


МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
ядерной физики

 Титова Л. В.
22.04.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.О.23 Физика нейтронов

1. Код и наименование специальности:

14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг

2. Специализация:

Проектирование и эксплуатация атомных станций

3. Квалификация выпускника: инженер – физик

4. Форма обучения: очная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:

кафедра ядерной физики

6. Составители программы:

д.ф-м.н., профессор, Кадменский Станислав Георгиевич, к.ф-м.н., доцент Долгополов
Михаил Анатольевич

7. Рекомендована:

Научно – методическим советом физического факультета, протокол №4 от 18.04.2024 г.

8. Учебный год: 2026/2027

Семестр(ы): 5

9. Цели и задачи учебной дисциплины

Целями освоения учебной дисциплины являются:

- познакомить студентов с основными эффектами и закономерностями взаимодействия нейтронов с веществом, возможностью осуществления контролируемой реакции деления, основами теории ядерных реакторов, управляемой цепной реакции деления ядер, методами описания кинетических процессов в ядерных паропроизводящих установках (ЯППУ), с курсом высшей математики КУЧП.

Задачи учебной дисциплины:

- знать основные эффекты и закономерности взаимодействия нейтронов с веществом, возможность осуществления контролируемой реакции деления, основы теории ядерных реакторов, управляемой цепной реакции деления ядер, проблемах, связанных с проектированием новых реакторов, и путях их решения;

- описать кинетические процессы в ядерных паропроизводящих установках (ЯППУ).

10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Учебная дисциплина Физика нейтронов относится к обязательной части Блока 1.

11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:

Код	Название компетенции	Код(ы)	Индикатор(ы)	Планируемые результаты обучения
ОПК-1	Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования	ОПК-1.5	Оценивает численные значения величин, характерных для различных разделов естествознания	Знать: основные типы ядерных реакций и принципы расчета их выхода и энергетического эффекта; спектры нейтронов в реакторе и определение их основных характеристик; основы процессов диффузии и замедления нейтронов в различных средах Уметь: составлять математическую модель процессов изменения нуклидного состава, протекающих в активной зоне реактора; составлять уравнение переноса энергии Владеть: методикой эксперимента и обработки опытных данных по определению миграционных характеристик нейтрона
ОПК-2	Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач в сфере ядерной энергетики и технологий	ОПК-2.2	Знает методы выбора и создания критериев оценки исследований в области ядерной физики, распространения и взаимодействия излучения с веществом	
		ОПК-2.4	Выбирает и создает критерии оценки исследований в области ядерной физики, физики реакторов, взаимодействия излучения с	

			веществом	
--	--	--	-----------	--

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. — 5/180.

Форма промежуточной аттестации – зачет с оценкой

13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость	
	Всего	По семестрам
		5 семестр
Аудиторные занятия	84	84
в том числе:	лекции	34
	практические	50
	лабораторные	
Самостоятельная работа	96	96
в том числе: курсовая работа (проект)		
Форма промежуточной аттестации		Зачет с оценкой
Итого:	180	180

13.1. Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК*
1. Лекции			
1.1	Взаимодействие нейтронов с атомными ядрами.	Характеристики нейтронов и ядер. Возбужденные состояния ядер. Виды взаимодействия нейтронов с ядрами. Способы распада компаунд-ядра. Свойства нейтронов различных энергий. Резонансы. Нейтронные сечения.	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181
1.2	Ядерные реакции с нейтронами.	Радиационный захват нейтрона, упругое и неупругое рассеяние, деление тяжелых ядер.	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181
1.3	Нейтронное поле.	Основная задача физики нейтронов применительно к ядерной энергетике.	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181
1.4	Замедление нейтронов.	Упругое рассеяние и замедление. Замедление в Непоглощающих средах. Замедление в поглощающих средах. Эффективный резонансный интеграл.	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181
1.5	Диффузия нейтронов.	Закон Фика. Диффузионное уравнение и длина диффузии. Альбедро.	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181
1.6	Пространственное распределение замедляющихся нейтронов	Модель непрерывного замедления. Уравнение возраста при отсутствии поглощения и примеры его решения. Миграция. Распределение тепловых нейтронов при заданном распределении источника быстрых нейтронов. Уравнение возраста при учете поглощения в среде.	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181
1.7	Групповое описание нейтронного поля.	Групповое описание нейтронного поля	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181
1.8	Источники нейтронов, регистрация нейтронов.	Источники нейтронов, регистрация нейтронов.	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181
2. Практические занятия			
2.1	Взаимодействие нейтронов с атомными ядрами.	Характеристики нейтронов и ядер. Возбужденные состояния ядер. Виды взаимодействия нейтронов с ядрами. Способы распада компаунд-ядра. Свойства нейтронов различных энергий. Резонансы. Нейтронные сечения.	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181

2.2	Ядерные реакции с нейтронами.	Радиационный захват нейтрона, упругое и неупругое рассеяние, деление тяжелых ядер.	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181
2.3	Нейтронное поле.	Основная задача физики нейтронов применительно к ядерной энергетике.	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181
2.4	Замедление нейтронов.	Упругое рассеяние и замедление. Замедление в Непоглощающих средах. Замедление в поглощающих средах. Эффективный резонансный интеграл.	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181
2.5	Диффузия нейтронов.	Закон Фика. Диффузионное уравнение и длина диффузии. Альбеда.	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181
2.6	Пространственное распределение замедляющихся нейтронов	Модель непрерывного замедления. Уравнение возраста при отсутствии поглощения и примеры его решения. Миграция. Распределение тепловых нейтронов при заданном распределении источника быстрых нейтронов. Уравнение возраста при учете поглощения в среде.	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181
2.7	Групповое описание нейтронного поля.	Групповое описание нейтронного поля	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181
2.8	Источники нейтронов, регистрация нейтронов.	Источники нейтронов, регистрация нейтронов.	https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=21181

13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (количество часов)				
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1.	Взаимодействие нейтронов с атомными ядрами.	2	4		10	16
2.	Ядерные реакции с нейтронами.	4	8		10	22
3.	Нейтронное поле.	4	4		10	18
4.	Замедление нейтронов.	6	8		10	24
5.	Диффузия нейтронов.	6	8		12	26
6.	Пространственное распределение замедляющихся нейтронов	4	8		12	24
7.	Групповое описание нейтронного поля.	4	6		16	26
8.	Источники нейтронов, регистрация нейтронов.	4	4		16	24
	Итого:	34	50		96	180

14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины:

Студентам на лекциях необходимо вести подробный конспект и стараться понять материал курса. Для полного понимания материала следует активно использовать консультации. Для самостоятельного изучения разделов курса, рекомендованных преподавателем, необходимо пользоваться основной и дополнительной литературой, интернет-ресурсами.

На практических занятиях необходимо уметь решать задачи и анализировать решение, на устных опросах обучаемый должен уметь продемонстрировать полученные на лекциях и практических занятиях знания, умения и навыки, отвечать на поставленные вопросы, поддерживать дискуссию по существу вопроса.

Методическое обеспечение аудиторной работы: учебно-методические пособия для студентов, учебники и учебные пособия, электронные и Интернет-ресурсы.

