

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

ФИЗИКА НЕЙТРИНО

4 Семестр

Раздел 1 Эксперименты на адронных коллайдерах.

1.1 Контроль по итогам (КИ) - 8 Неделя

АННОТАЦИЯ

Курс лекций «Физика нейтрино» включает в себя следующие основные разделы.

Предсказание и открытие нейтрино. Обнаружение мюонного нейтрино, измерение спиральности нейтрино, открытие нарушения пространственной четности в слабых взаимодействиях. Будет рассмотрена физика слабых взаимодействий, V-A теория, фундаментальные дискретные симметрии C, P, T, CP и CPT. Обсуждается теория Вайнберга-Салама (объединение электромагнитных и слабых взаимодействий) и свойства нейтрино в рамках Стандартной Модели. Рассматривается открытие нейтральных токов и промежуточных бозонов.

Значительное внимание уделено осцилляциям нейтрино. Изложена идея Б.М. Понтекорво и экспериментальное открытие нейтринных осцилляций в экспериментах с солнечными и атмосферными нейтрино. Детально рассмотрены ускорительные и реакторные осцилляционные эксперименты, измерение угла смешивания θ_{13} и поиск CP нарушения в лептонном секторе Стандартной Модели. Представлена феноменология нейтринных осцилляций в вакууме и в веществе. Излагаются дальнейшие перспективы осцилляционных экспериментов следующего поколения.

Рассмотрены эксперименты по прямому измерению массы нейтрино в бета распаде трития. Представлены ограничения на суммарную массу нейтрино из космологических данных. Обсуждается природа нейтрино: Майорановские или Дираковские частицы. Рассмотрены эксперименты по поиску безнейтринного двойного бета распада и представлены результаты по исследованию свойств нейтрино.

Также рассмотрены нейтринные аномалии: указания на существования стерильных нейтрино, полученные в ускорительных, реакторных радиохимических экспериментах. Обсуждаются последние экспериментальные результаты по поиску легких и тяжелых стерильных нейтрино. Рассматривается нейтринная астрофизика высоких энергий, астрофизические источники нейтрино, космогенные нейтрино, аннигиляция темной материи. Байкальский подводный нейтринный телескоп, эксперименты ICECUBE и ANTARES.

ABSTRACT

The lecture course “*Neutrino Physics*” includes the following main sections:

Prediction and Discovery of the Neutrino.

The detection of the muon neutrino, measurement of neutrino helicity, and the discovery of parity violation in weak interactions are discussed. The course covers the physics of weak interactions, the V-A theory, and the fundamental discrete symmetries: C, P, T, CP, and CPT. The Weinberg–Salam theory (unification of electromagnetic and weak interactions) and the properties of neutrinos within the Standard Model are also examined, along with the discovery of neutral currents and intermediate vector bosons.

Significant attention is devoted to neutrino oscillations.

The course presents B.M. Pontecorvo's idea and the experimental discovery of neutrino oscillations in solar and atmospheric neutrino experiments. Accelerator and reactor-based oscillation experiments are examined in detail, including the measurement of the mixing angle θ_{13} and the search for CP violation in the lepton sector of the Standard Model. The phenomenology of neutrino oscillations in vacuum and matter is presented, along with future prospects for next-generation oscillation experiments.

Experiments for direct measurement of neutrino mass in tritium beta decay are discussed. The course also presents constraints on the sum of neutrino masses derived from cosmological data. The nature of neutrinos—whether they are Majorana or Dirac particles—is explored. Experiments searching for neutrinoless double beta decay are reviewed, along with their results on neutrino properties.

Neutrino anomalies are also considered, including indications of sterile neutrinos observed in accelerator, reactor, and radiochemical experiments. The latest experimental results in the search for light and heavy sterile neutrinos are discussed. The course also covers high-energy neutrino astrophysics, astrophysical sources of neutrinos, cosmogenic neutrinos, and dark matter annihilation. Key experiments such as the Baikal underwater neutrino telescope, ICECUBE, and ANTARES are included.

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Курс лекций «Нейтринная физика» знакомит студента с основными теоретическими положениями, методами, экспериментальными установками и результатами в области нейтринной физики. Он создает необходимую базу для понимания и дальнейшего более глубокого изучения этой области науки и возможности научной работы в нейтринной физике.

1. PURPOSES OF THE EDUCATIONAL COURSE

The lecture course “*Neutrino Physics*” introduces students to the fundamental theoretical principles, methods, experimental setups, and key results in the field of neutrino physics. It provides the essential foundation for understanding and further, more in-depth study of this area of science, as well as for pursuing research work in neutrino physics.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО

Для освоения данной дисциплины обучающийся должен обладать знаниями и умениями в объеме нескольких курсов высшей школы. В частности,

– иметь хорошую подготовку по ряду математических дисциплин, таких как математический анализ, линейная алгебра, дифференциальные и интегральные уравнения, теория групп. В частности, обучающийся должен быть знаком с такими понятиями как ряд, функция, функционал, поле, должен обладать знаниями достаточными для решения дифференциальных и интегральных уравнений, должен быть знаком со специальными и обобщенными функциями, иметь базовые знания по теории групп;

– обладать знаниями в объеме не меньше стандартных курсов квантовой механики и классической электродинамики, уметь оперировать с такими понятиями как квантовый оператор, коммутационные соотношения, волновая функция, каноническое квантование, вторичное квантование, Бозе и Ферми статистика, понимать качественное поведение волновых

функций в задаче о связанном состоянии и в задаче рассеяния, иметь представление об аналитических свойствах волновой функции в комплексной плоскости импульса и энергии;

- понимать сущность алгоритмических предписаний и демонстрировать умение действовать в соответствии с предложенным алгоритмом;
- иметь навыки устных, письменных, инструментальных вычислений.

2. THE COURSE IN THE EDUCATIONAL PROGRAM

To successfully complete this course, student must possess comprehensive knowledge in a few disciplines of the high school. In particular,

- they should be well educated in mathematics (analysis, linear algebra, differential and integral equations, theory of groups and representations). The student must be familiar with such notions as series, function, functional, field and must be able to solve differential and integral equations, must be familiar with special and generalised functions as well as with the basic principles of the theory of groups;
- they must complete the standard courses in Quantum Mechanics and Classical Electrodynamics and be able to master such notions as quantum operator, commutation relations, wave function, canonical quantization, second quantisation, Bose and Fermi statistics, then understand the qualitative behaviour of the wave functions for a bound-state problem and a scattering problem, possess basic knowledge in analytical properties of the wave functions in the complex momentum and energy planes;
- they must have the idea of algorithms and demonstrate the ability to follow the prescribed algorithm;
- they must possess basic abilities of various types of calculations.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Календарный план

	Тема занятия	Лекции	Семинары	Самост. работа
1	Введение. Слабые взаимодействия. Гипотеза нейтрино. Фундаментальные симметрии. Нарушение P-четности	1	1	0
2	Открытие нейтрино в реакторном эксперименте. Открытие мюонных нейтрино. Спиральность нейтрино.	1	1	0
3	V-A теория. Промежуточные бозоны. Нейтральные токи.	1	1	0
4	Стандартная солнечная модель. Детектирование солнечных нейтрино. Открытие осцилляций солнечных нейтрино	1	1	0
5	Атмосферные нейтрино. Детектор СуперКамиоканде. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино	1	1	0
6	Феноменология нейтринных осцилляций. Осцилляций нейтрино в вакууме и в веществе	1	1	0
7	Ускорительные эксперименты с длинной базой	1	1	0
8	Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах	1	1	0
9	Измерение угла смешивания θ_{13}	1	1	0
10	Поиск CP нарушения в нейтринных	1	1	0

	осцилляциях			
11	Прямое измерение массы нейтрино. Модель качелей.	1	1	0
12	Природа нейтрино. Поиск безнейтринного двойного бета распада	1	1	0
13	Нейтрино и космология. Реликтовые нейтрино. Стерильные нейтрино	1	1	0
14	Нейтринная астрофизика.	1	1	0
15	Планируемые нейтринные эксперименты. Заключение.	1	1	0
Итого часов		30	30	

Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

1. Тема 1

Введение в курс нейтринной физики. Краткое изложение физики слабых взаимодействий. Изложение Гипотезы В.Паули о существовании нейтрино. Изложение фундаментальных дискретных S, P, T, CP, CPT симметрий. Гипотеза о нарушении пространственной четности и экспериментальное обнаружение в эксперименте ν_μ .

2. Тема 2

Регистрация нейтрино в реакторном эксперименте Рейнеса и Коуэна. Открытие мюонных нейтрино в ускорительном эксперименте в БНЛ. Понятие спиральности нейтрино и экспериментальное измерение спиральности в эксперименте Гольдхабер.

3. Тема 3

$V-A$ теория слабого взаимодействия. Гипотеза промежуточных векторных бозонов, объединение электромагнитного и слабого взаимодействия. Экспериментальное обнаружение нейтральных токов. Открытие W и Z бозонов в экспериментах в ЦЕРН.

4. Тема 4

Описание Стандартной Солнечной модели. Поток солнечных нейтрино на Земле. Обнаружение дефицита солнечных нейтрино в эксперименте Дэвиса, в галлиевых экспериментах и эксперименте Камиоканде. Гипотеза Б.М.Понтекорво об осцилляциях нейтрино. Открытие осцилляций солнечных нейтрино в эксперименте SNO.

5. Тема 5

Регистрация атмосферных нейтрино в подземных экспериментах. «Атмосферная аномалия». Водные черенковские детекторы Камиоканде и СуперКамиоканде. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино в эксперименте СуперКамиоканде.

6. Тема 6

Феноменология нейтринных осцилляций. Рассмотрение осцилляций двух типов нейтрино. Получение выражений для вероятности осцилляций. Матрица смешивания Понтекорво-Маки-Накагава-Саката для трех типов нейтрино. Параметры нейтринных осцилляций.

7. Тема 7

Исследование осцилляций нейтрино в ускорительных экспериментах с длинной базой. Эксперименты K2K, MINOS, OPERA. Смещенные от оси пучки нейтрино. Эксперименты с

длинной базой второго поколения T2K и NOvA. Открытие осцилляцию мюонных нейтрино в электронные.

8. Тема 8

Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах. Метод детектирования реакторных антинейтрино. Эксперимент с длинной базой КамЛанд. Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах Daya Bay, RENO и Double Chooz.

9. Тема 9

Измерение угла смешивания θ_{13} в ускорительных и реакторных экспериментах. Перспективы для измерения иерархии масс нейтрино и поиска CP нарушения в лептонном секторе Стандартной Модели. Структура PMNS матрицы смешивания.

10. Тема 10

Поиск нарушения CP симметрии в нейтринных осцилляциях. Методика поиска CP нечетной асимметрии при измерении осцилляций мюонных нейтрино и антинейтрино в эксперименте T2K. Использование реакторных данных для повышения чувствительности эксперимента. Первое указание на CP нарушение в эксперименте T2K. Результаты эксперимента NOvA.

11.Тема11.

Прямое измерение массы электронного нейтрино в бета распаде трития. Эксперименты Троицк-масс и Майнц. Метод магнитной адиабатической коллимации. Эксперимент КАТРИН. Ограничение на эффективную массу электронного нейтрино.

12. Тема 12

Нейтрино Майорановская или Дираковская частица. Физика безнейтринного двойного бета распада. Ядерные матричные элементы. Экспериментальные методы поиска безнейтринного двойного бета распада в германиевых, ксеноновых и криогенных детекторах. Экспериментальные ограничения на эффективную массу нейтрино, полученные в экспериментах КамЛанд-Zen, GERDA. Ближайшие перспективы.

13. Тема 13

Нейтрино и космология. Ограничения на сумму масс нейтрино из космологических данных. Реликтовые нейтрино. Нейтрино от взрывов сверхновых. Стерильные нейтрино. Аномалия LSND, реакторная и галлиевая аномалия. Ограничения на параметры легких стерильных нейтрино из реакторных, ускорительных и астрофизических экспериментов.

14. Тема 14

Нейтринная астрофизика высоких энергий. Байкальский подводный нейтринный телескоп, эксперименты ICECUBE, ANTARES. Астрофизические источники нейтрино.

15.Тема 15

Рассматриваются нейтринные эксперименты следующего поколения ГиперКамиоканде и DUNE. Основными целями этих экспериментов являются поиск CP нарушения в нейтринных осцилляциях, определение иерархии масс нейтрино, поиск распада протона, регистрация реликтовых нейтрино от сверхновых. Будет рассмотрена экспериментальная методика и чувствительность этих экспериментов к различным физическим процессам. В заключении будут изложены основные итоги курса и проанализированы основные фундаментальные результаты, полученные в нейтринной физике.

	Chapters	Lectures	Seminars	Homework
1	Introduction. Weak Interactions. The Neutrino Hypothesis. Fundamental Symmetries. Parity Violation.	1	1	0
2	Discovery of the Neutrino in Reactor Experiments. Discovery of Muon Neutrinos. Neutrino Helicity.	1	1	0
3	V-A Theory. Intermediate Vector Bosons. Neutral Currents.	1	1	0
4	Standard Solar Model. Detection of Solar Neutrinos. Discovery of Solar Neutrino Oscillations.	1	1	0
5	Atmospheric Neutrinos. The Super-Kamiokande Detector. Discovery of Atmospheric Neutrino Oscillations.	1	1	0
6	Phenomenology of Neutrino Oscillations. Neutrino Oscillations in Vacuum and in Matter.	1	1	0
7	Long-Baseline Accelerator Experiments.	1	1	0
8	Measurement of Oscillation Parameters in Reactor Experiments.	1	1	0
9	Measurement of the Mixing Angle θ_{13} .	1	1	0
10	Search for CP Violation in Neutrino Oscillations.	1	1	0
11	Direct Measurement of Neutrino Mass. The See-Saw Mechanism.	1	1	0
12	Nature of Neutrinos. Search for Neutrinoless Double Beta Decay.	1	1	0
13	Neutrinos and Cosmology. Relic Neutrinos. Sterile Neutrinos.	1	1	0
14	Neutrino Astrophysics.	1	1	0
15	Planned Neutrino Experiments. Conclusion.	1	1	0
Total		30	30	

Contents

Topic

1

Introduction to the Neutrino Physics Course. A brief overview of the physics of weak interactions. Presentation of V. Pauli's hypothesis on the existence of neutrinos. Explanation of fundamental discrete symmetries: C, P, T, CP, and CPT. The hypothesis of spatial parity violation and its experimental discovery in the Wu experiment.

Topic

2

Neutrino detection in the Reines and Cowan reactor experiment. Discovery of muon neutrinos in an accelerator experiment at BNL. The concept of neutrino helicity and experimental measurement of helicity in the Goldhaber experiment.

Topic

3

V-A theory of weak interaction. Hypothesis of intermediate vector bosons, unification of

electromagnetic and weak interactions. Experimental discovery of neutral currents. Discovery of W and Z bosons in CERN experiments.

Topic **4**

Description of the Standard Solar Model. Solar neutrino flux on Earth. Detection of the solar neutrino deficit in the Davis experiment, gallium experiments, and the Kamiokande experiment. B.M. Pontecorvo's hypothesis of neutrino oscillations. Discovery of solar neutrino oscillations in the SNO experiment.

Topic **5**

Detection of atmospheric neutrinos in underground experiments. "Atmospheric anomaly." Water Cherenkov detectors Kamiokande and Super-Kamiokande. Discovery of atmospheric neutrino oscillations in the Super-Kamiokande experiment.

Topic **6**

Phenomenology of neutrino oscillations. Consideration of oscillations between two types of neutrinos. Derivation of oscillation probability expressions. The Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata mixing matrix for three types of neutrinos. Neutrino oscillation parameters.

Topic **7**

Study of neutrino oscillations in long-baseline accelerator experiments. K2K, MINOS, and OPERA experiments. Off-axis neutrino beams. Second-generation long-baseline experiments: T2K and NOvA. Discovery of muon neutrino to electron neutrino oscillations.

Topic **8**

Measurement of oscillation parameters in reactor experiments. Reactor antineutrino detection methods. Long-baseline KamLAND experiment. Measurement of oscillation parameters in reactor experiments: Daya Bay, RENO, and Double Chooz.

Topic **9**

Measurement of the mixing angle θ_{13} in accelerator and reactor experiments. Prospects for measuring the neutrino mass hierarchy and searching for CP violation in the lepton sector of the Standard Model. Structure of the PMNS mixing matrix.

Topic **10**

Search for CP violation in neutrino oscillations. Methods to search for CP-odd asymmetry in muon neutrino and antineutrino oscillation measurements in the T2K experiment. Use of reactor data to improve experimental sensitivity. First hint of CP violation in the T2K experiment. Results from the NOvA experiment.

Topic **11**

Direct measurement of the electron neutrino mass in tritium beta decay. The Troitsk and Mainz experiments. Magnetic adiabatic collimation method. The KATRIN experiment. Constraints on the effective electron neutrino mass.

Topic **12**

Are neutrinos Majorana or Dirac particles? Physics of neutrinoless double beta decay. Nuclear matrix elements. Experimental methods for searching for neutrinoless double beta decay in germanium,

xenon, and cryogenic detectors. Experimental constraints on the effective neutrino mass from KamLAND-Zen, GERDA experiments. Future prospects.

Topic **13**

Neutrinos and cosmology. Constraints on the sum of neutrino masses from cosmological data. Relic neutrinos. Neutrinos from supernova explosions. Sterile neutrinos. LSND anomaly, reactor and gallium anomalies. Constraints on the parameters of light sterile neutrinos from reactor, accelerator, and astrophysical experiments.

Topic **14**

High-energy neutrino astrophysics. The Baikal underwater neutrino telescope, ICECUBE, and ANTARES experiments. Astrophysical sources of neutrinos.

Topic **15**

Next-generation neutrino experiments: Hyper-Kamiokande and DUNE. The main goals of these experiments are to search for CP violation in neutrino oscillations, determine the neutrino mass hierarchy, search for proton decay, and detect relic neutrinos from supernovae. The experimental methods and sensitivities of these experiments to various physical processes will be discussed. In conclusion, the main results of the course will be presented, and the fundamental outcomes in neutrino physics will be analyzed.

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Курс состоит из трёх разных форм обучения: лекции, семинары и самостоятельная работа. Лекции проводятся с использованием современных технологий, в т.ч. мультимедийных. На семинарских занятиях студенты решают типичные задачи по квантовой теории поля, проводится разбор практических задач. Предусмотрено индивидуальные и групповые консультации. Возможно дистанционное общение со студентами.

6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Разработаны контрольно-измерительные материалы для контроля успеваемости и оценочные средства для аттестации по итогам освоения дисциплины (контрольные вопросы по всем разделам курса).

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

а) ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Л.Б.Окунь. "Лептоны и кварки". Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.
2. Ю.Комминс, Б.Буксбаум. Слабые взаимодействия лептонов и кварков. Пер. с англ. Москва, Энергоиздат, 1987.
3. Ф.Боум, П. Фогель. «Физика массивных нейтрино», «Мир» , Москва, 1990.
4. К. Winter. Neutrino physics. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology. 2008.
5. С.М.Биленький. Лекции по физике нейтринных и лептон-нуклонных процессов, Москва, Энергоиздат, 1981.

б) ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Клапдор-Клайнротхаус Г.В., Шмидт А., "Неускорительная физика элементарных частиц", Пер. с нем., Москва, Наука, Физматлит, 1997.
2. Дж.Бакал "Нейтринная астрофизика", "Мир", Москва, 1993.
3. М.Кошиба. Рождение нейтринной астрофизики. Успехи физических наук, т.174 (2004) с.418-426.
4. К.Зубер. Neutrino physics, CRC Press, 2012.
5. С.Гианти и С.В.Ким. Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics, Oxford University Press, 2007.
6. Герштейн С.С., Кузнецов Е.П., Рябов В.А. Природа массы нейтрино и нейтринные осцилляции. Успехи физических наук, т.167 (1997) с.811.
7. Биленький С.М. Массы нейтрино, смешивание и осцилляции нейтрино. Успехи физических наук, т.173 (2003) с.1137.
8. Куденко Ю.Г. Исследование нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой. Успехи физических наук, т.181 (2011) с.569-594.
- 9.

в) ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<http://www.library.mephi.ru/> библиотека НИЯУ МИФИХ

<http://www.gpntb.ru/> государственная публичная научно-техническая библиотекаХ

<http://elibrary.ru/> база данных научных статейХ

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

В ходе проведения лекций используется мультимедийное оборудование.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО 3+ по направлениям подготовки:

14.03.02 Ядерная физика и технологии.

Автор программы:

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

2. ТИПОВЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

для оценки знаний (З), умений (У) и навыков (В)

Контрольные вопросы (не менее пяти вопросов/заданий)

1. Определите кинетическую энергию реликтовых нейтрино.
2. Возможны ли осцилляции нейтрино $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$?
3. Рассчитайте вероятность (branching ratio) распада $\pi \rightarrow e\nu$. Сравните её с вероятностью распада $\pi \rightarrow \mu\nu$.
4. Покажите, возможен ли распад нейтрального пиона на нейтрино и антинейтрино, если масса нейтрино равна нулю.
5. Рассчитайте длину детектора нейтрино из железа, где вероятность взаимодействия нейтрино с энергией 1 ГэВ равна 10^{-8} . Сечение взаимодействия нейтрино равно 10^{-38} см^2 .
6. Определите порог энергии для реакции $\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \mu^{-} + \nu_e$ в лабораторной системе.

Примеры контрольных заданий (не менее пяти вопросов/заданий)

1. Выведите выражение для вероятности осцилляций между двумя типами нейтрино.
2. В водных черенковских детекторах при регистрации электронных нейтрино с энергией около 1 ГэВ одним из основных источников фона являются нейтральные пионы, производимые мюонными нейтрино через нейтральные токи. Выведите кинематику распада нейтрального пиона на два фотона. Используя это, вычислите массу пиона из измерений двух фотонов. Покажите, в каких случаях распад $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ может имитировать сигнал от одиночного электрона.
3. Выведите выражение для осцилляций нейтрино в случае трёх типов нейтрино в вакууме.
4. Выведите выражение для вероятности распада (branching ratio) $\pi \rightarrow e\nu$. Сравните её с вероятностью распада $\pi \rightarrow \mu\nu$.
5. Черенковский водный детектор используется для поиска распада протона. Основной режим $p \rightarrow e + \pi^0$. Какие процессы с участием атмосферных нейтрино могут имитировать этот распад? Какие методы используются для подавления фона атмосферных нейтрино?

Примеры экзаменационных билетов (если форма контроля — экзамен)

Билет 1:

1. Измерение осцилляционных параметров в ускорительных экспериментах K2K и MINOS.
2. Выведите выражение для CP-нечётной асимметрии

$$A_{CP} = P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \nu_e)$$

в вакууме, используя полные выражения для осцилляций трёх типов нейтрино. Рассчитайте численное значение асимметрии для энергии мюонных нейтрино 600 МэВ и базы 300 км. Осцилляционные параметры: $\theta_{12}=34^\circ$, $\theta_{23}=45^\circ$, $\theta_{13}=9^\circ$, $\Delta m_{212}^2=7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$, $\Delta m_{232}^2=2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$.

Билет 2:

1. Эксперимент Super-Kamiokande. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино.
2. В случае распада $\pi \rightarrow \mu \nu$ выведите зависимость энергии нейтрино (в лабораторной системе) от угла θ между направлением пиона и нейтрино. Рассмотрите случай малого угла θ . Постройте графики зависимости энергии нейтрино от энергии пиона для углов 0, 1, 2, 3 градуса в диапазоне энергий пионов от 0 до 20 ГэВ.

Билет 3:

1. Измерение угла θ_{13} в экспериментах T2K и реакторных экспериментах.
2. Оцените вклад вещества в CP-нечётную асимметрию

$$A_{CP} = P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \nu_e)$$

для двух случаев: $E_\nu=600 \text{MeV}, L=300 \text{km}$ и $E_\nu=1800 \text{MeV}, L=900 \text{km}$. Считайте нормальную иерархию масс. Используйте осцилляционные параметры из таблиц PDG.

Билет 4:

1. Измерение солнечных нейтрино в эксперименте SNO. Открытие осцилляций солнечных нейтрино.
2. Мюонное нейтрино взаимодействует в воде и рождает мюон с энергией 1 ГэВ. Рассчитайте размеры Черенковского кольца (внутренний и внешний диаметры) на стенке, перпендикулярной направлению мюона, расположенной на расстоянии 20 м от точки взаимодействия. Предложите метод восстановления вершины взаимодействия нейтрино и оцените погрешность при временном разрешении фотоумножителей 2 нс.

Билет 5:

1. Безнейтринный двойной бета распад. Майорановские и Дираковские нейтрино.
2. Определите оптимальные базы реакторных экспериментов для измерения «солнечных» параметров и угла θ_{13} . Считайте среднюю энергию реакторных антинейтрино 4 МэВ. Возможно ли измерение «атмосферных параметров» в экспериментах с реакторными нейтрино? Если да, то при какой базе?

QUESTIONS

Control Questions (at least five questions/tasks)

1. Determine the kinetic energy of relic neutrinos.

2. Are neutrino oscillations possible for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}^{-}$?
3. Calculate the branching ratio for the decay $\pi \rightarrow e\nu$. Compare it with the decay $\pi \rightarrow \mu\nu$.
4. Show whether the decay of a neutral pion to neutrino and antineutrino is possible if the neutrino mass is zero.
5. Calculate the length of a neutrino detector made of iron, where the probability of interaction of a neutrino with an energy of 1 GeV is 10^{-8} . The cross-section for neutrino interaction is 10^{-38}cm^2 .
6. Determine the threshold energy for the reaction $\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \mu^{-} + \nu_e$ in the laboratory system.

Examples of Control Tasks (at least five questions/tasks)

1. Derive the expression for the oscillation probability between two types of neutrinos.
2. In water Cherenkov detectors, the detection of electron neutrinos with an energy of about 1 GeV often faces background from neutral pions, produced by muon neutrinos via neutral currents. Derive the kinematics for the decay of a neutral pion into two photons. Use this to calculate the mass of the pion from the measurement of the two photons. Show in what cases the decay $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ can mimic a signal from a single electron.
3. Derive the expression for neutrino oscillations in the case of three neutrino types in vacuum.
4. Derive the branching ratio for the decay $\pi \rightarrow e\nu$. Compare it with the branching ratio for the decay $\pi \rightarrow \mu\nu$.
5. The Cherenkov water detector is used to search for proton decay. The main mode is $p \rightarrow e + \pi^0$. What processes involving atmospheric neutrinos can mimic this decay? What methods are used to suppress the background from atmospheric neutrinos?

Examples of Exam Tickets (if the form of assessment is an exam)

Ticket 1:

1. Measurement of oscillation parameters in the K2K and MINOS accelerator experiments.
2. Derive the expression for the CP-odd asymmetry

$$A_{CP} = P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \nu_e)$$

in vacuum, using the full expressions for three-neutrino oscillations. Calculate the numerical value of the asymmetry for the energy of muon neutrinos at 600 MeV and a baseline of 300 km. The oscillation parameters are: $\theta_{12} = 34^\circ$, $\theta_{23} = 45^\circ$, $\theta_{13} = 9^\circ$, $\Delta m_{21}^2 = 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$, $\Delta m_{23}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$.

Ticket 2:

1. Super-Kamiokande experiment. Discovery of atmospheric neutrino oscillations.
2. In the case of the decay $\pi \rightarrow \mu\nu$, derive the dependence of neutrino energy (in the laboratory frame) on the angle θ between the direction of the pion and the neutrino. Specifically, examine the case of small angle θ . Construct graphs showing the dependence of neutrino energy on pion energy for angles of 0, 1, 2, 3 degrees in the pion energy range of 0 to 20 GeV.

Ticket 3:

1. Measurement of the mixing angle θ_{13} in the T2K and reactor experiments.
2. Evaluate the contribution of matter to the CP-odd asymmetry

$$ACP = P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e)$$

for two cases: $E_{\nu} = 600 \text{ MeV}, L = 300 \text{ km}$ and $E_{\nu} = 1800 \text{ MeV}, L = 900 \text{ km}$. Assume normal mass hierarchy. Use the oscillation parameters from PDG tables.

Ticket 4:

1. Measurement of solar neutrinos in the SNO experiment. Discovery of solar neutrino oscillations.
2. A muon neutrino interacts in water and produces a muon with an energy of 1 GeV. Calculate the size of the Cherenkov ring (inner and outer diameters) on the wall, perpendicular to the muon direction, located 20 meters from the interaction point. Propose a method to reconstruct the neutrino interaction vertex and estimate the error with a photo-multiplier time resolution of 2 ns.

Ticket 5:

1. Neutrinoless double beta decay. Majorana and Dirac neutrinos.
2. Determine the optimal baseline lengths for reactor experiments aimed at measuring "solar" parameters and the mixing angle θ_{13} . Assume an average reactor antineutrino energy of 4 MeV. Is it possible to measure "atmospheric parameters" in reactor neutrino experiments? If so, at what baseline length?

Составитель

Зам. заведующего кафедрой

_____ Грачёв В.М.

« ____ » _____ 20 г.

Критерии для аттестации разделов:

Теоретическая часть курса содержит 25 вопросов, разбитых на 4 раздела. Студенту выставляется от 0 до 2 баллов за каждый вопрос в зависимости от полноты и аргументированности ответа. Максимальное количество баллов, которое может получить студент по результатам аттестации теоретической части, – 50 баллов. Минимальное количество баллов, которое необходимо получить студенту для аттестации, – 30 баллов.

Каждый из 4 разделов списка задач к практическим занятиям содержит по 6 задач, которые студенту необходимо решить для аттестации соответствующего раздела. Студенту выставляется от 0 до 2 баллов за каждую задачу в зависимости от правильности решения, его полноты и аргументированности, подтверждающей знание материала. Максимальное количество баллов, которое может получить студент по результатам аттестации практической части, – 48 баллов. Минимальное количество баллов, которое необходимо получить студенту для аттестации, – 30 баллов (но не менее 6 баллов по каждому разделу).

Для допуска к сдаче экзамена по курсу студент должен получить не менее 30 баллов по результатам аттестации теоретической части и не менее 30 баллов по результатам аттестации практической части (причём не менее 6 баллов за каждый из разделов).

Общая оценка определяется суммой баллов, полученных студентом на экзамене (минимальное количество – 30 баллов, максимальное количество – 50 баллов) и по итогам аттестации разделов. Итоговая оценка определяется общим количеством баллов.

Критерии общей оценки:

Процент результативности (правильных ответов)	Качественная оценка индивидуальных образовательных достижений	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 ÷ 100	5	отлично
70 ÷ 89	4	хорошо
60 ÷ 69	3	удовлетворительно
менее 60	2	не удовлетворительно

Оценка экзамена, зачёта (стандартная)		Оценка экзамена, зачёта (тестовые нормы: % правильных ответов)	Требования к знаниям на устном зачёте
«отлично», A	90 ÷ 100 %	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.	1.2 Ко нт ро ль по ит ога м (К И) - 8 Не де ля АН
«хорошо», D, C, B	70 ÷ 89%	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.	
«удовлетворительно» E, D	60 ÷ 69%	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.	
«неудовлетворительно», F	менее 60%	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.	

НОТАЦИЯ

Курс лекций «Физика нейтрино» включает в себя следующие основные разделы.

Предсказание и открытие нейтрино. Обнаружение мюонного нейтрино, измерение спиральности нейтрино, открытие нарушения пространственной четности в слабых взаимодействиях. Будет рассмотрена физика слабых взаимодействий, V-A теория, фундаментальные дискретные симметрии C, P, T, CP и CPT. Обсуждается теория Вайнберга-Салама (объединение электромагнитных и слабых взаимодействий) и свойства нейтрино в рамках Стандартной Модели. Рассматривается открытие нейтральных токов и промежуточных бозонов.

Значительное внимание уделено осцилляциям нейтрино. Изложена идея Б.М. Понтекорво и экспериментальное открытие нейтринных осцилляций в экспериментах с солнечными и атмосферными нейтрино. Детально рассмотрены ускорительные и реакторные осцилляционные эксперименты, измерение угла смешивания θ_{13} и поиск CP нарушения в лептонном секторе Стандартной Модели. Представлена феноменология нейтринных осцилляций в вакууме и в веществе. Излагаются дальнейшие перспективы осцилляционных экспериментов следующего поколения.

Рассмотрены эксперименты по прямому измерению массы нейтрино в бета распаде трития. Представлены ограничения на суммарную массу нейтрино из космологических данных. Обсуждается природа нейтрино: Майорановские или Дираковские частицы. Рассмотрены эксперименты по поиску безнейтринного двойного бета распада и представлены результаты по исследованию свойств нейтрино.

Также рассмотрены нейтринные аномалии: указания на существования стерильных нейтрино, полученные в ускорительных, реакторных радиохимических экспериментах. Обсуждаются

последние экспериментальные результаты по поиску легких и тяжелых стерильных нейтрино. Рассматривается нейтринная астрофизика высоких энергий, астрофизические источники нейтрино, космогенные нейтрино, аннигиляция темной материи. Байкальский подводный нейтринный телескоп, эксперименты ICECUBE и ANTARES.

ABSTRACT

The lecture course “*Neutrino Physics*” includes the following main sections:

Prediction and Discovery of the Neutrino.

The detection of the muon neutrino, measurement of neutrino helicity, and the discovery of parity violation in weak interactions are discussed. The course covers the physics of weak interactions, the V-A theory, and the fundamental discrete symmetries: C, P, T, CP, and CPT. The Weinberg–Salam theory (unification of electromagnetic and weak interactions) and the properties of neutrinos within the Standard Model are also examined, along with the discovery of neutral currents and intermediate vector bosons.

Significant attention is devoted to neutrino oscillations.

The course presents B.M. Pontecorvo’s idea and the experimental discovery of neutrino oscillations in solar and atmospheric neutrino experiments. Accelerator and reactor-based oscillation experiments are examined in detail, including the measurement of the mixing angle θ_{13} and the search for CP violation in the lepton sector of the Standard Model. The phenomenology of neutrino oscillations in vacuum and matter is presented, along with future prospects for next-generation oscillation experiments.

Experiments for direct measurement of neutrino mass in tritium beta decay are discussed. The course also presents constraints on the sum of neutrino masses derived from cosmological data. The nature of neutrinos—whether they are Majorana or Dirac particles—is explored. Experiments searching for neutrinoless double beta decay are reviewed, along with their results on neutrino properties.

Neutrino anomalies are also considered, including indications of sterile neutrinos observed in accelerator, reactor, and radiochemical experiments. The latest experimental results in the search for light and heavy sterile neutrinos are discussed. The course also covers high-energy neutrino astrophysics, astrophysical sources of neutrinos, cosmogenic neutrinos, and dark matter annihilation. Key experiments such as the Baikal underwater neutrino telescope, ICECUBE, and ANTARES are included.

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Курс лекций «Нейтринная физика» знакомит студента с основными теоретическими положениями, методами, экспериментальными установками и результатами в области нейтринной физики. Он создает необходимую базу для понимания и дальнейшего более глубокого изучения этой области науки и возможности научной работы в нейтринной физике.

1. PURPOSES OF THE EDUCATIONAL COURSE

The lecture course “*Neutrino Physics*” introduces students to the fundamental theoretical principles, methods, experimental setups, and key results in the field of neutrino physics. It provides the essential

foundation for understanding and further, more in-depth study of this area of science, as well as for pursuing research work in neutrino physics.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО

Для освоения данной дисциплины обучающийся должен обладать знаниями и умениями в объеме нескольких курсов высшей школы. В частности,

- иметь хорошую подготовку по ряду математических дисциплин, таких как математический анализ, линейная алгебра, дифференциальные и интегральные уравнения, теория групп. В частности, обучающийся должен быть знаком с такими понятиями как ряд, функция, функционал, поле, должен обладать знаниями достаточными для решения дифференциальных и интегральных уравнений, должен быть знаком со специальными и обобщёнными функциями, иметь базовые знания по теории групп;
- обладать знаниями в объёме не меньше стандартных курсов квантовой механики и классической электродинамики, уметь оперировать с такими понятиями как квантовый оператор, коммутационные соотношения, волновая функция, каноническое квантование, вторичное квантование, Бозе и Ферми статистика, понимать качественное поведение волновых функций в задаче о связанном состоянии и в задаче рассеяния, иметь представление об аналитических свойствах волновой функции в комплексной плоскости импульса и энергии;
- понимать сущность алгоритмических предписаний и демонстрировать умение действовать в соответствии с предложенным алгоритмом;
- иметь навыки устных, письменных, инструментальных вычислений.

2. THE COURSE IN THE EDUCATIONAL PROGRAM

To successfully complete this course, student must possess comprehensive knowledge in a few disciplines of the high school. In particular,

- they should be well educated in mathematics (analysis, linear algebra, differential and integral equations, theory of groups and representations). The student must be familiar with such notions as series, function, functional, field and must be able to solve differential and integral equations, must be familiar with special and generalised functions as well as with the basic principles of the theory of groups;
- they must complete the standard courses in Quantum Mechanics and Classical Electrodynamics and be able to master such notions as quantum operator, commutation relations, wave function, canonical quantization, second quantization, Bose and Fermi statistics, then understand the qualitative behaviour of the wave functions for a bound-state problem and a scattering problem, possess basic knowledge in analytical properties of the wave functions in the complex momentum and energy planes;
- they must have the idea of algorithms and demonstrate the ability to follow the prescribed algorithm;
- they must possess basic abilities of various types of calculations.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Календарный план

	Тема занятия	Лекции	Семинары	Самост. работа
1	Введение. Слабые взаимодействия. Гипотеза нейтрино. Фундаментальные симметрии. Нарушение P-четности	1	1	0
2	Открытие нейтрино в реакторном эксперименте. Открытие мюонных нейтрино. Спиральность нейтрино.	1	1	0
3	V-A теория. Промежуточные бозоны.	1	1	0

	Нейтральные токи.			
4	Стандартная солнечная модель. Детектирование солнечных нейтрино. Открытие осцилляций солнечных нейтрино	1	1	0
5	Атмосферные нейтрино. Детектор СуперКамиоканде. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино	1	1	0
6	Феноменология нейтринных осцилляций. Осцилляций нейтрино в вакууме и в веществе	1	1	0
7	Ускорительные эксперименты с длинной базой	1	1	0
8	Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах	1	1	0
9	Измерение угла смешивания θ_{13}	1	1	0
10	Поиск CP нарушения в нейтринных осцилляциях	1	1	0
11	Прямое измерение массы нейтрино. Модель качелей.	1	1	0
12	Природа нейтрино. Поиск безнейтринного двойного бета распада	1	1	0
13	Нейтрино и космология. Реликтовые нейтрино. Стерильные нейтрино	1	1	0
14	Нейтринная астрофизика.	1	1	0
15	Планируемые нейтринные эксперименты. Заключение.	1	1	0
Итого часов		30	30	

Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

1. Тема 1

Введение в курс нейтринной физики. Краткое изложение физики слабых взаимодействий. Изложение Гипотезы В.Паули о существовании нейтрино. Изложение фундаментальных дискретных C,P,T, CP, CPT симметрий. Гипотеза о нарушении пространственной четности и экспериментальное обнаружение в эксперименте Ву.

