

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 62

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ

1. Цель работы

Целью работы является изучение свойств радиоактивных излучений, измерение интенсивностей фона и β -излучения, снятие кривой поглощения и определение коэффициента поглощения.

2. Краткая теория

2.1. Общие сведения о радиоактивности

Радиоактивностью называется способность атомных ядер некоторых элементов (U, Th, Sr и других) самопроизвольно превращаться в другие ядра с испусканием различных видов частиц и электромагнитного излучения, объединяемых общим термином, - радиоактивное излучение.

Исследование процессов распространения радиоактивного излучения в электрическом и магнитном полях позволило выделить три основные компоненты, выяснить их природу и свойства. Оказалось, что в магнитном поле узкий пучок радиоактивного излучения расщепляется на три составляющие:

- слабоотклоняемый пучок "тяжелых" положительно заряженных частиц (α -излучение);
- сильноотклоняемый пучок отрицательных частиц (β -излучение);
- неотклоняемый пучок (γ -излучение).

α -излучение (рис. 1, а) представляет собой поток ядер гелия ${}^4_2\text{He}$, которые состоят из двух протонов и двух нейтронов.

Масса m_p протона в 1836, а масса нейтрона m_n в 1839 раз больше массы электрона m_e , которая равна $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Заряд нейтрона равен нулю, а заряд протона численно равен заряду электрона.

$$q_p = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

α -частицы обладают следующими свойствами:

- отклоняются в электрическом и магнитном полях;
- обладают высокой ионизирующей способностью (образуют $10^3 \div 10^4$ ионов на 1 мм пути в воздухе);
- имеют малую проникающую способность (полностью поглощаются слоем алюминия толщиной 0,05 мм или листом бумаги);
- энергия α -частиц лежит в пределах от 4 до 8,5 МэВ, причем энергетический спектр носит дискретный характер.

