

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:

Физика нейтрино и ее перспективы

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль)/специализация образовательной программы:

Физика элементарных частиц

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», утвержденным приказом МГУ от 30.12.2020 г. № 1366.

Год (годы) приема 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 В.А. Матвеев, заведующий кафедрой физического факультета МГУ

Аннотация к рабочей программе дисциплины

Цель курса - освоение студентами-экспериментаторами базовых знаний в области современной нейтринной физики и астрофизики, ознакомление с основами теории слабых взаимодействий и решения проблемы включения массы нейтрино в Стандартную модель, смешивания поколений, теории нейтринных осцилляций, методов детектирования нейтрино, механизмов образования нейтрино в атмосфере Земли, Солнце и других астрофизических источниках.

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, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 36 академических часа, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

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

1. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина «Физика нейтрино и ее перспективы» входит в состав вариативной части и реализуется 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
ПК-1	<p><u>Знать</u> разделы ядерной физики, необходимыми для решения поставленной научной задачи</p> <p><u>Уметь</u> применять экспериментальные и теоретические знания при решении поставленной научной задачи</p> <p><u>Владеть</u> экспериментальными и теоретическими методами исследования при решении научных задач в области современной ядерной физики</p>
МПК-2	<p><u>Знать</u> порядок организации научного исследования в области физики нейтрино</p> <p><u>Уметь</u> проводить работу с источниками информации для подготовки плана научного исследования в области физики нейтрино</p> <p><u>Владеть</u> методами научного исследования в области физики нейтрино</p>
МПК-3	<p><u>Знать</u> основные термины и модели в физике нейтрино</p> <p><u>Уметь</u> анализировать эффекты и особенности в процессах с нейтрино и делать на их основе выводы об астрофизических явлениях</p> <p><u>Владеть</u> знаниями об экспериментальном исследовании нейтрино и использовании его в наблюдениях астрофизики</p>

4. Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., в том числе: 36 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 36 академических часов, отведенных 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					Самостоятельная работа обучающегося, академические часы	Форма текущего контроля успеваемости, наименование
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) <i>Виды контактной работы, академические часы¹</i>						
		Занятия лекционного типа (лекции)	Занятия семинарского типа			Всего		
Семинары	Лабораторные занятия		Практические занятия					
Солнечные нейтрино — теория	15	4	4			8	7	Опрос, проверка домашнего задания
Солнечные нейтрино — эксперимент	15	4	4			8	7	Опрос, проверка домашнего задания
Нейтринные аномалии	21	6	6			12	9	Опрос, проверка домашнего задания
Атмосферные и астрофизические нейтрино	15	4	4			8	7	
Промежуточная аттестация							6 ²	Экзамен
Итого	72	36					36	

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

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

Тема 1. Солнечные нейтрино — теория.

Основные уравнения звёздной структуры. Вспомогательные уравнения. Пример: уравнение состояния в Стандартной Солнечной Модели (ССМ). Гелиосейсмология в картинках. Солнечный синтез. pp синтез шаг за шагом. Ветвь pp I. Реакция *pp*. Ветвь pp II. Ветвь pp III. Ветвь pp IV (реакция *hep*). Полная pp цепочка. Профили рождения нейтрино в Солнце. Тренинг. Полна ли pp цепочка? Тритиевые нейтрино. Тритиевые антинейтрино. Ветвь pp V (реакция *heep*). Электронная экранировка. Экскурс: химический состав Солнца. CNO цикл. Полный поли-цикл CNO. CNO-захват электронов. Спектр солнечных нейтрино. Сравнение моделей.

Тема 2. Солнечные нейтрино — эксперимент.

Современное состояние проблемы солнечных нейтрино. Cl-Ar эксперимент в Хоумстеке. Загадка солнечных нейтрино № I. Загадка солнечных нейтрино № II. Предлагаемые решения. Астрофизика и/или ядерная физика. Нестандартные свойства нейтрино. Экзотика и научная фантастика. Ga-Ge детектор SAGE. Ga-Ge детекторы GALLEX и GNO. H₂O Черенковские детекторы (Kamiokande и Super-Kamiokande). Черенковский метод обнаружения частиц. Сезонные вариации потока солнечных нейтрино. Возможные сигнатуры осцилляций солнечных нейтрино. D₂O детектор SNO. Детектор BOREXINO.

Тема 3. Нейтринные аномалии.

Список аномалий. Измерения скорости нейтрино. Проверка лоренц-инвариантности. Ускорительные измерения скорости нейтрино. Астрофизическое ограничение. Возможные объяснения... (пока) не понадобились. В чём была ошибка? GSI Аномалия. Эскиз экспериментальных установок GSI. Измерение скоростей β^+ распада и электронного захвата (ЭЗ). Неэкспоненциальные орбитальные электронные захваты (ЭЗ). Предлагаемые решения.

