



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**ФГБОУ ВО «ИГУ»**  
**Кафедра теоретической физики**

УТВЕРЖДАЮ  
Декан физического факультета

/Н.М. Буднев  
«31» августа 2021 г.



**Рабочая программа дисциплины**

Наименование дисциплины: Б1.В.02.02 Специальный практикум по квантовой теории

Направление подготовки: 03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки: Фундаментальная физика

Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр

Форма обучения: Очная

Согласовано с УМК физического факультета  
Протокол №30 от «31 августа 2021 г.

Председатель

Н.М.Буднев

Рекомендовано кафедрой:  
Протокол №1  
От «30» августа 2021 г.

И.о. зав. кафедрой

С.В. Ловцов

**Иркутск 2021 г.**

## **Содержание**

I. Цели и задачи дисциплины (модуля).....	3
II. Место дисциплины в структуре ОПОП:.....	3
III. Требования к результатам освоения дисциплины:.....	3
IV. Содержание и структура дисциплины (модуля).....	4
4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов.....	4
4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине.....	5
4.3. Содержание учебного материала.....	5
4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ.....	6
4.3.2. План самостоятельной работы студентов.....	7
4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.....	8
4.5. Примерная тематика курсовых работ.....	8
V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины:.....	8
а) список литературы.....	8
б) периодические издания.....	9
в) список авторских методических разработок.....	9
г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы.....	9
VII. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....	10
VII. Образовательные технологии:.....	10
VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации.....	10
Приложение: фонд оценочных средств	

## I. Цели и задачи дисциплины (модуля)

### **Цели курса**

Квантовая теория является важной частью универсальной базы для изучения общепрофессиональных и специальных дисциплин, вооружает выпускников необходимыми знаниями для решения научно-технических задач в теоретических и прикладных аспектах, знакомит студентов с научными методами познания, учит отличать гипотезу от теории и подчёркивает тесную связь теории и эксперимента. Эта дисциплина позволяет провести границу между научным и антинаучным подходом в изучении окружающего мира, позволяет научить строить физические модели происходящего и устанавливать связь между явлениями, прививает понимание причинно-следственной связи между явлениями.

Цель -изучение высокоэнергетических процессов в астрофизических объектах, в которых генерируются потоки космического излучения – гамма-кванты, нейтрино и космических лучи, являющиеся в настоящее время предметом исследования с помощью крупномасштабных детекторов.

Задачи: научиться выполнять расчеты и делать оценки характеристик фундаментальных процессов, лежащих в основе генерации потоков частиц внеземного происхождения и методов их детектирования: рассеяние нейтрино на электронах, нуклонах и ядрах; поглощение и регенерация нейтрино при прохождении через толщу Земли; слабые распады мезонов.

## II. Место дисциплины в структуре ОПОП:

Дисциплина «Спецпрактикум по квантовой теории» относится к дисциплинам формируемым участниками образовательного процесса. Изучение курса проходит параллельно с изучением курса «Квантовая механика» и предполагает наличие полученных на предыдущем уровне образования основных знаний, умений и компетенций по дисциплинам «Дифференциальные уравнения», «Теоретическая механика», «Электродинамика», «Интегральные уравнения», «Теория функций комплексного переменного», «Линейные и нелинейные уравнения физики». Дисциплина «Спецпрактикум по квантовой теории» предоставляет качественную основу для последующих разделов курса теоретической физики «Физика конденсированного состояния», «Термодинамика и статистическая физика», «Введение в квантовую теорию поля», «Квантовая теория излучения», «Астрофизика высоких энергий», «Нейтринная астрофизика».

## III. Требования к результатам освоения дисциплины:

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- Способен использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин (ПК-1).

- Способность проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта (ПК-2).

**Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине , соотнесенных с индикаторами достижения компетенций**

Компетенция	ПК-1
Индикаторы компетенции	ИДК пк 1.1 зnaet основные принципы и понятия
Результаты обучения	<p><b>Знает:</b> основные методы решения задач, основные законы квантовой механики, типы и характеристики фундаментальных взаимодействий.</p> <p><b>Умеет:</b> решать основные уравнения квантовой механики; формулировать основные принципы квантовой теории и применять их к решению конкретных квантово-механических задач; применять уравнения и методы для решения задач в области физики частиц, астрофизики высоких энергий и нейтринной астрофизики</p> <p><b>Владеет:</b> математическим аппаратом, применяющимся в квантово-механическом подходе, навыками решения квантово-механических задач; дифференциальных и полных сечений рассеяния, времен жизни, времени задержки, энергий связи, спектров распадов частиц и их пробегов в веществе.</p>
Компетенция	ПК-2
Индикаторы компетенции	ИДК пк 2.1 зnaet основные принципы и понятия
Результаты обучения	<p><b>Знает:</b> основные методы решения задач, основные законы квантовой механики, типы и характеристики фундаментальных взаимодействий.</p> <p><b>Умеет:</b> решать основные уравнения квантовой механики; формулировать основные принципы квантовой теории и применять их к решению конкретных квантово-механических задач; применять уравнения и методы для решения задач в области физики частиц, астрофизики высоких энергий и нейтринной астрофизики.</p> <p><b>Владеет:</b> математическим аппаратом, применяющимся в квантово-механическом подходе, навыками решения квантово-механических задач; дифференциальных и полных сечений рассеяния, времен жизни, времени задержки, энергий связи, спектров распадов частиц и их пробегов в веществе.</p>

#### **IV. Содержание и структура дисциплины (модуля)**

Объем дисциплины составляет 2 зачетных единицы, 72 часа, в том числе 53 часа контактной работы.

Занятия проводятся только в очной форме обучения с применением дистанционного контроля самостоятельной работы студентов через ЭИОС факультета. Электронной и дистанционной форм обучения не предусматривается.

На практическую подготовку отводится 44 часа.

Форма промежуточной аттестации: зачет.

#### **4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов**

№ п/п	Раздел дисципл	Семестр	Всего	Из них практиче-	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу обучающихся , практическую подготовку и трудоемкость (в часах)	Формы текущего контроля успеваемости; Форма

иные/ темы	с т р	с о в	сказа подго товка обу- чающ ихся	Контактная работа преподавателя с обучающимися			Самостоятельная работа	промежуточ- ной аттеста- ции (по семест- рам)	
				Лекции	Семинарские /практические /лабораторные занятия	Консультации			
1	1-10	8	72	53		44	1	19	Практиче- ское зада- ние
Итого:			72	53		44	1	19	

#### 4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

Семестр	Название раздела, темы	Самостоятельная работа обучающихся			Оценочное средство	Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы
		Вид самостоятельной работы	Сроки выполнения	Трудоемкость (час.)		
8	Тема 1-10	Задание в виде задачи	После пройденных тем	19	Демонстрация готовых решений	Источники из основной и дополнительной литературы по теме практических занятий; Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ.

#### 4.3. Содержание учебного материала

**Тема 1.** Феноменология слабого взаимодействия, (V-A)-теория, структура слабых токов, слабый кварковый ток. Несохранение Р-, С-четности. Несохранение СР-четности в распадах нейтральных каонов.

**Тема 2.** Стандартная модель электрослабого взаимодействия (теория Вайнберга-Глэшоу-Салама), общая структура лагранжиана электрослабого взаимодействия, заряженные и нейтральные лептонные и кварковые токи. Необходимость смешивания夸ков, угол Кабббо, матрица Кабббо-Кобаяши-Маскава.

**Тема 3.** Возможные расширения стандартной модели. Физика нейтрино: массы, смешивание, осцилляции. Нейтрино в космологии и астрофизике.

**Тема 4.** Рассеяние нейтрино на нуклонах, электронах и ядрах, заряженные и нейтральные токи.

**Тема 5.** Прохождение пучка нейтрино через вещество, поглощение и регенерация нейтрино.

**Тема 6.** Вынужденная поляризация частиц в слабых распадах пионов  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$  и мюонов  $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e (\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu (\nu_\mu)$ .

