

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР НЕВОД

ОДОБРЕНО УМС ИЯФИТ

Протокол № 01/423-573.1

от 20.04.2023 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
7	3	108	16	0	32		44	16	3
Итого	3	108	16	0	32	32	44	16	

## АННОТАЦИЯ

Современные исследования в области физики высоких энергий и космических лучей проводятся на крупных и сложных установках, при этом для интерпретации экспериментальных данных (наблюдаемых явлений) обычно требуется привлечение теоретических моделей. Данный курс предназначен в основном для практического изучения студентами современных научных программных инструментов (PYTHON, CORSIKA, Geant4), позволяющих проводить моделирование взаимодействия частиц, а также анализировать полученные результаты (ROOT). Особое внимание уделено работе с операционной системой Linux (команды, редактирование, компиляция). Кратко рассматриваются теоретические аспекты взаимодействий при высоких энергиях.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины «Моделирование взаимодействия частиц» является приобретение учащимися практических навыков работы с широко используемыми сейчас в области физики высоких энергий и космических лучей программами: PYTHON, CORSIKA, Geant4, а также с операционной системой Linux и программным обеспечением для научного анализа данных ROOT.

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Учебная дисциплина «Моделирование взаимодействия частиц» относится к профессиональному модулю программы «Физика космических излучений» по направлению «Ядерная физика и технологии» и является дисциплиной по выбору.

Данная дисциплина логически опирается на такие учебные дисциплины, как: «Атомная физика», «Ядерная физика», «Квантовая механика», также студент должен:

- знать: иностранный язык в объеме, необходимом для получения информации профессионального содержания из зарубежных источников; понятия и методы математического анализа: дифференциальное исчисление, интегральное исчисление и функции многих переменных; аналитическую геометрию; линейную алгебру; векторный и тензорный анализ; обыкновенные дифференциальные уравнения; теорию вероятности и математическую статистику; общую физику: механику, молекулярную физику, электричество и магнетизм, волны и оптику; области и возможности применения физических явлений; фундаментальные законы (явления и эффекты) в области физики атомного ядра и частиц;

- уметь: использовать математические методы в физических приложениях; применять методы решения задач анализа и расчета характеристик механических, электромагнитных, оптических, атомных и ядерных систем; использовать основные приемы обработки экспериментальных данных;

- владеть: методами математического анализа; методами решения задач анализа и расчета характеристик физических систем; основными методами работы на ПЭВМ в том числе методами работы с прикладными программными продуктами.

Освоение дисциплины «Моделирование взаимодействия частиц» важно для изучения следующих дисциплин программы «Физика мюонов космических лучей», «Экспериментальные методы ядерной физики», «Производственная практика», а также при подготовке и защите диплома (выпускной квалификационной работы).

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
1 Изучение и анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования; математическое моделирование процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований; проведение экспериментов по заданной методике, составление описания проводимых исследований и анализ результатов; подготовка данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций, участие во внедрении результатов исследований и разработок;	1 Объектами профессиональной деятельности выпускников по основной образовательной программе «Экспериментальные исследования и моделирование фундаментальных взаимодействий» являются: атомное ядро, элементарные частицы и плазма, газообразное и конденсированное состояние вещества, лазеры и их применения, ускорители заряженных частиц, современная электронная схемотехника, электронные системы ядерных и физических установок, системы автоматизированного управления ядерно-физическими	ПК-2 [1] - Способен проводить математическое моделирование процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	З-ПК-2[1] - знать методы математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований; ; У-ПК-2[1] - уметь использовать методы математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований;; В-ПК-2[1] - владеть навыками математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований;

	<p>установками, разработка ядерных и физических установок, технологии применения приборов и установок для регистрации излучений, разделения изотопных и молекулярных смесей, а также анализа веществ, радиационное воздействие ионизирующих излучений на человека и окружающую среду, радиационные технологии в медицине, математические модели для теоретических, экспериментальных и прикладных исследований явлений и закономерностей в области физики ядра, частиц, плазмы, газообразного и конденсированного состояния вещества, распространения и взаимодействия излучения с объектами живой и неживой природы, экологический мониторинг окружающей среды, обеспечение безопасности ядерных материалов, объектов и установок атомной промышленности и энергетики.</p>		
<p>проведение научных исследований поставленных проблем;</p>	<p>атомное ядро, элементарные частицы и космические лучи,</p>	<p>ПК-26.2 [1] - Способен работать с детекторами и установками в</p>	<p>З-ПК-26.2[1] - Знать физические принципы и основные методы регистрации</p>

