

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:

Диагностика лазерной плазмы

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:

к.ф.-м.н., Зав.лаб. ОИВТ РАН С.А. Пикуз

Аннотация к рабочей программе дисциплины

«Диагностика лазерной плазмы»

В курсе изучаются различные подходы к измерению параметров плазмы, создаваемой при воздействии интенсивных потоков лазерного излучения на вещество. Рассматриваются теоретические основы зависимости различных измеряемых величин от параметров лазерной плазмы. Делается акцент на измерительных методах, основанных на анализе собственного либо зондирующего оптического и ионизирующего излучения. Изучаются различные модели излучения, поглощения, рассеяния и дифракции в лазерной плазме, в том числе атомно-кинетические модели излучения многозарядных ионов. Обсуждаются принципы постановки экспериментов с использованием изучаемых методов и примеры измерений параметров релятивистской плазмы и плазмы с астрофизическим подобием. Дается обзор и обоснование пределов возможностей современного диагностического оборудования, применяемого в экспериментах с лазерной плазмой.

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Диагностика лазерной плазмы» реализуется на 2-ом курсе в 3-ем семестре и относится к вариативной части программы обучения.

В результате освоения дисциплины «Диагностика лазерной плазмы» 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», «Атомная физика», «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">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).	<p>ЗНАТЬ основные законы и направления современных научных исследований в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p> <p>УМЕТЬ на основе фундаментальных знаний в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики, определять возможные направления научных исследований.</p> <p>ВЛАДЕТЬ 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">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).	<p>ЗНАТЬ 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>УМЕТЬ используя знания в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики проводить научные исследования.</p> <p>ВЛАДЕТЬ навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.</p>
<ul style="list-style-type: none">Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области экстремальных	<p>ЗНАТЬ основные направления инновационного развития в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p> <p>УМЕТЬ 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. ВЛАДЕТЬ 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. Современные направления исследований по физике высокой плотности энергии с использованием мощных лазеров.

Классификация и обзор актуальных фундаментальных и прикладных задач в экспериментальной физике высокой плотности энергии. Плазма, создаваемая лазерными импульсами высокой (кДж) энергетики, ультракороткими сверхмощными (ПВт) лазерными импульсами. Плазменная гидродинамика, лазерно-плазменные неустойчивости, ударные волны, лабораторная астрофизическая плазма. Релятивистская и ультрарелятивистская лазерная плазма. Ускорение частиц, генерация гармоник, рентгеновское излучение, сверхсильные магнитные поля, плотное нагретое вещество. Современные экспериментальные установки, примеры постановок экспериментов и применяемых диагностических подходов и оборудования.

Тема 2. Собственное ионизирующее излучение плазмы.

Плазма как источник ионизирующего излучения. Построение изображений плазменного источника. Тепловое излучение и закон Кирхгофа, метод пирометрии. Измерения с временным разрешением. Непрерывный спектр излучения плазмы. Тормозное, бетатронное, циклотронное излучения, их применение для диагностики плазмы. Измерения корпускулярного излучения плазмы. Время-пролетные методы, электромагнитные спектрометры. Методы ступенчатой и последовательной фильтрации.

Тема 3. Рентгеновская эмиссионная спектроскопия. Кинетические модели плазмы.

Линейчатое излучение плазмы. Идентификация спектров, классификация переходов. Изоэлектронные последовательности в спектре. Диэлектронные сателлиты. Контур спектральной линии. Доплеровское, лоренцево и др. уширения. Влияние горячих электронов, эффектов плотности и радиационной накачки на рентгеновские спектры. Полые ионы. Плазменные сателлиты. Модели атомной кинетики - равновесная, локальное термодинамическое равновесие, корональная, столкновительно-радиационная. Стационарные и нестационарные решения. Приближенные методы решения.

Тема 4. Зондирование плазмы ионизирующим излучением.

Метод зонд-накачка. Рентгеновская абсорбционная радиография. Метод фазового контраста. Оптическая толщина, абсорбционная рентгеновская спектроскопия. Протонная радиография и дефлектометрия. Томсоновское и малоугловое рентгеновское рассеяние. Рентгеновская дифракция в плазме. Применение рентгеновских лазеров на свободных электронах.

Тема 5. Оптические методы диагностики плазмы.

Метод теневого и шпирен фотографирования. Интерферометрические методы. Метод оптической пирометрии с временным разрешением. Томсоновское, релеевское и комбинационное рассеяние. Метод резонансной флуоресценции. Поляризационные измерения магнитного поля. Оптическая и ВУФ спектроскопия.

Тема 6. Применяемое диагностическое оборудование, особенности обработки результатов измерений.