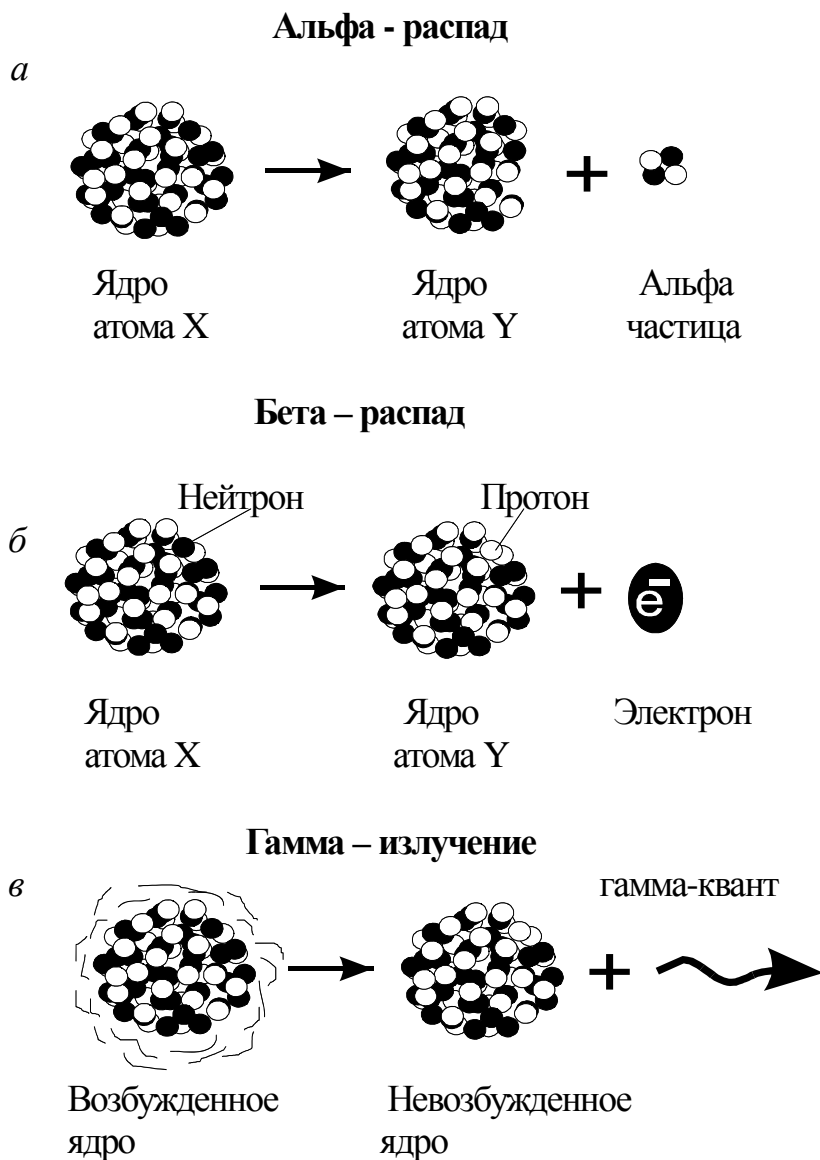


Рис. 1. Основные виды ядерных превращений, приводящие к испусканию радиоактивных излучений:
a – α -распад, *б* – β -распад, *в* – γ -излучение

β -частицы имеют следующие свойства:

- отклоняются электрическим и магнитным полями;
- ионизирующая способность примерно на два порядка меньше, чем у α -частиц, а проникающая способность гораздо больше (полностью поглощается слоем алюминия толщиной около двух миллиметров);
- энергия испускаемых β -частиц может иметь любое значение от нулевого до некоторого $E_{\text{макс}}$, т. е. энергетический спектр является непрерывным.

β -излучение представляет собой поток электронов (рис. 1, б) или позитронов (см. раздел 2.3).

γ -излучение (рис. 1, в) представляет собой электромагнитное излучение с чрезвычайно малой длиной волны (меньше 10^{-10} м), т. е. является потоком фотонов (γ -квантов).

γ -излучение не отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает очень большой проникающей способностью.

Для характеристики проникающей способности γ -излучения используется понятие слоя половинного ослабления $h_{1/2}$. Это толщина материала, после прохождения которого интенсивность (число γ -квантов) уменьшается в два раза (рис. 2). Для жесткого γ -излучения с энергией квантов 1 МэВ толщина этого слоя составляет 5 см бетона, или 3 см стали, или 1 см свинца.

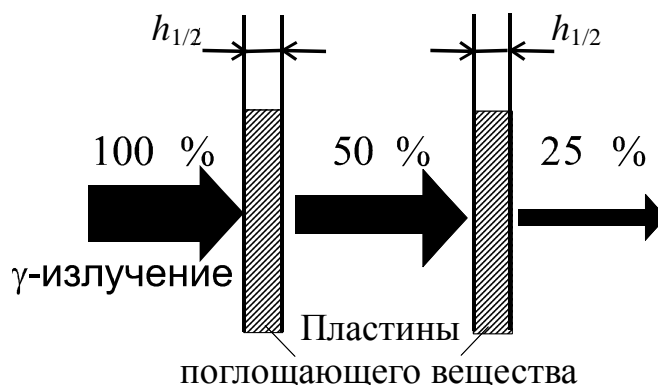


Рис. 2. Поглощение γ -излучения веществом
Иллюстрация понятия слоя половинного ослабления

В горных породах глубина проникновения α -излучения составляет

десятки микрометров, β -излучения – несколько миллиметров, а γ -излучений - 30 ÷ 40 см. Радиоактивность горных пород определяется, в основном, содержанием урана, тория, актиноурана и изотопа калия ${}_{19}\text{K}^{40}$. Наибольшей радиоактивностью обладают кислые породы, наименьшей - основные. Чрезвычайно мала радиоактивность осадочных пород.

Установлено, что γ -излучение не является самостоятельным видом радиоактивности, а только сопровождает α - и β -распады.

