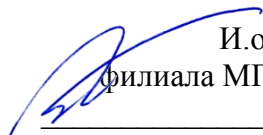


Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
ФИЛИАЛ МГУ В Г. ДУБНЕ

УТВЕРЖДАЮ


И.о. директора
филиала МГУ в г.Дубне
/ Э.Э. Боос /
«01» сентября 2024 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

Прецизионные расчеты в физике высоких энергий

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль)/специализация образовательной программы:

Физика элементарных частиц

Форма обучения:

Очная

Дубна 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению 03.04.02 «Физика», утвержденным приказом МГУ от 30.12.2020 г. № 1366.

Год (годы) приема на обучение _____

Авторы–составители:

1. Доктор физ.-мат. наук Калиновская Лидия Владимировна, профессор физического факультета МГУ по совместительству

Руководитель магистерской программы:

Доктор физ.-мат. наук, профессор академик РАН В.А. Матвеев, заведующий кафедрой физического факультета МГУ

Аннотация к рабочей программе дисциплины

Курс посвящен углубленному изучению принципов релятивистской квантовой теории поля как одной из важнейших составляющих современной квантовой теории; изучению основных понятий релятивистской теории возмущений, используемой в современной физике высоких энергий для прецизионного расчета наблюдаемых процессов взаимодействия элементарных частиц. Рассматривается применение для теоретической поддержки экспериментов на БАК.

Дисциплина реализуется на 1 курсе во 2 семестре и входит в состав вариативной части.

Объем дисциплины составляет 2 з.е., в том числе 34 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 38 академических часа, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Промежуточная аттестация по дисциплине (модулю) – экзамен во 2 семестре.

1. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина «Прецизионные расчеты в физике высоких энергий» входит в состав вариативной части и реализуется на 1 курсе во 2 семестре.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Базовые знания в области общей и теоретической физики в объеме классических университетских курсов

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Компетенции	Результаты обучения
ОПК-4	<p><u>Знать</u> типовые процедуры применения проблемно-ориентированных прикладных программных средств в области современной ядерной физики</p> <p><u>Уметь</u> использовать современные информационные и компьютерные технологии, средства коммуникаций, способствующие повышению эффективности научной деятельности в области современной ядерной физики</p> <p><u>Владеть</u> методами научного моделирования при решении поставленных исследовательских задач с использованием современных информационных технологий</p>
ПК-2	<p><u>Знать</u> современное программное и аппаратное обеспечение информационных и систем, используемых в профильной области научного исследования</p> <p><u>Уметь</u> модернизировать программное и аппаратное обеспечение информационных и автоматизированных систем для решения поставленной научной задачи</p> <p><u>Владеть</u> навыками адаптирования программного и аппаратного обеспечения информационных и автоматизированных систем для решения поставленной научной задачи</p>
МПК-2	<p><u>Знать</u> теоретические основы физики высоких энергий, такие как лагранжиан стандартной модели, регуляризация, нарушения симметрии</p> <p><u>Уметь</u> вычислять характеристики однопетлевых</p>

	процессов в физике высоких энергий <u>Владеть</u> методами расчета характеристик основных характерных процессов физики высоких энергий
--	--

4. Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., в том числе: 34 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 38 академических часов, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Контактная работа включает в себя: занятия лекционного типа и занятия семинарского типа.

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

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (ак.ч.)	В том числе					Самостоятельная работа обучающегося, академические часы	Форма текущего контроля успеваемости, наименование
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) <i>Виды контактной работы, академические часы¹</i>						
		Занятия лекционного типа (лекции)	Занятия семинарского типа			Всего		
Семинары	Лабораторные занятия*		Практические занятия*					
Стандартная модель физики элементарных частиц	13	3	3			6	7	Опрос, проверка домашнего задания
Спинорные методы	14	4	4			8	6	Опрос, проверка домашнего задания
Язык символьных вычислений FORM	13	3	3			6	7	Опрос, проверка домашнего задания
Методы Монте-Карло и партонный ливень	12	3	3			6	6	Опрос, проверка домашнего задания
Генераторы событий	14	4	4			8	6	Опрос, проверка домашнего задания
Промежуточная аттестация							6²	Экзамен

¹Текущий контроль успеваемости может быть реализован в рамках занятий лекционного и(или) семинарского типа.

²Часы на проведение промежуточной аттестации выделяются из часов самостоятельной работы обучающегося

Итого	72	34	38	

*Лабораторные занятия, практические занятия относятся к практической подготовке обучающихся.

Тема 1. Стандартная модель физики элементарных частиц.

Лагранжиан СМ. Связь параметров лагранжиана с экспериментально измеряемыми величинами. Роль наблюдаемых и псевдонаблюдаемых при сопоставлении теории с данными детекторов. Требования к точности расчётов для будущих коллайдеров. Обзор программ, позволяющих получать предсказания в заданном порядке теории возмущений (например, Zfitter, HEPfit, CalcHEP, ...).

Тема 2. Спинорные методы.

Понятие спиноров. Повороты и бусты спиноров. Метод спиральных амплитуд: от следов матриц Дирака к произведению спиноров с фиксированной спиральностью. Расчёт многочастичных процессов без явного суммирования по поляризациям. Получение в системах компьютерной алгебры компактных аналитических выражений, готовых к численному интегрированию.

Тема 3. Язык символьных вычислений FORM.

Знакомство с системой FORM. Преимущества перед универсальными СКА. Синтаксис, работа с шаблонами, автоматизация рутинных алгебраических преобразований, критически важных в многопетлевых вычислениях и ренормгрупповом анализе. Написание эффективных скриптов для упрощения тензорных структур, сокращения следов матриц Дирака. Вывод результатов в формат, совместимый с генераторами событий.

Тема 4. Методы Монте-Карло и партонный ливень.

Алгоритм разыгрывания событий по методу Монте-Карло. Выборка с отклонением. Выборка по значимости. Адаптивные алгоритмы. Процедура получения единичных весов, для корректного статистического анализа и прямого сравнения с данными детекторов. Формула Судакова и вероятности ветвления, как математическая основа эволюции партонного ливня. Методы согласования (matching) и объединения (merging) расчётов точных матричных элементов с партонным ливнем для устранения двойного учёта излучений и обеспечения плавного перехода между жёсткими и мягкими областями фазового пространства.

Тема 5. Генераторы событий.

Различия между генераторами жёстких процессов, такими как CalcHEP и WHIZARD, и программами моделирования адронизации и непертурбативной физики, среди которых особое место занимает Pythia. Знакомство с циклом генерации: от задания калибровочной модели и расчёта дифференциальных сечений до формирования физически наблюдаемых конечных состояний. Работа с генератором Pythia8. Написание простых программ для моделирования процессов, использование настроек и параметров. Методика расчетов сечений и получение событий для жесткого процесса с использованием CalcHEP, WHIZARD (на древесном уровне), ReneSANCe (на петлевом уровне).

6. Фонд оценочных средств для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)

6.1. Типовые задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения:

Типовые вопросы для проведения текущей проверки успеваемости:

1. Чем Стандартная Модель описывается
2. Как оцениваются калибровочные константы взаимодействия для групп симметрии
3. $SU(3), SU(2), U(1)$?
4. Описывает ли Стандартная Модель гравитацию и объясняет ли она темную материю
5. Какая команда в FeynCalc используется для упрощения выражений с матрицами Дирака?
6. Как регуляризуется коллинеарная сингулярность в КЭД?
7. В контексте Монте-Карло генераторов событий, что такое партонный ливень?
8. В программе CalcHEP, что происходит на этапе символьного расчёта матричных элементов?

Типовые вопросы, задания для проведения промежуточной аттестации (экзамена):

Задание 1

Расчёт спиральных амплитуд для процессов $2 \rightarrow 2$ с использованием формализма Вейля-ван-дер-Вардена для определенного процесса.

Список процессов:

- $e^- e^+ \rightarrow \gamma \gamma, e^- e^+ \rightarrow HZ, e^- e^+ \rightarrow Z \gamma, e^- e^+ \rightarrow \mu^- \mu^+, \gamma e^- \rightarrow \gamma e^-, e^- e^+ \rightarrow W+W^-$
- 1) нарисовать все древесные диаграммы Фейнмана для данного процесса;
 - 2) используя правила Фейнмана, приведённые в справочнике, правильно написать выражение для матричного элемента;
 - 3) используя методические материалы, выразить волновые функции внешних частиц через вейлевские спиноры;
 - 4) используя тождества Фирца, вычислить все свёртки по лоренцевским индексам;
 - 5) переписать амплитуду в терминах спинорных произведений, выполнить упрощения, основанные на элементарных свойствах спинорных произведений.

Задание 2.

Вычислить сечение процесса $pp \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$ при $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ и следующими кинематическими ограничениями:

$$|\eta(\mu^-)| < 2.4, |\eta(\mu^+)| < 2.4, 60 \text{ GeV} < M(\mu^+ \mu^-) < 120 \text{ GeV},$$

$$p_T(\mu^-) > 20 \text{ GeV}, p_T(\mu^+) > 20 \text{ GeV}, E(\gamma) > 1 \text{ GeV}.$$

Построить распределение по $M(\mu^+ \mu^-)$ в диапазоне от 60 GeV до 120 GeV.

Повторить вычисления, отключив излучение фотона из начального/конечного состояния.

Сравнить результаты.

Задание 3.

