

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

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
природоподобных, плазменных и
ядерных технологий им. И.В.**

Курчатова

Т.Е. Григорьев

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине:	Физика за пределами Стандартной Модели
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра теоретической астрофизики и квантовой теории поля
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: Ю.М. Зиновьев, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры теоретической астрофизики и квантовой теории поля 21.02.2025

Аннотация

В рамках курса излагаются основные подходы к расширению стандартной модели, их особенности и проблемы, возможные феноменологические проявления. Будут изучены основы теории представлений групп Ли, в частности групп Лоренца и Пуанкаре, а также методы определения уравнения движения для заданного лагранжиана, исследованы свойства симметрии полученных решений. Студенты научатся анализировать спектр и взаимодействия моделей новой физики, их наиболее важные отличия от Стандартной модели, возможные ограничения на характерные параметры.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- дать представление об основных направлениях возможного развития физики элементарных частиц за пределы стандартной модели.

Задачи дисциплины

- основные подходы к расширению стандартной модели, их особенности и проблемы, возможные феноменологические проявления.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
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-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	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-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-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений

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-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	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:

- основы теории представлений групп Ли, в частности групп Лоренца и Пуанкаре;
- основы стандартной модели.

уметь:

- работать с неприводимыми представлениями групп (произведение, разложение на неприводимые);
- определять уравнения движения для заданного лагранжиана и исследовать свойства симметрии.

владеть:

- методами построения конечномерных представлений алгебры;
- техникой работы со спинорными обозначениями.

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	Стандартная модель	5	5		7
2	Лево-право симметричные модели	5	5		7
3	Теории великого объединения	5	5		8
4	Глобальные суперсимметрии	5	5		8
5	Локальные суперсимметрии	5	5		7
6	Высшие размерности	5	5		8
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. Стандартная модель

Классификация адронов (цвет, изоспин, гиперзаряд, кварковая модель). Теории Янга-Миллса. Треугольные аномалии и их отсутствие в СМ. Спонтанное нарушение калибровочной симметрии.

Вопросы к стандартной модели.

2. Лево-право симметричные модели

Зеркальные фермионы. Простейшая лево-право симметричная модель. Модель Пати-Салама (лептоны как четвертый цвет).

3. Теории великого объединения

Модель SU(5). Модель SO(10).

4. Глобальные суперсимметрии

Понятие супермультиплетов. Примеры суперсимметричных моделей. Спонтанное нарушение суперсимметрии. Минимальная суперсимметричная стандартная модель. Мягко нарушающие суперсимметрию члены.

5. Локальные суперсимметрии

Безмассовая частица со спином 2 и гравитация. Безмассовая частица со спином 3/2 и супергравитация. Спонтанное нарушение локальной суперсимметрии и генерация мягко нарушающих членов. Попытка построения суперединых теорий в рамках расширенных супергравитаций.

6. Высшие размерности

Размерная редукция. Спонтанная компактификация. Калибровочные симметрии из геометрии. Многомерные супергравитации. Гравитация на ускорителе? Жизнь на "бране".

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

Учебная аудитория, оснащенная доской, мультимедиапроектором и экраном.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Введение в квантовую теорию поля [Текст] : [учебник для вузов] / М. Пескин, Д. Шредер ; пер. с англ. под ред. А.А. Белафина, А. В. Беркова .— М. ; Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001 .— 784 с.
 2. Калибровочные теории в физике элементарных частиц [Текст] = Gauge theory of elementary particle physics/Та-пей Ченг, Линг-фонг Ли , -М., Мир, 1987
 3. Стандартная модель и ее расширения [Текст]/В. М. Емельянов, -М., Физматлит, 2007
- Фонд литературы кафедры
4. Вилчек Ф., Космическая асимметрия между материей и антиматерией, пер. с англ., "УФН", 1982, т. 136, с. 149
 5. Долгов А.Д., Зельдович Я.Б., Сажин М.В. Космология ранней Вселенной. М.: Изд-во МГУ, 1988

Дополнительная литература

1. Введение в теорию ранней Вселенной : Теория горячего Большого взрыва [Текст]/Д. С. Горбунов, В. А. Рубаков , -М., ЛЕНАНД, 2016
Фонд литературы кафедры

2. С. Вайнберг, Первые три минуты. Basic Books, Inc. Publisher, New York, перевод «Регулярная и хаотическая динамика», 2000

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

Не используются

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

Система электронного обучения iMOODLE

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:

- 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 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 к преподавателю.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра теоретической астрофизики и квантовой теории поля
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен	
Разработчик:	Ю.М. Зиновьев, д-р физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
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-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	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-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-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
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-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	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 «Физика за пределами Стандартной Модели» обучающийся должен:

знать:

- основы теории представлений групп Ли, в частности групп Лоренца и Пуанкаре;
- основы стандартной модели.

