

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

13 » 04 2022 г.



Рабочая программа факультативной дисциплины

НЕЙТРИННЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСТРОФИЗИКЕ

программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

по научной специальности 1.3.3 Теоретическая физика

Принята решением Ученого совета
от 04.03.2022 № 03/22

Санкт-Петербург

2022 г.

Рабочая программа факультативной дисциплины «Нейтринные процессы в астрофизике» составлена на основании программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.3 Теоретическая физика (далее- программа аспирантуры)

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями изучения дисциплины является:

- Углубление знаний по ряду теоретических проблем в области слабых взаимодействий и нейтринных процессов в астрофизике и космологии;
- изучение современных астрофизических экспериментов по детектированию нейтрино, приобретение опыта выполнения оценок возможностей нейтринных экспериментов;
- приобретение опыта выполнения оценок основных величин, характеризующих как свойства нейтрино различных типов, так и физические условия астрофизических объектов, являющихся источниками генерации нейтрино.

Задачи дисциплины заключаются в изучении:

- фундаментальных понятий, теоретических концепций и моделей, описывающих физику слабых взаимодействий с участием нейтрино;
- современных представлений об астрофизических и космологических объектах, для которых важную роль играют нейтринные процессы.
- методов регистрации нейтрино, характеристик существующих нейтринных детекторов и способов оценки параметров детектированных нейтрино.

Для достижения задач, поставленных при изучении дисциплины, используется набор методических средств: учебная, учебно-методическая литература, информационные ресурсы библиотеки, электронные курсы и др.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ

2.1. Дисциплина «Нейтринные процессы в астрофизике» входит в факультативную часть программы аспирантуры с целью расширения и углубления научных и прикладных знаний аспирантов и организуется по выбору и желанию аспиранта.

2.2. Программа данной дисциплины строится на преемственности программ в системе высшего образования и предназначена для аспирантов ФТИ, прошедших обучение по программе подготовки магистров, прослушавших соответствующие курсы и имея по ним положительные оценки. Она основывается на положениях, отраженных учебных программах указанных уровней.

3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

По окончании изучения дисциплины аспиранты должны будут:

знать:

- основные положения теории электрослабых взаимодействий, физики нейтрино и процессов, происходящих с участием нейтрино;
- основные понятия, законы и модели астрофизических и космологических объектов, в которых важную роль играют нейтринные процессы.

уметь:

- описывать и качественно объяснять основные механизмы взаимодействия нейтрино с веществом в астрофизических объектах и в детекторах, регистрирующих космические нейтрино;
- применять методы математического описания строения и эволюции астрофизических и космологических объектов, в которых важную роль играют нейтринные процессы, моделировать нейтринные процессы в различных астрофизических объектах и в установках детектирования нейтрино;
- самостоятельно изучать и понимать специальную научную и методическую литературу, связанную с проблемами нейтринной астрофизики.

владеть:

- фундаментальными разделами физики, необходимыми для исследования нейтринных астрофизических процессов;
- навыками собственных теоретических вычислений и качественных оценок процессов, происходящих с участием нейтрино;
- навыками самостоятельного изучения и анализа специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами астрофизики нейтрино, а также понимания качества исследований, относящихся к нейтринной астрофизике.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Разделы дисциплины и виды занятий

Приводимая ниже таблица показывает распределение бюджета учебного времени, отводимого на освоение основных разделов курса согласно учебному плану «Нейтринные процессы в астрофизике»

Наименование разделов и тем	Трудоёмкость (в ЗЕТ)	Объём работы (в ак. часах)	Всего учебных занятий (в часах)			
			Лекции	Лаб. практи.	Самостоятельная работа	Контроль
Нейтринные процессы в астрофизике						
Тема 1.1. Слабые взаимодействия и нейтрино		16	8		13	
Тема 1.2. Осцилляции нейтрино и оценки масс		12	8		13	
Тема 1.3. Солнечные нейтрино		8	8		13	
Тема 1.4. Сверхновые и нейтрино		12	8		13	
Тема 1.5. Нейтронные звезды и нейтрино		8	8		13	
Тема 1.6. Нейтрино ультравысоких энергий		12	7		13	
Тема 1.7. Реликтовые нейтрино		8	7		12	
Всего по дисциплине	2	144	54		90	зачет

4.3. Содержание разделов и тем

Нейтринные процессы в астрофизике

Тема 1.1. Слабые взаимодействия и нейтрино

Лекции (8 часов)

Понятие о нейтрино. Открытие нейтрино. Нейтрино в астрономии и космологии: краткий обзор. Нейтринная астрофизика, как наблюдательная наука.

