

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 03.03.02 Физика
 ООП/ОПОП Физика
 Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Тема работы
Исследование свойств бета-распада атомных ядер на основе микроскопической плотности заряда

УДК 539.165.01

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б91	Синь Ян		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Лаптев Роман Сергеевич	К.Т.Н.		

Консультант (при наличии)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Верховская М.В.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Сечин А.И.	Д.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры	Лидер А.М.	Д.Т.Н., профессор		

Томск – 2023 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП/ОПОП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач.
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений.
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовать свою роль в команде.
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном (-ых) языке.
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах.
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни.
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций.
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи.
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен применять естественно-научные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в инженерной деятельности, связанной с проектированием и конструированием, технологиями производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов
ОПК(У)-2	Способен осуществлять профессиональную деятельность с учетом экономических, экологических, интеллектуально-правовых, социальных и других ограничений на всех этапах жизненного цикла технических объектов и процессов
ОПК(У)-3	Способен использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач.
ОПК(У)-4	Способен понимать сущность и значение информации в развитии современного общества, осознавать опасность и угрозу, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности.
ОПК(У)-5	Способен использовать основные методы, способы и средства получения, хранения, переработки информации и навыки работы с компьютером как со средством управления информацией.
ОПК(У)-6	Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных

	требований информационной безопасности.
ОПК(У)-7	Способен использовать в своей профессиональной деятельности знание иностранного языка.
ОПК(У)-8	Способен критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости направление своей деятельности.
ОПК(У)-9	Способен получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах и других малых коллективах исполнителей.
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способностью использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин
ПК(У)-2	Способностью проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта
ПК(У)-3	Готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований
ПК(У)-4	Способность применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин
ПК(У)-5	Способность пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза физической информации в избранной области физических исследований
ПК(У)-6	Способность понимать и использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований
ПК(У)-7	Способность участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме
ПК(У)-8	Способность понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (ООП/ОПОП) 03.03.02 Физика

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП/ОПОП

_____ Лидер А.М.

(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
150Б91	Синь Ян

Тема работы:

Исследование свойств бета-распада атомных ядер на основе микроскопической плотности заряда

Утверждена приказом директора (дата, номер)

27.01.2023, 27-79/с

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:

06.06.2023

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к функционированию (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<p>свойств бета-распада атомных ядер бета-спектр</p>
<p>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке <i>(аналитический обзор литературных источников с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе)</i></p>	<p>Аналитический обзор литературных источников Теоретическое введение Методы вычисления β-спектра Результаты вычисления Социальная ответственность Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Заключение по работе</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	-
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Сечин А.И.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и	Верховская М.В.

ресурсосбережение	
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
-	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Лаптев Роман Сергеевич	К.Т.Н.			

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б91	Синь Ян		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (ООП/ОПОП) 03.03.02 Физика
 Уровень образования бакалавриат
 Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики
 Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2022/2023 учебного года)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
150Б91	Синь Ян

Тема работы:

Исследование свойств бета-распада атомных ядер на основе микроскопической плотности заряда

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	06.06.2023
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.11.2022	Литературный обзор по теме ВКР	15
30.04.2023	Методы исследования	5
01.06.2023	Результаты экспериментальных исследований. Обработка результатов.	50
01.06.2023	Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение	15
01.06.2023	Социальная ответственность	15

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Лаптев Роман Сергеевич	К.Т.Н.		

Консультант (при наличии)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП/ОПОП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры	Лидер А.М.	Д.Т.Н., профессор		

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б91	Синь Ян		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 79 с., 11 рис., 18 табл., 51 источников, 0 приложений.

Ключевые слова: β -распад, энергетический спектр бета-распада, модель распределения ядерного заряда

Объектом исследования является явление β -распада атомных ядер. Целью данной работы является изучение влияния различных моделей распределения ядерного заряда на энергетический спектр бета-распада, а также описание исследовательских проблем анализа распределения ядерного заряда при β -распаде с применением модели распределения ядерного заряда.

В ходе работы анализировались модель точечного заряда, модель равномерного сферического распределения заряда и модель гауссова распределения заряда. Описана теория расчета энергетического спектра β -распада и введена коррекция расчета энергетического спектра для различных моделей заряда. Энергетический спектр построен с использованием открытого исходного кода BSG. Обсуждается степень влияния различных моделей распределения ядерных зарядов на энергетический спектр.

В результате исследований показано, что модель распределения заряда точечного заряда обладает относительно хорошей производительностью. Модель равномерного сферического распределения заряда необходимо использовать для коррекции энергетического спектра, то есть объем ядра является характерной физической величиной. Однако влияние гауссовой модели распределения заряда на спектр β -энергии неочевидно, и от этой коррекции можно отказаться при недостаточной вычислительной мощности.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: Кодовые операции используются для реализации выходных данных β -энергетических спектров, и степень влияния различных моделей распределения заряда обсуждается с помощью энергетических спектров распада различных радиусов ядер.

Область применения: Результаты исследования могут быть использованы в качестве основы для выбора модели распределения заряда ядра при высокоточном расчете энергетического спектра β -распада.

Экономическая значимость работы является использованием на объектах атомной промышленности, таких как атомные электростанции. Это может лучше решить проблему выделения энергии, вызванного β -распадом, который все еще существует в ядерных реакторах после остановки реакции, и улучшить коэффициент преобразования энергии.

В будущем планируется провести более всестороннее обсуждение и сопоставление влияния микроскопической модели распределения заряда ядра на β -энергетический спектр. Хотя модель гауссова распределения оказывает незначительное влияние на энергетический спектр распада, распределение заряда ядра не является изотропным, и все еще существует много проблем с деформацией, которые сопровождают распад. Это может быть одной из причин, влияющих на точность энергетического спектра распада.

Оглавление

Введение.....	11
Литературный обзор	13
Применение высокоточной энергетической спектроскопии β -распада	13
Статус исследования энергетического спектра β -распада.....	14
Глава 1. Теоретическое введение	17
1.1 Система единиц измерения	17
1.2 Общее описание бета-распада	17
1.3 Теория бета-распада Ферми	19
1.3.1 Золотое правило Ферми	19
1.3.2 Расчет плотности состояния и вероятности распада.....	21
1.4 Влияние распределения заряда на вероятность распада.....	24
1.4.1 Атомная модель I - точечное распределение заряда	24
1.4.2 Атомная модель II – равномерное сферическое распределение заряда	26
1.4.3 Атомная модель III - Гауссово распределение заряда	27
Вывод.....	29
Глава 2. Методы вычисления β -спектра.....	30
2.1 Структура расчетного кода	30
2.2 Вычисление формул в коде	32
Вывод.....	35
Глава 3. Результаты вычисления	36
3.1.1 Результаты вычисления $^{45}\text{Ca} \rightarrow ^{45}\text{Sc}$	36
3.1.2 Результаты вычисления $^{106}\text{Ru} \rightarrow ^{106}\text{Rh}$	37
3.1.3 Результаты вычисления $^{86}\text{Br} \rightarrow ^{86}\text{Kr}$	38
Вывод.....	39
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение.....	41
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	41

4.2 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения.....	42
4.2.1 SWOT – анализ.....	42
4.3 Планирование научно-технического исследования	45
4.3.1 Определение трудоемкости выполнения работ.....	46
4.4 Бюджет научного исследования	52
4.4.1 Расчет материальных затрат НИИ.....	52
4.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ	53
4.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы	54
4.4.4 Расчет затрат на электроэнергию	55
4.4.5 Расчет затрат на научные и производственные командировки и накладные расходы	56
4.5 Ресурс эффективность.....	57
Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	58
Глава 5. Социальная ответственность.....	60
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	60
5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства	60
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.....	61
5.2 Производственная безопасность.....	62
5.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	63
5.3 Экологическая безопасность.....	69
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	70
Выводы	72
Заключение	74

Введение

Исследования в области бета-распада всегда являются актуальной темой. В этой области важным объектом исследования является высокоточный энергетический спектр β -распада (β -спектр). Это означает, что плотность вероятности β -частиц (электронов) соответствует линии распределения энергии. Из-за сложности системы бета-распада теории описания постоянно обновляются, и их уточненные результаты продолжают оказывать влияние на современную физику. При расчете β -распада необходимо учитывать сложные взаимодействия между частицами внутри ядра и между ядром и β -частицами. Следовательно, эффекты новых физических теорий могут быть использованы для повышения точности анализа спектральных линий. Экспериментальные результаты могут помочь в проверке правильности новой теории. В ядерных реакторах происходит большое количество бета-распадов. Например, когда ядро ^{86}Br подвергается β -распаду, оно выделяет большое количество энергии (несколько тысяч кэВ). Также стоит отметить, что ^{45}Ca широко используется в экспериментах по обнаружению бета-распада в биологии. Электромагнитное взаимодействие между ядром и β -частицами оказывает наибольшее влияние на β -спектр, и влияние на энергетический спектр может составлять несколько процентов или даже больше единицы. Модель распределения заряда ядра занимает очень важное значение в теории вычисления β -спектра.

Цель работы:

Целью данной работы является анализ области применения и перспектив исследований β -распада, а также описание исследовательских проблем анализа распределения ядерного заряда при β -распаде с использованием модели распределения ядерного заряда на β -спектре.

Задачи:

Для того чтобы проанализировать влияние модели распределения ядерного заряда на β -спектр, необходимо решить **следующие задачи**:

- 1) изучить теоретический процесс высокоточной энергетической спектроскопии β -распада;
- 2) обобщить теоретическую формулу β -распада при различных распределениях заряда;
- 3) разработать способ построения энергетического спектра β -распада на основе теоретических закономерностей;
- 4) Применить полученные вычисления для анализа β -распада ^{45}Ca , ^{86}Br и ^{106}Ru для апробации способа.

Литературный обзор

Применение высокоточной энергетической спектроскопии β -распада

Изучение высокоточной энергетической спектроскопии β -распада (β -спектра) постоянно помогало решать неизвестные физические проблемы и прикладные задачи ядерной физики в течение последних нескольких десятилетий. Точные β -спектры сформировали эволюцию стандартной модели (по-английски «SM») и остаются на переднем крае новых физических поисков. Изучение β -распада сыграло ключевую роль в раскрытии природы левостороннего V-A слабого взаимодействия и, как следствие, электросилового сектора стандартной модели полвека назад[1]. В течение последующих десятилетий непрерывное развитие новых экспериментальных методов удерживало исследования β -распада на переднем крае раскрытия структуры стандартной модели и его внутренней работы[2][3]. Зондирование массива различных наблюдаемых величин, таких как коэффициенты корреляции или значение Ft , позволяет провести тщательное исследование нескольких воздействий, выходящих за рамки стандартной модели (по-английски «BSM»). Отклонения от чистой теории V-A могут возникать как проявления экзотических взаимодействий, таких как правосторонние течения с участием новых тяжелых частиц[4]. Благодаря исследованию звездных вариаций экспериментальных наблюдаемых это дополнительно позволяет изучить нарушение Лоренц-инвариантности[5].

Кроме того, прецизионные исследования процесса β -распада предложили широкий спектр чувствительных экспериментальных наблюдаемых данных, начиная от корреляций и заканчивая фактической формой спектра[2]. Например, наиболее точное определение V_{ud} , восходящего кваркового элемента матрицы Кабиббо–Кобаяси–Маскавы, определяется по интегрированной форме β -спектра [6]错误!未找到引用源。 , в то время как поиск экзотической физики является одновременно

конкурентным и дополняющим поиск на БАК (Большой Адронный Коллайдер, по-английски «LHC») [7][8][9].

В последнее время вновь возник интерес к β -спектру как инструменту для прецизионных измерений, поиска экзотических токов, выходящих за рамки стандартной электросиловой модели, и исследования форм-факторов, индуцированных КХД[10]. Последние связаны с тем фактом, что кварк, участвующий в β -распаде, не является свободной частицей, а встроен в нуклон. Помимо стандартной модели скалярные и тензорные константы связи появляются в математическом описании формы β -спектра с помощью так называемого интерференционного термина Фирца (по-английски «Fierz term»). Термины Фирц и слабый магнетизм изменяют форму β -спектра. По мере увеличения требуемой точности эксперимента необходимо учитывать форм-факторы, индуцированные КХД[14][15], чтобы не ограничивать чувствительность к физике BSM.

Очевидно, что очень важно получить высокоточный энергетический спектр β -распада. Сравнение между ним и экспериментом может выявить неизвестные физические проблемы.

Проблема бета-распада — это сложная проблема. Во время процесса распада происходят движения электронов и нейтрино, движение отдачи ядра, деформация ядра и некоторые более подробные проблемы взаимодействия. Чтобы получить более точный энергетический спектр распада, необходимо подробно обсудить физический процесс.

Статус исследования энергетического спектра β -распада

Вышеизложенное кратко объясняет прикладные исследования энергетического спектра β -распада, и можно видеть, что результаты высокоточных теоретических расчетов энергетического спектра β -распада очень важны. А сама теория разрабатывалась почти 90 лет. В принципе, β -распад является проблемой квантового перехода, и вероятность распада может быть оценена в соответствии с теорией возмущений. Однако, поскольку система очень сложна, вычисление волновых функций является

сложной задачей. Это должно быть приблизительно в соответствии с фактическими потребностями. Когда потребность в точности возрастает, ученые вносят новые поправки, основанные на предыдущих теориях. Например: В 1934 году теория распада Ферми предполагала, что электроны движутся в кулоновском поле точечного заряда[16]. На самом деле ядро имеет свой собственный объем, поэтому термин коррекции конечного объема ядра дается позже. До сих пор теоретический расчет формулы плотности вероятности учитывал 12 корректирующих терминов, соответствующих различным физическим изображениям для коррекции[17].

