

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Метод Монте-Карло в ядерной физике
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных взаимодействий и космологии
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: О.Б. Щеголев, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальных взаимодействий и космологии 04.06.2021

Аннотация

Курс посвящен технике применения метода Монте-Карло к задачам о взаимодействии частиц с веществом, построению модельного ядерно-физического эксперимента, обработке, анализу полученных в нем данных, и представлению результатов.

Первая часть курса посвящена теоретическим основам ядерно-физического моделирования, и теории применения метода Монте-Карло.

Во второй части курса происходит знакомство с программным пакетом ROOT, разработанным в ЦЕРНе для обработки и анализа данных. Рассказывается про базовые структуры данных, основы статистического анализа и графическое представление результатов. По итогу первой и второй частей студентам предлагается выполнить проект, включающий в себя моделирование выбранного эксперимента методом Монте-Карло, анализ и представление его результатов с написанием всего кода в пакете ROOT.

Третья часть курса посвящена основам построения модели ядерно-физического эксперимента в пакете GEANT4. Рассматривается структура GEANT4, детально на примере простейших программ рассматривается работа с основными необходимыми классами. В завершении студентам предлагается написать программу моделирования выбранного эксперимента в пакете GEANT4, с проведением анализа данных и представлением результатов в пакете ROOT.

Для работы с GEANT4 и ROOT для каждого студента создается учетная запись на специальном сервере с установленным программным обеспечением.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Изложение метода Монте-Карло применительно к задачам о взаимодействии частиц с веществом. Формирование базовых навыков использования пакетов программ GEANT4 и ROOT для моделирования ядерно-физических экспериментов и анализа полученных результатов. Формирование математической культуры, исследовательских навыков и способности применять знания на практике.

Задачи дисциплины

- Изложение некоторых разделов теории вероятностей и математической статистики, необходимых для метода Монте Карло;
- Основные алгоритмы моделирования случайных величин с заданным законом распределения
- Некоторые типичные задачи моделирования ядерно-физических процессов и регистрации результатов
- Работа с данными в программном пакете ROOT
- Построение модели ядерно-физического эксперимента в пакете GEANT4

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения

ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

понятия теории вероятностей и математической статистики, используемые в методе Монте-Карло; основные приемы моделирования случайных величин с заданным законом распределения; физические приближения, принятые при моделировании взаимодействия частиц с веществом и ядерных реакций при высоких энергиях; основные структуры данных пакета ROOT, структуру простой модели эксперимента в пакете GEANT4

уметь:

строить простейшие математические модели процессов взаимодействия частиц на языке программирования используя теоретические знания, построить простую модель ядерно-физического эксперимента с использованием пакета GEANT4, обработать результаты эксперимента и графически их представить с использованием пакета ROOT, делать правильные выводы из сопоставления результатов расчётов и эксперимента, видеть в прикладных задачах физическое содержание.

владеть:

навыками самостоятельной разработки компьютерных программ, навыком освоения большого количества информации, навыками постановки научно-исследовательских задач в области взаимодействия частиц с веществом, навыками работы в пакетах GEANT4 и ROOT

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение в метод Монте-Карло	1			1
2	Методы моделирования случайных величин с заданным законом распределения	3			3
3	Некоторые типичные задачи моделирования в ядерной физике	3			3
4	Моделирование многочастичных процессов	3			3
5	Основы работы на удаленном сервере с операционной системой Linux	3			3
6	Введение в пакет ROOT	3			3

7	Основы обработки данных и представления результатов в пакете ROOT	3			3
8	Введение в пакет GEANT4	3			3
9	Структура программы классы в GEANT4	3			3
10	Физический модели в GEANT4	3			3
11	Создание простой модели эксперимента в GEANT4	2			2
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. Введение в метод Монте-Карло

Что такое метод Монте-Карло. Прохождение частиц через вещество, взаимодействие адронов и ядер со сложными макроскопическими мишенями. Моделирование ядерных реакций в эксклюзивном и инклюзивном подходе. Пакеты программ применяемые в данной предметной области: FLUKA, GEANT4, MARS, MCNPX, PHITS, SHIELD

2. Методы моделирования случайных величин с заданным законом распределения

Генерация на компьютере случайных величин с заданным законом распределения. Равномерно распределенная случайная величина. Датчики псевдослучайных чисел. Метод обратных функций для непрерывного и дискретного распределений. Табличный метод обратных функций. Методы отбора, эффективность метода отбора, существенная выборка. Моделирование многомерных случайных величин. Метод суперпозиции. Моделирование некоторых важных распределений.

3. Некоторые типичные задачи моделирования в ядерной физике

Изотропное направление в пространстве. Моделирование азимутального угла методом отбора. Преобразование углов рассеяния к исходной лабораторной системе. Облучение сложного объекта космическим излучением. Связь числа испытаний Монте-Карло с реальным временем облучения. Моделирование профиля поперечного сечения пучка ускорителя. Моделирование многократного кулоновского рассеяния и энергетического страгглинга заряженных частиц.

4. Моделирование многочастичных процессов

Необходимые формулы релятивистской кинематики. Фазовый объем системы частиц. Фазовый объем двух частиц. Рекуррентная формула для фазового объема n частиц. Представление фазового объема в переменных (M, \square) . Алгоритм моделирования процесса $a+b \rightarrow 1+2+\dots+n$.

5. Основы работы на удаленном сервере с операционной системой Linux

Соединение с сервером через протокол ssh. Основные команды терминала в Linux. Права доступа. Редакторы кода.