Стандартная модель элементарных частиц. Понятие о калибровочной инвариантности. Спонтанное нарушение калибровочной симметрии и механизм Хиггса. Модель электрослабых взаимодействий Глэшоу-Вайнберга-Салама. Нейтрино в стандартной модели. Четность и зарядовое сопряжение для нейтрино. Дираковские и майорановские нейтрино. Взаимодействия нейтрино в стандартной модели. Открытые вопросы физики нейтрино.

Тема 1.2. Осцилляции нейтрино и оценки масс

Лекции (8 часов)

Осцилляции нейтрино в вакууме. Описание осцилляций с помощью волновых пакетов. Осцилляции нейтрино в веществе. Эффект Михеева—Смирнова—Вольфенштейна. Магнитный момент нейтрино и осцилляции в магнитном поле. Атмосферные нейтрино и оценки масс нейтрино.

Тема 1.3. Солнечные нейтрино

Лекции (8 часа)

Нейтрино в стандартной солнечной модели. Детектирование солнечных нейтрино. Характеристики основных нейтринных экспериментов. Анализ данных по наблюдению солнечных нейтрино. Решение проблемы солнечных нейтрино. Осцилляции солнечных нейтрино.

Тема 1.4. Сверхновые и нейтрино

Лекции (8 часов)

Нейтринные процессы на поздней стадии эволюции массивных звезд. Гравитационный коллапс и вспышка сверхновой звезды. Нейтринные процессы и динамика взрыва сверхновой. Роль слабых процессов в энергетике расширяющихся оболочек. Сверхновая SN 1987A и регистрация нейтринных импульсов. Ограничения на свойства нейтрино. Нейтринно-ядерные реакции и нуклеосинтез в сверхновых. Диффузный фон нейтрино от сверхновых.

Тема 1.5. Нейтронные звезды и нейтрино

Лекции (8 часа)

Нейтрино и остывание нейтронных звезд. Нейтринные процессы в коре нейтронной звезды. Нейтринные процессы в ядре нейтронной звезды. Нейтринные процессы и сверхтекучесть нуклонов. Нейтринные процессы в нейтронных звездах с экзотическим внутренним ядром. Нейтринное излучение как регулятор остывания нейтронных звезд.

Тема 1.6. Нейтрино ультравысоких энергий

Лекции (7 часов)

Спектр высокоэнергичных космических лучей. Эффект Грейсена-Зацепина-Кузьмина и космические нейтрино. Астрофизические источники нейтрино ультравысоких энергий (УВЭ). Предел Ваксмана-Бакалла и теоретические оценки потоков УВЭ нейтрино. Проект DUMAND и современные телескопы УВЭ нейтрино. УВЭ нейтрино от космических гамма-всплесков. Наблюдения ПЭВ-ных нейтрино.

Тема 1.7. Реликтовые нейтрино

Лекции (7 часа)

Нейтрино в ранней Вселенной. Расширение Вселенной и плотности энергии в ранней Вселенной. «Закалка» реликтовых нейтрино. Выход нуклонов из бета-равновесия и начало первичного нуклеосинтеза. Современный фон реликтовых нейтрино. Способы детектирования реликтовых нейтрино.

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Технология процесса обучения по дисциплине «Нейтринные процессы в астрофизике» включает в себя следующие образовательные мероприятия:

- а) аудиторные занятия (лекционно-семинарская форма обучения);
- б) самостоятельная работа студентов;
- в) контрольные мероприятия в процессе обучения и по его окончании;
- г) зачет по окончании изучения дисциплины.

Аудиторные занятия проводятся в интерактивной форме с использованием мультимедийного обеспечения и технологии проблемного обучения.

Презентации позволяют качественно иллюстрировать практические занятия схемами, формулами, чертежами, рисунками. Кроме того, презентации позволяют чётко структурировать материал занятия.

Электронная презентация позволяет отобразить процессы в динамике, что улучшает восприятие материала.

Самостоятельная работа организована в соответствии с технологией проблемного обучения и предполагает следующие формы активности:

- самостоятельная проработка учебно-проблемных задач, выполняемая с привлечением основной и дополнительной литературы;
- поиск научно-технической информации в открытых источниках с целью анализа и выявления ее ключевых особенностей.

Основные аспекты применяемой технологии проблемного обучения:

- постановка проблемных задач отвечает целям освоения дисциплины «Нейтринные процессы в астрофизике» и формирует необходимые компетенции;
- решаемые проблемные задачи стимулируют познавательную деятельность и научно-исследовательскую активность аспирантов.

6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

6.1. Текущий контроль

Текущий контроль успеваемости, т.е. проверка усвоения учебного материала, регулярно осуществляется на протяжении семестра. Текущий контроль знаний аспирантов организован как выступления на семинарах.

