

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
ФИЛИАЛ МГУ В Г. ДУБНЕ

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора
филиала МГУ в г.Дубне
/ Э.Э. Боос /
«01» сентября 2024 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

Основные понятия физики микромира

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль)/специализация образовательной программы:

Фундаментальная и прикладная ядерная физика

Форма обучения:

Очная

Дубна 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению 03.04.02 «Физика», утверждённым приказом МГУ от 30.12.2020 г. № 1366.

Год (годы) приёма на обучение _____

Авторы–составители:

1. Доктор физ.-мат. наук профессор академик РАН Матвеев Виктор Анатольевич, зав. кафедрой, профессор физического факультета МГУ по совместительству

Руководитель магистерской программы:

Доктор физ.-мат. наук, профессор академик РАН Г.В.Трубников, заведующий кафедрой физического факультета МГУ

Аннотация к рабочей программе дисциплины

Курс направлен на формирование базовых знаний в области теоретической и экспериментальной физики элементарных частиц и астрофизики; ознакомление студентов-экспериментаторов с современными методами теоретического описания различных процессов слабого взаимодействия.

Дисциплина реализуется на 2 курсе в 3 семестре и входит в состав вариативной части.

Объем дисциплины составляет 2 з.е., в том числе 36 академических часа, отведённых на контактную работу обучающихся с преподавателем, 36 академических часа, отведённых на самостоятельную работу обучающихся.

Промежуточная аттестация по дисциплине (модулю) – зачёт в 3 семестре.

1.

1. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина «Основные понятия физики микромира» входит в блок «Профессиональный» вариативной части и является обязательной для освоения обучающимися в 3 семестре

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

Базовые знания в области общей и теоретической физики в объеме классических университетских курсов

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Компетенции	Результаты обучения
ОПК-3	<p><u>Знать</u> достижения современной ядерной физики в разрезе междисциплинарного научного развития</p> <p><u>Уметь</u> применять современные достижения естествознания при анализе и постановке научных задач</p> <p><u>Владеть</u> методами анализа и синтеза современных научных междисциплинарных результатов при проведении профильных научных исследований</p>
МПК-2	<p><u>Знать</u> основные проблемы физики элементарных частиц и физики нейтрино и попытки их решения.</p> <p><u>Уметь</u> анализировать и оценивать существующие модели взаимодействий нейтрино между собой и веществом.</p> <p><u>Владеть</u> знаниями о ведущихся исследованиях и экспериментах физики элементарных частиц, связанных с нейтрино.</p>

4. Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., в том числе: 36 академических часов, отведённых на контактную работу обучающихся с преподавателем, 36 академических часов, отведённых на самостоятельную работу обучающихся.

Контактная работа включает в себя: занятия лекционного типа и занятия семинарского типа.

5. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (ак.ч.)	В том числе				Форма текущего контроля успеваемости, наименование
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) <i>Виды контактной работы, академические часы¹</i>			Самостоятельная работа обучающегося, академические часы	
		Занятия лекционного	Занятия семинарского типа			
Семинары	Лабораторные занятия		Практические занятия *			

¹Текущий контроль успеваемости может быть реализован в рамках занятий лекционного и(или) семинарского типа.

				*				
Введение	10	3	3			6	4	Опрос, проверка домашнего задания
Нейтринные хроники	10	3	3			6	4	Опрос, проверка домашнего задания
Нейтринные очерки	12	3	3			6	6	Опрос, проверка домашнего задания
Масса нейтрино в Стандартной Модели	12	3	3			6	6	Опрос, проверка домашнего задания
Нейтринные осцилляции в вакууме	12	3	3			6	6	Опрос, проверка домашнего задания
Нейтринные осцилляции в веществе	12	3	3			6	6	Опрос, проверка домашнего задания
Промежуточная аттестация							4²	Зачет
Итого	72	36					36	

*Лабораторные занятия, практические занятия относятся к практической подготовке обучающихся.