**Тема 7.** Осцилляции странности в пучках нейтральных каонов, роль этого явления в широких атмосферных ливнях. Спектры распадов каонов в лабораторной системе.

**Тема 8.** Сильные взаимодействия. Сравнение характеристик основных адронных моделей, используемых при моделировании широких атмосферных ливней, порожденных космическими лучами (ШАЛ).

**Тема 9.** Взаимодействие космических лучей с атмосферой Земли. Широкие атмосферные ливни. Модели ядерного каскада в атмосфере, методы приближенного решения уравнений каскада. Точно решаемая модель нуклонного каскада и ее расширение на случай зависящих от энергии свободных пробегов частицы

**Тема 10.** Механизм Грейзена-Зацепина-Кузьмина обрезания спектра КЛ. Изменение спектра протонов КЛ сверхвысоких энергий при учете механизма ГЗК.

#### 4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ

№ п/п	№ раздела и темы дисциплины (модуля)	Наименование семинаров, практических и лабораторных работ	Трудоемкость (часы)	Оценочные средства	Формируемые компетенции
1	2	3	4	5	6
1.	Тема 1	Расчет относительного выхода заряженных и нейтральных пи-мезонов в реакции фоторождения	6	Проверка решения задач, собеседование с преподавателем	ПК-1 ПК-2
2.	Тема 2	Расчет энергетических спектров мюонов и нейтрино в двухчастичных распадах заряженных пионов и каонов	6		ПК-1 ПК-2
3.	Тема 3	Пробег $\pi^\pm, K^\pm, K_L^0, K_S^0$ в веществе, критическая энергия до распада, рассчитать долю распавшихся мезонов космических лучей с энергией $E$ (ЛС) на данной глубине $h$ в атмосфере Земли.	-		ПК-1 ПК-2
4.	Тема 4	Расчет сечений CC-, NC-взаимодействий нейтрино высоких энергий ( $E > 10$ ГэВ) с нуклоном, сигнатура событий в нейтринном детекторе.	4		ПК-1 ПК-2

5.	Тема 5	Рассчитать свободные пробеги нейтрино разных сортов ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) в воде и грунте.	4		ПК-1 ПК-2
6.	Тема 6	Распадах поляризованных положительно заряженных мюонов	4		ПК-1 ПК-2
7.	Тема 7	Расчет интенсивности мезонов	4		ПК-1 ПК-2
8.	Тема 8	Расчет энергетических спектров нуклонов и мезонов для простой модели адронного каскада на малой глубине атмосферы	8		ПК-1 ПК-2
9.	Тема 9	Расчет пороговой энергии и энергетических потерь протонов космических лучей сверхвысоких энергий в процессах взаимодействия с реликтовым излучением	4		ПК-1 ПК-2
10.	Тема 10	Расчет сечений рождения очарованных мезонов в pp-соударениях при высоких энергиях в рамках модели кварк-глюонных струн	4		ПК-1 ПК-2

#### 4.3.2. План самостоятельной работы студентов

№ нед.	Тема	Вид самостоятельной работы	Задание	Рекомендуемая литература	Количество часов
1	Феноменология слабого взаимодействия	Внеаудиторная, изучение литературы, решение задач	Лаб. работы, подготовка отчета	Источники из основной и дополнительной литературы по теме практических занятий; Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ и Сторонние сайты	-
2	Физика нейтрино: массы, смешивание, осцилляции	Внеаудиторная, изучение литературы, выполнение лаб. работы	Лаб. работы, подготовка отчета		4
3	Рассеяние нейтрино на нуклонах, электронах и ядрах	Внеаудиторная, анализ моделей	Лаб. работы, подготовка отчета		4
4	Прохождение пучка нейтрино через вещество	Внеаудиторная, компьютерное моделирование	Лаб. работы, подготовка отчета		4
5	Поляризация частиц в слабых	Внеаудиторная, решение задач	Лаб. работы, подготовка отчета		4