6.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация завершает изучение дисциплины «Нейтринные процессы в астрофизике». Форма аттестации – зачет в письменной или устной форме.

Контрольные вопросы для промежуточной аттестации

1. Основные свойства нейтрино в рамках стандартной модели элементарных частиц: теоретическое описание нейтрино; три поколения нейтрино, четность и зарядовое

сопряжение; реакции слабого взаимодействия с участием нейтрино; реакции, используемые при регистрации нейтрино.

2. Калибровочный принцип. Локальные и глобальные калибровочные симметрии. Спонтанное нарушение симметрии. Механизм Хиггса.

3. Характеристики стандартной модели элементарных частиц. Основные положения теории электрослабых взаимодействий.

4. Принципы описания взаимодействий. Распад мюона. Рассеяние нейтрино на электронах. Приближение малых энергий.

5. Волновое описание осцилляций нейтрино в вакууме. Осцилляции трех типов нейтрино и ограничения на квадраты масс. Осцилляции и соотношение неопределенностей.

6. Траектория нейтринных осцилляций с помощью волновых пакетов. Уравнение эволюции для нейтрино. Реакторные эксперименты по поиску нейтринных осцилляций.

7. Распространение нейтрино в среде и осцилляции в веществе. Резонансное усиление осцилляций: эффект Михеева-Смирнова-Вольфенштейна. Астрофизические оценки величины эффекта.

8. Адиабатическое приближение. Осцилляции нейтрино в магнитном поле. Астрофизические оценки величины эффекта.

9. Принципы анализа данных по осцилляциям нейтрино: диаграмма углы смешивания - разница квадратов масс. Оценки осцилляций при прохождении нейтрино сквозь Землю.

10. Описание стандартной модели Солнца, скорости основных реакций и спектр солнечных нейтрино. Теоретические потоки нейтрино.

11. Описание экспериментов с солнечными нейтрино: хлорный эксперимент, галиевые эксперименты, детекторы Камиоканде и Суперкамиоканде, нейтринная обсерватория в Сёдбери (SNO). Решение проблемы солнечных нейтрино.

12. Оценки нейтринных процессов на поздних стадиях эволюции звезд. Переход к фазе гравитационного коллапса. Оценки нейтринных потоков.

13. Основные нейтринные процессы, влияющие на динамику взрыва сверхновой. Понятие нейтриносферы. Стадии взрыва сверхновых и характерные потоки нейтрино. Оценки потоков диффузного фона нейтрино от сверхновых.

14. Характеристики нейтринных импульсов от сверхновой SN 1987A. Анализ данных регистрации нейтрино. Оценки частоты появления сверхновых и планируемые эксперименты по регистрации нейтринных импульсов.

15. Основные нейтринно-ядерные реакции нуклеосинтеза в сверхновых. Синтез элементов тяжелее железа. Бета-процессы, как источники расширения оболочек сверхновых.

16. Характеристика и оценки нейтринных процессов в коре нейтронных звезд. Основные нейтринные процессы в ядрах нейтронных звезд. Режимы быстрого, стандартного и медленного остывания нейтронных звезд. Оценки нейтринных процессов при сверхтекучести нуклонов.

17. Характеристика основных процессов генерации нейтрино ультравысоких энергий. Возможные астрофизические объекты, генерирующие высокоэнергичные нейтрино. Эффект Грейсена-Зацепина-Кузьмина и ограничения на энергии космических нейтрино.

18. Регистрация космических нейтрино сверхвысоких энергий. Теоретические ограничения. Принципы работы современных телескопов для регистрации нейтрино сверхвысоких энергий. Первые результаты эксперимента IceCube («km³»).

19. Равновесные процессы слабого взаимодействия. Температура закалки нейтрино и эффективная температура реликтовых нейтрино в настоящее время. Космологические ограничения на массу нейтрино. Понятие о стерильных нейтрино.

20. Первичный нуклеосинтез и отношение плотности барионов к плотности фотонов. Космологические оценки числа типов нейтрино и ограничения на массу нейтрино. Оценки возможностей прямой регистрации реликтовых нейтрино.

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

7.1. Основная литература

1. Г.В. Клапдор-Клайнротхаус, А. Штаудт. Неускорительная физика элементарных частиц. Главы 1, 3, 6, 7. Наука. Физматлит, 1997.

2. О.М. Бояркин. Физика массивных нейтрино. Главы 1, 3—6. КомКнига 2006.

3. К. Гротц, Г.В. Клапдор-Клайнротхаус. Слабое взаимодействие в физике ядра, частиц и астрофизике. Главы 1, 4, 5, 9. М: Мир 1992.

