

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:  
Декан физического факультета  
С.Н. Филимонов

Рабочая программа дисциплины

**Теория элементарных частиц**

по направлению подготовки

**03.04.02 Физика**

Направленность (профиль) подготовки:  
**«Фундаментальная и прикладная физика»**

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация  
**Магистр**

Год приема  
**2025**

СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ОП  
О.Н. Чайковская

Председатель УМК  
О.М. Сюсина

Томск – 2025

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

– ИПК-1.1 – Знает основные стратегии исследований в выбранной области физики, критерии эффективности, ограничения применимости.

– ИПК-1.2 – Умеет выделять и систематизировать основные цели исследований в выбранной области физики, извлекать информацию из различных источников, включая периодическую печать и электронные коммуникации, представлять её в понятном виде и эффективно использовать.

– ИПК-1.3 – Владеет навыками аналитической переработки информации, проведения исследований с помощью современной аппаратуры и информационных технологий, обобщения и представления результатов, полученных в процессе решения задач исследования.

## **2. Задачи освоения дисциплины**

– Освоить понятийный аппарат и методы теории элементарных частиц.

– Научиться применять понятийный аппарат и методы теории элементарных частиц для решения практических задач профессиональной деятельности.

## **3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений.

## **4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине**

Семестр 2, зачет с оценкой.

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для изучения и понимания материала данной дисциплины обучающийся должен владеть основными понятиями и методами квантовой механики, квантовой теории поля, методами математического анализа, математической физики, линейной алгебры и теории групп.

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины (модуля)**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 часов, из которых:

– лекции: 16 ч.;

– практические занятия: 16 часов.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## **8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам**

Тема 1. Введение. Кинематика элементарных частиц. Основные понятия. Распады, сечения, распределения. Вывод формул для времени жизни частицы и дифференциального сечения рассеяния двух частиц. Методы вычислений интегралов по фазовому объему. Эксклюзивные и инклюзивные процессы. Решение задач.

Тема 2. Кварковая модель. Составные модели адронов. Квантовые числа адронов. Вывод формул для магнитных моментов барионов. Решение задач.

Тема 3. Теоретические и экспериментальные предпосылки возникновения КХД. Получение формул для ширины распада нейтрального пиона в пару фотонов и для отношений сечений электрон-позитронной аннигиляции в кварки и лептоны.

Тема 4. Лагранжиан КХД. Цветная симметрия КХД. Калибровочные схемы в КХД. Правила Фейнмана. Вывод формул для пропагатора глюона в различных калибровках.

Тема 5. Киральная симметрия. Аномалии и структура вакуума КХД. Голдстоуновский механизм нарушения киральной симметрии в КХД.

Тема 6. Симметрия Изгура-Вайзе в секторе тяжелых кварков. Эффективная теория тяжелых кварков. Форм-факторы полуплептонных распадов тяжелых мезонов и барионов с изменением аромата тяжелых кварков. Решение задач.

Тема 7. Перенормировка КХД в одной петле. Размерная регуляризация. Асимптотическая свобода и ренормгруппа. Бегущие константа связи КХД и массы кварков. Решение задач.

Тема 8. Фундаментальные процессы в пертурбативной КХД. Коллинеарные и мягко-импульсные расходимости в КХД. Инфракрасная стабильность в КХД. Глубоко-неупругое рассеяние в КХД. Электрон-позитронное рассеяние в адроны. Процессы Дрелла-Яна. Полуинклюзивные процессы глубоко-неупругого рассеяния в КХД. Функции распределения кварков и глюонов в адронах. Решение задач.

Тема 9. Феноменология слабых взаимодействий. Основы модели Вайнберга-Салама (единой модели электрослабых взаимодействий). Матрица смешивания кварков Кабиббо-Кобаяси-Маскава. Механизм Хиггса (спонтанное нарушение симметрии электрослабых взаимодействий). Распады бозона Хиггса. Решение задач.

Тема 10. SU(5) модель великого объединения. Бегущая константа взаимодействия. Нарушение барионного, лептонного числа и лептонного аромата. Механизм Хиггса. Распад протона.