2. Тема 2

Регистрация нейтрино в реакторном эксперименте Рейнеса и Коуэна. Открытие мюонных нейтрино в ускорительном эксперименте в БНЛ. Понятие спиральности нейтрино и экспериментальное измерение спиральности в эксперименте Гольдхабер.

3. Тема 3

V-A теория слабого взаимодействия. Гипотеза промежуточных векторных бозонов, объединение электромагнитного и слабого взаимодействия. Экспериментальное обнаружение нейтральных токов. Открытие W и Z бозонов в экспериментах в ЦЕРН.

4. Тема 4

Описание Стандартной Солнечной модели. Поток солнечных нейтрино на Земле. Обнаружение дефицита солнечных нейтрино в эксперименте Дэвиса, в галлиевых экспериментах и

эксперименте Камиоканде. Гипотеза Б.М.Понтекорво об осцилляциях нейтрино. Открытие осцилляций солнечных нейтрино в эксперименте SNO.

5. Тема 5

Регистрация атмосферных нейтрино в подземных экспериментах. «Атмосферная аномалия». Водные черенковские детекторы Камиоканде и СуперКамиоканде. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино в эксперименте СуперКамиоканде.

6. Тема 6

Феноменология нейтринных осцилляций. Рассмотрение осцилляций двух типов нейтрино. Получение выражений для вероятности осцилляций. Матрица смешивания Понтекорво-Маки-Накагава-Саката для трех типов нейтрино. Параметры нейтринных осцилляций.

7. Тема 7

Исследование осцилляций нейтрино в ускорительных экспериментах с длинной базой. Эксперименты K2K, MINOS, OPERA. Смещенные от оси пучки нейтрино. Эксперименты с длинной базой второго поколения T2K и NOvA. Открытие осцилляцию мюонных нейтрино в электронные.

8. Тема 8

Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах. Метод детектирования реакторных антинейтрино. Эксперимент с длинной базой КамЛанд. Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах Daya Bay, RENO и Double Chooz.

9. Тема 9

Измерение угла смешивания θ_{13} в ускорительных и реакторных экспериментах. Перспективы для измерения иерархии масс нейтрино и поиска CP нарушения в лептонном секторе Стандартной Модели. Структура PMNS матрицы смешивания.

10. Тема 10

Поиск нарушения CP симметрии в нейтринных осцилляциях. Методика поиска CP нечетной асимметрии при измерении осцилляций мюонных нейтрино и антинейтрино в эксперименте T2K. Использование реакторных данных для повышения чувствительности эксперимента. Первое указание на CP нарушение в эксперименте T2K. Результаты эксперимента NOvA.

11. Тема 11

Прямое измерение массы электронного нейтрино в бета распаде трития. Эксперименты Троицк-масс и Майнц. Метод магнитной адиабатической коллимации. Эксперимент КАТРИН. Ограничение на эффективную массу электронного нейтрино.

12. Тема 12

Нейтрино Майорановская или Дираковская частица. Физика безнейтринного двойного бета распада. Ядерные матричные элементы. Экспериментальные методы поиска безнейтринного двойного бета распада в германиевых, ксеноновых и криогенных детекторах. Экспериментальные ограничения на эффективную массу нейтрино, полученные в экспериментах КамЛанд-Zen, GERDA. Ближайшие перспективы.

13. Тема 13

Нейтрино и космология. Ограничения на сумму масс нейтрино из космологических данных. Реликтовые нейтрино. Нейтрино от взрывов сверхновых. Стерильные нейтрино. Аномалия LSND, реакторная и галлиевая аномалия. Ограничения на параметры легких стерильных нейтрино из реакторных, ускорительных и астрофизических экспериментов.

14. Тема 14

Нейтринная астрофизика высоких энергий. Байкальский подводный нейтринный телескоп, эксперименты ICECUBE, ANTARES. Астрофизические источники нейтрино.

15.Тема 15

Рассматриваются нейтринные эксперименты следующего поколения ГиперКамиоканде и DUNE. Основными целями этих экспериментов являются поиск CP нарушения в нейтринных осцилляциях, определение иерархии масс нейтрино, поиск распада протона, регистрация реликтовых нейтрино от сверхновых. Будет рассмотрена экспериментальная методика и чувствительность этих экспериментов к различным физическим процессам. В заключении будут изложены основные итоги курса и проанализированы основные фундаментальные результаты, полученные в нейтринной физике.

	Chapters	Lectures	Seminars	Homework
1	Introduction. Weak Interactions. The Neutrino Hypothesis. Fundamental Symmetries. Parity Violation.	1	1	0
2	Discovery of the Neutrino in Reactor Experiments. Discovery of Muon Neutrinos. Neutrino Helicity.	1	1	0
3	V-A Theory. Intermediate Vector Bosons. Neutral Currents.	1	1	0
4	Standard Solar Model. Detection of Solar Neutrinos. Discovery of Solar Neutrino Oscillations.	1	1	0
5	Atmospheric Neutrinos. The Super-Kamiokande Detector. Discovery of Atmospheric Neutrino Oscillations.	1	1	0
6	Phenomenology of Neutrino Oscillations. Neutrino Oscillations in Vacuum and in Matter.	1	1	0
7	Long-Baseline Accelerator Experiments.	1	1	0
8	Measurement of Oscillation Parameters in Reactor Experiments.	1	1	0
9	Measurement of the Mixing Angle θ_{13} .	1	1	0
10	Search for CP Violation in Neutrino Oscillations.	1	1	0
11	Direct Measurement of Neutrino Mass. The See-Saw Mechanism.	1	1	0
12	Nature of Neutrinos. Search for Neutrinoless Double Beta Decay.	1	1	0
13	Neutrinos and Cosmology. Relic Neutrinos. Sterile Neutrinos.	1	1	0
14	Neutrino Astrophysics.	1	1	0
15	Planned Neutrino Experiments. Conclusion.	1	1	0
Total		30	30	

Contents

Topic	1
Introduction to the Neutrino Physics Course. A brief overview of the physics of weak interactions. Presentation of V. Pauli's hypothesis on the existence of neutrinos. Explanation of fundamental discrete symmetries: C, P, T, CP, and CPT. The hypothesis of spatial parity violation and its experimental discovery in the Wu experiment.	
Topic	2
Neutrino detection in the Reines and Cowan reactor experiment. Discovery of muon neutrinos in an accelerator experiment at BNL. The concept of neutrino helicity and experimental measurement of helicity in the Goldhaber experiment.	
Topic	3
V-A theory of weak interaction. Hypothesis of intermediate vector bosons, unification of electromagnetic and weak interactions. Experimental discovery of neutral currents. Discovery of W and Z bosons in CERN experiments.	
Topic	4
Description of the Standard Solar Model. Solar neutrino flux on Earth. Detection of the solar neutrino deficit in the Davis experiment, gallium experiments, and the Kamiokande experiment. B.M. Pontecorvo's hypothesis of neutrino oscillations. Discovery of solar neutrino oscillations in the SNO experiment.	
Topic	5
Detection of atmospheric neutrinos in underground experiments. "Atmospheric anomaly." Water Cherenkov detectors Kamiokande and Super-Kamiokande. Discovery of atmospheric neutrino oscillations in the Super-Kamiokande experiment.	
Topic	6
Phenomenology of neutrino oscillations. Consideration of oscillations between two types of neutrinos. Derivation of oscillation probability expressions. The Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata mixing matrix for three types of neutrinos. Neutrino oscillation parameters.	
Topic	7
Study of neutrino oscillations in long-baseline accelerator experiments. K2K, MINOS, and OPERA experiments. Off-axis neutrino beams. Second-generation long-baseline experiments: T2K and NOvA. Discovery of muon neutrino to electron neutrino oscillations.	
Topic	8
Measurement of oscillation parameters in reactor experiments. Reactor antineutrino detection methods. Long-baseline KamLAND experiment. Measurement of oscillation parameters in reactor experiments: Daya Bay, RENO, and Double Chooz.	
Topic	9
Measurement of the mixing angle θ_{13} in accelerator and reactor experiments. Prospects for measuring the neutrino mass hierarchy and searching for CP violation in the lepton sector of the Standard Model. Structure of the PMNS mixing matrix.	

- Topic** **10**
Search for CP violation in neutrino oscillations. Methods to search for CP-odd asymmetry in muon neutrino and antineutrino oscillation measurements in the T2K experiment. Use of reactor data to improve experimental sensitivity. First hint of CP violation in the T2K experiment. Results from the NOvA experiment.
- Topic** **11**
Direct measurement of the electron neutrino mass in tritium beta decay. The Troitsk and Mainz experiments. Magnetic adiabatic collimation method. The KATRIN experiment. Constraints on the effective electron neutrino mass.
- Topic** **12**
Are neutrinos Majorana or Dirac particles? Physics of neutrinoless double beta decay. Nuclear matrix elements. Experimental methods for searching for neutrinoless double beta decay in germanium, xenon, and cryogenic detectors. Experimental constraints on the effective neutrino mass from KamLAND-Zen, GERDA experiments. Future prospects.
- Topic** **13**
Neutrinos and cosmology. Constraints on the sum of neutrino masses from cosmological data. Relic neutrinos. Neutrinos from supernova explosions. Sterile neutrinos. LSND anomaly, reactor and gallium anomalies. Constraints on the parameters of light sterile neutrinos from reactor, accelerator, and astrophysical experiments.
- Topic** **14**
High-energy neutrino astrophysics. The Baikal underwater neutrino telescope, ICECUBE, and ANTARES experiments. Astrophysical sources of neutrinos.
- Topic** **15**
Next-generation neutrino experiments: Hyper-Kamiokande and DUNE. The main goals of these experiments are to search for CP violation in neutrino oscillations, determine the neutrino mass hierarchy, search for proton decay, and detect relic neutrinos from supernovae. The experimental methods and sensitivities of these experiments to various physical processes will be discussed. In conclusion, the main results of the course will be presented, and the fundamental outcomes in neutrino physics will be analyzed.

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Курс состоит из трёх разных форм обучения: лекции, семинары и самостоятельная работа. Лекции проводятся с использованием современных технологий, в т.ч. мультимедийных. На семинарских занятиях студенты решают типичные задачи по квантовой теории поля, проводится разбор практических задач. Предусмотрено индивидуальные и групповые консультации. Возможно дистанционное общение со студентами.

6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Разработаны контрольно-измерительные материалы для контроля успеваемости и оценочные средства для аттестации по итогам освоения дисциплины (контрольные вопросы по всем разделам курса).

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

а) ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 1.Л.Б.Окунь. "Лептоны и кварки". Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.
2. 2.Ю.Комминс, Б.Буксбаум. Слабые взаимодействия лептонов и кварков. Пер. с англ. Москва, Энергоиздат, 1987.
3. 3. Ф.Боум, П. Фогель. «Физика массивных нейтрино», «Мир» , Москва, 1990.
4. 4.К.Winter. Neutrino physics. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology. 2008.
5. 5.С.М.Биленький. Лекции по физике нейтринных и лептон-нуклонных процессов, Москва, Энергоиздат, 1981.

б) ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 1.Клапдор-Клайнротхаус Г.В., Шмидт А., "Неускорительная физика элементарных частиц", Пер. с нем., Москва, Наука, Физматлит, 1997.
2. 2.Дж.Бакал "Нейтринная астрофизика", "Мир", Москва, 1993.
3. 3.М.Кошиба. Рождение нейтринной астрофизики .Успехи физических наук, т.174 (2004) с.418-426.
4. 4.К.Zuber. Neutrino physics, CRC Press, 2012.
5. 5.С.Giunti and C.W.Kim. Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics, Oxford University Press, 2007.
6. 6. Герштейн С.С., Кузнецов Е.П., Рябов В.А. Природа массы нейтрино и нейтринные осцилляции. Успехи физических наук, т.167 (1997) с.811.
7. 7.Биленький С.М. Массы нейтрино, смешивание и осцилляции нейтрино. Успехи физических наук, т.173 (2003) с.1137.
8. 8.Куденко Ю.Г. Исследование нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой. Успехи физических наук, т.181 (2011) с.569-594.
- 9.

в) ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<http://www.library.mephi.ru/> библиотека НИЯУ МИФИХ

<http://www.gpntb.ru/> государственная публичная научно-техническая библиотекаХ

<http://elibrary.ru/> база данных научных статейХ

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

В ходе проведения лекций используется мультимедийное оборудование.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО 3+ по направлениям подготовки:

14.03.02 Ядерная физика и технологии.

Автор программы:

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

2. ТИПОВЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

для оценки знаний (З), умений (У) и навыков (В)

Контрольные вопросы (не менее пяти вопросов/заданий)

1. Определите кинетическую энергию реликтовых нейтрино.
2. Возможны ли осцилляции нейтрино $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$?
3. Рассчитайте вероятность (branching ratio) распада $\pi \rightarrow e\nu$. Сравните её с вероятностью распада $\pi \rightarrow \mu\nu$.
4. Покажите, возможен ли распад нейтрального пиона на нейтрино и антинейтрино, если масса нейтрино равна нулю.
5. Рассчитайте длину детектора нейтрино из железа, где вероятность взаимодействия нейтрино с энергией 1 ГэВ равна 10^{-8} . Сечение взаимодействия нейтрино равно 10^{-38} см^2 .
6. Определите порог энергии для реакции $\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \mu^{-} + \nu_e$ в лабораторной системе.

Примеры контрольных заданий (не менее пяти вопросов/заданий)

1. Выведите выражение для вероятности осцилляций между двумя типами нейтрино.
2. В водных черенковских детекторах при регистрации электронных нейтрино с энергией около 1 ГэВ одним из основных источников фона являются нейтральные пионы, производимые мюонными нейтрино через нейтральные токи. Выведите кинематику распада нейтрального пиона на два фотона. Используя это, вычислите массу пиона из измерений двух фотонов. Покажите, в каких случаях распад $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ может имитировать сигнал от одиночного электрона.
3. Выведите выражение для осцилляций нейтрино в случае трёх типов нейтрино в вакууме.
4. Выведите выражение для вероятности распада (branching ratio) $\pi \rightarrow e\nu$. Сравните её с вероятностью распада $\pi \rightarrow \mu\nu$.
5. Черенковский водный детектор используется для поиска распада протона. Основной режим $p \rightarrow e + \pi^0$. Какие процессы с участием атмосферных нейтрино могут имитировать этот распад? Какие методы используются для подавления фона атмосферных нейтрино?

Примеры экзаменационных билетов (если форма контроля — экзамен)

Билет 1:

1. Измерение осцилляционных параметров в ускорительных экспериментах K2K и MINOS.
2. Выведите выражение для CP-нечётной асимметрии

$$A_{CP} = P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \nu_e)$$

в вакууме, используя полные выражения для осцилляций трёх типов нейтрино. Рассчитайте численное значение асимметрии для энергии мюонных нейтрино 600 МэВ и базы 300 км. Осцилляционные параметры: $\theta_{12}=34^\circ$, $\theta_{23}=45^\circ$, $\theta_{13}=9^\circ$, $\Delta m_{212}^2=7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$, $\Delta m_{232}^2=2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$.

Билет 2:

1. Эксперимент Super-Kamiokande. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино.
2. В случае распада $\pi \rightarrow \mu \nu$ выведите зависимость энергии нейтрино (в лабораторной системе) от угла θ между направлением пиона и нейтрино. Рассмотрите случай малого угла θ . Постройте графики зависимости энергии нейтрино от энергии пиона для углов 0, 1, 2, 3 градуса в диапазоне энергий пионов от 0 до 20 ГэВ.

Билет 3:

1. Измерение угла θ_{13} в экспериментах T2K и реакторных экспериментах.
2. Оцените вклад вещества в CP-нечётную асимметрию

$$A_{CP} = P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \nu_e)$$

для двух случаев: $E_\nu=600 \text{MeV}, L=300 \text{km}$ и $E_\nu=1800 \text{MeV}, L=900 \text{km}$. Считайте нормальную иерархию масс. Используйте осцилляционные параметры из таблиц PDG.

Билет 4:

1. Измерение солнечных нейтрино в эксперименте SNO. Открытие осцилляций солнечных нейтрино.
2. Мюонное нейтрино взаимодействует в воде и рождает мюон с энергией 1 ГэВ. Рассчитайте размеры Черенковского кольца (внутренний и внешний диаметры) на стенке, перпендикулярной направлению мюона, расположенной на расстоянии 20 м от точки взаимодействия. Предложите метод восстановления вершины взаимодействия нейтрино и оцените погрешность при временном разрешении фотоумножителей 2 нс.

Билет 5:

1. Безнейтринный двойной бета распад. Майорановские и Дираковские нейтрино.
2. Определите оптимальные базы реакторных экспериментов для измерения «солнечных» параметров и угла θ_{13} . Считайте среднюю энергию реакторных антинейтрино 4 МэВ. Возможно ли измерение «атмосферных параметров» в экспериментах с реакторными нейтрино? Если да, то при какой базе?

QUESTIONS

Control Questions (at least five questions/tasks)

1. Determine the kinetic energy of relic neutrinos.

2. Are neutrino oscillations possible for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}^{-}$?
3. Calculate the branching ratio for the decay $\pi \rightarrow e\nu$. Compare it with the decay $\pi \rightarrow \mu\nu$.
4. Show whether the decay of a neutral pion to neutrino and antineutrino is possible if the neutrino mass is zero.
5. Calculate the length of a neutrino detector made of iron, where the probability of interaction of a neutrino with an energy of 1 GeV is 10^{-8} . The cross-section for neutrino interaction is 10^{-38}cm^2 .
6. Determine the threshold energy for the reaction $\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \mu^{-} + \nu_e$ in the laboratory system.

Examples of Control Tasks (at least five questions/tasks)

1. Derive the expression for the oscillation probability between two types of neutrinos.
2. In water Cherenkov detectors, the detection of electron neutrinos with an energy of about 1 GeV often faces background from neutral pions, produced by muon neutrinos via neutral currents. Derive the kinematics for the decay of a neutral pion into two photons. Use this to calculate the mass of the pion from the measurement of the two photons. Show in what cases the decay $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ can mimic a signal from a single electron.
3. Derive the expression for neutrino oscillations in the case of three neutrino types in vacuum.
4. Derive the branching ratio for the decay $\pi \rightarrow e\nu$. Compare it with the branching ratio for the decay $\pi \rightarrow \mu\nu$.
5. The Cherenkov water detector is used to search for proton decay. The main mode is $p \rightarrow e + \pi^0$. What processes involving atmospheric neutrinos can mimic this decay? What methods are used to suppress the background from atmospheric neutrinos?

Examples of Exam Tickets (if the form of assessment is an exam)

Ticket 1:

1. Measurement of oscillation parameters in the K2K and MINOS accelerator experiments.
2. Derive the expression for the CP-odd asymmetry

$$A_{CP} = P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \nu_e)$$

in vacuum, using the full expressions for three-neutrino oscillations. Calculate the numerical value of the asymmetry for the energy of muon neutrinos at 600 MeV and a baseline of 300 km. The oscillation parameters are: $\theta_{12} = 34^\circ$, $\theta_{23} = 45^\circ$, $\theta_{13} = 9^\circ$, $\Delta m_{21}^2 = 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$, $\Delta m_{23}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$.

