

Министерство образования и науки Российской Федерации

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

В.В. Кушин, С.Г. Покачалов

**МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ
ИЗЛУЧЕНИЙ**
(итоговое занятие)

Лабораторный практикум

*Рекомендовано к изданию
УМО «Ядерные физика и технологии»*

Москва 2015

УДК 539.107(076.5)
ББК 22.38я7
К 43

Кушин В.В., Покачалов С.Г. Методы регистрации излучений (итоговое занятие). Лабораторный практикум: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – 24 с.

Содержит материалы к решению практических задач и проведению самостоятельных экспериментальных исследований на базе установок, предназначенных для выполнения лабораторных работ практикума «Экспериментальные методы ядерной физики».

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям «Ядерная физика и технологии», «Физика атомного ядра и частиц», «Физика», «Физика кинетических явлений», «Радиационная безопасность человека и окружающей среды», «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника», в рамках образовательных программ бакалавриата, специалитета и магистратуры, выполнения научно-исследовательской работы студентов.

Подготовлено в рамках Программы создания и развития НИЯУ МИФИ.

Рецензент проф. *С.А. Воронов*

ISBN 978-5-7262-2085-7

© *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2015*

Редактор *Е.Г. Станкевич*

Подписано в печать 20.11.2015. Формат 60×84 1/16

Печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 100 экз.

Изд. № 1/1. Заказ № 30.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

115409, Москва, Каширское ш., 31.

ООО «Баркас».

115230, Москва, Каширское ш., 4..

Содержание

Порядок выполнения работы	4
1. Газовые ионизационные детекторы	4
1.1. Импульсная ионизационная камера	4
1.2. Газонаполненный пропорциональный детектор нейтронов	7
1.3. Счетчик Гейгера	9
2. Полупроводниковый детектор.....	11
3. Сцинтилляционный детектор	13
Приложение	16
Список рекомендуемой литературы	24

Цель практикума: *решение практических задач в рамках контрольного задания и проведение самостоятельного экспериментального исследования на базе лабораторного практикума «Экспериментальные методы ядерной физики».*

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

К работе допускаются студенты, которые выполнили и защитили все предусмотренные учебным планом лабораторные работы.

При подготовке к итоговому занятию студенту необходимо:

1) получить у преподавателя одно из контрольных заданий, выполнить его и защитить;

2) получить у преподавателя рабочее задание;

3) составить структурную схему эксперимента, согласовать с преподавателем выбранную методику, представить и обосновать расчеты и приступить к выполнению рабочего задания;

4) составить отчет о проделанной работе. Привести в отчете структурную схему эксперимента, результаты с указанием ошибок измерений. Защитить полученные результаты.

При выполнении контрольного и рабочего заданий можно использовать справочные материалы, приведенные в приложении.

1. ГАЗОВЫЕ ИОНИЗАЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

1.1. Импульсная ионизационная камера

Контрольное задание

1. В двухэлектродной камере, работающей в режиме полного электронного собирания, вычислить и построить распределение импульсов напряжения по амплитудам от альфа-частиц ^{239}Pu , размещенного в центре высоковольтного электрода для случаев, когда на электрод подается отрицательное и положительное напряжение. Камера заполнена чистым аргоном до давления 0,2; 0,3; 0,4 МПа, диаметр электродов 60 мм, расстояние между ними $d = 2$ см, $C_{\text{ЭКВ}} = 50$ пФ. Считать, что плотность ионизации вдоль трека альфа-частиц постоянна.

2. В двухэлектродной камере, заполненной чистым аргоном, вычислить и построить величину индуцированного электронного тока и электронной компоненты импульса напряжения от источника альфа-частиц ^{239}Pu , размещенного в центре высоковольтного электрода, в зависимости от угла вылета частиц для отрицательной и положительной полярностей приложенного напряжения. Пробег альфа-частиц равен расстоянию между электродами. Считать, что плотность ионизации вдоль трека постоянна. Обосновать выбор эквивалентной RC -цепи (полосы пропускания усилителя), при которой величина сигнала на выходе усилителя пропорциональна электронной компоненте тока и электронной компоненте импульса напряжения.

3. Двухэлектродная камера заполнена чистым аргоном до давления 0,2 МПа. Источник альфа-частиц ^{239}Pu размещен на отрицательном высоковольтном электроде. Расстояние между электродами $d = 2$ см. Напряжение, приложенное к электродам, $U = 800$ В. Вычислить максимальное время собирания электронов и ионов в камере. Сделать вывод о режиме работы камеры, если к ней подключен зарядочувствительный предусилитель, в который введена дифференцирующая цепочка с постоянной времени $\tau_d = 50$ мкс.