Чтобы облегчить получение результатов теоретических вычислений, проект MIT с открытым исходным кодом записывает содержание теоретических вычислений в код и выполняет вычисления на языке C++[18]. И измените код для запуска в системе Linux. Чтобы облегчить работу, модифицированная программа предоставляет графический интерфейс для запуска python.

В недавних исследованиях исследование спектральных линий β -распада было в основном сосредоточено на эффектах в областях квантовой электродинамики и квантовой хромо динамики. Например, кулоновское поле для фактического движения электронов не является стационарным, потому что распавшееся ядро также будет двигаться в противоположном направлении из-за движения отдачи[19]

Эффект электронного экранирования также был рассмотрен более подробно в последние годы, L. Науен и др. дали более подробную коррекцию экранирования[18]. Это исследование электростатических полей, но объектом коррекции в этом исследовании является импульс и энергия β -частиц, а не электромагнитное взаимодействие. Это происходит потому, что точное решение уравнения Дирака математически не существует при экранирующей потенциальной.

Поправочный термин для распределения ядерного заряда несколько раз оптимизировался в 1970-х годах[20], но поскольку эффекты внутри ядра

неизвестны, исследование взаимодействия между β -частицами (электронами) и ядром было приостановлено. До сих пор коррекция электромагнитного взаимодействия, которую мы использовали, все еще является результатом, предложенным в то время.

Следует отметить, что энергетический спектр β -распада в настоящее время сильно зависит от распределения ядер. Соответствующие поправочные условия модели равномерного сферического распределения заряда и используемой в настоящее время модели распределения заряда Ферми являются лишь приблизительными решениями. Оптимизируя эту проблему, точность линии β -распада может быть дополнительно улучшена.

Изучение бета-распада имеет 90-летнюю историю, в течение которой были обнаружены новые неизвестные проблемы, и развитие современной физики постоянно стимулировалось. В этой главе будет кратко описана область применения β -распада и состояние исследований высокоточной энергетической спектроскопии β -распада.

Глава 1. Теоретическое введение

В этой главе процесс β -распада будет кратко описан с теоретической точки зрения, и будет получена формула вероятности β -распада. Наконец, описано влияние различных моделей распределения ядерного заряда на вероятность β -распада.

1.1 Система единиц измерения

Вероятность распада и член фазового пространства относятся к общим физическим теориям. Международная система единиц в основном используется в базовых учебниках, таких как термодинамика и квантовая механика. В этой статье в этой части используется Международная система единиц. В части коррекции, поскольку это микроскопическая задача ядерной физики, широко используется система единиц массы естественного электрона ($c = \hbar = m_e = 1$). Если есть какие-либо особые обстоятельства, они будут объяснены в тексте.

1.2 Общее описание бета-распада

Процесс бета-распада включает в себя несколько процессов, связанных с взаимным превращением нейтронов и протонов, при которых испускаются или захватываются электроны или испускаются позитроны[23][24]. В этом случае ядро становится другим ядром (ядром с тем же атомным номером), перемещая ячейку влево в периодической таблице (К-захват или β^+ -распад позитронов) или вправо (β -распад электронов).

Энергетический спектр β -распада непрерывен[25], и он начинается с нулевой энергии. Другими словами, испускаются β -частицы с очень низкой кинетической энергией. Однако необходимо принимать во внимание релятивистские эффекты электронов. Хотя существует большое количество низкоэнергетических β -частиц, нам все еще нужно, чтобы спектральные линии имели очень хорошую точность в области высоких энергий. Поскольку энергия β -распада относительно высока, необходимо учитывать релятивистские эффекты движения электронов. Однако ядро можно

рассматривать как нерелятивистскую интерпретацию, в зависимости от требований к точности энергетического спектра. Принципиальная схема β -распада показана на рисунке ниже.

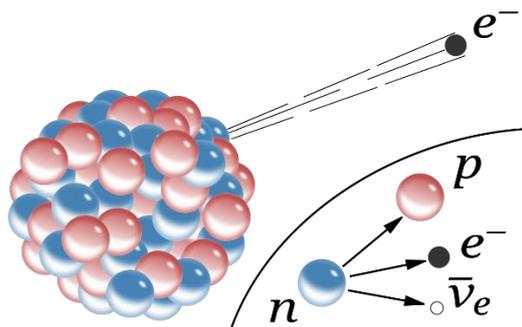


Рис.1. бета-распад[23]

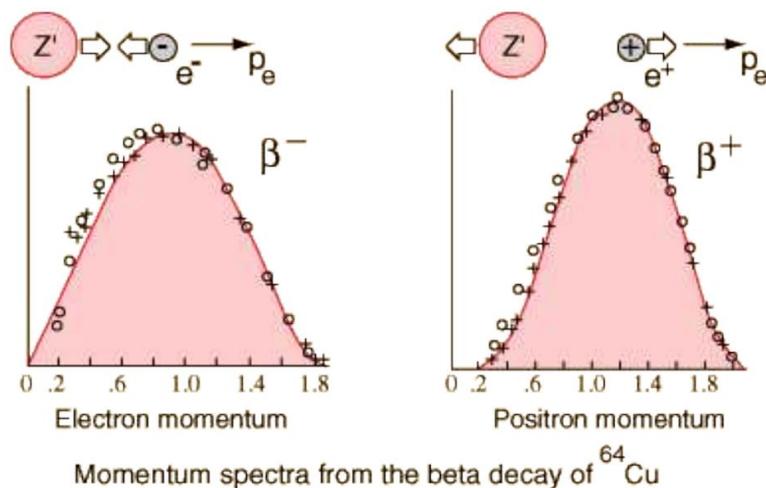


Рис. 2. Спектра β -распада меди-64[24].

Непрерывная проблема энергетического спектра β -частиц также трудна для понимания. Рассматриваем некоторые общие спектры, такие как спектры атомов водорода, и становится ясно, что они представляют собой дискретные линии. Из-за правил количественного определения энергии энергия спектра соответствует разнице энергий между двумя квантовыми энергетическими уровнями. Энергетический спектр β -частиц непрерывен, но очевидно, что теоретически невозможно найти непрерывно распределенный уровень ядерной энергии, поэтому вопрос о том, сохраняется ли энергия, является очень важным. В. Паули выдвинул гипотезу о нейтрино, утверждая, что β -распад является сложной проблемой трех тел. Непрерывная энергия β -частиц возникает не потому, что энергия не сохраняется, а потому, что энергия,

выделяемая ядром, может быть случайным образом распределена в системе из трех тел: ядер, нейтрино и электронов. Таким образом, решается эта проблема.

1.3 Теория бета-распада Ферми

Вопрос о непрерывности энергетического спектра β -распада заставил некоторых ученых усомниться в законе сохранения энергии. Паули ловко решил эту трудность, представив существование нейтрино, но количественного ответа дано не было. Эта проблема была окончательно количественно объяснена Ферми в 1934 году и стала теорией бета-распада Ферми.

1.3.1 Золотое правило Ферми

Согласно теории пертурбации, содержащего время, гамильтонов оператор может быть записан как :

$$\hat{H}(x, t) = \hat{H}_0(x) + \hat{\mathcal{H}}(x, t) \quad (1.1)$$

В случае постоянного пертурбации гамильтониан удовлетворяет соотношению :

$$\hat{\mathcal{H}}(x, t) = \begin{cases} 0 & \text{else} \\ \hat{\mathcal{H}}(x) & 0 < t < t_0 \end{cases} \quad (1.2)$$

Относится к присоединению к возмущению при $t = 0$ и удалению при $t = t_0$. Гамильтониан — это ступенчатая функция. Если рассматривать с точки зрения общей ситуации содержащего время возмущения - простого гармонического возмущения, то постоянное возмущение является частным случаем простого гармонического возмущения $\omega = 0$.

С физической точки зрения, зависимость ступенчатой функции постоянного возмущения от времени не очевидна. Даже при рассмотрении проблемы β -распада физические процессы, соответствующие двум узлам $t = 0$ и $t = t_0$, не могут быть по-настоящему объяснены. Однако результат, полученный в результате изменения возмущения, то есть вероятность

перехода ко времени t , положительно коррелирует со временем. Вероятность перехода в единицу времени не включает время.

$$P_{if}(t_0) = \frac{2\pi t_0}{\hbar} |w_{if}|^2 \delta(E_f - E_i) \quad (1.3)$$

Это понятие относится к вероятности того, что система претерпела переход (распад), когда возмущение вводится с момента $t = 0$ и квантовая система наблюдается в момент t_0 . Среди них w_{if} - элемент матрицы перехода системы, а разложение записывается как: $\langle \psi_f | \hat{\mathcal{H}} | \psi_i \rangle$; ψ_i - начальная волновая функция системы, ψ_f - конечная волновая функция системы, а $\hat{\mathcal{H}}$ - возмущенный гамильтониан. E_i и E_f представляют энергию квантового состояния до и после квантового перехода системы. Согласно $\delta(E_f - E_i)$, можно видеть, что переход может произойти только тогда, когда энергия начального и конечного состояний равна.

Скорость перехода в единицу времени равна:

$$\omega_{if} = \frac{P_{if}}{t_0} = \frac{2\pi}{\hbar} |w_{if}|^2 \delta(E_f - E_i) \quad (1.4)$$

Процесс бета-распада является ситуацией пертурбации в квантовой теории. И гамильтонов оператор может быть записан как [26] :

$$H = H_{heavy} + H_{light} + H_{interaction} \quad (1.5)$$

То есть энергия всей системы может быть записана как сумма энергии бариона, энергии лептона и энергии слабого взаимодействия. Энергия взаимодействия соответствует члену возмущения $\hat{\mathcal{H}}$, а энергия бариона и энергия лептона соответствуют H_0 . Определение и вычисление гамильтониана в оригинальном тексте Ферми неясны, и в последующих исследованиях появилось много представлений гамильтониана.

$$I(p)dp = \frac{2\pi}{\hbar} \langle \psi_f | \hat{\mathcal{H}} | \psi_i \rangle^2 \rho_e dp \quad (1.6)$$

где ρ_e - плотность конечных состояний. Выражение (5) называют золотым правилом Ферми.

1.3.2 Расчет плотности состояния и вероятности распада

В импульсном пространстве плотность со значением импульса $p \sim p + dp$ является фиксированным значением: $4\pi p^2 dp$. Геометрический смысл этой формы таков: изоповерхность p в пространстве импульсов является сферической поверхностью, в то время как $p + dp$ является сферической поверхностью с окружностью dp , немного большей, чем p . Следовательно, интервал импульса $p \sim p + dp$ представляет собой сферическую оболочку в импульсном пространстве.

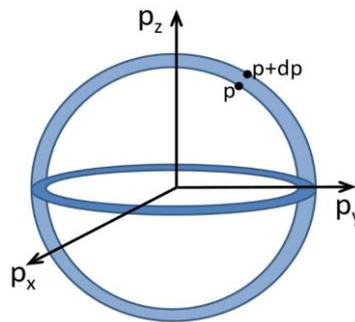


Рис. 3. Спектра β -распада меди-64

Объем сферической оболочки можно оценить, умножив площадь сферы на толщину. Итак, для частиц без спина удовлетворяем: $\Omega = 4\pi p^2 dp$. Однако электроны имеют $s = \pm 1/2$ спина, а нейтрино $s = \pm 1/2$ спин. Следовательно, в импульсном пространстве этих двух объектов будут две ориентации $p_e = \pm 1/2\hbar$ и $p_\nu = \pm 1/2\hbar$. Следовательно, число квантовых состояний частиц, нормализованных рамкой, соответствует :

$$\rho_e = L^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{4\pi p^2}{h^3} dp \quad (1.7)$$

$$\rho_\nu = L^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{4\pi q^2}{h^3} dq \quad (1.8)$$

Где L - нормализованная длина ящика, p - импульс электрона, q - импульс нейтрино и h - постоянная Планка. Константа нормализации бокса появляется здесь, потому что при вычислении плотности квантового состояния необходимо интегрировать фазовое пространство. Результатом

интегрирования в координатном пространстве является нормализованный объем $L^{3/2}$.

Плотность квантового состояния конечного состояния :

$$\rho(E_{fi}) = \frac{\Omega_e \Omega_\nu}{\Omega_0^2} = L^3 \frac{16\pi^2 p^2 q^2}{h^6} dpdq \quad (1.9)$$

У нас:

$$E + E_\nu = E_m$$

То есть максимальная энергия электрона равна сумме энергии электрона и энергии нейтрино, а E_m измеряется экспериментально. Возьмись дифференциал приведенной выше формулы, чтобы получить :

$$dE = -dE_\nu.$$

Если масса нейтрино равна нулю, то :

$$E_\nu = cq; dE_\nu = cdq$$

получим:

$$dE = -cdq$$

Подставить в формулу вместо q :

$$q = (E_m - E)/c$$

Таким образом, (8) в результате:

$$\rho(E_{fi}) = \frac{16\pi^2}{h^6 c^3} L^3 p^2 (E_m - E)^2 dp \quad (1.10)$$

Приведенная выше формула вычисляется из фазового пространства, поэтому ее также называют "фактором фазового пространства" или "фазовым коэффициентом". Эта формула применима при любых условиях, поскольку плотность состояний электронов и нейтрино не требует дополнительных условий для коррекции. В то же время нормированная по квадрату волновая функция равна :

$$\psi_e = L^{-\frac{3}{2}} \exp(i\vec{k}_e \vec{r}) \quad (1.11)$$

При $r = 0$, $\psi_e = \psi_\nu = L^{-3/2}$.