Детекторы оптического и ионизирующего излучения. Фундаментальные и технические ограничения - источники помех, квантовая эффективность и чувствительность. Камеры с быстрой временной разверткой. Рентгеновские и ВУФ спектрометры, доступный спектральный диапазон. Достижимое спектральное, пространственное и временное разрешение. Подходы к калибровке аппаратуры. Методы защиты от жесткого рентгеновского и корпускулярного излучений, электромагнитных наводок. Методы повышения соотношения сигнал-шум в измеряемых данных. Режим одиночного счета фотонов. Алгоритмы Фурье- и вейвлет-преобразований.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Самостоятельная работа студентов
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Диагностика лазерной плазмы	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 «Диагностика лазерной плазмы» 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	Современные направления исследований по физике высокой плотности энергии с использованием мощных лазеров.	8	2		2	4	Собеседование, опрос
2	Собственное ионизирующее излучение плазмы.	12	3	-	3	6	
3	Рентгеновская эмиссионная спектроскопия. Кинетические модели плазмы.	16	4	-	4	8	
4	Зондирование плазмы ионизирующим излучением.	12	3		3	6	
5	Оптические методы диагностики плазмы.	12	3		3	6	
6	Применяемое диагностическое оборудование, особенности обработки результатов измерений.	8	2		2	4	
	Промежуточная аттестация	4				4	зачет в устной форме
ИТОГО:		72	17	-	17	38	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Диагностика лазерной плазмы» 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 «Диагностика лазерной плазмы» 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
Оценочные средства текущего контроля		
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
ЗНАТЬ: современные методы диагностики лазерной плазмы ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний современных методов диагностики лазерной плазмы	В целом успешные, но не систематические знания современных методов диагностики лазерной плазмы	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания современных методов диагностики	Успешные и систематические знания современных методов диагностики лазерной плазмы

			лазерной плазмы	
<p>УМЕТЬ: обоснованно выбирать и применять диагностические методы и подходы для изучения лазерной плазмы и измерения ее параметров, интерпретировать данные измерений.</p> <p>ОПК-3.Б У-6</p>	Отсутствие умения	В целом успешное, но не систематическое умение	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умения	Успешное и систематическое умение
<p>ВЛАДЕТЬ: современными методами измерений параметров лазерной плазмы, навыками разработки диагностических схем, обработки и интерпретации регистрируемых данных.</p> <p>ОПК-3.Б В-6</p>	Отсутствие/фрагментарное владение	В целом успешное, но не систематическое владение	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение	Успешное и систематическое владение

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

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:

Пример:

1. Запишите условие термодинамического равновесия и формулу Саха. Запишите уравнения столкновительного возбуждения и рекомбинации.
2. Какие элементарные процессы доминируют в плазме, находящейся в локальном термодинамическом равновесии? При температуре 0.8 эВ для атомарного водорода в условиях локального термодинамического равновесия константа равновесия равна 10^{14}см^{-3} . Определить концентрацию электронов, для которой степень ионизации при указанной температуре составляет 1/2.

3. Запишите уравнения Больцмана и Власова, интеграл столкновений. Оцените время максвеллизации для плазмы с заданной кратностью ионизации, электронной плотностью и температурой.
4. От каких параметров зависит скорость ионообразования и рекомбинации электронов и ионов, образование и разрушение возбужденных атомов (ионов) данной кратности?
5. Составьте схему оптического интерферометра для диагностики плазменного факела. Объясните принцип работы и границы применимости метода оптической интерферометрии в измерении плотности плазмы.
6. Опишите принципы измерения непрерывного рентгеновского спектра методом фильтров Росса.
7. В представленном рентгеновском спектре проведите идентификацию спектральных линий. Укажите, какие из спектральных особенностей можно использовать для определения электронной температуры и плотности плазмы.

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

Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме зачета:

1. Плазма, создаваемая лазерными импульсами кДж энергии нс и пс длительности. Актуальные задачи исследований. Современные экспериментальные установки, примеры постановок экспериментов.
2. Плазма, создаваемая фемтосекундными лазерными импульсами ПВт уровня мощности и ультра-релятивистской интенсивности. Актуальные задачи исследований. Современные экспериментальные установки, примеры постановок экспериментов.
3. Лазерная плазма как источник ионизирующего излучения. Измерения корпускулярного излучения плазмы. Время-пролетные методы, электромагнитные спектрометры.
4. Лазерная плазма как источник ионизирующего излучения. Методы построения изображений плазменного источника в рентгеновском диапазоне – камера обскуры, рентгеновская микроскопия. Тепловое излучение, закон Кирхгофа, метод пирометрии с временным разрешением.
5. Непрерывный спектр излучения плазмы. Тормозное, бетатронное, циклотронное излучение и их применение для диагностики плазмы.
6. Линейчатое рентгеновское излучение плазмы. Рентгеновская спектроскопия. Идентификация спектров, классификация переходов, LS и jj- связь.
7. Корональная и столкновительно-радиационная модели плазмы. Изоэлектронные последовательности в рентгеновском спектре. Диэлектронные сателлиты и их зависимость от температуры и плотности плазмы. Влияние горячих электронов на рентгеновский спектр.
8. Модели атомной кинетики – равновесная, локального термодинамического равновесия. Приближенные, стационарные и нестационарные решения радиационно-столкновительной кинетики в плазме.
9. Контур рентгеновской спектральной линии. Допплеровское, Лоренцево, Штарковское уширения. Оптическая толщина и эффект самопоглощения.
10. Ионизация рентгеновским излучением. Фотоиндуцированные переходы в многозарядных ионах. Конфигурации полых ионов, вероятности их образования в зависимости от параметров плазмы и источника.
10. Радиационно-транспортные свойства плазмы. коэффициент поглощения в слабоионизованном газе. Самопоглощение излучения, оптическая толщина. Абсорбционная рентгеновская спектроскопия в резонансных линиях и вблизи краев поглощения в плотной плазме.

