

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

**УТВЕРЖДЕНО**

решением ученого совета ННГУ  
протокол от "16" января 2024 г. №1

**Рабочая программа дисциплины  
Аттосекундная физика**

Уровень высшего образования  
**Подготовка научных и научно-педагогических кадров**

Программа аспирантуры  
**Лазерная физика**

Научная специальность  
**1.3.19 Лазерная физика**

Форма обучения  
**Очная**

Нижний Новгород  
2024 год

### 1. Место и цель дисциплины в структуре ПА

Дисциплина «Аттосекундная физика» относится к числу элективных дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 2 году обучения в 4 семестре.

**Цель дисциплины** – ознакомление с методами генерации аттосекундных световых импульсов, методами исследования сверхбыстрых процессов в веществе.

### 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Выпускник, освоивший программу, должен

**знать:**

- основные принципы получения, измерения и применения аттосекундных световых импульсов;
- современное состояние исследований в области аттосекундной физики;

**уметь:**

- определять наиболее актуальные направления исследований взаимодействия ультракоротких световых импульсов с веществом;

**владеть:**

- современными теоретическими методами исследования сверхбыстрых процессов в веществе.

### 3. Структура и содержание дисциплины.

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего - 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа), 36 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

**Таблица 2**

**Структура дисциплины**

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					
		Контактная работа, часов					Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского	Занятия лабораторного	Консультации	Всего	
1. Введение	8	4				4	4
2. Ионизационные процессы в газах в интенсивном лазерном поле	8	4				4	4
3. Генерация высоких гармоник лазерного излучения в газах	8	4				4	4
4. Факторы, определяющие свойства высоких гармоник лазерного излучения, генерируемых в газах	12	6				6	6
5. Генерация аттосекундных импульсов в газах	8	4				4	4

6. Другие методы получения аттосекундных импульсов	8	4				4	4
7. Методы измерения аттосекундных импульсов	8	4				4	4
8. Измерения сверхбыстрых процессов в веществе с аттосекундным временным разрешением	12	6				6	6
<b>Промежуточная аттестация</b>	зачет						
<b>Итого</b>	<b>72</b>	<b>36</b>				<b>36</b>	<b>36</b>

**Таблица 3**

**Содержание дисциплины**

<b>№ п/п</b>	<b>Наименование раздела дисциплины</b>	<b>Содержание раздела</b>	<b>Форма проведения занятия</b>	<b>Форма текущего контроля</b>
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.	лекции	-
2.	Ионизационные процессы в газах в интенсивном лазерном поле	Многофотонная ионизация. Теория Келдыша. Туннельная и надбарьерная ионизация. Надпороговая ионизация. Многократная ионизация. Экспериментальные методы исследования ионизационных процессов.	лекции	-
3.	Генерация высоких гармоник 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.	лекции	-
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.	лекции	-

		Недипольные эффекты в ГГВП.		
5.	Генерация аттосекундных импульсов 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»).	лекции	-
6.	Другие методы получения аттосекундных импульсов	ГГВП в плазменном факеле при абляции твердотельной мишени. ГГВП при релятивистских взаимодействиях высокоинтенсивного лазерного излучения с поверхностью плотной плазмы. Методы, не использующие ГГВП.	лекции	-
7.	Методы измерения 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.	лекции	-
8.	Измерения сверхбыстрых процессов в веществе 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.	лекции	-

#### 4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает следующие виды:

- разбор лекционного материала,
- изучение дополнительных разделов дисциплины с использованием учебной литературы.

Итоговый контроль качества усвоения аспирантами содержания дисциплины проводится в виде зачета. Зачет проводится в устной форме и заключается в ответе аспирантом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые аспирант должен дать краткий ответ.

#### 5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине

### **5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине.**

При выполнении всех работ учитываются следующие **основные критерии**:

- уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы, заданные членами комиссии);
- умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;
- качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая сжатости);
- способность устанавливать внутри- и межпредметные связи,
- оригинальность мышления, знакомство с дополнительной литературой и другие факторы.

#### **Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме зачета**

<b>Оценка</b>	<b>Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой</b>
<b>Зачтено</b>	владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить проблемные ситуации в организации научных исследований, способность критически анализировать и сравнивать существующие подходы и методы к оценке результативности научной деятельности, свободное владение источниками, умение четко и ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.
<b>Не зачтено</b>	непонимание смысла ключевых проблем, недостаточное владение науковедческой терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации, неспособность анализировать и сравнивать существующие концепции, подходы и методы, неумение ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.

### **5.2. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине**

#### 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 перерасеянии электронов на родительских ионах для исследования сверхбыстрых процессов в молекулах.
20. Методы исследования сверхбыстрых процессов в веществе с использованием аттосекундных импульсов.

## **6. 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.

### **в) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы**

1. <http://www.unn.ru/pages/ranking/method/oaf.pdf>
2. Проект «Международный центр исследований экстремальных световых полей (ЦИЭС)» <http://www.xcels.iapras.ru/>

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ;
  - материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование;
  - лицензионное программное обеспечение: *Windows, Microsoft Office*;
  - обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.
- ресурсам.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122), Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Авторы:

Автор: М.Ю. Рябикин

Рецензент: С.Б. Бодров

Заведующий кафедрой: М.И. Бакунов

**Программа одобрена** на заседании методической комиссии от 18 декабря 2023 года, протокол № 09/23.