Наконец-то получите шанс на распад:

$$I(p)dp = \frac{g^2 |M_{if}|^2}{2\pi^3 \hbar^7 c^3} (E_m - E)^2 p^2 dp \quad (1.12)$$

Согласно соотношению между импульсом и энергией:

$$E^2 = m_e^2 c^4 + p^2 c^2 \quad (1.13)$$

Получаем выражение, согласно которому энергия является независимой переменной:

$$I(E)dE = \frac{g^2 |M_{if}|^2}{2\pi^3} (E_m - E)^2 \sqrt{E^2 - 1} \cdot E dE \quad (1.14)$$

Константа слабого взаимодействия g является постоянной; и матричный элемент $|M_{if}|^2$ не меняется очень резко с энергией β -частиц, которую здесь также можно рассматривать как постоянную. Можно получить следующую формулу:

$$I(E)dE \sim (E_m - E)^2 \sqrt{E^2 - 1} \cdot E dE \quad (1.15)$$

Называем эту часть, которая оказывает наиболее непосредственное влияние на энергетический спектр, термином “фазовое пространство”. Это статистический результат, который вычисляется с использованием концепции термодинамики и статистической физики “фазовое пространство”.

$$\text{фазовое пространство} = (E_m - E)^2 \sqrt{E^2 - 1} \cdot E \quad (1.16)$$

В большинстве вводной литературы по β -распаду используется метод оценки элементов матрицы перехода с помощью плоских волн, описанный выше. Недостатком этого метода является не только то, что не вводится электромагнитное взаимодействие, но и то, что не вводятся релятивистские эффекты. Фактически, электронная радиальная релятивистская волновая функция используется в теории β -распада. В отсутствие электромагнитного воздействия волновая функция является решением радиального уравнения Дирака при нулевой потенциальной энергии и представляет собой сферическую функцию Бесселя.

В 1935 году Konopinski и Unlenbeck написали аналитическую форму функции Ферми F_0 в кратком изложении β -распада, а затем обсудили ее на этой основе. Коррекция волновой функции была введена в 1963 и 1971 годах,

соответственно, в соответствии с различными математическими методами, была введена задача о конечном ядерном объеме, и было внесено несколько изменений.

1.4 Влияние распределения заряда на вероятность распада

В этом параграфе основное внимание будет уделено описанию формул корректирующего члена при различных распределениях заряда. Взаимосвязь между поправками является постепенной. И каждый поправочный член будет умножен на окончательную формулу вероятности распада.

1.4.1 Атомная модель I - точечное распределение заряда

Учитывая влияние электромагнитного взаимодействия на вероятность распада, дана функция Ферми. Этот термин очень сложен, потому что релятивистская волновая функция электронов, то есть решение уравнения Дирака, очень сложна.

При точечном заряде мы рассматриваем уравнение Дирака зеркального отражения :

$$\begin{aligned} \frac{df}{dr} &= \frac{\kappa - 1}{r} f - (W - 1 - V)g \\ \frac{dg}{dr} &= (W - V + 1)f - \frac{\kappa + 1}{r} g \end{aligned} \quad (1.17)$$

Могут быть решены следующие результаты[27][5] :

$$\begin{Bmatrix} g_{\kappa} \\ f_{\kappa} \end{Bmatrix} = \pm \left[\frac{W \pm 1}{W} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{|\Gamma(\gamma + iy)|}{\Gamma(2\gamma + 1)} \frac{(2pr)^{\gamma}}{r} e^{\frac{1}{2}\pi y} \begin{Bmatrix} \text{Re}(\Lambda) \\ \text{Im}(\Lambda) \end{Bmatrix} \quad (1.18)$$

Где:

$$\begin{aligned} \Lambda &= (\gamma + iy)e^{i(\eta - pr)} F_1(\gamma + 1 + iy, 2\gamma + 1, 2ipr); \\ y &= \pm \alpha ZW/p; \gamma = \sqrt{1 - (\alpha Z)^2}; \end{aligned}$$

Где R - радиус ядра, определенный экспериментом. α - Постоянная тонкой структуры, равна $1/137$; Z - количество ядерных зарядов; W - максимальное значение энергии β -частиц, определенное экспериментом; p -

импульс β -частиц. Где $F_1(\gamma + 1 + iy, 2\gamma + 1, 2ipr)$ - гипергеометрическая функция.

Если ядро модели распределения точечного заряда претерпевает β -распад, то появление β -частиц должно происходить в начале координат ($r = 0$). Однако результаты расчета волновой функции расходятся в начале координат, поэтому приходится использовать компромиссный метод: используется значение волновой функции с радиусом ядра, определённом экспериментально. Эта операция не имеет физического значения, но результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными результатами по β -спектру.

Определение функции Ферми :

$$F(Z, W, r) \equiv \frac{f_1^2(r) + g_{-1}^2(r)}{2p^2} \quad (1.19)$$

Функция Ферми имеет следующий вид[26]:

$$F_0(W, Z) = 4(2pR)^{2(\gamma-1)} e^{\pi y} \left[\frac{|\Gamma(\gamma + iy)|}{\Gamma(2\gamma + 1)} \right]^2 \#(1.20)$$

Для простоты вычислений Ферми рассматривает ядро как точку с объемом 0, то есть потенциальная энергия является функцией Дирака. С точки зрения распределения заряда, этот результат является результатом ядерного распада точечного распределения заряда.

Использование функции Ферми:

$$I(E)dE = \frac{g^2 |M_{if}|^2}{2\pi^3} F_0(E_m - E)^2 \sqrt{E^2 - 1} \cdot E dE \quad (1.21)$$

Функция Ферми непосредственно умножается на интегральное выражение, и может быть получен β -спектр ядра в качестве модели точечного заряда.

1.4.2 Атомная модель II – равномерное сферическое распределение заряда

В случае равномерного сферического распределения заряда электронная волновая функция не может получить аналитических результатов. Это происходит потому, что уравнение Дирака больше не имеет аналитического решения. Таким образом, ученые пытаются найти последовательное решение, а затем берут первые несколько членов для оценки, так что ошибка, вызванная процессом аппроксимации, может быть как малой, так и пренебрежимо малой.

Функция L_0 имеет следующий вид[28]:

$$L_0(Z, W) = 1 + \frac{13}{60} (\alpha Z)^2 \mp \frac{\alpha Z W R (41 - 26\gamma)}{[15(2\gamma - 1)]} \mp \frac{\alpha Z R \gamma (17 - 2\gamma)}{[30W(2\gamma - 1)]} + a_{-1} \frac{R}{W} + \sum_{n=0}^5 a_n (WR)^n + 0.41(R - 0.0164)(\alpha Z)^{4.5} \quad (1.22)$$

Где:

$$a_n = \sum_{x=1}^6 b_{x,n} (\alpha Z)^x \quad (1.23)$$

Значения параметров a и b можно найти в таблице ниже[28]:

Таблица 1. Для β^- распада параметр ряда в L_0

	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
a_{-1}	0.115	-1.8123	8.2498	-11.223	-14.854	32.086
a_0	-0.00062	0.007165	0.01841	-0.53736	1.2691	-1.5467
a_1	0.02482	-0.5975	4.84199	-15.3374	23.9774	-12.6534
a_2	-0.14038	3.64953	-38.8143	172.1368	-346.708	288.7873
a_3	0.008152	-1.15664	49.9663	-273.711	657.6292	-603.7033
a_4	1.2145	-23.9931	149.9718	-471.2985	662.1909	-305.6804
a_5	-1.5632	33.4192	-255.1333	938.5297	-1641.2845	1095.358

Таблица 2. Для β^+ распада параметр ряда в L_0^*

	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
a_{-1}	0.07010	-2.572	27.5971	-128.658	272.264	-214.925
a_0	-0.002308	0.066463	-0.6407	2.63606	-5.6317	4.0011
a_1	0.07936	-2.09284	18.45462	-80.9375	160.8384	-124.8927
a_2	-0.93832	22.02513	-197.00221	807.1878	-1566.6077	1156.3287
a_3	4.276181	-96.82411	835.26505	-3355.8441	6411.3255	-4681.573
a_4	-8.2135	179.0862	-1492.1295	5872.5362	-11038.7299	7963.4701
a_5	5.4583	-115.8922	940.8305	-3633.9181	6727.6296	-4795.0481

Результат корректирующего термина различен для разных ядер. Поэтому здесь не могут быть сделаны конкретные расчеты.

Использование функции L_0 :

$$I(E)dE = \frac{g^2 |M_{if}|^2}{2\pi^3} F_0 L_0 (E_m - E)^2 \sqrt{E^2 - 1} \cdot E dE \quad (1.24)$$

1.4.3 Атомная модель III - Гауссово распределение заряда

Равномерное сферическое распределение заряда все еще сильно отличается от реальной ситуации с ядром, и следует предложить более точную модель распределения заряда. В существующих исследованиях использовались статистические результаты, такие как распределение Гаусса [29][30]. Что у них общего, так это то, что они приближают модель распределения ядерного заряда к реальности: ядро — это не конкретная различимая сфера, а очень расплывчатая группа зарядов. Приблизительное изображение показано на рисунке ниже:

* 0,066463 в столбце b_2 таблицы 2 и 2,63606 в столбце b_4 таблицы 2 взяты из ошибок рабочего документа D.H.Wilkinson 1993 года, а не из спецификации 1990 года. Данные в исходной таблице равны 0,066463 и 2,83606, что является типографскими ошибками.

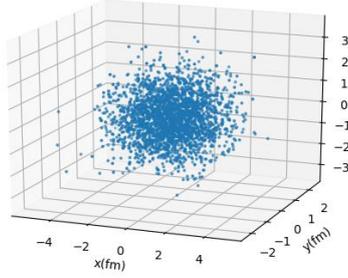


Рис.4. Гауссово распределение заряда

Плотности заряда Гауссово распределение:

$$\rho_{MG}(r) = N_0 \left\{ 1 + A \left(\frac{r}{2} \right)^2 \right\} e^{-(r/a)^2} \quad (1.25)$$

Где:

$$N_0 = \frac{8}{2 + 3A} a^{-3} \pi^{-\frac{1}{2}} \quad (1.26)$$

$$a = R \left[\frac{\frac{5}{2} (2 + 5A)}{2 + 3A} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1.27)$$

Так получим потенциал:

$$V(r) = -\alpha Z \left[\frac{\operatorname{erf}\left(\frac{r}{a}\right)}{r} - \frac{2A}{(2 + 3A)\alpha\sqrt{\pi}} \exp[-(r/a)^2] \right] \quad (1.28)$$

Функция U может быть записан в виде следующей формулы :

$$U(Z, W) \equiv \frac{L'_0}{L_0} \approx 1 + \alpha Z W R \Delta_1 + \frac{\gamma}{W} \alpha Z R \Delta_2 + (\alpha Z)^2 \Delta_3 - (W R)^2 \Delta_4 \quad (1.29)$$

Где:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \frac{4}{3} \Delta v_0 + \frac{17}{30} \Delta v_2 + \frac{25}{63} \Delta v_4 \\ \Delta_2 &= \frac{2}{3} \Delta v_0 + \frac{7}{12} \Delta v_2 + \frac{11}{63} \Delta v_4 \\ \Delta_3 &= \frac{1}{3} \Delta v_0^2 + \frac{1}{15} \Delta v_2^2 + \frac{1}{35} \Delta v_4^2 + \frac{1}{6} \Delta v_2 v_0 \\ &\quad + \frac{1}{9} \Delta v_4 v_0 + \frac{1}{20} \Delta v_4 v_2 + \frac{1}{5} \Delta v_2 + \frac{1}{7} \Delta v_4 \\ \Delta_4 &= \frac{4}{3} \Delta v_0 + \frac{4}{5} \Delta v_2 + \frac{4}{7} \Delta v_4 \end{aligned}$$

Где:

$$v_0 = \sqrt{\frac{5}{2}} \frac{4(1+A)(2+5A)^{1/2}}{\sqrt{\pi}(2+3A)^{3/2}}$$

$$v_2 = -\frac{4}{3(3A+2)\sqrt{\pi}} \left(\frac{5(2+5A)}{2(2+3A)} \right)^{3/2}$$

$$v_4 = \frac{2-7A}{5(3A+2)\sqrt{\pi}} \left(\frac{5(2+5A)}{2(2+3A)} \right)^{5/2}$$

Формула потенциальной энергии разложена в ряд, и информация о волновой функции β -частиц может быть выражена в терминах потенциальной энергии. Можно обнаружить, что, хотя формула U очень сложна, ее независимыми переменными являются только Z и W . Это дает большие преимущества при расчетах. В то же время его результаты применимы не только к определенным ядрам.

