КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

Е.Н. ДУЛОВ, Е.В. ВОРОНИНА, А.Е. МАСЛЕННИКОВА, М.М. БИКЧАНТАЕВ

БЕТА-СПЕКТРОСКОПИЯ: РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРОВ БЕТА-ЧАСТИЦ ПРОХОЖДЕНИЕ БЕТА-ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Казань

2013

УДК 539.164

Печатается по решению Редакционно-издательского света ФГАУВПО

«Казанский (Приволжский) федеральный университет»

методической комиссии института физики
Протокол №__ от __ мая 2013 г.

заседания кафедры физики твёрдого тела
Протокол № 5 от 19 ноября 2013 г.

Авторы
канд. физ.-мат. наук, асс. Дулов Е.Н.
доктор физ.-мат. наук, доцент Воронина Е.В.
аспирант Масленникова А.Е.
электроник 1 кат. Бикчантаев М.М.

Рецензент:
к.ф.-м.н., с.н.с КИББ КазНЦ РАН **Манапов Р.А.**

БЕТА СПЕКТРОСКОПИЯ: РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРОВ БЕТА-ЧАСТИЦ. ПРОХОЖДЕНИЕ БЕТА-ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО. Учебно-методическое пособие / Е.Н. Дулов, Е.В. Воронина, А.Е. Масленникова, М.М. Бикчантаев // Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2013. – 14 с., 7 илл.

Аннотация
Учебно-методическое пособие предназначено для студентов института физики дневного и вечернего отделений, приступивших к изучению курсов «Ядерная физика», «Физика атомного ядра и частиц», «Физика атомов, атомных явлений, атомного ядра и частиц». Задачей настоящей лабораторной работы, предназначенной для общего физического практикума по ядерной физике, является знакомство с регистрацией бета-спектров сцинтилляционными детекторами ионизирующего излучения, а также с закономерностями прохождения бета-частиц через вещество.

© Казанский федеральный университет, 2013
© Е.Н. Дулов, Е.В. Воронина, А.Е. Масленникова, М.М. Бикчантаев, 2013

Введение 4

1. Бета-радиоактивность.....4

2. Описание эксперимента 7

3. Схема экспериментальной установки.....8

4. Порядок выполнения работы 9

5. Анализ и представление результатов 12

6. Вопросы для самоподготовки 14

Литература 14

Введение

Цель настоящей работы – знакомство с бета-радиоактивностью и основными закономерностям бета-распада. Практическая часть работы включает в себя знакомство с техникой и методикой регистрации энергетических спектров бета-частиц на примере регистрации бета-спектра препарата ^{90}Sr с помощью предварительно откалиброванного по гамма-линиям ^{60}Co спектрометра со сцинтилляционным детектором. После этого предлагается пронаблюдать взаимодействие бета частиц с веществом посредством регистрации спектров бета-частиц ^{90}Sr для различных толщин алюминиевого поглотителя.

1. Бета-радиоактивность

Бета-распад это разновидность радиоактивного распада, в котором нуклоны атомного ядра самопроизвольно меняют свой тип. Распад происходит в том случае, если он энергетически выгоден, он может сопровождаться испусканием электрона (β^--распад, один из нейтронов ядра превращается в протон), испусканием позитрона (β^+-распад, один из протонов превращается в нейтрон). Бета-распад может также происходить без испускания каких-либо заряженных частиц. Такой процесс называется К-захватом, при этом один из протонов атомного ядра захватывает электрон атомной оболочки и превращается в нейтрон. К-захват встречается, главным образом, среди тяжёлых ядер, у которых велик радиус ядра и реализуются малые размеры электронных волновых функций. Как правило, электроны захватываются с внутренней электронной оболочки, так называемой К-оболочки, поскольку такие электроны располагаются ближе всего к ядру (в среднем).

Бета распад это процесс, обуславливающий оптимальное соотношение числа нейтронов и протонов в ядре, т.е. энергетическим соотношением бета распада в значительной мере определяется набор встречающихся в природе стабильных ядер.

Времена жизни бета-радиоактивных ядер варьируются от нескольких миллисекунд до 10^{16} лет. Период полураспада сильно зависит от энерговыделения в бета-распаде и от ядерных свойств материнского и дочернего ядер. Энерговыделение лежит в диапазоне от 18 кэВ до 16 МэВ.

Бета-распад обусловлен *слабым взаимодействием*, существование которого было впервые предложено для объяснения относительно больших времён и малых вероятностей соответствующих реакций.