<p>формулировка новых задач, возникающих в ходе научных исследований; работа с российской и зарубежной научной литературой с использованием новых информационных технологий и ресурсов, работа на экспериментальных физических установках; выбор необходимых методов исследования; анализ получаемой физической информации с использованием современной вычислительной техники; математическое моделирование процессов и экспериментальных установок</p>	<p>математические модели для теоретического и экспериментального исследований явлений и закономерностей в области физики ядра, частиц, космических лучей</p>	<p>области физики космических излучений, проводить оптимизацию их характеристик.  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p>	<p>элементарных частиц, основные элементы детектирующих систем, принципы работы детекторов и установок в области физики космических излучений.; У-ПК-26.2[1] - Уметь планировать и организовывать современный физический эксперимент, проводить оптимизацию детекторов и установок в области физики космических излучений.; В-ПК-26.2[1] - Владеть методами модернизации детекторов и установок для научно-инновационных исследований в области физики космических излучений.</p>
--	--	---	---

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
Интеллектуальное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование культуры умственного труда (В11)	Использование воспитательного потенциала дисциплин гуманитарного, естественнонаучного, общепрофессионального и профессионального модуля для формирования культуры умственного труда посредством вовлечения студентов в учебные исследовательские задания, курсовые работы и др.
Профессиональное и трудовое воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование психологической готовности к профессиональной деятельности по	Использование воспитательного потенциала дисциплин общепрофессионального модуля для: - формирования устойчивого интереса к профессиональной деятельности, потребности в достижении результата, понимания функциональных

	избранной профессии (B15)	обязанностей и задач избранной профессиональной деятельности, чувства профессиональной ответственности через выполнение учебных, в том числе практических заданий, требующих строгого соблюдения правил техники безопасности и инструкций по работе с оборудованием в рамках лабораторного практикума.
--	---------------------------	--

## 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (семинары )/ Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>7 Семестр</i>						
1	Работа в ОС Linux. Моделирование столкновений частиц (PYTHIA). Анализ данных. Ускорительные эксперименты, космические лучи.	1-8	8/0/16	ЛР-8 (25)	25	КИ-8	3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-26.2, У-ПК-26.2, В-ПК-26.2
2	Моделирование ШАЛ (CORSIKA). Моделирование отклика детекторов на прохождение частиц (Geant4). Взаимодействия мюонов. Детекторы ЭК НЕВОД.	9-16	8/0/16	ЛР-16 (25)	25	КИ-16	3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-26.2, У-ПК-26.2,

							В-ПК-26.2
	<i>Итого за 7 Семестр</i>		16/0/32		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 7 Семестр</b>				50	3	3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-26.2, У-ПК-26.2, В-ПК-26.2

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
ЛР	Лабораторная работа
КИ	Контроль по итогам
З	Зачет

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>7 Семестр</i>	16	0	32
1-8	<b>Работа в ОС Linux. Моделирование столкновений частиц (PYNIA). Анализ данных. Ускорительные эксперименты, космические лучи.</b>	8	0	16
1 - 2	<b>Виртуальная машина. Работа с ОС Linux.</b> Создание и настройка виртуальной машины (VirtualBox) на компьютере под управлением ОС Windows. Установка и настройка ОС Linux (CentOS, Ubuntu). Начальные понятия работы под управлением ОС Linux: основные команды, редактирование файлов, компиляция программ.	Всего аудиторных часов		
		2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 4	<b>ROOT – программное обеспечение для научного анализа данных.</b> Построение гистограмм, графиков. Аппроксимация и статистическая обработка данных. Работа с файлами. Примеры использования.	Всего аудиторных часов		
		2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0
5 - 6	<b>Физика высоких энергий. Эксперименты на</b>	Всего аудиторных часов		

