

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:

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ГЛАВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Теоретическая 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 рабочей программы дисциплины:

д.ф.-м.н., профессор А. И. Студеникин, кафедра теоретической физики физического факультета МГУ

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Физика нейтрино» реализуется на 1-ом курсе в 1-ом семестре и входит в вариативную часть магистерской программы (курс по выбору).

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

Освоение следующих дисциплин: «Дополнительные главы электродинамики и квантовой механики», «Квантовая теория поля. Ч. 1», «Теория фундаментальных взаимодействий. Ч. 1».

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

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

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 теоретической физики в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1).	<p>ЗНАТЬ</p> <p>основные законы и направления современных научных исследований в области теоретической физики.</p> <p>УМЕТЬ</p> <p>на основе фундаментальных знаний в области теоретической физики, определять возможные направления научных исследований.</p> <p>ВЛАДЕТЬ</p> <p>необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования области теоретической физики.</p>
<ul style="list-style-type: none">Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области теоретической физики и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2).	<p>ЗНАТЬ</p> <p>базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном научном оборудовании.</p> <p>УМЕТЬ</p> <p>используя знания в области теоретической физики проводить научные исследования.</p> <p>ВЛАДЕТЬ</p> <p>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 теоретической физики (СПК-3). 	<p>ЗНАТЬ</p> <p>основные направления инновационного развития в области теоретической физики.</p> <p>УМЕТЬ</p> <p>проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области теоретической физики для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.</p> <p>ВЛАДЕТЬ</p> <p>методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области теоретической физики.</p>
---	---

4. **Форма обучения:** очная.

5. **Язык обучения:** русский.

6. **Содержание дисциплины**

Тема 1. История открытия нейтрино.

История открытия нейтрино. Гипотеза Паули о существовании нейтрино. Локальная модель слабых взаимодействий Ферми. Нейтрино в Стандартной модели взаимодействий. Нарушение четности в слабых взаимодействиях. Вероятность бета-распада нейтрона в случае безмассового нейтрино.

Тема 2. Массивное нейтрино.

Массивное нейтрино в расширенной Стандартной модели. Дираковское и майорановское массовые слагаемые лагранжиана. Механизм «качелей» генерации массы нейтрино. Трансформационные свойства волновой функции нейтрино при преобразованиях дискретных симметрий и Лоренца. Определение массы нейтрино по кинематике распадов. Спектр электронов бета-распада трития. График Кюри для бета-распада и масса нейтрино. Двойной безнейтринный бета-распад.

Тема 3. Проблемы физики нейтрино.

Стандартная солнечная модель. Ядерные реакции и рождение нейтрино на Солнце. CNO-циклы солнечных ядерных реакций и pp-циклы солнечных ядерных реакций. Проблемы солнечных, атмосферных, реакторных и ускорительных нейтрино. Дефицит нейтрино в детектируемых потоках частиц от Солнца и других источников. Характерные значения энергий и пролетного расстояния до детектора в экспериментах с нейтрино от различных источников.

Тема 4. Смешивание и осцилляции нейтрино.

Смешивание нейтрино в вакууме. Осцилляции нейтрино (случай двух поколений нейтрино). Угол смешивания нейтрино и характерная длина осцилляций. Максимально возможная степень подавления потока нейтрино в вакуумных осцилляциях при наличии фиксированного