Методическое обеспечение самостоятельной работы: учебно-методические пособия по организации самостоятельной работы, контрольные задания и тесты в бумажном и электронном вариантах, тестирующие системы, дистанционные формы общения с преподавателем. Контроль самостоятельной работы реализуется с помощью опросов, тестов, вопросов по темам заданий и т.д.

15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1.	Гуревич, Исая Исидорович. Нейтронная физика: Учебное пособие для студ.вузов, обуч. по напр. "Физика" и специальности "Ядерная физика" и "Атомные электростанции и установки" / И.И. Гуревич, В.П. Протасов. — М.: Энергоатомиздат, 1997. — 415, [1] с. — ISBN 5-283-03991-9 : 47.60.
2.	Стогов, Ю.В. Основы нейтронной физики: учебное пособие / Ю.В. Стогов; МИФИ. - Москва, 2008. — 204 с.
3.	Пасечник, Митрофан Васильевич. Вопросы нейтронной физики средних энергий / М.В. Пасечник; АН УССР. — Киев: Изд-во АН УССР, 1962. — 335, [1] с.: ил., табл.
4.	Кадилин, В. В. Прикладная нейтронная физика: учебное пособие / В. В. Кадилин, Е. В. Рябева, В. Т. Самосадный. — Москва: НИЯУ МИФИ, 2011. — 124 с. — ISBN 978-5-7262-1515-0. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/75893

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
5.	Бекурц, К. Нейтронная физика / К. Бекурц, К. Виртц; Пер с англ. под ред. Л.А. Микаэляна, В.И. Лебедева. — М.: Атомиздат, 1968. — 4566 с.: ил.
6.	Владимиров, Владимир Иванович. Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов / В. И. Владимиров. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоиздат, 1981. — 285, [3] с.: ил.+

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет)*:

№ п/п	Ресурс
7.	www.lib.vsu.ru — ЗНБ ВГУ.
8.	https://edu.vsu.ru – Электронный университет ВГУ
9.	https://e.lanbook.com – ЭБС «Лань»
10.	https://www.studentlibrary.ru – ЭБС «Консультант студента»
11.	https://urait.ru – Образовательная платформа «ЮРАЙТ»
12.	https://rucont.ru - Информационно-телекоммуникационная система «Контекстум»

16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

№ п/п	Источник
1.	Физика ядерного реактора. Нейтронно-физический расчет ВВЭР: учебное пособие / А. Я. Благовещенский, А. А. Калютин, М. Н. Конович, В. Н. Митюков. — Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2018. — 47 с. — ISBN 978-5-7422-6170-4. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/112150+
2.	Климов, Аполлон Николаевич. Ядерная физика и ядерные реакторы: Учебник для студ. инж.-физ. спец. вузов / А. Н. Климов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1985.— 350 с.: ил.; 22 см.

17. Образовательные технологии, используемые при реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ, электронное обучение (ЭО), смешанное обучение):

При проведении занятий по дисциплине используются следующие образовательные технологии:

1. активные и интерактивные формы проведения занятий;
2. компьютерные технологии при проведении занятий;
3. презентационные материалы и технологии при объяснении материала на лекционных и практических занятиях;
4. специализированное оборудование при проведении лабораторных работ;
5. разбор конкретных ситуаций при постановке целей и задач к разработке прикладных программ, при выборе программного обеспечения по установленным критериям, при разработке программ по предусмотренным алгоритмам и методам.

Для самостоятельной работы используется ЭБС Университетская библиотека online - www.lib.vsu.ru - ЗНБ ВГУ. Программное обеспечение, применяемое при реализации дисциплины – Microsoft Windows, LibreOffice, CodeBlocks, Adobe Reader, Mozilla FireFox.

Дистанционные образовательные технологии (ДОТ) применяются с использованием образовательного портала «Электронный университет ВГУ».

18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, практического типа, текущего контроля и промежуточной аттестации

Специализированная мебель

Компьютерный класс, аудитория для групповых и индивидуальных консультаций, помещение для самостоятельной работы

Специализированная мебель, компьютеры с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду университета

Microsoft Windows 10, LibreOffice, Adobe Reader

19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
1.	Взаимодействие нейтронов с атомными ядрами.	ОПК-1 ОПК-2	ОПК-1.5 ОПК-2.2 ОПК-2.4	Практические задачи, собеседование по вопросам к зачету
2.	Ядерные реакции с нейтронами.			
3.	Нейтронное поле.			
4.	Замедление нейтронов.			
5.	Диффузия нейтронов.			
6.	Пространственное распределение замедляющихся нейтронов			
7.	Групповое описание нейтронного поля.			
8.	Источники нейтронов, регистрация нейтронов.			
Промежуточная аттестация форма контроля – зачет с оценкой				Перечень вопросов к зачету Пункт 20.2

20. Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

20.1. Текущий контроль успеваемости

Контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Перечень примерных практических задач:

1. На сколько а.е.м. суммарная масса продуктов деления ^{235}U тепловыми нейтронами будет меньше массы исходной системы? Каково при этом относительное изменение массы?
2. Сечение деления тепловыми нейтронами на ядро для естественной смеси изотопов урана равно 4,22 барн. Вычислить сечение деления тепловыми нейтронами на ядро ^{235}U , учитывая, что ^{238}U тепловыми нейтронами не делится.
3. Определить количество делений и поглощений без деления за 1 с в размножающей среде из урана. Плотность потока тепловых нейтронов $\Phi_0=1,0 \cdot 10^{10} \text{ (см}^2 \cdot \text{с)}^{-1}$, а обогащение нуклидом ^{235}U составляет 5%.
4. Пластика из естественного металлического урана размерами $1 \times 1 \times 0,1 \text{ см}^3$ облучается в течение 24 часов параллельным потоком тепловых нейтронов, падающих по нормали к поверхности пластики. Плотность потока нейтронов $\Phi_0=1,0 \cdot 10^{10} \text{ (см}^2 \cdot \text{с)}^{-1}$. Оценить полную энергию, выделившуюся в результате деления.
5. Какой слой ^{235}U при падении на него N_0 тепловых нейтронов в секунду дает то же число быстрых нейтронов деления.
6. Наиболее вероятные значения массовых чисел осколков деления ^{235}U тепловыми нейтронами составляют 95 и 139. Вычислить энергии и скорости каждого из осколков, если их общая кинетическая энергия составляет 165 МэВ.
7. В чём физический смысл коэффициента размножения нейтронов k ? Во сколько раз увеличится первоначальное количество нейтронов в сотом поколении, если $k = 1,01$?
8. Найти число нейтронов, возникающих в секунду в реакторе с тепловой мощностью $P = 100 \text{ Вт}$, если среднее число вторичных нейтронов на каждый акт деления $\nu = 2,5$. Считать, что при каждом делении освобождается энергия $Q = 200 \text{ МэВ}$.
9. Оценить средний пробег нейтрона в алюминии до первого взаимодействия.
10. Нейтрон упруго рассеялся на первоначально покоившемся ядре ^9Be . Найти долю кинетической энергии, теряемой нейтроном при рассеянии на угол J , если J равен 30, 90 и 150°.