Ticket 2:

1. Super-Kamiokande experiment. Discovery of atmospheric neutrino oscillations.
2. In the case of the decay $\pi \rightarrow \mu\nu$, derive the dependence of neutrino energy (in the laboratory frame) on the angle θ between the direction of the pion and the neutrino. Specifically, examine the case of small angle θ . Construct graphs showing the dependence of neutrino energy on pion energy for angles of 0, 1, 2, 3 degrees in the pion energy range of 0 to 20 GeV.

Ticket 3:

1. Measurement of the mixing angle θ_{13} in the T2K and reactor experiments.
2. Evaluate the contribution of matter to the CP-odd asymmetry

$$ACP = P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \nu_e)$$

for two cases: $E_{\nu} = 600 \text{ MeV}, L = 300 \text{ km}$ and $E_{\nu} = 1800 \text{ MeV}, L = 900 \text{ km}$. Assume normal mass hierarchy. Use the oscillation parameters from PDG tables.

Ticket 4:

1. Measurement of solar neutrinos in the SNO experiment. Discovery of solar neutrino oscillations.
2. A muon neutrino interacts in water and produces a muon with an energy of 1 GeV. Calculate the size of the Cherenkov ring (inner and outer diameters) on the wall, perpendicular to the muon direction, located 20 meters from the interaction point. Propose a method to reconstruct the neutrino interaction vertex and estimate the error with a photo-multiplier time resolution of 2 ns.

Ticket 5:

1. Neutrinoless double beta decay. Majorana and Dirac neutrinos.
2. Determine the optimal baseline lengths for reactor experiments aimed at measuring "solar" parameters and the mixing angle θ_{13} . Assume an average reactor antineutrino energy of 4 MeV. Is it possible to measure "atmospheric parameters" in reactor neutrino experiments? If so, at what baseline length?

Составитель

Зам. заведующего кафедрой

_____ Грачёв В.М.

« ____ » _____ 20 г.

Критерии для аттестации разделов:

Теоретическая часть курса содержит 25 вопросов, разбитых на 4 раздела. Студенту выставляется от 0 до 2 баллов за каждый вопрос в зависимости от полноты и аргументированности ответа. Максимальное количество баллов, которое может получить студент по результатам аттестации теоретической части, – 50 баллов. Минимальное количество баллов, которое необходимо получить студенту для аттестации, – 30 баллов.

Каждый из 4 разделов списка задач к практическим занятиям содержит по 6 задач, которые студенту необходимо решить для аттестации соответствующего раздела. Студенту выставляется от 0 до 2 баллов за каждую задачу в зависимости от правильности решения, его полноты и аргументированности, подтверждающей знание материала. Максимальное количество баллов, которое может получить студент по результатам аттестации практической части, – 48 баллов. Минимальное количество баллов, которое необходимо получить студенту для аттестации, – 30 баллов (но не менее 6 баллов по каждому разделу).

Для допуска к сдаче экзамена по курсу студент должен получить не менее 30 баллов по результатам аттестации теоретической части и не менее 30 баллов по результатам аттестации практической части (причём не менее 6 баллов за каждый из разделов).

Общая оценка определяется суммой баллов, полученных студентом на экзамене (минимальное количество – 30 баллов, максимальное количество – 50 баллов) и по итогам аттестации разделов. Итоговая оценка определяется общим количеством баллов.

Критерии общей оценки:

Процент результативности (правильных ответов)	Качественная оценка индивидуальных образовательных достижений	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 ÷ 100	5	отлично
70 ÷ 89	4	хорошо
60 ÷ 69	3	удовлетворительно
менее 60	2	не удовлетворительно

Оценка экзамена, зачёта (стандартная)		Оценка экзамена, зачёта (тестовые нормы: % правильных ответов)	Требования к знаниям на устном зачёте
«отлично», <i>A</i>	90 ÷ 100 %	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.	
«хорошо», <i>D, C, B</i>	70 ÷ 89%	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.	
«удовлетворительно» <i>E, D</i>	60 ÷ 69%	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.	
«неудовлетворительно», <i>F</i>	менее 60%	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.	

Раздел 2 Нейтрино.

2.1 Контроль по итогам (КИ) - 12 Неделя

АННОТАЦИЯ

Курс лекций «Физика нейтрино» включает в себя следующие основные разделы.

Предсказание и открытие нейтрино. Обнаружение мюонного нейтрино, измерение спиральности нейтрино, открытие нарушения пространственной четности в слабых взаимодействиях. Будет рассмотрена физика слабых взаимодействий, V-A теория, фундаментальные дискретные симметрии C, P, T, CP и CPT. Обсуждается теория Вайнберга-Салама (объединение электромагнитных и слабых взаимодействий) и свойства нейтрино в рамках Стандартной Модели. Рассматривается открытие нейтральных токов и промежуточных бозонов.

Значительное внимание уделено осцилляциям нейтрино. Изложена идея Б.М. Понтекорво и экспериментальное открытие нейтринных осцилляций в экспериментах с солнечными и атмосферными нейтрино. Детально рассмотрены ускорительные и реакторные осцилляционные эксперименты, измерение угла смешивания θ_{13} и поиск CP нарушения в лептонном секторе Стандартной Модели. Представлена феноменология нейтринных осцилляций в вакууме и в веществе. Излагаются дальнейшие перспективы осцилляционных экспериментов следующего поколения.

Рассмотрены эксперименты по прямому измерению массы нейтрино в бета распаде трития. Представлены ограничения на суммарную массу нейтрино из космологических данных. Обсуждается природа нейтрино: Майорановские или Дираковские частицы. Рассмотрены эксперименты по поиску безнейтринного двойного бета распада и представлены результаты по исследованию свойств нейтрино.

Также рассмотрены нейтринные аномалии: указания на существования стерильных нейтрино, полученные в ускорительных, реакторных радиохимических экспериментах. Обсуждаются последние экспериментальные результаты по поиску легких и тяжелых стерильных нейтрино. Рассматривается нейтринная астрофизика высоких энергий, астрофизические источники нейтрино, космогенные нейтрино, аннигиляция темной материи. Байкальский подводный нейтринный телескоп, эксперименты ICECUBE и ANTARES.

ABSTRACT

The lecture course “*Neutrino Physics*” includes the following main sections:

Prediction and Discovery of the Neutrino.

The detection of the muon neutrino, measurement of neutrino helicity, and the discovery of parity violation in weak interactions are discussed. The course covers the physics of weak interactions, the V-A theory, and the fundamental discrete symmetries: C, P, T, CP, and CPT. The Weinberg–Salam theory (unification of electromagnetic and weak interactions) and the properties of neutrinos within the Standard Model are also examined, along with the discovery of neutral currents and intermediate vector bosons.

Significant attention is devoted to neutrino oscillations.

The course presents B.M. Pontecorvo’s idea and the experimental discovery of neutrino oscillations in

solar and atmospheric neutrino experiments. Accelerator and reactor-based oscillation experiments are examined in detail, including the measurement of the mixing angle θ_{13} and the search for CP violation in the lepton sector of the Standard Model. The phenomenology of neutrino oscillations in vacuum and matter is presented, along with future prospects for next-generation oscillation experiments.

Experiments for direct measurement of neutrino mass in tritium beta decay are discussed. The course also presents constraints on the sum of neutrino masses derived from cosmological data. The nature of neutrinos—whether they are Majorana or Dirac particles—is explored. Experiments searching for neutrinoless double beta decay are reviewed, along with their results on neutrino properties.

Neutrino anomalies are also considered, including indications of sterile neutrinos observed in accelerator, reactor, and radiochemical experiments. The latest experimental results in the search for light and heavy sterile neutrinos are discussed. The course also covers high-energy neutrino astrophysics, astrophysical sources of neutrinos, cosmogenic neutrinos, and dark matter annihilation. Key experiments such as the Baikal underwater neutrino telescope, ICECUBE, and ANTARES are included.

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Курс лекций «Нейтринная физика» знакомит студента с основными теоретическими положениями, методами, экспериментальными установками и результатами в области нейтринной физики. Он создает необходимую базу для понимания и дальнейшего более глубокого изучения этой области науки и возможности научной работы в нейтринной физике.

1. PURPOSES OF THE EDUCATIONAL COURSE

The lecture course “*Neutrino Physics*” introduces students to the fundamental theoretical principles, methods, experimental setups, and key results in the field of neutrino physics. It provides the essential foundation for understanding and further, more in-depth study of this area of science, as well as for pursuing research work in neutrino physics.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО

Для освоения данной дисциплины обучающийся должен обладать знаниями и умениями в объеме нескольких курсов высшей школы. В частности,

– иметь хорошую подготовку по ряду математических дисциплин, таких как математический анализ, линейная алгебра, дифференциальные и интегральные уравнения, теория групп. В частности, обучающийся должен быть знаком с такими понятиями как ряд, функция, функционал, поле, должен обладать знаниями достаточными для решения дифференциальных и интегральных уравнений, должен быть знаком со специальными и обобщенными функциями, иметь базовые знания по теории групп;

– обладать знаниями в объеме не меньше стандартных курсов квантовой механики и классической электродинамики, уметь оперировать с такими понятиями как квантовый оператор, коммутационные соотношения, волновая функция, каноническое квантование, вторичное квантование, Бозе и Ферми статистика, понимать качественное поведение волновых функций в задаче о связанном состоянии и в задаче рассеяния, иметь представление об аналитических свойствах волновой функции в комплексной плоскости импульса и энергии;

- понимать сущность алгоритмических предписаний и демонстрировать умение действовать в соответствии с предложенным алгоритмом;
- иметь навыки устных, письменных, инструментальных вычислений.

2. THE COURSE IN THE EDUCATIONAL PROGRAM

To successfully complete this course, student must possess comprehensive knowledge in a few disciplines of the high school. In particular,

- they should be well educated in mathematics (analysis, linear algebra, differential and integral equations, theory of groups and representations). The student must be familiar with such notions as series, function, functional, field and must be able to solve differential and integral equations, must be familiar with special and generalised functions as well as with the basic principles of the theory of groups;
- they must complete the standard courses in Quantum Mechanics and Classical Electrodynamics and be able to master such notions as quantum operator, commutation relations, wave function, canonical quantisation, second quantisation, Bose and Fermi statistics, then understand the qualitative behaviour of the wave functions for a bound-state problem and a scattering problem, possess basic knowledge in analytical properties of the wave functions in the complex momentum and energy planes;
- they must have the idea of algorithms and demonstrate the ability to follow the prescribed algorithm;
- they must possess basic abilities of various types of calculations.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Календарный план

	Тема занятия	Лекции	Семинары	Самост. работа
1	Введение. Слабые взаимодействия. Гипотеза нейтрино. Фундаментальные симметрии. Нарушение P-четности	1	1	0
2	Открытие нейтрино в реакторном эксперименте. Открытие мюонных нейтрино. Спиральность нейтрино.	1	1	0
3	V-A теория. Промежуточные бозоны. Нейтральные токи.	1	1	0
4	Стандартная солнечная модель. Детектирование солнечных нейтрино. Открытие осцилляций солнечных нейтрино	1	1	0
5	Атмосферные нейтрино. Детектор СуперКамиоканде. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино	1	1	0
6	Феноменология нейтринных осцилляций. Осцилляций нейтрино в вакууме и в веществе	1	1	0
7	Ускорительные эксперименты с длинной базой	1	1	0
8	Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах	1	1	0
9	Измерение угла смешивания θ_{13}	1	1	0
10	Поиск CP нарушения в нейтринных осцилляциях	1	1	0
11	Прямое измерение массы нейтрино. Модель	1	1	0

	качелей.			
12	Природа нейтрино. Поиск безнейтринного двойного бета распада	1	1	0
13	Нейтрино и космология. Реликтовые нейтрино. Стерильные нейтрино	1	1	0
14	Нейтринная астрофизика.	1	1	0
15	Планируемые нейтринные эксперименты. Заключение.	1	1	0
Итого часов		30	30	

Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

1. Тема 1

Введение в курс нейтринной физики. Краткое изложение физики слабых взаимодействий. Изложение Гипотезы В.Паули о существовании нейтрино. Изложение фундаментальных дискретных C, P, T, CP, CPT симметрий. Гипотеза о нарушении пространственной четности и экспериментальное обнаружение в эксперименте Ву.

2. Тема 2

Регистрация нейтрино в реакторном эксперименте Рейнеса и Коуэна. Открытие мюонных нейтрино в ускорительном эксперименте в БНЛ. Понятие спиральности нейтрино и экспериментальное измерение спиральности в эксперименте Гольдхабер.

3. Тема 3

V-A теория слабого взаимодействия. Гипотеза промежуточных векторных бозонов, объединение электромагнитного и слабого взаимодействия. Экспериментальное обнаружение нейтральных токов. Открытие W и Z бозонов в экспериментах в ЦЕРН.

4. Тема 4

Описание Стандартной Солнечной модели. Поток солнечных нейтрино на Земле. Обнаружение дефицита солнечных нейтрино в эксперименте Дэвиса, в галлиевых экспериментах и эксперименте Камиоканде. Гипотеза Б.М.Понтекорво об осцилляциях нейтрино. Открытие осцилляций солнечных нейтрино в эксперименте SNO.

5. Тема 5

Регистрация атмосферных нейтрино в подземных экспериментах. «Атмосферная аномалия». Водные черенковские детекторы Камиоканде и СуперКамиоканде. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино в эксперименте СуперКамиоканде.

6. Тема 6

Феноменология нейтринных осцилляций. Рассмотрение осцилляций двух типов нейтрино. Получение выражений для вероятности осцилляций. Матрица смешивания Понтекорво-Маки-Накагава-Саката для трех типов нейтрино. Параметры нейтринных осцилляций.

7. Тема 7

Исследование осцилляций нейтрино в ускорительных экспериментах с длинной базой. Эксперименты K2K, MINOS, OPERA. Смещенные от оси пучки нейтрино. Эксперименты с длинной базой второго поколения T2K и NOvA. Открытие осцилляцию мюонных нейтрино в электронных.

8. Тема 8

Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах. Метод детектирования реакторных антинейтрино. Эксперимент с длинной базой КамЛанд. Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах Daya Bay, RENO и Double Chooz.

9. Тема 9

Измерение угла смешивания θ_{13} в ускорительных и реакторных экспериментах. Перспективы для измерения иерархии масс нейтрино и поиска CP нарушения в лептонном секторе Стандартной Модели. Структура PMNS матрицы смешивания.

10. Тема 10

Поиск нарушения CP симметрии в нейтринных осцилляциях. Методика поиска CP нечетной асимметрии при измерении осцилляций мюонных нейтрино и антинейтрино в эксперименте T2K. Использование реакторных данных для повышения чувствительности эксперимента. Первое указание на CP нарушение в эксперименте T2K. Результаты эксперимента NOvA.

11.Тема11.

Прямое измерение массы электронного нейтрино в бета распаде трития. Эксперименты Троицк-масс и Майнц. Метод магнитной адиабатической коллимации. Эксперимент КАТРИН. Ограничение на эффективную массу электронного нейтрино.

12. Тема 12

Нейтрино Майорановская или Дираковская частица. Физика безнейтринного двойного бета распада. Ядерные матричные элементы. Экспериментальные методы поиска безнейтринного двойного бета распада в германиевых, ксеноновых и криогенных детекторах. Экспериментальные ограничения на эффективную массу нейтрино, полученные в экспериментах КамЛанд-Zen, GERDA. Ближайшие перспективы.

13. Тема 13

Нейтрино и космология. Ограничения на сумму масс нейтрино из космологических данных. Реликтовые нейтрино. Нейтрино от взрывов сверхновых. Стерильные нейтрино. Аномалия LSND, реакторная и галлиевая аномалия. Ограничения на параметры легких стерильных нейтрино из реакторных, ускорительных и астрофизических экспериментов.

14. Тема 14

Нейтринная астрофизика высоких энергий. Байкальский подводный нейтринный телескоп, эксперименты ICECUBE, ANTARES. Астрофизические источники нейтрино.

15.Тема 15

Рассматриваются нейтринные эксперименты следующего поколения ГиперКамиоканде и DUNE. Основными целями этих экспериментов являются поиск CP нарушения в нейтринных осцилляциях, определение иерархии масс нейтрино, поиск распада протона, регистрация реликтовых нейтрино от сверхновых. Будет рассмотрена экспериментальная методика и чувствительность этих экспериментов к различным физическим процессам. В заключении будут изложены основные итоги курса и проанализированы основные фундаментальные результаты, полученные в нейтринной физике.

	Chapters	Lectures	Seminars	Homework
1	Introduction. Weak Interactions. The Neutrino	1	1	0

	Hypothesis. Fundamental Symmetries. Parity Violation.			
2	Discovery of the Neutrino in Reactor Experiments. Discovery of Muon Neutrinos. Neutrino Helicity.	1	1	0
3	V-A Theory. Intermediate Vector Bosons. Neutral Currents.	1	1	0
4	Standard Solar Model. Detection of Solar Neutrinos. Discovery of Solar Neutrino Oscillations.	1	1	0
5	Atmospheric Neutrinos. The Super-Kamiokande Detector. Discovery of Atmospheric Neutrino Oscillations.	1	1	0
6	Phenomenology of Neutrino Oscillations. Neutrino Oscillations in Vacuum and in Matter.	1	1	0
7	Long-Baseline Accelerator Experiments.	1	1	0
8	Measurement of Oscillation Parameters in Reactor Experiments.	1	1	0
9	Measurement of the Mixing Angle θ_{13} .	1	1	0
10	Search for CP Violation in Neutrino Oscillations.	1	1	0
11	Direct Measurement of Neutrino Mass. The See-Saw Mechanism.	1	1	0
12	Nature of Neutrinos. Search for Neutrinoless Double Beta Decay.	1	1	0
13	Neutrinos and Cosmology. Relic Neutrinos. Sterile Neutrinos.	1	1	0
14	Neutrino Astrophysics.	1	1	0
15	Planned Neutrino Experiments. Conclusion.	1	1	0
Total		30	30	

Contents

Topic

1

Introduction to the Neutrino Physics Course. A brief overview of the physics of weak interactions. Presentation of V. Pauli's hypothesis on the existence of neutrinos. Explanation of fundamental discrete symmetries: C, P, T, CP, and CPT. The hypothesis of spatial parity violation and its experimental discovery in the Wu experiment.

Topic

2

Neutrino detection in the Reines and Cowan reactor experiment. Discovery of muon neutrinos in an accelerator experiment at BNL. The concept of neutrino helicity and experimental measurement of helicity in the Goldhaber experiment.

Topic

3

V-A theory of weak interaction. Hypothesis of intermediate vector bosons, unification of electromagnetic and weak interactions. Experimental discovery of neutral currents. Discovery of W and Z bosons in CERN experiments.