Примеры бета-распадов:

β^--decay: $^{3}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + e^- + \tilde{\nu}_e$,

β^+-decay: $^{22}_{11}Na \rightarrow ^{22}_{10}Ne + e^+ + \nu_e$,

K-capture: $^{57}_{28}Co + e^- \rightarrow ^{57}_{27}Fe + \nu_e$,

где e^- (e^+) это электрон (позитрон), ν_e ($\tilde{\nu}_e$) это нейтрино (антинейтрино).

Графическая схема бета-распада, сочетающая в себе все три возможных варианта распадов, показана на Рис.1. Интересно отметить, что ^{40}K это бета-радиоактивный изотоп, всегда присутствующий в естественной смеси изотопов калия, его содержание составляет 0.012%.

Бета-распад всегда сопровождается испусканием нейтрино или антинейтрино.

В бета-распадах материнское ядро превращается в дочернее ядро с тем же самым числом нуклонов или, иначе говоря, с тем же самым массовым числом. Такие ядра обнаруживают некоторые сходства свойств благодаря зарядовой симметрии *сильного взаимодействия* и называются *изобарами*. Из-за того, что в процессах β^+-распада и K-захвата дочернее ядро одинаково, эти процессы иногда конкурируют друг с другом.

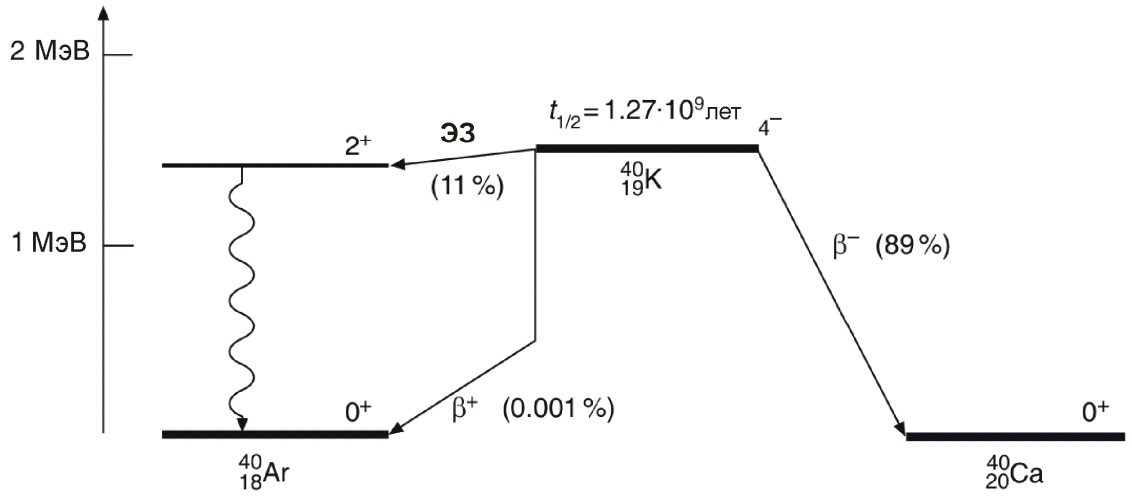

Рисунок 1. Бета-распад ^{40}K. Вертикальная линия в обозначении β^+-распада показывает, что рождение позитрона и наличие дополнительного электрона в ^{40}Ar требует затрат энергии в 1.022МэВ ($2m_ec^2$), оставшаяся часть энергии распада реализуется в виде кинетической энергии позитрона и нейтрино. ЭЗ означает электронный захват.

Простейший пример, демонстрирующий внутричастичную природу бета-распада, это самопроизвольный распад свободного нейтрона в протон, электрон и антинейтрино:

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e.$$

В этом распаде выделяется энергия 0.78 МэВ. Свободный нейтрон имеет среднее время жизни около 887 секунд.

Нейтрино (и позднее антинейтрино) появляется в 1930 году как гипотетическая частица, призванная объяснить некоторые противоречия, экспериментально наблюдаемые в бета-распаде (гипотеза В.Паули). Одним из таких противоречий был непрерывный характер спектра бета-частиц, что сильно отличало бета-распад от двухчастичного процесса наподобие альфа-распада. Законы сохранения энергии и импульса в двухчастичном процессе в сочетании с постоянной энергией распада должны всегда приводить к постоянной энергии испускаемых бета-частиц. Кроме того, закон сохранения импульса в бета-распаде без привлечения третьей частицы с полуцелым спином не выполняется никогда, что ярко видно на примере приведённой реакции распада нейтрона, где все частицы имеют спин 1/2. Уникальное свойство нейтрино и антинейтрино – исключительно малая вероятность взаимодействия с веществом, что сделало возможным экспериментальное открытие нейтрино только в 1950-х, когда появились достаточно производительные искусственные источники нейтрино в виде ядерных реакторов. Средний пробег нейтрино в твёрдых телах это величина, имеющая порядок световых лет.

