

Государственное образовательное учреждение  
высшего образования  
**КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**  
**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

В.В. АРИНИН, Д.М. ХРИПУНОВ

ОСЛАБЛЕНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВОМ  
ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОБРАТНЫХ КВАДРАТОВ  
РАССТОЯНИЙ

Казань

2014

**УДК 539.164**

*Печатается по решению Редакционно-издательского света ФГАУВО  
«Казанский (Приволжский) федеральный университет»*

*методической комиссии института физики  
Протокол №3 от 27 февраля 2014 г.*

*заседания кафедры физики твёрдого тела  
Протокол № 6 от 26 ноября 2013 г.*

*Авторы:*

канд. физ.-мат. наук, асс. Аринин В.В.  
инженер 1 кат. Хрипунов Д.М.

*Рецензент:*

к.ф.-м.н., м.н.с. лаб. «Радиохимия» ФГБОУ ВПО «КНИТУ» **Назипов Р.А.**

**ОСЛАБЛЕНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВОМ. ПРОВЕРКА ЗАКОНА  
ОБРАТНЫХ КВАДРАТОВ РАССТОЯНИЙ / В.В. Аринин, Д.М. Хрипунов //**  
Учебно-методическое пособие, Казань: Казанский (Приволжский) федеральный  
университет, 2014. – 20 с., 8 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 изучение закономерностей распространения гамма-излучения в веществе и экспериментальная проверка закона обратных квадратов расстояний.

© Казанский федеральный университет, 2014

© В.В. Аринин, Д.М. Хрипунов, 2014

Введение.....	4
1. Природа гамма-излучения и физические свойства гамма-квантов.....	4
2. Взаимодействие гамма-излучения с веществом .....	6
2.1. Процессы поглощения гамма-квантов. ....	6
2.2. Рассеяние гамма-излучения .....	8
3. Ослабление гамма-излучения .....	10
4. Закон обратных квадратов.....	11
5. Схема экспериментальной установки .....	13
6. Порядок выполнения работы .....	13
6.1. Упражнение 1. Проверка закона обратных квадратов. ....	15
6.2. Упражнение 2. Ослабление гамма-излучения веществом. ....	15
7. Анализ и представление результатов .....	16
8. Вопросы для самоподготовки .....	16
Литература .....	16
Приложение 1 .....	18
Приложение 2 .....	20

# Введение

Цель настоящей работы – знакомство с природой и свойствами гамма-излучения, процессами, протекающими при взаимодействии гамма-излучения с веществом, закономерностями ослабления гамма-излучения в веществе и законом обратных квадратов расстояний. Практическая часть работы основана на регистрации гамма-излучения препарата цезия  $^{137}\text{Cs}$  счетчиком Гейгера-Мюллера.

## 1. Природа гамма-излучения и физические свойства гамма-квантов

Гамма-излучение – электромагнитное излучение с самой короткой длиной волны и соответственно с самой большой энергией  $E_\gamma$ . Диапазон энергий гамма-квантов условно принимается как  $E_\gamma > 10^3$  эВ. Нижний предел этого диапазона перекрывается с диапазоном энергий рентгеновского излучения. Гамма-излучение испускается при переходах между возбужденными состояниями ядер, при ядерных реакциях, при отклонении частиц с высокой энергией в электрических и магнитных полях. Верхняя граница энергии гамма-квантов, излучаемых ядрами-продуктами альфа- и бета-распадов, порядка  $10^7$  эВ. Гамма-излучение другого происхождения (ускорители, распады элементарных частиц, космическое излучение) содержит кванты значительно больших энергий. В настоящей работе мы используем препарат цезия  $^{137}\text{Cs}$  (упрощенная схема распада приведена на Рис. 1) с энергией гамма-излучения  $E_\gamma = 0,66$  МэВ.

