

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по Од

Е.В. Луков

« 17 » 02 2023г.

**ПРОГРАММА**

**кандидатского экзамена по научной специальности**

*«1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»*

Программа кандидатского экзамена по научной специальности

*«1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»* рассмотрена и рекомендована к утверждению ученым советом Физического факультета протокол № 528 от 16.02.2023

**Авторы-разработчики:**

1. Егоров Михаил Викторович, к. ф.-м. н., доцент кафедры квантовой теории поля.
2. Шрейбер Ирина Владимировна, к. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник лаборатории экспериментальной физики высоких энергий НУ

Согласовано:

Руководитель ОП



С.Н. Филимонов

## 1. Общие положения

На основании постановления Правительства Российской Федерации от 23.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» кандидатские экзамены сдаются в соответствии с научной специальностью (научными специальностями) и отраслью науки, предусмотренными номенклатурой научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утверждаемой Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (далее – Минобрнауки России), по которым осуществляется подготовка (подготовлена) диссертации.

Кандидатский экзамен по специальной дисциплине в соответствии с темой диссертации на соискание ученой степени кандидата наук представляет собой форму оценки степени подготовленности соискателя ученой степени к проведению научных исследований по научной специальности «1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» по физико-математическим наукам (далее – кандидатский экзамен).

Программа кандидатского экзамена разработана на основе Паспорта научной специальности «1.3.3. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» (далее – Программа), утвержденного ВАК при Минобрнауки России <https://drive.google.com/drive/folders/1RNYkXhvAzaEF85GqxOH8HhbenJloUMR7>.

Организация и проведение приема кандидатского экзамена осуществляется в соответствии с установленным в НИ ТГУ порядком.

Подготовка по Программе может осуществляться как самостоятельно, так и в рамках освоения соответствующей программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре НИ ТГУ. Сдача аспирантом кандидатского экзамена является обязательным условием обучения и относится к оценке результатов освоения базовой дисциплины (модуля) образовательного компонента программы, осуществляемой в рамках промежуточной аттестации.

## 2. Структура кандидатского экзамена и шкала оценивания уровня знаний

Кандидатский экзамен проводится в форме устного экзамена по билетам продолжительностью один академический час и состоит из следующих частей:

1. Основной вопрос из первого раздела Программы, подразумевающий развернутый ответ.
2. Дополнительный вопрос из второго раздела Программы, подразумевающий краткий ответ.



Оценка уровня знаний по каждому вопросу осуществляется по пятибалльной шкале со следующим принципом перерасчета:

«отлично» – 5 баллов;

«хорошо» – 4 балла;

«удовлетворительно» – 3 балла;

«неудовлетворительно» – 1-2 балла.

При оценивании ответов на каждый из вопросов экзаменационного билета учитываются следующие критерии:

Ответ на вопрос исчерпывающий, продемонстрировано понимание и знание сути вопроса в полном объеме. Замечаний нет.	5 баллов
Ответ на вопрос неполный, но раскрывающий основную суть вопроса, продемонстрировано понимание и знание вопроса в достаточном объеме. Замечания незначительные.	4 балла
Ответ неполный с существенными замечаниями, знания по вопросу фрагментарные и частичные, в том числе и по тематике диссертационного исследования.	3 балла
Ответ на вопрос отсутствует или дан неправильный	1-2 балла

Итоговая оценка за кандидатский экзамен выставляется решением экзаменационной комиссии:

«отлично» – при наличии не менее 80% 5-балльных ответов и отсутствии 3-2-1-балльных ответов;

«хорошо» – при наличии не менее 80% 4-балльных ответов и отсутствии 2-1-балльных ответов;

«удовлетворительно» – при наличии более 20% 3-балльных ответов и отсутствии 2-1-балльных ответов;

«неудовлетворительно» – при наличии 1-2 балльного ответа (или отказа отвечать на вопрос).

### 3. Перечень тем и вопросов для подготовки к сдаче экзамена

**Раздел 1.** Основные вопросы по содержанию курса *«Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».*

#### **Тема 1. Теория атомного ядра**

1. Общие свойства ядер (массы, спин-чётность, магнитные и электрические моменты, изоспины и гиперзаряд). Энергии связи ядер и формула Вейцеккера.
2. NN взаимодействие. Феноменология нуклон-нуклонного взаимодействия. Фазовоэквивалентные потенциалы. Свойства дейтрона.