	<b>ускорителях. Программа PYTHIA.</b> Стандартная модель элементарных частиц. Некоторые понятия из квантовой механики, релятивистской кинематики. Взаимодействия частиц. Источники частиц высоких энергий. Эксперименты, проводимые на ускорителях. Примеры анализа открытых данных LHC. Генераторы событий, происходящих при столкновении частиц высоких энергий, методом Монте-Карло. Краткий обзор PYTHIA. Настройки программы (частицы, процессы). Обработка событий. Столкновения протонов и ядер: стандартный подход (Лундовская модель), генерация W-бозонов и t-кварков. Сравнение распределений вторичных частиц по множественности, энергии, поперечному импульсу, скорости.	2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0
7 - 8	<b>Космические лучи. Широкие атмосферные ливни. Программа CORSIKA.</b> Источники, ускорение и распространение первичных космических лучей (ПКЛ). Энергетический спектр, массовый состав, анизотропия. Прохождение космических лучей через атмосферу Земли. Широкие атмосферные ливни (ШАЛ), основные компоненты. Методы изучения ШАЛ, эксперименты по регистрации ШАЛ. Возможности программы CORSIKA. Модели адронных взаимодействий. Дополнительные опции. Атмосфера и магнитное поле Земли. Параметры входного файла, управление моделированием. Компиляция и сборка программы. Расчет ШАЛ для разных первичных ядер, энергий, направлений, моделей взаимодействий. Чтение выходного файла.	Всего аудиторных часов		
		2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0
9-16	<b>Моделирование ШАЛ (CORSIKA). Моделирование отклика детекторов на прохождение частиц (Geant4). Взаимодействия мюонов. Детекторы ЭК НЕВОД.</b>	8	0	16
9 - 10	<b>Корреляции различных компонент ШАЛ. Обработка результатов моделирования ШАЛ.</b> Анализ пространственных, угловых, временных, энергетических характеристик электронно-фотонной, мюонной и адронной компонент ШАЛ для разных первичных частиц, энергий и зенитных углов, моделей взаимодействий. Корреляции разных компонент, их использование для оценки массового состава первичных космических лучей. Особенности моделирования мюонной компоненты ШАЛ для изучения групп мюонов в эксперименте НЕВОД-ДЕКОР (спектры локальной плотности, энергетические характеристики). Моделирование электронно-фотонной компоненты для расчета отклика установки НЕВОД-ШАЛ (мощность и возраст ливней, функция НКГ) и адронной – для установки УРАН.	Всего аудиторных часов		
		2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0
11 - 12	<b>Пакет программ Geant4. Моделирование прохождения частиц через вещество.</b> Обзор возможностей Geant4. Сборка библиотек Geant4. Примеры использования Geant4 разного уровня сложности. Настройка интерактивного сеанса работы. Визуализация и	Всего аудиторных часов		
		2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0

	анализ моделированных событий.			
13 - 14	<b>Мюоны. Проверка процессов взаимодействия мюонов, заложенных в Geant4.</b> Краткая справка по процессам взаимодействия частиц с веществом. Сильные взаимодействия при высоких энергиях. Электромагнитные взаимодействия. Взаимодействия мюонов с атомами и ядрами, наблюдаемые эффекты. Методы измерения энергии мюонов и эксперименты. Реализация основных процессов взаимодействия высокоэнергичных мюонов с веществом в пакете программ Geant4. Оригинальный подход для сопоставления результатов моделирования с теорией – распределение числа взаимодействий по переданным энергиям. Тесты для различных веществ (легких и тяжелых) и энергий мюонов (100 ГэВ – 1 ПэВ).	Всего аудиторных часов		
		2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0
15 - 16	<b>Разработка простой программы (модели детектора) на основе Geant4. ЭК НЕВОД.</b> Определение геометрии и материалов детектора (сцинтилляционного / водного черенковского). Описание частиц и процессов взаимодействия. Задание источника частиц (положение, угловое и энергетическое распределения). Сборка и отладка программы. Визуализация детектора и треков частиц. Установки ЭК НЕВОД для регистрации электронно-фотонной, мюонной и адронной компонент ШАЛ (НЕВОД-ШАЛ, НЕВОД, СКТ, ДЕКОР, ПРИЗМА, УРАН). Особенности, схемы расчетов, возможности упрощения и ускорения расчетов. Сравнение результатов моделирования с экспериментом. Вычислительные ресурсы высокопроизводительного вычислительного центра (НРС) НИЯУ МИФИ. Система управления распределенными вычислениями SLURM. Использование вычислительного центра: работа с файловой системой, подготовка пользовательских приложений и скриптов исполнения задач, мониторинг и управление задачами.	Всего аудиторных часов		
		2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

ТЕМЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>7 Семестр</i>
1 - 2	<p><b>Создание виртуальной машины. Установка, настройка и работа в ОС Linux.</b></p> <p>Создание виртуальной машины на компьютере под управлением ОС Windows. Установка и настройка ОС Linux. Приобретение основных навыков работы под управлением ОС Linux.</p>
3 - 4	<p><b>Обработка и анализ данных с помощью ROOT.</b></p> <p>Обзор возможностей программного обеспечения ROOT для научного анализа данных. Анализ открытых данных ускорительных детекторов LHC и установки по регистрации ШАЛ Pierre Auger Observatory.</p>
5 - 6	<p><b>Программа PYTHIA. Моделирование столкновений высокоэнергичных частиц.</b></p> <p>Обзор возможностей программы PYTHIA. Примеры использования. Моделирование столкновений высокоэнергичных частиц. Построение и анализ различных распределений вторичных частиц, образовавшихся в столкновениях высокоэнергичных протонов и ядер.</p>
7 - 8	<p><b>Программа CORSIKA. Моделирование ШАЛ.</b></p> <p>Обзор возможностей программы CORSIKA. Входные параметры. Обработка выходного файла. Моделирование ШАЛ для разных первичных ядер, энергий, направлений, моделей взаимодействий.</p>
9 - 10	<p><b>Анализ характеристик различных компонент моделированных ШАЛ.</b></p> <p>Построение и анализ пространственных, угловых, временных, энергетических характеристик электронно-фотонной, мюонной и адронной компонент ШАЛ.</p>
11 - 12	<p><b>Примеры использования пакета программ Geant4 разного уровня сложности.</b></p> <p>Обзор возможностей пакета программ Geant4. Сборка библиотек. Примеры использования Geant4 разного уровня сложности. Визуализация и анализ моделированных событий.</p>
13 - 14	<p><b>Проверка процессов взаимодействия мюонов, реализованных в Geant4.</b></p> <p>Использование примера TestEm17 для проверки взаимодействий мюонов.</p>
15 - 16	<p><b>Разработка простой модели детектора на основе Geant4.</b></p> <p>Определение геометрии и материалов детектора, описание частиц и процессов взаимодействия, задание источника частиц, генерация событий.</p>

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Занятия по дисциплине «Моделирование взаимодействия частиц» проходят в форме лекций и лабораторных работ с использованием современных средств мультимедиа и интерактивных технологий. Самостоятельная работа студентов предусматривает предварительную подготовку по тематике занятий.

## 7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-2	З-ПК-2	З, КИ-8, КИ-16, ЛР-8, ЛР-16
	У-ПК-2	З, КИ-8, КИ-16, ЛР-8, ЛР-16
	В-ПК-2	З, КИ-8, КИ-16, ЛР-8, ЛР-16
ПК-26.2	З-ПК-26.2	З, КИ-8, КИ-16, ЛР-8, ЛР-16
	У-ПК-26.2	З, КИ-8, КИ-16, ЛР-8, ЛР-16
	В-ПК-26.2	З, КИ-8, КИ-16, ЛР-8, ЛР-16

## Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	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.
85-89	4 – «хорошо»	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 –	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает
60-64			

			неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	F	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.

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ К 93 Курс общей физики Т. 5 Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц, : , 2022
2. ЭИ К 55 Операционные системы, среды и оболочки : , Санкт-Петербург: Лань, 2022
3. ЭИ С 12 Основы теоретической физики. В 2-х тт. Том 2. Квантовая механика : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2022
4. ЭИ Э 41 Экспериментальная ядерная физика Т. 3 Физика элементарных частиц, : , 2022

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 52 М 91 Астрофизика космических лучей : [учеб. пособие по специальностям "Физика и космос", "Астрономия", "Астрофизика", "География" и другим физ. направлениям и специальностям], Москва: ЛОГОС, 2007
2. ЭИ Г17 Космические лучи : , А. М. Гальпер, М.: МИФИ, 2002
3. 004 Т46 Введение в LINUX : учебное пособие для вузов, В. О. Тихомиров, Москва: МИФИ, 2007

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

1. Сайт Научно-образовательного центра НЕВОД (<http://nevod.mephi.ru/>)
2. ScienceDirect is a leading full-text scientific database offering journal articles and book chapters (<http://www.sciencedirect.com/science/journals/>)

3. Springer. Providing researchers with access to millions of scientific documents from journals, books (<http://link.springer.com/>)
  4. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU. (<http://elibrary.ru/>)
  5. Электронная библиотека НИЯУ МИФИ ([www.library.mephi.ru](http://www.library.mephi.ru))
  6. Geant4 is a toolkit for the simulation of the passage of particles through matter. (<https://geant4.web.cern.ch/>)
  7. ROOT Data Analysis Framework (<https://root.cern.ch/>)
  8. Linuxsoft: Software Repository Service (<https://linuxsoft.cern.ch/>)
  9. PYTHIA is a program for the generation of high-energy physics collision events (<https://pythia.org/>)
  10. CORSIKA – an Air Shower Simulation Program (<https://www.iap.kit.edu/corsika/>)
  11. Некоммерческий научно-популярный проект «Элементы большой науки». (<https://elementy.ru/>)
- <https://online.mephi.ru/>
- <http://library.mephi.ru/>