уметь:

- работать с неприводимыми представлениями групп (произведение, разложение на неприводимые);
- определять уравнения движения для заданного лагранжиана и исследовать свойства симметрии.

владеть:

- методами построения конечномерных представлений алгебры;
- техникой работы со спинорными обозначениями.

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

Не предусмотрено.

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

Перечень типовых контрольных заданий

1. Разложение октета и декуплета по изоспину и гиперзаряду
2. Спонтанное нарушение симметрии в простейшей лево-право симметричной модели
3. Разложение квинтета и декуплета $SU(5)$
4. Спонтанное нарушение симметрии в модели $SU(5)$
5. Модель Весса-Зумино
6. Суперсимметричная электродинамика
7. Юкавские взаимодействия в МССМ
8. Калибровочная инвариантность безмассового спина 2
9. Калибровочная инвариантность безмассового спина $3/2$

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Классификация адронов (цвет, изоспин, гиперзаряд, кварковая модель). Теории Янга-Миллса.
2. Теория великого объединения. Модель $SU(5)$.

Билет 2.

1. Зеркальные фермионы. Простейшая лево-право симметричная модель.
2. Теория великого объединения. Модель $SO(10)$.

Критерии оценивания

Обучающемуся ставится оценка в соответствии с продемонстрированным уровнем подготовки; оценивание производится на усмотрения экзаменатора в соответствии с особенностями дисциплины и следующими критериями:

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 недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо 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 твёрдо 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

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа.

1. Составить таблицы Кэли для групп симметрий квадрата D_4 и звезды D_5
2. Пользуясь таблицей Кэли для группы D_3 построить явное соответствие между элементами группы симметрий правильного треугольника и группой перестановок трех элементов
3. Вычислить классы сопряженности групп симметрий правильных треугольника, квадрата и звезды
4. Рассматривается группа перестановок и смежные классы в ней. Демонстрируется, что набор смежных классов в группе перестановок параметризуется диаграммами Юнга. Доказывается теорема Кэли о конечных группах.
5. Доказать, что соседние элементарные транспозиции σ_i и σ_{i+1} удовлетворяют соотношениям группы кос.
6. Доказать, что набор из двух элементов - первой транспозиции $\sigma_1 = (1, 2)$ и самого длинного цикла $(1, 2, \dots, n)$ являются образующими всей группы S_n .
7. Построить диаграммы Юнга, соответствующие классам сопряженности в группе S_4 и вычислить их размерности. Сложив эти размерности убедиться, что сумма совпадает с порядком группы S_4 равным 24. Выразить все элементы из разных классов сопряженности группы S_4 через элементарные транспозиции.
8. Построить матричную реализацию образующих группы перестановок S_3 . Проверить соотношение группы кос непосредственно на матрицах, реализующих это представление.
9. Рассматриваются матричные группы. Для любой матрицы A доказывается формула

$$\det(e^A) = e^{\text{tr}(A)}$$
10. Вводится понятие матричного представления группы. Рассматриваются точные, неточные и эквивалентные представления. Вводится понятие характера представления. Формулируется и доказывается Лемма Шура о неприводимости матричного представления.
11. Доказать, что дробно-линейные преобразования

$$z \rightarrow z' = \frac{az+b}{cz+d},$$
 где $ad - bc \neq 0$, образуют группу $GL(2)$ и преобразование $z \rightarrow z'$ соответствует элементу

$$g = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in GL(2)$$
12. Построить таблицу характеров для группы поворотов правильного квадрата C_4
13. Построить таблицу характеров для неабелевой группы симметрий правильного треугольника $D_3 \cong S_3$ и убедиться, что каждое неприводимое m -мерное представление конечной группы входит в регулярное представление ровно m раз.

14. Вводится понятие алгебры Ли как касательного пространства к группе в единице. Определяются векторные поля на многообразиях и экспонента векторного поля. Определяются структурные константы группы Ли.

15. Доказать формулу

$$\exp(\mathbf{i}\phi) = I \cos \phi + \mathbf{i} \sin \phi$$

где матрицы I и \mathbf{i} заданы формулами

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{i} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

16. Доказать, что касательное пространство к специальной линейной группе $SL(n)$ в единице совпадает с пространством матриц с нулевым следом.

17. Вывести тождество Якоби для структурных констант алгебры Ли из условия ассоциативности группового умножения.

18. Построить присоединенное представление алгебры $su(2)$. Вычислить значения формы Киллинга на базисных элементах алгебры $su(2)$.

19. Построить конечномерное n -мерное представление алгебры $sl(2)$ заданной коммутационными соотношениями

$$[h, e] = 2e, \quad [h, f] = -2f, \quad [e, f] = h$$