

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:**

Лазерно-плазменное ускорение частиц

---

**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., Главный научный сотрудник ОИВТ РАН Н.Е.Андреев

## Аннотация к рабочей программе дисциплины

### «Лазерно-плазменное ускорение частиц»

В курсе изучаются физические процессы и явления, лежащие в основе ускорения частиц в плазме с помощью интенсивных лазерных импульсов.

---

Проведена классификация моделей, используемых для описания электродинамических свойств плазмы и распространения в ней электромагнитного излучения. Описаны механизмы возбуждения в плазме ускоряющих полей интенсивными лазерными импульсами.

Изложены физические основы ускорения электронов, позитронов и ионов в плазме, принципы создания лазерно-плазменных ускорителей заряженных частиц, основы теории нелинейной электродинамики плазмы в релятивистски-интенсивных лазерных полях. Рассмотрены различные схемы инжекции электронов в ускоряющие плазменные поля и пути оптимизации параметров лазерного излучения и плазменных мишеней для получения пучков ускоренных частиц с заданными характеристиками.

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Лазерно-плазменное ускорение частиц» реализуется на 2-ом курсе в 3-ем семестре и относится к вариативной части программы обучения.

В результате освоения дисциплины «Лазерно-плазменное ускорение частиц» 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:

<b>Формируемые компетенции (код компетенции)</b>	<b>Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)</b>
<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. Основные уравнения линейной электродинамики плазмы*

Введение. Из истории электродинамики. Предмет и содержание курса. Генерация и чирпированное усиление фемтосекундных лазерных импульсов. Уравнения Максвелла, диэлектрическая проницаемость линейной среды с пространственной и временной дисперсией. Дисперсионное уравнение в изотропной среде, продольные и поперечные волны, групповая и фазовая скорости волны. Плотность энергии электромагнитного поля и закон ее изменения.

*Тема 2. Модели плазмы*

Методы построения замкнутой системы уравнений электро-плазмо-динамики, базирующиеся на уравнениях Максвелла и динамики плазмы. Модели линейного и нелинейного отклика плазмы для определения высокочастотного тока под действием электромагнитного поля на основе одночастичной модели холодной плазмы, гидродинамической модели многокомпонентной плазмы и кинетической модели на базе уравнений Власова.

*Тема 3. Генерация лазерным импульсом ускоряющих плазменных полей*

Методы решения уравнений Максвелла для медленно меняющихся в пространстве и во времени комплексных амплитуд электромагнитного поля и процессы самофокусировки и вынужденного рассеяния излучения в плазме (релятивистская и пондеромоторная нелинейности). Резонансное возбуждение ультракороткими релятивистски-интенсивными лазерными импульсами кильватерных волн электронной плотности, режимы самомодуляции лазерного импульса.

*Тема 4. Ускорение заряженных частиц в плазме*

Лазерно-плазменные методы ускорения электронов, позитронов и ионов. Ускорение в кильватерных плазменных полях, в полях разделения заряда, прямое лазерное ускорение и стохастическое ускорение. Принципы создания лазерно-плазменного электрон-позитронного коллайдера для физики высоких энергий. Сильноточные пучки ультрарелятивистских электронов для создания ярких источников интенсивного рентгеновского и гамма излучения. Различные схемы инъекции электронов в ускоряющие плазменные поля и пути оптимизации параметров лазерного излучения и плазменных мишеней для получения пучков ускоренных частиц с заданными характеристиками.

**7. Объем дисциплины**

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах					Самостоятельная работа студентов
		Общая трудоемко сть	в том числе				
			ауд. занятий				
		Общая трудоемко сть	Общая ауд. нагрузка	Итоговая нагрузка	Лекций	Семинаров	
Лазерно-плазменное ускорение частиц	2	72	36		18	18	36

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

Изучение курса «Лазерно-плазменное ускорение частиц» 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. По вопросам, вызывающим затруднения (по темам, рассматриваемым на лекциях и изучаемым самостоятельно), 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	Основные уравнения линейной электродинамики плазмы	12	3		3	6	Собеседование, опрос
2	Модели плазмы	16	4	-	4	8	
3	Генерация лазерным импульсом ускоряющих плазменных полей	18	5	-	5	7	
4	Ускорение заряженных частиц в плазме	22	6		6	11	

	Промежуточная аттестация	4				4	зачет в устной форме
<b>ИТОГО:</b>		<b>72</b>	<b>18</b>	<b>-</b>	<b>18</b>	<b>36</b>	

### 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Лазерно-плазменное ускорение частиц» 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 «Лазерно-плазменное ускорение частиц» 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

Оценочные средства промежуточной аттестации		
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> физические основы лазерного ускорения частиц в плазме ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний о физических основах лазерного ускорения частиц в плазме	В целом успешные, но не систематические знания физических основ лазерного ускорения частиц в плазме	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания физических основ лазерного ускорения частиц в плазме	Успешные и систематические знания физических основ лазерного ускорения частиц в плазме
<b>УМЕТЬ:</b> исследовать механизмы лазерного ускорения частиц в плазме ОПК-3.Б У-6	Отсутствие умения исследовать механизмы лазерного ускорения частиц в плазме	В целом успешное, но не систематическое умение исследовать механизмы лазерного ускорения частиц в плазме	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение исследовать механизмы лазерного ускорения частиц в плазме	Успешное и систематическое умение исследовать механизмы лазерного ускорения частиц в плазме
<b>ВЛАДЕТЬ:</b> методами описания и расчета лазерного ускорения частиц в плазме ОПК-3.Б В-6	Отсутствие/фрагментарное владение методами описания и расчета лазерного ускорения частиц в плазме	В целом успешное, но не систематическое владение методами описания и расчета лазерного ускорения частиц в плазме	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение методами описания и расчета лазерного ускорения частиц в плазме	Успешное и систематическое владение методами описания и расчета лазерного ускорения частиц в плазме

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

*Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:*

*Пример:*

1. Уравнения Максвелла, диэлектрическая проницаемость.



