внутренних орбиталей. Многофотонная ионизация. Теория Келдыша. Многофотонный и туннельный пределы. Формула Аммосова-Делоне-Крайнова. Надбарьерная ионизация. Лазерная ионизация молекул. Зависимости вероятности ионизации молекул от угла выстраивания, межъядерного расстояния и типа валентной орбитали. Надпороговая ионизация атомов. Генерация «горячих электронов при надпороговой ионизации атомов. Многократная ионизация. Полуклассическая трехступенчатая модель Коркума. Описание особенностей процессов ионизации с помощью модели Коркума. Эксперименты, подтверждающие модель Коркума.

**Генерация высоких гармоник лазерного излучения.**

Плато в спектре генерации гармоник высокого порядка (ГГВП) интенсивного лазерного излучения в газах. Высокочастотная граница спектра. Рассмотрение ГГВП в рамках модели Коркума. «Короткие» и «длинные» траектории электронов. Квантовомеханическое описание ГГВП. Теория Левенштейна. Частотно-временной анализ сигнала высоких гармоник. «Атточирп» высоких гармоник. Опустошение атомарных уровней в интенсивном лазерном поле. Зависимость формы спектра высоких гармоник от типа атомов. Теория Манакова-Фролова. Особенности ГГВП в молекулярных газах. Фазовый синхронизм при ГГВП. Методы реализации фазового квазисинхронизма. Влияние поляризации лазерного излучения на эффективность ГГВП в газах. Зависимость ширины плато и выхода высоких гармоник от длины волны лазерного излучения. Магнитный дрейф электрона как ограничивающий фактор при ГГВП в газах. ГГВП при взаимодействии высокоинтенсивного лазерного излучения с поверхностью плотной плазмы.

### **Генерация аттосекундных импульсов.**

Основные условия, необходимые для получения аттосекундных импульсов. Относительные фазы высоких гармоник, генерируемых в газах. Синхронизация гармоник: селекция траекторий; компенсация атточирпа. Получение одиночных аттосекундных импульсов: методы амплитудного затвора, поляризационного затвора, двойного оптического затвора, ионизационного затвора, аттосекундного маяка. Современные достижения.

### **Экспериментальная техника аттосекундной физики.**

Методы управления фазой заполнения относительно огибающей предельно короткого лазерного импульса. Рентгеновская спектрометрия. Методы спектрометрии заряженных частиц (времяпролетная спектроскопия, VMIS, COLTRIMS). Колебательные и вращательные молекулярные волновые пакеты, возбуждаемые ультракороткими лазерными импульсами; полные и дробные возрождения волновых пакетов. Методы создания и зондирования выстроенных и ориентированных ансамблей молекул. Генерация и применения циркулярно-поляризованных рентгеновских импульсов.

### **Аттосекундная метрология.**

Измерение длительностей ультракоротких импульсов в фемтосекундной оптике. Аттосекундная стрик-камера. Измерение длительности одиночного аттосекундного импульса. Измерение профиля электрического поля лазерного импульса. Метод RABBITT. Измерение характеристик последовательности аттосекундных импульсов. Измерения *in situ*.

### **Измерения и контроль сверхбыстрых процессов с аттосекундным временным разрешением.**

Измерения сверхбыстрых процессов в веществе без использования аттосекундных импульсов. «Аттосекундные часы». Молекулярный динамический имиджинг. «Молекулярные часы». ГГВП-спектроскопия. Томография молекулярных орбиталей. Использование дифракции электронов на родительских ядрах молекул. Измерения сверхбыстрых процессов с использованием аттосекундных импульсов. Измерения задержки фотоэмиссии в твердотельных образцах и газах методами аттосекундной стрик-камеры и RABBITT. Измерение времени Оже-процесса. Аттосекундная абсорбционная спектроскопия.

## **4. Образовательные технологии**

Основными видами образовательных технологий дисциплины «Аттосекундная физика» являются занятия лекционного типа с применением технологий интерактивного обучения (презентаций), проблемный метод изложения материала, диалоговая форма проведения занятий и самостоятельная работа аспиранта.

