

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 /  
« 09 » 2022 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Наименование дисциплины:**

Избранные главы физики элементарных частиц

---

**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 «Избранные главы физики элементарных частиц»**

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.

### **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 «Избранные главы физики элементарных частиц» 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-2</b> Способен ставить, формализовать и решать задачи в области физики элементарных частиц	<b>ИМПК-2.3</b> Знает основные и перспективные направления физики элементарных частиц	<b>З-1</b> Знать: основные проблемы физики элементарных частиц и физики нейтрино и попытки их решения. <b>У-1</b> Уметь: анализировать и оценивать существующие модели взаимодействий нейтрино между собой и веществом. <b>В-1</b> Владеть: знаниями о проводящихся исследованиях и экспериментах физики элементарных частиц, связанных с нейтрино.

3. **Форма обучения:** очная.

4. **Язык обучения:** русский.

5. **Содержание дисциплины**

*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  $\beta$ -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.  $\nu\nu$  цепочка. СНО-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. 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  $\tau$ -нейтрино в IceCube. Что дальше? P-ONE @ ONC, PLE M. Космические нейтрино сверхвысоких энергий. Методы детектирования (радио, акустический, флуоресцентный). Эффект Аскарьяна. (Гео)синхротронное излучение. Загадка ANITA. Примеры радиодетекторов (ARA, ARIANNA, GRAND, NuMoon, ...). Взаимодействие нейтрино с веществом. Сравнение сечений взаимодействия нейтрино и протонов с веществом. Сечения взаимодействий солнечных нейтрино. Сечения взаимодействий нейтрино от сверхновых. Сечения N-взаимодействий при ускорительных энергиях. Кинематика (квази)упругого рассеяния. Кинематика нейтринорождения пионов. Кинематика глубоконеупругого рассеяния. Динамика N-взаимодействий. Простой пример: квазиупругое рассеяние. Роль ядерных эффектов. Поляризационная матрица плотности. Сечения N-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 В-L симметрия (ТэВного масштаба) с обратным see-saw. Резюме.

*Тема 5. Нейтринные осцилляции в вакууме.*

Квантово-механическая 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  $\pi \oplus p \rightarrow \mu \oplus \nu_\tau$ . 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  $\psi_G(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ . Квазистабильный режим. Сокращённый РГП (СРГП). Компендиум. Функция  $DG(\mathbf{p}, \mathbf{q}; \mathbf{x})$ . 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.

**7. Объем дисциплины**

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетны	объем учебной нагрузки в ак. часах		
		Общая	в том числе ауд.занятий	Самост

	х единица х	трудое мкость	Общая аудио рная нагруз ка	Ле кц ий	Се ми нар ов	Учебн о- практи ческие заняти я	оательн ая работа студент ов
Избранные главы физики элементарных частиц	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 «Избранные главы физики элементарных частиц» 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.

№ тем ы		Виды учебной нагрузки и их трудоёмкость, часы					Са мо ст оя те ль на я ра бо та	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Вс его ча со в	Л е к ц и и	С е м и на р ы	Учебно- практичес кие занятия (лаборато рные или практичес кие занятия)			
1	Введение	10	3	3		4		
2	Нейтринные хроники	10	3	3		4		
3	Нейтринные очерки	12	3	3		6		
4	Масса нейтрино в Стандартной Модели	12	3	3		6		
5	Нейтринные осцилляции в вакууме	12	3	3		6		
6	Нейтринные осцилляции в веществе	12	3	3		6		
	Промежуточная аттестация	4				4	зачет	

<b>ИТОГО:</b>	72	1 8	1 8		36	
---------------	----	--------	--------	--	----	--

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

### 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Избранные главы физики элементарных частиц» 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 широта используемых теоретических знаний.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Избранные главы физики элементарных частиц» проводится в третьем семестре в форме зачета в виде письменной работы.

### 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 зачету
Собеседование	Средство, позволяющее получить экспертную оценку знаний, умений и навыков по для оценивания и анализа	Требования к порядку проведения



	различных фактов и явлений в своей профессиональной области.	собеседования
--	--	---------------

## 11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
<b>ЗНАТЬ:</b> основные проблемы физики элементарных частиц и физики нейтрино и попытки их решения ИМПК-2.3	Отсутствие знаний основных проблем физики элементарных частиц и физики нейтрино и попыток их решения	В целом успешные, но не систематические знания основных проблем физики элементарных частиц и физики нейтрино и попыток их решения	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных проблем физики элементарных частиц и физики нейтрино и попыток их решения	Успешные и систематические знания основных проблем физики элементарных частиц и физики нейтрино и попыток их решения
<b>УМЕТЬ:</b> анализировать и оценивать существующие модели взаимодействий нейтрино между собой и веществом ИМПК-2.3	Отсутствие умения анализировать и оценивать существующие модели взаимодействий нейтрино между собой и веществом	В целом успешное, но не систематическое умение анализировать и оценивать существующие модели взаимодействий нейтрино между собой и веществом	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение анализировать и оценивать существующие модели взаимодействий нейтрино между собой и веществом	Успешное и систематическое умение анализировать и оценивать существующие модели взаимодействий нейтрино между собой и веществом
<b>ВЛАДЕТЬ:</b> знаниями о проводящихся исследованиях и экспериментах физики элементарных частиц, связанных с нейтрино ИМПК-2.3	Отсутствие/фрагментарное владение знаниями о проводящихся исследованиях и экспериментах физики элементарных частиц, связанных с нейтрино	В целом успешное, но не систематическое владение знаниями о проводящихся исследованиях и экспериментах физики элементарных частиц, связанных с нейтрино	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение знаниями о проводящихся исследованиях и экспериментах физики элементарных частиц, связанных с нейтрино	Успешное и систематическое владение знаниями о проводящихся исследованиях и экспериментах физики элементарных частиц, связанных с нейтрино

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

### *Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся*

#### **Пример:**

#### Вопросы по теории:

1. Безнейтринный распад мюона в Стандартной Модели.
2. Майорановские нейтрино.

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

Зачет проводится в форме письменной работы.

#### *Материалы промежуточной аттестации обучающихся*

##### Вопросы к зачету:

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  $\Sigma v$  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 определенной массой и определенным флейвором.
12. Связь полей майорановских нейтрино с определенной массой и определенным 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  $\beta$ -распада. Что такое эффективная масса нейтрино от  $\beta$ -распада,  $m\beta$ .
21. Что означает термин «график Кюри»? В чём сложность измерений «на конце спектра»? Что Вы знаете о современных экспериментальных ограничениях на величину  $m\beta$ .
22. Механизм двойного безнейтринного  $\beta$  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 квантового 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?

#### **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. 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).

При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

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

Электронные ресурсы, включая доступ к базам данных:

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.

#### **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.