2 Часы на проведение промежуточной аттестации выделяются из часов самостоятельной работы обучающегося

Тема 1. Введение.

Вопросы для разминки. Краткий обзор современных представлений о роли нейтрино в физике элементарных частиц, ядерной физике, астрофизике, космологии и геофизике. Связь физики нейтрино с физикой космических лучей, гамма-астрономией и неускорительной физикой частиц.

Тема 2. Нейтринные хроники.

История развития представлений о нейтрино: от проблемы непрерывного спектра β -распада (~1914 г.) и гипотезы Паули (1932 г.) до измерения углов смешивания и разностей квадратов масс нейтрино в современных экспериментах. Хронология важнейших идей в теории слабого взаимодействия. Основные этапы становления нейтринной астрофизики.

Тема 3. Нейтринные очерки.

Нейтрино на Земле и в Небесах. Предварительная презентация. Спектры нейтрино и антинейтрино у Земли. Спектр электромагнитных волн. Космический микроволновый фон (СМВ). Избранные результаты эксперимента Planck 2018. Рождение гравитационно-волновой астрономии. Краткая история Вселенной. Основные проблемы космологии. Кривая вращения Галактики. Проблема тёмной материи в виде интеллект-карт. Мультивселенная (краткий очерк). Реликтовые нейтрино (С В). Краткое резюме по измерению суммы масс нейтрино. Космологические зонды для измерения массы нейтрино. Кинетика нейтрино в ранней Вселенной. Поверхность последнего рассеяния нейтрино. Нейтрино и нуклеосинтез. Нейтрино и формирование космологических структур. Космический взгляд на нейтринную рябь. Солнечные нейтрино. pp цепочка. CNO-цикл. Потоки солнечных нейтрино. Будущее Солнца. Хронология экспериментов с солнечными нейтрино. Отступление: Внутреннее строение Земли. Предварительная эталонная модель Земли (PREM). Химический состав Земли (где обитает дьявол?). Распределение Z/A отношения, электронов и кварков в Земле. Тепловой поток на поверхности Земли. Геонейтрино: современные результаты и перспективы развития. Взаимодействие нейтрино с веществом. Сравнение сечений взаимодействия нейтрино и протонов с веществом. Сечения взаимодействий солнечных нейтрино. Сечения взаимодействий нейтрино от сверхновых. Сечения νN -взаимодействий при ускорительных энергиях. Кинематика (квази)упругого рассеяния. Кинематика нейтринорождения пионов. Кинематика глубоконеупругого рассеяния. Динамика νN -взаимодействий. Простой пример: квазиупругое рассеяние. Роль ядерных эффектов. Поляризационная матрица плотности. Сечения νN -взаимодействий при сверхвысоких энергиях.

Тема 4. Масса нейтрино в Стандартной Модели.

Лагранжиан взаимодействия и слабые токи в СМ. Дираковские нейтрино. Параметризация матрицы смешивания Дираковских нейтрино. Случай трёх нейтрино. Диаграмма параметров нейтринных осцилляций. Безнейтринный распад мюона в СМ. Ядерный бета-распад. Бета-распад трития – теория и эксперимент. Троицкая аномалия. Краткое резюме окончательных результатов Троицкого эксперимента. Резюме текущих результатов эксперимента KATRIN. Майорановские нейтрино. Параметризация матрицы смешивания Майорановских нейтрино. Безнейтринный двойной бета-распад – теория и эксперимент. Качельный (see-saw) механизм. Массовый член Дирака–Майораны для одного поколения. Больше нейтральных фермионов. Двойной и обратный see-saw. Радиационный see-saw. Калибровочная B-L симметрия (ТЭВ-ного масштаба) с обратным see-saw. Резюме.

Тема 5. Нейтринные осцилляции в вакууме.

