

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 /  
«14» \_\_\_\_\_ 2022 г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

**Наименование дисциплины:**

Элементы нейтринной физики и астрофизики

---

**Уровень высшего образования:**

Магистратура

---

**Направление подготовки:**

03.04.02 Физика

---

**Направленность (профиль) ОПОП:**

Физика элементарных частиц

---

**Форма обучения:** Очная форма обучения

---

Дубна 2022 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 программы магистратуры 03.04.02 «Физика».

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
2. Кандидат физ.-мат. наук Наумов Вадим Александрович, почасовик МГУ

Руководитель магистерской программы:

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

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины «Элементы нейтринной физики и астрофизики»**

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, смешивания поколений, теории нейтринных осцилляций, методов детектирования нейтрино, механизмов образования нейтрино в атмосфере Земли, Солнце и других астрофизических источниках.

### **Разделы рабочей программы**

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
4. Формат обучения.
5. Язык обучения.
6. Содержание дисциплины.
7. Объем дисциплины
8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.
10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
11. Шкала оценивания.
12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Элементы нейтринной физики и астрофизики» реализуется на 2-ом курсе в 3-ем семестре магистратуры и входит в состав вариативной части.

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

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

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

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции	Результаты обучения
<b>МПК-3</b> Способен самостоятельно (или) в составе научного коллектива применять математические методы для исследования физических явлений и процессов в области физики элементарных частиц при решении задач профессиональной деятельности	<b>ИМПК-3.1</b> Знает основные математические методы, применяемые при исследовании в области физики элементарных частиц	<b>З-1</b> Знать: основные термины и модели в физике нейтрино <b>У-1</b> Уметь: анализировать эффекты и особенности в процессах с нейтрино и делать на их основе выводы об астрофизических явлениях <b>В-1</b> Владеть: знаниями об экспериментальном исследовании нейтрино и использовании его в наблюдениях астрофизики

3. **Форма обучения:** очная.

4. **Язык обучения:** русский.

5. **Содержание дисциплины**

*Тема 1. Солнечные нейтрино — теория.*

Основные уравнения звёздной структуры. Вспомогательные уравнения. Пример: уравнение состояния в ССМ. Гелиосейсмология в картинках. Солнечный синтез.  $pp$  синтез шаг за шагом. Ветвь  $pp$  I. Реакция  $pep$ . Ветвь  $pp$  II. Ветвь  $pp$  III. Ветвь  $pp$  IV (реакция  $hep$ ). Полная  $pp$  цепочка. Профили рождения нейтрино в Солнце. Тренинг. Полна ли  $pp$  цепочка? Третье нейтрино. Третье 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. H<sub>2</sub>O Черенковские детекторы (Kamiokande и Super-Kamiokande). Черенковский метод обнаружения частиц. Сезонные вариации потока солнечных нейтрино. Возможные сигнатуры осцилляций солнечных нейтрино. D<sub>2</sub>O 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  $\beta^+$  распада и электронного захвата (ЭЗ). Неэкспоненциальные орбитальные ЭЗ распады. Предлагаемые решения.

**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			Учебно-практические занятия	
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров		
Элементы нейтринной физики и астрофизики	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 «Элементы нейтринной физики и астрофизики» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса; семинарские занятия, предусматривающие углубленное изучение и обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются на семинарских занятиях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

		Вс его ча со в	Ле кц ии	Се ми на ры	Учебно- практич еские занятия (лаборат орные или практич еские занятия)	Са мо ст оя те ль на я ра бо та	
1	Солнечные нейтрино — теория	22	6	6		10	
2	Солнечные нейтрино — эксперимент	22	6	6		10	
3	Нейтринные аномалии	22	6	6		10	
	Промежуточная аттестация	6				6	экзамен
<b>ИТОГО:</b>		72	18	18		36	

ДЗ- домашнее задание, Оп- опрос, КР- контрольная работа, Т- тестирование, Реф - реферат

#### 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Элементы нейтринной физики и астрофизики» осуществляется на лекциях и семинарских занятиях и заключается в оценке активности и качества участия в опросах и собеседованиях по проблемам, изучаемых в рамках тем лекционных занятий, аргументированности позиции; оценивается ширина используемых теоретических знаний.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Элементы нейтринной физики и астрофизики» проводится в третьем семестре в форме экзамена.

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).

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
<b>Оценочные средства текущего контроля</b>		

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 аспиранта по изученной теме.	Образцы тестов
<b>Оценочные средства промежуточной аттестации</b>		
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 по 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/ неудовлетворительно	3/ удовлетворительно	4/ хорошо	5/ отлично
ЗНАТЬ: основные термины и модели в физике нейтрино ИМПК-3.1	Отсутствие знаний основных терминов и моделей в физике нейтрино	В целом успешные, но не систематические знания основных терминов и моделей в физике нейтрино	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных терминов и моделей в физике нейтрино	Успешные и систематические знания основных терминов и моделей в физике нейтрино
УМЕТЬ: анализировать эффекты и особенности в процессах с нейтрино и делать на их основе выводы об астрофизических явлениях ИМПК-3.1	Отсутствие умения анализировать эффекты и особенности в процессах с нейтрино и делать на их основе выводы об астрофизических явлениях	В целом успешное, но не систематическое умение анализировать эффекты и особенности в процессах с нейтрино и делать на их основе выводы об астрофизических	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение анализировать эффекты и особенности в процессах с нейтрино и делать на их основе выводы об	Успешное и систематическое умение анализировать эффекты и особенности в процессах с нейтрино и делать на их основе выводы об астрофизических явлениях