Использование функции U :

$$I(E)dE = \frac{g^2 |M_{if}|^2}{2\pi^3} F_0 L_0 U(E_m - E)^2 \sqrt{E^2 - 1} \cdot E dE \quad (1.30)$$

Вывод

В этой главе описан теоретический расчет β -спектра. В соответствии с теорией возмущений квантовой механики и золотым правилом Ферми получена формула для вычисления вероятности перехода квантовой системы. Используя физическую концепцию фазового пространства, вычисляется плотность конечного состояния в формуле. После этого также были обсуждены модели распределения заряда различных ядер, которые состоят из модели точечного распределения заряда, модели равномерного сферического распределения заряда и модели распределения заряда Гаусса. Их влияние на волновую функцию β -частиц выражается поправочными членами F_0 , L_0 и U соответственно. И на конец, в данной главе кратко описан метод их расчета.

Глава 2. Методы вычисления β -спектра

Приведенные выше главы кратко объясняют теорию β -распада и методы расчета для получения точных β -энергетических спектров. Однако, демонстрируя результаты расчетов и сравнивая их с экспериментами, нельзя полагаться только на формулы, и необходимы более удобные методы.

В настоящее время MIT разработал BSG с открытым исходным кодом, который работает в системе Linux, код расчета написан на языке C++ и имеет графический пользовательский интерфейс, работающий на python.

Этот код может быть использован для вычисления энергетического β -спектра, и он сам может обрабатывать такие формулы, как фазовое пространство и функции Ферми, которые могут легко выводить спектральные линии. В этой главе будет рассказано о том, как работает код, и об основной структуре.

2.1 Структура расчетного кода

Хотя этот код включает в себя два языка, он по-прежнему работает в системе Linux. Но логика выполнения кода не является сложной. Весь процесс от ввода до вывода можно представить на рисунке ниже.

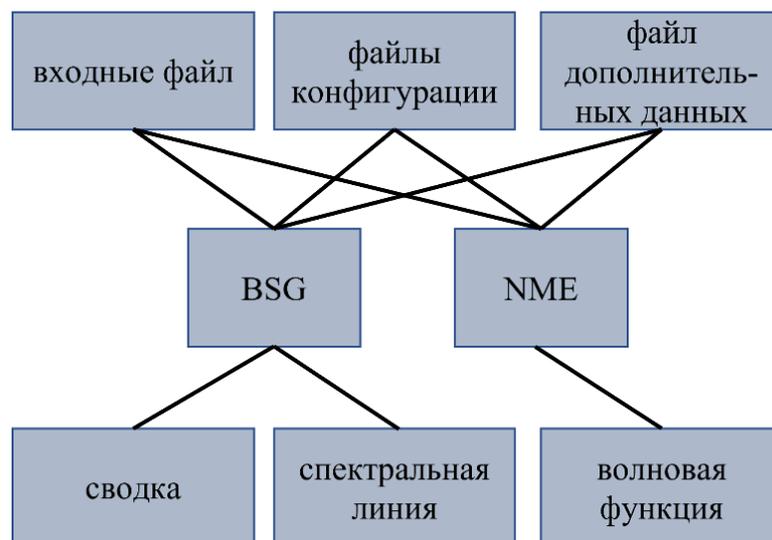


Рис. 5. Структура кода BSG

Необходимыми файлами являются входные файлы, файлы конфигурации и дополнительные файлы данных. После вычисления пакета «BSG», если данных элемента матрицы перехода в программе недостаточно,

будет вызвана программа расчета элемента матрицы перехода «NME», и тогда будут получены три выходных файла: сводка, спектральная линия, волновая функция. Физические эффекты, которые может рассчитать BSG, — это не только эффекты распределения ядерного заряда, но также можно рассчитать влияние ядерных эффектов на энергетический спектр распада. Поскольку в этой работе обсуждается только электромагнитное взаимодействие между β -частицами и атомными ядрами, NME использоваться не будет. Просто для полноты описания кода мы показали и объяснили его здесь.

Исправленный код BSG будет иметь следующую структуру:

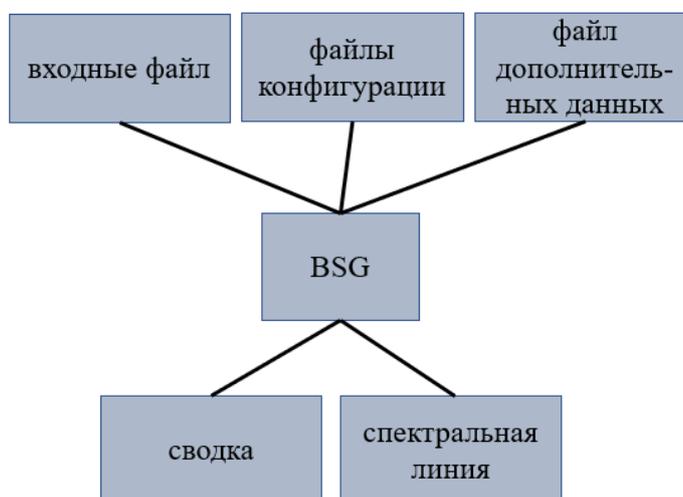


Рис. 6. Структура кода, которая будем использоваться

Ниже показан формат входного файла (возьмем в качестве примера ^{45}Ca), который содержит важную информацию о родительском и дочерних ядрах процесса распада. Например, энергия распада и радиус ядра. Все это является важным содержимым при вычислении кода. Они будут использоваться вместе в этом файле и не требуют ручного управления пользователем.

Входной файл «45Ca.ini»

[Transition]	[Mother]	[Daughter]
Process = B-	Z = 20	Z = 21
Type = Gamow-Teller	A = 45	A = 45

MixingRatio = 0.0	Radius = 3.49	Radius = 3.55
QValue = 255.8	beta2 = 0.0	beta2 = 0.0
	beta4 = 0.0	beta4 = 0.0
	beta6 = 0.0	beta6 = 0.0
	SpinParity = -7	SpinParity = -7

Сам файл состоит не из трех столбцов, а из одного столбца. Чтобы сэкономить место здесь, мы используем для его представления три столбца. Значения beta2, beta4 и beta6 в файле представляют данные о деформации ядра. Поскольку деформация учитывается в коде BSG, вводится информация о деформации. Однако в этой работе обсуждается только модель распределения заряда, а деформация не рассматривается, поэтому они равны 0.

Файл конфигурации и файл дополнительных данных используются для ввода значений физических величин. Они приведены непосредственно в BSG и не требуют изменения.

2.2 Вычисление формул в коде

Общая структура кода BSG была объяснена, но детали его работы все еще нуждаются в представлении. Методы расчета формул, фазовых пространств, функций Ферми F_0 и т.д., упомянутые во введении к теории в коде, будут представлены в этом разделе.

Формула фазового пространства была приведена в теоретическом введении. Чтобы облегчить чтение, запишем формулу еще раз:

$$\text{фазовое пространство} = (E_m - E)^2 \sqrt{E^2 - 1} \cdot E$$

Формула для фазового пространства очень проста, ее нужно только дополнить математическими командами на C++.

Структура кода вычисления фазовое пространство показана на следующем рисунке:

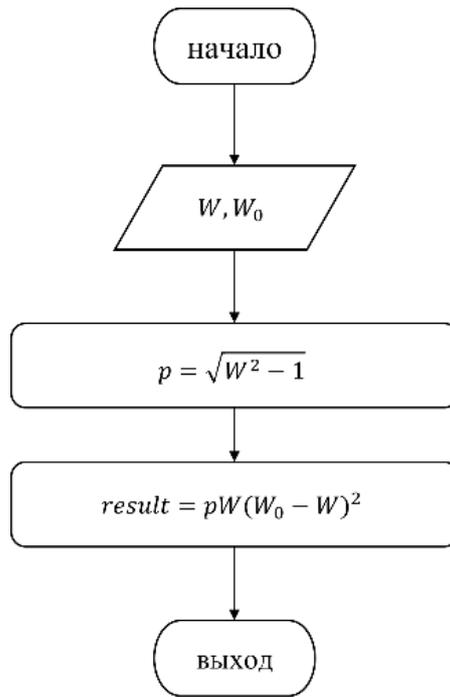


Рис. 7. Процесс вычисления фазового пространства
 Функции Ферми выглядит следующим образом:

$$F_0(W, Z) = 4(2pR)^{2(\gamma-1)} e^{\pi y} \left[\frac{|\Gamma(\gamma + iy)|}{\Gamma(2\gamma + 1)} \right]^2$$

Из формулы функции Ферми видно, что она очень сложная. F_0 включает в себя гамма-функцию комплексных чисел, которая не может быть выполнена с помощью математических команд C++. Для облегчения расчетов необходимо использовать другие базы данных.

Структура кода вычисления функции Ферми показана на следующем рисунке:

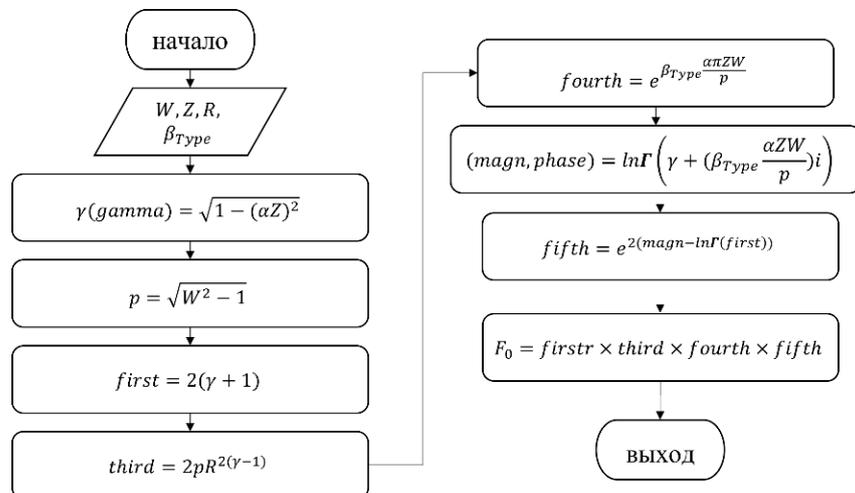


Рис. 8. Процесс вычисления функции Ферми

Формула разбита на пять частей для независимого расчета. Гамма-функция вычисляется с помощью библиотеки gsl. Используется логарифмическая гамма-функция в библиотеке gsl, а возвращаемым значением является абсолютное значение (magn). Вторая часть (second) отсутствует на структурной схеме. Это не ошибка, но для удобства вычисления вторая часть включена в пятую часть (fifth) для вычисления и вывода результата. Подсчитываются все части функции Ферми.

Ферми L_0 выглядит следующим образом:

$$L_0(Z, W) = 1 + \frac{13}{60} (\alpha Z)^2 \mp \frac{\alpha Z W R (41 - 26\gamma)}{[15(2\gamma - 1)]} \mp \frac{\alpha Z R \gamma (17 - 2\gamma)}{[30W(2\gamma - 1)]} + a_{-1} \frac{R}{W} + \sum_{n=0}^5 a_n (WR)^n + 0.41(R - 0.0164)(\alpha Z)^{4.5}$$

Структуры кода вычисления L_0 показаны на следующем рисунке:

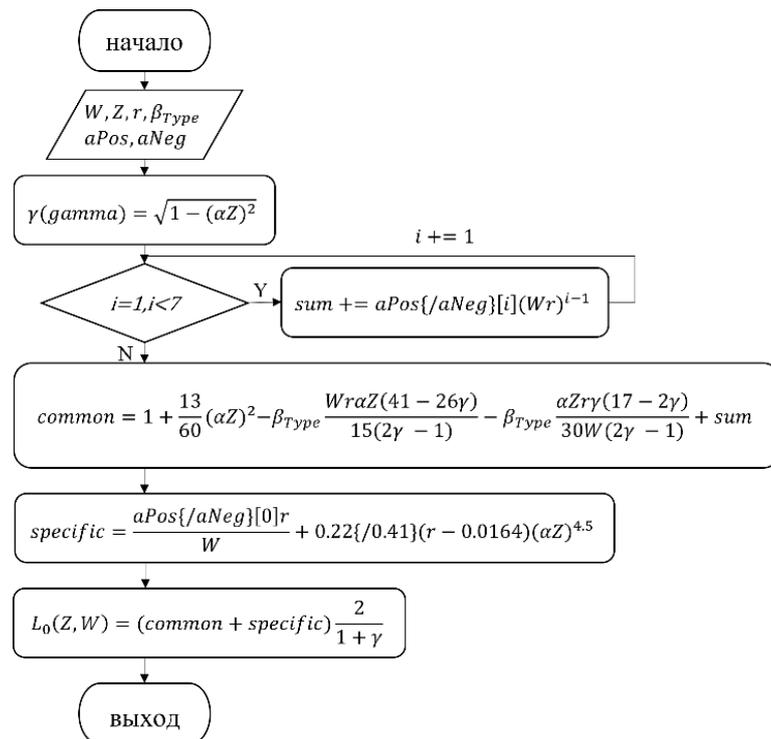


Рис. 7. Процесс вычисления L_0

Можно видеть, что на блок-схеме имеется определение « $i < 7$ », которое использует встроенную информацию таблицы затухания для вычисления циклического определения по формуле L_0 .