3. Коллективные модели ядер. Модель жидкой деформируемой капли. Метод функционала плотности.
4. Микроскопические модели ядер. Оболочечная модель и классификация одночастичных состояний. Методы Хартри-Фока.
5. Явление радиоактивности. Теория  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -распада. Дозиметрия (единицы измерения, типы поглощённых доз, биологический эффект радиации).
6. Электромагнитные переходы в ядрах. Эффективный заряд. Теорема Зиггера. Мультипольные разложения матричных элементов операторов перехода.
7. Экзотические и сверхтяжёлые ядра. Лёгкие ядра у границы нейтронной стабильности. Лёгкие гиперядра и эффект нарушения зарядовой симметрии. Методы исследования структуры нейтронно-избыточных ядер. Новые магические числа.
8. Взаимодействие ядерных излучений с веществом. Особенности взаимодействий заряженных частиц, фотонов и нейтронов в зависимости от энергии и характеристик вещества. Ионизационные потери и их флуктуации. Излучение Вавилова—Черенкова.

**Тема 2: Ядерная астрофизика** (для специалистов-экспериментаторов по физике ядра и элементарных частиц)

1. Происхождение и эволюция Вселенной. Физика элементарных частиц и космология. Происхождение легчайших элементов, барионная асимметрия Вселенной и проблема стабильности протона.
2. Солнечная энергия. Основные ядерные реакции на Солнце. Ядерные реакции в звездах в процессе эволюции. Модели звезд и эволюция звезд до взрыва сверхновой.
3. Природа сверхновых. Механизм взрыва сверхновой. Роль нейтрино в коллапсе сверхновых. Образование нуклидов в S- и R-процессах. Происхождение средних и тяжелых элементов.
4. Солнечные нейтрино. Современные детекторы солнечных нейтрино, проблема дефицита солнечных нейтрино, масса нейтрино и гипотеза нейтринных осцилляций. Наблюдение нейтрино от сверхновых. Поиски темной материи во Вселенной.

### **Тема 3. Теория ядерных реакций**

1. Виды реакций. Энергетический выход реакций. Принцип детального равновесия. Первичный и звёздный нуклеосинтез. Образование нуклидов в S- и R-процессах.
2. Кинематика ядерных реакций. Лоренц преобразования физических величин в движущиеся системы. Связь сечений в системе центра масс и в лабораторной системе.



3. Прямые и идущие через стадию составного ядра реакции. Резонансные и нерезонансные вклады. Формализм Хаузера-Фешбаха. Оптическая модель. Импульсное приближение. Теория R-матриц.
4. Теория многочастичных реакций. Связывание каналов в уравнениях Шрёдингера и Липпмана-Швингера. Точные уравнения малочастичной динамики (Фаддеева, Фаддеева-Якубовского).
5. Деление и синтез. Условия возникновения деления. Модели деления. Энергетический выход и продукты деления. Спектр нейтронов деления. Распределение продуктов деления по массе и энергии. Условия возникновения синтеза. Скорость термоядерных реакций. Катализ термоядерных реакций.
6. Уравнение переноса нейтронов. Цепная реакция деления. Энергетические ядерные и гибридные ядерно-термоядерные установки.

**Тема 4. Классическая и квантовая теория рассеяния** (для физиков-теоретиков, специалистов по физике высоких энергий)

1. Классическое рассеяние. Связь прицельного параметра и сечения рассеяния. Формулы Мотта и Резерфорда.
2. Квантовое рассеяние. Одночастичный оператор рассеяния. Асимптотические состояния и операторы Мёллера. Регулярные и нерегулярные решения уравнения Шрёдингера. Функции Грина.
3. Свойства S-матрицы. Полюса S-матрицы. Уравнения Липпмана-Швингера для функции Грина и T-матрицы. Способы нахождения T-матрицы. Фазовый анализ.
4. Обратная задача рассеяния. Уравнение Гельфанда-Левитана. Уравнение Марченко.
5. Эффекты низшего порядка теории возмущений: комптон-эффект, тормозное излучение и рождение пары электрон-позитрон в поле ядра. Кулоновское возбуждение атомов в рамках полуклассической теории. Быстрые атомные столкновения. Процессы встряски в молекулярных столкновениях.
6. Глубоко-неупругое рассеяние электронов и формулы Розенблата. Электрон-позитронные столкновения высоких энергий.

**Тема 5. Физика элементарных частиц и их взаимодействий**

1. Классификация частиц по мультиплетам. Типы и характеристики фундаментальных взаимодействий и их основные положения. Модель Глэшоу—Салама—Вайнберга. Механизм спонтанного нарушения симметрии (электрослабое взаимодействие и взаимодействие с полем Хиггса).
2. Связь унитарных групп  $U(1)$ ,  $SU(2)$ ,  $SU(3)$  с мультиплетами частиц. Стандартная модель и её недостатки. Основные направления и перспективы развития физики

элементарных частиц. Физика за пределами Стандартной модели. Теория Великого Объединения. Суперсимметричные теории.