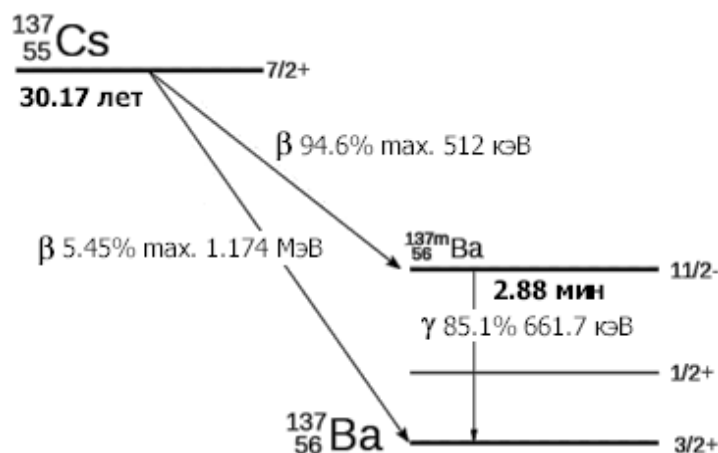


Рисунок 1. Упрощенная схема распада  $^{137}\text{Cs}$ . При распаде  $^{137}\text{Cs}$  образуются электроны с энергиями до 1.17 МэВ и гамма-кванты, в основном с энергией 662 кэВ.

Перечислим наиболее существенные свойства, присущие гамма-квантам:

- ✓ Как фотон вообще, гамма-квант имеет нулевую массу покоя и движется со скоростью света. При взаимодействии с частицами вещества происходит поглощение и рассеяние фотонов, сопровождающееся изменением энергии кванта порциями, сравнимыми с энергией самого кванта (в противоположность торможению и плавному изменению энергии у тяжелых частиц).
- ✓ Фотон участвует только в электромагнитном взаимодействии. Электрический заряд фотона равен нулю, вследствие чего эффективное сечение взаимодействия фотона с заряженными частицами значительно меньше, чем во взаимодействиях между заряженными частицами. Следствием этого является относительно большая проникающая способность гамма-излучения.
- ✓ Спин фотона равен 1 (фотон – бозе-частица) и, следовательно, он подчиняется статистика Бозе-Эйнштейна.
- ✓ Большая энергия гамма-квантов обуславливает легко доступное наблюдению проявление корпускулярных свойств гамма-излучения. Регистрация отдельного кванта, измерение его энергии является стандартной процедурой. Большой энергии гамма-кванта соответствует большая величина отклика регистрирующего устройства (счетчика), что позволяет работать с чрезвычайно малыми интенсивностями излучения и малыми количествами радиоактивных веществ (менее  $10^{-11}$  г).

Волновые свойства гамма-излучения наблюдались при  $E_\gamma < 1$  МэВ. Подобно рентгеновскому излучению, гамма-излучение испытывает брэгговскую дифракцию на кристаллах. Это явление может использоваться для измерения длины волны и для монохроматизации гамма-излучения.

- ✓ В качестве основной характеристики отдельного фотона можно принять волновой вектор  $\mathbf{k}_\gamma = \mathbf{p}_\gamma / \hbar$ , где  $\mathbf{p}_\gamma$  – импульс фотона. Энергия фотона  $E_\gamma = \hbar \cdot k_\gamma c$ . Помимо этого, состояние движения фотона свободно распространяющегося поля описывается его *мультипольностью*, равной  $2^L$  ( $L = 1, 2, 3, 4, \dots$ ) и *четностью*  $P$ . Величина  $L$  определяет момент количества движения, который несет фотон  $|L| = \{L(L + 1)\}^{1/2}$ . Мультипольность и четность совместно определяют тип излучения: излучение с характеристиками  $2^L$  и  $P = (-1)^L$  называется *электрическим  $2^L$ -польным (EL-излучением)*, а с характеристиками  $2^L$  и  $P = (-1)^{L+1}$  – *магнитным (ML)  $2^L$ -польным излучением*. Излучения с  $L = 1, 2, 3, 4$  называются дипольным, квадрупольным, октупольным и

гексадекапольным соответственно. Подробнее этот вопрос освещен, например, в [1] (см. Лекцию 4).