Тема 4. Атмосферные и астрофизические нейтрино

Атмосферные нейтрино. Почему атмосферные нейтрино важны для физики частиц и астрофизики? Некоторые осложняющие факторы. Ergo. Отступление: распад протона. Ergo... (продолжение). Отступление: Космические лучи. Потоки АН при низких и промежуточных энергиях: геомагнитные эффекты. Потоки АН при низких и промежуточных энергиях: свидетельство осцилляций. Потоки АН при высоких и сверхвысоких энергиях. Астрофизические нейтрино. Космические магнитные поля. Ускорение частиц в космосе. Диаграмма Хилласа. Классификация космических источников нейтрино. Ожидаемые потоки и верхние пределы. Отступление: Галактика и системы координат. Ожидаемые потоки и верхние пределы (продолжение). IceCube революция. Отступление: несколько замечаний о чёрных дырах Шварцшильда. Избранные результаты из ANTARES. Астрофизические проверки стабильности нейтрино. IceCube-170922A. Астрофизические τ -нейтрино в IceCube. Что дальше? P-ONE @ ONC, PLE M. Космические нейтрино сверхвысоких энергий. Методы детектирования (радио, акустический, флюоресцентный). Эффект Аскарьяна. (Гео)синхротронное излучение. Загадка ANITA. Примеры радиодетекторов (ARA, ARIANNA, GRAND, NuMoon, ...).

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:

1. Что такое космогенные или ГЗК нейтрино?
2. Что такое высокоширотное обрезание спектра космических лучей?
3. Какой из процессов взаимодействия ядер практически не существует при распространении КЛ в межзвёздной среде Галактики: а) спалляция/обдирка, б) индуцированное деление, в) испарение, г) фрагментация, е) мультифрагментация?
4. Что такое тепловые солнечные нейтрино?
5. Какие из элементарных частиц были открыты в космических лучах?
6. В каком примерно соотношении рождаются мюонные и электронные нейтрино в общем потоке атмосферных нейтрино (АН) при энергиях, когда не существует вклад в АН от распадов D -мезонов, а метеорологическими и геомагнитными эффектами можно пренебречь?

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

1. В чём заключалась проблема непрерывного β -спектра, обнаруженного в экспериментах Чадвика?
2. В чём заключалась гипотеза Паули, объясняющая наблюдаемые загадки β -спектров? Чем отличаются гипотезы Паули и 4-фермионной теории Ферми?
3. В чём заключалось обобщение 4-фермионной теории Ферми Гамовым и Теллером (1936)? В чём заключалось последующее обобщение Ли и Янга (1956)?
4. В чём заключалась " π - μ схема" Сакаты–Иноуэ?
5. Что Вы знаете об открытии несохранения чётности в слабых взаимодействиях? В каком эксперименте была впервые измерена спиральность нейтрино? Что Вы знаете о самых первых экспериментах по детектированию природных нейтрино?
6. Как (примерно) зависит от энергии $E\nu$ полное сечение $\nu_{\mu}N$ -взаимодействия при высоких энергиях ($E\nu > 100$ ГэВ)?
7. Что Вы знаете о вспышке сверхновой SN1987A? В чём её значение для нейтринной астрономии?
8. Каким образом было установлено, что имеется в точности 3 поколения лёгких активных нейтрино?
9. Что Вы знаете о хлор-аргонном и галлий-германиевых детекторах солнечных нейтрино? Что Вы знаете о подземных черенковских детекторах солнечных и атмосферных нейтрино? Что Вы знаете об эксперименте KamLAND?
10. Что Вы знаете о реакторных антинейтринных экспериментах? Что Вы знаете об эксперименте OPERA?
11. В чём заключается «оперная аномалия»?
12. Что Вы знаете о глубоководных и подлёдных черенковских нейтринных телескопах? Что Вы знаете о радиодетектировании нейтрино сверхвысоких