## **5. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся**

Используются виды самостоятельной работы аспиранта: в читальном зале библиотеки, в компьютерных классах, с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Предусматривается также посещение аспирантами лекций и докладов ведущих специалистов по проблематике, относящейся к предмету курса. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется в ходе заслушивания докладов-презентаций и зачета по данной дисциплине. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, доступные ресурсы в Интернет по тематике курса, а также конспекты и презентации лекций.

## **6. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине**

### **6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), и уровня их сформированности**

Описание показателей и критериев оценивания компетенций приведены в приложении 1.

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

Для оценивания сформированности компетенций используется промежуточная аттестация в форме зачета. Зачет состоит из индивидуального собеседования и решения практических контрольных заданий. Критерии оценок выполнения задания:

Зачтено	В целом удовлетворительная подготовка, возможно с заметными, но не грубыми ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все теоретические вопросы собеседования, возможно с небольшими неточностями; допускаются негрубые ошибки при ответах на дополнительные вопросы. Полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей, возможно с не всегда полной обоснованностью выводов.
Не зачтено	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы как на теоретические вопросы, так и на наводящие и дополнительные вопросы преподавателя, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки.

## 6.3. Контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций.

**Вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:**

Для оценки сформированности профессиональных компетенций ПК-2, ПК-3:

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. Надпороговая ионизация атомов в полях длинных и коротких лазерных импульсов.
6. Полуклассическая модель перерасеяния Коркума и ее использование для анализа энергетических и угловых распределений электронов в ионизационных процессах.
7. Полуклассическая модель перерасеяния Коркума и ее использование для анализа спектральных и частотно-временных характеристик процесса генерации высоких гармоник в газах.
8. Квантовомеханическое описание процесса генерации высоких гармоник в газах. Приближение сильного поля. Теория Левенштейна.
9. Неадиабатическое выстраивание и ориентация молекул ультракороткими лазерными импульсами и методы их зондирования.
10. Особенности процессов ионизации и генерации высоких гармоник в молекулярных газах.
11. «Короткие» и «длинные» траектории электронов и их роль в процессе генерации высоких гармоник в газах. «Атточирп» и синхронизация высоких гармоник.
12. Зависимость эффективности генерации высоких гармоник в газах от интенсивности и длины волны лазерного излучения.
13. Влияние поляризации и магнитного поля лазерного излучения на эффективность генерации высоких гармоник в газах.
14. Генерация и применения циркулярно-поляризованных рентгеновских импульсов.
15. Методы реализации фазового синхронизма и квазисинхронизма при генерации высоких гармоник в газах.
16. Использование предельно коротких лазерных импульсов для получения одиночного аттосекундного импульса. Роль фазы заполнения относительно огибающей лазерного импульса.
17. Принцип «поляризационного затвора» для получения одиночного аттосекундного импульса.
18. Принцип пространственной селекции одиночного аттосекундного импульса с помощью «аттосекундного маяка».
19. Режимы и физические механизмы генерации высоких гармоник при взаимодействии высокоинтенсивного лазерного излучения с поверхностью плотной плазмы.

20. Принцип метода RABBITT и его использование для измерения характеристик цуга аттосекундных импульсов.
21. Принцип действия аттосекундной стрик-камеры и ее применения.
22. Использование процессов при перерассеянии электронов на родительских ионах для исследования сверхбыстрых процессов в молекулах.
23. Методы исследования сверхбыстрых процессов в веществе с использованием аттосекундных импульсов.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Н.Б. Делоне, В.П. Крайнов, Атом в сильном световом поле, М., Атомиздат, 1978, 288 с.; М., Энергоатомиздат, 1984, 224 с. – 3 экз.
2. П.Г. Крюков, Фемтосекундные импульсы. Введение в новую область лазерной физики, М., Физматлит, 2008, 208 с. – 3 экз.
3. О. Звелто, Принципы лазеров, СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 4 экз.