Теоретическое объяснение бета-распада было впервые предложено Э.Ферми в 1934 году. Ключевой идеей теории Ферми была аналогия процесса бета-распада с процессом испускания фотона возбуждённым атомом. Согласно этой идее, бета-частицы, подобно фотонам, не существуют в составе нуклона или ядра до распада, но рождаются в сам момент распада. Э.Ферми показал, что добавление гипотетической третьей частицы в картину бета-распада, нейтрино Паули, приводит к элегантной модели, объясняющей основные закономерности бета-распада и бета-радиоактивных ядер. В то же время, в теории Ферми оказалось необходимым введение нового типа взаимодействия – слабого, в качестве масштабирующего фактора для величины энергии взаимодействия квантовой системы (гамильтониана).

Дальнейшее развитие квантовой теории поля и экспериментальной физики частиц потребовало некоторой модернизации теории Ферми. Во-первых, оригинальная модель Ферми предполагала мгновенное превращение нуклона в три частицы (так называемое 4-точечное взаимодействие Ферми или четырёхфермионное взаимодействие). Во-вторых, теория Ферми обнаруживала расхождения с экспериментами в физике частиц в области больших энергий. По этой причине в 1960-х появляется идея о переносчиках взаимодействия. Слабые силы обуславливаются квантами поля подобно тому, как электромагнитные силы обусловлены обменом фотонами. В настоящее время бета распад рассматривается как распад отдельных кварков (составляющих нуклонов) с участием слабых

сил, квантами поля которых являются массивные промежуточные бозоны (W^+,W^-,Z^0). Вероятность появления промежуточных бозонов, характерная для электромагнитного взаимодействия, в сочетании с их массами (примерно в сто раз больших массы нуклона) позволило впоследствии объединить слабое и электромагнитное взаимодействие в *электрослабое взаимодействие*.

2. Описание эксперимента

Испускаемые ядрами бета частицы имеют непрерывный спектр, распределение по энергиям охватывает диапазон от E_β=0 до энергии бета распада E_0. Поскольку электрическое поле положительно заряженного ядра действует на бета-частицы, спектры бета-плюс и бета-минус частиц немного различаются (Рис.2).

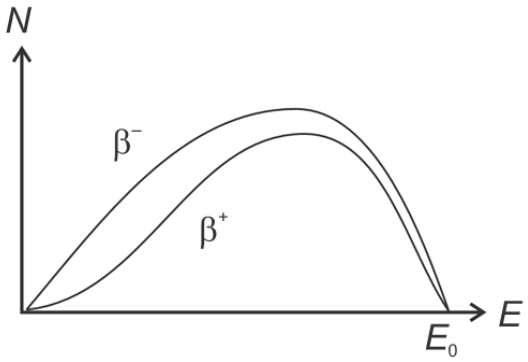

Рисунок 2. Спектры электронов (β^-) и позитронов (β^+), испускаемых ядрами при бета-распаде.

В практической части настоящей работы бета-спектр ^{90}Sr регистрируется на предварительно откалиброванном сцинтилляционном детекторе: при бета-распаде ^{90}Sr образуется дочерний нуклид ^{90}Y, который также β-нестабилен (см. Рис. 3). Таким образом, регистрируется суперпозиция двух спектров с разными энергиями распада E_0. Поскольку бета-частицы теряют энергию в защитном герметизирующем покрытии источника и в алюминиевом корпусе сцинтилляционного детектора, измеренная максимальная энергия бета-частиц всегда меньше энергии распада E_0 (см. Рис. 4).

Потери энергии бета-частиц изменяются в эксперименте путём размещения алюминиевых пластин известной толщины x между источником и детектором. Измеренные значения верхней границы бета-спектра E_0 представляются графически в виде зависимости E_0 от x. Из наклона полученной зависимости определяются удельные потери энергии бета частиц dE/dx в алюминии.

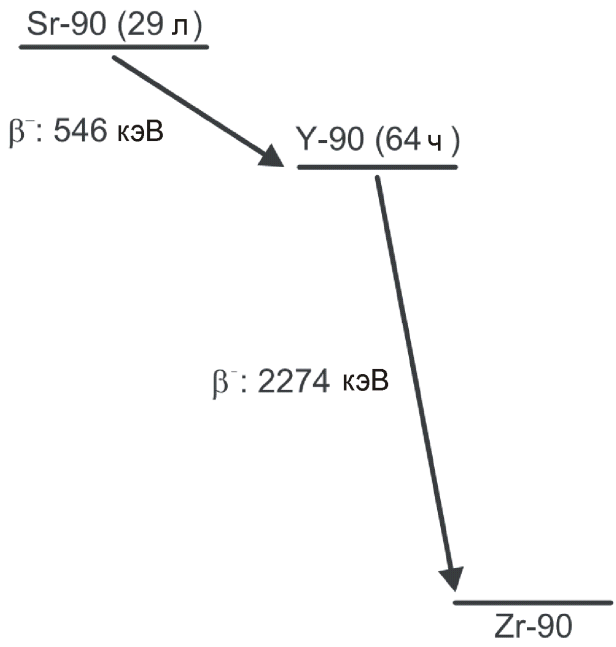

Рисунок 3. Схема распада ^{90}Sr.