Квантовомеханическая теория. Ангелы и гиппопотамы. Простейший пример: двухфлейворные осцилляции. Краткое изложение стандартной квантовомеханической теории. Некоторые проблемы квантовомеханического (КМ) подхода. Цели и концепции теоретико-полевого подхода. набросок квантовополевого (КТП) подхода. КТП подход на примере реакции $\pi \oplus n \rightarrow \mu \oplus \nu$. Пространственно-временные шкалы. Примеры макроскопических диаграмм. Волновые пакеты в квантовой механике. Пространственно-временная локализация (локальный предел). Локализация импульса (плосковолновой предел). Квазистабильные волновые пакеты (КВП). Другие свойства КВП. Физический смысл вектора \mathbf{r}_a . Средний 4-импульс и масса КВП. Среднее положение КВП. Значение пространственно-временного параметра. Эффективный объем КВП. Волновые пакеты в квантовой теории поля. Одночастичные Фоковские состояния. Состояния волнового пакета. Наиболее общие свойства КВП. Важный нюанс (метафизические замечания). Волновой пакет в конфигурационном пространстве. Приближение узкого КВП. Коммутационная функция. Плосковолновой предел. Поведение коммутационной функции в системе центра инерции. Сводка кинематических соотношений. Многопакетные состояния. Релятивистские Гауссовы пакеты (РГП). Пример: ультрарелятивистский случай. Плосковолновой предел. Функция $\psi_G(p, x)$. Квазистабильный режим. Сокращённый РГП (СРГП). Компендиум. Функция $D_G(p, q; x)$. Многопакетные матричные элементы (примеры). Эффективные размеры и неопределённость импульса СРГП. Область применимости модели СРГП. Правила Фейнмана и интегралы перекрытия. Асимптотические условия. Расчёт макроскопической амплитуды. Эскиз расчёта. Асимптотика на дальних расстояниях. Интегрирование по q_0 . Окончательное выражение для амплитуды. Эффективный нейтринный волновой пакет. Объёмы перекрытия. Микроскопическая вероятность. Резюме (ультрарелятивистский случай). Макроскопическое усреднение. Синхронизированные измерения. Диагональная функция декогеренции. Недиагональная функция декогеренции. Флейворные переходы в асимптотическом режиме. Основные свойства перехода «вероятность». Промежуточные выводы о КТП подходе.

Тема 6. Нейтринные осцилляции в веществе.

Преломление нейтрино в веществе. Пример: вещество постоянной плотности (случай 2). Осцилляции нейтрино высоких энергий в веществе. Обобщённое уравнение МСВ. Основное уравнение. Простые примеры. Полные сечения взаимодействия. Показатели преломления. Задача на собственные значения. Матрица смешивания. Собственные значения. Собственные состояния. Угол смешивания в веществе. Матрица смешивания в веществе. Адиабатическое решение. Адиабатическая теорема. Решение. Предельные случаи. Среда постоянной плотности и состава. Случай $|q| \gtrsim |\Delta s|$. Примеры осцилляций $\mu \leftrightarrow s$. Объекты Торна-Житков. Вырожденный случай. Стандартный механизм МСВ. Выводы.

6. Фонд оценочных средств для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)

6.1. Типовые задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения:

Типовые вопросы для проведения текущей проверки успеваемости:

- Что такое космогенные или ГЗК нейтрино?
- Какой из формфакторов квазиупругого рассеяния нейтрино на свободном нуклоне обращается в нуль при условии выполнения T -инвариантности и S -инвариантности?
- Какая из реакций отвечает за максимальный поток солнечных нейтрино?
- Какие процессы протекают в Солнце?