Структуры кода вычисления U показаны на следующем рисунке:

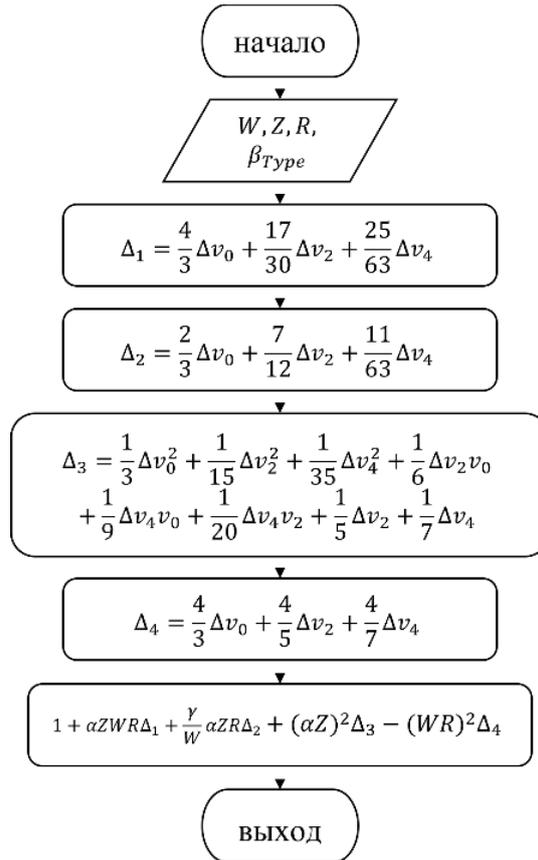


Рис. 8. Процесс вычисления U

Приведенное выше содержимое вычисления вызывается BSG для получения результата спектральной линии.

Вывод

В этой главе описаны методы вычисления β -спектра. Сначала объясняется структура BSG, а затем выделяются некоторые структуры, которые необходимо использовать в этой работе. Затем из блок-схемы кода объясняется процесс вычисления фазового пространства, функции Ферми, формул L_0 и U , а также кодовая база, необходимая для их вычислений.

Глава 3. Результаты вычисления

Использованы β -распады ^{45}Ca , ^{86}Br и ^{106}Ru в качестве примеров расчетов. Были выбраны различные типы распада, различные ядерные радиусы и различные энергии распада, и распад был рассчитан в качестве примера. Обобщено и проанализировано влияние модели распределения плотности ядерного заряда на спектральные линии.

Три ядра, ^{45}Ca , ^{86}Br и ^{106}Ru , с относительно разными массами ядер были выбраны для сравнения важности ядерного объема в разных ядрах в поперечном направлении. В то же время β -спектры этих трех ядер имеют очень важное исследовательское значение: эксперимент по измерению β -спектров ^{45}Ca очень важен и является важным ядром для измерения b_{feriz} , который может помочь изучить взаимодействие сверхстандартных моделей. Бета-распад ^{86}Br широко используется в ядерных реакторах, поскольку он обладает очень высокой энергией распада и морфология его спектральных линий также очень характерна. ^{106}Ru является хорошим источником излучения частиц и имеет определенное применение в медицине.

3.1.1 Результаты вычисления $^{45}\text{Ca} \rightarrow ^{45}\text{Sc}$

Взяв в качестве примера ядро $^{45}\text{Ca} \rightarrow ^{45}\text{Sc}$, можно задать функцию Ферми (точечное распределение заряда) и L_0 и U . Результат показан на рисунки.

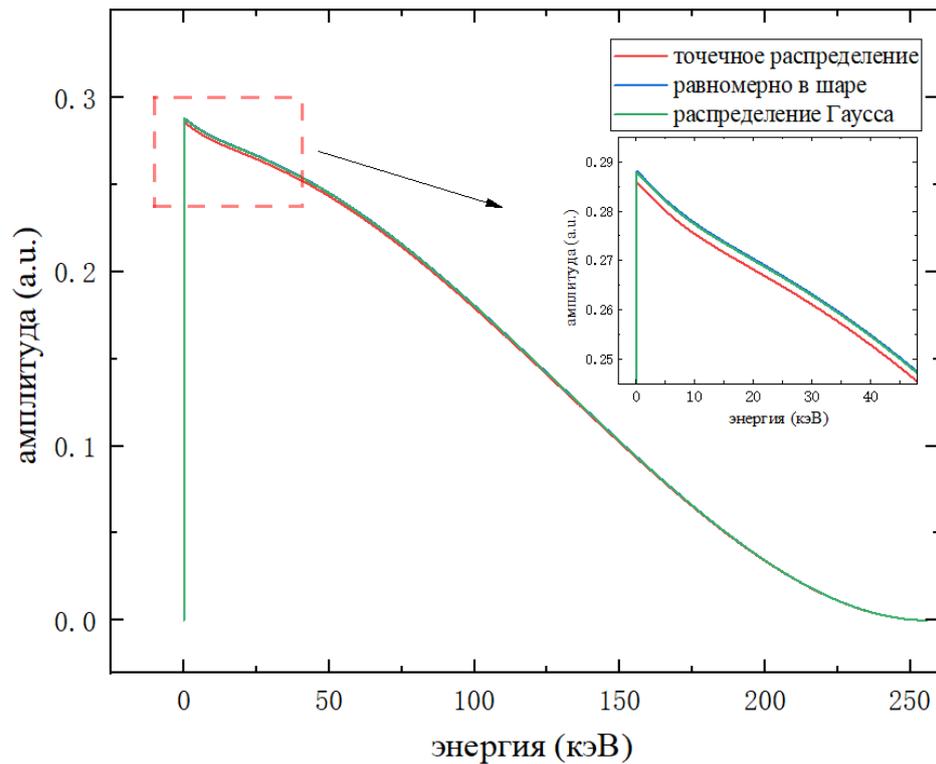


Рис. 9. Теоретический расчет энергетического спектра распада $^{46}\text{Ca} \rightarrow ^{45}\text{Sc}$, точечное распределение - функция Ферми F_0 ; равномерно в шаре – L_0 ; Распределение Гаусса - модель ядерного заряда распределения Гаусса (U)

Хорошо видно, что график спектральной линии имеет большое значение в области низких энергий. Абсолютное значение ординаты не имеет значения, поскольку вероятность распада не является ни математически, ни физически необходимой для нормализации. В то же время формулы L_0 и U практически не влияют на форму спектральной линии (то есть они не изменяют кривой), но они существенно изменяют долю вероятности затухания.

3.1.2 Результаты вычисления $^{106}\text{Ru} \rightarrow ^{106}\text{Rh}$

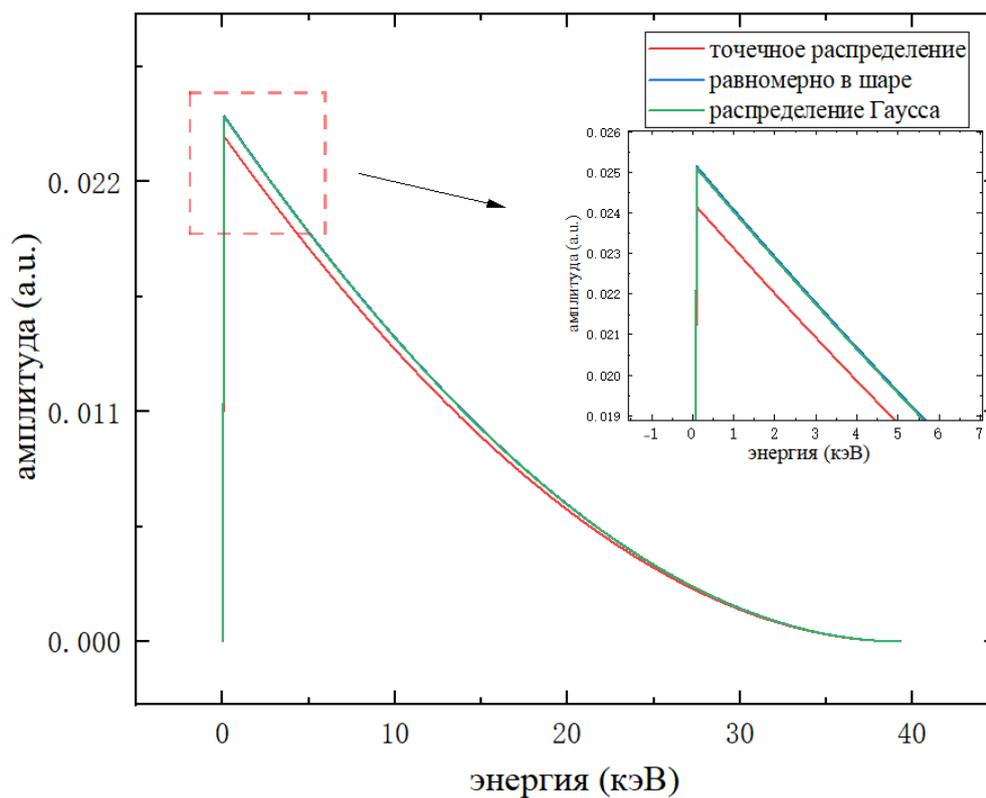


Рис. 10 . Теоретический расчет энергетического спектра распада $^{106}\text{Ru} \rightarrow ^{106}\text{Rh}$, Ферми - функция Ферми F_0 ; Конечный размер – L_0 ; Распределение заряда - модель ядерного заряда распределения Гаусса (U)

3.1.3 Результаты вычисления $^{86}\text{Br} \rightarrow ^{86}\text{Kr}$

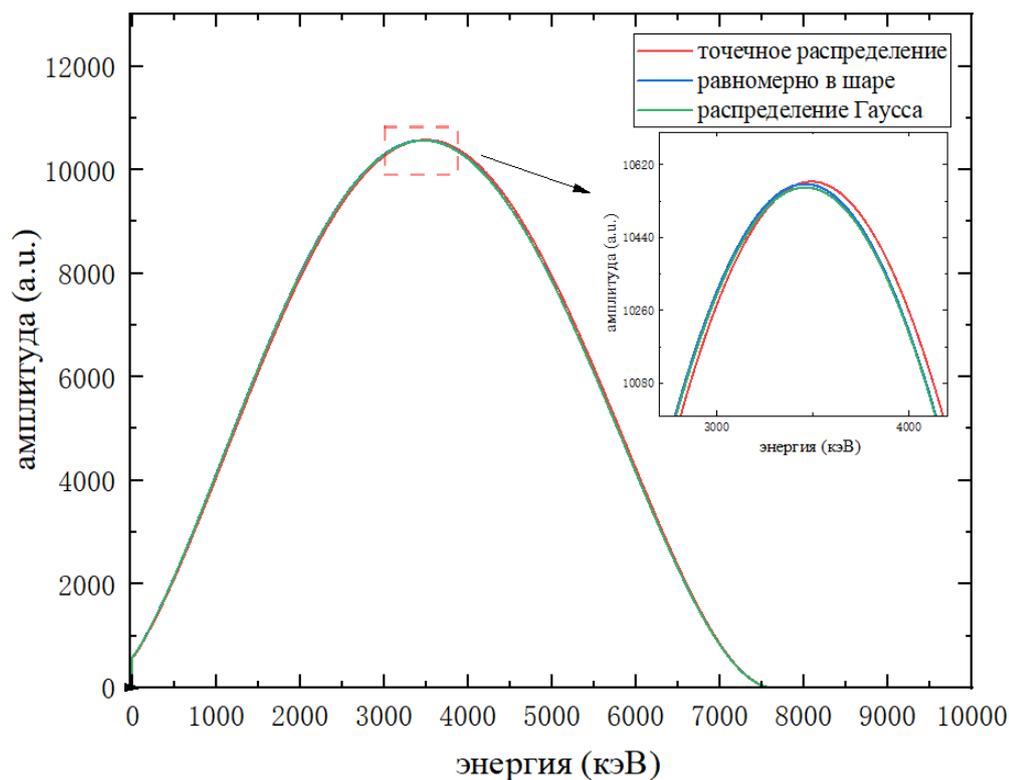


Рис. 11. Теоретический расчет энергетического спектра распада $^{86}\text{Br} \rightarrow ^{86}\text{Kr}$, Ферми - функция Ферми F_0 ; Конечный размер – L_0 ; Распределение заряда - модель ядерного заряда распределения Гаусса U

В целом, распределение ядерного заряда оказывает наиболее очевидное влияние на энергетический спектр низкоэнергетической области. Влияние объема ядра может значительно увеличить вероятность низкоэнергетического β -распада.

Вывод

В работе описан процесс β -распада и рассчитана формула для вероятности распада. На основе различных моделей распределения атомов и зарядов обсуждаются условия коррекции β -распада. И в конце описывается метод реализации кода МПТ. Более тонкое распределение ядерного заряда увеличит вероятность распада в низкоэнергетических областях энергетического спектра.

Модель ядра точечного распределения заряда имеет наименьшую вероятность перехода в результате расчета. Вероятность перехода, соответствующая модели распределения Гаусса, ненамного больше, чем вероятность равномерного сферического распределения в области низких энергий. Из этого можно сделать вывод, что объем распределения основного заряда ядра очень важен. И при необходимости ядро может быть упрощено до сферы с равномерно распределенным зарядом, чтобы рассчитать вероятность β -распада.