2. Плотность энергии электромагнитного поля и закон ее изменения.
3. Кинетическая модель бесстолкновительной плазмы.
4. Процессы самофокусировки и вынужденного рассеяния излучения в плазме.
5. Лазерно-плазменные методы ускорения электронов и позитронов в кильватерных полях.

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

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

1. Физические основы генерации и chirпированного усиления фемтосекундных лазерных импульсов.
2. Уравнения Максвелла, диэлектрическая проницаемость линейной среды с пространственной и временной дисперсией (общие соотношения, условия квазистационарности и однородности).
3. Дисперсионное уравнение в изотропной среде, продольные и поперечные волны, групповая и фазовая скорости волн.
4. Плотность энергии электромагнитного поля и закон ее изменения в поглощающей среде с дисперсией.
5. Методы построения замкнутой системы уравнений электро-плазмо-динамики, базирующиеся на уравнениях Максвелла и динамики плазмы; одночастичная модель холодной плазмы.
6. Определение высокочастотного тока под действием электромагнитного поля на основе гидродинамической модели многокомпонентной плазмы.
7. Кинетическая модель бесстолкновительной плазмы (уравнения Власова); законы дисперсии электромагнитных, ленгмюровских и ионно-звуковых волн.
8. Методы решения уравнений Максвелла для медленно меняющихся в пространстве и во времени комплексных амплитуд электромагнитного поля.
9. Процессы самофокусировки и вынужденного рассеяния излучения в плазме (релятивистская и пондеромоторная нелинейности).
10. Резонансное возбуждение ультракороткими релятивистски-интенсивными лазерными импульсами кильватерных волн электронной плотности.
11. Режимы самомодуляции лазерного импульса: генерация кильватерных полей при самомодуляционной неустойчивости.
12. Канализованное распространение лазерного импульса в направляющих структурах (плазменных каналах и капиллярах).
13. Лазерно-плазменные методы ускорения электронов и позитронов в кильватерных полях (умеренно нелинейный режим, длина дефазировки, максимальный прирост энергии пучка).
14. Различные схемы инъекции электронов в ускоряющие кильватерные плазменные поля: захват и ускорение квазимоноэнергетических коротких сгустков электронов.
15. Принципы создания лазерно-плазменного электрон-позитронного коллайдера для физики высоких энергий.
16. Сильно нелинейный "бабл"-режим ускорения электронов фемтосекундными лазерными импульсами ультрарелятивистской интенсивности.
17. Взаимодействие релятивистски-интенсивных субпикосекундных лазерных импульсов с плазмой околоритической плотности электронов.
18. Прямое лазерное ускорение электронов в релятивистских плазменных каналах в плазме околоритической плотности.
19. Сильноточные пучки ультрарелятивистских электронов для создания ярких источников интенсивного рентгеновского и гамма излучения.
20. Механизмы ускорения ионов при воздействии интенсивных лазерных импульсов на твердотельные мишени различной толщины.

21. Лазерное ускорение ионов с использованием структурированных мишеней.

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

Основная литература.

1. Силин В.П., Рухадзе А.А. Электромагнитные свойства плазмы и плазмоподобных сред. М.: Атомиздат, 1961. (Издательство: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2013г. 248 с.)
2. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1960. 552 с. (Издательство: ЛЕНАНД, 2015г. 688 с.)
3. E. Esarey, C.B. Schroeder, W.P. Leemans, Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators. Reviews of Modern Physics 81 (2009) 1229-1285.
4. H. Daido, M. Nishiuchi, A.S. Pirozhkov. Review of laser-driven ion sources and their applications. Reports on Progress in Physics. 75 (2012) 056401. doi:10.1088/0034-4885/75/5/056401

Дополнительная литература.

1. А.Ф.Александров, Л.С.Богданкевич, А.А.Рухадзе "Основы электродинамики плазмы" 2-е издание 1988.
2. Горбунов Л.М., Кирсанов В.И. Возбуждение плазменных волн электромагнитными импульсами. Труды ФИАН. т.219. Нелинейная теория взаимодействия сильных электромагнитных волн с плазмой. М.: Наука, 1992.
3. Pukhov A. Strong field interaction of laser radiation. Rep. Prog. Phys. 66 (2003) 47–101.
4. E. Esarey, P. Sprangle, J. Krall, A. Ting. Overview of Plasma-Based Accelerator Concepts. IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 24, NO. 2, 1996 pp. 252-288.
5. Андреев Н.Е., Горбунов Л.М. Лазерно-плазменное ускорение электронов. УФН 169 (1) 53 - 84 (1999).
6. И.Ю. Костюков, А.М. Пухов. Плазменные методы ускорения электронов: современное состояние и перспективы. УФН, том 185 (1), 89–96 (2015).
7. T. Tajima, K. Nakajima, G. Mourou. Laser acceleration. RIVISTA DEL NUOVO CIMENTO Vol. 40, N. 2 (2017).

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.