количества N различных нейтрино. Осцилляции нейтрино и длина когерентности. Условие когерентности и возможность экспериментального наблюдения явления осцилляций нейтрино. Доказательство принципиальной невозможности регистрации двойного пика в экспериментах по нейтринным осцилляциям. Смешивание нейтрино в веществе. Эффективный потенциал нейтрино в веществе (формула Вольфенштейна). Когерентное взаимодействие нейтрино со средой. Потенциал Вольфенштейна для различных флейворных нейтрино в средах различного состава. Осцилляции нейтрино в веществе. Эффект Михеева–Смирнова–Вольфенштейна резонансного усиления осцилляций. Смешивание нейтрино в случае трех поколений. Матрица Понтекорво–Маки–Накагавы–Сакаты. Условие адиабатичности для осцилляций нейтрино. Осцилляции нейтрино в неадиабатическом приближении. Стерильные нейтрино. Принципы детектирования нейтрино. Радиохимический метод детектирования нейтрино. Основные эксперименты по детектированию солнечных нейтрино. Ограничения на углы смешивания и разности квадратов масс нейтрино в экспериментах с солнечными нейтрино. Основные эксперименты по детектированию атмосферных нейтрино. Ограничения на углы смешивания и разности квадратов масс нейтрино в экспериментах с атмосферными нейтрино. Основные эксперименты по детектированию реакторных нейтрино. Ограничения на углы смешивания и разности квадратов масс нейтрино в экспериментах с реакторными нейтрино. Основные эксперименты по детектированию ускорительных нейтрино. Ограничения на углы смешивания и разности квадратов масс нейтрино в экспериментах с ускорительными нейтрино.

Тема 5. Электромагнитные свойства нейтрино.

Общая структура электромагнитной вершинной функции нейтрино. Вершинная функция и требования калибровочной и лоренц-инвариантности. Дираковский и паулевский формфакторы нейтрино. Общий вид электромагнитной вершинной функции нейтрино. Электромагнитные свойства нейтрино. Диагональные формфакторы. Недиагональные формфакторы. Электромагнитные свойства дираковских нейтрино. Зарядовый формфактор нейтрино. Зарядовый радиус нейтрино в калибровочных моделях взаимодействия. Электрический заряд нейтрино в калибровочных моделях взаимодействия за пределами расширенной Стандартной модели. Дипольные магнитный и электрический формфакторы нейтрино. Диагональные магнитный и электрический моменты нейтрино. Недиагональные магнитный и электрический моменты нейтрино. Электромагнитные свойства майорановских нейтрино. Анапольный формфактор нейтрино. Анапольный момент и зарядовый радиус безмассового нейтрино. Анапольный момент и зарядовый радиус массивного нейтрино. Связь анапольного момента и зарядового радиуса для случая безмассового нейтрино. Магнитный момент нейтрино (теория и эксперимент). Экспериментальные лабораторные и астрофизические ограничения на магнитный момент нейтрино. Связь магнитного момента и массы нейтрино. Магнитный момент нейтрино и проблема солнечных нейтрино. Эффект Волошина–Высоцкого–Окуня подавления потока солнечных нейтрино. Подавление потока активных нейтрино в магнитном поле нейтронной звезды. Спиновые (спин-флейворные) осцилляции нейтрино в магнитном поле и их резонансное усиление в веществе. Эволюция магнитного момента нейтрино в произвольных электромагнитных полях (квазиклассическое приближение). Спиновые и флейворные осцилляции в поле электромагнитной волны. Резонансное усиление флейворных осцилляций нейтрино в замагниченном веществе. Общее условие адиабатичности при спиновых (спин-флейворных) осцилляциях нейтрино в электромагнитных полях и веществе. Спиновые осцилляции нейтрино в продольном и поперечном магнитном поле. Спиновые-флейворные осцилляции нейтрино в продольном и поперечном магнитном поле. Возможность усиления эффекта осцилляций нейтрино в поперечном магнитном поле за счет действия продольного магнитного поля.

Тема 6. Бета-распад нейтрона в магнитном поле.