Описание критериев и шкалы оценивания компетенций (результатов обучения) при аттестации

Критерии оценивания компетенций	Шкала оценок
Обучающийся в полной мере владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), способен иллюстрировать ответ примерами, фактами, данными научных исследований.	Отлично
Ответ на контрольно-измерительный материал не соответствует одному (двум) из перечисленных показателей, но обучающийся дает правильные ответы на дополнительные вопросы.	Хорошо
Ответ на контрольно-измерительный материал не соответствует любым двум(трем) из перечисленных показателей, обучающийся дает неполные ответы на дополнительные вопросы.	Удовлетворительно
Ответ на контрольно-измерительный материал не соответствует любым трем(четырем) из перечисленных показателей. Обучающийся демонстрирует отрывочные, фрагментарные знания, допускает грубые ошибки.	Неудовлетворительно

20.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Перечень вопросов к зачету:

1. Взаимодействие нейтронов с атомными ядрами
2. Характеристики нейтрона и атомных ядер
3. Возбужденные состояния атомных ядер
4. Виды взаимодействия нейтронов с атомными ядрами
5. Способы перехода компаунд-ядра
6. Нейтронные эффективные сечения
7. Свойства нейтронов различных энергий
8. Формулы Брейта-Вигнера. Резонансы
9. Доплеровское уширение резонансных линий
10. Обзор нейтронных сечений
11. Радиационный захват нейтронов
12. Упругое рассеяние нейтронов
13. Неупругое рассеяние нейтронов
14. Деление тяжелых ядер
15. Упругое рассеяние и замедление
16. Замедление в водороде
17. Замедление в тяжелых непоглощающих средах
18. Замедление в тяжелых поглощающих средах
19. Эффективный резонансный интеграл
20. Диффузия нейтронов. Закон Фика
21. Диффузионное уравнение. Длина диффузии. Альбеда
22. Скорость взаимодействия в случае немонотонных нейтронов
23. Модель непрерывного замедления
24. Уравнение возраста при отсутствии поглощения
25. Физический смысл возраста
26. Площадь миграции нейтронов
27. Распределение тепловых нейтронов при заданном распределении источников быстрых нейтронов
28. Уравнение замедления в возрастном приближении в средах с поглощением
29. Групповое описание нейтронного поля
30. Термализация нейтронов
31. Источники нейтронов
32. Регистрация нейтронов

Промежуточная аттестация проводится в соответствии с Положением о промежуточной аттестации обучающихся по программам высшего образования.

Контрольно-измерительные материалы промежуточной аттестации включают в себя теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень полученных знаний и/или практическое задание(я), позволяющее(ие) оценить степень сформированности умений и(или) навыков, и(или) опыт деятельности.

При оценивании используются количественные или качественные шкалы оценок. Критерии оценивания приведены выше.

Описание критериев и шкалы оценивания компетенций (результатов обучения) при аттестации

Критерии оценивания компетенций	Шкала оценок
Обучающийся в полной мере владеет понятийным	Отлично

<p>аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), способен иллюстрировать ответ примерами, фактами, данными научных исследований, применять теоретические знания для решения практических задач в области кинетики ядерных реакторов</p>	
<p>Ответ на контрольно-измерительный материал не соответствует одному (двум) из перечисленных показателей, но обучающийся дает правильные ответы на дополнительные вопросы. Недостаточно продемонстрировано взаимовлияние различных факторов, определяющих состояние активной зоны на кинетику реактора, или содержатся отдельные пробелы в определении физических причин, определяющих кинетику реактора.</p>	Хорошо
<p>Ответ на контрольно-измерительный материал не соответствует любым двум(трем) из перечисленных показателей, обучающийся дает неполные ответы на дополнительные вопросы. Демонстрирует частичные знания факторов, влияющих на кинетику реактора, или имеет не полное представление о соотношении различных эффектов реактивности.</p>	Удовлетворительно
<p>Ответ на контрольно-измерительный материал не соответствует любым трем(четырем) из перечисленных показателей. Обучающийся демонстрирует отрывочные, фрагментарные знания, допускает грубые ошибки в оценке эффектов реактивности.</p>	Неудовлетворительно

веществе.

- d. Среднее количество взаимодействий с атомными ядрами за единицу времени.
- 6) Плотность потока нейтронов определяет
- Количество нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади за единицу времени.
 - Количество нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади за единицу времени в определенном направлении.
 - Количество нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади за единицу времени и имеющих определенную энергию.
 - Количество нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади.
- 7) Флюенс нейтронов определяет
- Количество нейтронов, падающих на поверхность единичной площади за единицу времени
 - Количество нейтронов, падающих на поверхность единичной площади за время облучения
 - Количество нейтронов, падающих на поверхность за единицу времени
 - Количество нейтронов, падающих на поверхность за время облучения
- 8) Плотность тока нейтронов – это
- Сумма числа нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади, в двух противоположных направлениях, перпендикулярных поверхности, за единицу времени
 - Разность числа нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади, в двух противоположных направлениях за единицу времени
 - Сумма числа нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади, в двух противоположных направлениях за единицу времени
 - Разность числа нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади, в двух противоположных направлениях, перпендикулярных поверхности, за единицу времени
- 9) Транспортная длина пробега определяет
- Среднюю длину пробега нейтрона в среде с анизотропным рассеянием без поглощения в направлении первоначального движения после бесконечного числа столкновений
 - Среднюю длину пробега нейтрона в среде с анизотропным рассеянием в направлении первоначального движения после бесконечного числа столкновений
 - Среднюю длину пробега нейтрона в среде с анизотропным рассеянием без поглощения после бесконечного числа столкновений
 - Среднюю длину пробега нейтрона в среде с анизотропным рассеянием без поглощения в направлении первоначального движения после одного столкновения
- 10) Спектр Ферми описывает
- Распределение тепловых нейтронов по энергиям
 - Распределение быстрых нейтронов по энергиям
 - Распределение замедляющихся нейтронов по энергиям
 - Зависимость пробега замедляющихся нейтронов от энергии
- 11) Длина рассеяния медленного нейтрона – это
- Отношение величины волнового вектора нейтрона к фазовому сдвигу
 - Отношение энергии нейтрона к фазовому сдвигу
 - Отношение фазового сдвига к величине волнового вектора нейтрона
 - Отношение фазового сдвига к энергии нейтрона
- 12) Выберите правильное утверждение
- При когерентном рассеянии сечение пропорционально сумме амплитуд рассеяния на

- отдельных ядрах
- b. При когерентном рассеянии сечение равно сумме сечений на отдельных ядрах
- c. При когерентном рассеянии сечение пропорционально сумме квадратов амплитуд рассеяния на отдельных ядрах
- d. При когерентном рассеянии сечение пропорционально квадрату суммы амплитуд рассеяния на отдельных ядрах
- 13) Плотность замедления определяется как
- a. Число нейтронов, замедлившихся до определенной энергии за 1 с
- b. Число нейтронов, замедлившихся в 1 см^3 за 1 с до определенной энергии.
- c. Число нейтронов, замедлившихся в 1 см^3 за 1 с ниже определенной энергии
- d. Число нейтронов, замедлившихся в 1 см^3 за 1 с и попадающих в определенный энергетический интервал.
- 14) Наибольшие средние логарифмические потери нейтрона в одном столкновении будут в
- a. Кадмии
- b. Уране
- c. Углероде
- d. Воде
- 15) Сколько упругих столкновения должен испытать нейтрон деления с энергией 2 МэВ в воде, чтобы стать тепловым?
- a. 10
- b. 30
- c. 18
- d. 13

Вопросы

Задача 1

Показать, что для нейтронов с длиной волны площадь геометрического сечения взаимодействия с ядром $S \approx \pi(R + \lambda_n)^2$, где R – радиус ядра. Оценить эту величину для нейтронов с энергией $T_n = 10 \text{ МэВ}$, налетающих на ядро Au.

