

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:

Теория фундаментальных процессов в полях экстремальной интенсивности

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., доцент НИЯУ МИФИ А.М.Федотов

Аннотация к рабочей программе дисциплины

«Теория фундаментальных процессов в полях экстремальной интенсивности»

В курсе изучаются физические процессы и явления в лазерных полях экстремальной интенсивности.

Описан мировой прогресс в создании сверхмощных фемтосекундных лазеров. Изложены и проиллюстрированы на конкретных примерах основные понятия и расчетные методы квантовой электродинамики, в том числе непertурбативные по внешнему полю. На их основе показано, что взаимодействие материи с лазерными полями интенсивности $>10^{24}$ Вт/см² происходит в режиме доминирования эффектов КЭД. Разобраны классические и недавно предсказанные новые эффекты (включая радиационное трение в квантовом режиме, развитие самоподдерживающихся каскадов, эффекты поляризации вакуума и швингеровское рождение пар), наблюдение которых станет возможным при помощи перспективных лазерных установок мультитераваттной, экзаваттной и зептоваттной мощности.

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Теория фундаментальных процессов в полях экстремальной интенсивности» реализуется на 2-ом курсе во 3-ем семестре и относится к вариативной части программы обучения.

В результате освоения дисциплины «Теория фундаментальных процессов в полях экстремальной интенсивности» 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">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 теории классических и квантовых процессов в электромагнитных полях экстремальной интенсивности.</p> <p>УМЕТЬ на основе фундаментальных знаний в области теории классических и квантовых процессов в электромагнитных полях экстремальной интенсивности, определять возможные направления научных исследований.</p> <p>ВЛАДЕТЬ необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования области теории классических и квантовых процессов в электромагнитных полях экстремальной интенсивности.</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 теории классических и квантовых процессов в электромагнитных полях экстремальной интенсивности.</p> <p>УМЕТЬ используя знания в области теории классических и квантовых процессов в электромагнитных полях экстремальной интенсивности, 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	<p>ЗНАТЬ основные направления инновационного развития в области теории классических и квантовых процессов в электромагнитных полях экстремальной интенсивности.</p>

<p>области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики (СПК-3).</p>	<p>УМЕТЬ проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области теории классических и квантовых процессов в электромагнитных полях экстремальной интенсивности для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.</p> <p>ВЛАДЕТЬ методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области теории классических и квантовых процессов в электромагнитных полях экстремальной интенсивности.</p>
--	---

4. **Форма обучения:** очная

5. **Язык обучения:** русский

6. **Содержание дисциплины:**

Тема 1. Введение

Обзор характеристик и исследовательских программ существующих, строящихся и проектирующихся лазерных установок петаваттной и мультитераваттной мощности. Модели и методы диагностики сверхмощных фокусированных лазерных импульсов. Понятие критического поля и шкала масштабов критических полей для различных физических процессов.

Тема 2. Квантовая электродинамика во внешнем поле

Основные понятия и методы квантовой электродинамики. Ковариантная теория возмущений и фейнмановская диаграммная техника (примеры конкретных расчетов). Понятие внешнего поля. Картина Фарри. Волковские решения и их физический смысл. Методика расчета вероятностей и сечений квантово-электродинамических процессов в сильном внешнем электромагнитном поле (в картине Фарри).

Тема 3. Элементарные КЭД процессы

Расчет вероятностей элементарных квантовых процессов (излучения фотона, фоторождения электрон-позитронной пары) в поле плоской монохроматической волны и в коротком импульсе. Анализ предельных случаев. Пределы применимости приближения локально-постоянного поля и принципы моделирования элементарных процессов методом Монте Карло. Обзор свободно распространяемых кодов для моделирования динамики лазерной плазмы с учетом квантово-электродинамических эффектов.

Тема 4. Радиационное трение

Радиационное трение в классическом и квантовом режимах. Динамика электронов в лазерном поле в режиме доминирования радиационного трения. Спиновая динамика и поляризация электронов в сильном поле.

