


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова  
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова  
в городе Сарове

«УТВЕРЖДАЮ»



\_\_\_\_\_  
Директор филиала МГУ в г.Сарове  
Член-корреспондент РАН В.В. Воеводин

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

### Наименование дисциплины:

Атгосекундная физика

---

### Уровень высшего образования:

Магистратура

---

### Направление подготовки:

03.04.02 Физика

---

### Направленность (профиль) ОПОП:

Экстремальные электромагнитные поля, релятивистская плазма  
и атгосекундная физика

---

Квалификация «Магистр»

Форма обучения: Очная

---

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика в редакции приказа по МГУ от 30 декабря 2020 г. №1366.

**Авторы–составители:**

к.ф.-м.н., Доцент физического факультета МГУ Ф.В.Потемкин

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины**

### **«Аттосекундная физика»**

В курсе изучаются методы получения и измерения лазерных импульсов аттосекундной длительности и их применение для зондирования и управления сверхбыстрыми процессами в веществе.

---

Подробно рассматриваются микроскопические и макроскопические аспекты явления генерации высоких гармоник при взаимодействии интенсивного фемтосекундного лазерного излучения с газами, методы его описания, вопросы синхронизации генерируемых гармоник для получения цугов аттосекундных импульсов, методы получения одиночных аттосекундных импульсов и другие важные вопросы аттосекундной физики.

### **Разделы рабочей программы**

- 1.** Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
- 2.** Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
- 3.** Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
- 4.** Форма обучения.
- 5.** Язык обучения.
- 6.** Содержание дисциплины.
- 7.** Объем дисциплины
- 8.** Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
- 9.** Текущий контроль и промежуточная аттестация.
- 10.** Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
- 11.** Шкала оценивания.
- 12.** Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
- 13.** Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
- 14.** Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Аттосекундная физика» реализуется на 2-ом курсе в 3-ем семестре и относится к обязательной части программы обучения.

В результате освоения дисциплины «Аттосекундная физика» обучающийся кроме знаний предмета получает навыки применения ранее полученных знаний для решения новых научных и практических задач.

## 2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Освоение дисциплин «Электромагнетизм», «Электродинамика», «Оптика», «Математический анализ», «Квантовая механика», «Дифференциальные уравнения», «Теория колебаний», «Теория волн».

## 3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
<ul style="list-style-type: none"><li>Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1).</li></ul>	<p><b>ЗНАТЬ</b> основные законы и направления современных научных исследований в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p> <p><b>УМЕТЬ</b> на основе фундаментальных знаний в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики, определять возможные направления научных исследований.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ</b> необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p>
<ul style="list-style-type: none"><li>Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2).</li></ul>	<p><b>ЗНАТЬ</b> базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном научном оборудовании в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p> <p><b>УМЕТЬ</b> используя знания в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики проводить научные исследования.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ</b> навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.</p>
<ul style="list-style-type: none"><li>Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области экстремальных</li></ul>	<p><b>ЗНАТЬ</b> основные направления инновационного развития в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p> <p><b>УМЕТЬ</b> проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и</p>

<p>электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики (СПК-3).</p>	<p>аттосекундной физики для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.  <b>ВЛАДЕТЬ</b>  методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p>
--	--

4. **Форма обучения:** очная

5. **Язык обучения:** русский

6. **Содержание дисциплины:**

**Тема 1. Ионизация атомов и молекул в сверхсильном световом поле.**

Теория полевой ионизации Келдыша. Многофотонный и туннельный пределы. Формула Аммосова-Делоне-Крайнова. Формула Переломов-Попов-Терентьев. Надбарьерная ионизация. Ионизация молекул лазерным полем. Надпороговая ионизация атомов. Генерация «горячих» электронов при надпороговой ионизации атомов. Многократная ионизация. Трехступенчатая модель Коркума. Описание особенностей процессов ионизации с помощью модели Коркума. Эксперименты, подтверждающие модель Коркума.

**Тема 2. 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.

**Тема 3. Генерация цуга и изолированных 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.

**Тема 4. Экспериментальные методы 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.

**Тема 5. 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. Метод FROG-CRAB. Измерение характеристик последовательности аттосекундных импульсов. Измерения *in situ*.

**Тема 6. Исследование 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. Динамический эффект Франца-Келдыша. Измерение времени Оже-процесса. Аттосекундная абсорбционная спектроскопия.

## 7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемко в зачетных	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоем	в том числе			Самост оательн ая
			ауд. занятий			
			О б щ ая	Ле к ц и и	Се м и н а р ы	
Аттосекундная физика	2	72	34	17	17	38

## 8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Аттосекундная физика» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса, обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются на семинарских занятиях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

		Всего часов	Лекции	Научно-практические	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Ионизация атомов и молекул в сверхсильном световом поле	12	3		3	4	Собеседование, опрос
2	Генерация высоких гармоник лазерного излучения	12	3	-	3	6	
3	Генерация цуга и изолированных аттосекундных импульсов	12	3	-	3	6	
4	Экспериментальные методы аттосекундной физики	12	3		3	6	
5	Аттосекундная метрология	12	3	-	3	6	
6	Исследование сверхбыстрых процессов с аттосекундным временным разрешением	12	2	-	2	6	
	Промежуточная аттестация	4				4	экзамен в устной форме
<b>ИТОГО:</b>		<b>72</b>	<b>17</b>	<b>-</b>	<b>17</b>	<b>38</b>	

### 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Аттосекундная физика» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности слушателей, качества ответов на вопросы лектора, аргументированности позиции студента, оценивается широта используемых им теоретических знаний. В семестре в конце некоторых лекций проводятся несколько коротких контрольных работ (10 – 15 минут).