Вычислить сечение процесса $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^- \gamma$ при $\sqrt{s} = 250 \text{ GeV}$ и следующими кинематическими ограничениями:

$$|\cos(\theta^-)| < 0.9, |\cos(\theta^+)| < 0.9, E(\gamma) > 1 \text{ GeV}.$$

Построить распределение по $\cos(\theta^-)$ в диапазоне от -0.9 до 0.9.

Повторить вычисления, отключив диаграммы с Z-бозоном.

Сравнить результаты.

Задание 4.

Вычислить сечение поляризованного процесса $e+e- \rightarrow \mu+\mu- \gamma$ при $\sqrt{s} = 250 \text{ GeV}$ с начальными поляризациями $(+0.5, -0.5)$ и $(-0.5, +0.5)$ и следующим кинематическим ограничением: $E(\gamma) > 1 \text{ GeV}$.

Построить распределение по $\cos(\theta)$ в диапазоне от -1.0 до 1.0 для двух выборов начальных поляризаций и распределение для асимметрии A_{LR} .

Задание 5.

Фитирование гистограмм. Получение минимума χ^2 -квадрата.

Сохранить root-файл у себя в директории.

Написать скрипт, открывающий файл, считывающий из файла древесную структуру `ntuple`. Построить распределения инвариантной массы бозона Хигса и топ кварка.

Определить параметры распределения отфитированной суммой гауссиана и полиномом 3-ой степени.

(M_H, σ_H определяются из распределения инвариантной массы бозона Хигса;

M_t, σ_t определяются из распределения инвариантной массы топ кварка).

Задание 6.

Получить выборку событий. Построить соответствующую гистограмму.

Сохранить root-файл у себя в директории.

Написать скрипт открывающий файл и считывающий из файла древесную структуру `ntuple`.

Построить CutFlow событий после применения каждого CUTа, т.е. построить выборку событий.

Список выборки:

1. наличие 2 лептонов одного знака в событии,
2. наличие 1 τ мезона в событии,
3. наличие более 4 струй в событии,
4. наличие более 1 b -струи в событии,
5. наличие недостающей энергии более 30 ГэВ.

Гистограммы взвесить и отнормировать на заданную светимость. Полученные плотности сохранить в файл.

Задание 7.

Skimming.

Сохранить root-файл у себя в директории.

Написать скрипт, открывающий root-файл, считывающий из root-файл древесную структуру `ntuple`, удалить не используемые ветки деревьев.

К оставшимся применить каты позволяющие сильно сократить размер входного root-файл.

Результат `skimming`-а сохранить в выходном файле.

Сравнить вес входящего и входящегося root-файлов.

Список веток, которые надо сохранить:

1. `passEventCleaning`,
2. `nTaus_OR_Pt25`,

3. pass_SS_2L,
4. pass_tight_2L,
- 5 nJets_OR_T,
6. nJets_OR_T_MV2c10_70,
7. nTaus_OR_Pt25,
- 8.tau_isHadronic_0,
- 9.tau_truthType_0,
10. tau_truthJetFlavour_0.

Список катов, которые надо применить:

- pass_SS_2L == 1,
nTaus_OR_Pt25 ==1,
nJets_OR_T > 0,
tau=isHadronic_0==1,
nJets_OR_T_MV2c10_70>0.

6.2. Шкала и критерии оценивания

Результат освоения дисциплины	Критерии оценивания знаний, умений и навыков			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
Знания	Отсутствие знаний	В целом успешные, но не систематические знания	В целом успешное, но содержащие отдельные пробелы знания	Успешные и систематические знания
Умения	Отсутствие умения применять знания фундаментальных и актуальных проблем.	В целом успешное, но не систематическое умение применять знания	В целом успешное, но содержащие отдельные пробелы умение применять знания	Успешное и систематическое умение применять знания
Навыки	Отсутствие/фрагментарные навыки в решении задач	В целом успешные, но не систематические навыки в решении задач	В целом успешные, но содержащие отдельные пробелы навыки в	Успешные и систематические навыки в решении задач

			решении задач	
--	--	--	------------------	--

7. Ресурсное обеспечение

Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная литература

1. С.М. Биленький, "Введение в диаграммы Фейнмана и физику электрослабого взаимодействия", М. Энергоатомиздат, 1990г.
2. М. Пескин, Д. Шредер, "Введение в квантовую теорию поля", РХД, 2001г.
3. Т. Banks, "Modern Quantum Field Theory: A Concise Introduction", Cambridge, Cambridge University Press, 2008г

Дополнительная литература

1. М. Srednicki, "Quantum Field Theory", Cambridge, Cambridge University Press, 2007г

Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. База данных РИНЦ (российский индекс научного цитирования) <http://www.elibrary.ru>

Описание материально-технической базы: курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски

8. Язык преподавания: русский