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение

Темой настоящей ВКР является: Исследование свойства бета-распада атомных ядер на основе микроскопической плотности заряда. В этой работе представлена модель распределения ядерного заряда, использовавшаяся для изучения β -распада. Энергетический спектр β -распада при различных моделях распределения заряда был рассчитан с помощью пакета BSG, который работает в системе Linux. Получена степень влияния различных моделей распределения заряда атомных ядер на β -линии.

В процессе поиска источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов, оценка коммерческой ценности работы является необходимым условием. Помимо превышения технических параметров над предыдущими разработками необходимо понимать коммерческую привлекательность научного исследования.

Целью выполнения финансово-экономической части выпускной квалификационной работы является формирование навыков оценки результата научной работы и поиск источников финансирования для проведения научного исследования. Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки;
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Потенциальными потребителями результатов исследований являются атомная промышленность или организации, занимающиеся атомной

энергетикой. В каждой области необходимо понимать теоретическую ценность энергии β -распада, чтобы облегчить планирование работы реактора. Это означает, что потребителями являются крупные национальные организации и некоммерческие исследовательские организации.

Для определения группы потребителей, которых может заинтересовать результаты данных научных исследований, необходимо провести сегментирование рынка.

Выбранные основные характеристики потребителей сегмента:

Месторасположение – регионы с развитыми отраслями тяжелой промышленности (ядерная энергетика).

Отношение к услуге – готовность внедрять новые технологии в технологический процесс.

Принцип закупок - компания, которая оказывает услуги по техническим закупкам.

Поскольку этот проект содержит только теоретические расчеты, можно сказать, что конечные результаты являются общедоступными академическими результатами, и для этой цели не может быть подана заявка на патентную защиту. Таким образом, это не связано с очевидной конкуренцией на рынке и проблемами закупок компании.

4.2 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения.

4.2.1 SWOT – анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта.

Сильные стороны – это факторы, которые характеризуют конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта.

Указывают на отличительное преимущество проекта или ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей.

Возможности включают в себя предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза – это любая нежелательная ситуация, тенденция или изменение в условиях окружающей среды проекта, которая имеет разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

SWOT-анализ можно осуществить и представить в виде интерактивной матрицы работы, таблица 2, а также результирующих таблиц возможностей и угроз НИР, таблицы 3.

Каждый фактор таблицы 2 помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» / «-».

Таблица 3. Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	+	0
	B2	+	+	+	-
	B3	-	-	-	0

Таблица 4. SWOT-анализ

	Сильные стороны проекта: С1. Актуальность.	Слабые стороны
--	---	----------------

	<p>С2. Применение современного оборудования.</p> <p>С3. Квалифицированный персонал.</p> <p>С4. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.</p>	<p>проекта:</p> <p>Сл1. Высокая стоимость.</p> <p>Сл2. Малый круг потребителей.</p> <p>Сл3. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.</p> <p>Сл4. Отсутствие прототипа научной разработки.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p>В2. Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые при научных исследованиях.</p> <p>В3. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»:</p> <p>1. Обеспечение условий для создания кадров в области создания пористых структур для медицинского применения.</p> <p>2. Появление дополнительного спроса и финансирования, обеспеченных актуальностью тематики.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»:</p> <p>1. Необходимо финансирование на модернизацию, что возможно реализовать в условиях вуза.</p> <p>2. Расширение круга потребителей путем модернизации системы.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p>У2. Развитая конкуренция технологий производства.</p> <p>У3. Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»:</p> <p>1. Благодаря возможностям системы своевременному финансированию продвижение на рынок может стать успешным.</p> <p>2. Повышение конкурентоспособности после модернизации разработки.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»:</p> <p>1. Относительно высокая стоимость, и ограниченный круг потребителей может вызвать низкий спрос со стороны заказчиков.</p>

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта. Приведённый анализ показал, что технология, находясь на этапе разработки, имеет хорошие шансы на коммерциализацию, с учетом проявляемого интереса партнеров и удачных исследований. При этом если переход разработки в стадию коммерциализации затянется, то возможна потеря спроса на готовую технологию.

4.3 Планирование научно-технического исследования

В данном разделе составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и проведено распределение исполнителей по видам работ. Планирование комплекса предполагаемых работ осуществлялось в следующем порядке:

- разработка задания;
- теоретические исследования;
- составление порядка эксперимента, выбор технических режимов;
- изготовление исследуемых образцов;
- изготовление подготовка исследуемых образцов к исследованиям;
- экспериментальные исследования;
- оценка результатов экспериментов;
- оформление отчёта по ВКР;
- подготовка к защите ВКР.

Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 5.

Таблица 5. Распределение исполнителей и этапы выполняемых работ

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы

Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель (дипломник)
	3	Проведение патентных исследований	Руководитель (дипломник)
	4	Выбор направления исследований	дипломник
	5	Календарное планирование работ по теме	дипломник
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель (дипломник)
	7	Написание компьютерных программ	дипломник
	8	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель

Данная таблица отображает вклад каждого участника исследовательской работы. Наибольшая часть работы приходится на дипломника.

4.3.1 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

С целью определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости используем следующую формулу:

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}, \quad (5.2)$$

где $t_{ож}$ – ожидаемая трудоёмкость выполнения работы, чел.дн.; t_{min} – минимально возможная трудоёмкость выполнения работы, чел.дн.; t_{max} – максимально возможная трудоёмкость выполнения работы, чел.-дн. Оценка трудоёмкости выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 43 + 2 \cdot 91}{5} = 62.2 \text{ чел. - дн.}$$

Трудоёмкость выполнения научного исследования для сотрудника – техника:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 6 + 2 \cdot 18}{5} = 10.8 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Трудоёмкость выполнения научного исследования для лаборанта:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 61 + 2 \cdot 129}{5} = 88.2 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Далее определим продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями, по следующей формуле:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож_i}}{Ч_i} \quad (5.3)$$

где T_{di} – продолжительность одного этапа работы, раб.дн.; $t_{ож_i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.; $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Произведем длительно работ в рабочих днях.

Расчёт продолжительности работы выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{K_{вн}} \cdot K_d = \frac{62.2 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 62.2 \text{ раб.дни}$$

Продолжительность работы выполнения научного исследования для сотрудника-техника:

$$T_{рд} = \frac{10.8 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 10.8 \text{ раб.дни}$$

Продолжительность работы выполнения научного исследования для лаборанта:

$$T_{рд} = \frac{88.2 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 88.2 \text{ раб.дни}$$

Ленточный график проведения научных работ изображается в форме диаграммы Ганта. Для построения диаграммы необходимо перевести рабочие дни в календарные дни, для чего воспользуемся следующим соотношением:

$$T_{\text{кд}} = T_{\text{рд}} \cdot T_{\text{к}}, \quad (5.4)$$

где $T_{\text{кд}}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях; $T_{\text{к}}$ – коэффициент календарности, определяющийся выражением 4.4.

$$T_{\text{к}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вд}} - T_{\text{пд}}}, \quad (5.5)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году; $T_{\text{вд}}$ – количество выходных дней в году; $T_{\text{пд}}$ – количество праздничных дней.

Рассчитаем коэффициент календарности по формуле 4.4:

$$T_{\text{к}} = \frac{365}{365 - 66} = 1.22$$

Построим таблицу по результатам расчётов, в которой укажем трудоёмкости работ, название работы, а также укажем длительность работ в рабочих и календарных днях, таблица 6.

Таблица 6. Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ									Длит. работ в раб. дни			Длит. работ в кален. дни		
	t _{min} , чел.-дн			t _{max} , чел.-дн			t _{ож} , чел.-дн			Трд			Ткд		
	НР	СТ	ЛАБ	НР	СТ	ЛАБ	НР	СТ	ЛАБ	НР	СТ	ЛАБ	НР	СТ	ЛАБ
Составление и утверждение технического задания	2	-	-	4	-	-	2.8	-	-	2.8	-	-	3.4	-	-
Подбор и изучение материалов по теме	10	-	10	21	-	30	14.4	-	18	14.4	-	18	17.6	-	21.96
Проведение патентных исследований	5	-	7	8	-	15	6.2	-	10.2	6.2	-	10.2	7.6	-	12.4
Выбор направления исследований	3	-	5	4	-	7	3.4	-	5.8	3.4	-	5.8	4.2	-	7.1
Календарное планирование работ по теме	2	-	3	3	-	4	2.4	-	3.4	2.4	-	3.4	2.9	-	4.2
Проведение теоретических расчетов и обоснований	4	-	7	6	-	10	4.8	-	8.2	4.8	-	8.2	5.9	-	10
Проведение экспериментов	5	5	5	15	15	15	9	9	9	9	9	9	11	11	11
Определение целесообразности проведения ОКР	3	-	3	7	-	7	4.6	-	4.6	4.6	-	4.6	5.6	-	5.6
Итого	43	6	61	91	18	129	62.2	10.8	88.2	62.2	10.8	88.2	75.9	13.2	107.6

На основе таблицы 6, построим календарный план-график. График построим для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта, с разбивкой по месяцам и декадам за период времени дипломирования. Отметим области в зависимости от исполнителей, ответственных за конкретную работу, таблица 7.

Таблица 7 – Календарный план-график (график Ганта) проведения НИОКР

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ														
				январь	февраль			март			апрель			май			июнь	
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы	4.88															
2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель	25.6															
		Лаборант (дипломник)	36.6															
3	Проведение патентных исследований	Руководитель	9.8															
		Лаборант (дипломник)	18.3															
4	Выбор направления исследований	Руководитель	4.9															
		Лаборант (дипломник)	8.5															
5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	3.7															
		Лаборант (дипломник)	4.9															
6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель	7.3															
		Лаборант (дипломник)	12.2															
7	Составление порядка эксперимента,	Руководитель	3.7															
		Лаборант (дипломник)	4.9															

Таким образом, в ходе данного этапа работы были определены длительности и обозначены сроки выполнения всех запланированных видов работ. Была построена диаграмма Ганта, демонстрирующая этапы выполнения проекта участниками.

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей, а также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из исполнителей.

4.4 Бюджет научного исследования

4.4.1 Расчет материальных затрат НИИ

В данном разделе составлен полный бюджет научных исследований. Расходы научных исследований состоят из материальных затрат, расходов на специальные оборудования, основной и дополнительной заработной платы, социальные отчисления и накладные расходы.

В статью расходов входят затраты на приобретение материалов, комплектующих изделий, необходимых для выполнения работ по данному научному исследованию. В таблице 8 приведены расходы по данной статье.

Таблица 8. Сырье, материалы, комплектующие изделия

Наименование	Марка, размер	кл-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Виртуальная машина для Linux	программа		Бесплатный	0

Всего за материалы	0
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)	0
Итого по статье	0

4.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

В рамках выполнения исследования использовалось имеющееся в собственности ИФПМ СО РАН оборудование, и закупка дополнительного специального оборудования не производилась. В таком случае затраты на специальное оборудование отсутствуют. Однако в ходе эксплуатации оборудования средства были затрачены в соответствии с амортизационными отчислениями. Расчет амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов.

$$H_A = \frac{1}{n} = 0,1, \quad (5.6)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет

Амортизация:

$$A_M = \sum \frac{I \cdot H_A}{12} = 19507 \text{ рублей}$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.; – время использования, мес. M

Таблица 9. Амортизационные расходы

Наименование оборудования	Ст-ть, руб.	Срок полезного исп., лет	А, %	Время исп., мес.	Амортизационные расходы, руб
компьютер	100000	10	0	4	3333
Итого:					3333

4.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

Основная заработная плата работников вычисляется по формуле:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (5.7)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата; $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20% от $Z_{осн}$).

Основная заработная плата одного работника:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \quad (5.8)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.; $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывалась по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot M}{F_d} \quad (5.9)$$

где Z_M – месячный должностной оклад работника, руб; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

В таблице 10 представлен годовой баланс рабочего времени для 6-дневной рабочей недели, в таблице 11 представлен расчет основной заработной платы.

Таблица 10. Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Дни
Календарные дни	365
Нерабочие дни (праздники/выходные)	66
Потери рабочего времени (отпуск/невыходы по болезни)	47
Действительный годовой фонд рабочего времени	252

Таблица 11. Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб/мес	Среднедневная ставка, руб/раб. день	Затраты времени, раб. дни	Фонд, з/платы, руб
Научный руководитель	26116	1077.8	62.2	67039.16
Лаборант (дипломник)	-	-	88.2	-
Итого				67039.16

По данным таблицы 11 получены данные по затратам на заработную плату сотрудников за весь период ВКР.

4.4.4 Расчет затрат на электроэнергию

Потребляемая мощность анализатора составляет 7 кВт/час. Длительность еженедельной работы на комплексной технологической установке составляет 2

часа. Стоимость электроэнергии в Томске составляет 5.748 рубля за 1 кВт/час.

Стоимость электропотребления за 5 месяцев рассчитывается по формуле:

$$C_{эл.об.} = P_{об} \cdot Ц_{э} \cdot t_{об}, \quad (5.12)$$

где $P_{об}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт; $Ц_{э}$ – тариф на 1 кВт·час; $t_{об}$ – время работы оборудования, час.

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 12.

Таблица 12. Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Время работы оборудования	Потребляемая мощность $P_{об}$, кВт	Затраты $C_{эл.об.}$, руб.
Персональный компьютер	655	0.3	1127,91
Итого			1127.91

4.4.5 Расчет затрат на научные и производственные командировки и накладные расходы

Затраты на научные и производственные командировки исполнителей определяются в соответствии с планом выполнения темы и с учетом действующих норм командировочных расходов различного вида и транспортных тарифов, а также организационных взносов на конференции. Расчеты по данному пункту представлены в таблице 13.

