

**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:	Эксперименты на коллайдерах
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных взаимодействий и физики элементарных частиц
курс:	1
квалификация:	магистр

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

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Р.Н. Чистов, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальных взаимодействий и физики элементарных частиц
28.03.2025

Аннотация

В курсе рассматриваются конструкция и принцип работы экспериментов CMS, ATLAS, LHCb, ALICE на Большом Адронном Коллайдере (БАК), их особенности в свете заявленных физических целей. Далее, основное внимание уделяется обсуждению полученных результатов на БАК: открытие бозона Хиггса и измерению его параметров, измерение характеристик процессов рождения бозона Хиггса, измерение характеристик процессов с участием $W^{+/-}$ и Z бозонов, поиск частиц и процессов вне рамок Стандартной Модели (суперсимметрия и темная материя), физика тяжелых кварков, физика в ион-ионных и ион-протонных взаимодействиях. На примерах этих результатов показывается логика и методы анализа данных в экспериментах на БАК.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Данный курс знакомит студента с основными результатами экспериментов на Большом Адронном Коллайдере (БАК) CMS, ATLAS, LHCb и ALICE. Также, курс позволяет студенту понять современные экспериментальные методы, лежащие в основе получения этих результатов. Курс создает базу для изучения и анализа последующих результатов на БАК.

Задачи дисциплины

- формирование знаний по постановке экспериментов на Большом адронном коллайдере (БАК);
- формирование знаний по основным результатам, полученным в экспериментах на БАК.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.3 Способен предвидеть результаты (последствия) как личных, так и коллективных действий
	УК-3.4 Способен планировать командную работу, распределять поручения членам команды, организовать обсуждение разных идей и мнений
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	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-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
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
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
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-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	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:

Содержание предмета курса «Эксперименты на коллайдерах», соответствующую терминологию и понятийный аппарат. Знать логику и методы получения основных результатов на БАК.

уметь:

интерпретировать экспериментальные результаты, получаемый на БАК.

владеть:

основными методами измерения характеристик бозонов Хиггса, W^{+-} , Z , поиска частиц темной материи и суперсимметричных частиц, а также восстановления очарованных и прелестных адронов на БАК.

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	Экспериментальные установки на БАК	4	4		6
2	Поиск и исследование свойств бозона Хиггса	6	6		9

3	Исследование процессов с образованием W и Z бозонов на БАК	4	4		6
4	Исследование процессов с образованием топ-кварков	6	6		9
5	Исследование КХД процессов в pp взаимодействиях	2	2		3
6	Поиск темной материи, суперсимметрии	4	4		6
7	Исследование Pb-Pb и Pb-p взаимодействий	2	2		3
8	Исследования по физике тяжелых кварков	2	2		3
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. Экспериментальные установки на БАК

Неделя 1. Конструкция и принцип работы установок CMS и ATLAS. Трековая система установок CMS и ATLAS. Калориметрические системы установок CMS и ATLAS.

Неделя 2. Триггер и система сбора данных CMS. Основные особенности установок LHCb и ALICE.

2. Поиск и исследование свойств бозона Хиггса

Неделя 3. Открытие бозона Хиггса. Зависимость сечения процессов образования бозона Хиггса в pp взаимодействиях от его массы.

Неделя 4. Вероятности распадов бозона Хиггса по различным каналам. Измерение массы и ширины бозона Хиггса.

Неделя 5. Измерение спина и четности бозона Хиггса

3. Исследование процессов с образованием W и Z бозонов на БАК

Неделя 6. Одинокое рождение векторных бозонов.

Неделя 7. Двойное и тройное рождение векторных бозонов.

4. Исследование процессов с образованием топ-кварков

Неделя 8. Процессы с образованием пар топ-кварков.

Неделя 9. Процессы с образованием одинокоего топ-кварка.

Неделя 10. Измерение массы топ-кварка.

5. Исследование КХД процессов в pp взаимодействиях

Неделя 11. Процессы с образованием адронных струй с большими поперечными импульсами.

6. Поиск темной материи, суперсимметрии

Неделя 12. Сигнатуры образования суперсимметричных частиц. Ограничения на параметры суперсимметрии, поставленные в экспериментах БАК.

Неделя 13. Сигнатуры образования частиц темной материи. Ограничения на параметры частиц темной материи, поставленные в экспериментах БАК.

7. Исследование Pb-Pb и Pb-p взаимодействий

Неделя 14. Общие характеристики процессов PbPb столкновений на БАК. Измерение прицельного параметра для PbPb столкновений на БАК. Измерение коллективных параметров для PbPb столкновений на БАК. Образование адронных струй в PbPb столкновениях на БАК. Образование тяжелых кваркониев в PbPb столкновениях на БАК.

8. Исследования по физике тяжелых кварков

Неделя 15. Обзор результатов экспериментов на БАК по изучению очарованных и прелестных адронов. Поиск Новой Физики в распадах тяжелых адронов. Спектроскопия тяжелых адронов: классическая и многокварковая.