γ -излучение возникает также при ядерных реакциях. Все эти процессы характеризуются образованием новых элементов, ядра которых в момент своего образования оказываются возбужденными: за время $10^{-13} \div 10^{-14}$ с они переходят в основное состояние с испусканием γ -кванта (см. рис. 1, в).

Излучение радиоактивных веществ, присутствующих в почве, и космическая радиация создают естественный γ -фон. Для регистрации космического излучения обычно используют газоразрядные счетчики Гейгера и сцинтилляционные счетчики.

Регистрация естественного γ -излучения в определенной области энергии, характерной для данного элемента, составляет сущность спектрометрического γ -каротажа скважин, который используется для расчленения разрезов скважин по плотности пород, выделения газоносных коллекторов.

Измерение естественной γ -активности позволило создать метод экспресс-анализов руд в емкостях, который является важной и неотъемлемой частью технологии добычи, обогащения и переработки уранового сырья.

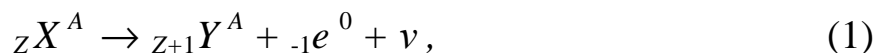
γ -излучение, обладающее большой проникающей способностью, используется при просвечивании объектов большой толщины с целью выявления скрытых дефектов, так называемая γ -дефектоскопия, которая находит широкое применение для неразрушающего контроля качества деталей машин, сварных швов и других целей.

Особенно целесообразно применять радиоактивные методы для измерения уровня и плотности агрессивных веществ, в резервуарах с высокими температурами, в литейном производстве.

На обогатительных и агломерационных фабриках применяются γ -реле для контроля за заполнением бункеров, для постоянного контроля уровня жидкости в резервуарах и трубопроводах. γ -реле используются для измерения уровня засыпки шихты в шахтных электропечах.

2.2. Отрицательный бета-распад (β^- -распад)

Символическая запись процесса β^- -распада имеет следующий вид:



где X - символ ядра исходного элемента;

Y - символ образующегося ядра;

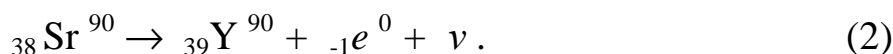
Z - зарядовое число, равное числу протонов в ядре и совпадающее с порядковым номером химического элемента в таблице Менделеева;

A - массовое число, равное общему числу нуклонов (протонов и нейтронов) в ядре;

${}_{-1} e^0$ - символическое обозначение электрона;

ν - антинейтрино (частица с нулевым зарядом и массой, близкой к нулю).

При β^- -распаде элемент смещается в периодической системе на один номер вправо без изменения массового числа. Например,



Рассмотрим вопрос о появлении электрона при β^- -распаде. Протонно-нейтронное строение ядра исключает возможность существования электрона в ядре. Предположение о том, что электроны вылетают из электронной оболочки, несостоятельно, так как при этом должно наблюдаться оптическое или рентгеновское излучение, что экспериментально не подтверждается.

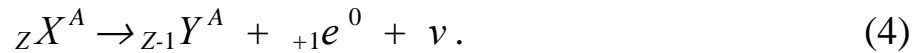
β^- -частица рождается в результате процессов, происходящих внутри ядра. Так как при β^- -распаде число нуклонов в ядре не изменяется, а Z увеличивается на единицу, то единственной возможностью одновременного осуществления этих условий является превращение одного из нейтронов ядра в протон с одновременным образованием электрона (см. рис. 1, б) и вылетом электрически нейтральной частицы - антинейтрино.



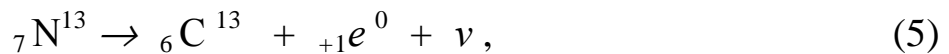
2.3. Положительный бета-распад (β^+ -распад)

β^+ -излучение представляет собой поток позитронов ${}_{+1}e^0$ (частиц с положительным зарядом e и массой покоя, равной массе электрона).

β^+ -распад идет по схеме



Например,



где ν - символ нейтрино.