3. Релятивистские инварианты. Инвариантная структура выражений для T-матриц. Мезон-нуклонное рассеяние. Фоторождение мезонов на протоне и нейтроне. Спектр нуклона.

4. Слабое взаимодействие и смешивание кварковых конфигураций (матрица Кабиббо-Кобаяши-Маскава). Комбинированные CP и CPT чётности. Странные мезоны. Свойства Z- и W-бозонов. Наблюдение Хиггса, Z- и W-бозонов в экспериментах ЦЕРН.

5. Физика нейтрино. Дираковские и майорановские нейтрино. Стерильные нейтрино. Осцилляции нейтрино и матрица смешивания. Нейтринные эксперименты на ускорителях при высоких и низких энергиях, реакторах, детектирование солнечных, атмосферных нейтрино и нейтрино от взрывов сверхновых, эксперименты по поискам нейтринных осцилляций.

6. Диаграммы и правила Фейнмана. Вероятность перехода. Сечение рассеяния. Кулоновское рассеяние электронов. Связь пропагаторов с функциями Грина. Вывод Резерфордского рассеяния.

7. Квантовая хромодинамика (КХД). Глюоны. Цвет кварков и глюонов. Сходства и различия взаимодействий, осуществляемых путем обмена глюонами и фотонами. Асимптотическая свобода и конфайнмент. Массы кварков. Бегущая константа квантовой хромодинамики. Партоново-кварковая структура адронов.

## **Тема 6. Принципы ускорения и детектирования частиц. Взаимодействие частиц высокой энергии с веществом.**

1. Основные этапы развития ускорителей. Особенность применения, физические основы и конструкция ускорителей различных типов: линейные ускорители, бетатрон, микротрон, циклотрон, фазотрон, синхротрон, установки с встречными пучками (коллайдеры). Большой адронный коллайдер и ускорительный комплекс ЦЕРН.

2. Методы ускорения заряженных частиц: высоковольтный, индукционный и резонансный. Коллективный метод ускорения. Основные характеристики пучков. Методы фокусировки частиц и обеспечение устойчивого движения частиц. Мягкая и жесткая фокусировка. Принцип автофазировки.

3. Детекторы элементарных частиц. Детектор ATLAS Большого Адронного Коллайдера. Структура детектора и принципы работы.



4. Классификация приборов регистрации элементарных частиц. Газоразрядные детекторы. Счетчики Гейгера-Троста. Пропорциональные счетчики. Ионизационные камеры. Камера Вильсона. Метод ядерных фотоэмульсий.
5. Методы вычисления основных величин, измеряемых экспериментально. Кинематические закономерности реакций взаимодействия и распада элементарных частиц. Основные задачи анализа данных в эксперименте. Планирование эксперимента.
6. Программы обработки и анализа физических результатов. Моделирование процессов рассеяния. Метод Монте-Карло и его модификации. Программы-генераторы. Программные пакеты RYTHIA, MadGraph, GEANT4 и возможности их применения.

#### **Рекомендуемая литература**

1. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. – М.: Энергоатомиздат, 1985 г. – 488 с.
2. Гинзбург В.Л. О физике и астрофизике. – М.: Наука, 1980 г. – 160 с.
3. Долгов А.Д., Зельдович Я.Б., Сажин М.В. Космологи ранней вселенной. – М.: Издательство московского университета, 1988 г. – 199 с.
4. Хелзен Ф., Мартин А. Кварки и лептоны: Введение в физику частиц (пер. с англ. под ред. А.Ц. Аматуни). – М.: Мир, 1987 г. – 456 с.
5. Балдин А. Кинематика ядерных реакций. – М.: Государственное издание физико-математической литературы, 1959 г. – 307 с.
6. Нелипа Н. Введение в теорию сильно-взаимодействующих элементарных частиц. – М.: Атомиздат, 1970 г. – 488 с.
7. Кузьмин А. Основы теории переноса нейтронов. – Томск: Издательство томского политехнического университета, 2007 г. – 192 с.
8. Greiner W. Quantum electrodynamics (4 ed.). – Berlin: Springer, 2009 г. – 461 с.
9. Greiner W. Quantum chromodynamics (2 ed.). – Berlin: Springer, 2002 г. – 558 с.
10. Greiner W. Nuclear Models. – Berlin: Springer, 1996 г. – 375 с.
11. Пенионжкевич Ю., Калпакчиева Р. Лёгкие ядра у границы нейтронной стабильности. – Дубна: ОИЯИ, 2016 г. – 383 с.
12. Никитин Ю., Розенталь И. Ядерная физика высоких энергий. – М.: Атомиздат, 1980 г. – 232 с.
13. Tamura T. Analyses of the scattering of nuclear particles by collective nuclei in terms of the coupled-channel calculation. *Reviews of Modern Physics*. – 1965 г. – Т.37, №1. 679-708 с.
14. Kawano T., Capote R., и др. Statistical Hauser-Feshbach theory with width-fluctuation correction including direct reaction channels for neutron-induced reactions at low energies. *Physical Review C*. – 2016 г. – Т.94. – 014612 с.