	распадах пионов и мюонов			
6	Осцилляции странности в пучке каонов	Внеаудиторная, решение задач	Лаб. работы, подготовка отчета	3
7	Феноменологические модели адрон-ядерных взаимодействий	Внеаудиторная, компьютерное моделирование	Лаб. работы, подготовка отчета	-
8	Модели ядерного каскада в атмосфере	Внеаудиторная, решение задач, компьютерное моделирование	Лаб. работы, подготовка отчета	-
9	Расчет характеристик потоков мюонов космических лучей	Внеаудиторная, решение задач	Лаб. работы, подготовка отчета	-
10	Выход $\pi^\pm$ , $\pi^0$ - мезонов реакциях фоторождения	Внеаудиторная, решение задач	Лаб. работы, подготовка отчета	-

#### **4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов**

Предполагается, что студент самостоятельно изучит дополнительный материал из рекомендованной литературы и решит предложенные задачи. Оценка самостоятельной работы студентов проводится на основе устного и письменного отчета по каждой лабораторной работе.

#### **4.5. Примерная тематика курсовых работ**

Учебным планом не предусмотрено написание курсовых работ.

V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины:

##### **a) список литературы**

###### **основная литература**

1. Валл А. Н. Квантовая механика в задачах: учеб.- метод. пособие / А. Н. Валл, О. Н. Солдатенко. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2010. – 87 с. нф А623906; физмат 30856 (100 экз.)
2. Паршаков А. Н. Введение в квантовую физику: учеб. пособие [Электронный ресурс] / А. Н. Паршаков. – Электрон. версия кн. – СПб. : Изд-во Лань, [2010]. – 352 с. – (ЭБС «Лань»). – Режим доступа: неограниченный доступ <http://e.lanbook.com/view/book/297/>
3. Киселев В.В. Квантовая механика [Текст] : курс лекций / В. В. Киселев. - М.: Изд-во МЦНМО, 2009. - 560 с. - ISBN 978-5-94057-497-2 (4)
4. Синеговский, С. И. Космические нейтрино высоких энергий [Электронный ресурс]: учеб. пособие / С. И. Синеговский. - ЭВК. - Иркутск: Изд-во ИГУ, 2009. - Режим доступа: ЭЧЗ "Библиотех". - Неограниченный доступ.

###### **дополнительная литература**

1. Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики / Д. И. Блохинцев. – 5-е изд. – М. : Наука, 1976. – 664 с. (1)
2. Ландау Л. Д. Квантовая механика: Теоретическая физика, том III / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 5-е изд. – М. : Наука, 1989. – 767 с. (56)
3. Давыдов А.С. Квантовая механика: учеб. пособие для студ. ун-тов и тех. вузов / А. С. Давыдов. – 3-е изд., стер. – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 703 с. (2)
4. Галицкий В.М. Задачи по квантовой механике: учеб. пособие для физ. спец. вузов / В. М. Галицкий, Б. М. Карнаков, В. И. Коган. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1992. – 878 с. (2)
5. Липкин Г. Квантовая механика. Новый подход к некоторым проблемам / Г. Липкин. – М. : Мир, 1977. – 592 с. (5)