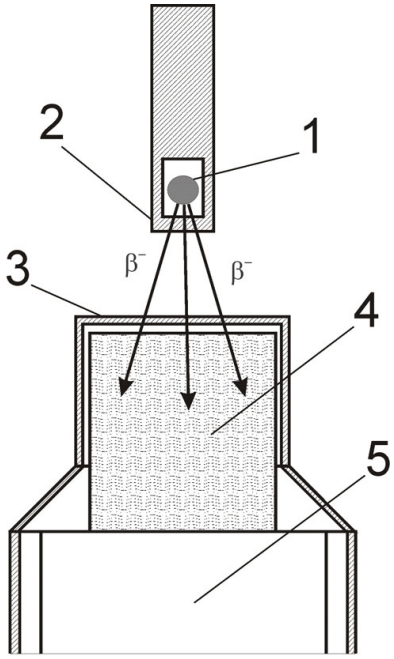

Рисунок 4. Схема участка экспериментальной установки, показывающая препятствия на пути бета-частиц. 1 – радиоактивный источник; 2 – герметичная капсула радиоактивного источника; 3 – корпус сцинтилляционного детектора; 4 – сцинтилляционный кристалл; 5 – фотоумножитель.

3. Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка показана на Рис. 5. Используется универсальный узел сбора данных CassyLab2 **1** с установленным модулем многоканального анализатора MCA **2** и

соответствующее программное обеспечение. Радиоактивный источник размещается на верхней крышке (торце) сцинтилляционного детектора **4** или крепится в держателе **6** над ним. Сцинтилляционный детектор подсоединён ко входу CassyLab2 **1** (Рис. 5). Напряжение на фотоэлектронном умножителе (ФЭУ) детектора регулируется высоковольтным источником **5**. Ноутбук с установленным программным обеспечением используется для отображения и обработки полученных результатов.