4. В камере с сеткой, заполненной чистым аргоном до давления 0,2 МПа, источник альфа-частиц ^{239}Pu размещен на высоковольтном электроде. Расстояние «высоковольтный электрод – сетка» и «сетка – сигнальный электрод» $d = 2$ см. Доказать, что максимальная амплитуда индуцированного заряда на сигнальном электроде не зависит от угла вылета альфа-частицы. Напряженность поля между высоковольтным электродом и сеткой E_1 , сеткой и сигнальным электродом E_2 , $E_2 = 2E_1$, $E_1 = 400$ В/см. $T^+ \gg RC \gg T^-$, где R – сопротивление нагрузки, C – эквивалентная емкость, T^+ и T^- – время собирания положительных ионов и электронов соответственно. Считать, что плотность ионизации вдоль трека альфа-частицы постоянна, проницаемость сетки 100 %.

5. Перечислить все факторы, которые могут влиять на амплитуду импульса и энергетическое разрешение в камере с сеткой.

6. Выбрать и обосновать основные параметры камеры с сеткой, предназначенной для спектрометрии альфа-излучения (расстояния «катод – сетка», «сетка – сигнальный электрод», диаметр электродов, наполняющий газ и его давление, потенциалы на электродах,

требования к сетке, параметры внешней эквивалентной цепи – полюсы пропускания усилителя).

Рабочее задание

1. Снять распределение импульсов по амплитудам в двухэлектродной импульсной ионизационной камере (ИИК), работающей в режиме электронного собирания, от источника альфа-частиц ^{239}Pu , размещенного в центре отрицательного высоковольтного электрода при давлениях аргона 0,2; 0,3; 0,4 МПа. Выбрать и обосновать величину напряжения между электродами, полосу пропускания усилителя. Объяснить полученный результат.

2. Снять распределение импульсов по амплитудам в ИИК без сетки в режиме электронного собирания от источника альфа-частиц ^{239}Pu , размещенного в центре высоковольтного электрода, при различных полярностях приложенного напряжения. Давление аргона 0,2 МПа, расстояние между электродами 2 см. Выбрать и обосновать величину напряжения между электродами, полосу пропускания усилителя. Объяснить полученный результат. Как будут меняться спектры при увеличении давления аргона?

3. Определить собственное энергетическое разрешение ИИК с сеткой для источника альфа-частиц ^{239}Pu , размещенного на высоковольтном электроде, вклад в собственное разрешение токов утечек через ИИК.

4. Снять счетную характеристику ИИК без сетки и с сеткой от источника альфа-частиц ^{239}Pu , размещенного на отрицательном высоковольтном электроде. Объяснить полученный результат.

5. Определить эффективность собирания электронов в ИИК с сеткой. Камера заполнена аргоном, регистрируются альфа-частицы от источника ^{239}Pu , размещенного на высоковольтном электроде. Как будет меняться эффективность собирания при изменении E_2/E_1 , где E_2 – напряженность поля между сеткой и сигнальным электродом, E_1 – между высоковольтным электродом и сеткой? Под эффективностью собирания зарядов понимается отношение зарядов Q_1/Q_2 , где Q_1 – значение заряда, полученного на сигнальном электроде ИИК для энергии ε_α , потерянной альфа-частицей; Q_2 – расчетное значение заряда, созданного альфа-частицей в ИИК. Значение

ние Q_2 вычисляется по формуле $Q_2 = e\varepsilon_\alpha / \omega$, где e – заряд электрона, ω – средняя энергия ионообразования в аргоне.

6. В двухэлектродной ИИК, заполненной аргоном, снять зависимость скорости дрейфа электронов от E/p , где E – напряженность электрического поля между электродами; p – давление. Обосновать выбор полярности высоковольтного электрода, на котором помещен источник альфа-частиц ^{239}Pu , выбор полосы пропускания усилителя. Сравнить полученный результат с данными, приведенными в приложении.

1.2. Газонаполненный пропорциональный детектор нейтронов

Контрольное задание

1. Счетчик СММ-5 с длиной рабочей части (250 ± 5) мм и диаметром 35 мм, заполненный газом BF_3 с естественным содержанием изотопов ^{10}B , ^{11}B до давления 0,027 МПа, облучается тепловыми нейтронами. Оценить эффективность регистрации нейтронов в двух случаях: а) поток нейтронов направлен параллельно оси счетчика; б) поток нейтронов направлен перпендикулярно оси счетчика.

2. Эффективность регистрации пропорционального счетчика, наполненного газом BF_3 с естественной смесью изотопов ^{10}B и ^{11}B , для тепловых нейтронов при комнатной температуре составляет 4 %. Как изменится эффективность счетчика при регистрации нейтронов с энергией 0,4 эВ? До какого процентного содержания нужно обогатить газ изотопом ^{10}B , чтобы довести эффективность счетчика до ее прежнего значения?

3. Получить зависимость коэффициента газового усиления m в цилиндрическом пропорциональном счетчике от величины напряжения, приложенного к его электродам. Обосновать практически полную независимость m от координаты первичной ионизации.