## 2. Взаимодействие гамма-излучения с веществом

Взаимодействие гамма-квантов с электронами и ядрами можно рассматривать как индивидуальные взаимодействия между квантом и частицей. Возможность такого подхода обусловлена тем, что радиус взаимодействия фотона с точечным зарядом равен т.н. *комптоновской длине волны электрона*  $\Lambda_e = h/m_e \cdot c = 3,86 \cdot 10^{-13}$  м, которая значительно меньше средних расстояний между частицами вещества ( $10^{-10}$  м). Здесь  $m_e$  – масса электрона,  $h$  – постоянная Планка и  $c$  – скорость света в вакууме.

### 2.1. Процессы поглощения гамма-квантов.

Поглощение фотона частицей без изменения энергии покоя последней (т.е. с полным переходом энергии фотона в кинетическую энергию частицы) невозможно, т.к. при этом невозможно совместное выполнение законов сохранения энергии и импульса. Электрон не имеет возбужденных состояний, его энергия покоя неизменна, следовательно, свободный электрон не может поглотить фотон при любых энергиях последнего. Поэтому процессы поглощения гамма-квантов электронами происходят при участии частиц-посредников. Существуют два механизма поглощения гамма-квантов: фотоэффект и рождение электронно-позитронных пар.

1) *Фотоэффект*, или фотоэлектрическое поглощение гамма-квантов, подобен оптическому фотоэффекту. Большая энергия фотона обуславливает энергетическую возможность фотоионизации не только внешних, но и внутренних электронных оболочек:  $E_\gamma > E_i$ , ( $E_i$  – энергия ионизации  $i$ -оболочки). Фотоэлектрон покидает атом, имея кинетическую энергию  $E_e = E_\gamma - E_i$ . Роль частицы-посредника играет атом. Вероятность передачи импульса возрастает с ростом энергии связи электрона с атомом, вследствие чего при  $E_\gamma > E_K$  основной вклад дает фотоэффект на  $K$ -оболочке. При выполнении этого условия зависимость эффективного сечения фотоэффекта от энергии кванта и характеристик поглощающих атомов, можно представить приближенными формулами (или проследить по Рис. 2):

$$\sigma_{\text{фот}} \propto Z^5 / E_\gamma^{3.5} \text{ при } E_\gamma \geq E_K \text{ и } \sigma_{\text{фот}} \propto Z^5 / E_\gamma \text{ при } E_\gamma \gg E_K. \quad (1)$$

Выбитые из атома фотоэлектроны имеют кинетическую энергию, равную  $E_e = E_\gamma - E_i$ , причем обычно  $E_e \gg \langle E_i \rangle$ , где  $\langle E_i \rangle = 13,6 Z$  эВ - среднее значение энергии ионизации вещества. Кинетическая энергия, приобретаемая атомом, исчезающе мала в сравнении с энергией фотона.

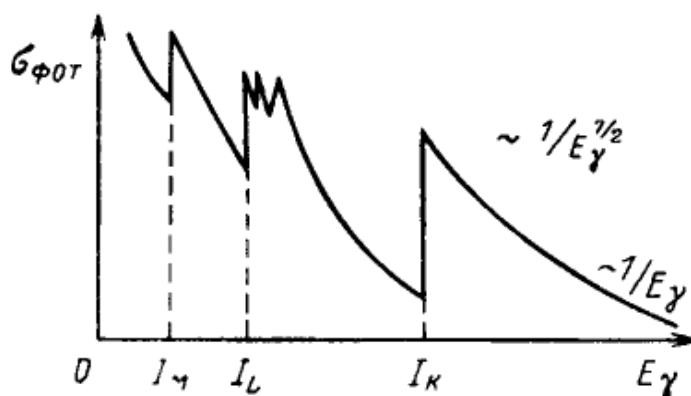


Рисунок 2. Зависимость эффективного сечения фотоэффекта  $\sigma_{\text{фот}}$  от энергии кванта  $E_\gamma$ .

