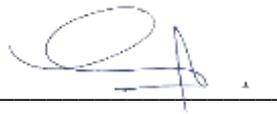


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова в городе
Сарове

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор филиала МГУ в г.Сарове
Член-корреспондент РАН В.В. Воеводин

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Наименование дисциплины:

Теория фундаментальных взаимодействий. Ч.1

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Теоретическая физика

Квалификация «Магистр»

Форма обучения: Очная

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 «Физика».

Член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., профессор Э.Э Боос, и.о. директора НИИЯФ МГУ,
зав. отделом ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ,
Д.ф.-м.н., профессор А. В. Борисов, заведующий кафедрой теоретической физики
физического факультета МГУ

1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО:

Дисциплина «Теория фундаментальных взаимодействий Ч.1» реализуется во 2-ом семестре 1-го курса магистратуры и является частью общенаучного блока обязательной части. Курс тесно связан с читаемым в 1-ом семестре курсом «Теория групп и элементарные частицы», с читаемым параллельно курсом «Квантовая теория поля», а также с читаемым 3-ом семестре курсом «Теория фундаментальных взаимодействий Ч.2»

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

Освоение следующих дисциплин: «Теория поля», «Квантовая теория поля», «Физика элементарных частиц».

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю):

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
<ul style="list-style-type: none">Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области теоретической физики в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1).	<p>ЗНАТЬ основные законы и направления современных научных исследований в области теоретической физики.</p> <p>УМЕТЬ на основе фундаментальных знаний в области теоретической физики, определять возможные направления научных исследований.</p> <p>ВЛАДЕТЬ необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования области теоретической физики.</p>
<ul style="list-style-type: none">Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области теоретической физики и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2).	<p>ЗНАТЬ базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном научном оборудовании.</p> <p>УМЕТЬ используя знания в области теоретической физики проводить научные исследования.</p> <p>ВЛАДЕТЬ навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.</p>

<ul style="list-style-type: none"> Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области теоретической физики (СПК-3). 	<p>ЗНАТЬ основные направления инновационного развития в области теоретической физики.</p> <p>УМЕТЬ проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области теоретической физики для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.</p> <p>ВЛАДЕТЬ методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области теоретической физики.</p>
---	--

4. Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е.

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

5.1. Структура дисциплины (модуля) по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий (в строгом соответствии с учебным планом)

** Примеры форм текущего контроля успеваемости:*

опрос;

тестирование;

контрольная работа;

коллоквиум;

реферат и и.д.

5.2. Содержание разделов (тем) дисциплины

Наименование разделов и тем дисциплины (модуля),	Номинальные трудозатраты обучающегося		академические часы	контр. работы	успеваемости	*
	Контактная работа (работа во взаимодействии с	Самостоятельная работа				

Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	преподавателем) Виды контактной работы, академические часы		обучающегося, академические часы		
	Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа			
Тема 1. Физика элементарных частиц и современная научная картина мира.	2	2	4	8	Собеседование, опрос
Тема 2. Калибровочная инвариантность и неабелевы калибровочные теории.	2	2	4	8	Собеседование, опрос
Тема 3. Лагранжиан СМ до спонтанного нарушения симметрии.	2	2	4	8	Собеседование, опрос
Тема 4. Спонтанное нарушение симметрии в СМ.	2	2	4	8	Собеседование, опрос
Тема 5. Аналитическое вычисление сечений рассеяния процессов с участием элементарных частиц.	2	2	4	8	Собеседование, опрос
Тема 6. Феноменология бозона Хиггса и проблемы натуральности и иерархии в Стандартной модели.	2	2	4	8	Собеседование, опрос
Тема 7. Феноменология топ-кварка.	2	2	4	8	Собеседование, опрос
Тема 8. Проблемы СМ и основные варианты ее обобщения.	4	4	6	14	Собеседование, опрос
Другие виды самостоятельной работы (при наличии):					
<i>Например,</i>					
<i>Курсовая работа</i>					
<i>Творческая работа (эссе)</i>					
...					
Промежуточная аттестация (зачет(ы) и			4	4	Экзамен в форме

(или) экзамен(ы))					письменной работы с последующим собеседованием
Итого	17	17	38	72	—