6. Боум А. Квантовая механика: основы и приложения / А. Боум. – М. : Мир, 1990. – 720 с. (2)
7. Елютин П.В., Кривченков В.Д. Квантовая механика. М: Наука, 1976. (5 экз)
8. Зелевинский, В. Г. Лекции по квантовой механике [Текст] : учебное пособие / В. Г. Зелевинский. - 2-е изд., испр. и доп. - Новосибирск : Сиб. унив. изд-во, 2002. (1 экз)
9. Сербо, В. Квантовая механика [Text] : учеб.пособие / В. Сербо, И.Б. Хриплович ; Новосибирский гос.ун-т. - Новосибирск : [с. н.], 2000. - 136 с. (1 экз)
10. Мессия, А. Квантовая механика / А. Мессия. Т. 1., Т. 2. – М: Наука, 1978. (2 экз)
11. Галицкий А.М., Карнаков Б.М., Коган В.И. Сборник задач по квантовой механике. М: Наука, 1981, 2001. (54 экз)
12. Ньютон, Р. Теория рассеяния волн и частиц [Текст] : научное издание / Р. Ньютон ; пер. с англ.: А. М. Кузнецов, А. А. Черненко ; ред.: А. М. Бродский, В. В. Толмачев. - М. : Мир, 1969. - 607 с. Пер. изд. : Stattering theory of waves and particles / Roger G. Newton. - New York. (1 экз)
13. Фаддеев, Л. Д. Лекции по квантовой механике для студентов-математиков [Текст] : учебное пособие / Л.Д. Фаддеев, О.А. Якубовский. - 2-е изд. - Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001. - 255 с. (1 экз)
14. Ситенко А.Г. Лекции по теории рассеяния. Киев, «Вища школа», 1971. (1 экз)
15. Сунакава С. Квантовая теория рассеяния. М: Мир, 1979. (8 экз)
16. Тейлор Дж. Теория рассеяния. М: Мир, 1975. (2 экз)
17. В. де Альфаро, Т. Редже. Потенциальное рассеяние. М: Мир, 1966. (1 экз)
18. Бисноватый-Коган, Г. С. Релятивистская астрофизика и физическая космология / Г. С. Бисноватый-Коган. - М. : Красанд, 2011. - 363 с. - ISBN 978-5-396-00276-0 (2)
19. Окунь, Л. Б. Лептоны и кварки / Л. Б. Окунь. - 3-е изд., стер. - М. : Едиториал УРСС, 2005. - 348 с. - ISBN 5-354-01084-5 (1)
20. Зелевинский В.Г. Лекции по квантовой механике / В. Г. Зелевинский. - 2-е изд., испр. и доп. - Новосибирск : Сиб. унив. изд-во, 2002. - 498 с. - ISBN 5-94087-021-X (1)
21. Клапдор-Клайнгратхаус, Г. В. Астрофизика элементарных частиц / Г.В. Клапдор-Клайнгратхаус, Kay Цюбер; Пер.с нем.,Под ред.А.А.Беднякова. - М.: Ред. журн."Успехи физич.наук", 2000. - 496 с. - ISBN 5855040127 (1)
22. Райдер, Л. Элементарные частицы и симметрии/ Л. Райдер. - М.: Наука, 1983. - 317 с. (2)
23. Пескин, М. Е. Введение в квантовую теорию поля / М.Е. Пескин, Д.В. Шредер. - Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. - 783 с. - ISBN 5-93972-083-8 (1)
24. Вайнберг, С. Квантовая теория поля / С. Вайнберг. - М.: Физматлит, 2003. Т.1 : Общая теория. - 648 с. - ISBN 5-9221-0403-9 (2)

## **б) периодические издания**

- нет.

## **в) список авторских методических разработок**

- Материалы и книги по курсу доступны на сайте [http://www.pd.isu.ru/sost/teor\\_phi/homepage/sinegovsky.html](http://www.pd.isu.ru/sost/teor_phi/homepage/sinegovsky.html).

## **г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы**

<http://library.isu.ru/> - Научная библиотека ИГУ;

Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ:

<https://isu.bibliotech.ru/> - ЭЧЗ «БиблиоТех»;

<http://e.lanbook.com> - ЭБС «Издательство «Лань»;

<http://rucont.ru> - ЭБС «Руконт» - межотраслевая научная библиотека, содержащая оцифрованные книги, периодические издания и отдельные статьи по всем отраслям знаний, а также аудио-, видео-, мультимедиа софт и многое другое;

<http://ibooks.ru/> - ЭБС «Айбукс»- интернет ресурсы в свободном доступе;

## VII. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения занятий используются учебные аудитории с меловой доской, также занятия могут проходить в компьютерном классе с современной вычислительной техникой и соответствующим программным обеспечением. В классе имеются стационарные компьютеры. Компьютеры имеют доступ к локальной сети университета и выход в Интернет. На занятиях могут использоваться мультимедийные средства: проектор, переносной экран, ноутбук. На факультете имеется компьютеризированная аудитория, предназначенная для самостоятельной работы, с неограниченным доступом в Интернет.