1 Внешние электромагнитные поля в единых калибровочных теориях взаимодействия -

история проблемы и основные эффекты в наземных экспериментах, в астрофизике и в космологии. Точное решение уравнения Дирака для электрона в магнитном поле. 2 Стандартная модель электрослабых взаимодействий и эффективная локальная теория Ферми. Расчет матричного элемента процесса бета-распада нейтрона в магнитном поле. 4 Теория обратного бета-распада нейтрона в сильном магнитном поле. 4 Астрофизические приложения: урка-процессы в сильном магнитном поле с учетом эффектов плотности вещества. Асимметрия пространственного распределения нейтрино при урка-процессах в магнитном поле. Равновесное состояние вещества нейтронной звезды относительно урка-процессов в сильном магнитном поле.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоёмкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в акад. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Самостоятельная работа студентов
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Фундаментальные свойства нейтрино	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 «Физика нейтрино» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса, и самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях, закрепляются самостоятельной работой, 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	
К Р Ы Т	1. История открытия нейтрино.	2	1			1	Собеседование,

	2. Нейтрино в локальной теории слабых взаимодействий Ферми.	2	1			1	опрос
2. Массивное нейтрино	1. Определение массы нейтрино по кинематике распадов.	2			1	1	
	2. Массивное нейтрино в расширенной Стандартной модели.	2	1			1	
	3. Дираковские и майорановские нейтрино.	2			1	1	
3. Проблемы физики нейтрино	1. Стандартная солнечная модель.	2	1			2	
	2. Проблемы солнечных и атмосферных нейтрино.	2			1	1	
4. Смешивание и осцилляции нейтрино.	1. Смешивание и осцилляции нейтрино в вакууме.	2	1			1	
	2. Условие и длина когерентности при осцилляциях нейтрино.	2			1	1	
	3. Смешивание и осцилляции нейтрино в случае трех поколений.	2	1			1	
	4. Смешивание и осцилляции нейтрино в веществе.	2			1	1	
	5. Резонансное усиление осцилляций нейтрино в веществе. Эффект Михеева-Смирнова-Вольфенштейна.	2	1			1	

	6. Условие адиабатичности для осцилляций нейтрино в веществе.	2			1	1	
	7. Осцилляции нейтрино в веществе в неадиабатическом режиме.	2	1			1	
	8. Принципы детектирования нейтрино.	2			1	1	
	9. Основные эксперименты по детектированию солнечных нейтрино.	2	1			1	
	10. Основные эксперименты по детектированию атмосферных нейтрино.	2			1	1	
	11. Основные эксперименты по детектированию реакторных нейтрино.	2	1			1	
	12. Основные эксперименты по детектированию ускорительных нейтрино.	2			1	1	
	13. Современные значения разности квадратов масс и углов смешивания нейтрино.	2	1			1	
5. Электромагнитные свойства нейтрино	1. Общая структура электромагнитной вершинной функции нейтрино.	2			1	1	
	2. Зарядовый формфактор нейтрино.	2	1			1	
	3. Дипольные магнитный и электрический формфакторы нейтрино.	2			1	1	
	4. Анапольный формфактор нейтрино.	2	1			1	
	5. Магнитный момент нейтрино (теория и эксперимент).	4			1	1	
	6. Магнитный момент нейтрино и проблема солнечных нейтрино.	2	1			1	
	7. Спиновые (спин-флейворные) осцилляции нейтрино в магнитном поле и их резонансное усиление в веществе.	2				1	1

	8. Общее условие адиабатичности при спиновых (спин-флейворных) осцилляциях нейтрино в электромагнитных полях и веществе.	2	1			1	
6. Бета-распад нейтрона в магнитном поле.	Точное решение уравнения Дирака для электрона в магнитном поле.	2				1	1
	Локальная теория Ферми слабых взаимодействий. Расчет матричного элемента процесса бета-распада нейтрона в магнитном поле.	2	1				1
	Теория обратного бета-распада нейтрона в сильном магнитном поле.	2				1	1
	Урка-процессы в сильном магнитном поле с учетом эффектов плотности вещества. Асимметрия пространственного распределения нейтрино.	2				1	1
		72	18			18	36
							Зачет в форме письменной работы, экзамен в форме письменной работы с последующим собеседованием

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Физика нейтрино» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности и качества участия в опросах и собеседованиях по

проблемам, изучаемых в рамках тем лекционных занятий, аргументированности позиции; оценивается широта используемых теоретических знаний.

Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение экзамена.

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 специальная беседа по тематике предыдущей лекции и 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
Тестирование	Средство контроля, позволяющее получить оценку уровня фактических знаний студента по изученной теме.	Образцы тестов
Оценочные средства промежуточной аттестации		
Письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к экзамену

Собеседование	Средство, позволяющее получить экспертную оценку знаний, умений и навыков для оценивания и анализа различных фактов и явлений в своей профессиональной области.	Требования к порядку проведения собеседования
---------------	---	---

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: фундаментальные свойства нейтрино. ОПК-2.Б З-4	Отсутствие знаний о фундаментальных свойствах нейтрино.	В целом успешные, но не систематические знания фундаментальных свойствах нейтрино.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания фундаментальных свойствах нейтрино.	Успешные и систематические знания фундаментальных свойствах нейтрино.
УМЕТЬ: применять методы квантовой механики и теории поля к исследованию свойств нейтрино. ОПК-2.Б У-4	Отсутствие умения применять методы квантовой механики и теории поля к исследованию свойств нейтрино.	В целом успешное, но не систематическое умение применять методы квантовой механики и теории поля к исследованию свойств нейтрино.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы в умении применять методы квантовой механики и теории поля к исследованию свойств нейтрино.	Успешное и систематическое умение применять методы квантовой механики и теории поля к исследованию свойств нейтрино.
ВЛАДЕТЬ: навыками проводить вычисления характеристик основных процессов с участием нейтрино. ОПК-2.Б В-4	Отсутствие/фрагментарное владение навыками проводить вычисления характеристик основных процессов с участием нейтрино.	В целом успешное, но не систематическое владение навыками проводить вычисления характеристик основных процессов с участием нейтрино.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками проводить вычисления характеристик основных процессов с участием нейтрино.	Успешное и систематическое владение навыками проводить вычисления характеристик основных процессов с участием нейтрино.

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

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся

Пример: вычислить максимально возможную степень подавления потока нейтрино в вакуумных осцилляциях при наличии фиксированного количества N различных нейтрино.

Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

В результате освоения дисциплины обучающийся должен знать фундаментальные свойства нейтрино; уметь проводить вычисления характеристик основных процессов с участием нейтрино.

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

Пример: смешивание нейтрино в случае трех поколений нейтрино; матрица Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты.

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

Основная литература:

1. А.И.Студеникин, К.А.Кузаков. Электромагнитные свойства нейтрино как окно в новую физику, Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. № 5 (2020) 3 (17 с.) – доступна через сайт физического факультета МГУ, <http://vmu.phys.msu.ru/>.
2. A.Popov, A.Studenikin, Neutrino eigenstates and flavour, spin and spin-flavour oscillations in a constant magnetic field. Eur. Phys. J. C (2019) 79:144 (7 p.) – в открытом доступе на <https://inspirehep.net/files/30cbe93160326b07be05a7976c08f02c>.
3. A. Grigoriev, A. Lokhov, A. Studenikin, A. Ternov, Spin light of neutrino in astrophysical environments, J. Cosmol. Astropart. Phys. (2017) 068P_0517 (23 p.), e-Print: 1705.07481 (<https://inspirehep.net>).
4. P.Pustoshny, A.Studenikin, Neutrino spin and spin-flavour oscillations in transversal matter currents with standard and non-standard interactions, Phys.Rev. D 98 (2018) 113009 (14 p.), e-Print: 1808.00302, <https://inspirehep.net>.
5. A.Popov, A.Studenikin, Manifestations of nonzero Majorana CP-violating phases in oscillations of supernova neutrinos, Phys.Rev.D 103 (2021) 11, 115027, e-Print: 2102.07991 (<https://inspirehep.net>).