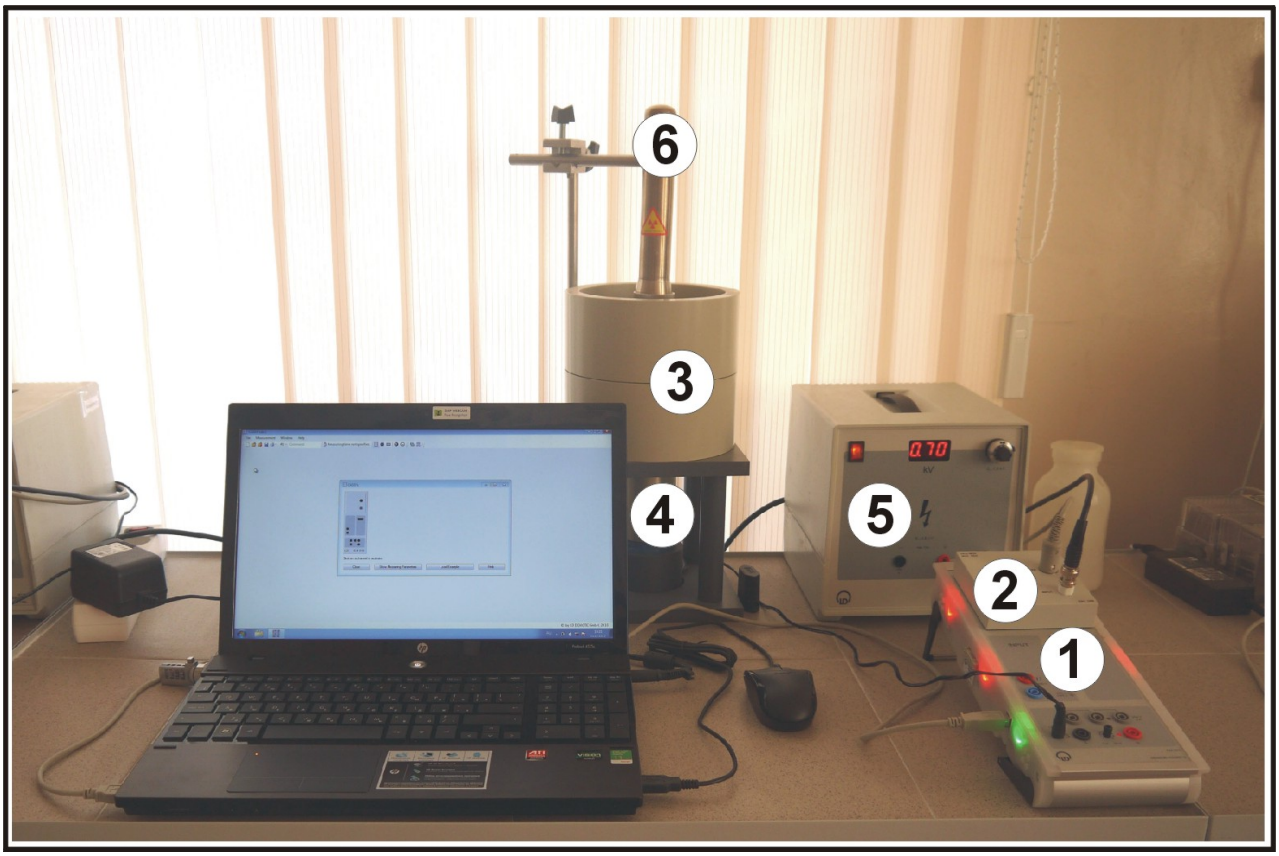

Рисунок 5. Экспериментальная установка. 1 – унифицированный узел сбора данных CassyLab2; 2 – модуль многоканального анализатора; 3 – радиационная защита (Pb, ~1 см); 4 – сцинтилляционный детектор; 5 – высоковольтный источник питания ФЭУ сцинтилляционного детектора; 6 – держатель бета-радиоактивного источника.

4. Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения работы убедитесь, что все части установки присутствуют и соединены в соответствии с вышеописанной схемой.

Подготовка к измерениям

Включите ноутбук, источник питания CassyLab2, высоковольтный источник питания ФЭУ детектора.

Запустите программное обеспечение CassyLab2.

В окне «Cassy» выберите в качестве «measurement channel» верхний квадрат левого столбца (схематичное изображение модуля многоканального анализатора MCA). Должна появиться измерительная шкала и окно Voltage U_a, показывающее установленное значение напряжения ФЭУ.

В окне «Cassy» выберите «Show Measuring Parameters». На вкладке «Settings» должно появиться окно справа с названием «Measuring Parameters». Установите время измерения 10 минут с шагом времени в 1 секунду.

Установите напряжение на высоковольтном источнике питания ФЭУ 500В.

Калибровка шкалы энергий

Попросите лаборанта установить калибровочный гамма-источник с известным составом (например, ^{60}Co).

На вкладке главного меню «Measurement» выберите пункт «Start/stop Measurement». При этом начнётся накопление спектра. Также можно запустить измерение нажатием кнопки <F9>, не используя главное меню.

Отрегулируйте высокое напряжение питания ФЭУ таким образом, чтобы спектр калибровочного источника максимально покрывал измерительную шкалу, т.е. чтобы он не обрывался справа и не был чрезмерно сжат. На этом этапе нет необходимости регистрировать спектр в течение всех 10 минут. Остановить измерения можно так же, как и в предыдущем пункте, через главное меню или нажатием кнопки <F9>.

По окончании выбора рабочего напряжения ФЭУ выполните регистрацию калибровочного спектра в течение 10 минут.

Выполните калибровку энергетической шкалы по зарегистрированному спектру. Для этого, нажатием правой кнопки мыши над окном спектра вызовите контекстное меню «Menu of Actions». Выберите «Fit Function» → “Gaussian of equal Width”. После этого выберите спектральную линию, отметив её мышью с зажатой левой клавишей.

После выбора аппроксимируемой гауссианом линии программное обеспечение CassyLab2 выполнит математическую обработку спектра, параметры линии отобразятся в нижней части окна CassyLab2 (центр тяжести линии - μ, ширина линии – σ).

Повторите шаги с определением параметров второй спектральной линии калибровочного источника, если таковая имеется.

На вкладке «Settings» выполните калибровку оси абсцисс. Для этого в дереве Settings выберите элемент “Cassys” → “Input A_1” → “Channel n_A”.

В разделе с названием «Energy Calibration» установите флажок в строке «Global for all channels» и занесите энергии калибровочных точек в соответствующие поля. Для

калибровочного источника с одной линией введите в качестве первой точки channel – 0, energy – 0. Для второй точки введите центр тяжести линии μ в поле channel. Значение в поле energy нужно выбрать из выпадающего меню в соответствии со спектральной линией калибровочного источника.

Выберите в дереве Settings элемент Cassys → Display → Standard → $N_A(n_A)$, после чего переименуйте ось абсцисс: выберите E_A вместо n_A. Спектр перерисуется в энергетической шкале.