- Topic** **4**
Description of the Standard Solar Model. Solar neutrino flux on Earth. Detection of the solar neutrino deficit in the Davis experiment, gallium experiments, and the Kamiokande experiment. B.M. Pontecorvo's hypothesis of neutrino oscillations. Discovery of solar neutrino oscillations in the SNO experiment.
- Topic** **5**
Detection of atmospheric neutrinos in underground experiments. "Atmospheric anomaly." Water Cherenkov detectors Kamiokande and Super-Kamiokande. Discovery of atmospheric neutrino oscillations in the Super-Kamiokande experiment.
- Topic** **6**
Phenomenology of neutrino oscillations. Consideration of oscillations between two types of neutrinos. Derivation of oscillation probability expressions. The Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata mixing matrix for three types of neutrinos. Neutrino oscillation parameters.
- Topic** **7**
Study of neutrino oscillations in long-baseline accelerator experiments. K2K, MINOS, and OPERA experiments. Off-axis neutrino beams. Second-generation long-baseline experiments: T2K and NOvA. Discovery of muon neutrino to electron neutrino oscillations.
- Topic** **8**
Measurement of oscillation parameters in reactor experiments. Reactor antineutrino detection methods. Long-baseline KamLAND experiment. Measurement of oscillation parameters in reactor experiments: Daya Bay, RENO, and Double Chooz.
- Topic** **9**
Measurement of the mixing angle θ_{13} in accelerator and reactor experiments. Prospects for measuring the neutrino mass hierarchy and searching for CP violation in the lepton sector of the Standard Model. Structure of the PMNS mixing matrix.
- Topic** **10**
Search for CP violation in neutrino oscillations. Methods to search for CP-odd asymmetry in muon neutrino and antineutrino oscillation measurements in the T2K experiment. Use of reactor data to improve experimental sensitivity. First hint of CP violation in the T2K experiment. Results from the NOvA experiment.
- Topic** **11**
Direct measurement of the electron neutrino mass in tritium beta decay. The Troitsk and Mainz experiments. Magnetic adiabatic collimation method. The KATRIN experiment. Constraints on the effective electron neutrino mass.
- Topic** **12**
Are neutrinos Majorana or Dirac particles? Physics of neutrinoless double beta decay. Nuclear matrix elements. Experimental methods for searching for neutrinoless double beta decay in germanium, xenon, and cryogenic detectors. Experimental constraints on the effective neutrino mass from KamLAND-Zen, GERDA experiments. Future prospects.

Topic **13**
Neutrinos and cosmology. Constraints on the sum of neutrino masses from cosmological data. Relic neutrinos. Neutrinos from supernova explosions. Sterile neutrinos. LSND anomaly, reactor and gallium anomalies. Constraints on the parameters of light sterile neutrinos from reactor, accelerator, and astrophysical experiments.

Topic **14**
High-energy neutrino astrophysics. The Baikal underwater neutrino telescope, ICECUBE, and ANTARES experiments. Astrophysical sources of neutrinos.

Topic **15**
Next-generation neutrino experiments: Hyper-Kamiokande and DUNE. The main goals of these experiments are to search for CP violation in neutrino oscillations, determine the neutrino mass hierarchy, search for proton decay, and detect relic neutrinos from supernovae. The experimental methods and sensitivities of these experiments to various physical processes will be discussed. In conclusion, the main results of the course will be presented, and the fundamental outcomes in neutrino physics will be analyzed.

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Курс состоит из трёх разных форм обучения: лекции, семинары и самостоятельная работа. Лекции проводятся с использованием современных технологий, в т.ч. мультимедийных. На семинарских занятиях студенты решают типичные задачи по квантовой теории поля, проводится разбор практических задач. Предусмотрено индивидуальные и групповые консультации. Возможно дистанционное общение со студентами.

6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Разработаны контрольно-измерительные материалы для контроля успеваемости и оценочные средства для аттестации по итогам освоения дисциплины (контрольные вопросы по всем разделам курса).

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

а) ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Л.Б.Окунь. "Лептоны и кварки". Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.
2. Ю.Комминс, Б.Буксбаум. Слабые взаимодействия лептонов и кварков. Пер. с англ. Москва, Энергоиздат, 1987.
3. Ф.Боум, П. Фогель. «Физика массивных нейтрино», «Мир» , Москва, 1990.
4. К.Винтер. Neutrino physics. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology. 2008.
5. С.М.Биленький. Лекции по физике нейтринных и лептон-нуклонных процессов, Москва, Энергоиздат, 1981.

б) ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 1.Клапдор-Клайнротхаус Г.В., Шмидт А., "Неускорительная физика элементарных частиц", Пер. с нем., Москва, Наука, Физматлит, 1997.
2. 2.Дж.Бакал "Нейтринная астрофизика", "Мир", Москва, 1993.
3. 3.М.Кошиба. Рождение нейтринной астрофизики .Успехи физических наук, т.174 (2004) с.418-426.
4. 4.К.Zuber. Neutrino physics, CRC Press, 2012.
5. 5.C.Giunti and C.W.Kim. Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics, Oxford University Press, 2007.
6. 6. Герштейн С.С., Кузнецов Е.П., Рябов В.А. Природа массы нейтрино и нейтринные осцилляции. Успехи физических наук, т.167 (1997) с.811.
7. 7.Биленький С.М. Массы нейтрино, смешивание и осцилляции нейтрино. Успехи физических наук, т.173 (2003) с.1137.
8. 8.Куденко Ю.Г. Исследование нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой. Успехи физических наук, т.181 (2011) с.569-594.
- 9.

в) ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<http://www.library.mephi.ru/> библиотека НИЯУ МИФИХ

<http://www.gpntb.ru/> государственная публичная научно-техническая библиотекаХ

<http://elibrary.ru/> база данных научных статейХ

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

В ходе проведения лекций используется мультимедийное оборудование.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО 3+ по направлениям подготовки:

14.03.02 Ядерная физика и технологии.

Автор программы:

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

2. ТИПОВЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

для оценки знаний (З), умений (У) и навыков (В)

Контрольные вопросы (не менее пяти вопросов/заданий)

1. Определите кинетическую энергию реликтовых нейтрино.
2. Возможны ли осцилляции нейтрино $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$?
3. Рассчитайте вероятность (branching ratio) распада $\pi \rightarrow e\nu$. Сравните её с вероятностью распада $\pi \rightarrow \mu\nu$.
4. Покажите, возможен ли распад нейтрального пиона на нейтрино и антинейтрино, если масса нейтрино равна нулю.
5. Рассчитайте длину детектора нейтрино из железа, где вероятность взаимодействия нейтрино с энергией 1 ГэВ равна 10^{-8} . Сечение взаимодействия нейтрино равно 10^{-38} см^2 .
6. Определите порог энергии для реакции $\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \mu^{-} + \nu_e$ в лабораторной системе.

Примеры контрольных заданий (не менее пяти вопросов/заданий)

1. Выведите выражение для вероятности осцилляций между двумя типами нейтрино.
2. В водных черенковских детекторах при регистрации электронных нейтрино с энергией около 1 ГэВ одним из основных источников фона являются нейтральные пионы, производимые мюонными нейтрино через нейтральные токи. Выведите кинематику распада нейтрального пиона на два фотона. Используя это, вычислите массу пиона из измерений двух фотонов. Покажите, в каких случаях распад $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ может имитировать сигнал от одиночного электрона.
3. Выведите выражение для осцилляций нейтрино в случае трёх типов нейтрино в вакууме.
4. Выведите выражение для вероятности распада (branching ratio) $\pi \rightarrow e\nu$. Сравните её с вероятностью распада $\pi \rightarrow \mu\nu$.
5. Черенковский водный детектор используется для поиска распада протона. Основной режим $p \rightarrow e + \pi^0$. Какие процессы с участием атмосферных нейтрино могут имитировать этот распад? Какие методы используются для подавления фона атмосферных нейтрино?

Примеры экзаменационных билетов (если форма контроля — экзамен)

Билет 1:

1. Измерение осцилляционных параметров в ускорительных экспериментах K2K и MINOS.
2. Выведите выражение для CP-нечётной асимметрии

$$A_{CP} = P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \nu_e)$$

в вакууме, используя полные выражения для осцилляций трёх типов нейтрино. Рассчитайте численное значение асимметрии для энергии мюонных нейтрино 600 МэВ и базы 300 км. Осцилляционные параметры: $\theta_{12}=34^\circ$, $\theta_{23}=45^\circ$, $\theta_{13}=9^\circ$, $\Delta m_{212}^2=7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$, $\Delta m_{232}^2=2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$.

Билет 2:

1. Эксперимент Super-Kamiokande. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино.
2. В случае распада $\pi \rightarrow \mu \nu$ выведите зависимость энергии нейтрино (в лабораторной системе) от угла θ между направлением пиона и нейтрино. Рассмотрите случай малого угла θ . Постройте графики зависимости энергии нейтрино от энергии пиона для углов 0, 1, 2, 3 градуса в диапазоне энергий пионов от 0 до 20 ГэВ.

Билет 3:

1. Измерение угла θ_{13} в экспериментах T2K и реакторных экспериментах.
2. Оцените вклад вещества в CP-нечётную асимметрию

$$A_{CP} = P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \nu_e)$$

для двух случаев: $E_\nu=600 \text{MeV}, L=300 \text{km}$ и $E_\nu=1800 \text{MeV}, L=900 \text{km}$. Считайте нормальную иерархию масс. Используйте осцилляционные параметры из таблиц PDG.

Билет 4:

1. Измерение солнечных нейтрино в эксперименте SNO. Открытие осцилляций солнечных нейтрино.
2. Мюонное нейтрино взаимодействует в воде и рождает мюон с энергией 1 ГэВ. Рассчитайте размеры Черенковского кольца (внутренний и внешний диаметры) на стенке, перпендикулярной направлению мюона, расположенной на расстоянии 20 м от точки взаимодействия. Предложите метод восстановления вершины взаимодействия нейтрино и оцените погрешность при временном разрешении фотоумножителей 2 нс.

Билет 5:

1. Безнейтринный двойной бета распад. Майорановские и Дираковские нейтрино.
2. Определите оптимальные базы реакторных экспериментов для измерения «солнечных» параметров и угла θ_{13} . Считайте среднюю энергию реакторных антинейтрино 4 МэВ. Возможно ли измерение «атмосферных параметров» в экспериментах с реакторными нейтрино? Если да, то при какой базе?

QUESTIONS

Control Questions (at least five questions/tasks)

1. Determine the kinetic energy of relic neutrinos.

2. Are neutrino oscillations possible for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$?
3. Calculate the branching ratio for the decay $\pi \rightarrow e\nu$. Compare it with the decay $\pi \rightarrow \mu\nu$.
4. Show whether the decay of a neutral pion to neutrino and antineutrino is possible if the neutrino mass is zero.
5. Calculate the length of a neutrino detector made of iron, where the probability of interaction of a neutrino with an energy of 1 GeV is 10^{-8} . The cross-section for neutrino interaction is 10^{-38}cm^2 .
6. Determine the threshold energy for the reaction $\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \mu^{-} + \nu_e$ in the laboratory system.

Examples of Control Tasks (at least five questions/tasks)

1. Derive the expression for the oscillation probability between two types of neutrinos.
2. In water Cherenkov detectors, the detection of electron neutrinos with an energy of about 1 GeV often faces background from neutral pions, produced by muon neutrinos via neutral currents. Derive the kinematics for the decay of a neutral pion into two photons. Use this to calculate the mass of the pion from the measurement of the two photons. Show in what cases the decay $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ can mimic a signal from a single electron.
3. Derive the expression for neutrino oscillations in the case of three neutrino types in vacuum.
4. Derive the branching ratio for the decay $\pi \rightarrow e\nu$. Compare it with the branching ratio for the decay $\pi \rightarrow \mu\nu$.
5. The Cherenkov water detector is used to search for proton decay. The main mode is $p \rightarrow e + \pi^0$. What processes involving atmospheric neutrinos can mimic this decay? What methods are used to suppress the background from atmospheric neutrinos?

Examples of Exam Tickets (if the form of assessment is an exam)

Ticket 1:

1. Measurement of oscillation parameters in the K2K and MINOS accelerator experiments.
2. Derive the expression for the CP-odd asymmetry

$$A_{CP} = \frac{P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \nu_e)}{P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e)}$$

in vacuum, using the full expressions for three-neutrino oscillations. Calculate the numerical value of the asymmetry for the energy of muon neutrinos at 600 MeV and a baseline of 300 km. The oscillation parameters are: $\theta_{12} = 34^\circ$, $\theta_{23} = 45^\circ$, $\theta_{13} = 9^\circ$, $\Delta m_{21}^2 = 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$, $\Delta m_{23}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$.

Ticket 2:

1. Super-Kamiokande experiment. Discovery of atmospheric neutrino oscillations.
2. In the case of the decay $\pi \rightarrow \mu\nu$, derive the dependence of neutrino energy (in the laboratory frame) on the angle θ between the direction of the pion and the neutrino. Specifically, examine the case of small angle θ . Construct graphs showing the dependence of neutrino energy on pion energy for angles of 0, 1, 2, 3 degrees in the pion energy range of 0 to 20 GeV.

Ticket 3:

1. Measurement of the mixing angle θ_{13} in the T2K and reactor experiments.
2. Evaluate the contribution of matter to the CP-odd asymmetry

$$ACP = P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e)$$

for two cases: $E_{\nu} = 600 \text{ MeV}, L = 300 \text{ km}$ and $E_{\nu} = 1800 \text{ MeV}, L = 900 \text{ km}$. Assume normal mass hierarchy. Use the oscillation parameters from PDG tables.

Ticket 4:

1. Measurement of solar neutrinos in the SNO experiment. Discovery of solar neutrino oscillations.
2. A muon neutrino interacts in water and produces a muon with an energy of 1 GeV. Calculate the size of the Cherenkov ring (inner and outer diameters) on the wall, perpendicular to the muon direction, located 20 meters from the interaction point. Propose a method to reconstruct the neutrino interaction vertex and estimate the error with a photo-multiplier time resolution of 2 ns.

Ticket 5:

1. Neutrinoless double beta decay. Majorana and Dirac neutrinos.
2. Determine the optimal baseline lengths for reactor experiments aimed at measuring "solar" parameters and the mixing angle θ_{13} . Assume an average reactor antineutrino energy of 4 MeV. Is it possible to measure "atmospheric parameters" in reactor neutrino experiments? If so, at what baseline length?

Составитель

Зам. заведующего кафедрой

_____ Грачёв В.М.

« ____ » _____ 20 г.

Критерии для аттестации разделов:

Теоретическая часть курса содержит 25 вопросов, разбитых на 4 раздела. Студенту выставляется от 0 до 2 баллов за каждый вопрос в зависимости от полноты и аргументированности ответа. Максимальное количество баллов, которое может получить студент по результатам аттестации теоретической части, – 50 баллов. Минимальное количество баллов, которое необходимо получить студенту для аттестации, – 30 баллов.

Каждый из 4 разделов списка задач к практическим занятиям содержит по 6 задач, которые студенту необходимо решить для аттестации соответствующего раздела. Студенту выставляется от 0 до 2 баллов за каждую задачу в зависимости от правильности решения, его полноты и аргументированности, подтверждающей знание материала. Максимальное количество баллов, которое может получить студент по результатам аттестации практической части, – 48 баллов. Минимальное количество баллов, которое необходимо получить студенту для аттестации, – 30 баллов (но не менее 6 баллов по каждому разделу).

Для допуска к сдаче экзамена по курсу студент должен получить не менее 30 баллов по результатам аттестации теоретической части и не менее 30 баллов по результатам аттестации практической части (причём не менее 6 баллов за каждый из разделов).

Общая оценка определяется суммой баллов, полученных студентом на экзамене (минимальное количество – 30 баллов, максимальное количество – 50 баллов) и по итогам аттестации разделов. Итоговая оценка определяется общим количеством баллов.

Критерии общей оценки:

Процент результативности (правильных ответов)	Качественная оценка индивидуальных образовательных достижений	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 ÷ 100	5	отлично
70 ÷ 89	4	хорошо
60 ÷ 69	3	удовлетворительно
менее 60	2	не удовлетворительно

Оценка экзамена, зачёта (стандартная)		Оценка экзамена, зачёта (тестовые нормы: % правильных ответов)	Требования к знаниям на устном зачёте
«отлично», A	90 ÷ 100 %	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.	2.2 Ко нт ро ль по ит ога м (К И) - 12 Не де ля
«хорошо», D, C, B	70 ÷ 89%	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.	
«удовлетворительно» E, D	60 ÷ 69%	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.	
«неудовлетворительно», F	менее 60%	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.	

АННОТАЦИЯ

Курс лекций «Физика нейтрино» включает в себя следующие основные разделы.

Предсказание и открытие нейтрино. Обнаружение мюонного нейтрино, измерение спиральности нейтрино, открытие нарушения пространственной четности в слабых взаимодействиях. Будет рассмотрена физика слабых взаимодействий, V-A теория, фундаментальные дискретные симметрии C, P, T, CP и CPT. Обсуждается теория Вайнберга-Салама (объединение электромагнитных и слабых взаимодействий) и свойства нейтрино в рамках Стандартной Модели. Рассматривается открытие нейтральных токов и промежуточных бозонов.

Значительное внимание уделено осцилляциям нейтрино. Изложена идея Б.М. Понтекорво и экспериментальное открытие нейтринных осцилляций в экспериментах с солнечными и атмосферными нейтрино. Детально рассмотрены ускорительные и реакторные осцилляционные эксперименты, измерение угла смешивания θ_{13} и поиск CP нарушения в лептонном секторе Стандартной Модели. Представлена феноменология нейтринных осцилляций в вакууме и в веществе. Излагаются дальнейшие перспективы осцилляционных экспериментов следующего поколения.

Рассмотрены эксперименты по прямому измерению массы нейтрино в бета распаде трития. Представлены ограничения на суммарную массу нейтрино из космологических данных. Обсуждается природа нейтрино: Майорановские или Дираковские частицы. Рассмотрены эксперименты по поиску безнейтринного двойного бета распада и представлены результаты по исследованию свойств нейтрино.

Также рассмотрены нейтринные аномалии: указания на существования стерильных нейтрино, полученные в ускорительных, реакторных радиохимических экспериментах. Обсуждаются последние экспериментальные результаты по поиску легких и тяжелых стерильных нейтрино. Рассматривается нейтринная астрофизика высоких энергий, астрофизические источники нейтрино, космогенные нейтрино, аннигиляция темной материи. Байкальский подводный нейтринный телескоп, эксперименты ICECUBE и ANTARES.

ABSTRACT

The lecture course “*Neutrino Physics*” includes the following main sections:

Prediction and Discovery of the Neutrino.

The detection of the muon neutrino, measurement of neutrino helicity, and the discovery of parity violation in weak interactions are discussed. The course covers the physics of weak interactions, the V-A theory, and the fundamental discrete symmetries: C, P, T, CP, and CPT. The Weinberg–Salam theory (unification of electromagnetic and weak interactions) and the properties of neutrinos within the Standard Model are also examined, along with the discovery of neutral currents and intermediate vector bosons.

Significant attention is devoted to neutrino oscillations.

The course presents B.M. Pontecorvo’s idea and the experimental discovery of neutrino oscillations in solar and atmospheric neutrino experiments. Accelerator and reactor-based oscillation experiments are examined in detail, including the measurement of the mixing angle θ_{13} and the search for CP violation in the lepton sector of the Standard Model. The phenomenology of neutrino oscillations in vacuum and matter is presented, along with future prospects for next-generation oscillation experiments.

Experiments for direct measurement of neutrino mass in tritium beta decay are discussed. The course also presents constraints on the sum of neutrino masses derived from cosmological data. The nature of neutrinos—whether they are Majorana or Dirac particles—is explored. Experiments searching for neutrinoless double beta decay are reviewed, along with their results on neutrino properties.

Neutrino anomalies are also considered, including indications of sterile neutrinos observed in accelerator, reactor, and radiochemical experiments. The latest experimental results in the search for light and heavy sterile neutrinos are discussed. The course also covers high-energy neutrino astrophysics, astrophysical sources of neutrinos, cosmogenic neutrinos, and dark matter annihilation. Key experiments such as the Baikal underwater neutrino telescope, ICECUBE, and ANTARES are included.