Решение. Для того чтобы нейтрон попал в зону действия ядерных сил, его прицельный параметр не должен превышать величины R . Поэтому проводя из центра ядра окружность радиуса R , получим оценку геометрического сечения взаимодействия нейтрона с ядром. Для золота и нейтрона с кинетической энергией $T_n = 10 \text{ МэВ}$ (используя формулы (1.1) и (4.5)), получим

$$S = 3,14 \cdot 10^{-13} \left(1,4 \cdot 196^{1/3} + \frac{4,55}{\sqrt{10}} \right)^2 = 2,9 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2 = 2,9 \text{ барн.}$$

Задача 2

Оценить максимальную величину центробежного барьера для нейтронов с кинетической энергией $T_n = 7,0 \text{ МэВ}$ при взаимодействии с ядрами Sn.

$$B_{ц} = \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\mu_{nM} R_j^2}$$

Решение. Для решения задачи воспользуемся формулой

$$\mu_{nM} = \frac{m_n \cdot M(\text{Sn})}{m_n + M(\text{Sn})} = \frac{1 \cdot 119}{1 + 119} = 0,99 \approx 1$$

Приведенная масса системы нейтрон – ядро Sn составляет а.е.м.

Радиус ядра

$$R_j = 1,4 \cdot 10^{-13} \cdot 119^{1/3} = 6,9 \cdot 10^{-13} \text{ см.}$$

Длину волны нейтрона определим как

$$\lambda = \frac{4,45 \cdot 10^{-13}}{\sqrt{7}} = 1,7 \cdot 10^{-13} \text{ см.}$$

Максимальную величину орбитального момента нейтрона оценим как

$$R_{\text{я}} + \lambda_{\text{n}} \geq b_{\text{max}} = \lambda_{\text{n}} \sqrt{l_{\text{max}}(l_{\text{max}} + 1)},$$

подставив в которую значения λ_{n} и $R_{\text{я}}$, получим $l_{\text{max}} = 3$.

Искомая высота центробежного барьера

$$B_{\text{ц}} = \frac{(1,05 \cdot 10^{-34})^2 \cdot 3 \cdot 4}{2 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot (6,9 \cdot 10^{-15})^2} \cdot \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 5,3 \text{ МэВ.}$$

Задача 3

Найти вероятность того, что в результате взаимодействия медленных нейтронов ($l = 0$) с ядрами, спин которых $l = 1$, составное ядро образуется в основном состоянии с квантовым числом спина $l_c = 3/2$. Считать, что спины нейтронов и ядер до взаимодействия имеют все возможные взаимные ориентации.

Решение. Связанное состояние, которым является составное ядро, имеет вектор

спина $I_c = s + I$, где S – вектор спина нейтрона. Сложение векторов S и I есть сложение их проекций на выбранное направление в пространстве как алгебраических чисел. Каждый из векторов имеет по $(2s + 1)$ или $(2I + 1)$ проекций соответственно. Для получения всех возможных проекций вектора I_c , каждая из возможных проекций вектора складывается с одной из проекций вектора I . Всего таких суммарных проекций оказывается $(2s + 1)(2I + 1)$, каждая из которых реализуется с равной вероятностью. Таким образом, возможны $(2s + 1)(2I + 1)$ различных способов образования составного ядра. Число же возможных и равновероятных проекций вектора составляет $(2l_c + 1)$, а относительная вероятность образования составного ядра с квантовым числом l_c составит

$$g = \frac{2I_c + 1}{(2s + 1)(2I + 1)} = \frac{2 \cdot 3/2 + 1}{(2 \cdot 1/2 + 1)(2 \cdot 1 + 1)} = \frac{2}{3}.$$

Задача 4

Исходя из формулы Брейта-Вигнера для сечения σ_a образования составного ядра получить выражение для сечений процессов упругого рассеяния σ_{nn} и радиационного захвата $\sigma_{\text{n}\gamma}$ нейтрона.

Решение. Вероятность распада (постоянная распада) составного ядра в единицу времени с одного из рассматриваемых изолированных (уединенных) уровней

$$\lambda = \lambda_{\text{nn}} + \lambda_{\text{n}\gamma}$$

где λ_{nn} и $\lambda_{\text{n}\gamma}$ – вероятности распада составного ядра по каналам (n,n) и (n,γ) соответственно, если других каналов распада составного ядра нет. Учитывая связь между постоянной распада λ и

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{nn}}} + \frac{1}{\tau_{\text{n}\gamma}}$$

средним временем τ жизни ядра, получим

Из соотношения неопределенностей $\Gamma\tau \geq \hbar$, предполагая что измерения производятся с наилучшей точностью, получим $\Gamma = \Gamma_{\text{nn}} + \Gamma_{\text{n}\gamma}$

т.е. полная ширина есть сумма парциальных ширин. Таким образом, относительные вероятности распада составного ядра по каналам (n,n) и (n,γ) будут равны соответственно

$$\eta_{\text{nn}} = \frac{\Gamma_{\text{nn}}}{\Gamma} \text{ и } \eta_{\text{n}\gamma} = \frac{\Gamma_{\text{n}\gamma}}{\Gamma}$$

а соответствующие сечения $\sigma_{\text{nn}} = \sigma_a \frac{\Gamma_{\text{nn}}}{\Gamma}$ и $\sigma_{\text{n}\gamma} = \sigma_a \frac{\Gamma_{\text{n}\gamma}}{\Gamma}$

Задача 5

Выразить с помощью формулы Брейта-Вигнера зависимость сечения радиационного захвата

нейтрона $\sigma_{n\gamma}$ от его кинетической энергии T_n , если известно сечение σ_0 данного процесса при $T_n = T_0$ и значения T_0 и Γ .