№ п/п	Наименование разделов (тем) дисциплины	Содержание разделов (тем) дисциплин
1.	Тема 1. Физика элементарных частиц и современная научная картина мира.	Современная физическая картина мира и характерные масштабы энергий, расстояний и времен. Естественная система единиц и соотношения между единицами измерения энергии и расстояния. Введение в коллайдерную физику: понятие о сечении рассеяния процесса, интегральная и дифференциальная светимость коллайдера, рабочий год. Современные коллайдеры и характерные масштабы расстояний, достижимые на них. Проекты коллайдеров ближайшего будущего. Поля Стандартной модели (СМ), их квантовые числа и группировка в мультиплеты по представлениям калибровочной группы СМ.
2.	Тема 2. Калибровочная инвариантность и неабелевы калибровочные теории.	Калибровочная инвариантность в классической электродинамике, квантовой механике и теории поля. Абелевы калибровочные теории поля. Гиперзаряд. Электродинамика как абелева калибровочная теория. Неабелевы калибровочные теории поля и построение калибровочно-инвариантных лагранжианов. Стандартная модель как неабелева калибровочная теория с группой калибровочной симметрии $U(1) \times SU(2) \times SU(3)_C$.
3.	Тема 3. Лагранжиан СМ до спонтанного нарушения симметрии.	Калибровочная инвариантность и другие базовые требования к лагранжиану СМ. Сокращение аномалий в СМ и ограничения на заряды и гиперзаряды частиц СМ. Бозонный сектор СМ до спонтанного нарушения симметрии: поля W^+ и W^- . Смешивание полей W_3 и B . Угол Вайнберга. Поля фотона и Z -бозона. Открытие Z -бозона на коллайдере SPS. Фермионный сектор СМ до спонтанного нарушения симметрии и с одним поколением фермионов. Слабый гиперзаряд фермионов. Ковариантная производная Стандартной модели и взаимодействие калибровочных бозонов СМ с фермионами. Заряженные и нейтральные токи. Открытие нейтральных токов, как триумф Стандартной модели. Достоинства и недостатки лагранжиана, полученного из требования калибровочной инвариантности.
4.	Тема 4. Спонтанное нарушение симметрии в СМ.	Понятие спонтанного нарушения симметрии. Спонтанное нарушение дискретных и непрерывных глобальных симметрий в теории поля. Теорема Голдстоуна о возникновении безмассовых, безспиновых бозонов Намбу-Голдстоуна при спонтанном нарушении глобальной симметрии в теории поля. Спонтанное нарушение калибровочной симметрии на примере абелевой модели Хиггса. Явление Хиггса. Спонтанное нарушение калибровочной симметрии и возникновение бозона Хиггса в Стандартной Модели. Квантовые числа хиггсовского бозона в СМ. Механизм ВЕН для калибровочных бозонов. Массы калибровочных бозонов. Перераспределение степеней свободы. Унитарная и ковариантная калибровки. Оценка величины вакуумного среднего поля Хиггса из низкоэнергетических экспериментов. ВЕН-механизм и массы фермионов. Смешивание в

		кварковом секторе в случае двух поколений фермионов, угол Кабибо. Матрица смешивания для трех поколений фермионов (СКМ-матрица). Унитарность СКМ матрицы. Параметры СКМ-матрицы для произвольного числа фермионных поколений. Наиболее употребительные варианты параметризации СКМ-матрицы. Порядок величины элементов матрицы СКМ. Отсутствие в СМ на древесном уровне нейтральных токов, изменяющих аромат. Смешивание в лептонном секторе. Матрица Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты (PMNS-матрица) и ее свойства.
5.	Тема 5. Аналитическое вычисление сечений рассеяния процессов с участием элементарных частиц.	Теория возмущений по константе связи в теории поля. Пропагаторы полей СМ. Формула для эффективных вершин теории. Правила Фейнмана для сопоставления графическим диаграммам процессов рассеяния аналитических выражений на примере КЭД. Примеры вычисления эффективных вершин теории: вершина КЭД, вершины самодействия хиггсовского бозона, трехглюонная вершина КХД. Понятие сечения рассеяния процессов с элементарными частицами. Понятие ширины распада и времени жизни частицы. Формула ширины процессов распада $1 \rightarrow 2$. Процессы $2 \rightarrow 2$, Двухчастичный фазовый объём. Формула дифференциального сечения рассеяния процессов $2 \rightarrow 2$.
6.	Тема 6. Феноменология бозона Хиггса и проблемы натуральности и иерархии в Стандартной модели.	Поиски хиггсовского бозона на коллайдерах Tevatron и LEP2. Основные процессы рождения бозона Хиггса на коллайдере Tevatron. Основные моды распада бозона Хиггса на коллайдере Tevatron. Основные процессы рождения бозона Хиггса на коллайдере LEP2. Основные моды распада бозона Хиггса на коллайдере LEP2. Поиск хиггсовского бозона и открытие нейтральной безспиновой частицы на коллайдере LHC. Основные процессы рождения бозона Хиггса на коллайдере LHC. Основные моды распада бозона Хиггса на коллайдере LHC. Выражения для ширин распада бозона Хиггса два фермиона и на два W-бозона. Брейчинги распада W-бозона. Ширина бозона Хиггса Стандартной модели как функция его массы. Поправки к массе бозона Хиггса. Проблема иерархий и проблема "малых иерархий". Проблема натуральности в формулировке т'Хоофта. Унитарность и электрослабая теорема эквивалентности. Поведение продольных компонент массивных калибровочных бозонов в процессах рассеяния при высоких энергиях. "No-lose" теорема и открытие бозона Хиггса.
7.	Тема 7. Феноменология топ-кварка.	Особенности феноменологии топ-кварка: масса, ширина, время жизни, отсутствие адронизации, параметры матрицы СКМ. Открытие топ-кварка на коллайдере Tevatron. Основные процессы одиночного и парного рождения топ-кварка на коллайдере Tevatron. Основные моды распада топ-кварка на коллайдере Tevatron. Основные моды одиночного и парного рождения топ-кварка на коллайдере LHC. Основные моды распада топ-кварка на коллайдере LHC. Аналитическое вычисление полной ширины распада топ-кварка.