Тема 5. Каскадные процессы

Самоподдерживающиеся квантово-электродинамические каскады: критерий зарождения, методы и результаты моделирования их эволюции.

Тема 6. Эффекты поляризации вакуума

Поляризация вакуума в сильном поле. Эффекты, обусловленные поляризацией вакуума (двойное лучепреломление, самофокусировка, генерация гармоник и ударных волн) в полях экстремальной интенсивности и предлагаемые эксперименты по их наблюдению.

Тема 7. Рождение пар из вакуума и другие экзотические процессы

Спонтанное рождение электрон-позитронных пар из вакуума и фундаментальные ограничения на максимально достижимую интенсивность лазерных полей. Влияние лазерного поля на распады ядер и элементарных частиц. Эффект Унру и концепция излучения Унру. Предложения по поиску физики за пределами стандартной модели.

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			Семинары	
			Общая аудиторная	Лекции	Семинары		
Теория фундаментальных процессов в полях экстремальной интенсивности	2	72	36	17	17	36	

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

Изучение курса «Теория фундаментальных процессов в полях экстремальной интенсивности» 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	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	Введение	4	2	-	2	2	Собеседование, опрос
2	Квантовая электродинамика во внешнем поле	14	4	-	4	8	
3	Элементарные КЭД процессы	16	4	-	4	8	
4	Радиационное трение	6	2	-	2	2	
5	Каскадные процессы	4	2	-	2	2	
6	Эффекты поляризации вакуума	10	2	-	2	4	
7	Рождение пар из вакуума и другие экзотические процессы	10	2	-	2	6	
	Промежуточная аттестация	4		-		4	зачет в устной форме
ИТОГО:		72	18	-	18	36	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Теория фундаментальных процессов в полях экстремальной интенсивности» 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 «Теория фундаментальных процессов в полях экстремальной интенсивности» 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: принципы описания и типы процессов в полях экстремальной интенсивности ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний принципов описания и типов процессов в полях экстремальной интенсивности	В целом успешные, но не систематические знания принципов описания и типов процессов в полях экстремальной интенсивности	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания принципов описания и типов процессов в полях экстремальной интенсивности	Успешные и систематические знания принципов описания и типов процессов в полях экстремальной интенсивности
УМЕТЬ: проводить оценки величины эффектов в полях экстремальной интенсивности ОПК-3.Б У-6	Отсутствие умения проводить оценки величины эффектов в полях экстремальной интенсивности	В целом успешное, но не систематическое умение проводить оценки величины эффектов в полях	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение проводить оценки величины эффектов в полях	Успешное и систематическое умение проводить оценки величины эффектов в полях экстремальной интенсивности

		экстремальной интенсивности	экстремальной интенсивности	
ВЛАДЕТЬ: базовыми методами расчета величины эффектов в полях экстремальной интенсивности ОПК-3.Б В-6	Отсутствие/фрагментарное владение базовыми методами расчета величины эффектов в полях экстремальной интенсивности	В целом успешное, но не систематическое владение базовыми методами расчета величины эффектов в полях экстремальной интенсивности	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение базовыми методами расчета величины эффектов в полях экстремальной интенсивности	Успешное и систематическое владение базовыми методами расчета величины эффектов в полях экстремальной интенсивности

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

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:

Пример:

1. Разложите в ряд Фурье функцию Волкова в монохроматическом циркулярно-поляризованном поле и укажите физический смысл полученного разложения.
2. Решите классические уравнения движения заряда в постоянном электромагнитном поле (рассмотрите все возможные случаи).
Докажите непосредственным расчетом, что при классическом движении в постоянном поле динамический квантовый параметр остается постоянным.
3. Покажите, что в пределе низких энергий и слабого поля каскадные кинетические уравнения сводятся к классическому уравнению движения с учетом радиационного трения.
4. Исходя из лагранжиана Гейзенберга-Эйлера, оцените величину сечения рассеяния мягких фотонов.
5. Исходя из лагранжиана Гейзенберга-Эйлера, найдите поправку к закону Кулона на больших расстояниях.
6. Оцените вероятность генерации четных гармоник сверхмощной стоячей волной в вакууме. При какой интенсивности данный процесс становится эффективным?
7. Оцените вероятность излучения аксиона в сильном лазерном поле.