Решение Формула Брейта-Вигнера для сечения радиационного захвата

$$\sigma_{n\gamma} = \sigma_0 \frac{\Gamma_\gamma}{\Gamma} = \pi \lambda_n^2 g \frac{\Gamma_\gamma \Gamma_n}{(T_n - T_0)^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (1)$$

Тогда
$$\sigma_0 = 4\pi \lambda_0^2 g \frac{\Gamma_{\gamma 0} \Gamma_{n0}}{\Gamma_0^2} \quad (2)$$

Разделив (1) на (2), получим
$$\frac{\sigma_{n\gamma}}{\sigma_0} = \frac{1}{4} \frac{\lambda_n^2}{\lambda_0^2} \frac{\Gamma_n}{\Gamma_{n0}} \frac{\Gamma_\gamma}{\Gamma_{\gamma 0}} \frac{\Gamma_0^2}{(T_n - T_0)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

Поскольку формула записана для $l=0$ ($T_n < 10$ кэВ), то можно положить $\Gamma_\gamma \approx \text{const}$, т. к. энергия возбуждения составного ядра

$$\Delta W(C) = S_n(C) + \tilde{T}_n,$$

а энергия связи нейтрона $S_n(C) \gg \tilde{T}_n$. Кроме того, испускание γ -кванта в этой области энергий налетающих нейтронов является преобладающим процессом распада составного ядра, поскольку выброс нейтрона сильно затруднен из-за очень малого превышения энергии возбуждения составного ядра над энергией связи нейтрона. Поэтому $\Gamma_\gamma \gg \Gamma_n$ и полная ширина уровня $\Gamma = \Gamma_\gamma + \Gamma_n \approx \Gamma_\gamma \approx \text{const}$. С учетом этого получим

$$\sigma_{n\gamma} = \sigma_0 \frac{\lambda}{\lambda_0} \frac{\Gamma^2}{4(T_n - T_0)^2 + \Gamma^2} = \sigma_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_n}} \frac{\Gamma^2}{4(T_n - T_0)^2 + \Gamma^2},$$

поскольку

$$\lambda = \frac{\hbar}{\sqrt{2mT}}.$$

Задача 6

Выяснить с помощью формулы Брейта-Вигнера условия, при которых сечение радиационного захвата нейтронов подчиняется закону $1/v_n$

Решение. Исследуем формулу Брейта-Вигнера для сечения радиационного захвата, сделав следующие три предположения:

1. $T_n \ll T_{01}$;
2. $\Gamma_\gamma \approx \text{const}$;
3. $\Gamma_\gamma \gg \Gamma_n$ и полная ширина уровня $\Gamma = \Gamma_\gamma + \Gamma_n \approx \Gamma_\gamma \approx \text{const}$.

Возможность применения последних двух предположений обсуждалась в предыдущей задаче.

Тогда

$$\sigma_{n\gamma} = \pi \lambda_n^2 g \frac{\Gamma_\gamma \Gamma_n}{T_0^2 + (\Gamma_\gamma/2)^2} = \lambda_n^2 \Gamma_n \frac{\pi g \Gamma_\gamma}{T_{01}^2 + (\Gamma_\gamma/2)^2} = \lambda_n^2 \Gamma_n \cdot \text{const},$$

т.е.

$$\sigma_{n\gamma} \sim \lambda_n^2 \Gamma_n \sim \frac{1}{v_n^2} \cdot v_n \sim \frac{1}{v_n}.$$

Задача 7

Найти с помощью формулы Брейта-Вигнера для сечения радиационного захвата нейтрона отношение σ_{\min}/σ_0 , где σ_{\min} – минимальное сечение реакции (n, γ) в области $T_n < T_0$, σ_0 – сечение этого процесса при $T_n = T_0$, если $\Gamma \ll T_0$.

Решение. Считая $\Gamma_\gamma \approx \text{const}$ и $\Gamma \approx \text{const}$ для сечения процесса радиационного захвата нейтрона

получим
$$\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_0} = \frac{(\lambda_n^2)_{\min} (\Gamma_n)_{\min}}{\lambda_{n0}^2 \Gamma_{n0}} \frac{\Gamma^2}{4(T_{\min} - T_0)^2 + \Gamma^2}$$

Для нахождения T_{\min} продифференцируем формулу (4.7.1) по T_n , приняв $\Gamma_n \sim V_n$ (см. 4.2), и результат приравняем нулю. После несложных преобразований получим квадратное уравнение

$$T_{\min}^2 - 1,2 \cdot T_0 \cdot T_{\min} + \frac{T_0^2 + (\Gamma/2)^2}{5} = 0$$

Из этого уравнения

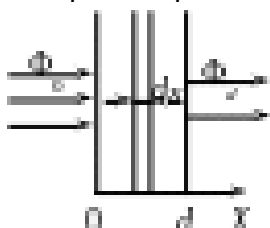
$$T_{\min} = T_0 \left(0,6 - 0,4 \sqrt{1 - 0,2 \left(\frac{\Gamma}{2T_0} \right)^2} \right) \approx 0,2 \cdot T_0$$

т. к. $\Gamma \ll T_0$. Подставив полученное значение T_{\min} в (4.9.1), получим

$$\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_0} = \sqrt{\frac{T_0}{0,2T_0}} \cdot \frac{\Gamma^2}{4(0,2T_0 - T_0)^2 + \Gamma^2} = 0,87 \frac{\Gamma^2}{T_0^2}$$

Задача 8

Какова должна быть толщина d кадмиевой пластинки, чтобы параллельный пучок тепловых нейтронов при прохождении через нее уменьшился в 100 раз?



Решение. Пусть Φ_0 – плотность потока параллельного пучка нейтронов, падающих на пластинку. По мере прохождения пластинки плотность потока нейтронов будет уменьшаться вследствие захвата их ядрами кадмия. Выделим в пластинке на глубине x слой толщиной dx . Изменение плотности потока при прохождении слоя dx равно

$$d\Phi = -n\sigma_a\Phi dx$$

где n – концентрация ядер поглотителя нейтронов; σ_a – сечение поглощения тепловых нейтронов.

Решение этого уравнения с граничным условием $\Phi(x=0) = \Phi_0$ имеет вид $\Phi(d) = \Phi_0 \exp(-n\sigma_a d)$ (1)

$$d = \frac{1}{n\sigma_a} \ln \frac{\Phi_0}{\Phi(d)}$$

где d – толщина пластинки. Из (1) получим

Тепловые нейтроны эффективно захватываются только ядрами ^{113}Cd , атомное содержание которого в природном кадмии составляет 12,26%. Сечение захвата тепловых нейтронов $\sigma_a(^{113}\text{Cd}) = 2 \cdot 10^4$ барн. Для вычисления d найдем концентрацию ядер ^{113}Cd :

$$n(^{113}\text{Cd}) = \frac{\rho(^{113}\text{Cd}) \cdot 12,26 \cdot 10^{-2}}{A_r(\text{Cd}) \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}} = \frac{8,65 \cdot 12,26 \cdot 10^{-2}}{112,4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}} = 5,86 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$$

Окончательно

$$d = \frac{1}{5,86 \cdot 10^{21} \cdot 2,0 \cdot 10^{20}} \ln 100 = 3,9 \cdot 10^{-2} \text{ см}$$

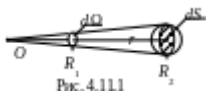
Задача 9

^{14}C ;
 $R_1 = 1,0 \text{ см}$;
 $R_2 = 10,0 \text{ см}$;
 $I_0 = 2,0 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$;
 $T_n = 2 \text{ МэВ}$;
 $\sigma = 1,6 \text{ барн}$

В центре сферического слоя графита, внутренний и внешний радиусы которого $R_1 = 1,0$ см и $R_2 = 10,0$ см, находится точечный источник нейтронов с кинетической энергией $T_n = 2$ МэВ. Интенсивность источника $I_0 = 2,0 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. Сечение взаимодействия нейтронов данной энергии с ядрами углерода $\sigma = 1,6$ барн. Определить плотность потока нейтронов $\Phi_n(R_2)$ на внешней поверхности графита, проходящих данный слой без столкновений.