8	Тема 8. Проблемы СМ и основные варианты ее обобщения.	Основные проблемы Стандартной модели и фундаментальные вопросы, на которые Стандартная модель не дает ответа. Экспериментальные факты, которые невозможно объяснить в рамках Стандартной модели. Основные теоретические направления выхода за рамки Стандартной модели: дополнительные измерения пространства-времени, суперсимметрия, GUT, составные модели, эффективные теории поля, «simplified models».
---	---	---

6. Фонд оценочных средств (ФОС, оценочные и методические материалы) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

6.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости, критерии и шкалы оценивания (в отсутствие утвержденных соответствующих локальных нормативных актов на факультете)

Задачи для текущего контроля успеваемости публикуются на сайте:

<https://www-hep.sinp.msu.ru/hep/>

- 1) Нарисовать диаграммы Фейнмана основных процессов рождения бозона Хиггса на коллайдере LHC.
- 2) Нарисовать диаграммы Фейнмана доминирующих распадов бозона Хиггса на коллайдере LHC.
- 3) Показать, что в СМ гиперзаряд хиггсовского дублета должен быть с точностью до знака равен гиперзаряду лептонного дублета.
- 4) Получите выражение для трехглюонной вершины в КХД, используя формулу для получения вершин в квантовой теории поля с помощью производящего функционала Γ для одночастично-неприводимых функций Грина.
- 5) Аналогично предыдущему пункту получите выражение для вершин КЭД и теории φ^4 .
- 6) Пример комплексного контрольного задания (КЗ) по данному курсу:

Используя материалы лекций, вывести аналитическое выражение для ширины распада бозона Хиггса в два фермиона. Найти в научной литературе выражения для аналогичных процессов, сравнить с полученным результатом и объяснить различия.

Аналогичные КЗ с использованием различных процессов выдаются каждому обучающемуся из расчета одно комплексное КЗ на семестр. Как правило, используются процессы $1 \rightarrow 2$ или $2 \rightarrow 2$ (например, хиггсштралунг) в древесном приближении, описываемые одним матричным элементом, чтобы избежать интерференционных эффектов, усложняющих процесс аналитических вычислений.

6.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), критерии и шкалы оценивания (в отсутствие утвержденных соответствующих локальных нормативных актов на факультете)

Вопросы к экзамену публикуются на сайте:

<https://www-hep.sinp.msu.ru/hep/>

Примеры:

- 1) Дайте определение спонтанного нарушения симметрии. К чему приводит спонтанное нарушение дискретных и непрерывных глобальных симметрий в теории поля? Сформулируйте и докажите теорему Голдстоуна. Что такое явление Хиггса? Какие калибровочные симметрии СМ спонтанно нарушены?
- 2) Какова калибровочная группа СМ? В какие представления калибровочной группы СМ помещают поля СМ? Перечислите поля СМ с указанием их квантовых чисел и соответствующие представления. Запишите ковариантную производную СМ.
- 3) Выпишите лагранжиан хиггсовского сектора СМ. Какова роль бозона Хиггса в СМ? Назовите основные процессы рождения и основные моды распада бозона Хиггса на коллайдере LHC. В каких модах был обнаружен бозон Хиггса на коллайдере LHC?
- 4) В чем состоят особенности феноменологии t-кварка, по сравнению с остальными кварками? Каковы основные моды одиночного и парного рождения t-кварка на коллайдере LHC? Назовите основные моды распада t-кварка на коллайдере LHC. Выпишите выражение для полной ширины распада t-кварка.
- 5) Перечислите основные проблемы Стандартной модели. Какие экспериментальные факты невозможно объяснить в рамках Стандартной модели? На какие фундаментальные вопросы Стандартная модель не дает ответа? Назовите основные теоретические направления выхода за рамки Стандартной модели.

7. Ресурсное обеспечение:

7.1. Перечень основной и дополнительной литературы

Основная литература.