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Курс лекций «Нейтринная физика» знакомит студента с основными теоретическими положениями, методами, экспериментальными установками и результатами в области нейтринной физики. Он создает необходимую базу для понимания и дальнейшего более глубокого изучения этой области науки и возможности научной работы в нейтринной физике.

1. PURPOSES OF THE EDUCATIONAL COURSE

The lecture course “*Neutrino Physics*” introduces students to the fundamental theoretical principles, methods, experimental setups, and key results in the field of neutrino physics. It provides the essential foundation for understanding and further, more in-depth study of this area of science, as well as for pursuing research work in neutrino physics.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО

Для освоения данной дисциплины обучающийся должен обладать знаниями и умениями в объеме нескольких курсов высшей школы. В частности,

- иметь хорошую подготовку по ряду математических дисциплин, таких как математический анализ, линейная алгебра, дифференциальные и интегральные уравнения, теория групп. В частности, обучающийся должен быть знаком с такими понятиями как ряд, функция, функционал, поле, должен обладать знаниями достаточными для решения дифференциальных и интегральных уравнений, должен быть знаком со специальными и обобщёнными функциями, иметь базовые знания по теории групп;
- обладать знаниями в объёме не меньше стандартных курсов квантовой механики и классической электродинамики, уметь оперировать с такими понятиями как квантовый оператор, коммутационные соотношения, волновая функция, каноническое квантование, вторичное квантование, Бозе и Ферми статистика, понимать качественное поведение волновых функций в задаче о связанном состоянии и в задаче рассеяния, иметь представление об аналитических свойствах волновой функции в комплексной плоскости импульса и энергии;
- понимать сущность алгоритмических предписаний и демонстрировать умение действовать в соответствии с предложенным алгоритмом;
- иметь навыки устных, письменных, инструментальных вычислений.

2. THE COURSE IN THE EDUCATIONAL PROGRAM

To successfully complete this course, student must possess comprehensive knowledge in a few disciplines of the high school. In particular,

- they should be well educated in mathematics (analysis, linear algebra, differential and integral equations, theory of groups and representations). The student must be familiar with such notions as series, function, functional, field and must be able to solve differential and integral equations, must be familiar with special and generalised functions as well as with the basic principles of the theory of groups;
- they must complete the standard courses in Quantum Mechanics and Classical Electrodynamics and be able to master such notions as quantum operator, commutation relations, wave function, canonical quantization, second quantization, Bose and Fermi statistics, then understand the qualitative behaviour of the wave functions for a bound-state problem and a scattering problem, possess basic knowledge in analytical properties of the wave functions in the complex momentum and energy planes;
- they must have the idea of algorithms and demonstrate the ability to follow the prescribed algorithm;
- they must possess basic abilities of various types of calculations.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Календарный план

	Тема занятия	Лекции	Семинары	Самост. работа
1	Введение. Слабые взаимодействия. Гипотеза нейтрино. Фундаментальные симметрии. Нарушение Р-четности	1	1	0
2	Открытие нейтрино в реакторном эксперименте. Открытие мюонных	1	1	0

	нейтрино. Спиральность нейтрино.			
3	V-A теория. Промежуточные бозоны. Нейтральные токи.	1	1	0
4	Стандартная солнечная модель. Детектирование солнечных нейтрино. Открытие осцилляций солнечных нейтрино	1	1	0
5	Атмосферные нейтрино. Детектор СуперКамиоканде. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино	1	1	0
6	Феноменология нейтринных осцилляций. Осцилляций нейтрино в вакууме и в веществе	1	1	0
7	Ускорительные эксперименты с длинной базой	1	1	0
8	Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах	1	1	0
9	Измерение угла смешивания θ_{13}	1	1	0
10	Поиск CP нарушения в нейтринных осцилляциях	1	1	0
11	Прямое измерение массы нейтрино. Модель качелей.	1	1	0
12	Природа нейтрино. Поиск безнейтринного двойного бета распада	1	1	0
13	Нейтрино и космология. Реликтовые нейтрино. Стерильные нейтрино	1	1	0
14	Нейтринная астрофизика.	1	1	0
15	Планируемые нейтринные эксперименты. Заключение.	1	1	0
Итого часов		30	30	

Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

1. Тема 1

Введение в курс нейтринной физики. Краткое изложение физики слабых взаимодействий. Изложение Гипотезы В.Паули о существовании нейтрино. Изложение фундаментальных дискретных C,P,T, CP, CPT симметрий. Гипотеза о нарушении пространственной четности и экспериментальное обнаружение в эксперименте Ву.

2. Тема 2

Регистрация нейтрино в реакторном эксперименте Рейнеса и Коуэна. Открытие мюонных нейтрино в ускорительном эксперименте в БНЛ. Понятие спиральности нейтрино и экспериментальное измерение спиральности в эксперименте Гольдхабер.

3. Тема 3

V-A теория слабого взаимодействия. Гипотеза промежуточных векторных бозонов, объединение электромагнитного и слабого взаимодействия. Экспериментальное обнаружение нейтральных токов. Открытие W и Z бозонов в экспериментах в ЦЕРН.

4. Тема 4

Описание Стандартной Солнечной модели. Поток солнечных нейтрино на Земле. Обнаружение дефицита солнечных нейтрино в эксперименте Дэвиса, в галлиевых экспериментах и эксперименте Камиоканде. Гипотеза Б.М.Понтекорво об осцилляциях нейтрино. Открытие осцилляций солнечных нейтрино в эксперименте SNO.

5. Тема 5

Регистрация атмосферных нейтрино в подземных экспериментах. «Атмосферная аномалия». Водные черенковские детекторы Камиоканде и СуперКамиоканде. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино в эксперименте СуперКамиоканде.

6. Тема 6

Феноменология нейтринных осцилляций. Рассмотрение осцилляций двух типов нейтрино. Получение выражений для вероятности осцилляций. Матрица смешивания Понтекорво-Маки-Накагава-Саката для трех типов нейтрино. Параметры нейтринных осцилляций.

7. Тема 7

Исследование осцилляций нейтрино в ускорительных экспериментах с длинной базой. Эксперименты K2K, MINOS, OPERA. Смещенные от оси пучки нейтрино. Эксперименты с длинной базой второго поколения T2K и NOvA. Открытие осцилляцию мюонных нейтрино в электронных.

8. Тема 8

Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах. Метод детектирования реакторных антинейтрино. Эксперимент с длинной базой КамЛанд. Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах Daya Bay, RENO и Double Chooz.

9. Тема 9

Измерение угла смешивания θ_{13} в ускорительных и реакторных экспериментах. Перспективы для измерения иерархии масс нейтрино и поиска CP нарушения в лептонном секторе Стандартной Модели. Структура PMNS матрицы смешивания.

10. Тема 10

Поиск нарушения CP симметрии в нейтринных осцилляциях. Методика поиска CP нечетной асимметрии при измерении осцилляций мюонных нейтрино и антинейтрино в эксперименте T2K. Использование реакторных данных для повышения чувствительности эксперимента. Первое указание на CP нарушение в эксперименте T2K. Результаты эксперимента NOvA.

11. Тема 11

Прямое измерение массы электронного нейтрино в бета распаде трития. Эксперименты Троицк-масс и Майнц. Метод магнитной адиабатической коллимации. Эксперимент КАТРИН. Ограничение на эффективную массу электронного нейтрино.

12. Тема 12

Нейтрино Майорановская или Дираковская частица. Физика безнейтринного двойного бета распада. Ядерные матричные элементы. Экспериментальные методы поиска безнейтринного двойного бета распада в германиевых, ксеноновых и криогенных детекторах. Экспериментальные ограничения на эффективную массу нейтрино, полученные в экспериментах КамЛанд-Zen, GERDA. Ближайшие перспективы.

13. Тема 13

Нейтрино и космология. Ограничения на сумму масс нейтрино из космологических данных. Реликтовые нейтрино. Нейтрино от взрывов сверхновых. Стерильные нейтрино. Аномалия

LSND, реакторная и галлиевая аномалия. Ограничения на параметры легких стерильных нейтрино из реакторных, ускорительных и астрофизических экспериментов.

14. Тема 14

Нейтринная астрофизика высоких энергий. Байкальский подводный нейтринный телескоп, эксперименты ICECUBE, ANTARES. Астрофизические источники нейтрино.

15. Тема 15

Рассматриваются нейтринные эксперименты следующего поколения ГиперКамиоканде и DUNE. Основными целями этих экспериментов являются поиск CP нарушения в нейтринных осцилляциях, определение иерархии масс нейтрино, поиск распада протона, регистрация реликтовых нейтрино от сверхновых. Будет рассмотрена экспериментальная методика и чувствительность этих экспериментов к различным физическим процессам. В заключении будут изложены основные итоги курса и проанализированы основные фундаментальные результаты, полученные в нейтринной физике.

	Chapters	Lectures	Seminars	Homework
1	Introduction. Weak Interactions. The Neutrino Hypothesis. Fundamental Symmetries. Parity Violation.	1	1	0
2	Discovery of the Neutrino in Reactor Experiments. Discovery of Muon Neutrinos. Neutrino Helicity.	1	1	0
3	V-A Theory. Intermediate Vector Bosons. Neutral Currents.	1	1	0
4	Standard Solar Model. Detection of Solar Neutrinos. Discovery of Solar Neutrino Oscillations.	1	1	0
5	Atmospheric Neutrinos. The Super-Kamiokande Detector. Discovery of Atmospheric Neutrino Oscillations.	1	1	0
6	Phenomenology of Neutrino Oscillations. Neutrino Oscillations in Vacuum and in Matter.	1	1	0
7	Long-Baseline Accelerator Experiments.	1	1	0
8	Measurement of Oscillation Parameters in Reactor Experiments.	1	1	0
9	Measurement of the Mixing Angle θ_{13} .	1	1	0
10	Search for CP Violation in Neutrino Oscillations.	1	1	0
11	Direct Measurement of Neutrino Mass. The See-Saw Mechanism.	1	1	0
12	Nature of Neutrinos. Search for Neutrinoless Double Beta Decay.	1	1	0
13	Neutrinos and Cosmology. Relic Neutrinos. Sterile Neutrinos.	1	1	0
14	Neutrino Astrophysics.	1	1	0
15	Planned Neutrino Experiments. Conclusion.	1	1	0

Total	30	30	
-------	----	----	--

Contents

Topic	1
Introduction to the Neutrino Physics Course. A brief overview of the physics of weak interactions. Presentation of V. Pauli's hypothesis on the existence of neutrinos. Explanation of fundamental discrete symmetries: C, P, T, CP, and CPT. The hypothesis of spatial parity violation and its experimental discovery in the Wu experiment.	
Topic	2
Neutrino detection in the Reines and Cowan reactor experiment. Discovery of muon neutrinos in an accelerator experiment at BNL. The concept of neutrino helicity and experimental measurement of helicity in the Goldhaber experiment.	
Topic	3
V-A theory of weak interaction. Hypothesis of intermediate vector bosons, unification of electromagnetic and weak interactions. Experimental discovery of neutral currents. Discovery of W and Z bosons in CERN experiments.	
Topic	4
Description of the Standard Solar Model. Solar neutrino flux on Earth. Detection of the solar neutrino deficit in the Davis experiment, gallium experiments, and the Kamiokande experiment. B.M. Pontecorvo's hypothesis of neutrino oscillations. Discovery of solar neutrino oscillations in the SNO experiment.	
Topic	5
Detection of atmospheric neutrinos in underground experiments. "Atmospheric anomaly." Water Cherenkov detectors Kamiokande and Super-Kamiokande. Discovery of atmospheric neutrino oscillations in the Super-Kamiokande experiment.	
Topic	6
Phenomenology of neutrino oscillations. Consideration of oscillations between two types of neutrinos. Derivation of oscillation probability expressions. The Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata mixing matrix for three types of neutrinos. Neutrino oscillation parameters.	
Topic	7
Study of neutrino oscillations in long-baseline accelerator experiments. K2K, MINOS, and OPERA experiments. Off-axis neutrino beams. Second-generation long-baseline experiments: T2K and NOvA. Discovery of muon neutrino to electron neutrino oscillations.	
Topic	8
Measurement of oscillation parameters in reactor experiments. Reactor antineutrino detection methods. Long-baseline KamLAND experiment. Measurement of oscillation parameters in reactor experiments: Daya Bay, RENO, and Double Chooz.	
Topic	9
Measurement of the mixing angle θ_{13} in accelerator and reactor experiments. Prospects for measuring	

the neutrino mass hierarchy and searching for CP violation in the lepton sector of the Standard Model. Structure of the PMNS mixing matrix.

Topic **10**

Search for CP violation in neutrino oscillations. Methods to search for CP-odd asymmetry in muon neutrino and antineutrino oscillation measurements in the T2K experiment. Use of reactor data to improve experimental sensitivity. First hint of CP violation in the T2K experiment. Results from the NOvA experiment.

Topic **11**

Direct measurement of the electron neutrino mass in tritium beta decay. The Troitsk and Mainz experiments. Magnetic adiabatic collimation method. The KATRIN experiment. Constraints on the effective electron neutrino mass.

Topic **12**

Are neutrinos Majorana or Dirac particles? Physics of neutrinoless double beta decay. Nuclear matrix elements. Experimental methods for searching for neutrinoless double beta decay in germanium, xenon, and cryogenic detectors. Experimental constraints on the effective neutrino mass from KamLAND-Zen, GERDA experiments. Future prospects.

Topic **13**

Neutrinos and cosmology. Constraints on the sum of neutrino masses from cosmological data. Relic neutrinos. Neutrinos from supernova explosions. Sterile neutrinos. LSND anomaly, reactor and gallium anomalies. Constraints on the parameters of light sterile neutrinos from reactor, accelerator, and astrophysical experiments.

Topic **14**

High-energy neutrino astrophysics. The Baikal underwater neutrino telescope, ICECUBE, and ANTARES experiments. Astrophysical sources of neutrinos.

Topic **15**

Next-generation neutrino experiments: Hyper-Kamiokande and DUNE. The main goals of these experiments are to search for CP violation in neutrino oscillations, determine the neutrino mass hierarchy, search for proton decay, and detect relic neutrinos from supernovae. The experimental methods and sensitivities of these experiments to various physical processes will be discussed. In conclusion, the main results of the course will be presented, and the fundamental outcomes in neutrino physics will be analyzed.

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Курс состоит из трёх разных форм обучения: лекции, семинары и самостоятельная работа. Лекции проводятся с использованием современных технологий, в т.ч. мультимедийных. На семинарских занятиях студенты решают типичные задачи по квантовой теории поля, проводится разбор практических задач. Предусмотрено индивидуальные и групповые консультации. Возможно дистанционное общение со студентами.

6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Разработаны контрольно-измерительные материалы для контроля успеваемости и оценочные средства для аттестации по итогам освоения дисциплины (контрольные вопросы по всем разделам курса).

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

а) ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 1.Л.Б.Окунь. "Лептоны и кварки". Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.
2. 2.Ю.Комминс, Б.Буксбаум. Слабые взаимодействия лептонов и кварков. Пер. с англ. Москва, Энергоиздат, 1987.
3. 3. Ф.Боум, П. Фогель. «Физика массивных нейтрино», «Мир» , Москва, 1990.
4. 4.K.Winter. Neutrino physics. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology. 2008.
5. 5.С.М.Биленький. Лекции по физике нейтринных и лептон-нуклонных процессов, Москва, Энергоиздат, 1981.

б) ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 1.Клапдор-Клайнротхаус Г.В., Шмидт А., "Неускорительная физика элементарных частиц", Пер. с нем., Москва, Наука, Физматлит, 1997.
2. 2.Дж.Бакал "Нейтринная астрофизика", "Мир", Москва, 1993.
3. 3.М.Кошиба. Рождение нейтринной астрофизики .Успехи физических наук, т.174 (2004) с.418-426.
4. 4.K.Zuber. Neutrino physics, CRC Press, 2012.
5. 5.C.Giunti and C.W.Kim. Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics, Oxford University Press, 2007.
6. 6. Герштейн С.С., Кузнецов Е.П., Рябов В.А. Природа массы нейтрино и нейтринные осцилляции. Успехи физических наук, т.167 (1997) с.811.
7. 7.Биленький С.М. Массы нейтрино, смешивание и осцилляции нейтрино. Успехи физических наук, т.173 (2003) с.1137.
8. 8.Куденко Ю.Г. Исследование нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой. Успехи физических наук, т.181 (2011) с.569-594.
- 9.

в) ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<http://www.library.mephi.ru/> библиотека НИЯУ МИФИХ

<http://www.gpntb.ru/> государственная публичная научно-техническая библиотекаХ

<http://elibrary.ru/> база данных научных статейХ

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

В ходе проведения лекций используется мультимедийное оборудование.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО 3+ по направлениям подготовки:

14.03.02 Ядерная физика и технологии.

Автор программы:

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

2. ТИПОВЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

для оценки знаний (З), умений (У) и навыков (В)

Контрольные вопросы (не менее пяти вопросов/заданий)

1. Определите кинетическую энергию реликтовых нейтрино.
2. Возможны ли осцилляции нейтрино $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$?
3. Рассчитайте вероятность (branching ratio) распада $\pi \rightarrow e\nu$. Сравните её с вероятностью распада $\pi \rightarrow \mu\nu$.
4. Покажите, возможен ли распад нейтрального пиона на нейтрино и антинейтрино, если масса нейтрино равна нулю.
5. Рассчитайте длину детектора нейтрино из железа, где вероятность взаимодействия нейтрино с энергией 1 ГэВ равна 10^{-8} . Сечение взаимодействия нейтрино равно 10^{-38}см^2 .
6. Определите порог энергии для реакции $\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \mu^{-} + \nu_e$ в лабораторной системе.

Примеры контрольных заданий (не менее пяти вопросов/заданий)

1. Выведите выражение для вероятности осцилляций между двумя типами нейтрино.
2. В водных черенковских детекторах при регистрации электронных нейтрино с энергией около 1 ГэВ одним из основных источников фона являются нейтральные пионы, производимые мюонными нейтрино через нейтральные токи. Выведите кинематику распада нейтрального пиона на два фотона. Используя это, вычислите массу пиона из измерений двух фотонов. Покажите, в каких случаях распад $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ может имитировать сигнал от одиночного электрона.
3. Выведите выражение для осцилляций нейтрино в случае трёх типов нейтрино в вакууме.
4. Выведите выражение для вероятности распада (branching ratio) $\pi \rightarrow e\nu$. Сравните её с вероятностью распада $\pi \rightarrow \mu\nu$.
5. Черенковский водный детектор используется для поиска распада протона. Основной режим $p \rightarrow e + \pi^0$. Какие процессы с участием атмосферных нейтрино могут имитировать этот распад? Какие методы используются для подавления фона атмосферных нейтрино?

Примеры экзаменационных билетов (если форма контроля — экзамен)

Билет 1:

1. Измерение осцилляционных параметров в ускорительных экспериментах K2K и MINOS.
2. Выведите выражение для CP-нечётной асимметрии

$$A_{CP} = P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \nu_e)$$

в вакууме, используя полные выражения для осцилляций трёх типов нейтрино. Рассчитайте численное значение асимметрии для энергии мюонных нейтрино 600 МэВ и базы 300 км. Осцилляционные параметры: $\theta_{12}=34^\circ$, $\theta_{23}=45^\circ$, $\theta_{13}=9^\circ$, $\Delta m_{212}^2=7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$, $\Delta m_{232}^2=2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$.

Билет 2:

1. Эксперимент Super-Kamiokande. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино.
2. В случае распада $\pi \rightarrow \mu \nu$ выведите зависимость энергии нейтрино (в лабораторной системе) от угла θ между направлением пиона и нейтрино. Рассмотрите случай малого угла θ . Постройте графики зависимости энергии нейтрино от энергии пиона для углов 0, 1, 2, 3 градуса в диапазоне энергий пионов от 0 до 20 ГэВ.