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

Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме зачета:

1. Модели фокусированного электромагнитного импульса.
2. Методы диагностики сверхмощных фокусированных лазерных импульсов.
3. Понятие критического поля и шкала масштабов критических полей для различных физических процессов.
4. Ковариантная теория возмущений и фейнмановская диаграммная техника в квантовой электродинамике.

5. Кинематика комптоновского рассеяния, расчет сечения, предельные случаи, перекрестная инвариантность.
6. Формулировка КЭД в картине Фарри. Волковские решения и их физический смысл. Эффективная масса.
7. Характерные масштабы и метод оценки вероятностей квантовых процессов в сильном поле по порядку величины.
8. Вероятность излучения фотона в поле плоской монохроматической волны. Анализ предельных случаев.
9. Вероятность фоторождения пары в поле плоской монохроматической волны. Анализ предельных случаев.
10. Радиационное трение в классической электродинамике.
11. Движение в магнитном поле, равномерно вращающемся электрическом поле и в поле плоской волны с учетом радиационного трения.
12. Радиационное трение в КЭД. Предельный переход к классической теории.
13. Уравнение Дирака. Описание спина в КЭД. Динамика спина в сильном поле. Эффект Соколова-Тернова.
14. Критерий зарождения самоподдерживающегося каскада в равномерно вращающемся электрическом поле.
15. Радиационные поправки во внешнем поле. Двойное лучепреломление и эффект Черенкова в вакууме.
16. Лагранжиан Гейзенберга-Эйлера. Нелинейные поправки к уравнению Максвелла за счет поляризации вакуума в сильном поле.
17. Особенности формулировки задач КЭД с нестабильным вакуумом.
18. Спонтанное рождение пар из вакуума в постоянном поле.
19. Оценка влияния лазерного поля на распады ядер и элементарных частиц.
20. Эффект Унру, температура Унру.

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

Основная литература.

1. С.В. Попруженко, А.М. Федотов, Динамика и излучение систем заряженных частиц в электромагнитных полях экстремальной интенсивности (обзор планируется опубликовать, предположительно в УФН, до конца 2021г.)
2. N.V. Narozhny and A.M. Fedotov, Extreme light physics, Contemp. Phys. 56, 249 (2015).
3. A. Di Piazza, C. Müller, K. Hatsagortsyan, and C.H. Keitel, Extremely high-intensity laser interactions with fundamental quantum systems, Rev. Mod. Phys. 84, 1177 (2012).

Дополнительная литература.

1. Д. Джексон, Классическая электродинамика, М: Мир, 1965.
2. М.Е. Пескин, Д.В. Шредер, Введение в квантовую теорию поля, Ижевск: НИЦ РХД, 2001.
3. В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский, Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1989
4. В.Н. Байер В.М. Катков В.С. Фадин, Излучение релятивистских электронов, М: Атомиздат, 1973
5. Квантовая электродинамика явлений в интенсивном внешнем поле: Труды ФИАН. Т.111. М.: Наука, 1979.
6. Проблемы квантовой электродинамики интенсивного поля: Труды ФИАН. Т.168. М.: Наука, 1986.

7. А.А. Гриб , С.Г. Мамаев, В.М. Мостепаненко, Вакуумные квантовые эффекты в сильных полях. М.: Энергоатомиздат, 1988.
8. Е.С. Фрадкин, Д.М. Гитман, Ш.М. Шварцман, Квантовая электродинамика с нестабильным вакуумом, М: Наука, 1991.

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.