Дополнительная литература:

1. C. Giunti, A. Studenikin, Electromagnetic interactions of neutrinos: A window to new physics, Rev. Mod. Phys. 87 (2015) 531-591, e-Print: 1403.6344, <https://inspirehep.net>.
2. M. Dvornikov, A.Studenikin, Electric charge and magnetic moment of massive neutrino, Phys.Rev.D 69 (2004) 073001, e-Print: hep-ph/0305206, <https://inspirehep.net>.

3. C. Brogini, C. Giunti, A. Studenikin, Electromagnetic properties of neutrinos, Adv. High Energy Phys. 2012 (2012) 459526 – в открытом доступе <https://downloads.hindawi.com/journals/ahep/2012/459526.pdf> .
4. M. Dvornikov, A. Studenikin, Neutrino spin evolution in presence of general external fields, JHEP 09 (2002) 016, <https://archive.org/details/axiv-hep-ph0202113> .

Интернет-ресурсы:

1. www.arXiv.org.

Перечень лицензионного программного обеспечения, в том числе отечественного производства

При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

1. Программный продукт Red Hat Enterprise Linux Server for HPC Compute Node for Power, LE, Self-support 4 шт. №5540331
2. Программный продукт Red Hat Enterprise Linux Server for HPC Head Node for Power, LE, Standard 1 шт. №5540332
3. Операционная система SUSE Linux Enterprise Server 11 SP4 for x86_64 16 шт.
4. Операционная система Red Hat Enterprise Linux Server 5.0 for x86_64 14шт.
5. Операционная система SUSE Linux Enterprise Server 10 SP3 for ppc64 7 шт.
6. Операционная система Ubuntu 18.04.
7. Программное обеспечение для виртуализации Oracle VM VirtualBox
8. Операционная система ALTLinuxMATEStarterkit 9 лицензияGPL
9. Программный продукт JetBrains IntelliJ IDEA Community Edition Free Educational Licenses
10. Программный продукт JetBrainsPyCharm Community Edition Free Educational Licenses
11. Программный продукт JetBrainsCLion Community Edition Free Educational Licenses
12. Программный продукт UPPAAL (<http://www.uppaal.org/>) академическая лицензия
13. Программный продукт Java 8 (64-bit)Oracle Corporation
14. Программный продукт Java SE Development Kit 8(64-bit) Oracle Corporation
15. Программный продукт NetBeans IDE 8.2 NetBeans.org
16. Программный продукт Dev-C++ Bloodshed Software
17. Программный продуктCodeBlocksThe Code::Blocks Team
18. Программный продукт Free Pascal 3.0.0Free Pascal Team
19. Программный продукт Python 3.5.1 (64-bit)Python Software Foundation
20. Программный продукт R for Windows 3.2.2 R Core Team
21. Программный продуктHaskell Platform 7.10.3 Haskell.org
22. Операционная система Microsoft Windows 7 корпоративная академическая лицензия
23. Операционная система Microsoft Windows 10 Educationакадемическая лицензия
24. Программный продукт Microsoft ProjectProfessional 2013 академическая лицензия

25. Программный продукт Microsoft VisioProfessional 2013 академическая лицензия
26. Программный продукт Microsoft VisualStudioProfessional 2013 - RUS [Русский (Россия)] академическая лицензия

Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. <http://www.edu.ru> – портал Министерства образования и науки РФ
2. <http://www.ict.edu.ru> – система федеральных образовательных порталов «ИКТ в образовании»
3. <http://www.openet.ru> - Российский портал открытого образования
4. <http://www.mon.gov.ru> - Министерство образования и науки Российской Федерации
5. <http://www.fasi.gov.ru> - Федеральное агентство по науке и инновациям

15. Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика». Занятия проводятся в лекционных аудиториях, оборудованными компьютерами и мультимедиа-проекторами.