4. Д.С. Горбунов, В.А. Рубаков. Введение в теорию горячей Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. Главы 4, 7, 8, приложения В, С. Издательство ЛКИ, 2008.

7.2. Дополнительная литература

1. K. Langanke, G. Martinez-Pinedo. Nuclear weak-interaction processes in stars, Review Modern Physics 75, 819--862, 2003.

2. K.G. Balasi, K. Langanke, Martinez-Pinedo. Neutrino-nucleus reactions and their role for supernova dynamics and nucleosynthesis. ArXiv: 1503.08095.

3. C. Spiering. Towards high-energy neutrino astronomy. A historical review. The European Physical Journal H, v. 37, 515--565, 2012. ArXiv: 1207.4952.

4. D.G. Yakovlev, A.D. Kaminker, O.Y. Gnedin, P. Haensel. Neutrino emission from neutron stars. Physics Reports 354, 1-155, 2001.

7.3. Интернет-ресурсы

Отечественные журналы:

1. Астрономический вестник (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7665;
2. Астрономический журнал (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7666;
3. Письма в астрономический журнал (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=79414;
4. Геомагнетизм и аэрономия (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7765;
5. Исследование Земли из космоса (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7842;
6. Космические исследования (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7859;
7. Вестник МГУ. Часть 3. Физика, астрономия (<http://vmu.phys.msu.ru/toc/list>;
8. Проблемы передачи информации

(http://www.mathnet.ru/php/journal.phtml?jrnid=ppi&wshow=details&option_lang=rus;

9. Земля и Вселенная (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7808;

Отечественные журналы в переводе:

1. Astronomy Reports (<http://link.springer.com/journal/11444>;
2. Astronomy Letters (<http://www.springerlink.com/content/119837>
3. Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory

(<http://link.springer.com/journal/11989>;

4. Cosmic Research (<http://link.springer.com/journal/10604>;
5. Earth and Space Science

(<http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/agu/journal/10.1002/%28ISSN%292333-5084/> ;

6. Geomagnetism and Aeronomy (<http://link.springer.com/journal/11478>;
7. Problems of Information Transmission (<http://link.springer.com/journal/11122>;
8. Solar System Research (<http://link.springer.com/journal/11208>;
9. Radiophysics and Quantum Electronics

(<http://www.springer.com/astronomy/journal/11141>;

Международные журналы:

Gravitation and Cosmology (<http://link.springer.com/journal/12267>

Иностранные журналы:

1. Astronomy and Astrophysics (<http://www.aanda.org/>;
2. Astronomy and Astrophysics Review (<http://link.springer.com/journal/159>;
3. Astronomy & Geophysics (<http://astrogeo.oxfordjournals.org/>;
4. Astroparticle Physics (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09276505/23/1>;

5. Astrophysics (<http://link.springer.com/journal/10511>;
6. Astrophysics and Space Science (<http://link.springer.com/journal/10509>;
7. Classical and Quantum Gravity (<http://iopscience.iop.org/0264-9381/>;
8. Computational Astrophysics and Cosmology (<http://link.springer.com/journal/40668>;
9. Experimental Astronomy (<http://link.springer.com/journal/10686>;
10. Journal of Astrophysics and Astronomy (<http://link.springer.com/journal/12036>;
11. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (<http://iopscience.iop.org/1475-7516/>;
12. Microgravity Science and Technology (<http://link.springer.com/journal/12217>;
13. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (<http://mnras.oxfordjournals.org/> ;
(<http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/%28ISSN%291365-2966>;
14. Monthly Notices Letters of the Royal Astronomical Society
(<http://mnrasl.oxfordjournals.org/>;
15. Nature (<http://www.nature.com/nature/index.html> ;
16. Planetary Science (<http://link.springer.com/journal/13535>
17. Research in Astronomy and Astrophysics (<http://iopscience.iop.org/1674-4527/>;
18. Space Science Reviews (<http://link.springer.com/journal/11214>;
19. Space Weather
(<http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/agu/journal/10.1002/%28ISSN%291542-7390/>
20. Solar Physics (<http://link.springer.com/journal/11207>
21. The Astronomical Journal (<http://iopscience.iop.org/1538-3881>
22. The Astrophysical Journal (<http://iopscience.iop.org/0004-637X/> ;
23. The Astrophysical Journal Letters (<http://iopscience.iop.org/2041-8205/> ;
24. The Astrophysical Journal. Supplement series (<http://iopscience.iop.org/0067-0049/>;

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Лекционная аудитория
2. Мультимедийный проектор и (или) LCD панель большого размера.
3. Персональный компьютер

Программа разработана:
главный научный сотрудник-заведующий
сектором теоретической физики,
д-р физ.-мат. наук, Яковлев Д.Г.