Пакеты программ для выполнения расчетов и обработки численных результатов: Сомпаq Visual FOTRAN , Visual C++, Python (3.4.3), ROOT. Стандартная библиотека пакета Python

<http://pythonworld.ru/osnovy/skachat-python.html> предоставляет широкий набор средств. Содержит встроенные модули, написанные на языке C, обеспечивающие доступ к стандартизованным решениям многих задач программирования. Часть этих модулей организована так, чтобы обеспечить (усилить) мобильность программ, написанных на языке Python - т. е. возможность их переноса с одного компьютера на другой. Установщик Python на платформе Windows обычно включает целиком стандартную библиотеку и много других дополнительных компонент. Для операционных систем Unix (Linux) Python обеспечивает доступ к набору пакетов, которые обеспечивают возможность использовать инструментарий операционной системы.

## VII. Образовательные технологии:

лабораторные занятия, направленные на активизацию познавательной деятельности студентов и приобретения ими навыков решения задач;  
консультации –еженедельно для желающих студентов;  
самостоятельная внеаудиторная работа направлена на приобретение навыков самостоятельного решения задач по дисциплине; чтение литературы, завершение лабораторных работ, графическую обработку данных и составление отчетов;  
текущий контроль работы студентов осуществляется через письменные и устные отчеты по выполненным лабораторным работам.

## VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации

Фонд оценочных средств представлен в приложении.

8.1. Оценочные средства для входного контроля: не требуются.

8.2. Оценочные средства текущего контроля.

Текущий контроль осуществляется путем заслушивания отчетов по лабораторным работам.

Форма проведения промежуточной аттестации — зачет.

Примерный перечень вопросов и заданий к зачёту

1. 1. Используя законы сохранения (энергии-импульса и квантовых чисел), определите, какие из реакций возможны:

2. 1)  $n \rightarrow \mu^+ + \mu^- + \gamma$ , 2)  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ , 3)  $\mu^+ \rightarrow e^+ + e^- + e^+$ ,
3. 4)  $K^+ + n \rightarrow \Sigma^+ + \pi^0$ , 5)  $\Sigma^- \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$ , 6)  $\Sigma^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
4. 7)  $\Sigma^+ \rightarrow \Lambda^0 + e^+ + \nu_e$  8)  $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^- + K^+$ , 9)  $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^+ + K^-$
5. 10)  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ , 11)  $\pi^- \rightarrow e^- + \nu_e$ , 12)  $\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$

6. Какие процессы доминируют в электронно-фотонных ливнях, генерируемых при взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли?

7. Какие основные процессы отвечают за развитие ядерного (адронного) каскада в атмосфере (ядерной компоненты ШАЛ)?

8. Сформулируйте точно решаемую модель ядерного каскада, порожденного космическим лучами в атмосфере, и приближения, используемые при решении реальной задачи.

9. При каком условии можно отщепить нуклонную часть ядерного каскада ШАЛ от мезонной?

10. К какому типу процессов (заряженные или нейтральные токи) отнесете взаимодействия нейтрино с дейtronом:  $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ ;  $\nu_e + d \rightarrow n + p + e^-$ ;  $\nu_\mu + d \rightarrow p + n + \nu_\mu$ ?

11. К какому типу процессов отнесете рассеяние нейтрино на электроне:  $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$ ;  $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$  ?

**Разработчики:**

профессор кафедры теоретической физики

С.И. Синеговский

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.03.02 Физика.

Программа рассмотрена на заседании кафедры теоретической физики  
«30» августа 2021 г.

Протокол № 1 И.о. зав. кафедрой С.В. Ловцов

**Настоящая программа не может быть воспроизведена ни в какой форме без предварительного письменного разрешения кафедры-разработчика программы.**