4. Счетчик СММ-5 с длиной рабочей части (250 ± 5) мм диаметром 35 мм, заполненный газом BF_3 с естественным содержанием изотопов ^{10}B , ^{11}B до давления 0,027 МПа, регистрирует в режиме

газового усиления тепловые нейтроны. Рассчитать энергии и пробеги образующихся продуктов реакции, сравнить с размерами детектора. Нарисовать качественно распределение импульсов по амплитудам на выходе счетчика с учетом рассчитанных значений пробегов и вероятностей каналов ядерной реакции.

5. Счетчик СММ-16 с длиной рабочей части (100 ± 5) мм и диаметром катода 18,5 мм, заполненный газом ^3He до давления 0,7 МПа, регистрирует в режиме газового усиления тепловые нейтроны. Рассчитать энергии и пробеги образующихся продуктов реакции, сравнить пробеги с размерами детектора. Нарисовать качественно распределение импульсов по амплитудам на выходе счетчика с учетом рассчитанных значений пробегов.

6. Рассчитать чувствительность цилиндрического пропорционального счетчика, наполненного газом BF_3 с естественной смесью изотопов ^{10}B и ^{11}B , к потоку тепловых нейтронов. Давление газа 0,027 МПа, длина рабочей части (250 ± 5) мм, диаметр катода 35 мм. Чувствительность – это отношение числа зарегистрированных сигналов в единицу времени к плотности потока частиц в месте расположения детектора.

Рабочее задание

1. Определить собственное абсолютное и относительное энергетическое разрешение счетчика СММ-5, наполненного газом BF_3 , работающего в режиме газового усиления, при регистрации тепловых нейтронов. Определить энергетический эквивалент уровня шума детектора.

2. Проверить свойство пропорциональности счетчика СММ-5, наполненного газом BF_3 , работающего в режиме газового усиления, при регистрации тепловых нейтронов.

3. Для счетчика СММ-5, наполненного газом BF_3 , измерить соотношение вероятностей каналов ядерной реакции при регистрации тепловых нейтронов. Сравнить со значениями вероятностей, приведенными в приложении.

4. Снять счетную характеристику счетчика СММ – 5 при регистрации тепловых нейтронов.

1.3. Счетчик Гейгера

Контрольное задание

1. Счетчик Гейгера облучается гамма-квантами источника ^{137}Cs с энергией 662 кэВ. Напряжение на электродах счетчика U_1 .

а) Нарисовать качественно распределение образующихся электронов по энергии.

б) Нарисовать качественно распределение импульсов по амплитудам на выходе счетчика.

в) Как изменится форма распределения импульсов при замене источника ^{137}Cs на источник гамма-квантов ^{60}Co ?

г) Как изменится форма распределения импульсов при увеличении напряжения на счетчике до значения $U_2 > U_1$.

2. Счетчик Гейгера облучается узким пучком монохроматических квантов с энергией $h\nu = 100$ кэВ. Оценить количественно эффективность регистрации квантов счетчиком со следующими параметрами: диаметр катода – 1 см, толщина стенки катода – 100 мкм, диаметр анода – 10 мкм, счетчик наполнен аргоном до давления $6,7 \cdot 10^3$ Па, анод и катод выполнены из стали. Полный массовый коэффициент ослабления квантов с энергией 100 кэВ составляет величину $(\mu/\rho)_{\text{Ar}} = 0,204$ см²/г и $(\mu/\rho)_{\text{Fe}} = 0,370$ см²/г для аргона и железа соответственно. Плотность стали равна 7,88 г/см³, плотность аргона при нормальном давлении 1,78 г/л. Полагать в расчетах, что все образующиеся вторичные электроны попадают в рабочий объем счетчика.

а) Как качественно изменится эффективность регистрации при увеличении энергии квантов?

б) Как качественно изменится эффективность регистрации при уменьшении давления газа в счетчике?

в) Как качественно изменится эффективность регистрации при увеличении толщины стенки счетчика?

3. Релятивистская заряженная частица пересекает рабочий объем счетчика Гейгера и, потеряв в нем незначительную часть своей энергии, выходит наружу. При этом в рабочем объеме счетчика она оставляет некоторое количество пар ионов n_i , где n_i – случайная величина. Найти эффективность регистрации релятивистских заряженных частиц счетчиком, если среднее число пар составляет

величину \bar{n} . При расчете считать, что распределение случайной величины n_i подчиняется закону Пуассона.

4. Известно, что число быстрых заряженных частиц, попадающих в рабочий объем счетчика Гейгера в единицу времени равно N . При этом измеренная скорость счета составила величину n ($n < N$). Чему равно временное разрешение счетчика?

5. Счетчик Гейгера срабатывает 1000 раз в секунду. Разрешающее время счетчика составляет $2 \cdot 10^{-4}$ с. Найти истинную частоту изучаемых событий.

6. Разрешающее время счетчика Гейгера равно τ_1 , разрешающее время регистрирующего устройства равно τ_2 . Найти число зарегистрированных событий, если в счетчик попало N частиц.

7. Известен метод измерения эффективности регистрации релятивистских заряженных частиц в счетчике Гейгера по отношению числа тройных и двойных совпадений в телескопе, состоящем из трех счетчиков $\eta = N_{123} / N_{13}$. Можно ли использовать этот метод для измерения эффективности регистрации счетчиком Гейгера гамма-квантов? Обосновать полученный вывод.