Нейтрино и антинейтрино являются античастицами. Они обладают исчезающе малой ионизирующей способностью и огромной проникающей способностью (например, пробег нейтрино в свинце 10^{18} м). Эти факторы чрезвычайно затрудняют их экспериментальное обнаружение.

При β^+ -распаде происходит превращение одного из протонов ядра в нейтрон с испусканием позитрона и нейтрино.



2.4. Поглощение β -частиц веществом

β -частицы, проходящие через вещество, рассеиваются, теряют энергию и замедляют свое движение в результате взаимодействия с его атомами. При этом в веществе происходят изменения, так как атомы возбуждаются или ионизируются, наблюдается также диссоциация молекул, изменения в строении решетки кристаллов, в электропроводности.

При увеличении толщины h слоя вещества количество проходящих через него в единицу времени β -частиц (интенсивность) уменьшается. Зависимость интенсивности I прошедшего β -излучения от толщины h слоя материала называется *кривой поглощения*, характерный вид которой приведен на рис. 3.

Число зарегистрированных частиц уменьшается приблизительно

по экспоненциальному закону с увеличением толщины слоя вещества.

$$I_{\beta} = I_0 \cdot \exp(-\mu h), \quad (7)$$

где I_{β} - интенсивность β -излучения, прошедшего через слой вещества толщиной h ;

I_0 - интенсивность β -излучения при отсутствии поглощающего вещества;
 μ - линейный коэффициент поглощения β -излучения.

Согласно выражению (7) интенсивность излучения стремится к нулю при увеличении толщины вещества. В реальных же условиях всегда имеется естественный радиационный фон. Поэтому в нашем случае при увеличении толщины h интенсивность $I_{\text{эксп}}$ стремится к величине этого фона I_{Φ} .

Таким образом, истинная интенсивность бета-излучения

$$I_{\beta} = I_{\text{эксп}} - I_{\Phi}. \quad (8)$$

Толщина слоя вещества, при которой интенсивность I_{β} становится пренебрежимо малой, называется *толщиной слоя полного поглощения* h_0 . Определив ее из кривой поглощения, можно рассчитать максимальную энергию E бета-частиц по эмпирическим (полученным опытным путем) формулам

$$h_0 \rho = 0,11(\sqrt{1 + 22,4 \cdot E^2} - 1) \quad (9)$$

или

$$h_0 \rho = 0,54E - 0,15, \quad (10)$$

где h_0 - толщина слоя полного поглощения, см;

ρ - плотность вещества, г/см³;

E - максимальная энергия бета-излучения, МэВ.

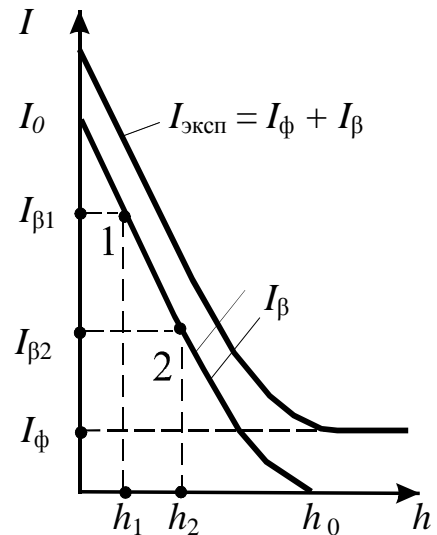


Рис. 3. Кривая поглощения β -излучения

Коэффициент поглощения μ определяется также с помощью кривой поглощения $I_{\beta}(h)$. На графике выбирают две точки (1 и 2) на средней части кривой (см. рис. 3). Если написать для каждой из точек с соответствующими индексами выражения согласно (7), прологарифмировать их и вычесть одно из другого, то получим для коэффициента поглощения следующее выражение:

$$\mu = \frac{\ln I_{\beta 1} - \ln I_{\beta 2}}{h_2 - h_1} . \quad (11)$$

Линейный коэффициент поглощения

$$\mu = \mu' \rho, \quad (12)$$

где μ' - массовый коэффициент поглощения, см²/г.