15. Descouvemont P., Baye D. The R-matrix theory. Reports on progress in Physics. – 2010 г. – Т.73, №3. – 036301 с.
16. Герштейн С., Петров Ю., Пономарёв Л. Мюонный катализ и ядерный бридинг. Успехи физических наук. – 1990 г. – Т.160, вып.8. 1-46 с.
17. Адамов Е.О. и др. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами. – М.: Изд-во АО НИКИЭТ, 2020 г. – 502 с.
18. Беляев В. Лекции по теории малочастичных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986 г. – 128 с.
19. Фаддеев Л. Обратная задача квантовой теории рассеяния. Успехи математических наук. – 1959 г. – Т.14, вып.4. 57-119 с.
20. Тейлор Дж. Теория рассеяния. Квантовая теория нерелятивистских столкновений (пер. с англ. А.С. Жукарева, под ред. проф. А.М. Бродского). – М.: Мир, 1975 г. – 564 с.
21. Дыхне А., Юдин Г. Внезапные возмущения и квантовая эволюция. – М.: Успехи физически наук. – 1996 г. – 428 с.
22. Наумов Д. Введение в физику нейтрино. Письма в ЭЧАЯ. – 2011 г. – Т.8, №7. 1192-1231 с.
23. Suekane F. Neutrino Oscillations (a practical guide to basics and applications). – Tokyo: Springer, 2015 г. – 185 с.
24. Иден Р. Соударения элементарных частиц при высоких энергиях (пер. с англ. И.В.Андреева, под ред. В.Я.Файнберга). – М.: Наука, 1970 г. – 392 с.
25. Калашникова В.И., Козодаев М.С. Детекторы элементарных частиц. – М.: Наука. – 1966 г. – 408 с.
26. Группен К. Детекторы элементарных частиц (пер. с англ. Н.Ю.Эйдельман, под ред. Л.М.Курдадзе). – Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999 г. – 408 с.
27. Комар Е.Г. Основы ускорительной техники. – М.: Атомиздат, 1975 г. – 368 с.
28. Идье В., Драйард Д., Джеймс Ф. Статистические методы в экспериментальной физике (пер. с англ. под ред. А.А. Тяпкина). – М.: Атомиздат, 1976 г. – 335 с.
29. Битюков С.И., Красников Н.В. Применение статистических методов для поиска новой физики на большом адронном коллайдере. – М.: Едиториал УРСС, 2019 г. 272 с.
30. Смирнова Л.Н. Детектор ATLAS Большого Адронного Коллайдера (учебное пособие). – М.: (электронный ресурс: <http://web.ihep.su/spitsky/mipt/literature/src/hep/ATLAS.pdf>), 2010 г. – 213 с.

## **Раздел 2. Дополнительные вопросы.**

В соответствии с направлениями исследований по паспорту научной специальности 1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» определены следующие дополнительные вопросы:

1. Измеряемые в опытах характеристики ядер
2. Суть векового (секулярного) уравнения
3. Асимметрия осколков деления по массе и в зависимости от энергии
4. Особенности торможения заряженных частиц в веществе
5. Связь Фаддеевских компонент T-матрицы с полной T-матрицей
6. Поведение сечения радиационного захвата нейтронов с энергией
7. Явление мюонного катализа термоядерных реакций
8. Кандидаты частиц «тёмной материи»
9. Связь ширины распада и времени жизни короткоживущих состояний
10. Источники нейтрино
11. Как изменится порог эндотермической реакции от перестановки частиц местами?
12. Как энергия связи экзотической ядерной системы связана с энергией отщепления произвольной частицы из неё?
13. Акцептанс детектора

### 3. Пример экзаменационного билета

#### Билет №1

1. Классификация частиц по мультиплетам. Типы и характеристики фундаментальных взаимодействий и их основные положения. Модель Глэшоу—Салама—Вайнберга. Механизм спонтанного нарушения симметрии (электрослабое взаимодействие и взаимодействие с полем Хиггса).
2. Как изменится порог эндотермической реакции от перестановки частиц местами?

#### Билет №2

1. Основные этапы развития ускорителей. Особенность применения, физические основы и конструкция ускорителей различных типов: линейные ускорители, бетатрон, микротрон, циклотрон, фазотрон, синхротрон, установки с встречными пучками (коллайдеры). Большой адронный коллайдер и ускорительный комплекс ЦЕРН.
2. Кандидаты частиц «тёмной материи».