6. Введение в пакет ROOT

Что такое ROOT. Код на языке C++. Основные структуры данных. Деревья. Встроенные генераторы случайных чисел и функции получения случайных величин с различными законами распределения.

7. Основы обработки данных и представления результатов в пакете ROOT

Загрузка данных из файла. Построение и фитирование распределений. Поиск пиков. Статистический анализ.

8. Введение в пакет GEANT4

Что такое GEANT4. Области его применения. Примеры моделирования некоторых экспериментов.

9. Структура программы классы в GEANT4

Структура программы в GEANT4. Этапы моделирования. Основные классы. Описание геометрии эксперимента. Описание источника излучения. Получение информации с детектора. Визуализация моделирования. IDE QtCreator. Управление процессом моделирования через графический интерфейс. Скрипты с командами. Сборка и запуск программы.

10. Физический модели в GEANT4

Наборы физических моделей. Выбор подходящей модели для описания конкретного эксперимента. Создание своего набора физических процессов.

11. Создание простой модели эксперимента в GEANT4

Написание программы для моделирования опыта Резерфорда в GEANT4. Формирование выходных данных. Анализ результатов.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном, доской. Сервер с установленными пакетами GEANT4 и ROOT

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Н.М. Соболевский. Метод Монте Карло в задачах о взаимодействии частиц с веществом. Учебное пособие, ИЯИ РАН, Москва, 2007, ISBN 978-5-94274-027-5, 158 стр.

Дополнительная литература

1. Прохождение частиц высоких энергий через вещество [Текст]/А. Н. Калиновский, Н. В. Мохов, Ю. П. Никитин, -М., Энергоатомиздат, 1985
2. Г.А.Михайлов, А.В.Войтишек. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. - М.: «Академия», 2006.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

<https://root.cern.ch/> <https://geant4.web.cern.ch/>

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

GEANT4, ROOT, Google Meet (при необходимости), демонстрация презентаций.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных взаимодействий и космологии
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Разработчик: О.Б. Щеголев, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Метод Монте-Карло в ядерной физике» обучающийся должен:

знать:

понятия теории вероятностей и математической статистики, используемые в методе Монте-Карло; основные приемы моделирования случайных величин с заданным законом распределения; физические приближения, принятые при моделировании взаимодействия частиц с веществом и ядерных реакций при высоких энергиях; основные структуры данных пакета ROOT, структуру простой модели эксперимента в пакете GEANT4

уметь:

строить простейшие математические модели процессов взаимодействия частиц на языке программирования используя теоретические знания, построить простую модель ядерно-физического эксперимента с использованием пакета GEANT4, обработать результаты эксперимента и графически их представить с использованием пакета ROOT, делать правильные выводы из сопоставления результатов расчётов и эксперимента, видеть в прикладных задачах физическое содержание.

владеть:

навыками самостоятельной разработки компьютерных программ, навыком освоения большого количества информации, навыками постановки научно-исследовательских задач в области взаимодействия частиц с веществом, навыками работы в пакетах GEANT4 и ROOT

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

1. Общее представление о методе Монте-Карло. Статистическое моделирование как основной метод теоретического описания взаимодействия частиц высоких энергий со сложными мишенями. Современные компьютерные программы для моделирования взаимодействия частиц с веществом методом Монте-Карло. Понятие об эксклюзивном и инклюзивном подходах к описанию ядерных реакций.
2. Основные свойства функции распределения непрерывной случайной величины. Математическое ожидание, алгебраические и центральные моменты, связь между ними. Функция вероятности дискретной случайной величины.
3. Характеристическая функция и производящая функция вероятностей. Вычисление моментов дифференцированием на примере нормального распределения и распределения Пуассона.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов

1. Метод обратных функций для непрерывного и дискретного распределений
2. Метод отбора, его эффективность
3. Структура программы в GEANT4
4. Что такое деревья в ROOT
5. Описание источника излучения в GEANT4

Примеры контрольных заданий

1. Написать программу для моделирования прохождения пучка нейтронов через слой парафина методом Монте-Карло
2. Написать программу для моделирования ионизационных потерь мюона при прохождении через слой пластического сцинтиллятора методом Монте-Карло
3. Построить гистограмму по данным с использованием пакета ROOT, на гистограмме отметить ошибки и профитировать подходящей функцией
4. Написать код для задания геометрии эксперимента для моделирования опыта Резерфорда (в методе `DetectorConstruction::Construct`)
5. Написать код для генерации нейтронов от точечного источника по спектру калифорния Cf-252 (в классе `PrimaryGeneratorAction`)

Примеры экзаменационных билетов

Билет 1.

1. Моделирование длины пробега частицы до взаимодействия. Макроскопическое сечение и оптическая толщина. Пробег нейтрона в бесконечной однородной и конечной кусочно-однородной среде.
2. Моделирование изотропного направления в трехмерном пространстве. Моделирование азимутального угла ϕ методом отбора.

Билет 2.

1. Основные методы моделирования случайных величин с заданным законом распределения: метод обратных функций и метод отбора; метод отбора с существенной выборкой.
2. Деревья в ROOT

Билет 3.

1. Статистическая точность оценки математического ожидания средним арифметическим. Вычисление статистических ошибок в расчете Монте-Карло.
2. Описание источника излучения в GEANT4. Классы `G4ParticleGun` и `G4GeneralParticleSource`.

Билет 4.

1. Структура программы в GEANT4.
2. Моделирование профиля пучка частиц согласно распределению Релея.

Билет 5.

1. Описание геометрии детектора в GEANT4
2. Гистограмма. Представление энергетического спектра в переменных энергии и логарифма.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении зачёта и экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.