Билет 3:

1. Измерение угла θ_{13} в экспериментах T2K и реакторных экспериментах.
2. Оцените вклад вещества в CP-нечётную асимметрию

$$A_{CP} = P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \nu_e)$$

для двух случаев: $E_\nu=600 \text{MeV}, L=300 \text{km}$ и $E_\nu=1800 \text{MeV}, L=900 \text{km}$. Считайте нормальную иерархию масс. Используйте осцилляционные параметры из таблиц PDG.

Билет 4:

1. Измерение солнечных нейтрино в эксперименте SNO. Открытие осцилляций солнечных нейтрино.
2. Мюонное нейтрино взаимодействует в воде и рождает мюон с энергией 1 ГэВ. Рассчитайте размеры Черенковского кольца (внутренний и внешний диаметры) на стенке, перпендикулярной направлению мюона, расположенной на расстоянии 20 м от точки взаимодействия. Предложите метод восстановления вершины взаимодействия нейтрино и оцените погрешность при временном разрешении фотоумножителей 2 нс.

Билет 5:

1. Безнейтринный двойной бета распад. Майорановские и Дираковские нейтрино.
2. Определите оптимальные базы реакторных экспериментов для измерения «солнечных» параметров и угла θ_{13} . Считайте среднюю энергию реакторных антинейтрино 4 МэВ. Возможно ли измерение «атмосферных параметров» в экспериментах с реакторными нейтрино? Если да, то при какой базе?

QUESTIONS

Control Questions (at least five questions/tasks)

1. Determine the kinetic energy of relic neutrinos.

2. Are neutrino oscillations possible for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}^{-}$?
3. Calculate the branching ratio for the decay $\pi \rightarrow e\nu$. Compare it with the decay $\pi \rightarrow \mu\nu$.
4. Show whether the decay of a neutral pion to neutrino and antineutrino is possible if the neutrino mass is zero.
5. Calculate the length of a neutrino detector made of iron, where the probability of interaction of a neutrino with an energy of 1 GeV is 10^{-8} . The cross-section for neutrino interaction is 10^{-38}cm^2 .
6. Determine the threshold energy for the reaction $\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \mu^{-} + \nu_e$ in the laboratory system.

Examples of Control Tasks (at least five questions/tasks)

1. Derive the expression for the oscillation probability between two types of neutrinos.
2. In water Cherenkov detectors, the detection of electron neutrinos with an energy of about 1 GeV often faces background from neutral pions, produced by muon neutrinos via neutral currents. Derive the kinematics for the decay of a neutral pion into two photons. Use this to calculate the mass of the pion from the measurement of the two photons. Show in what cases the decay $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ can mimic a signal from a single electron.
3. Derive the expression for neutrino oscillations in the case of three neutrino types in vacuum.
4. Derive the branching ratio for the decay $\pi \rightarrow e\nu$. Compare it with the branching ratio for the decay $\pi \rightarrow \mu\nu$.
5. The Cherenkov water detector is used to search for proton decay. The main mode is $p \rightarrow e + \pi^0$. What processes involving atmospheric neutrinos can mimic this decay? What methods are used to suppress the background from atmospheric neutrinos?

Examples of Exam Tickets (if the form of assessment is an exam)

Ticket 1:

1. Measurement of oscillation parameters in the K2K and MINOS accelerator experiments.
2. Derive the expression for the CP-odd asymmetry

$$A_{CP} = P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \nu_e)$$

in vacuum, using the full expressions for three-neutrino oscillations. Calculate the numerical value of the asymmetry for the energy of muon neutrinos at 600 MeV and a baseline of 300 km. The oscillation parameters are: $\theta_{12} = 34^\circ$, $\theta_{23} = 45^\circ$, $\theta_{13} = 9^\circ$, $\Delta m_{21}^2 = 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$, $\Delta m_{23}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$.

Ticket 2:

1. Super-Kamiokande experiment. Discovery of atmospheric neutrino oscillations.
2. In the case of the decay $\pi \rightarrow \mu\nu$, derive the dependence of neutrino energy (in the laboratory frame) on the angle θ between the direction of the pion and the neutrino. Specifically, examine the case of small angle θ . Construct graphs showing the dependence of neutrino energy on pion energy for angles of 0, 1, 2, 3 degrees in the pion energy range of 0 to 20 GeV.

Ticket 3:

1. Measurement of the mixing angle θ_{13} in the T2K and reactor experiments.
2. Evaluate the contribution of matter to the CP-odd asymmetry

$$ACP = P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \nu_e)$$

for two cases: $E_{\nu} = 600 \text{ MeV}, L = 300 \text{ km}$ and $E_{\nu} = 1800 \text{ MeV}, L = 900 \text{ km}$. Assume normal mass hierarchy. Use the oscillation parameters from PDG tables.

Ticket 4:

1. Measurement of solar neutrinos in the SNO experiment. Discovery of solar neutrino oscillations.
2. A muon neutrino interacts in water and produces a muon with an energy of 1 GeV. Calculate the size of the Cherenkov ring (inner and outer diameters) on the wall, perpendicular to the muon direction, located 20 meters from the interaction point. Propose a method to reconstruct the neutrino interaction vertex and estimate the error with a photo-multiplier time resolution of 2 ns.

Ticket 5:

1. Neutrinoless double beta decay. Majorana and Dirac neutrinos.
2. Determine the optimal baseline lengths for reactor experiments aimed at measuring "solar" parameters and the mixing angle θ_{13} . Assume an average reactor antineutrino energy of 4 MeV. Is it possible to measure "atmospheric parameters" in reactor neutrino experiments? If so, at what baseline length?

Составитель

Зам. заведующего кафедрой

_____ Грачёв В.М.

« ____ » _____ 20 ____ г.

Критерии для аттестации разделов:

Теоретическая часть курса содержит 25 вопросов, разбитых на 4 раздела. Студенту выставляется от 0 до 2 баллов за каждый вопрос в зависимости от полноты и аргументированности ответа. Максимальное количество баллов, которое может получить студент по результатам аттестации теоретической части, – 50 баллов. Минимальное количество баллов, которое необходимо получить студенту для аттестации, – 30 баллов.

Каждый из 4 разделов списка задач к практическим занятиям содержит по 6 задач, которые студенту необходимо решить для аттестации соответствующего раздела. Студенту выставляется от 0 до 2 баллов за каждую задачу в зависимости от правильности решения, его полноты и аргументированности, подтверждающей знание материала. Максимальное количество баллов, которое может получить студент по результатам аттестации практической части, – 48 баллов. Минимальное количество баллов, которое необходимо получить студенту для аттестации, – 30 баллов (но не менее 6 баллов по каждому разделу).

Для допуска к сдаче экзамена по курсу студент должен получить не менее 30 баллов по результатам аттестации теоретической части и не менее 30 баллов по результатам аттестации практической части (причём не менее 6 баллов за каждый из разделов).

Общая оценка определяется суммой баллов, полученных студентом на экзамене (минимальное количество – 30 баллов, максимальное количество – 50 баллов) и по итогам аттестации разделов. Итоговая оценка определяется общим количеством баллов.

Критерии общей оценки:

Процент результативности (правильных ответов)	Качественная оценка индивидуальных образовательных достижений	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 ÷ 100	5	отлично
70 ÷ 89	4	хорошо
60 ÷ 69	3	удовлетворительно
менее 60	2	не удовлетворительно

Оценка экзамена, зачёта (стандартная)		Оценка экзамена, зачёта (тестовые нормы: % правильных ответов)	Требования к знаниям на устном зачёте
«отлично», A	90 ÷ 100 %	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.	
«хорошо», D, C, B	70 ÷ 89%	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.	
«удовлетворительно» E, D	60 ÷ 69%	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.	
«неудовлетворительно», F	менее 60%	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.	

4 Семестр

Зачет

АННОТАЦИЯ

Курс лекций «Физика нейтрино» включает в себя следующие основные разделы.

Предсказание и открытие нейтрино. Обнаружение мюонного нейтрино, измерение спиральности нейтрино, открытие нарушения пространственной четности в слабых взаимодействиях. Будет рассмотрена физика слабых взаимодействий, V-A теория, фундаментальные дискретные симметрии C, P, T, CP и CPT. Обсуждается теория Вайнберга-Салама (объединение электромагнитных и слабых взаимодействий) и свойства нейтрино в рамках Стандартной Модели. Рассматривается открытие нейтральных токов и промежуточных бозонов.

Значительное внимание уделено осцилляциям нейтрино. Изложена идея Б.М. Понтекорво и экспериментальное открытие нейтринных осцилляций в экспериментах с солнечными и атмосферными нейтрино. Детально рассмотрены ускорительные и реакторные осцилляционные эксперименты, измерение угла смешивания θ_{13} и поиск CP нарушения в лептонном секторе Стандартной Модели. Представлена феноменология нейтринных осцилляций в вакууме и в веществе. Излагаются дальнейшие перспективы осцилляционных экспериментов следующего поколения.

Рассмотрены эксперименты по прямому измерению массы нейтрино в бета распаде трития. Представлены ограничения на суммарную массу нейтрино из космологических данных. Обсуждается природа нейтрино: Майорановские или Дираковские частицы. Рассмотрены эксперименты по поиску безнейтринного двойного бета распада и представлены результаты по исследованию свойств нейтрино.

Также рассмотрены нейтринные аномалии: указания на существования стерильных нейтрино, полученные в ускорительных, реакторных радиохимических экспериментах. Обсуждаются последние экспериментальные результаты по поиску легких и тяжелых стерильных нейтрино. Рассматривается нейтринная астрофизика высоких энергий, астрофизические источники нейтрино, космогенные нейтрино, аннигиляция темной материи. Байкальский подводный нейтринный телескоп, эксперименты ICECUBE и ANTARES.

ABSTRACT

The lecture course “*Neutrino Physics*” includes the following main sections:

Prediction and Discovery of the Neutrino.

The detection of the muon neutrino, measurement of neutrino helicity, and the discovery of parity violation in weak interactions are discussed. The course covers the physics of weak interactions, the V-A theory, and the fundamental discrete symmetries: C, P, T, CP, and CPT. The Weinberg–Salam theory (unification of electromagnetic and weak interactions) and the properties of neutrinos within the Standard Model are also examined, along with the discovery of neutral currents and intermediate vector bosons.

Significant attention is devoted to neutrino oscillations.

The course presents B.M. Pontecorvo’s idea and the experimental discovery of neutrino oscillations in

solar and atmospheric neutrino experiments. Accelerator and reactor-based oscillation experiments are examined in detail, including the measurement of the mixing angle θ_{13} and the search for CP violation in the lepton sector of the Standard Model. The phenomenology of neutrino oscillations in vacuum and matter is presented, along with future prospects for next-generation oscillation experiments.

Experiments for direct measurement of neutrino mass in tritium beta decay are discussed. The course also presents constraints on the sum of neutrino masses derived from cosmological data. The nature of neutrinos—whether they are Majorana or Dirac particles—is explored. Experiments searching for neutrinoless double beta decay are reviewed, along with their results on neutrino properties.

Neutrino anomalies are also considered, including indications of sterile neutrinos observed in accelerator, reactor, and radiochemical experiments. The latest experimental results in the search for light and heavy sterile neutrinos are discussed. The course also covers high-energy neutrino astrophysics, astrophysical sources of neutrinos, cosmogenic neutrinos, and dark matter annihilation. Key experiments such as the Baikal underwater neutrino telescope, ICECUBE, and ANTARES are included.

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Курс лекций «Нейтринная физика» знакомит студента с основными теоретическими положениями, методами, экспериментальными установками и результатами в области нейтринной физики. Он создает необходимую базу для понимания и дальнейшего более глубокого изучения этой области науки и возможности научной работы в нейтринной физике.

1. PURPOSES OF THE EDUCATIONAL COURSE

The lecture course “*Neutrino Physics*” introduces students to the fundamental theoretical principles, methods, experimental setups, and key results in the field of neutrino physics. It provides the essential foundation for understanding and further, more in-depth study of this area of science, as well as for pursuing research work in neutrino physics.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО

Для освоения данной дисциплины обучающийся должен обладать знаниями и умениями в объеме нескольких курсов высшей школы. В частности,

– иметь хорошую подготовку по ряду математических дисциплин, таких как математический анализ, линейная алгебра, дифференциальные и интегральные уравнения, теория групп. В частности, обучающийся должен быть знаком с такими понятиями как ряд, функция, функционал, поле, должен обладать знаниями достаточными для решения дифференциальных и интегральных уравнений, должен быть знаком со специальными и обобщенными функциями, иметь базовые знания по теории групп;

– обладать знаниями в объеме не меньше стандартных курсов квантовой механики и классической электродинамики, уметь оперировать с такими понятиями как квантовый оператор, коммутационные соотношения, волновая функция, каноническое квантование, вторичное квантование, Бозе и Ферми статистика, понимать качественное поведение волновых функций в задаче о связанном состоянии и в задаче рассеяния, иметь представление об аналитических свойствах волновой функции в комплексной плоскости импульса и энергии;

- понимать сущность алгоритмических предписаний и демонстрировать умение действовать в соответствии с предложенным алгоритмом;
- иметь навыки устных, письменных, инструментальных вычислений.

2. THE COURSE IN THE EDUCATIONAL PROGRAM

To successfully complete this course, student must possess comprehensive knowledge in a few disciplines of the high school. In particular,

- they should be well educated in mathematics (analysis, linear algebra, differential and integral equations, theory of groups and representations). The student must be familiar with such notions as series, function, functional, field and must be able to solve differential and integral equations, must be familiar with special and generalised functions as well as with the basic principles of the theory of groups;
- they must complete the standard courses in Quantum Mechanics and Classical Electrodynamics and be able to master such notions as quantum operator, commutation relations, wave function, canonical quantisation, second quantisation, Bose and Fermi statistics, then understand the qualitative behaviour of the wave functions for a bound-state problem and a scattering problem, possess basic knowledge in analytical properties of the wave functions in the complex momentum and energy planes;
- they must have the idea of algorithms and demonstrate the ability to follow the prescribed algorithm;
- they must possess basic abilities of various types of calculations.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Календарный план

	Тема занятия	Лекции	Семинары	Самост. работа
1	Введение. Слабые взаимодействия. Гипотеза нейтрино. Фундаментальные симметрии. Нарушение P-четности	1	1	0
2	Открытие нейтрино в реакторном эксперименте. Открытие мюонных нейтрино. Спиральность нейтрино.	1	1	0
3	V-A теория. Промежуточные бозоны. Нейтральные токи.	1	1	0
4	Стандартная солнечная модель. Детектирование солнечных нейтрино. Открытие осцилляций солнечных нейтрино	1	1	0
5	Атмосферные нейтрино. Детектор СуперКамиоканде. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино	1	1	0
6	Феноменология нейтринных осцилляций. Осцилляций нейтрино в вакууме и в веществе	1	1	0
7	Ускорительные эксперименты с длинной базой	1	1	0
8	Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах	1	1	0
9	Измерение угла смешивания θ_{13}	1	1	0
10	Поиск CP нарушения в нейтринных осцилляциях	1	1	0
11	Прямое измерение массы нейтрино. Модель	1	1	0

	качелей.			
12	Природа нейтрино. Поиск безнейтринного двойного бета распада	1	1	0
13	Нейтрино и космология. Реликтовые нейтрино. Стерильные нейтрино	1	1	0
14	Нейтринная астрофизика.	1	1	0
15	Планируемые нейтринные эксперименты. Заключение.	1	1	0
Итого часов		30	30	

Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

1. Тема 1

Введение в курс нейтринной физики. Краткое изложение физики слабых взаимодействий. Изложение Гипотезы В.Паули о существовании нейтрино. Изложение фундаментальных дискретных C,P,T, CP, CPT симметрий. Гипотеза о нарушении пространственной четности и экспериментальное обнаружение в эксперименте Ву.

2. Тема 2

Регистрация нейтрино в реакторном эксперименте Рейнеса и Коуэна. Открытие мюонных нейтрино в ускорительном эксперименте в БНЛ. Понятие спиральности нейтрино и экспериментальное измерение спиральности в эксперименте Гольдхабер.

3. Тема 3

V-A теория слабого взаимодействия. Гипотеза промежуточных векторных бозонов, объединение электромагнитного и слабого взаимодействия. Экспериментальное обнаружение нейтральных токов. Открытие W и Z бозонов в экспериментах в ЦЕРН.

4. Тема 4

Описание Стандартной Солнечной модели. Поток солнечных нейтрино на Земле. Обнаружение дефицита солнечных нейтрино в эксперименте Дэвиса, в галлиевых экспериментах и эксперименте Камиоканде. Гипотеза Б.М.Понтекорво об осцилляциях нейтрино. Открытие осцилляций солнечных нейтрино в эксперименте SNO.

5. Тема 5

Регистрация атмосферных нейтрино в подземных экспериментах. «Атмосферная аномалия». Водные черенковские детекторы Камиоканде и СуперКамиоканде. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино в эксперименте СуперКамиоканде.

6. Тема 6

Феноменология нейтринных осцилляций. Рассмотрение осцилляций двух типов нейтрино. Получение выражений для вероятности осцилляций. Матрица смешивания Понтекорво-Маки-Накагава-Саката для трех типов нейтрино. Параметры нейтринных осцилляций.

7. Тема 7

Исследование осцилляций нейтрино в ускорительных экспериментах с длинной базой. Эксперименты K2K, MINOS, OPERA. Смещенные от оси пучки нейтрино. Эксперименты с длинной базой второго поколения T2K и NOvA. Открытие осцилляцию мюонных нейтрино в электронных.

8. Тема 8

Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах. Метод детектирования реакторных антинейтрино. Эксперимент с длинной базой КамЛанд. Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах Daya Bay, RENO и Double Chooz.

9. Тема 9

Измерение угла смешивания θ_{13} в ускорительных и реакторных экспериментах. Перспективы для измерения иерархии масс нейтрино и поиска CP нарушения в лептонном секторе Стандартной Модели. Структура PMNS матрицы смешивания.

10. Тема 10

Поиск нарушения CP симметрии в нейтринных осцилляциях. Методика поиска CP нечетной асимметрии при измерении осцилляций мюонных нейтрино и антинейтрино в эксперименте T2K. Использование реакторных данных для повышения чувствительности эксперимента. Первое указание на CP нарушение в эксперименте T2K. Результаты эксперимента NOvA.

11.Тема11.

Прямое измерение массы электронного нейтрино в бета распаде трития. Эксперименты Троицк-масс и Майнц. Метод магнитной адиабатической коллимации. Эксперимент КАТРИН. Ограничение на эффективную массу электронного нейтрино.

12. Тема 12

Нейтрино Майорановская или Дираковская частица. Физика безнейтринного двойного бета распада. Ядерные матричные элементы. Экспериментальные методы поиска безнейтринного двойного бета распада в германиевых, ксеноновых и криогенных детекторах. Экспериментальные ограничения на эффективную массу нейтрино, полученные в экспериментах КамЛанд-Zen, GERDA. Ближайшие перспективы.

13. Тема 13

Нейтрино и космология. Ограничения на сумму масс нейтрино из космологических данных. Реликтовые нейтрино. Нейтрино от взрывов сверхновых. Стерильные нейтрино. Аномалия LSND, реакторная и галлиевая аномалия. Ограничения на параметры легких стерильных нейтрино из реакторных, ускорительных и астрофизических экспериментов.