Перед началом эксперимента рекомендуется измерить фоновый спектр.

Регистрация бета-спектров для разных толщин поглотителя

Попросите лаборанта убрать калибровочный источник и установить бета-источник ^{90}Sr.

Зарегистрируйте спектр бета-частиц без поглотителя.

Поместите алюминиевую пластину на торец сцинтилляционного детектора и зарегистрируйте спектр с поглотителем.

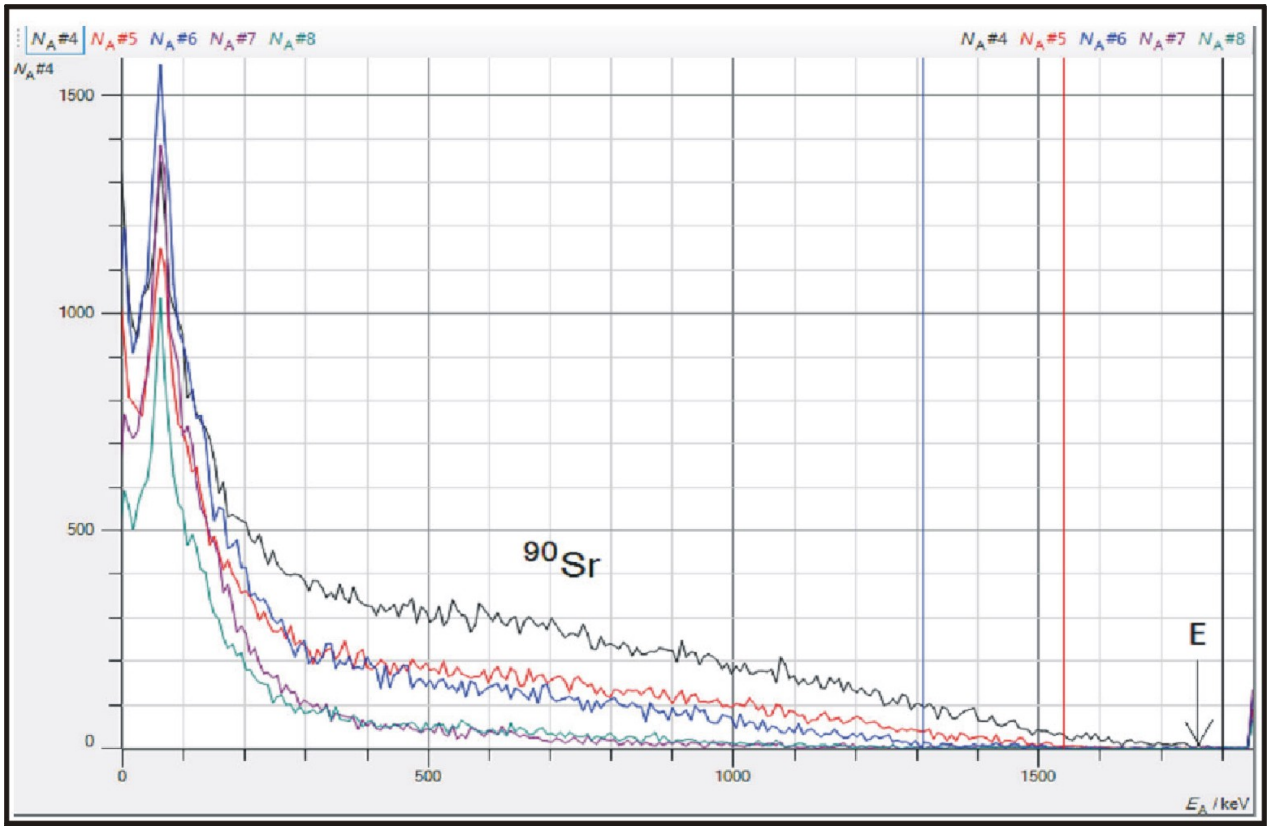

Рисунок 6. Бета-спектр ^{90}Sr без поглотителя (чёрная кривая) и с алюминиевым поглотителем различной толщины (цветные кривые).

Повторите предыдущий шаг с другой толщиной поглотителя, по крайней мере, один раз, чтобы получились данные не менее чем для двух толщин поглотителя, например, 0.5 мм и 1 мм.

На измеренных спектрах определите E_m как точку пересечения спектра и оси абсцисс.

Постройте график зависимости E_m от толщины поглотителя. Для этого в дереве «Settings» выберите элемент Cassys → Display и нажмите кнопку «New».

В поле “Name” введите название графика, например, “Energy loss”, затем нажмите кнопку “Add new Curve”.