Таблица 13. Расчета на научные и производственные командировки

Наименование мероприятия	Оплата, руб
Конференция «Перспективы развития	0

фундаментальных наук XVIII)	
Итого: 0 руб.	

4.5 Ресурс эффективность

Определение эффективности происходит на основе расчёта интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух величин: финансовой эффективности и ресурс эффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трёх вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчёта, с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Однако, хотя теоретические расчеты, предложенные в этой работе, могут помочь ученым лучше понять распределение энергии в ядерных реакторах и повысить эффективность науки и техники, сами по себе результаты теоретических расчетов экономически неэффективны. Это не значит, что данный проект не имеет никаких экономических выгод, но в рамках данной модели данный проект неприменим. Что касается теоретической работы, то нам, возможно, следует обратить внимание на необходимость самого этого проекта.

Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент» был выполнен анализ конкурентоспособности. Проведён SWOT-анализ проекта, в ходе которого были выявлены потенциальные внутренние и внешние сильные и слабые стороны, возможности и угрозы. Из анализа выяснили, что потенциальных сильных сторон у проекта больше, чем слабостей, что свидетельствует о перспективности исследования. Сильными сторонами можно назвать то, что технология является экономичной, энергоэффективной и экологичной, имеет маленький срок готовых результатов при проведении научного исследования и имеет квалифицированный персонал. К слабым сторонам можно отнести отсутствие прототипа научной разработки, Недостаток финансовых средств, большой срок поставок материалов и комплектующих, используемых при проведении научного исследования.

При планировании научно-исследовательской работы был произведен подсчет затратам на специальное оборудование для научной работы (19507 руб.), затратам по основной заработной плате исполнителей тем (72859,28 руб.). Всего бюджет составил 48906,96 руб.

Требуются только затраты по основной заработной плате исполнителей, а также очень небольшое количество затрат на электроэнергию и амортизацию оборудования. Теоретическая модель проекта имеет высокие перспективы использования, может быть широко использована в модели оценки энергии

ядерных реакторов, а также может послужить ориентиром для теоретических исследований β -распада.

Проведение такого рода оценки коммерческой ценности необходимо, чтобы оценить состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Глава 5. Социальная ответственность

Объектом исследования является энергетический спектр бета-распада атомных ядер.

Исследование выполнялось в компьютерном зале Цзилиньского университета (КНР). Размеры помещения: высота 4 м, ширина 3.5 м, длина 3 м, площадь 42 м³. Рабочее оборудование для проведения исследования – персональный компьютер.

В процессе проведения исследования рассчитывали энергетический спектр бета-распада в системе Linux с использованием персонального компьютера.

С целью оценки степени безопасности исследования свойствах бета-распада атомных ядер на основе микроскопической плотности заряда в данном разделе ВКР необходимо рассмотреть правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности; потенциальные вредные и опасные факторы и способы снижения их воздействия; экологическую безопасность научного проекта, а также вопросы безопасности в чрезвычайных ситуациях.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

Организации должны соблюдать требования трудового кодекса Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ[31].

Согласно данному документу, нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, в данном случае продолжительность рабочей недели составляет шесть дней. Как следствие, применяется следующий режим работы: с понедельника по пятницу 7 часов в

день, в субботу 5 часов в день. Оплата труда производится в размере не ниже уровня МРОТ, и нормы труда установлены в соответствии с уровнем техники, технологии, организации производства и труда.

Компенсации и гарантии регламентируются в трудовом кодексе Российской Федерации [31], в локальных нормативных актах, в коллективном договоре и трудовом договоре.

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рабочее место располагается в подвале в компьютерном зале (Цилинский университет, КНР). Размеры помещения: высота 4 м, ширина 3.5 м, длина 3 м, площадь 42 м³. Рабочее оборудование персональный компьютер.

При проведении исследования инженер находится в положении стоя или сидя. Следовательно, при организации рабочего места исследователя требуется соблюдение нормативов ГОСТ 12.2.032-78 [32] и ГОСТ 12.2.033-78 [33].

Компьютерный зал оснащен отоплением и вентиляцией. Для отделки помещений используют диффузно-отражающие материалы. Поверхность пола соответствует следующим требованиям: ровность, удобство для очистки, наличие антистатических свойств, отсутствие выбоин. В помещении держат аптечку первой медицинской помощи и огнетушитель. Расположение рабочего стола обеспечивает удобство работы за ним и дает возможность осмотра, а также ремонта находящегося на нем оборудования.

5.2 Производственная безопасность

Исследование выполнялось в компьютерном зале Цзилиньского университета (КНР). Размеры помещения: высота 4 м, ширина 3.5 м, длина 3 м, площадь 42 м³. Рабочее оборудование – персональный компьютер.

Для идентификации потенциальных факторов использован ГОСТ 12.0.003-2015 [34]. Перечень выявленных возможных опасных и вредных факторов представлен в таблице 14.

Таблица 14 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	аэра ботк	згот овле	кспл уата	
1. Анализ электробезопасности <ul style="list-style-type: none"> • наличие электроисточников, характер их опасности; • установление класса электроопасности помещения, а также безопасные номиналы тока, напряжения, сопротивления заземления, уровня шума 				ГОСТ 12.1.003-2014 [5] СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [6] ГОСТ 12.1.029-80. ССБТ [7]
2. Отклонение показателей микроклимата				ГОСТ 12.1.005-88 [8] ГОСТ 12.1.007-76. ССБТ [9] СанПиН 1.2.3685-21 [10] ГОСТ 12.4.011-89 [11]
3. Анализ электробезопасности				ГОСТ 12.1.038-82 [12] ГОСТ Р 12.1.019-2009 [13]
4. Анализ освещенности рабочей зоны				СанПиН 1.2.3685-21 [10]

5.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

5.2.1.1 Анализ показателей шума

Гигиенические нормативы по шуму устанавливаются национальным законодательством [35].

В таблице 5.2 показаны допустимые уровни шума представленные в Санитарных нормах [36].

Таблица 15 – Предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах для трудовой деятельности разных категорий тяжести и напряженности в дБА

Категория напряженности трудового процесса	Категория тяжести трудового процесса				
	легкая физическая нагрузка	средняя физическая нагрузка	тяжелый труд 1 степени	тяжелый труд 2 степени	тяжелый труд 3 степени
Напряженность легкой степени	80	80	75	75	75
Напряженность средней степени	70	70	65	65	65
Напряженный труд 1 степени	60	60	-	-	-
Напряженный труд 2 степени	50	50	-	-	-

Работа исследователя в компьютерном зале относится к категории работ с легкой степенью напряжённости и с легкой физической нагрузкой. Для рабочих мест таких работников предельно допустимый уровень шума составляет 80 дБА.

Длительное воздействие шума является причиной возникновения определенных заболеваний нервной системы.

С воздействием шума, превышающего норму, связано повышение артериального давления, снижение слуха, и т. п. [44]. Показатели уровня шума в компьютерном зале соответствуют нормативам.

При превышении норм по шуму нужно принимать меры по снижению уровня шума и защите работников от его воздействия в соответствии с [37], используя в том числе такие меры, как:

- применение противошумных наушников;
- оборудование акустических экранов;

Кроме того, необходимо рационально размещать рабочие места, а также создавать шумозащищенные зоны.

5.2.1.2 Анализ показателей микроклимата

Показателями микроклимата производственных помещений называются температура и относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха [45].

В таблице 5.3 обозначены оптимальные и допустимые показатели микроклимата в рабочей зоне помещения для категории работ «Легкая Ia» по ГОСТ 12.1.005-88 [38].

Влажность воздуха влияет на терморегуляцию организма: с высокой влажностью связано затруднение терморегуляции, слишком низкая влажность приводит к пересыханию слизистой оболочки дыхательных путей.

Движение воздуха в значительной степени отражается на самочувствии человека: результатом движения воздуха меньше нормы является головная боль; вследствие движения воздуха больше нормы возможны переохлаждение и простудные заболевания.

Таблица 16 – Требования к микроклимату помещения для категории работ «Легкая Ia»

ери	од	год	Температура, °С	Относите	Скор
-----	----	-----	-----------------	----------	------

						льная влажность, %		ость движения, м/с	
	оптимальная	Д опусти мая				оптимальная	на рабочих местах постоянных и непостоянных, не оптимальная,	не более	на рабочих местах постоянных и
		верхняя граница		нижняя граница					
		на рабочих местах							
	посто- янных	не- посто- янных	пос- тоян- ных	не- посто- янных					
Холод- ный	22- 24	25	26	21	18	40-60	75	0,1	Не более 0,1
Теплый	23- 25	28	30	22	20	40-60	55 (при 28°С)	0,1	0,1- 0,2

Если температуры окружающего воздуха высокие, то это может приводить к перегреву, обмороку, тепловому удару, обезвоживанию. Если температура окружающего воздуха на рабочем месте слишком низкая, то это может приводить к простудным заболеваниям, снижению иммунитета, замерзанию [46].

В компьютерном зале существует опасность, что скорость движения воздуха недостаточна, и исследователи не могут работать в этой среде в течение длительного периода времени.

Для обеспечения соответствия показателей микроклимата требуемым оптимальным и допустимым нормам следует проводить измерение

показателей микроклимата в соответствии с требованиями, представленными в СанПиН 1.2.3685-21 [40].

Чтобы поддерживать требуемые параметры микроклимата в рабочей зоне, используют защиту от источников теплового излучения, систему вентиляции, кондиционирование воздуха, отопление, влажную уборку, увлажнение воздуха.

В компьютерном зале требуется выполнение санитарно-гигиенических, медико-биологических и организационно-технических мероприятий:

- вентиляция и очистка воздуха;
- кондиционирование воздуха;
- локализация вредных факторов;
- отопление;
- автоматический контроль и сигнализация [41].

5.2.1.3 Анализ электробезопасности

Электрический ток рассматривается в качестве повышенного источника опасности. В таблице 17 выделены предельно допустимые значения электрического тока при неаварийном режиме работы электрооборудования [42].

Таблица 17 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов

Род тока	U , В	I , мА
	не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0

Основными источниками поражения электрическим током являются поврежденная проводка, розетка, выключатель и открытые металлические участки электроприборов.

К основным причинам воздействия тока на человека относятся ситуации: 1) человек случайно прикасается или приближается на опасное расстояние к токоведущим частям; 2) в результате повреждения изоляции или ошибочных действий персонала на металлических частях оборудования появляется напряжение; 3) напряжение появляется на отключённых токоведущих частях, где работают люди, в связи с ошибочным включением установки; 4) провод замыкается на землю, в результате чего появляется шаговое напряжение на поверхности земли [47].

Электрический ток оказывает на человека следующие виды воздействия:

1) термическое – приводит к ожогам, нагреву кровеносных сосудов и других органов, вследствие чего в них появляются функциональные расстройства;

2) электролитическое – для электролитического действия тока характерно разложение крови и других органических жидкостей, что приводит к нарушениям их физико-химического состава;

3) механическое – повреждения (разрыв, расслоение и др.) различных тканей организма в результате электродинамического эффекта;

4) биологическое – может являться причиной нарушения и полного прекращения деятельности органов дыхания и кровообращения [48].

Электробезопасность включает следующие технические и организационные средства и мероприятия, предназначенные для обеспечения защиты людей от воздействия тока:

– выполнение электроустановок в соответствии с требованиями электробезопасности;

– использование электрического разделения;

– применение системы защитных проводов; применение электрического разделения сети [48].

5.2.1.4 Анализ показателей освещенности рабочей зоны

Нормы освещения в помещении для работы с персональным компьютером по [40] представлены в таблице 18.

В результате неблагоприятных условий освещения может утомляться зрительный анализатор, снижаться работоспособность, могут появляться профессиональные заболевания [49].

С неблагоприятными условиями освещения связано повышенное утомление и развитие близорукости. Неблагоприятные условия освещения вызывают повышенное утомление и апатию.

Таблица 18 – Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения

Рабочая поверхность и плоскость нормирования КЕО и освещённости (Г – горизонтальная, В – вертикальная) и высота плоскости	Естественное освещение КЕО e_n , %		Совмещённое освещение КЕО e_n , %		Искусственное освещение			
	при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении	при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении	Освещённость, лк		Показатель диска форты, М, не более	Коэффициент пульсации освещённости, КЕО e_n , %, не более
					при комбинированном освещении	при общем освещении		
					сег	т		
					о	обще		
						го		

и над полом, м									
Г-0,8	2.4	1.9	2.0	0,5	397	255	367	37	37

Длительное пребывание в условиях недостаточного освещения способствует световому голоданию и снижению интенсивности обмена веществ в организме.

Для правильного освещения в компьютерном зале необходимо верно выбирать вид освещения, количество и расположение ламп, тип осветительных приборов. Компьютерный зал освещен верхним общим освещением.

Используемое в компьютерном зале освещение обеспечивает достаточную освещенность рабочей поверхности, освещенность стабильная, без блескости и без теней.

5.3 Экологическая безопасность

При написании ВКР вредных выбросов в атмосферу, почву и водные источники не производилось, радиационного заражения не произошло, чрезвычайные ситуации не наблюдались, поэтому не оказывались существенные воздействия на окружающую среду и никакого ущерба окружающей среде не было нанесено.