Типовые вопросы, задания для проведения промежуточной аттестации (зачета):

1. Что Вам известно о современных ускорительных и космологических ограничениях на число типов нейтрино и суммарную массу нейтрино всех типов?
2. Каковы современные экспериментальные оценки долей обычной материи, радиации, тёмной материи, тёмной энергии и нейтрино во Вселенной?
3. В чём заключается проблема «космического совпадения» (cosmic coincidence problem)? Где плотность Σv больше в галактиках или в межгалактическом пространстве? Почему? Выведите формулу для красного смещения безмассовый реликтовых нейтрино.
4. Что такое «поверхность последнего рассеяния» (ППР) реликтовых нейтрино? Можете ли вы привести качественные и количественные зависимости радиуса ППР от массы нейтрино?
5. Что Вы знаете об ограничениях на число типов нейтрино, следующих из данных о первичном нуклеосинтезе?
6. Что Вы знаете о влиянии массивных нейтрино на формирование крупномасштабных структур Вселенной?
7. Кинетика нейтрино в ранней Вселенной (классическое релятивистское уравнение Больцмана, основные реакции).
8. Что Вы можете рассказать об учёте смешивания нейтрино и эффекта преломления в кинетическом уравнении?
9. В чём разница между дираковскими и майорановскими нейтрино?
10. Что такое вакуумная матрица смешивания нейтрино (ПМНС матрица)?
11. Связь полей дираковских нейтрино с определённой массой и определённым флейвором.
12. Связь полей майорановских нейтрино с определённой массой и определённым флейвором.
13. В чём причина сохранения лептонных чисел в Стандартной Модели с безмассовыми нейтрино?
14. Подсчитать число физических фаз в вакуумной матрице смешивания дираковских нейтрино.
15. Подсчитать число физических фаз в вакуумной матрице смешивания майорановских нейтрино. В чём разница между естественной и обратной иерархиями масс нейтрино? Приведите 3-4 примера процессов, идущих с нарушением индивидуальных лептонных чисел, а так же с нарушением полного лептонного числа.

16. Чем определяется малость ширины радиационного (безнейтринного) распада мюона в Стандартной Модели?
17. Что Вы знаете о современном экспериментальном статусе проблемы спектра (иерархии) масс нейтрино?
18. Что Вы знаете о современном экспериментальном статусе CP-нарушения в лептонном секторе Стандартной Модели? Поясните связь нарушения CP- и T-симметрий.
19. Что такое «стерильные нейтрино»? Что Вы знаете о современном экспериментальном статусе проблемы стерильных нейтрино?
20. Поясните качественно физический смысл сомножителей в формуле для β -распада. Что такое эффективная масса нейтрино от β -распада, m_β .
21. Что означает термин «график Кюри»? В чём сложность измерений «на конце спектра»? Что Вы знаете о современных экспериментальных ограничениях на величину m_β .
22. Механизм двойного безнейтринного β распада ($0\nu\beta\beta$).
23. Что такое эффективная масса нейтрино $m_{\beta\beta}$ в $0\nu\beta\beta$ -распаде?
24. Что Вы знаете о современном экспериментальном статусе проблемы $0\nu\beta\beta$
25. Что Вы знаете о результатах эксперимента «Heidelberg-Moscow» по поиску $0\nu\beta\beta$ -распада?
26. Что Вы знаете о проблеме массы нейтрино? Почему малые массы нейтрино свидетельствуют о неполноте Стандартной Модели?
27. Что означает термин «качельный механизм» (see-saw)? Какие типы see-saw Вы знаете?
28. Что Вы знаете об экспериментах по изучению нейтринных осцилляций? Как зависит от энергии длина осцилляций нейтрино?
29. Стандартная квантовомеханическая теория нейтринных осцилляций.
30. Какие положения квантовомеханической (КМ) теории нейтринных осцилляций представляются спорными? Почему эта теория не может справедлива на очень больших расстояниях между источником и детектором? Или может?...
31. Могут ли лёгкие нейтрино «проосциллировать» (превратиться) в тяжёлые? Осциллируют ли реликтовые нейтрино?
32. Что Вы можете рассказать об основных идеях ковариантного квантовполевого подхода к теории нейтринных осцилляций?
33. Что Вы можете сказать об основных масштабах пространственно-временных областей в макроскопической фейнмановской диаграммы?
34. Теория волновых пакетов в КМ и КТП.
35. Что Вы знаете об МСВ эффекте?