б) дополнительная литература:

1. Ханин Я.И. Основы динамики лазеров. М., 1999 – 2 экз.
2. Ильинский Ю.А., Келдыш Л.В. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. М., 1989. – 2 экз.
3. F. Krausz, M. Ivanov, Attosecond physics, Rev. Mod. Phys., v. 81, No. 1, pp. 163-234 (2009).
4. В.В. Стрелков, В.Т. Платоненко, А.Ф. Стержантов, М.Ю. Рябикин, Аттосекундные электромагнитные импульсы: генерация, измерение и применение. Генерация высоких гармоник интенсивного лазерного излучения для получения аттосекундных импульсов, УФН, т. 186, вып. 5, с. 449-470 (2016).

в) Интернет-ресурсы:

1. М.Ю. Емелин, М.Ю. Рябикин, Основы аттосекундной физики (электронное пособие), Учебн. пособие, Н. Новгород, ННГУ, 2014, 52 с. <http://www.unn.ru/pages/ranking/method/oaf.pdf>

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Специальные помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет";
- Лицензионное программное обеспечение (*Windows, Microsoft Office*);
- Обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются (при необходимости) электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, направленность 01.04.21 Лазерная физика.

Автор \_\_\_\_\_ М.Ю. Рябикин

Ответственный за направление подготовки \_\_\_\_\_ Вл.В. Кочаровский

Рецензент \_\_\_\_\_

Программа принята на заседании Ученого совета отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН, протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года.

Ученый секретарь ОНДиО \_\_\_\_\_ А.В. Коржиманов

**Карты компетенций, в формировании которых участвует дисциплина**

**ПК-2:** Способность проводить научные исследования и решать научно-исследовательские задачи, соответствующие направленности подготовки, используя специализированные знания в области физики и астрономии, современные методы исследований и информационные технологии, с учетом отечественного и зарубежного опыта

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания результатов обучения	
	Зачтено	Не зачтено
<u>Знания:</u> Знать основные методы получения и измерения световых импульсов субфемтосекундной длительности и их применения для зондирования и управления сверхбыстрыми процессами в веществе	Успешная демонстрация знаний по базовым разделам дисциплины	Отсутствие знаний или фрагментарные знания без положительного результата применения
<u>Умения:</u> Уметь применять полученные знания для исследования путей высокоэффективной генерации аттосекундных импульсов с управляемыми характеристиками и их использования для получения информации о динамике процессов в веществе с аттосекундным временным и субнанометровым пространственным разрешением	Успешная демонстрация умений по базовым разделам дисциплины	Отсутствие умений или фрагментарное присутствие умений без положительного результата
<u>Навыки:</u> Владеть приемами целеполагания, планирования, реализации необходимых видов деятельности, оценки и самооценки результатов деятельности по решению профессиональных задач; приемами выявления и осознания своих возможностей, личностных и профессионально-значимых качеств с целью их совершенствования	Успешная демонстрация навыков решения задач на базе полученных в ходе освоения дисциплины знаниях	Отсутствие навыков или фрагментарные навыки без положительного результата применения
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	50 – 100%	0 – 50 %

**ПК-3:** Способность свободно ориентироваться в разделах физики, необходимых для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (в соответствии с направленностью подготовки)

Индикаторы компетенций	Критерии оценивания результатов обучения	
	Зачтено	Не зачтено
<u>Знания:</u> Знать основные теоретические подходы и модели, используемые для описания генерации сверхкоротких электромагнитных импульсов и их взаимодействия с веществом и конденсированными средами	Успешная демонстрация знаний по базовым разделам дисциплины	Отсутствие знаний или фрагментарные знания без положительного результата применения
<u>Умения:</u> Уметь использовать полученные знания для изучения сверхбыстрых процессов в веществе, анализировать результаты использования простых моделей для описания взаимодействия сверхкоротких импульсов излучения с газовыми и конденсированными средами	Успешная демонстрация умений по базовым разделам дисциплины	Отсутствие умений или фрагментарное присутствие умений без положительного результата
<u>Навыки:</u> Владеть современными теоретическими и численными методами, используемыми в аттосекундной физике	Успешная демонстрация навыков решения задач на базе полученных в ходе освоения дисциплины знаниях	Отсутствие навыков или фрагментарные навыки без положительного результата применения
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	50 – 100%	0 – 50 %