		явлениях	астрофизических явлениях	
ВЛАДЕТЬ: знаниями об экспериментальном исследовании нейтрино и использовании его в наблюдениях астрофизики ИМПК-3.1	Отсутствие/фрагментарное владение знаниями об экспериментальном исследовании нейтрино и использовании его в наблюдениях астрофизики	В целом успешное, но не систематическое владение знаниями об экспериментальном исследовании нейтрино и использовании его в наблюдениях астрофизики	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владения знаниями об экспериментальном исследовании нейтрино и использовании его в наблюдениях астрофизики	Успешное и систематическое владение знаниями об экспериментальном исследовании нейтрино и использовании его в наблюдениях астрофизики

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

### *Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся*

#### *Пример:*

#### Вопросы по теории:

1. Измерения скорости нейтрино.
2. Химический состав Солнца. CNO цикл.

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

Экзамен проводится в виде письменной работы с последующим собеседованием по изучаемым темам.

### *Материалы промежуточной аттестации обучающихся*

#### Вопросы к экзамену:

1. В чём заключалась проблема непрерывного  $\beta$ -спектра, обнаруженного в экспериментах Чадвика?
2. В чём заключалась гипотеза Паули, объясняющая наблюдаемые загадки  $\beta$ -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 "л-м-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  $\nu N$ -взаимодействия при высоких энергиях ( $E_\nu > 100$  ГэВ)?
7. Что Вы знаете о вспышке сверхновой SN1987A? В чём ее 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  $\nu N$ -взаимодействия при относительно низких энергиях ( $E_\nu < 10$  ГэВ)?
15. Оцените порог рождения пиона при взаимодействии нейтрино с протоном.
16. Что такое гиперзаряд, G-чстность, 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  $\nu N$ -рассеяния.
23. Поляризационная матрица плотности и вектор поляризации лептона в  $\nu N$ -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 ответ-ствен 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  $\sim 100$  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  $\sim 100$  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  $\sim 1$  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  $\sim 10$  км над уровнем моря? В чём заключаются метеорологические эффекты КЛ? Существенны ли они для потоков АН? Что такое «быстрые нейтрино»? Объясните качественно различия спектров и зенитно-угловых распределений «обычных» ( $\pi$ -К) и «быстрых» нейтрино. В каких процессах могут генерироваться атмосферные  $\tau$ -нейтрино?
45. Объясните качественно соотношение потоков электронных, мюонных и  $\tau$ -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,  $\gamma$  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  $\sim 100 \text{ EeV}$ )?
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 зеркало».
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)?
74. Что Вы знаете о механизмах генерации тепла в Земле? При чём тут метеориты?
75. Каковы типичные энергии геофизических антинейтрино (ГА)?
76. Какие процессы ответственны за образование основного потока ГА?
77. Какова пороговая энергия детектирования ГА? [Вывести формулу.]
78. Перечислите основные фоновые процессы в экспериментах по детектированию ГА.
79. Каковы возможные (гипотетические) источники нейтрино высоких и сверхвысоких энергий (выше  $\sim 100 \text{ ГэВ}$ ) в центре Земли?
81. В чём заключается гипотеза геореактора? При чём тут Габон?
82. 9. Какова (примерно) температура, микроволнового электромагнитного излучения (СМВ)? Какова числовая плотность и средняя энергия реликтовых фотонов?
83. Каков порядок величины анизотропии СМВ и в чём важность наблюдаемой неизотропности СМВ?
84. В чём заключается причина анизотропии СМВ?
85. Проанализируйте разложение температурных флуктуаций СМВ по сферическим гармоникам и объясните физический смысл углового спектра мощности СМВ.
86. Объясните причину появления нетривиального дипольного вклада в спектр мощности СМВ.
87. Что Вы знаете об Аттракторе Шепли (Shapley Attractor) и Дипольном Отталкивателе (Dipole Repeller)?
88. Выведите формулу для красного смещения СМВ.
89. В чём заключается проблема с постоянной Хаббла, возникшая после недавней (2018) обработки данных эксперимента Planck?
90. Что Вам известно об инфляционных моделях ранней эволюции Вселенной? Об альтернативных моделях?
91. Перечислите основные этапы (эпохи) эволюции ранней Вселенной (желательно с числами).
92. Что Вы знаете о первичном нуклеосинтезе?
93. Что Вы знаете о тёмной материи? О тёмной энергии?
94. Прокомментируйте известные Вам гипотезы о природе тёмной материи.

95. Сделайте грубую оценку средней температуры и средней энергии реликтовых нейтрино ( $\nu_B$ ), их числовой плотности, локального потока.

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

##### Основная литература

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. 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. Н. В. Кlapдор-Kleingrothaus and К. Zuber, Particle Astrophysics. Revised Edition (Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2000); Г. В.Кlapдор-Клайнгротхаус, К. Цюбер, Астрофизика элементарных частиц (М.: Редакция журнала Успехи физических наук, 2000) (перевод первого немецкого издания 1997 года).
11. Н. В. 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).

При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

1. Операционная система Astra Linux ( <https://astralinux.ru/> ) или аналог, с офисным пакетом, с пакетами разработчика.

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.

**Материально-техническое обеспечение**

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика», курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски.