

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:**

Теоретические и численные модели в физике взаимодействия лазерного излучения с плазмой

---

### **Уровень высшего образования:**

Магистратура

---

### **Направление подготовки:**

03.04.02 Физика

---

### **Направленность (профиль) ОПОП:**

Экстремальные электромагнитные поля, релятивистская плазма  
и аттосекундная 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:**

д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ФИАН А. В. Брантов

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины**

«Теоретические и численные модели в физике взаимодействия лазерного излучения с плазмой»

В курсе изучаются теоретические модели и численные методы, описывающие физические процессы и явления, происходящие при воздействии мощных лазерных импульсов на плазму.

---

Проведена классификация особенностей взаимодействия мощных лазерных импульсов с докритической и твердотельной плазмой. Описаны режимы распространения лазерного импульса в газовой плазме с учетом возникающих неустойчивостей и модели поглощения лазерного излучения как в газовой, так и в твердотельной плазме. Изложены физические основы лазерных методов ускорения заряженных частиц и генерации вторичного излучения в различных диапазонах частот (от терагерцового до гамма-излучения).

Дано сравнение гидродинамического и кинетического подходов к описанию плазменных явлений и рассмотрены основные принципы и алгоритмы численных кодов на их основе. Даны примеры численного моделирования лазерно-плазменного взаимодействия.

### **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 «Теоретические и численные модели в физике взаимодействия лазерного излучения с плазмой» реализуется на 2-ом курсе в 3-ем семестре и относится к вариативной части программы обучения.

В результате освоения дисциплины «Теоретические и численные модели в физике взаимодействия лазерного излучения с плазмой» 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</li></ul>	<p><b>ЗНАТЬ</b> основные направления инновационного развития в области экстремальных</p>

направления внедрения научных результатов в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики (СПК-3).	электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики. <b>УМЕТЬ</b> проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и 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.
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

4. **Форма обучения:** очная

5. **Язык обучения:** русский

6. **Содержание дисциплины:**

*Тема 1. Взаимодействие лазерного излучения с отдельной заряженной частицей и атомом*  
Введение. Предмет и содержание курса. Движение релятивистского электрона в электрическом и магнитном полях. Прямое ускорения электронов лазерным импульсом. Пондеромоторная сила. Торможение излучением. Томсоновское и комптоновское рассеяние света. Модели ионизации вещества. Многофотонная и туннельная ионизация.

*Тема 2. Распространение лазерного излучения в плазме докритической плотности*  
Возбуждение плазменных волн. Релятивистская плазменная волна. Релятивистская самофокусировка. Кавитация электронов. Самозахват и филаментация лазерного света. Параметрические неустойчивости. Вынужденное комбинационное рассеяние, вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна и двухплазмонный распад. Ионно-звуковая неустойчивость обратного тока. Турбулентность и модели аномального поглощения света.

*Тема 3. Взаимодействие лазерного излучения с твердыми мишенями*  
Модели поглощения света. Обратнотормозное поглощение. Нагрев и теплопроводность. Нормальный и аномальный скин-эффект. Резонансное поглощение. Вакуумный нагрев. Генерация горячих электронов. Высшие гармоники. Релятивистская прозрачность. Генерация магнитных полей. Тормозное и линейчатое излучение.

*Тема 4. Модели лазерного ускорения заряженных частиц и генерации вторичного излучения*  
Схема ускорения электронов полем кильватерной волны. Стохастический нагрев/ускорение. Модели лазерного ускорения ионов полем разделения заряда. Изотермический и адиабатический разлет плазмы в вакуум. Пондеромоторное ускорение - световой парус. Кулоновский взрыв. Рентгеновское и гамма излучение. Бетатронное и синхротронное излучение. Обратное комптоновское рассеяние. Переходное излучение. Генерация терагерцового излучения. Возбуждение поверхностных волн.

*Тема 5. Численное моделирование взаимодействия лазерного излучения с веществом*  
Гидродинамическое и кинетическое описание плазмы. Двухтемпературная гидродинамика. Уравнение Фоккера-Планка. Кинетические коды. Включение кинетических эффектов в гидродинамические коды. Модели теплопереноса.