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

Для занятий требуется аудитория, оснащенная проектором для показа слайдов с компьютера и экраном.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Статьи с ресурса <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/>
2. Статьи с ресурса <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/WebHome#PhysicsGroups>
3. Статьи с ресурса http://lhcbproject.web.cern.ch/lhcbproject/Publications/LHCbProjectPublic/Summary_all.html
4. Статьи с ресурса <https://alice-publications.web.cern.ch/submitted>

Дополнительная литература

1. Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons, Peter W. Higgs; Phys. Rev. Lett. 13, 508;
2. Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons, F. Englert and R. Brout; Phys. Rev. Lett. 13, 321

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

<http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/>
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/WebHome#PhysicsGroups>
http://lhcbproject.web.cern.ch/lhcbproject/Publications/LHCbProjectPublic/Summary_all.html
<https://alice-publications.web.cern.ch/submitted>
<http://pdg.lbl.gov/> The Review of Particle Physics

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

На лекционных и семинарских занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию 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 дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента в соответствии с данными в рабочей программе. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях;
- при необходимости подготовку к практическим занятиям, экзамену.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору или преподавателю, ведущему практические занятия.

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

ПРИЛОЖЕНИЕ

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 физики элементарных частиц
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен	
Разработчик:	Р.Н. Чистов, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.3 Способен предвидеть результаты (последствия) как личных, так и коллективных действий УК-3.4 Способен планировать командную работу, распределять поручения членам команды, организовать обсуждение разных идей и мнений
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности 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-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
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 ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

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 «Эксперименты на коллайдерах» обучающийся должен:

знать:

Содержание предмета курса «Эксперименты на коллайдерах», соответствующую терминологию и понятийный аппарат. Знать логику и методы получения основных результатов на БАК.

уметь:

интерпретировать экспериментальные результаты, получаемый на БАК.

владеть:

основными методами измерения характеристик бозонов Хиггса, W^{+-} , Z , поиска частиц темной материи и суперсимметричных частиц, а также восстановления очарованных и прелестных адронов на БАК.

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

Примеры заданий контрольной работы:

1. Объясните термин центральность столкновения в ион-ионных столкновениях.
2. Объясните причину подавления выхода $Y(2, 3S)$ по сравнению с выходом $Y(1S)$ в Pb-Pb столкновениях на БАК.
3. Объясните термин pile-up.

Примеры задач из домашнего задания:

1. Объясните причину создания триггеров первого и высшего уровня в эксперименте CMS. Проиллюстрируйте примерами.
2. Какие свойства прелестных адронов используются для подавления фона при их восстановлении.
3. В столкновениях каких партонов рождается пара топ-кварков на БАК и Tevatron.

Темы докладов на семинарах:

1. Открытие бозона Хиггса.
2. Измерение массы топ-кварка.
3. Квенчинг струй в Pb-Pb столкновениях.
4. Поиск Новой Физики в распадах прелестных адронов.
5. Открытие пентакварков в LHCb.

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

Перечень контрольных вопросов:

1. Перечислите известные моды распадов бозона Хиггса. Как они ранжируются по вероятности.
2. Перечислите основные процессы рождения бозона Хиггса, нарисуйте диаграммы. Как эти процессы ранжируются по вероятности.
3. Почему при энергии в с.ц.м. примерно 2 ТэВ сечение рождения пар топ-кварков больше в протон-антипротонных взаимодействиях чем в pp ?
4. Нарисуйте диаграммы рождения одиночного топ-кварка на БАК.
5. Какая основная сигнатура рождения частиц темной материи на БАК.

6. Нарисуйте как может выглядеть event display события с рождением бозона Хиггса по каналу WW-fusion с последующим распадом бозона Хиггса на два фотона (на БАК). Нарисуйте диаграмму распада бозона Хиггса на два фотона.
7. Опишите на качественном уровне критерии отбора событий рождения пары топ кварков с последующим их распадом по лептонному каналу (на БАК).
8. Оцените минимальную энергию сталкивающихся протонов, необходимую для рождения пары топ-кварков на БАК.
9. Опишите качественно основные критерии отбора событий с рождением прелестных адронов на БАК.
10. Опишите метод измерения массы топ-кварка на БАК.

Примеры билетов:

Билет 1.

1. Конструкция и принцип работы установок CMS и ATLAS. Трековая система установок CMS и ATLAS.
2. Исследование КХД процессов в pp взаимодействиях. Процессы с образованием адронных струй с большими поперечными импульсами.

Билет 2.

1. Калориметрические системы установок CMS и ATLAS. Триггер и система сбора данных CMS.
2. Поиск темной материи, суперсимметрии и других явлений вне СМ. Сигнатуры образования суперсимметричных частиц. Ограничения на параметры суперсимметрии, поставленные в экспериментах БАК.

Критерии оценивания

- 10 полный ответ на экзаменационный билет и дополнительные вопросы
- 9 полный ответ на экзаменационный билет и дополнительные вопросы, возможны затруднения в ответе на дополнительные вопросы, самостоятельно устраняемые студентом
- 8 полный ответ на экзаменационный билет и дополнительные вопросы, возможны затруднения в ответе на дополнительные вопросы
- 7 возможны затруднения в ответе на вопросы экзаменационного билета, устраняемые после подсказки преподавателя
- 6 возможны затруднения в ответе на вопросы экзаменационного билета, устраняемые после нескольких подсказок преподавателя
- 5 затруднения в ответе на вопросы экзаменационного билета, устраняемые только с серьезной помощью преподавателя
- 4 затруднения в ответе на вопросы экзаменационного билета, устраняемые только с серьезной помощью преподавателя; неспособность ответить на дополнительный вопрос по другой теме
- 3 неспособность ответить на вопросы билета, однако ответ на дополнительные вопросы из списка экзаменационных
- 2 неспособность ответить на вопросы билета и на дополнительные вопросы из списка экзаменационных
- 1 неспособность ответить на вопросы билета и на любой дополнительный вопросы из списка экзаменационных

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

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 1 час времени на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также любой литературой и вычислительной техникой.