11. Рентгеновское излучение плазмы твердотельной плотности. Эффекты в плазме твердотельной плотности. Рекомбинационный континуум, Понижение потенциала ионизации, Штарковское уширение спектральных линий.
12. Зондирование плазмы ионизирующим излучением. Метод зонд-накачка. Рентгеновская абсорбционная и фазово-контрастная радиография. Протонная радиография.
13. Зондирование плазмы ионизирующим излучением. Томсоновское и малоугловое рентгеновское рассеяние. Рентгеновская дифракция в плазме. Применение рентгеновских лазеров на свободных электронах в физике высокой плотности энергии.
14. Измерение сильных магнитных полей в плазме. Метод протонной дефлектометрии. Эффект Фарадея и поляриметрия. Возмущения в профилях рентгеновских спектральных линий, плазменные сателлиты.
15. Оптическая интерферометрия. Основные схемы оптических интерферометров. Измерение электронной плотности и скорости ударно-волнового фронта в плазме.
16. Оптическое зондирование. Методы теневого и шпирен фотографирования. То Томсоновское, релеевское и комбинационное рассеяние. Метод резонансной флуоресценции.
17. Современные детекторы оптического и ионизирующего излучения. Фундаментальные и технические ограничения - источники помех, квантовая эффективность и чувствительность. Камеры с быстрой временной разверткой.
18. Рентгеновские и ВУФ спектрометры. доступный спектральный диапазон. Достижимое спектральное, пространственное и временное разрешение. Режим одиночного счета фотонов. Подходы к калибровке аппаратуры.
19. Методы повышения соотношения сигнал-шум в измеряемых данных. Алгоритмы Фурье- и вейвлет-преобразований. Методы защиты от жесткого рентгеновского и корпускулярного излучений, электромагнитных наводок.

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

Основная литература.

1. И. И. Собельман. Введение в теорию атомных спектров. М: Физматгиз, 1963.
2. В. Н. Очкин Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
3. Р. Хаддлстоун, С. Леонард. Диагностика плазмы. М: Мир, 1967.
4. В. И. Демидов, Н. Б. Колоколов, А. А. Кудрявцев. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. М. Энергоатомиздат, 1996.
5. Н.И. Коротеев, И.Л Шумай, Физика мощного лазерного излучения. М.: Наука, 1991.

Дополнительная литература.

1. А.З. Грасюк. Взаимодействие излучения с веществом. М: Изд-во ФИАН, 2004.
2. Я. Б. Зельдович, П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Физматгиз, 1963.
3. В. И. Держиев, А. Г. Жидков, С. И. Яковленко. Излучение ионов в неравновесной плотной плазме. М. Энергоатомиздат, 1986.
4. Семиохин И. А. Элементарные процессы в низкотемпературной плазме. Учеб. пособие. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988.
5. С.К. Жданов, В.А. Курнаев, М.К. Романовский, И.В. Цветков. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках. М: МИФИ, 2007.

6. Г. Грим. Спектроскопия плазмы. М: Атомиздат, 1969.
7. Д.А. Франк-Каменецкий. Лекции по физике плазмы. М: Атомиздат, 1968.
8. В.А. Бойко, А.В. Виноградов и др. Рентгеновская спектроскопия лазерной плазмы. (Итоги науки и техники, том 27), М: ВИНТИ, 1980.
9. Л.А. Васильев. Теневые методы. М: Наука, 1968.
10. Ю.В. Коломийцов. Интерферометры. Л: Машиностроение, 1976
11. Л.Н. Пятницкий. Лазерная диагностика плазмы. М: Атомиздат, 1976
12. С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. Физическая оптика. М: Изд-во Моск.ун-та, 1998.
13. P. Gibbon. Short pulse laser interaction with matter an introduction. London, Imperial College Press, 2005.
14. D. Salzmann. Atomic Physics in Hot Plasmas. Oxford University Press, 1998.
15. E. Oks. Advances in X-Ray Spectroscopy of Laser Plasmas. IOP Publishing Ltd 2020

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.