14. Тема 14

Нейтринная астрофизика высоких энергий. Байкальский подводный нейтринный телескоп, эксперименты ICECUBE, ANTARES. Астрофизические источники нейтрино.

15.Тема 15

Рассматриваются нейтринные эксперименты следующего поколения ГиперКамиоканде и DUNE. Основными целями этих экспериментов являются поиск CP нарушения в нейтринных осцилляциях, определение иерархии масс нейтрино, поиск распада протона, регистрация реликтовых нейтрино от сверхновых. Будет рассмотрена экспериментальная методика и чувствительность этих экспериментов к различным физическим процессам. В заключении будут изложены основные итоги курса и проанализированы основные фундаментальные результаты, полученные в нейтринной физике.

	Chapters	Lectures	Seminars	Homework
1	Introduction. Weak Interactions. The Neutrino	1	1	0

	Hypothesis. Fundamental Symmetries. Parity Violation.			
2	Discovery of the Neutrino in Reactor Experiments. Discovery of Muon Neutrinos. Neutrino Helicity.	1	1	0
3	V-A Theory. Intermediate Vector Bosons. Neutral Currents.	1	1	0
4	Standard Solar Model. Detection of Solar Neutrinos. Discovery of Solar Neutrino Oscillations.	1	1	0
5	Atmospheric Neutrinos. The Super-Kamiokande Detector. Discovery of Atmospheric Neutrino Oscillations.	1	1	0
6	Phenomenology of Neutrino Oscillations. Neutrino Oscillations in Vacuum and in Matter.	1	1	0
7	Long-Baseline Accelerator Experiments.	1	1	0
8	Measurement of Oscillation Parameters in Reactor Experiments.	1	1	0
9	Measurement of the Mixing Angle θ_{13} .	1	1	0
10	Search for CP Violation in Neutrino Oscillations.	1	1	0
11	Direct Measurement of Neutrino Mass. The See-Saw Mechanism.	1	1	0
12	Nature of Neutrinos. Search for Neutrinoless Double Beta Decay.	1	1	0
13	Neutrinos and Cosmology. Relic Neutrinos. Sterile Neutrinos.	1	1	0
14	Neutrino Astrophysics.	1	1	0
15	Planned Neutrino Experiments. Conclusion.	1	1	0
Total		30	30	

Contents

Topic

1

Introduction to the Neutrino Physics Course. A brief overview of the physics of weak interactions. Presentation of V. Pauli's hypothesis on the existence of neutrinos. Explanation of fundamental discrete symmetries: C, P, T, CP, and CPT. The hypothesis of spatial parity violation and its experimental discovery in the Wu experiment.

Topic

2

Neutrino detection in the Reines and Cowan reactor experiment. Discovery of muon neutrinos in an accelerator experiment at BNL. The concept of neutrino helicity and experimental measurement of helicity in the Goldhaber experiment.

Topic

3

V-A theory of weak interaction. Hypothesis of intermediate vector bosons, unification of electromagnetic and weak interactions. Experimental discovery of neutral currents. Discovery of W and Z bosons in CERN experiments.

- Topic** **4**
Description of the Standard Solar Model. Solar neutrino flux on Earth. Detection of the solar neutrino deficit in the Davis experiment, gallium experiments, and the Kamiokande experiment. B.M. Pontecorvo's hypothesis of neutrino oscillations. Discovery of solar neutrino oscillations in the SNO experiment.
- Topic** **5**
Detection of atmospheric neutrinos in underground experiments. "Atmospheric anomaly." Water Cherenkov detectors Kamiokande and Super-Kamiokande. Discovery of atmospheric neutrino oscillations in the Super-Kamiokande experiment.
- Topic** **6**
Phenomenology of neutrino oscillations. Consideration of oscillations between two types of neutrinos. Derivation of oscillation probability expressions. The Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata mixing matrix for three types of neutrinos. Neutrino oscillation parameters.
- Topic** **7**
Study of neutrino oscillations in long-baseline accelerator experiments. K2K, MINOS, and OPERA experiments. Off-axis neutrino beams. Second-generation long-baseline experiments: T2K and NOvA. Discovery of muon neutrino to electron neutrino oscillations.
- Topic** **8**
Measurement of oscillation parameters in reactor experiments. Reactor antineutrino detection methods. Long-baseline KamLAND experiment. Measurement of oscillation parameters in reactor experiments: Daya Bay, RENO, and Double Chooz.
- Topic** **9**
Measurement of the mixing angle θ_{13} in accelerator and reactor experiments. Prospects for measuring the neutrino mass hierarchy and searching for CP violation in the lepton sector of the Standard Model. Structure of the PMNS mixing matrix.
- Topic** **10**
Search for CP violation in neutrino oscillations. Methods to search for CP-odd asymmetry in muon neutrino and antineutrino oscillation measurements in the T2K experiment. Use of reactor data to improve experimental sensitivity. First hint of CP violation in the T2K experiment. Results from the NOvA experiment.
- Topic** **11**
Direct measurement of the electron neutrino mass in tritium beta decay. The Troitsk and Mainz experiments. Magnetic adiabatic collimation method. The KATRIN experiment. Constraints on the effective electron neutrino mass.
- Topic** **12**
Are neutrinos Majorana or Dirac particles? Physics of neutrinoless double beta decay. Nuclear matrix elements. Experimental methods for searching for neutrinoless double beta decay in germanium, xenon, and cryogenic detectors. Experimental constraints on the effective neutrino mass from KamLAND-Zen, GERDA experiments. Future prospects.

Topic **13**
Neutrinos and cosmology. Constraints on the sum of neutrino masses from cosmological data. Relic neutrinos. Neutrinos from supernova explosions. Sterile neutrinos. LSND anomaly, reactor and gallium anomalies. Constraints on the parameters of light sterile neutrinos from reactor, accelerator, and astrophysical experiments.

Topic **14**
High-energy neutrino astrophysics. The Baikal underwater neutrino telescope, ICECUBE, and ANTARES experiments. Astrophysical sources of neutrinos.

Topic **15**
Next-generation neutrino experiments: Hyper-Kamiokande and DUNE. The main goals of these experiments are to search for CP violation in neutrino oscillations, determine the neutrino mass hierarchy, search for proton decay, and detect relic neutrinos from supernovae. The experimental methods and sensitivities of these experiments to various physical processes will be discussed. In conclusion, the main results of the course will be presented, and the fundamental outcomes in neutrino physics will be analyzed.

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Курс состоит из трёх разных форм обучения: лекции, семинары и самостоятельная работа. Лекции проводятся с использованием современных технологий, в т.ч. мультимедийных. На семинарских занятиях студенты решают типичные задачи по квантовой теории поля, проводится разбор практических задач. Предусмотрено индивидуальные и групповые консультации. Возможно дистанционное общение со студентами.

6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Разработаны контрольно-измерительные материалы для контроля успеваемости и оценочные средства для аттестации по итогам освоения дисциплины (контрольные вопросы по всем разделам курса).

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

а) ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Л.Б.Окунь. "Лептоны и кварки". Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.
2. Ю.Комминс, Б.Буксбаум. Слабые взаимодействия лептонов и кварков. Пер. с англ. Москва, Энергоиздат, 1987.
3. Ф.Боум, П. Фогель. «Физика массивных нейтрино», «Мир» , Москва, 1990.
4. К.Винтер. Neutrino physics. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology. 2008.
5. С.М.Биленький. Лекции по физике нейтринных и лептон-нуклонных процессов, Москва, Энергоиздат, 1981.

б) ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 1.Клапдор-Клайнротхаус Г.В., Шмидт А., "Неускорительная физика элементарных частиц", Пер. с нем., Москва, Наука, Физматлит, 1997.
2. 2.Дж.Бакал "Нейтринная астрофизика", "Мир", Москва, 1993.
3. 3.М.Кошиба. Рождение нейтринной астрофизики .Успехи физических наук, т.174 (2004) с.418-426.
4. 4.К.Zuber. Neutrino physics, CRC Press, 2012.
5. 5.C.Giunti and C.W.Kim. Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics, Oxford University Press, 2007.
6. 6. Герштейн С.С., Кузнецов Е.П., Рябов В.А. Природа массы нейтрино и нейтринные осцилляции. Успехи физических наук, т.167 (1997) с.811.
7. 7.Биленький С.М. Массы нейтрино, смешивание и осцилляции нейтрино. Успехи физических наук, т.173 (2003) с.1137.
8. 8.Куденко Ю.Г. Исследование нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой. Успехи физических наук, т.181 (2011) с.569-594.
- 9.

в) ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<http://www.library.mephi.ru/> библиотека НИЯУ МИФИХ

<http://www.gpntb.ru/> государственная публичная научно-техническая библиотекаХ

<http://elibrary.ru/> база данных научных статейХ

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

В ходе проведения лекций используется мультимедийное оборудование.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО 3+ по направлениям подготовки:

14.03.02 Ядерная физика и технологии.

Автор программы:

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

2. ТИПОВЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

для оценки знаний (З), умений (У) и навыков (В)

Контрольные вопросы (не менее пяти вопросов/заданий)

1. Определите кинетическую энергию реликтовых нейтрино.
2. Возможны ли осцилляции нейтрино $\nu_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{\mu}$?
3. Рассчитайте вероятность (branching ratio) распада $\pi \rightarrow e\nu$. Сравните её с вероятностью распада $\pi \rightarrow \mu\nu$.
4. Покажите, возможен ли распад нейтрального пиона на нейтрино и антинейтрино, если масса нейтрино равна нулю.
5. Рассчитайте длину детектора нейтрино из железа, где вероятность взаимодействия нейтрино с энергией 1 ГэВ равна 10^{-8} . Сечение взаимодействия нейтрино равно 10^{-38}см^2 .
6. Определите порог энергии для реакции $\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \mu^{-} + \nu_e$ в лабораторной системе.

Примеры контрольных заданий (не менее пяти вопросов/заданий)

1. Выведите выражение для вероятности осцилляций между двумя типами нейтрино.
2. В водных черенковских детекторах при регистрации электронных нейтрино с энергией около 1 ГэВ одним из основных источников фона являются нейтральные пионы, производимые мюонными нейтрино через нейтральные токи. Выведите кинематику распада нейтрального пиона на два фотона. Используя это, вычислите массу пиона из измерений двух фотонов. Покажите, в каких случаях распад $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ может имитировать сигнал от одиночного электрона.
3. Выведите выражение для осцилляций нейтрино в случае трёх типов нейтрино в вакууме.
4. Выведите выражение для вероятности распада (branching ratio) $\pi \rightarrow e\nu$. Сравните её с вероятностью распада $\pi \rightarrow \mu\nu$.
5. Черенковский водный детектор используется для поиска распада протона. Основной режим $p \rightarrow e + \pi^0$. Какие процессы с участием атмосферных нейтрино могут имитировать этот распад? Какие методы используются для подавления фона атмосферных нейтрино?

Примеры экзаменационных билетов (если форма контроля — экзамен)

Билет 1:

1. Измерение осцилляционных параметров в ускорительных экспериментах K2K и MINOS.
2. Выведите выражение для CP-нечётной асимметрии

$$ACP = P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \nu_e)$$

в вакууме, используя полные выражения для осцилляций трёх типов нейтрино. Рассчитайте численное значение асимметрии для энергии мюонных нейтрино 600 МэВ и базы 300 км. Осцилляционные параметры: $\theta_{12}=34^\circ$, $\theta_{23}=45^\circ$, $\theta_{13}=9^\circ$, $\Delta m_{212}^2=7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$, $\Delta m_{232}^2=2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$.

Билет 2:

1. Эксперимент Super-Kamiokande. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино.
2. В случае распада $\pi \rightarrow \mu \nu$ выведите зависимость энергии нейтрино (в лабораторной системе) от угла θ между направлением пиона и нейтрино. Рассмотрите случай малого угла θ . Постройте графики зависимости энергии нейтрино от энергии пиона для углов 0, 1, 2, 3 градуса в диапазоне энергий пионов от 0 до 20 ГэВ.

Билет 3:

1. Измерение угла θ_{13} в экспериментах T2K и реакторных экспериментах.
2. Оцените вклад вещества в CP-нечётную асимметрию

$$A_{CP} = P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \nu_e)$$

для двух случаев: $E_\nu=600 \text{MeV}, L=300 \text{km}$ и $E_\nu=1800 \text{MeV}, L=900 \text{km}$. Считайте нормальную иерархию масс. Используйте осцилляционные параметры из таблиц PDG.

Билет 4:

1. Измерение солнечных нейтрино в эксперименте SNO. Открытие осцилляций солнечных нейтрино.
2. Мюонное нейтрино взаимодействует в воде и рождает мюон с энергией 1 ГэВ. Рассчитайте размеры Черенковского кольца (внутренний и внешний диаметры) на стенке, перпендикулярной направлению мюона, расположенной на расстоянии 20 м от точки взаимодействия. Предложите метод восстановления вершины взаимодействия нейтрино и оцените погрешность при временном разрешении фотоумножителей 2 нс.

Билет 5:

1. Безнейтринный двойной бета распад. Майорановские и Дираковские нейтрино.
2. Определите оптимальные базы реакторных экспериментов для измерения «солнечных» параметров и угла θ_{13} . Считайте среднюю энергию реакторных антинейтрино 4 МэВ. Возможно ли измерение «атмосферных параметров» в экспериментах с реакторными нейтрино? Если да, то при какой базе?

QUESTIONS

Control Questions (at least five questions/tasks)

1. Determine the kinetic energy of relic neutrinos.

2. Are neutrino oscillations possible for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}^{-}$?
3. Calculate the branching ratio for the decay $\pi \rightarrow e\nu$. Compare it with the decay $\pi \rightarrow \mu\nu$.
4. Show whether the decay of a neutral pion to neutrino and antineutrino is possible if the neutrino mass is zero.
5. Calculate the length of a neutrino detector made of iron, where the probability of interaction of a neutrino with an energy of 1 GeV is 10^{-8} . The cross-section for neutrino interaction is 10^{-38}cm^2 .
6. Determine the threshold energy for the reaction $\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \mu^{-} + \nu_e$ in the laboratory system.

Examples of Control Tasks (at least five questions/tasks)

1. Derive the expression for the oscillation probability between two types of neutrinos.
2. In water Cherenkov detectors, the detection of electron neutrinos with an energy of about 1 GeV often faces background from neutral pions, produced by muon neutrinos via neutral currents. Derive the kinematics for the decay of a neutral pion into two photons. Use this to calculate the mass of the pion from the measurement of the two photons. Show in what cases the decay $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ can mimic a signal from a single electron.
3. Derive the expression for neutrino oscillations in the case of three neutrino types in vacuum.
4. Derive the branching ratio for the decay $\pi \rightarrow e\nu$. Compare it with the branching ratio for the decay $\pi \rightarrow \mu\nu$.
5. The Cherenkov water detector is used to search for proton decay. The main mode is $p \rightarrow e + \pi^0$. What processes involving atmospheric neutrinos can mimic this decay? What methods are used to suppress the background from atmospheric neutrinos?

Examples of Exam Tickets (if the form of assessment is an exam)

Ticket 1:

1. Measurement of oscillation parameters in the K2K and MINOS accelerator experiments.
2. Derive the expression for the CP-odd asymmetry

$$A_{CP} = P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \nu_e)$$

in vacuum, using the full expressions for three-neutrino oscillations. Calculate the numerical value of the asymmetry for the energy of muon neutrinos at 600 MeV and a baseline of 300 km. The oscillation parameters are: $\theta_{12} = 34^\circ$, $\theta_{23} = 45^\circ$, $\theta_{13} = 9^\circ$, $\Delta m_{21}^2 = 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$, $\Delta m_{23}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$.

Ticket 2:

1. Super-Kamiokande experiment. Discovery of atmospheric neutrino oscillations.
2. In the case of the decay $\pi \rightarrow \mu\nu$, derive the dependence of neutrino energy (in the laboratory frame) on the angle θ between the direction of the pion and the neutrino. Specifically, examine the case of small angle θ . Construct graphs showing the dependence of neutrino energy on pion energy for angles of 0, 1, 2, 3 degrees in the pion energy range of 0 to 20 GeV.

Ticket 3:

1. Measurement of the mixing angle θ_{13} in the T2K and reactor experiments.
2. Evaluate the contribution of matter to the CP-odd asymmetry

$$ACP = P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \nu_e)$$

for two cases: $E_{\nu} = 600 \text{ MeV}, L = 300 \text{ km}$ and $E_{\nu} = 1800 \text{ MeV}, L = 900 \text{ km}$. Assume normal mass hierarchy. Use the oscillation parameters from PDG tables.

Ticket 4:

1. Measurement of solar neutrinos in the SNO experiment. Discovery of solar neutrino oscillations.
2. A muon neutrino interacts in water and produces a muon with an energy of 1 GeV. Calculate the size of the Cherenkov ring (inner and outer diameters) on the wall, perpendicular to the muon direction, located 20 meters from the interaction point. Propose a method to reconstruct the neutrino interaction vertex and estimate the error with a photo-multiplier time resolution of 2 ns.

Ticket 5:

1. Neutrinoless double beta decay. Majorana and Dirac neutrinos.
2. Determine the optimal baseline lengths for reactor experiments aimed at measuring "solar" parameters and the mixing angle θ_{13} . Assume an average reactor antineutrino energy of 4 MeV. Is it possible to measure "atmospheric parameters" in reactor neutrino experiments? If so, at what baseline length?

Составитель

Зам. заведующего кафедрой

_____ Грачёв В.М.

« ____ » _____ 20 ____ г.

Критерии для аттестации разделов:

Теоретическая часть курса содержит 25 вопросов, разбитых на 4 раздела. Студенту выставляется от 0 до 2 баллов за каждый вопрос в зависимости от полноты и аргументированности ответа. Максимальное количество баллов, которое может получить студент по результатам аттестации теоретической части, – 50 баллов. Минимальное количество баллов, которое необходимо получить студенту для аттестации, – 30 баллов.

Каждый из 4 разделов списка задач к практическим занятиям содержит по 6 задач, которые студенту необходимо решить для аттестации соответствующего раздела. Студенту выставляется от 0 до 2 баллов за каждую задачу в зависимости от правильности решения, его полноты и аргументированности, подтверждающей знание материала. Максимальное количество баллов, которое может получить студент по результатам аттестации практической части, – 48 баллов. Минимальное количество баллов, которое необходимо получить студенту для аттестации, – 30 баллов (но не менее 6 баллов по каждому разделу).

Для допуска к сдаче экзамена по курсу студент должен получить не менее 30 баллов по результатам аттестации теоретической части и не менее 30 баллов по результатам аттестации практической части (причём не менее 6 баллов за каждый из разделов).

Общая оценка определяется суммой баллов, полученных студентом на экзамене (минимальное количество – 30 баллов, максимальное количество – 50 баллов) и по итогам аттестации разделов. Итоговая оценка определяется общим количеством баллов.

Критерии общей оценки:

Процент результативности (правильных ответов)	Качественная оценка индивидуальных образовательных достижений	
	балл (отметка)	вербальный аналог
90 ÷ 100	5	отлично
70 ÷ 89	4	хорошо
60 ÷ 69	3	удовлетворительно
менее 60	2	не удовлетворительно

Оценка экзамена, зачёта (стандартная)		Оценка экзамена, зачёта (тестовые нормы: % правильных ответов)	Требования к знаниям на устном зачёте
«отлично», A	90 ÷ 100 %	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.	
«хорошо», D, C, B	70 ÷ 89%	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.	
«удовлетворительно» E, D	60 ÷ 69%	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.	
«неудовлетворительно», F	менее 60%	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.	