Выражение (7), записанное в виде

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu' \rho h) , \quad (13)$$

дает надежный и довольно точный метод определения толщины или плотности поглотителя при постоянном μ' .

Плотностемеры применяют для измерения и регулирования плотности пульпы на обогатительных фабриках, а также для измерения плотности различных жидкостей на заводах цветной металлургии. Производится этим методом измерение толщины стенок трубопроводов, котлов шахтных котельных, воздухохоборников и т. д.

3. Выполнение работы

3.1. Описание экспериментальной установки и подготовка приборов к работе

Блок-схема установки для исследования поглощения веществом β -излучения приведена на рис. 4. Источник β -излучения помещен в защитную ячейку. Ячейка устанавливается на свинцовый домик. Для регистрации β -частиц используется счетчик Гейгера-Мюллера (СчГ), рабочая поверхность которого находится внутри свинцового домика.

Счетчик питается от высоковольтного блока питания БП. Контроль напряжения осуществляется с помощью цифрового вольтметра ЦВ.

Пластины из исследуемого материала вставляются в пазы свинцового домика между источником β -излучения и счетчиком Гейгера.

Импульсы напряжения, возникающие на счетчике при попадании β -частицы или γ -кванта, поступают через блок согласования БС на пересчетный прибор ПП, осуществляющий подсчет числа импульсов за заданный временной интервал.

Блок согласования БС необходим для стыковки счетчика Гейгера, обладающего высоким сопротивлением, с низкоомным входом ПП.

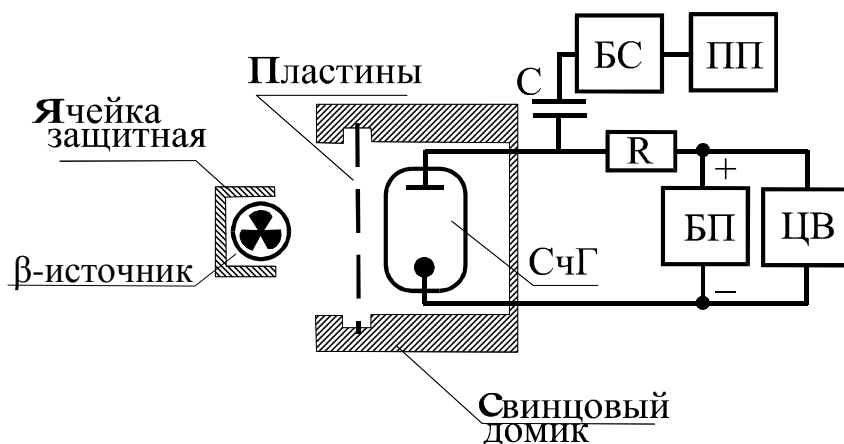


Рис. 4. Блок-схема установки

3.1.1. Подготовка к работе универсального вольтметра.

Соединительные провода должны быть подключены к клеммам "0" и " = 1000 V ". Установите переключатель "предел измерения" в положение "1000", что соответствует диапазону измерения вольтметра от 0 до 1000 В.

Переключатель "род работы" поставьте в положение " 1, S ". Включите тумблер "сеть" и дайте прибору прогреться 10 мин.

За это время рекомендуется провести включение и проверку прибора ПСО2-4 в соответствии с пунктом 3.1.2.

Затем при помощи резистора " ► 0 ◀ " установите на табло нулевые показания. Поставьте переключатель "род работы" в положение " ▼ " (калибровка) и с помощью резистора " ▼ " установите напряжение, значение которого нанесено на шильдике, закрепленном под

резистором "▼". Переведите переключатель "род работы" в исходное положение "1, S".

Таким образом, цифровой вольтметр В7-16А подготовлен к измерениям.

3.1.2. Подготовка к работе пересчетного прибора ПСО2-4.