- энергий? Приведите примеры установок по радиодетектированию. В чём заключается «аномалия ANITA»?
13. В чём заключается «реакторная антинейтринная аномалия»?
 14. Что Вы знаете об акустическом методе детектирования нейтрино сверхвысоких энергий? Какие эксклюзивные реакции дают основные вклады в полное сечение νN -взаимодействия при относительно низких энергиях ($E_i < 10$ ГэВ)?
 15. Оцените порог рождения пиона при взаимодействии нейтрино с протоном.
 16. Что такое гиперзаряд, G-честность, токи первого и второго рода?
 17. Выведите (или проверьте на примерах) формулу Гелл-Манна Нишиджимы.
 18. Что Вы знаете о структурных функциях и формфакторах нуклона?
 19. Докажите, что адронный тензор определяется шестью структурными функциями.
 20. Что такое «резонанс Глэшоу»? Оцените величину резонансной энергии.
 21. Докажите, что слабый заряженный адронный ток определяется пятью формфакторами.
 22. Выразите структурные функции нуклона через формфакторы для квазиупругого νN -рассеяния.
 23. Поляризационная матрица плотности и вектор поляризации лептона в νN -взаимодействиях.
 24. Какая реакция ответственна за максимальный вклад в поток солнечных нейтрино? Какими методами можно измерить поток нейтрино от этой реакции?
 25. Чему равен поток нейтрино в центре Солнца? Испускает ли Солнце антинейтрино?
 26. Что быстрее покидает солнечное ядро фотоны или нейтрино?
 27. Какова (приблизительно) максимальная энергия солнечных нейтрино и какой процесс ответствен за рождение нейтрино таких энергий? Какими методами можно измерить поток нейтрино от этой реакции?
 28. Перечислите основные процессы, участвующие в pp-цепочке.
 29. Что такое CNO (би)цикл? Каков (приблизительно) его вклад в энергетику Солнца?
 30. Доказано ли существование CNO цикла экспериментально?
 31. Что Вы знаете о звездном нуклеосинтезе?
 32. Какие астрофизические явления ответственны за синтез тяжёлых и сверхтяжёлых (тяжелее золота) элементов?
 33. Какая реакция определяет масштаб времени жизни Солнца (времени существования Солнца на главной последовательности)?
 34. Что Вы можете сказать об эволюции Солнца в отдалённом будущем (в отсутствие внешних влияний)? Что такое тройной альфа-процесс (triple-alpha reaction)?
 35. Что больше поток солнечных нейтрино, или поток нейтрино от типичного промышленного ядерного реактора на расстоянии ~ 100 м от него?
 36. Зависит ли поток солнечных нейтрино у Земли от времени года? Какие методы детектирования солнечных нейтрино Вы знаете?
 37. Каковы возможные (гипотетические) источники нейтрино высоких энергий (выше ~ 100 ГэВ) в Солнце?
 38. Что такое «гелиосферные нейтрино»?
 39. Что такое ядерно-каскадный процесс в атмосфере?
 40. Перечислите основные реакции, в которых рождаются атмосферные нейтрино и антинейтрино (далее АН) с энергиями ниже ~ 1 ТэВ.

41. Как (приблизительно) меняется с энергией их относительный вклад в поток АН? В чём заключаются геомагнитные эффекты космических лучей (КЛ)? Как они сказываются на потоках АН?
42. Зависит ли (и если да, то почему) поток АН у поверхности Земли от: географических координат точки наблюдения? зенитного и азимутального углов? солнечной активности? времени года?
43. Где поток АН, приходящих в детектор у поверхности Земли сверху больше у экватора или на средних широтах?
44. Тот же вопрос для усреднённого потока АН, приходящих в нейтринный детектор снизу. Где поток АН больше у поверхности Земли или на высоте ~ 10 км над уровнем моря? В чём заключаются метеорологические эффекты КJ1? Существенны ли они для потоков АН? Что такое «быстрые нейтрино»? Объясните качественно различия спектров и зенитно-угловых распределений «обычных» (π -K) и «быстрых» нейтрино. В каких процессах могут генерироваться атмосферные τ -нейтрино?
45. Объясните качественно соотношение потоков электронных, мюонных и τ -лептонных нейтрино в суммарном потоке АН.
46. Какое отношение имеют атмосферные нейтрино к проблеме поиска распадов протона и нейтрон-антинейтронных осцилляций?
47. Приведите примеры фейнмановских диаграмм, описывающих распад протона.
48. Чем интересен распад протона для космологии?
49. Что такое нейтрон-антинейтронные осцилляции?
50. Каковы (по порядку величины) экспериментальные верхние пределы на время жизни протона для простейших мод распада?
51. В чём заключается тесная связь «классических» космических лучей (далее КЛ) и астрофизических нейтрино?
52. Что Вам известно об энергетическом спектре и химсоставе КЛ? Какова плотность энергии КЛ в Галактике?
53. Объясните связь между магнитной активностью Солнца и потоками КЛ у Земли. Что такое «высокоширотное обрезание» спектра КЛ? В чём разница между точечными и диффузными астрофизическими источниками нейтрино?
54. Какие (предполагаемые) астрофизические источники КЛ, γ и нейтрино вам известны? Объясните смысл термина «вмороженное магнитное поле».
55. Выведите условие Хилласа и объясните физический смысл диаграммы Хилласа. Каковы типичные энергии нейтрино, возникающих при взрывах сверхновых?
56. При каких энергиях (приблизительно) Земля становится непрозрачной для нейтрино? [Сделать грубую оценку.]
57. Каков современный экспериментальный статус проблемы астрофизических нейтрино? Что Вам известно о событии IceCube-170922A?
58. Что такое активное галактическое ядро? радиогалактика? блазар? Что такое экваториальные и галактические координаты?
59. Что Вы знаете о современном экспериментальном статусе гравитационно-волновой астрономии?