8. Параллельный пучок релятивистских однозарядных частиц падает на поверхность счетчика Гейгера нормально к оси.

а) Вычислить среднее число пар ионов образующихся в объеме счетчика.

б) Вычислить вероятность того, что однозарядная частица, проходящая счетчик Гейгера нормально к его оси не будет зарегистрирована.

Диаметр счетчика 1,5 см, счетчик наполнен аргоном до давления 10^4 Па. Величина минимальной удельной ионизации v_{\min} в аргоне равна $v_{\min} = 53 \text{ см}^{-1}$ (v_{\min} – среднее значение полного числа пар ионов, образуемых однозарядной частицей с минимальной ионизирующей способностью на пути 1 см при нормальном давлении).

Рабочее задание

1. Установить на счетчике Гейгера напряжение в пределах рабочей области.

а) Измерить и зарисовать осциллограмму импульсов напряжения на выходе счетчика при облучении его гамма-квантами источника ^{137}Cs с энергией 662 кэВ.

б) Изменить напряжение на электродах счетчика, не выходя за пределы рабочей области. Наблюдать с помощью осциллографа, изменение формы и амплитуды сигнала на выходе счетчика.

в) Заменить источник ^{137}Cs на источник ^{60}Co . Измерить и зарисовать осциллограмму импульсов напряжения на выходе счетчика. Сравнить результаты измерений с результатами п. а).

2. Провести измерение эффективности регистрации релятивистских космических заряженных частиц в счетчике Гейгера по отношению двойных и тройных совпадений, регистрируемых телескопом из трех счетчиков. По результатам измерений вычислить среднее число пар \bar{n} , образованных в счетчике релятивистской заряженной частицей.

3. Измерить среднюю скорость счета событий при облучении счетчика Гейгера источником ^{137}Cs . Вычислить истинную частоту изучаемых событий, если известно, что временное разрешение счетчика равно $4 \cdot 10^{-5}$ с.

4. Измерить среднюю скорость счета событий при облучении счетчика Гейгера источником ^{137}Cs . Вычислить истинную частоту изучаемых событий, если известно, что временное разрешение счетчика равно $\tau_1 = 4 \cdot 10^{-5}$ с, а разрешающее время регистрирующего устройства $\tau_2 = 1 \cdot 10^{-5}$ с.

5. Измерить временное разрешение счетчика Гейгера методом двух источников. Оценить точность выполненных измерений.

2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДЕТЕКТОР

Контрольное задание

1. Параллельный пучок альфа-частиц с энергией 5,15 МэВ (^{239}Pu) падает на поверхность кремниевого поверхностно – барьерного полупроводникового детектора (ППД). Между ППД и источником находится слой воздуха при нормальных условиях. Рассчитать и построить зависимость амплитуды импульса от толщины слоя воздуха (в диапазоне толщин 0 – 5 см с шагом 0,25 см). Принять эффективность собирания зарядов в ППД равной 100 %, потерями энергии в мертвом слое можно пренебречь.

2. Кремниевый поверхностно-барьерный ППД облучается альфа-частицами с энергиями $4 \div 15$ МэВ. Толщина чувствительной области равна 45 мкм. Рассчитать и построить зависимость индуцированного заряда на выходе ППД от энергии альфа-частиц. Принять эффективность собирания зарядов в ППД равной 100 %. Указать область пропорциональности между амплитудой импульсов и энергией альфа-частиц.

3. Рассчитать максимальную величину индуцированного заряда, возникающего в кремниевом ППД с p - n -переходом, при облучении его параллельным пучком альфа-частиц с энергией 5,15 МэВ (^{239}Pu). Толщина чувствительной области детектора 40 мкм, мертвого слоя – 5 мкм. Принять эффективность собирания зарядов в ППД равной 100 %.

4. Сравнить значения максимальных индуцированных зарядов при регистрации альфа-частиц с энергией 5,15 МэВ на выходах кремниевых ППД и трехэлектродной импульсной ионизационной камеры, заполненной чистым аргоном, в которой источник размещен на высоковольтном электроде. Сравнить для этих детекторов физический предел энергетического разрешения, определяемый флуктуациями ионизации.

5. Обосновать необходимость создания в кремниевом ППД перехода. Оценить в кремниевом поверхностно-барьерном (структура p^+-n) ППД при поданном обратном напряжении смещения соотношение удельного сопротивления в области перехода, связанного с диффузией неосновных носителей в переход и удельного сопротивления вне перехода.

6. Вычислить эффективность регистрации гамма-квантов с энергией 100 кэВ кремниевым поверхностно-барьерным ППД с толщиной чувствительной области 50 мкм в геометрии узкого пучка.