## **9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

## **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

Основная задача дисциплины «Моделирование взаимодействия частиц» для студентов – научиться работать с широко применяемым в области физики высоких энергий и космических лучей программным обеспечением: PYTHIA, CORSIKA, Geant4, а также на пользовательском уровне освоить операционную систему Linux и получить базовые навыки анализа данных с помощью ROOT. Курс состоит из лекций (краткая теория) и лабораторных работ (практика). Для проведения лабораторных работ имеется компьютерный класс.

Значительное количество научных и инженерных пакетов программ в настоящее время работает под управлением ОС Linux, поэтому ее освоение важно для каждого грамотного специалиста. В ходе выполнения практических занятий студенты научатся устанавливать Linux на компьютер и настраивать рабочее окружение. При этом им необходимо проявлять внимательность и аккуратность в своих действиях. Предполагается, что учащиеся знакомы с устройством компьютера в целом, а также при необходимости могут расширить свои знания, используя соответствующую справочную литературу. Кроме того, в сложных случаях они могут обращаться за помощью к преподавателю. С целью быстрого практического освоения ОС Linux будут рассмотрены: основные команды, операции с файлами и каталогами, работа с текстовыми редакторами, компиляция и сборка программ и т.д.

Обучение работе с научным программным обеспечением для анализа данных – ROOT строится на имеющихся в открытом доступе реальных данных ускорительных детекторов (LHC) и данных по регистрации космических лучей сверхвысоких энергий (Pierre Auger Observatory), а также на результатах расчетов, выполненных студентами в процессе выполнения лабораторных работ с использованием программ PYTHIA, CORSIKA, Geant4.

Программа PYTHIA представляет собой генератор столкновений высокоэнергичных частиц: протонов, электронов, гамма-квантов, ядер. Программа CORSIKA позволяет проводить расчет методом Монте-Карло ядерно-электромагнитных каскадов, образующихся при прохождении первичных ядер космических лучей через атмосферу Земли. Пакет программ Geant4 дает возможность моделировать процессы взаимодействия частиц высоких энергий с веществом для расчета отклика различных детекторов. Предполагается, что каждый обучающийся сначала под руководством преподавателя, а затем и самостоятельно сможет выполнять практические задачи с использованием перечисленных научных программных инструментов.

Научные программные продукты (PYTHIA, CORSIKA, Geant4) непрерывно совершенствуются, поэтому для качественного обучения рекомендуется использовать руководства, размещенные в сети Интернет на соответствующих сайтах (страницах). При использовании программ моделирования взаимодействий частиц уже в научных исследованиях важно понимать, что программное обеспечение может содержать ошибки, которые не всегда выявляются на этапах обязательного тестирования перед выходом новых версий.

Для успешного освоения курса учащимся необходимы систематические занятия: регулярное посещение, конспектирование лекций и последующая проработка материала, выполнение практических заданий на лабораторных работах. Особая роль отводится самостоятельной работе студентов. С целью углубления знаний будет полезно изучать дополнительную литературу (в основном статьи).

## **11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

Основная цель данного курса «Моделирование взаимодействия частиц» – научить студентов практической работе с современным программным обеспечением (PYTHIA, CORSIKA, Geant4), которое широко используется в области физики высоких энергий и космических лучей, а также с операционной системой Linux и инструментами для анализа данных (на примере ROOT).

Сначала необходимо объяснить студентам, как установить на компьютеры и настроить ОС Linux, а также пройти все процедуры вместе с учащимися. В качестве дистрибутива можно использовать, например, Scientific Linux CERN, CentOS, Ubuntu. В качестве носителя ОС может выступать виртуальная машина. Далее надо уделить внимание базовым командам, работе с файлами и каталогами, использованию текстовых редакторов, компиляции и сборке программ и т.д. Потом осуществить сборку научного программного обеспечения для моделирования взаимодействий и анализа данных, подготовить его к использованию.

На следующем этапе переходим уже непосредственно к использованию научного программного обеспечения. При этом целесообразно кратко изложить теоретические сведения, а затем переходить к их практическому самостоятельному освоению студентами (лабораторные работы) на компьютерах.