Укажите в выпадающем окне название оси абсцисс d, а для оси ординат E_m. В колонке “Style” отметьте флажок “Values”.

На графике вызовите контекстное меню и выполните линейную аппроксимацию: “Fit Function”→ “Best fit Straight Line”.

Оцените толщину поглотителя, необходимую для полного поглощения бета-частиц ^{90}Sr.

5. Анализ и представление результатов

Форма бета-спектра

Рисунок 6 показывает внешний вид спектра ^{90}Sr, полученный сцинтилляционным детектором. Можно видеть наложение двух характерных распределений, показанных на Рис. 2. Одно из них соответствует переходу из ^{90}Y в ^{90}Zr (E_0 = 2274 кэВ), второе – переходу из ^{90}Sr в ^{90}Y (E_0 = 546 кэВ).

Определение удельных потерь энергии

На Рис. 7 показана зависимость максимальной энергии бета-частиц от толщины алюминиевого поглотителя. Наклон прямой линии, аппроксимирующий экспериментальную зависимость, показывает потери энергии на единицу длины пути бета-частиц в алюминии:

$$\frac{dE}{dx} = 452 \frac{\text{кэВ}}{\text{мм}}.$$

Аналогичная величина, известная из литературы:

$$\frac{dE}{dx} = 410\frac{\text{кэВ}}{\text{мм}} \text{ при } E_\beta = 2000\text{кэВ}.$$

Измеренная величина оказывается несколько больше литературных данных для чистого алюминия, поскольку алюминий, выпускаемый промышленным способом, всегда содержит небольшое количество примесей с большим атомным номером.

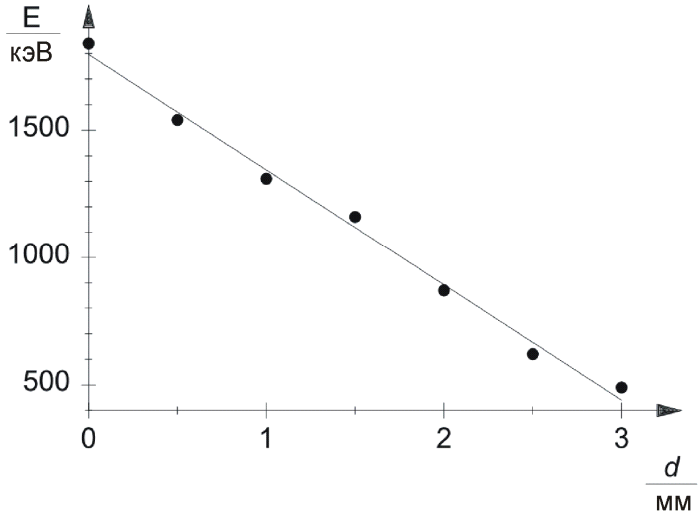

Рисунок 7. Максимальная энергия бета-частиц *E* как функция толщины поглотителя *d*.

Определение энергии распада

Алюминиевая защита сцинтилляционного детектора (d_0 = 0.4 мм) приводит к дополнительным потерям энергии бета-частиц:

$$\Delta E = \frac{dE}{dx} d_0 = 180\text{кэВ}.$$

С поправкой на потери в защите измеренная максимальная энергия бета-частиц, покидающих источник, составляет E_β = 1840 кэВ + 180 кэВ = 2020 кэВ. Энергия распада для перехода ^{90}Y в ^{90}Zr – E_0 = 2274 кэВ, что на 254 кэВ выше измеренной в эксперименте величины. Это различие вызвано наличием герметизирующего радиоактивный источник материала и потерями в нём (фольга Au-Pd толщиной 0.15 мм).

6. Вопросы для самоподготовки

1. Какие виды радиоактивного распада встречаются в природе?
2. Чем отличается спектр бета-частиц от спектра альфа частиц?
3. Каков спектр нейтрино в настоящей работе?
4. Запишите закон сохранения энергии в бета-распаде.
5. Покажите, что среди ядер-изобар существуют энергетически наиболее выгодные комбинации нуклонов.
6. Какова проникающая способность нейтрино (антинейтрино)?
7. Чем качественно отличается кривая поглощения бета-частиц от кривой поглощения гамма-квантов (закон Ламберта-Буггера)?
8. Как изменяется спектр бета-частиц при увеличении толщины поглотителя? Сравните с аналогичным изменением гамма-спектра.
9. Что такое слабое взаимодействие, и какие кванты поля ему соответствуют? Перечислите все известные частицы-кванты поля.
10. Какой толщины алюминия достаточно для того, чтобы гарантированно поглотить все бета-частицы ^{90}Sr?