7. Поверхностно-барьерный ППД и двухэлектродная ИИК с электронным собиранием облучаются изотропным источником альфа-частиц с энергией 5,15 МэВ. Пробег частиц в ИИК равен расстоянию между электродами, пробег частиц в ППД равен толщине чувствительного слоя. Нарисовать качественно распределение импульсов по амплитудам для каждого детектора. Объяснить полученный результат.

Рабочее задание

1. Измерить зависимость амплитуды импульсов как функции энергии альфа-частиц от источника ^{226}Ra кремниевым поверхностно-барьерным ППД при обратном напряжении смещения в диапазоне $1\div 2$ В. Объяснить полученный результат.

2. Между источником альфа-частиц с известной энергией и ППД находится слой воздуха. Определить среднюю энергию, потерянную альфа-частицами в воздухе. Принять эффективность собирания зарядов в ППД равной 100 %, потерями энергии в мертвом слое ППД можно пренебречь.

3. Варьируя расстояние между источником альфа-частиц с энергией 5,15 МэВ (^{239}Pu) и ППД, снять зависимость амплитуды импульса как функции толщины слоя воздуха. Сравнить с результатом задачи № 2 контрольного задания.

4. Определить с помощью кремниевого поверхностно-барьерного ППД энергию альфа-частиц от неизвестного источника.

5. Измерить эффективность собирания заряда в ППД. Измерения провести в двух режимах работы: при напряжении смещения $(1\div 2)$ В, и оптимальном смещении. Дать объяснения полученным результатам.

3. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР

Контрольное задание

1. Органический сцинтиллятор (антрацен) облучается параллельным пучком альфа-частиц от источника ^{239}Pu через алюминиевую фольгу толщиной 10 мкм, плотность алюминия $\rho = 2,7$ г/см³. Рассчитать среднее число фотонов в сцинтилляционной вспышке.

2. Оценить максимальную величину импульса напряжения на аноде ФЭУ для сцинтилляционного детектора с кристаллом NaJ(Tl) при облучении его гамма-квантами от источника ^{137}Cs . Считать, что квантовая эффективность фотокатода ФЭУ составляет 10 %, коэффициент усиления ФЭУ: $M = 10^5$, коэффициент светосбора 90 %. Величина RC в анодной цепи равна $RC = \tau$, где R – сопротивление нагрузки, C – эквивалентная емкость, τ – время высвечивания сцинтиллятора.

3. Оценить эффективность регистрации тепловых нейтронов сцинтилляционным детектором LiJ(In) диаметром 30 мм и высотой 10 мм для двух случаев: а) поток нейтронов направлен параллельно оси кристалла; б) поток нейтронов направлен перпендикулярно оси кристалла.

4. Вычислить отношение суммарного числа импульсов в пике полного поглощения к суммарному числу импульсов во всем амплитудном распределении для сцинтилляционного детектора с тонким кристаллом NaJ(Tl) (многократным комптоновским рассеянием в кристалле можно пренебречь) для параллельного пучка гамма-квантов с энергией 662 кэВ, падающих на торцевую поверхность кристалла.

5. Перечислить факторы, влияющие на энергетическое разрешение сцинтилляционного детектора. Каким фактором определяется предельное энергетическое разрешение сцинтилляционного детектора? Чему равно предельное разрешение при регистрации электрона с энергией 1 МэВ сцинтиллятором NaJ(Tl)?

6. Для сцинтилляционного детектора с кристаллом NaJ(Tl) оценить энергию заряженной частицы (электрона), которая приводит к появлению одноэлектронного импульса на фотокатоде ФЭУ, если квантовая эффективность фотокатода составляет 5 %, коэффициент светосбора 75 %.

7. Спектральная чувствительность фотокатода ФЭУ $\gamma(\lambda)$, [А/Вт] определяется как отношение тока фотокатода к потоку энергии фотонов с данной длиной волны λ . Найти связь между квантовой эффективностью фотокатода и спектральной чувствительностью.

Рабочее задание

1. Измерить отношение эффективностей регистрации гамма-квантов от источника ^{137}Cs сцинтилляционным детектором с кристаллами NaJ(Tl) и антраценом толщиной 10 мм. Сравнить полученный результат с расчетным значением для параллельного пучка гамма-квантов, падающего на торцевую поверхность кристалла.

2. Проверить линейность сцинтилляционного детектора при регистрации гамма-квантов неорганическим сцинтиллятором.

3. В сцинтилляционном детекторе с кристаллом NaJ(Tl) толщиной 10 мм определить долю гамма-квантов с энергией 662 кэВ

(^{137}Cs), зарегистрированных в пике полного поглощения. Сравнить полученный результат с вычисленным значением в контрольном задании № 4. Объяснить полученный результат.

4. Измерить сцинтилляционным детектором максимальную энергию комптоновских электронов от источника гамма – квантов источника ^{137}Cs . Сравнить полученную величину с теоретическим значением.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пробег легких ионов (от протона до альфа-частицы)

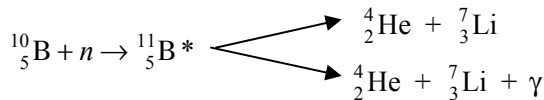
Связь между пробегами частиц одинаковых энергий в различных веществах устанавливается с удовлетворительной точностью с помощью эмпирической формулы $\rho_A R_A / A_A^{1/3} = \rho_B R_B / A_B^{1/3}$, где ρ_A, ρ_B – плотности; R_A, R_B – пробеги частиц; A_A, A_B – атомные веса веществ A и B соответственно.