Тема 11. Физика нейтрино. Дираковское и Майорановское нейтрино. Двойной бета-распад. Осцилляции нейтрино. Матрица смешивания нейтрино Понтекорво-Маки-Накагава-Саката. Решение задач.

Тема 12. Основные идеи построения лагранжианов и гамильтонианов эффективных теорий. Правила степенного счета. Устранение расходимостей. Связь с КХД.

Тема 13. Киральная пертурбативная теория (КПТ). Лагранжиан КПТ (линейная и нелинейная реализация). Явное и спонтанное нарушение киральной симметрии, массовый член, кварковый конденсат. Производящий функционал КХД. Перенормировка в КПТ (контр-члены и низкоэнергетические константы).

Тема 14. КХД в пределе большого количества цветов. Лагранжиан и инвариантные матричные элементы. Скейлинг констант связи и масс адронов.

Тема 15. Нерелятивистские приближения в КХД и КЭД. Разложение лагранжиана нерелятивистской КХД по степеням обратных масс тяжелых кварков.

Тема 16. Эффективные теории, основанные на бозонизации в КХД. Лагранжиан и производящий функционал. Условие связности Вайнберга-Салама. Критическая константа связи.

## **9. Текущий контроль по дисциплине**

Текущий контроль по дисциплине проводится с применением балльно-рейтинговой системы, включающей контроль посещаемости, результаты выполнения контрольных работ, заданий и тестов по материалам курса, и фиксируется в форме баллов (нарастающим итогом): посещаемость – максимальный балл 10, выполнение контрольных заданий – 40, тестов – 10. Контрольная точка проводится не менее одного раза в семестр.

Оценочные материалы текущего контроля размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» – <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

## 10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

**Зачет с оценкой во 2 семестре** проводится в устной форме по билетам.

Результаты зачета определяются оценкой, исходя из результатов ответов на экзамене (60%) и текущей аттестации в течение семестра (40%) в соответствии с балльной шкалой оценивания: количество набранных баллов более 80 — «отлично», от 65 до 79 — «хорошо», от 50 до 64 — «удовлетворительно, менее 50 баллов — «неудовлетворительно».

Билет состоит из двух частей.

Первая часть содержит основной вопрос, проверяющий сформированность компетенций ИПК-1.1, ИПК-1.2, ИПК-1.3. Ответы даются в развернутой форме, включая практические задачи.

Вторая часть содержит дополнительный вопрос из списка контрольных вопросов по курсу (приведен в разделе 11), проверяющий соответствие индикатору достижения компетенций ИПК-1.1, ИПК-1.2, ИПК-1.3. Ответ на вопрос второй части дается в краткой форме, включающей краткую интерпретацию полученных результатов.

Примерный перечень теоретических вопросов билета:

Вопрос 1. Глубоко-неупругое рассеяние в КХД. Функции распределения кварков и глюонов в адронах.

Дополнительные вопросы.

Вопрос 1. Что такое инфракрасная стабильность в КХД.

Вопрос 2. Как реализуется Голдстоуновский механизм нарушения киральной симметрии в КХД.

Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» — <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

## 11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронные учебные курсы по дисциплине в электронном университете «Moodle»: <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=25865>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

Перечень вопросов, выносимых на зачет во 2 семестре.

1. Время жизни частицы и дифференциального сечения рассеяния двух частиц.
2. Фазовый объем распада на 2 частицы.
3. Фазовый объем распада на 3 частицы.
4. Кварковая модель.
5. Составные модели адронов.
6. Квантовые числа адронов.
7. Магнитные моменты барионов.
8. Аномальный распад нейтрального пиона.
9. Отношение сечений электрон-позитронной аннигиляции в кварки и лептоны
10. Лагранжиан КХД.
11. Цветная симметрия КХД.
12. Калибровочные схемы в КХД.
13. Вывод формул для пропагатора глюона в различных калибровках.
14. Киральная симметрия.
15. Аномалии и структура вакуума КХД.
16. Голдстоуновский механизм нарушения киральной симметрии в КХД.
17. Симметрия Изгура-Вайзе в секторе тяжелых кварков.
18. Эффективная теория тяжелых кварков.
19. Форм-факторы полуперлептонных распадов тяжелых мезонов и барионов.
20. Перенормировка КХД в одной петле.