Литература

1. Капитонов, И.М. Введение в физику ядра и частиц [Текст] / И.М.Капитонов. – М.: УРСС, 2004. – 383 с.
2. Мухин, К.Н. Введение в ядерную физику [Текст] / К.Н. Мухин. – М.:Атомиздат, 1965. – 613 с.
3. Колпаков, П.Е. Основы ядерной физики [Текст] / П.Е. Колпаков. – М.:Просвещение, 1969. – 287 с.
4. Широков, Ю.М. Ядерная физика [Текст] / Ю.М. Широков, Н.П. Юдин. М.:Наука, 1980.- 783 с.
5. Povh, B. Particles and Nuclei [Text] / B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche. – Springer, 2006 – p. 391.

РЕЦЕНЗИЯ
на учебно-методическое пособие

Дулова Е.Н., Ворониной Е.В., Масленниковой А.Е., Бикчантаева М.М.

«Бета-спектроскопия: регистрация спектров бета-частиц. Прохождение бета-частиц через вещество»

Рецензируемое учебно-методическое пособие «Бета-спектроскопия: регистрация спектров бета-частиц. Прохождение бета-частиц через вещество» разработано авторами в рамках общефизического лабораторного практикума к лекционным курсам «Ядерная физика», «Физика ядра и частиц» и «Атомная и ядерная физика», читаемых на третьем году обучения студентов.

Пособие начинается с обзорной вводной части, в которой даются физические основы бета-распада. Затем следует часть с описанием экспериментальной лабораторной установки, в которой показаны основные узлы и их назначение. Далее приводится описание порядка выполнения работы, даются рекомендации по анализу и представлению экспериментальных результатов.

В пособии последовательно изложен материал, необходимый для понимания и применения регистрации бета-спектров в решении практических задач. Подробно рассматриваются многие явления и эффекты, необходимые как для работы с оборудованием, так и для анализа результатов.

Практическая часть задания даёт наглядное представление о физических процессах, происходящих при регистрации бета-частиц сцинтилляционным детектором, содержит все необходимые элементы для получения навыков работы на экспериментальных установках, в том числе на современном спектроскопическом оборудовании.

Рецензируемое пособие актуально и представляет несомненный интерес для преподавателей и студентов, сталкивающихся со спектроскопией ионизирующих излучений в учебной работе.

Считаю, что учебно-методическое пособие Дулова Е.Н., Ворониной Е.В., Масленниковой А.Е., Бикчантаева М.М. «Бета-спектроскопия: регистрация спектров бета-частиц. Прохождение бета-частиц через вещество» может быть рекомендовано в качестве учебно-методического пособия для студентов.

С.н.с. КИББ КазНЦ РАН,
к.ф.-м.н. Манапов Р.А.

Подпись
Заверяю

Выписка из протокола № 5 заседания кафедры физики твердого тела от 19.11.2013г.

ПРИСУТСТВОВАЛИ:

зав. каф. д.ф.-м.н., проф. Тагиров Л.Р.; д.ф.-м.н., проф. Парфёнов В.В.; д.ф.-м.н., проф. Садыков Э.К.; д.ф.-м.н., проф. Петухов В.Ю.; д.ф.-м.н., доц. Воронина Е.В.; к.ф.-м.н., доц. Вагизов Ф.Г.; к.т.н., доц. Салахов А.М.; к.ф.-м.н., доц. Храмов А.С.; к.ф.-м.н., асс. Болтакова Н.В.; к.ф.-м.н. асс. Гайнов Р.Р.; к.ф.-м.н., асс. Дулов Е.Н.; асс. Пятаев А.В.; зав. лаб. Закиров Р.Х.; зав. лаб. Халабуда Ю.Э.; эл-ник Бикчантаев М.М.; к.ф.-м.н., с.н.с. Усеинов Н.Х.; асп. Петухов Д.

Слушали ассистента Дулова Е.Н. о разработанном учебно-методическом пособии к лабораторной работе ядерно-физического практикума «Бета-спектроскопия: регистрация спектров бета-частиц. Прохождение бета частиц через вещество». Данное пособие предназначено для студентов 3-го курса Института физики, обучающихся по специальностям и направлениям «Астрономия», «Физика», «Радиофизика» и студентов 3-го курса Института физики очно-заочной (вечерней) формы обучения. После обсуждения было принято решение рекомендовать представленное пособие к публикации.

ПОСТАНОВИЛИ:

1. Рекомендовать учебно-методическое пособие «Бета-спектроскопия: регистрация спектров бета-частиц. Прохождение бета частиц через вещество» (авторы Дулов Е.Н., Воронина Е.В., Масленникова А.Е., Бикчантаев М.М.) к публикации.

Секретарь Болтакова Н.В.

Заведующий кафедрой ФТТ Тагиров Л.Р.