Отсюда, полагая вещество B воздухом, (атомный вес воздуха $A_B = 14,5$, плотность $\rho_B = 1,29$ кг/м³), для расчета пробега частиц в любой среде получаем $\rho_A R_A = 0,53 R_B A_A^{1/3}$, где R_B – пробег частицы в воздухе, см; $\rho_A R_A$ – искомый пробег, мг/см².

Для частиц с одинаковым зарядом (например, протона, ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_1\text{H}$) пробег частицы с массой M_x и кинетической энергией ϵ_x в каком-либо веществе можно определить, зная для этого вещества пробег протона с массой M_p и кинетической энергией $\epsilon_p = (M_p \cdot \epsilon_x) / M_x$, по формуле $R_x(\epsilon_x) = (M_x \cdot R(\epsilon_p)) / M_p$. Точно так же, зная пробег альфа-частицы, можно по этой формуле вычислить пробег ионов ${}^3\text{He}$ и т. д.

Сечения некоторых ядерных реакций на тепловых нейтронах

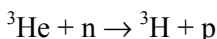
При захвате медленного нейтрона ядром ${}^{10}\text{B}$ образуется ядро изотопа ${}^{11}\text{B}$ в возбужденном состоянии, которое практически мгновенно (10^{-12} с) распадается на альфа-частицу и ядро лития:



Сечение реакции для тепловых нейтронов (при комнатной температуре $\epsilon_n = 0,025$ эВ) на изотопе ${}^{10}\text{B}$ составляет величину $\sigma({}^{10}\text{B}) = 3840 \cdot 10^{-28}$ м², энергия реакции $W = 2,78$ МэВ. Для естественной смеси изотопов, в которой содержится 19,8 % ${}^{10}\text{B}$ и 80,2 % ${}^{11}\text{B}$, $\sigma({}^{10}\text{B} + {}^{11}\text{B}) = 758 \cdot 10^{-28}$ м².

Если образовавшееся ядро лития находится в основном состоянии, то в результате этой реакции выделяющаяся энергия $W = 2,78$ МэВ делится между ядром ${}^7_3\text{Li}$ и альфа-частицей обратно пропорционально их массам. Однако при распаде ядра ${}^{11}_5\text{B}$ ядро ${}^7_3\text{Li}$ в 94 % случаев оказывается в возбужденном состоянии. При переходе его в основное состояние испускается гамма-квант с энергией 0,48 МэВ (вероятность регистрации которого мала), и в виде кинетической энергии продуктов реакции выделяется энергия, равная 2,3 МэВ.

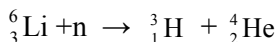
При захвате медленных нейтронов ядром ${}^3\text{He}$ идет реакция



с энергией $W = 0,765$ МэВ.

Сечение ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ реакции для тепловых нейтронов составляет величину $\sigma({}^3\text{He}) = 5327 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$.

При захвате медленных нейтронов ядром ${}^6\text{Li}$ идет реакция



с энергией $W = 4,476$ МэВ. Сечение реакции для тепловых нейтронов составляет величину $\sigma({}^6\text{Li}) = 936 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$. В естественной смеси изотопов нуклид ${}^6\text{Li}$ составляет 7,52 %, сечение для естественной смеси $\sigma({}^6\text{Li} + {}^7\text{Li}) = 70,4 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$.

Таблица П.1

Пробег альфа-частиц в воздухе, см

Энергия, МэВ	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
3	1,67	1,75	1,83	1,91	1,99	2,07	2,16	2,24	2,33	2,42
4	2,51	2,61	2,70	2,80	2,90	3,00	3,10	3,20	3,30	3,41
5	3,51	3,62	3,73	3,84	3,96	4,07	4,18	4,30	4,42	4,54
6	4,66	4,78	4,90	5,03	5,15	5,28	5,41	5,54	5,68	5,81

Таблица П.2

Значения констант в соотношении «пробег – энергия»
 для легких ионов в кремнии
 $(R = a \cdot \varepsilon^b, \text{ где } R \text{ в мкм, } \varepsilon - \text{ в МэВ)}$

Константа	p	d	${}^3\text{H}$	${}^3\text{He}$	α
a	13,27	8,48	6,96	1,90	1,61
b	1,74	1,72	1,68	1,66	1,65

Таблица П.3

Пробег частиц $R({}_2^4\text{He})$ и $R({}_3^7\text{Li})$ в газе BF_3
 при нормальных условиях

Энергия ε , МэВ	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
$R({}_2^4\text{He}), \text{ мг/см}^2$	0,61	0,67	0,73	0,80	0,87	0,93	1,00	1,07	1,14	1,21
$R({}_3^7\text{Li}), \text{ мг/см}^2$	0,57	0,61	0,66	0,70	0,74	0,78	0,82	0,86	0,90	0,94