*Тема 6. Моделирование плазмы методом "частица-в-ячейке"*  
Основные алгоритмы метода. Конечно-разностная схема решения уравнений Максвелла на сетке. Численная реализация движения частиц. Схема Бориса. Возможность параллельных

вычислений. Примеры численных расчетов воздействия коротких мощных лазерных импульсов на различные мишени.

## 7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах					Самостоятельная работа студентов
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Семинаров	
			Лекций	Семинаров	Самостоятельная работа		
Теоретические и численные модели в физике взаимодействия лазерного излучения с плазмой	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 «Теоретические и численные модели в физике взаимодействия лазерного излучения с плазмой» 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 занятия	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Взаимодействие лазерного излучения с отдельной заряженной частицей и атомом	8	2		2	4	Собеседование, опрос
2	Распространение лазерного излучения в плазме докритической плотности	12	3	-	3	6	
3	Взаимодействие лазерного излучения с твердотельными мишенями	8	2	-	2	4	
4	Модели лазерного ускорения заряженных частиц и генерации вторичного излучения	20	5		5	10	
5	Численное моделирование взаимодействия лазерного излучения с веществом	12	3		3	6	
6	Моделирование плазмы методом "частица-в-ячейке"	8	2		2	6	
	Промежуточная аттестация	4				4	зачет 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 «Теоретические и численные модели в физике взаимодействия лазерного излучения с плазмой» 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 «Теоретические и численные модели в физике взаимодействия лазерного излучения с плазмой» 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
<b>ЗНАТЬ:</b> Основные модели описания лазер-плазменного взаимодействия ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний основных моделей описания лазер-плазменного взаимодействия	В целом успешные, но не систематические знания основных моделей описания лазер-плазменного взаимодействия	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания основных моделей описания лазер-плазменного взаимодействия	Успешные и систематические знания основных моделей описания лазер-плазменного взаимодействия
<b>УМЕТЬ:</b>	Отсутствие умения	В целом	В целом	Успешное и

Правильно применять модели для описания физических ситуаций  ОПК-3.Б У-6	правильно применять модели для описания физических ситуаций	успешное, но не систематическое умение правильно применять модели для описания физических ситуаций	успешное, но содержащее отдельные пробелы умение правильно применять модели для описания физических ситуаций	систематическое умение правильно применять модели для описания физических ситуаций.
ВЛАДЕТЬ: методами моделирования лазерно-плазменных процессов  ОПК-3.Б В-6	Отсутствие/фрагментарное владение методами моделирования лазерно-плазменных процессов	В целом успешное, но не систематическое владение методами моделирования лазерно-плазменных процессов	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение методами моделирования лазерно-плазменных процессов	Успешное и систематическое владение методами моделирования лазерно-плазменных процессов

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

### *Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:*

#### *Пример:*

1. Вывод коэффициента обратно-тормозного поглощения лазерного излучения.
2. Нормальный и аномальный скин-эффект. Зависимость глубины скин-слоя от частоты лазерного импульса.
3. Вывод ponderomotive силы.
4. Максимальная энергия частицы при кулоновском взрыве сферического кластера.
5. Умножение и понижение частоты при падении излучения на релятивистски движущееся зеркало.

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

### *Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме зачета:*

1. Движение электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях. Траектория движения. Характерная скорость дрейфа.
2. Прямое ускорение электронов лазерным импульсом. Теорема Лоусона-Вудворда. Способы нарушения адиабатичности.
3. Томсоновское и комптоновское рассеяние. Нелинейное комптоновское рассеяние.
4. Туннельная ионизация атомов полем. Необходимые интенсивности лазерного излучения. Характерные времена ионизации.