Решение. Построим элемент телесного угла $d\Omega$ с вершиной в точке нахождения источника (рис. 4.11.1). По определению плотность потока нейтронов в точке R_2 будет равна

$$\Phi(R_2) = \frac{d\dot{N}(R_2)}{dS} \quad (9.1)$$



где $d\dot{N}(R_2)$ – количество нейтронов, не испытавших рассеяния и падающих со стороны графита на площадку dS в секунду. Количество нейтронов, испущенных источником в телесный угол $d\Omega$ в одну секунду и падающих на внутреннюю поверхность слоя в точке R_1 , составит

$$d\dot{N}(R_1) = \frac{I_0}{4\pi} d\Omega$$

Поскольку часть нейтронов испытывает рассеяние на ядрах углерода, то в соответствии с формулой (4.10.1) число нейтронов, не испытавших рассеяния и проходящих в секунду через площадку dS в точке R_2 , составит

$$d\dot{N}(R_2) = d\dot{N}(R_1) \exp[-n\sigma(R_2 - R_1)] = \frac{I_0}{4\pi} d\Omega \exp[-n\sigma(R_2 - R_1)]$$

где n – концентрация ядер углерода.

Подставив полученное выражение в (4.11.1) и воспользовавшись определением (3.22.2) для элемента телесного угла, получим

$$\begin{aligned} \Phi(R_2) &= \frac{I_0}{4\pi R_2^2} \exp[-n\sigma(R_2 - R_1)] = \frac{I_0}{4\pi R_2^2} \exp\left[-\frac{\rho(C)}{M_{\text{ат}}(C)}\sigma(R_2 - R_1)\right] = \\ &= \frac{2,0 \cdot 10^4}{4\pi 10^2} \exp\left[-\frac{1,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-24}}{12 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}}(10 - 1)\right] = 5 \frac{\text{нейтр.}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \end{aligned}$$

Задача 10

Узкий пучок нейтронов с кинетической энергией 10 эВ проходит через счетчик длиной $l = 15$ см вдоль его оси. Счетчик наполнен газообразным BF_3 при нормальных условиях (бор природного изотопного состава). Определить эффективность регистрации нейтронов с данной энергией, если известно, что сечение реакции (n, α) подчиняется закону $1/v$.

Решение. Эффективность η регистрации частиц – одна из основных характеристик любого счетчика частиц, которая представляет собой вероятность зарегистрировать ровно N частиц из N_0 вошедших в рабочий объем счетчика за время измерения. Для экспериментальной оценки величины η используют соотношение

$\eta = \frac{N_p}{N_0}$,	(10.1)
----------------------------	--------

где N_p – число зарегистрированных частиц, а N_0 – число частиц, попавших в рабочий объем детектора за время регистрации.

Непосредственная регистрация нейтронов данной энергии невозможна из-за крайне низкой кинетической энергии. Для регистрации используют экзоэнергетические реакции под действием нейтронов с образованием заряженных частиц, которые регистрируются обычными ионизационными методами. Одна из таких реакций



протекает на нуклиде ${}^{10}\text{B}$. Сечение этой реакции в тепловой области ($T_n = 0,025$ эВ) $\sigma_{n\alpha} = 3813$ б.

В соответствии с формулой (4.10.1) плотность потока нейтронов на выходе из детектора составит

$$\Phi(d) = \Phi_0 \exp(-n\sigma_{n\alpha}d)$$

а поглощенная в счетчике длиной d плотность потока

$\Delta\Phi(d) = \Phi_0 - \Phi_0 \exp(-n\sigma_{n\alpha}d) = \Phi_0[1 - \exp(-n\sigma_{n\alpha}d)]$,	(10.3)
---	--------

где Φ_0 – плотность потока нейтронов, входящих в счетчик через торцевую поверхность.

Если каждая α -частица, возникающая в реакции (10.2), оказывается зарегистрированной, то, согласно (4.12.1) и (4.12.3),

$$\eta = \frac{\Delta \Phi(d)}{\Phi_0} = 1 - \exp(-n\sigma_a d) =$$

$$= 1 - \exp\left(-2,69 \cdot 10^{19} \cdot 0,198 \cdot 3,813 \cdot 10^{-21} \sqrt{\frac{0,025}{10}} \cdot 15\right) = 1,51 \cdot 10^{-2},$$

т. к. при нормальных условиях в 1 см^3 идеального газа содержится $L = 2,69 \cdot 10^{19}$ молекул (число Лошмидта), а природное содержание $^{10}\text{В}$ составляет 18,9 %.

Задача 11

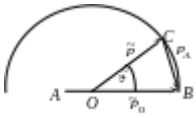


Рис. 4.15.1

Нейтроны с кинетической энергией T_0 упруго рассеиваются на неподвижных ядрах с массовым числом A . Определить а) энергию T нейтронов в ЛСК, рассеянных под углом в СЦИ; б) долю нейтронов, кинетическая энергия которых в результате однократного рассеяния лежит в интервале $(T, T + dT)$, если рассеяние в СЦИ изотропно.

Решение а). Запишем закон сохранения энергии:

$$T_0 = T + T_A,$$

где T_A – кинетическая энергия ядра отдачи с массовым числом A .

Тогда

$T = T_0 - T_A.$	(4.15.1)
------------------	----------

Для нахождения T_A воспользуемся векторной диаграммой импульсов (рис. 4.15.1). По теореме косинусов

$$p_A^2 = \tilde{p}_0^2 + \tilde{p}^2 - 2\tilde{p}_0\tilde{p}\cos\tilde{\vartheta}.$$

Но при упругом рассеянии в СЦИ величина импульса каждой из частиц не изменяется и по правилам построения импульсной диаграммы для упругого рассеяния

$$\tilde{p}_0 = \tilde{p} = p_0 \frac{A}{A+1},$$

где p_0 – импульс налетающего нейтрона в ЛСК. Тогда

$$\tilde{p}_A^2 = 2p_0^2 \frac{A^2}{(A+1)^2} (1 - \cos\tilde{\vartheta})$$

и

$$T_A = 2T_0 \frac{A}{(A+1)^2} (1 - \cos\tilde{\vartheta}).$$

Подставив полученное выражение для T_A в (4.15.1), получим окончательно

$T = \frac{1 + A^2 + 2A \cos\tilde{\vartheta}}{(A+1)^2} T_0.$	(4.15.2)
---	----------