Таблица П.4

Плотность некоторых газов при нормальных условиях

Газ	${}^3\text{He}$	Ar	Kr	Xe	BF_3	Воздух
$\rho, \text{ кг/м}^3$	0,134	1,78	3,74	5,89	2,99	1,29

Таблица П.5

Средняя энергия ионообразования в газах

Газ	Ar	Kr	Xe	BF_3	Воздух
$\omega, \text{ эВ}$	26,4	24,1	21,9	32	34

Таблица П.6

Характеристики некоторых радиоактивных нуклидов
как альфа-излучателей

Изотоп	Энергия альфа-частиц, МэВ	Выход, %	Период полураспада, лет
^{239}Pu	5,156	73,3	24390
	5,143	15,1	
	5,105	11,5	
^{233}U	4,773	15	$1,62 \cdot 10^5$
	4,816	84	
^{238}Pu	5,499	72	86,4
	5,456	28	
^{226}Ra	4,599	5,4	1602
	4,782	94,6	
	5,490	100	
	6,002	100	
	7,687	100	

Таблица П.7

Скорость дрейфа электронов в чистом аргоне, 10^5 см/с

$E/p, 10^{-3}$ В/(см·Па)	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	20,0	24,0
Скорость дрейфа	2,9	3,2	4,0	4,3	4,8	5,2	5,7	6,5	8,4	10

Следует отметить, что при данных E/p скорость дрейфа в аргоне (как и в других инертных газах), содержащем незначительные примеси определенных газов (например, CO_2 , CH_4), может быть значительно больше, чем в чистом аргоне (см., например, [1], с.114).

Таблица П.8

Подвижность некоторых ионов k в собственных газах, для нормального давления, $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$

Газ	Ион	k^+	k^-
Аргон	Ar^+	1,5	-
	Ar_2^+	1,8	-
Кислород	O_2^-	-	2,0

Примечание: подвижность для любого давления p определяется по формуле $k_p = k \cdot (760/p)$, где p – в мм рт. ст.

Характеристики чистых кремния и германия

Таблица П.9

Средняя энергия на образование пары зарядов, подвижность и среднее время жизни электронов и дырок в чистых кремнии и германии

Материал	ω , эВ	k , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$		τ_p , с	
		k^-	k^+	e^-	e^+
Кремний	3,7	1350	480	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Германий	2,94	3800	1820	10^{-3}	10^{-3}

Таблица П.10

Основные характеристики некоторых сцинтилляторов

Сцинтилляторы	Плотность, г/см ³	Эффективный атомный номер $Z_{эф}$	Время высвечивания τ , нс	Средняя энергия фотона $h\nu_{св}$, эВ	Физическая конверсионная эффективность к электронам η_k	Средняя энергия фотона $\omega_{ф}$, эВ	α/β
Неорганические							
NaI(Tl)	3,67	50	250	3	0,153	19,6	0,5
CsI(Tl)	4,51	54	700	2,2	0,06	36,6	0,5
ZnS(Ag)	4,09	27	1000	2,7	0,1	27	1
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	7,13	72	300	2,6	0,02	163,5	0,2
Органические							
Антрацен (C ₁₄ H ₁₀)	1,25	~ 6	25-30	2,77	0,034	81,4	0,1
Нафталин (C ₁₀ H ₈)	1,45	~ 6	70-80	3,6	0,017	176,4	0,1
Стильбен (C ₁₄ H ₁₂)	1,16	~ 6	4-8	3,5	0,03	116,6	0,1
Толан (C ₁₄ H ₁₀)	1,18	~ 6	4-7	3,16	0,032	98	0,1
Пластмассовые терфинил в полистироле)	1	~ 6	5	3,1	0,015	210	0,1

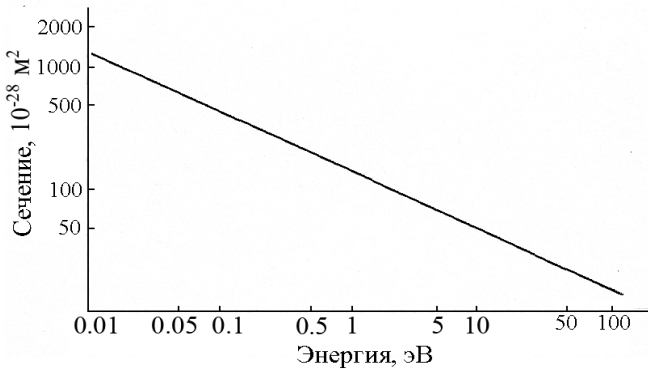


Рис. П.1. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами бора от энергии нейтронов для естественной смеси изотопов