21. Асимптотическая свобода и ренормгруппа.
22. Бегущие константа связи КХД и массы кварков.
23. Инфракрасная стабильность в КХД.
24. Глубоко-неупругое рассеяние в КХД.
25. Электрон-позитронное рассеяние в адроны.
26. Процессы Дрелла-Яна.
27. Полуинклюзивные процессы глубоко-неупругого рассеяния в КХД.
28. Функции распределения кварков и глюонов в адронах.
29. Модель Вайнберга-Салама.
30. Матрица смешивания кварков Кабиббо-Кобаяси-Маскава.
31. Механизм Хиггса спонтанного нарушения симметрии.
32. SU(5) модель великого объединения.
33. Нарушение барионного, лептонного числа и лептонного аромата.
34. Распад протона.
35. Дираковское и Майорановское нейтрино.
36. Двойной бета-распад.
37. Осцилляции нейтрино.
38. Матрица смешивания нейтрино Понтекорво-Маки-Накагава-Саката.
39. Киральная пертурбативная теория (КПТ).
40. КХД в пределе большого количества цветов.
41. Нерелятивистские приближения в КХД и КЭД.
42. Бозонизации в КХД.

в) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа студента включает:

- углубленное теоретическое изучение разделов курса при подготовке к лекционным и практическим занятиям;
- подготовку к обсуждению материала, в том числе самостоятельный поиск необходимых источников информации, включая научно-образовательные ресурсы сети Интернет;
- подготовку к экзаменам.

Вопросы, вынесенные на самостоятельное изучение.

1. Нарушение универсальности в слабых полулептонных распадах адронов.
2. Свойства адронов в подходах АдС/КХД.
3. Температурная зависимость свойств адронов.
4. Свойства адронов при конечной плотности среды.
5. Доменная структура вакуума КХД.
6. Физика аксионов.
7. Темная материя.
8. Физика лептокварков.

Темы для рефератов и учебно-методическая литература для самостоятельной работы по разделам дисциплины «Теория элементарных частиц»:

### Тема 1. Темная материя.

Литература:

1. G. Bertone and D. Hooper, History of dark matter, Rev. Mod. Phys. 90, no.4, 045002 (2018) doi:10.1103/RevModPhys.90.045002 [arXiv:1605.04909 [astro-ph.CO]].
2. K. M. Zurek, Asymmetric Dark Matter: Theories, Signatures, and Constraints, Phys. Rept. 537, 91 (2014) doi:10.1016/j.physrep.2013.12.001

[arXiv:1308.0338 [hep-ph]].

3. A. Arbey and F. Mahmoudi, Dark matter and the early Universe: a review, Prog. Part. Nucl. Phys. 119, 103865 (2021)

doi:10.1016/j.ppnp.2021.103865, arXiv:2104.11488 [hep-ph]].

4. F. Kahlhoefer, Review of LHC Dark Matter Searches, Int. J. Mod. Phys. A32, no.13, 1730006 (2017) doi:10.1142/S0217751X1730006X, [arXiv:1702.02430 [hep-ph]].

5. N. Arkani-Hamed, D. P. Finkbeiner, T. R. Slatyer and N. Weiner, A Theory of Dark Matter, Phys. Rev. D 79, 015014 (2009)

doi:10.1103/PhysRevD.79.015014[arXiv:0810.0713 [hep-ph]].

### Тема 2. Физика элементарных частиц на современных коллайдерах.

Литература:

1. M. Thomson, Modern particle physics, Cambridge University Press, 2013, ISBN 978-1-107-03426-6.

2. V. Shiltsev and F. Zimmermann, Modern and Future Colliders, Rev. Mod. Phys. 93, 015006 (2021) doi:10.1103/RevModPhys.93.015006 [arXiv:2003.09084 [physics.acc-ph]].

3. M. J. Strassler and K. M. Zurek, Echoes of a hidden valley at hadron colliders, Phys. Lett. B 651, 374 (2007) doi:10.1016/j.physletb.2007.06.055 [arXiv:hep-ph/0604261 [hep-ph]].