Приведите клавиши на панели управления в исходное состояние: нажмите клавиши "П" (счет положительных импульсов), "однократно" (однократные измерения в режиме ручного запуска), "N" - режим счета числа импульсов за время T и клавишу "экспозиция T" 20 с.

Нажмите клавишу "сеть" и проведите проверку функционирования прибора, для чего надо нажать последовательно клавиши "проверка", "сброс", "пуск". Если на табло устанавливается значение "10000 ±1", то прибор исправен и готов к работе. Клавишу "проверка" нужно отпустить (отжать).

Следует запомнить, что в процессе измерений нулевые показания табло осуществляются клавишей "сброс", а запуск для последующего измерительного цикла клавишей "пуск".

3.1.3. Подключение блока питания БНВ3-05.

Установите переключатель выходного напряжения "kV" в положение 0,4, а резистор плавной регулировки " " - в положение минимума.

Включите тумблер "сеть" и по загоранию сигнальной лампочки "высокое" убедитесь в наличии выходного напряжения.

Внимание!

Категорически запрещается трогать предохранитель 0,5 А, находящийся под напряжением.

При включенном блоке питания запрещается отстыковывать соединительные провода, подключенные к клеммам вольтметра.

После выполнения работы сначала отключить блок питания, затем цифровой вольтметр и пересчетный прибор.

3.2. Снятие счетной характеристики счетчика Гейгера

Счетной характеристикой называется зависимость числа импульсов за фиксированный интервал времени от приложенного

напряжения U при одной и той же интенсивности потока ионизирующих частиц.

Принцип действия счетчика Гейгера изложен в описании к лабораторной работе № 61.

Работа выполняется в следующем порядке.

Установите заслонку источника β -излучения в положение "открыто".

Рекомендуется экспериментально установить минимальное напряжение, при котором счетчик начинает работать, и провести исследования на начальном участке (в диапазоне 20 В) с шагом в 5 В. Результаты запишите в таблицу, аналогичную табл. 2 в работе № 61.

Снимите зависимость числа импульсов при времени экспозиции 20 с для диапазона напряжений от 340 до 400 В, увеличив шаг до 20 В. Измерения при каждом фиксированном напряжении повторите 3 раза, найдите среднее значение числа импульсов \bar{N} .

Постройте график зависимости \bar{N} от напряжения U , определите на нем плато Гейгера и выберите напряжение рабочей точки U_P счетчика на середине плато.

3.3. Определение интенсивности фона

Если Вы выполняли п. 3.2, то за интенсивность фона нужно взять число импульсов при напряжении U_P на счетчике Гейгера; если вы не выполняли этот пункт, возьмите U_P равным 370 В.

Определение интенсивности фона I_Φ производится при отсутствии источника β -излучения в следующей последовательности:

- установите на счетчике Гейгера напряжение U_P и проконтролируйте его с помощью цифрового вольтметра;
- с помощью пересчетного устройства определите число импульсов за время экспозиции $T = 20$ с;
- повторите опыт три раза, результаты запишите в табл. 1, подсчитайте средние значения U_P и \bar{I}_Φ .

3.4. Снятие кривой поглощения

Установите β -источник на свинцовый домик.

Произведите измерение интенсивности $I_{\text{эксп}}$ – суммарной интенсивности фона и β -излучения - с помощью пересчетного прибора.

Таблица 1

Измерение интенсивности фона

U_p				$\bar{U}_p =$
I_Φ				$\bar{I}_\Phi =$

Вычислите интенсивность I_β по формуле (8).

В пазы свинцового домика вставляйте последовательно одну, две, три и т. д. пластины исследуемого материала, каждый раз определяя интенсивность I_β проходящего через них β -излучения. Число пластин увеличивают до достижения толщины слоя полного поглощения. Измерения при каждом количестве пластин проводят два раза, данные наблюдений записывают в табл. 2.

Находят средние значения интенсивности I_β .