б). Если рассеяние нейтронов в СЦИ изотропно, то число нейтронов $d\dot{N}$, рассеянных в единичный телесный угол $d\tilde{\Omega}$ в единицу времени, составит

$$d\dot{N} = \frac{\dot{N}}{4\pi} d\tilde{\Omega},$$

где \dot{N} – полное число нейтронов, испытавших рассеяние по всем возможным направлениям. Доля нейтронов $d\eta$, рассеянных в единицу времени в элемент телесного угла $d\tilde{\Omega}$,

$$d\eta = \frac{d\dot{N}}{\dot{N}} = \frac{d\tilde{\Omega}}{4\pi}.$$

В сферической системе координат с началом в точке рассеяния

$$d\tilde{\Omega} = \sin\tilde{\vartheta} d\tilde{\vartheta} d\tilde{\varphi}$$

и

$$d\eta = \frac{\sin \tilde{\vartheta} d\tilde{\vartheta} d\tilde{\varphi}}{4\pi}$$

Поскольку рассеяние нейтронов в СЦИ по условию задачи сферически симметрично, то угол $\tilde{\vartheta}$ не зависит от полярного угла $\tilde{\varphi}$ и

$d\eta(\tilde{\vartheta}) = \frac{\sin \tilde{\vartheta} d\tilde{\vartheta}}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\tilde{\varphi} = \frac{\sin \tilde{\vartheta}}{2} d\tilde{\vartheta}$	(10.3)
--	--------

Связь между кинетической энергией рассеянного нейтрона и углом рассеяния в СЦИ дается формулой (4.15.2). Дифференцируя формулу (.2), получим

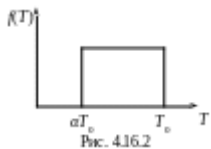
$$dT = - \frac{2A \sin \tilde{\vartheta}}{(A+1)^2} T_0 d\tilde{\vartheta}$$

Выразив из последнего выражения $\sin \tilde{\vartheta} d\tilde{\vartheta}$ и подставив в (4.15.3), получим окончательно, что

$d\eta = \frac{(A+1)^2}{4AT_0} dT$	(4.15.4)
------------------------------------	----------

а функция распределения рассеянных нейтронов по энергиям (энергетический спектр)

$$f(T) = \frac{d\eta}{dT} = \frac{(A+1)^2}{4AT_0}$$



Т аким образом, вероятность нейтрону иметь энергию от T_{\min} до T_{\max} оказывается одинаковой. Минимальному значению энергии рассеянного нейтрона соответствует рассеяние назад ($\tilde{\vartheta} = \pi$). Тогда из формулы (4.15.2) получаем

$$T_{\min} = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2} T_0 = \alpha T_0$$

Максимальному значению энергии нейтрона в энергетическом спектре соответствует отсутствие взаимодействия с ядрами мишени, т.е. $T_{\max} = T_0$. Этот же результат следует из формулы (4.15.2), если положить $\tilde{\vartheta} = 0$.

Энергетический спектр рассеянных нейтронов изображен на рис. 4.15.2.

Задача 12

Нейтроны испытывают рассеяние на первоначально покоившихся протонах. Считая это рассеяние изотропным в СЦИ, найти с помощью векторной диаграммы импульсов а) вероятность рассеяния нейтронов в интервале углов $(\vartheta, \vartheta + d\vartheta)$; б) долю нейтронов, рассеянных под углами $\vartheta > 60^\circ$; в) среднее значение угла рассеяния нейтронов в ЛСК.

Решение. Построим векторную диаграмму импульсов (рис. 4.16.1), не делая различия между массами протона и нейтрона.



а). В качестве оценки вероятности рассеяния нейтронов в интервале углов $(\vartheta, \vartheta + d\vartheta)$ можно использовать (4.15.3), если установить функциональную связь между углами ϑ и $\tilde{\vartheta}$. Из векторной диаграммы

$$2\vartheta + \varphi = \pi \text{ и } \tilde{\vartheta} + \varphi = \pi,$$

следовательно

$2\vartheta = \tilde{\vartheta}$	(4.16.1)
----------------------------------	----------

Тогда из (4.15.3) и (4.16.1)

$d\eta(\vartheta) = \frac{\sin 2\vartheta}{2} 2d\vartheta = \sin 2\vartheta d\vartheta$	(4.16.2)
---	----------

б). Доля нейтронов, рассеянных под углами ϑ , составит

$$\eta(\vartheta > 60^\circ) = \int_{\pi/3}^{\pi/2} d\eta(\vartheta) = \int_{\pi/3}^{\pi/2} \sin 2\vartheta d\vartheta = -\frac{1}{2} \cos 2\vartheta \Big|_{\pi/3}^{\pi/2} = \frac{1}{4}$$

т. к. максимально возможный угол рассеяния нейтрона в данном случае составляет $\vartheta_{\max} = \pi/2$.

в). Среднее значение угла рассеяния нейтрона найдем обычным образом:

$$\bar{\vartheta} = \frac{\int_0^{\pi/2} \vartheta d\eta(\vartheta)}{\int_0^{\pi/2} d\eta(\vartheta)} = \frac{\int_0^{\pi/2} \vartheta \sin 2\vartheta d\vartheta}{\int_0^{\pi/2} \sin 2\vartheta d\vartheta} = \frac{\pi}{4}$$

Задача 13

$M(^{51}\text{V}) = 0,5 \text{ г};$
 $t = 5,0 \text{ мин};$
 $N_p = 8,0 \cdot 10^9;$
 $\eta = 1,0 \cdot 10^{-2};$
 $T_{1/2} = 0,025 \text{ зБ};$
 $n_n = ?$

Небольшой образец ванадия ^{51}V массой $M = 0,5 \text{ г}$ активируется до насыщения в поле тепловых нейтронов. Непосредственно после облучения в течение $t = 5,0 \text{ мин}$ было зарегистрировано $N_p(t) = 8,0 \cdot 10^9$ импульсов при эффективности регистрации $\eta = 1,0 \cdot 10^{-2}$. Определить концентрацию n_n нейтронов, падающих на образец.

Решение. В результате захвата тепловых нейтронов ядрами ^{51}V образуется радиоактивный ^{52}V (сечение активации $\sigma_{\text{акт}} = 4,5 \text{ б}$), который после β^- -распада с периодом полураспада $T_{1/2} = 3,26 \text{ мин}$ превращается в стабильный нуклид ^{52}Cr .

Плотность потока нейтронов Φ_n может быть выражена через концентрацию нейтронов n_n и их среднюю скорость \bar{V}_n следующим образом:

$\Phi_n = n_n \bar{V}_n$	(13.1)
--------------------------	--------

Число импульсов, зарегистрированных за время t ,

$$N_p(t) = \eta \cdot N(t) = \eta \cdot N_a(1 - e^{-\lambda t}),$$

где $N(t)$ – число ядер, испытавших β^- -распад за время t , а N_a – число радиоактивных ядер при насыщении. Если воспользоваться формулой (2.3), то

$N_p(t) = \eta \frac{q}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$	(13.2)
--	--------

Здесь q – скорость образования радиоактивных ядер ^{52}V , распад которых регистрируется.