4. C. Anastasiou and K. Melnikov, Higgs boson production at hadron colliders in NNLO QCD, Nucl. Phys. B 646, 220 (2002) doi:10.1016/S0550-3213(02)00837-4 [arXiv:hep-ph/0207004 [hep-ph]].

5. A. Djouadi, M. Spira and P. M. Zerwas, Production of Higgs bosons in proton colliders: QCD corrections, Phys. Lett. B 264, 440 (1991) doi:10.1016/0370-2693(91)90375-Z

### Тема 3. Голография в физике элементарных частиц.

Литература:

1. J. M. Maldacena, The Large N limit of superconformal field theories and supergravity, Adv. Theor. Math. Phys. 2, 231 (1998) doi:10.1023/A:1026654312961 [arXiv:hep-th/9711200 [hep-th]].

2. A. Karch, E. Katz, D. T. Son and M. A. Stephanov, Linear confinement and AdS/QCD, Phys. Rev. D 74, 015005 (2006) doi:10.1103/PhysRevD.74.015005 [arXiv:hep-ph/0602229 [hep-ph]].

3. I. R. Klebanov and E. Witten, AdS/CFT correspondence and symmetry breaking," Nucl. Phys. B 556, 89 (1999) doi:10.1016/S0550-3213(99)00387-9 [arXiv:hep-th/9905104 [hep-th]].

4. A. Chamblin, R. Emparan, C. V. Johnson and R. C. Myers, Holography, thermodynamics and fluctuations of charged AdS black holes," Phys. Rev. D 60, 104026 (1999) doi:10.1103/PhysRevD.60.104026 [arXiv:hep-th/9904197 [hep-th]].

5. S. J. Brodsky, G. F. de Teramond, H. G. Dosch and J. Erlich, Light-Front Holographic QCD and Emerging Confinement, Phys. Rept. 584, 1 (2015) doi:10.1016/j.physrep.2015.05.001 [arXiv:1407.8131 [hep-ph]].

## **12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет**

а) основная литература:

1. М.Е. Пескин, Д.Е. Шрёдер, Введение в квантовую теорию поля. -- Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая механика", 2001. -- 784 с.
2. Н.Н. Боголюбов, Д.В. Ширков, Введение в теорию квантованных полей. -- М.: Физматлит, 1984. -- 600 с.
3. Л. Б. Окунь, Лептоны и кварки, Москва, "Наука", 2-е изд. , 1990, 324 с.
4. М. Thomson, Modern particle physics, Cambridge University Press, 2013, ISBN 978-1-107-03426-6.
5. Т. П. Ченг, Л. Ф. Ли, Калибровочные теории в физике элементарных частиц, Москва, издательство "Мир", 1987, 624 с.
6. Е. Бюклинг, К. Каянти, Кинематика элементарных частиц, издательство "Мир", 1975, 343 стр.

б) дополнительная литература:

1. Г. Кейн, Современная физика элементарных частиц, Москва, издание Мир, 1990, 360 с
2. Ф. Хелзен, А. Мартин, Кварки и лептоны: Введение в физику частиц, Москва, издательство "Мир", 1987, 456 с.
3. В. Л. Ioffe, V. S. Fadin and L. N. Lipatov, Quantum chromodynamics: Perturbative and nonperturbative aspects, Cambridge Univ. Press, 2010, 585 с.

в) ресурсы сети Интернет:

<http://arxiv.org> База электронных препринтов: разделы hep-th, hep-ph, hep-ex  
<https://www.inp.nsk.su/~baldin/PhysLect/index.html>

Лекции по физике элементарных частиц, читаемые в Новосибирском государственном университете

### 13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

– Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office OneNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook); системы компьютерной верстки LaTeX;

– публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ –  
<http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ –  
<http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>

– ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>

– Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>

– ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>

– ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

### 14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения практических занятий, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешенном формате, оснащенные системой («Актру»).

#### **15. Информация о разработчиках**

Любовицкий Валерий Ефимович, профессор, доктор физико-математических наук, кафедра квантовой теории поля физического факультета ТГУ.