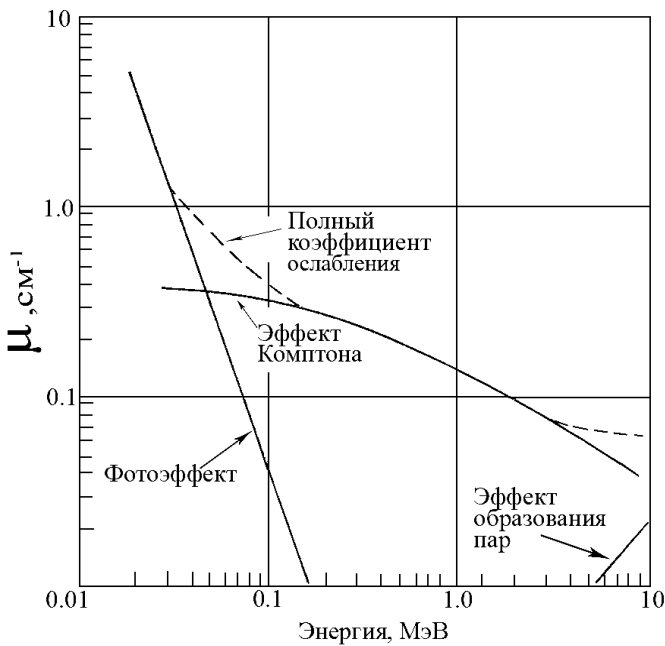


Рис. П.2. Зависимость полного коэффициента ослабления μ и его отдельных составляющих от энергии гамма-квантов в кремнии

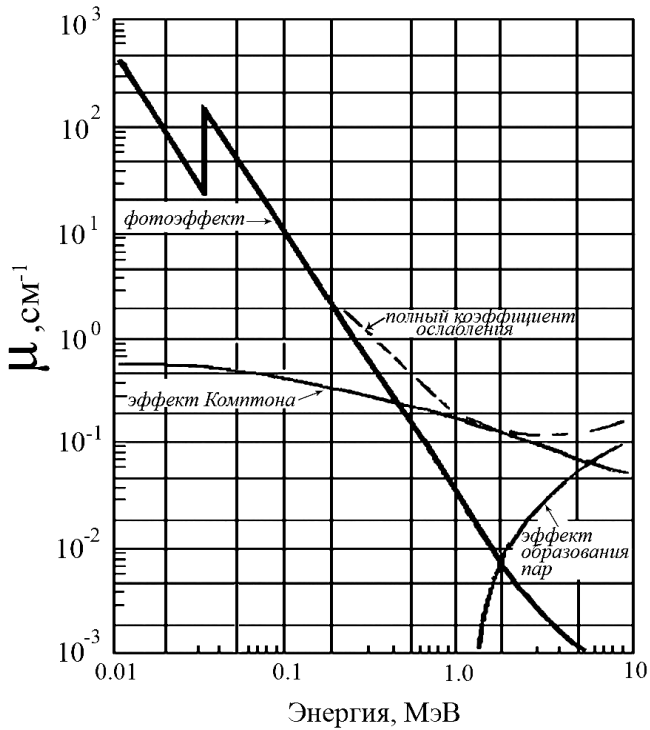


Рис. П.3. Зависимость полного коэффициента ослабления μ и его отдельных составляющих от энергии гамма-квантов в кристалле NaI(Tl)

Список рекомендуемой литературы

1. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Ляпидевский В.К. Методы детектирования излучений. М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Ободовский И.М. Сборник задач по экспериментальным методам ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Введение в физику тяжелых ионов: Учебное пособие / Под ред. Ю.Ц. Оганесяна. М.: МИФИ, 2008.
5. Акимов Ю.К. Газовые детекторы ядерных излучений. Дубна: ОИЯИ, 2011.
6. Акимов Ю.К. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Дубна: ОИЯИ, 2009.
7. Акимов Ю.К. Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006.
8. Введение в методику ядерно-физического эксперимента: Лабораторная работа. / Кирсанов М.А., Кушин В.В., Миханчук Н.А., Покачалов С.Г. М.: МИФИ, 2006.
9. Импульсная ионизационная камера: Лабораторная работа / Бондаренко В.Г., Кирсанов М.А., Кушин В.В., Миханчук Н.А., Покачалов С.Г. М.: МИФИ, 2009.
10. Газонаполненный пропорциональный детектор нейтронов: Лабораторная работа. / Бондаренко В.Г., Кирсанов М.А., Кушин В.В., Миханчук Н.А., Покачалов С.Г. М.: МИФИ, 2009.
11. Счетчик Гейгера – Мюллера: Лабораторная работа / Бондаренко В.Г., Кирсанов М.А., Кушин В.В., Миханчук Н.А., Покачалов С.Г. М.: МИФИ, 2009.
12. Полупроводниковый детектор: Лабораторная работа / Кирсанов М.А., Кушин В.В., Миханчук Н.А., Покачалов С.Г. М.: МИФИ, 2006.
13. Сцинтилляционный детектор: Лабораторная работа / Кирсанов М.А., Кушин В.В., Миханчук Н.А., Покачалов С.Г. М.: МИФИ, 2006.