По определению число реакций в бесконечно малом объеме вещества мишени в единицу времени составляет

$$v = n \sigma_{\text{акт}} \Phi_n,$$

где n – концентрация ядер мишени; $\sigma_{\text{акт}}$ – сечение активации; Φ_n – плотность потока нейтронов. Тогда скорость образования радиоактивных ядер в бесконечно малом объеме вещества мишени составит

$$dq = v dV = n \sigma_{\text{акт}} \Phi_n dV$$

Чтобы найти скорость q образования радиоактивных ядер во всем образце, следует полученное выражение проинтегрировать по объему

$$V = \frac{m}{\rho}$$

который занимает вещество данной массы M и плотности ρ :

$q = \int_V n \sigma_{\text{акт}} \Phi_n dV = n \sigma_{\text{акт}} \Phi_n V =$	(13.3)
---	--------

$= \frac{\rho}{M_a} \sigma_{\text{акт}} \cdot \Phi_n \frac{M}{\rho} = \frac{M}{M_a} \sigma_{\text{акт}} \Phi_n ,$	
---	--

если считать, что плотность потока нейтронов и сечение активации в пределах объема образца не изменяются (образец «тонкий»).

Покажем, что такое допущение имеет место. Длина пробега нейтронов до первого взаимодействия

$$l = \frac{1}{n\sigma_{\text{акт}}} = \frac{M_{\text{ат}}(^{51}\text{V})}{\rho(^{51}\text{V})\sigma_{\text{акт}}} = \frac{51 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}}{5,87 \cdot 4,5 \cdot 10^{-24}} = 3,2 \text{ см}$$

что намного превышает характерные линейные размеры образца:

$$L \leq \sqrt[3]{\frac{m(^{51}\text{V})}{\rho(^{51}\text{V})}} = \sqrt[3]{\frac{0,5}{5,87}} = 0,44 \text{ см}$$

Окончательно из (13.1), (13.2) и (13.3) получим

$$n_n = \frac{\Phi_n}{V_n} = \frac{N_p(t) \cdot \lambda \cdot M_{\text{ат}}(^{51}\text{V})}{V_n \cdot \eta \cdot M(^{51}\text{V}) \cdot \sigma_{\text{акт}} (1 - e^{-\lambda t})} =$$

$$= \frac{8,0 \cdot 10^8 \cdot \ln 2 \cdot 51 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}}{2,2 \cdot 10^5 \cdot 3,26 \cdot 60 \cdot 0,010 \cdot 0,5 \cdot 4,5 \cdot 10^{-24} \left[1 - \exp\left(-\frac{\ln 2}{3,26} 5,0\right) \right]} =$$

$$= 7,4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}.$$

Задача 14

Какую долю η первоначальной кинетической энергии T_0 теряет нейтрон при а) упругом лобовом столкновении с первоначально покоившимися ядрами ^2H , ^{12}C и ^{235}U ; б) упругом рассеянии под углом на первоначально покоившемся дейтоне, если угол = 30, 90 и 150°?

Решение. Доля энергии, теряемая нейтроном,

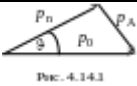
$\eta = \frac{T_0 - T_n}{T_0} = 1 - \frac{T_n}{T_0} = 1 - \left(\frac{p_n}{p_0} \right)^2 ,$	(14.1)
---	--------

где T_0 и p_0 – кинетическая энергия и импульс налетающего нейтрона; T_n и p_n – кинетическая энергия и импульс нейтрона после рассеяния.

Решение задачи получим в ЛСК. Запишем закон сохранения энергии и импульса:

$T_0 = T_n + T_A ;$	(14.2)
---------------------	--------

$p_0 = p_n + p_A ,$	(14.3)
---------------------	--------



где p_0 – импульс налетающего нейтрона; p_n – импульс нейтрона после рассеяния; T_A и p_A – кинетическая энергия и импульс ядра отдачи с массовым числом А. Из векторного треугольника (рис. 14.1), графически изображающего закон сохранения импульса (4.14.3), имеем

$p_A^2 = p_0^2 + p_n^2 - 2p_0 p_n \cos \theta .$	(14.4)
--	--------

Из (4.14.2), учитывая, что $T = p^2/2m$, получим

$p_A^2 = A(p_0^2 - p_n^2) .$	(14.5)
------------------------------	--------

Подставив (14.5) в (14.4), после несложных преобразований получим квадратное уравнение

$$(A+1) \cdot x^2 - 2 \cos \vartheta \cdot x + (1-A) = 0, \quad x = p_n / p_0$$

Решение этого уравнения

$$x = \frac{\cos \vartheta + \sqrt{A^2 - \sin^2 \vartheta}}{A+1},$$

т.к. знак « - » перед корнем соответствует физически бессмысленному решению (следует рассмотреть случаи $\vartheta = 0$, или $\vartheta = \pi$).

Окончательно

$\eta = 1 - \left(\frac{\cos \vartheta + \sqrt{A^2 - \sin^2 \vartheta}}{A+1} \right)^2$	(14.6)
--	--------

а). При лобовом столкновении с телом бóльшей массы нейтрон отлетает назад и выражение (4.14.6) приобретает вид

$\eta = 1 - \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 = \frac{4A}{(1+A)^2}$	(14.7)
--	--------

Для $A = 2$ (^2H), 12 (^{12}C) и 238 (^{238}U) получим соответственно $\eta = 0,89$; $0,284$ и $0,0168$.

б). При столкновении нейтрона с ядром ^2H ($A = 2$) выражение (4.14.6) приобретает вид:

$\eta = 1 - \left(\frac{\cos \vartheta + \sqrt{4^2 - \sin^2 \vartheta}}{3} \right)^2$	(14.8)
--	--------

Для углов $= 30, 90$ и 150° получим соответственно $\eta = 0,127, 0,667$ и $0,87$.

Задача 15

Получить с помощью квазиклассических рассуждений выражение для прицельного параметра b бомбардирующего нейтрона. Вычислить первые три возможных значения b для нейтронов с кинетической энергией $T_n = 1,00$ МэВ.

Решение. Величина момента импульса l частицы (орбитального момента) относительно произвольной точки O

$$|l| = bp,$$

где b – прицельный параметр; p – величина импульса. В квантовой механике величина $|l|$ может принимать значения

$$|l| = \hbar \sqrt{l(l+1)},$$

где $l = 0, 1, 2, \dots$ – квантовое число момента. Из двух последних соотношений получаем возможные значения

$b_l = \frac{\hbar}{p} \sqrt{l(l+1)} = \lambda \sqrt{l(l+1)}$	(15.1)
---	--------

Вычислим длину волны де-Бройля для нейтрона с кинетической энергией $T_n = 1,00$ МэВ:

$\lambda_n = \frac{4,55 \cdot 10^{-13}}{\sqrt{T_n [\text{МэВ}]} } = 4,55 \cdot 10^{-13} \text{ см.}$	(15.2)
--	--------

Соответственно первые три значения прицельного параметра равны $0, 6,4$ и $11,2$ Фм.