1. М. Пескин, Д. Шредер «Введение в квантовую теорию поля», Ижевск, РХД, 2001 (пер. с английского)
2. W. N. Cottingham and D. A. Greenwood «An Introduction to the Standard Model of Particle Physics», Cambridge University Press, 2001
3. Г. Кейн «Современная физика элементарных частиц», Москва, Мир, 1990 (пер. с английского)
4. Е. Бюклинг, К. Каянти «Кинематика элементарных частиц», Москва, Мир, 1975 (пер. с английского)
5. E. Boos «Quantum Field Theory and the Electroweak Standard Model», CERN, 2015, doi:10.5170/CERN-2015-004.1, arXiv:1608.02382 [hep-ph]

Дополнительная литература.

1. E. Boos «Standard Model and predictions for the Higgs boson» Phys. Usp. **57**, №.9, P. 912-923 (2014) doi:10.3367/UFNe.0184.201409h
2. E. Boos, O. Brandt, D. Denisov, S. Denisov and P. Grannis «The top quark (20 years after its discovery) », Phys. Usp. **58**, №.12, P. 1133-1158 (2015) doi:10.3367/UFNe.0185.201512a.1241
3. С. Вайнберг «Проблема космологической постоянной» УФН, Т. 58, Вып. 4, 1989 (пер. с английского)

Перечень лицензионного программного обеспечения, в том числе отечественного производства
При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

1. Программный продукт Red Hat Enterprise Linux Server for HPC Compute Node for Power, LE, Self-support 4 шт. №5540331
2. Программный продукт Red Hat Enterprise Linux Server for HPC Head Node for Power, LE, Standard 1 шт. №5540332

3. Операционная система SUSE Linux Enterprise Server 11 SP4 for x86_64 16 шт.
4. Операционная система Red Hat Enterprise Linux Server 5.0 for x86_64 14шт.
5. Операционная система SUSE Linux Enterprise Server 10 SP3 for ppc64 7 шт.
6. Операционная система Ubuntu 18.04.
7. Программное обеспечение для виртуализации Oracle VM VirtualBox
8. Операционная система ALTLinuxMATEStarterkit 9 лицензияGPL
9. Программный продукт JetBrains IntelliJ IDEA Community Edition Free Educational Licenses
10. Программный продукт JetBrainsPyCharm Community Edition Free Educational Licenses
11. Программный продукт JetBrainsCLion Community Edition Free Educational Licenses
12. Программный продукт UPPAAL (<http://www.uppaal.org/>) академическая лицензия
13. Программный продукт Java 8 (64-bit)Oracle Corporation
14. Программный продукт Java SE Development Kit 8(64-bit) Oracle Corporation
15. Программный продукт NetBeans IDE 8.2 NetBeans.org
16. Программный продукт Dev-C++ Bloodshed Software
17. Программный продуктCodeBlocksThe Code::Blocks Team
18. Программный продукт Free Pascal 3.0.0Free Pascal Team
19. Программный продукт Python 3.5.1 (64-bit)Python Software Foundation
20. Программный продукт R for Windows 3.2.2 R Core Team
21. Программный продуктHaskell Platform 7.10.3 Haskell.org
22. Операционная система Microsoft Windows 7 корпоративная академическая лицензия
23. Операционная система Microsoft Windows 10 Educationакадемическая лицензия
24. Программный продукт Microsoft ProjectProfessional 2013 академическая лицензия
25. Программный продукт Microsoft VisioProfessional 2013 академическая лицензия
26. Программный продуктMicrosoft VisualStudioProfessional 2013 - RUS [Русский (Россия)] академическая лицензия

Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. <http://www.edu.ru> – портал Министерства образования и науки РФ
2. <http://www.ict.edu.ru> – система федеральных образовательных порталов «ИКТ в образовании»

3. <http://www.openet.ru> - Российский портал открытого образования
4. <http://www.mon.gov.ru> - Министерство образования и науки Российской Федерации
5. <http://www.fasi.gov.ru> - Федеральное агентство по науке и инновациям

7.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

1. <https://theory.sinp.msu.ru/doku.php/comphep/start> страница проекта «CompHEP» на сайте ОТФВЭ НИИЯФ МГУ.
2. <http://nuclphys.sinp.msu.ru> сайт НИИЯФ МГУ «Ядерная физика в интернете».
3. <http://pdg.lbl.gov> сайт международной коллаборации «Particle Data Group»
4. <https://www-hep.sinp.msu.ru/hep/> Сайт отдела ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ, где публикуются задачи и вопросы к экзамену по данному курсу
5. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/conf/cern/> Материалы летних школ «CERN»

7.3. Описание материально-технического обеспечения.

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

8. Соответствие результатов обучения по данному элементу ОПОП результатам освоения ОПОП указано в Общей характеристике ОПОП.