5. Возбуждение плазменных волн ультра-коротким лазерным импульсом, распространяющемся в газовой плазме. Условие эффективного возбуждения плазменных волн.
6. Нелинейная плазменная волна. Трехмерная структура волны. Критерий опрокидывания плазменной волны.
7. ВКР неустойчивость и ее влияние на распространение коротких мощных лазерных импульсов в газовой плазме.
8. Критерий и характерная область возникновения ВРМБ неустойчивости. Характерное время нарастания неустойчивости.
9. Критерий и характерная область возникновения неустойчивости двухплазмонного распада. Абсолютная и конвективная неустойчивость.
10. Релятивистская самофокусировка гауссова лазерного импульса. Критическая мощность.
11. Критерий возникновения ионно-звуковой неустойчивости обратного тока.
12. Модель аномального поглощения света в плазменной короне на флуктуациях плотности, связанных с развитием звуковой турбулентности.
13. Модель обратнотормозного поглощения света и ее реализация в гидродинамическом коде.
14. Высокочастотный, нормальный и аномальный скин-эффект. Изменение размеров скин-слоя в зависимости от частоты падающего излучения.
15. Понятие релятивистской прозрачности. Критерий прохождения света через ультратонкие фольги (толщиной много меньше длины волны).
16. Вакуумный нагрев электронов при нормальном падении релятивистского лазерного импульса на твердотельную мишень. Нагрев электронов, связанный с эффектом Брюнеля.
17. Модель резонансного поглощения. Вынос тепла от области нагрева. Уравнение теплопроводности и модельные решения для тепловой волны.
18. Механизмы генерации магнитных полей при облучении разлетающейся твердотельной плазмы. Генерация магнитного поля в скрещенных градиентах плотности и температуры .
19. Ускорение электронов полем кильватерной волны, создаваемой коротким лазерным импульсом. Максимальная энергия электронов, длина дефокусировки и истощения. Способы инжекции электронов в ускоряющее поле.
20. Ускорение ионов полем разделения заряда, созданным в результате нагрева электронов мощным лазерным импульсом. Модели изотермического и адиабатического разлета плазмы в вакуум.
21. Кулоновский взрыв как механизм ускорения ионов. Условия реализации кулоновского взрыва. Максимальная энергия ионов.
22. Пондеромоторное ускорение ионов в режиме светового паруса.
23. Спектры рентгеновского излучения лазерной плазмы. Характеристическое излучение и тормозное излучение.
24. Бетатронное излучение электронов в плазменном канале.
25. Источник рентгеновского и гамма излучения, основанный на обратном комптоновском эффекте.
26. Переходное излучение при вылете лазерно-ускоренного электрона из плазмы в вакуум.
27. Закон дисперсии и затухание поверхностных волн, распространяющихся вдоль границы плазма-вакуум.
28. Гидродинамическое описание плазмы. Основные уравнения двухтемпературной гидродинамики.
29. Модели теплопроводности и их реализация в гидродинамических кодах.
30. Уравнение Фоккера-Планка. Численные методы решения кинетического уравнения. Способы включения кинетических эффектов в гидродинамические коды.
31. Численная реализация метода "частица-в-ячейке". Схема решения кинетического уравнения методом частиц (схема Бориса).

32. Конечно-разностная схема решения уравнений Максвелла на сетке. Численный закон дисперсии.

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

Основная литература.

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Теория поля, М. 1988
2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Электродинамика сплошных сред, М. 1982
3. А.Ф. Александров, Л. С. Богданкевич, А.А.Рухадзе, Основы электродинамики плазмы, М. 1978.
4. P. Gibbon, Short laser pulse interaction with matter. An introduction. 2005.
5. Ч. Бэдсел, А. Ленгдон, Физика плазмы и численное моделирование, М. 1989.

Дополнительная литература.

1. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер, Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений М., 1966.
2. В. Л. Гинзбург, В. Н. Цытович, Переходное излучение и переходное рассеяние. Некоторые вопросы теории, М., 1984.
3. В. Л. Гинзбург, Распространение электромагнитных волн в плазме, М., 1961
4. Ю.А. Березин, В. А.Вшивков, Метод частиц в динамике разреженной плазмы. Новосибирск, 1980.
5. W. Krueer, The Physics of Laser Plasma Interactions, 2003.

Интернет-ресурсы.

- [https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_39096](https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_39096)

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.