Таблица 2

Измерение интенсивности β -излучения

Число пластин	Толщина набора пластин, см	$I_\beta = I_{\text{эксп}} - I_\Phi$		\bar{I}_β
0				
1				
2				
3				
4				
5				

3.5. Обработка экспериментальных результатов

По данным табл. 2 постройте кривую поглощения и определите толщину слоя полного поглощения h_0 .

По эмпирическим формулам (9) или (10) найдите максимальную энергию β -частиц. Относительную ошибку примите равной 10 %.

Окончательный результат запишите в виде:

$$E_{\mu} = E \pm \Delta E . \quad (14)$$

По соотношению (11) вычислите коэффициент поглощения для трех участков кривой поглощения, найдите его среднее значение, абсолютную и относительную погрешности измерений. Окончательный результат запишите в виде:

$$\mu = \mu \pm \Delta\mu . \quad (15)$$

В таблице 3 приведены номера вариантов (их указывает преподаватель) и пункты теории, которые следует прочесть, чтобы выполнить соответствующие эксперименты.

Таблица 3

Варианты выполнения работ

Вариант	Пункты теории	Пункты эксперимента
I	2.1 2.4	3.1 3.3 3.4
II	2.1 2.2 2.4	3.3 3.4 3.5
III	2.1 2.2 2.4	3.1 3.2 3.3 3.5

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите виды и свойства радиоактивных излучений.
2. Какая из траекторий на рис. 5 принадлежит α -, β - и γ -излучениям?

Укажите направление магнитного поля.

3. Что изменится на рис. 5, если между источником излучения и свинцовым коллиматором поместить: а) лист бумаги; б) стальную пластинку толщиной 5 мм?

4. Какую толщину должна иметь стальная стенка, чтобы ослабить γ -излучение с энергией 1 МэВ в 256 раз?

5. Приведите примеры использования радиоактивных излучений в горной промышленности.

6. Поясните виды β -распада.

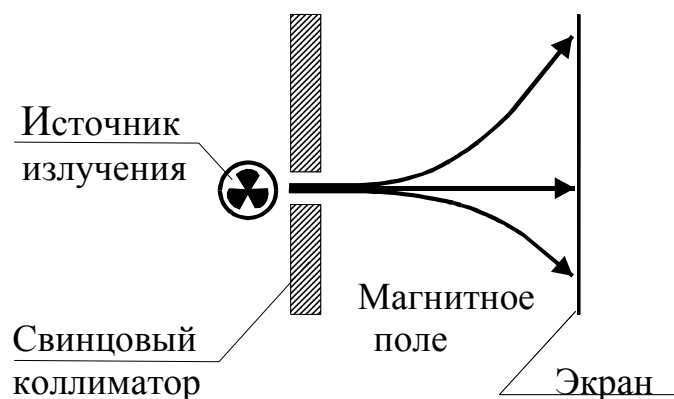


Рис. 5. Траектории излучений в магнитном поле

7. Что называется кривой поглощения?
8. Чем вызвана интенсивность фона?
9. Как устроена экспериментальная установка? Каково назначение ее отдельных узлов и блоков?
10. Как рассчитать коэффициент поглощения и максимальную энергию β -частиц?
11. В геологических исследованиях методом меченых атомов часто используют изотоп фосфора $^{32}_{15}\text{P}$. Напишите реакцию распада, если при этом образуется изотоп серы, электрон и антинейтрино.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Заворотько, Ю. М.* Геофизические методы исследования скважин / Ю. М. Заворотько - М.: Недра, 1983.- 208 с.
- Применение методов атомной и ядерной физики в горном деле* / под ред. В. В. Ржевского. - М.: Наука, 1969.- 206 с.
- Савельев, И. В.* Курс общей физики Т.3 / И. В. Савельев - М.: Наука, 1989. - 304 с.
- Трофимова, Т. И.* Курс физики / Т. И. Трофимова - М.: Высш. школа, 1994. - 541 с.