6.2. Шкала и критерии оценивания

Результат освоения дисциплин	Критерии оценивания знаний, умений и навыков			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено

Знания	Отсутствие знаний	В целом успешные, но не систематические знания	В целом успешное, но содержащие отдельные пробелы знания	Успешные и систематические знания
Умения	Отсутствие умения применять знания фундаментальных и актуальных проблем.	В целом успешное, но не систематическое умение применять знания	В целом успешное, но содержащие отдельные пробелы умение применять знания	Успешное и систематическое умение применять знания
Навыки	Отсутствие/фрагментарные навыки в решении задач	В целом успешные, но не систематические навыки в решении задач	В целом успешные, но содержащие отдельные пробелы навыки в решении задач	Успешные и систематические навыки в решении задач

7. Ресурсное обеспечение

Перечень основной и дополнительной учебной литературы

1. Zhi-Zhong Xing and Shun Zhou, Neutrinos in Particle Physics, Astronomy and Cosmology. Advanced Topics in Science and Technology in China (Zhejiang University Press, Hangzhou and Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2011).
2. Samoil~M.~Bilenky, Introduction to the Physics of Massive and Mixed Neutrinos, Lect.Not. Phys 817 (2010).
3. Mats Lindroos and Mauro Mezzetto, Beta Beams. Neutrino Beams (Imperial College Press, London, 2010).
4. Donald H. Perkins, Particle Astrophysics. Second Edition. Oxford Master Series in Particle Physics, Astrophysics, and Cosmology (Oxford University Press, 2009).
5. Carlo Giunti and Chung W. Kim, Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics (Oxford University Press Inc., New York, 2007).
6. Claus Grupen, Astroparticle Physics (Springer, 2005).
7. Kai Zuber, Neutrino Physics. Series in High Energy Physics, Cosmology and Gravitation (Taylor & Francis, 2004).
8. Rabindra N. Mohapatra and Palash B. Pal, Massive Neutrinos in Physics and Astrophysics. Third Edition. World Scientific Lecture Notes in Physics, Vol. 72 (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004).

9. Masataka Fukugita and Tsutomu Yanagida, *Physics of Neutrinos and Applications to Astrophysics. Texts and Monographs in Physics* (Springer-Verlag, 2003).
10. H. V. Klapdor-Kleingrothaus and K. Zuber, *Particle Astrophysics. Revised Edition* (Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2000); Г. В.Клапдор-Клайнгротхаус, К. Цюбер, *Астрофизика элементарных частиц* (М.: Редакция журнала *Успехи физических наук*, 2000) (перевод первого немецкого издания 1997 года).
11. H. V. Klapdor-Kleingrothaus and A. Staudt, *Non-accelerator Particle Physics* (Institute of Physics Publishing Ltd., 1995); Г. Клапдор-Клайнгротхаус, А. Штаудт, *Неускорительная физика элементарных частиц* (М.: Наука, 1997).
12. Felix Boehm and Petr Vogel, *Physics of Massive Neutrinos. Second Edition* (Cambridge University Press, 1992); Феликс Боум, Петр Фогель, *Физика массивных нейтрино* (М.: Мир, 1990) (Перевод первого английского издания 1987 года).
13. John N. Bahcall, *Neutrino Astrophysics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1989); Дж. Бакал, *Нейтринная астрофизика* (М.:Мир, 1993).
14. Самоил М. Биленький, *Лекции по физике нейтринных и лептон-нуклонных процессов* (М.: Энергоиздат, 1981).

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

Доступные через интернет журналы по физике элементарных частиц:

1. Теоретическая и математическая физика
2. European Physical Journal C
3. Journal of High Energy Physics
4. Lecture Notes in Physics
5. Nuclear Physics B
6. Physics Letters B
7. Physics Reports
8. Physical Review D
9. Reviews of Modern Physics
10. а также учебное пособие и сборник задач, разработанные для данного курса.

Описание материально-технической базы: курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски

8. Язык преподавания: русский