Промежуточная аттестация по дисциплине «Аттосекундная физика» проводится в форме зачета. Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

### 10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

**Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
<b>Оценочные средства текущего контроля</b>		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как короткий письменный ответ на поставленный вопрос по тематике предыдущей или текущей лекции, рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
<b>Оценочные средства промежуточной аттестации</b>		
Короткая письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к зачету

## 11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: методы анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области лазерной физики и нелинейной	Отсутствие знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области лазерной физики и нелинейной оптики	В целом успешные, но не систематические знания методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и	Успешные и систематические знания методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области лазерной



оптикиОПК-3.Б 3-6		области лазерной физики и нелинейной оптики	практических задач в области лазерной физики и нелинейной оптики	физики и нелинейной оптики
УМЕТЬ: организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области экспериментальной лазерной физики и нелинейной оптики, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования ОПК-3.Б У-6	Отсутствие умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области экспериментальной лазерной физики и нелинейной оптики, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования	В целом успешное, но не систематическое умение организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области экспериментальной лазерной физики и нелинейной оптики, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы проявления умений организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области экспериментальной лазерной физики и нелинейной оптики, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования	Успешное и систематическое умение организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области экспериментальной лазерной физики и нелинейной оптики, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования
ВЛАДЕТЬ: навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области экспериментальной лазерной	Отсутствие/фрагментарное владение навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области экспериментальной лазерной физики и нелинейной оптики	В целом успешное, но не систематическое владение навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении	Успешное и систематическое владение навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных задач в области

физики и нелинейной оптики ОПК-3.Б В-6		исследовательских задач в области экспериментальной лазерной физики и нелинейной оптики	конкретных исследовательских задач в области экспериментальной лазерной физики и нелинейной оптики	экспериментальной лазерной физики и нелинейной оптики
---	--	---	--	---

## 12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

*Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:*

*Пример:*

1. Что такое атточирп?
2. Сформулируйте условия генерации изолированного аттосекундного импульса, последовательности аттосекундных импульсов?
3. Поясните на конкретных примерах разницу между методом RABBIT и FROG-CRAB для характеристики аттосекундного импульса?
4. Поясните разницу в механизмах генерации аттосекундных импульсов в циркулярно и линейно поляризованных лазерных полях.
5. Перечислите методы аттосекундной физики, позволяющие исследовать динамику ионизации в газах?
6. Что такое временная задержка в фотоэмиссионных процессах перерасеяния электронов и каких образом можно её измерить с использованием изолированных аттосекундных импульсов?

## 13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

*Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме зачета:*

1. Характерные временные и энергетические масштабы различных процессов в микромире.
2. Основные условия, необходимые для получения аттосекундных импульсов.
3. Способы генерации импульсов когерентного рентгеновского излучения и их применения.
4. Формула Келдыша для скорости ионизации в переменном лазерном поле и ее предельные случаи.
5. Надбарьерная ионизация атомов в полях длинных и коротких лазерных импульсов.
6. Полуклассическая модель Коркума для анализа энергетических и угловых распределений электронов в ионизационных процессах.
7. Полуклассическая модель Коркума для анализа спектральных и частотно-временных характеристик процесса генерации высоких гармоник в газах.
8. Квантовомеханическое описание процесса генерации высоких гармоник в газах. Приближение сильного светового поля.
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. Квантовые траектории электронов («короткие» и «длинные») 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 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 сверхкоротких 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 перерасеянии электронов на родительских ионах для исследования сверхбыстрых процессов в молекулах.
23. Способы изучения сверхбыстрых процессов в газах и твердотельных средах с использованием аттосекундных импульсов.

#### **14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы**

##### 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.

##### Дополнительная литература.

- Ильинский Ю.А., Келдыш Л.В. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. М., 1989. – 2 экз.
- F. Krausz, M. Ivanov, Attosecond physics, Rev. Mod. Phys., v. 81, No. 1, pp. 163-234 (2009).
- Lukas Gallmann, Claudio Cirelli, and Ursula Keller, “Attosecond Science: Recent Highlights and Future Trends”, Annu. Rev. Phys. Chem. 2012. 63:447–69
- 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).
- Ханин Я.И. Основы динамики лазеров. М., 1999 – 2 экз.

##### Интернет-ресурсы.

- отсутствуют

## Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Для лекционной части курса требуются аудитория, оборудованная мультимедийным проектором, управляющим компьютером, экраном и обычной учебной доской.