60. В чём, по Вашему мнению, заключаются преимущества и недостатки нейтринной астрономии высоких энергий по сравнению с гамма-астрономией и гравитационно-волновой астрономией?
61. Что Вы знаете о космических гамма-вспышках (GRB)?
62. Что Вы знаете о ГЗК обрезании спектра первичных космических лучей? Что Вы знаете о космогенных (ГЗК) нейтрино?
63. В чём разница между «Top-down» и «bottom-up» моделями образования космических лучей и нейтрино сверхвысоких энергий?
64. В чём заключаются pp- и pγ-механизмы генерации астрофизических нейтрино высоких энергий?
65. Что такое «Z-вспышка» («Z-burst»)?
66. Что Вы знаете о методах детектирования космических лучей и нейтрино сверхвысоких энергий (выше ~ 100 EeV)?
67. Объясните механизм ускорения Ферми второго порядка.
68. В чём заключается стохастический механизм ускорения Ферми?
69. Выведите формулу прироста энергии релятивистской частицы при столкновении с массивным объектом («ракеткой»).
70. Выведите условия отражения заряженной частицы от «магнитное зеркала».
71. Выведите условия генерации степенного спектра космических лучей.
72. Что Вы знаете о строении Земли? В чём заключается т.н. «Предварительная эталонная модель Земли» (PREM)?
73. Что Вы знаете о механизмах генерации тепла в Земле? При чём тут метеориты?
74. Каковы типичные энергии геофизических антинейтрино (ГАН)?
75. Какие процессы ответственны за образование основного потока ГАН?
76. Какова пороговая энергия детектирования ГАН? [Вывести формулу.]
77. Перечислите основные фоновые процессы в экспериментах по детектированию ГАН.
78. Каковы возможные (гипотетические) источники нейтрино высоких и сверхвысоких энергий (выше ~100 ГэВ) в центре Земли?
79. В чём заключается гипотеза геореактора? При чём тут Габон?
80. Какова (примерно) температура, микроволнового электромагнитного излучения (СМВ)? Какова числовая плотность и средняя энергия реликтовых фотонов?
81. Каков порядок величины анизотропии СМВ и в чём важность наблюдаемой неизотропности СМВ?
82. В чём заключается причина анизотропии СМВ?
83. Проанализируйте разложение температурных флуктуаций СМВ по сферическим гармоникам и объясните физический смысл углового спектра мощности СМВ.
84. Объясните причину появления нетривиального дипольного вклада в спектр мощности СМВ.
85. Что Вы знаете об Аттракторе Шепли (Shapley Attractor) и Дипольном Отталкивателе (Dipole Repeller)?
86. Выведите формулу для красного смещения СМВ.
87. В чём заключается проблема с постоянной Хаббла, возникшая после недавней (2018) обработки данных эксперимента Planck?

88. Что Вам известно об инфляционных моделях ранней эволюции Вселенной? Об альтернативных моделях?
89. Перечислите основные этапы (эпохи) эволюции ранней Вселенной (желательно с числами).
90. Что Вы знаете о первичном нуклеосинтезе?
91. Что Вы знаете о тёмной материи? О тёмной энергии?
92. Прокомментируйте известные Вам гипотезы о природе тёмной материи.
93. Сделайте грубую оценку средней температуры и средней энергии реликтовых нейтрино (ν_B), их числовой плотности, локального потока.

6.2. Шкала и критерии оценивания

Результат освоения дисциплины	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 содержащее 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 содержащее 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 содержащее 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 профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. База данных РИНЦ (российский индекс научного цитирования) <http://www.elibrary.ru>
2. Обеспечение самостоятельной работы: доступ к библиотеке и базам данных по журналам Теоретическая и математическая физика, European Physical Journal C, Journal of High Energy Physics, Lecture Notes in Physics, Nuclear Physics B, Physics Letters B, Physics Reports, Physical Review D, Reviews of Modern Physics.

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

8. Язык преподавания: русский