Научное программное обеспечение для анализа данных ROOT. Надо рассмотреть построение гистограмм и графиков, аппроксимацию и статистическую обработку данных,

работу с файлами. Особое внимание уделить демонстрации возможностей ROOT на реальных примерах. С этой целью удобно использовать, например, имеющиеся в открытом доступе экспериментальные данные детекторов ускорителя LHC и данные по регистрации высокоэнергичных широких атмосферных ливней Pierre Auger Observatory. Еще более интересным представляется обработка и анализ данных, полученных самими студентами при выполнении ими научно-исследовательских работ (в частности, на установках ЭК НЕВОД).

Генератор столкновений высокоэнергичных частиц PYTHIA. Необходимо дать краткую справку по элементарным частицам и взаимодействиям, некоторые понятия из квантовой механики, релятивистской кинематики, рассмотреть эксперименты, проводимые на ускорителях. Далее обсудить возможности программы PYTHIA. Дать индивидуальные задания студентам по самостоятельному моделированию столкновений протонов и ядер (например, в стандартном подходе и с генерацией t-кварков). Затем, используя ROOT, студенты должны построить распределения вторичных частиц по множественности, энергии, поперечному импульсу, скорости и провести их сравнительный анализ. Совместно обсудить полученные результаты.

Программа для моделирования развития каскадов частиц в атмосфере CORSIKA. Необходимо дать краткую теорию по физике космических лучей (происхождение, энергетический спектр, массовый состав, анизотропия), рассказать об образовании широких атмосферных ливней, методах их изучения и экспериментах. Далее обсудить возможности программы CORSIKA, модели адронных взаимодействий, разобрать параметры входного файла, управление моделированием, структуру выходного файла. Вместе со студентами осуществить компиляцию и сборку программы. Дать индивидуальные задания учащимся по проведению моделирования ШАЛ для разных первичных ядер, энергий, направлений, моделей взаимодействий. Дать возможность студентам самостоятельно провести обработку моделированных событий и анализ пространственных, угловых, временных, энергетических характеристик электронно-фотонной, мюонной и адронной компонент ШАЛ, изучить корреляции разных компонент. При этом, в случае необходимости, поддерживать их и помогать.

Пакет программ для моделирования прохождения частиц через вещество Geant4. Необходимо дать краткое введение по процессам взаимодействия частиц с веществом, отдельное внимание уделить взаимодействиям мюонов с атомами и ядрами, наблюдаемым эффектам, обсудить методы измерения энергии мюонов и эксперименты. Далее рассмотреть возможности Geant4. Вместе со студентами провести сборку библиотек. Затем разобрать некоторые примеры использования Geant4 разного уровня сложности, включая визуализацию и анализ моделированных событий. Особо следует остановиться на примере, в котором осуществляется проверка основных процессов взаимодействия высокоэнергичных мюонов с веществом, реализованных в Geant4. Основываясь на этом примере, студенты должны провести тесты для различных веществ (легких и тяжелых) и энергий мюонов (100 ГэВ – 1 ПэВ). В рамках данного курса учащимся также предлагается самостоятельно разработать простую программу для моделирования отклика детектора (сцинтилляционного/водного черенковского) на прохождение частиц, которая включает определение геометрии и материалов детектора, описание частиц и процессов взаимодействия, задание источника частиц, настройку интерактивного сеанса работы, визуализацию частей детектора и треков.

Безусловный интерес для студентов будет представлять обсуждение расчетов: схемы, особенности, возможности упрощения и ускорения, проводимых для интерпретации данных установок ЭК НЕВОД (НЕВОД-ШАЛ, НЕВОД, СКТ, ДЕКОР, ПРИЗМА, УРАН). Очень

полезно будет рассмотреть некоторые аспекты проведения масштабных расчетов на высокопроизводительном вычислительном центре (НПС), включая подготовку пользовательских приложений и скриптов исполнения задач, систему управления распределенными вычислениями (SLURM), мониторинг выполнения задач.

Естественно, в рамках семестрового курса не получится рассмотреть многие аспекты использования научного программного обеспечения для моделирования взаимодействий и анализа данных. Однако, заложенные в процессе обучения знания и навыки, позволят будущим специалистам в области физики высоких энергий и космических лучей самостоятельно и достаточно быстро их совершенствовать.

Автор(ы):

Богданов Алексей Георгиевич, к.ф.-м.н.