Объект исследования является теоретическим, но разрабатывается в компьютере. Поэтому с точки зрения влияния на окружающую среду рассмотрим влияние компьютерной техники, использованной при его разработке.

Компьютерная техника потребляет сравнительно небольшое количество электроэнергии, поэтому по затратам на электроэнергию она не оказывает существенной опасности для окружающего мира.

Компьютеры, утратившие потребительские свойства, относятся к IV классу опасности (малоопасные отходы). Обезвреживание и размещение отходов I–IV классов опасности проводятся организациями, имеющими лицензию на осуществление этой деятельности. При неправильной утилизации компьютера может значительно пострадать экология, поэтому предлагается следующий порядок утилизации:

- 1) удаление всех опасных компонентов;
- 2) удаление всех крупных пластиковых частей. Оставшиеся после разборки части отправляют в большой измельчитель, и все дальнейшие операции автоматизированы;
- 3) измельченные в гранулы остатки компьютеров подвергаются сортировке. Сначала с помощью магнитов извлекаются все железные части. Затем приступают к выделению цветных металлов, которых в ПК значительно больше.

Все полученные в ходе переработки материалы могут вторично использоваться в различных производственных процессах.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Под чрезвычайными ситуациями понимаются опасные события или явления, в результате чего нарушается безопасность жизнедеятельности.

К основным причинам возникновения чрезвычайных ситуаций относятся две категории: 1) внешние – стихийные бедствия, неожиданное прекращение подачи электроэнергии, воды, технологических продуктов и т. д.; 2) внутренние – сложность технологий, недостаточная квалификация персонала, проектно-конструкторские недоработки, физический и моральный износ оборудования, низкая трудовая и технологическая дисциплина и т. п.

В компьютерном зале наиболее вероятно возникновение чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного характера. ЧС техногенного характера

называются ситуации, которые возникают в результате производственных аварий и катастроф на объектах; пожаров, взрывов на объектах; загрязнения атмосферы отравляющими веществами. Следствием ЧС техногенного характера могут быть внезапное обрушение зданий и сооружений, нарушение работы энергетических сетей, коммунального жизнеобеспечения, очистных сооружений, технологических линий и т. д.

В случае возникновения ЧС в организации необходимо выполнить следующий комплекс мероприятий: 1) эвакуация; 2) укрытие людей в защитных сооружениях; 3) обеспечение индивидуальными средствами защиты; 4) организация медицинской помощи пострадавшим.

В качестве наиболее распространенной вероятной ЧС в компьютерном зале выделяют пожар.

Помещение для работы за персональными компьютерами по степени пожароопасности относится к классу П-П, так как в нем присутствует пыль во взвешенном состоянии [50].

Причины возникновения пожара могут быть электрического и неэлектрического характера.

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

Причины возникновения пожара неэлектрического характера: халатное, неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня); самовоспламенение и самовозгорание веществ.

Для устранения причин возникновения пожаров в помещении для работы с персональными компьютерами должны проводиться следующие мероприятия: а) сотрудникам необходимо пройти противопожарный инструктаж; б) необходимо знание сотрудниками расположения средств пожаротушения и умение ими пользоваться; в) требуется обеспечить

правильный тепловой и электрический режим работы оборудования;
г) пожарный инвентарь и первичные средства пожаротушения необходимо содержать в исправном состоянии и располагать на видном и легко доступном месте.

Если в организации возник пожар, то после его ликвидации определяется возможность дальнейшего использования оборудования и имеющихся коммуникаций. Исследовательское оборудование, трубопроводы, электрооборудование проверяются на соответствие их состояния нормам пожарной безопасности. В случае отсутствия повреждений можно продолжать работу [51].

Выводы

В результате проведенных исследований в рамках раздела «Социальная ответственность» были изучены правовые нормы трудового законодательства при проведении исследования свойств бета-распада атомных ядер на основе микроскопической плотности заряда.

Проанализированы основные вредные и опасные факторы, которые могут возникать в процессе исследований: показатели микроклимата, уровень шума, освещенность рабочей зоны, значения опасности электрической цепи, потенциальные опасности пожара. Были описаны мероприятия по снижению уровней воздействия данных факторов.

Рассмотрен характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. В процессе выполнения исследования было выявлено, что отходы, полученные в ходе исследований, не оказывали влияние на гидросферу и литосферу. Во избежание загрязнения окружающей среды отходы утилизировались в строгом соответствии с соответствующими документами.

Проанализированы природные и технические чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть в компьютерном зале. Для предотвращения чрезвычайных ситуаций были разработаны превентивные меры, а также разработаны процедуры для обработки помещения после чрезвычайных ситуаций.

Заключение

В процессе выполнения ВКР для достижения цели в работе были определены и решены следующие задачи: приведен литературный обзор по теме ВКР, описан процесс β -распада и предложена формула для характеристики вероятности распада. На основе различных моделей распределения зарядов рассмотрены условия коррекции β -спектров. Приведено описание алгоритма построения β -спектров на основе программного кода BSG от MIT. Более детальное уточнение распределения ядерного заряда увеличивает точность в низкоэнергетических областях энергетического спектра. Таким образом, можно заключить, что модель точечного распределения заряда ядра имеет наименьшую вероятность перехода в результате расчета. Вероятность перехода, соответствующая модели распределения Гаусса, ненамного больше, чем вероятность равномерного сферического распределения в области низких энергий. Из этого можно сделать вывод, что объем распределения основного заряда ядра очень важен. И при необходимости ядро может быть упрощено до сферы с равномерно распределенным зарядом, чтобы рассчитать вероятность β -распада.

Список литературы

- [1] Steven Weinberg 2009 J. Phys.: Conf. Ser. 196 012002 DOI 10.1088/1742-6596/196/1/012002
- [2] Severijns, N..Correlation and spectrum shape measurements in β -decay probing the standard model(Review)[J].Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics,2014,Vol.41(11): 114006
- [3] Vos, K. K.;Wilschut, H. W.;Timmermans, R. G. E..Symmetry violations in nuclear and neutron β decay.[J].Reviews of Modern Physics,2015,Vol.87(4): 1483
- [4] Severijns, N.;Beck, M.;Naviliat-Cuncic, O..Tests of the standard electroweak model in nuclear beta decay.[J].Reviews of Modern Physics,2008,Vol.78(3): 991-1040
- [5] Noordmans, J. P.;Wilschut, H. W.;Timmermans, R. G. E..Lorentz violation in neutron decay and allowed nuclear β decay.[J].Physical Review C: Nuclear Physics,2013,Vol.87(5): 1-10
- [6] J.C. Hardy, I.S. Towner, Phys. Rev. C 91 (2) (2015) 025501, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.91.025501>, arXiv:1411.5987.
- [7] T. Bhattacharya, V. Cirigliano, S.D. Cohen, A. Filipuzzi, M. González-Alonso, M.L. Graesser, R. Gupta, H.-W. Lin, Phys. Rev. D 85 (5) (2012) 054512, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.85.054512>, arXiv:1110.6448.
- [8] O. Naviliat-Cuncic, M. González-Alonso, Ann. Phys. 525 (8–9) (2013) 600–619, <http://dx.doi.org/10.1002/andp.201300072>, arXiv:1304.1759.
- [9] Cirigliano, V.;González-Alonso, M.;Graesser, M.L..Non-standard charged current interactions: Beta decays versus the LHC(Article)[J].Journal of High Energy Physics,2013,Vol.2013(2)
- [10] Huyan, X., Naviliat-Cuncic, O., Bazin, D. et al. Toward a measurement of weak magnetism in ${}^6\text{He}$ decay. Hyperfine Interact 237, 93 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10751-016-1303-8>

- [11] X. Mougeot. Reliability of usual assumptions in the calculation of β and ν spectra[J]. Physical Review C, 2015, Vol. 91(5): 055504
- [12] Severin, Gregory; Knutson, L. D.; Voytas, P. A.; George, E. A. Ga-66 ground state beta spectrum[J]. PHYSICAL REVIEW C, 2014, Vol. 89(5): 057302
- [13] X. Mougeot and C. Bisch. Consistent calculation of the screening and exchange effects in allowed β^- transitions[J]. Physical Review A, 2014, Vol. 90(1): 012501
- [14] Fenker, Benjamin Brown. Precise Measurement of the Asymmetry in the Decay of Magneto-Optically Trapped, Spin-Polarized ^{37}K [D]. Texas A&M University, 2017
- [15] Paul Stephan; Bernd Crasemann. Internal Ionization of the K Shell[J]. Physical Review. C, 1971, Vol. 3(6): 2495-2497
- [16] Fermi, E. Tentativo di una Teoria Dei Raggi β . Nuovo Cim 11, 1–19 (1934). <https://doi.org/10.1007/bf02959820>
- [17] Hayen, L.; Severijns, N. Beta Spectrum Generator: High precision allowed β spectrum shapes.[J]. Comput. Phys. Commun., 2019, Vol. 240: 152-164
- [18] Leendert Hayen; Nathal Severijns. Beta Spectrum Generator: High precision allowed β spectrum shapes[J]. 2018,
- [19] A. Sirlin. Radiative correction to the $\nu^- e^-(\nu e)$ spectrum in β decay[J]. Physical Review D, 2011, Vol. 84(1): 014021
- [20] Bühring, Wolfgang. "Beta decay theory using exact electron radial wave functions." Nuclear Physics 40 (1963): 472-488.
- [21] Wolfgang Bühring. Beta decay theory using exact electron radial wave functions .3. influence of screening[j]. nuclear physics, 1965, vol. 61(1): 110
- [22] Behrens, H. O. and Wolfgang Bühring. Nuclear beta decay. Nuclear Physics 162 (1971): 111-144.
- [23] wikipedia.org, Beta decay, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Beta_decay

- [24] R.Nave, HyperPhysics: Nuclear, 2016, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- [25] G.J.Neary, The beta-ray spectrum of radium E [Bi-210], 1940
- [26] Fermi, E. Tentativo di una Teoria Dei Raggi β . Nuovo Cim 11, 1–19 (1934). <https://doi.org/10.1007/bf02959820>
- [27] Asai, Juhachi., "Electron radial wave functions in beta decay and high energy electron scattering with a diffused nuclear charge distribution." (1974).
- [28] D.H. Wilkinson, Evaluation of beta-decay: II. Finite mass and size effects, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 290, Issues 2–3, 1990
- [29] Wilkinson, Denys H..Methodology for superallowed Fermi beta-decay Part II. Reduction of data[J].Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment,1993,Vol.335: 182-200
- [30] H. Behrens W. B. On the sensitivity of β -transitions to the shape of the nuclear charge distribution[J].Nuclear Physics. A,1970,Vol.150: 481-496
- [31] Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 02.12.2019).
- [32] ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования (дата введения: 01.01.1979).
- [33] ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования (дата введения: 01.01.1979).
- [34] ГОСТ 12.0.003-2015. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (дата введения: 01.03.2017).
- [35] ГОСТ 12.1.003-2014. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности (дата введения: 01.11.2015).

[36] СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки (утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31 октября 1996 г.).

[37] ГОСТ 12.1.029-80. ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация (дата введения: 01.07.1981).

[38] ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (дата введения: 01.01.1989).

[39] ГОСТ 12.1.007-76. ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности (дата введения: 01.01.1977).

[40] СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (утв. Постановлением № 2 от 28 января 2021 г.).

[41] ГОСТ 12.4.011-89. ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация (дата введения: 01.07.1990).

[42] ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов (дата введения: 01.07.1983).

[43] ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты (дата введения: 01.01.2011).

[44] Влияние шума на организм человека [Электронный ресурс] // Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Карачаево-Черкесской республике. – 2011. – URL: <http://09.rospotrebnadzor.ru/content/vliyanie-shuma-na-organizm-cheloveka> (дата обращения: 20.03.2023).

[45] Микроклимат на рабочем месте [Электронный ресурс] // Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Кемеровской области – Кузбассу. – 2016. – URL: <http://42.rospotrebnadzor.ru/content/874/54136/> (дата обращения: 20.03.2023).

[46] Мушников, В. С. Условия труда работающих: влияние нагревающего микроклимата промышленных помещений на организм человека: Методическая разработка / В. С. Мушников, В. В. Вьюхин, В. И. Лихтенштейн, Л. Г. Турчанинов. – Екатеринбург: УрФУ, 2019. – 22 с.

[47] Назаренко, О. Б. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / О. Б. Назаренко. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 144 с.

[48] Куликов, Г. Б. Безопасность жизнедеятельности: учебник / Г. Б. Куликов. – М.: МГУП, 2010. – 408 с.

[49] Михалёва, К. А. Влияние параметров световой среды на здоровье человека / К. А. Михалёва [Электронный ресурс] // Городской округ Верхотурский. – 2017. – URL: <http://adm-verhotury.ru/social/helth/media/2017/10/16/vliyanie-parametrov-svetovoj-sredyi-na-zdorove-cheloveka/> (дата обращения: 20.03.2023).

[50] ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ (с изменениями от 30 апреля 2021 года).

[51] ВНЭ 5-79. Правила пожарной безопасности при эксплуатации предприятий химической промышленности (утв. Министерством химической промышленности 25 июля 1979 г.).