2) *Процесс рождения электронно-позитронных пар* – превращение фотона в электрон и позитрон в кулоновском поле частицы посредника (см. Рис. 3). Если процесс происходит в поле ядра, то энергетический баланс процесса выглядит так:  $E_\gamma = 2m_e c^2 + E_e^- + E_e^+ + E_N$ , где  $E_e^-$ ,  $E_e^+$  и  $E_N$  - кинетические энергии электрона, позитрона и ядра, причем  $E_N \cong 0$ , следовательно рождение электронно-позитронных пар возможно при  $E_\gamma \geq 2m_e c^2 = 1,02$  МэВ. Участие электронов среды в качестве посредников становится возможным при  $E_\gamma > 4m_e c^2$  и имеет очень малую вероятность. После рождения электрон и позитрон испытывают ионизационное и радиационное торможение. Позитрон образует с электроном (не обязательно с тем же самым) среды связанное водородоподобное состояние – позитроний и через время  $\sim 10^{-8}$  с аннигилирует с ним с образованием двух гамма-квантов с энергией  $E_\gamma = 0,511$  МэВ каждый (значительно реже – с образованием трех гамма-квантов).

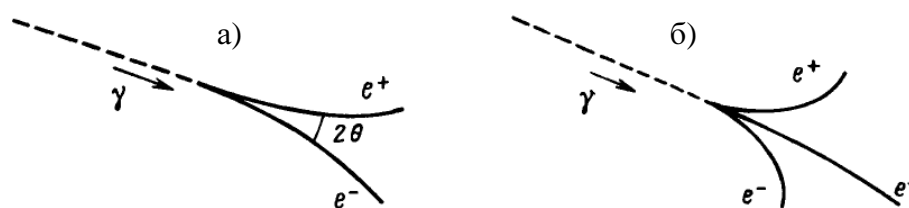


Рисунок 3. Схема рождения электронно-позитронных пар: а) в поле ядра, б) в поле электрона.

Эффективное сечение рождения электронно-позитронных пар монотонно возрастает с ростом энергии фотонов, рост сечения прекращается при  $E_\gamma > 15 \div 30$  МэВ. В интервале  $5m_e c^2 < E_\gamma < 50m_e c^2$  :

$$\sigma_{\text{пар}} \propto Z^2 \ln(E_\gamma/m_e c^2). \quad (2)$$

## 2.2. Рассеяние гамма-излучения

В отличие от поглощения, рассеяние фотонов может происходить на свободных частицах. Согласно классической теории Томсона, для рассеяния электромагнитной волны на *свободной* частице эффективное сечение этого процесса равно

$$\sigma_{\text{Томс}} = (8/3) \pi (Ze)^4 / (M^2 c^4), \quad (3)$$

где  $M$  – масса частицы,  $Ze$  – ее заряд. *Томсоновское рассеяние* не изменяет длину волны фотона и является классическим механизмом рассеяния гамма-излучения ядром.

Кроме томсоновского рассеяния, на ядрах происходит *дельбрюкковское рассеяние*. Оно имеет квантовую природу и может быть интерпретировано как рассеяние фотона на виртуальных фотонах кулоновского поля ядра. При таком рассеянии длина волны фотона также не меняется.

Основным механизмом рассеяния гамма-излучения на *связанных* электронах атома является *рэлеевское рассеяние*, при котором длина волны также не меняется.

Квантовый механизм рассеяния гамма-излучения основан на представлении об излучении, как о потоке частиц (фотонов), и учитывает обмен взаимодействующих частиц энергиями и импульсами. Если рассеивающие заряженные частицы можно считать свободными (для электронов это условие выражается как  $E_\gamma \gg E_i$ ), то рассеяние приводит к изменению энергии (длины волны) фотона (*эффект Комптона*):

$$E'_\gamma = E_\gamma [1 + (E_\gamma/Mc^2)(1 - \cos\theta)]^{-1}, \quad (4)$$

$$\lambda' = \lambda + \Lambda (1 - \cos\theta),$$

где  $\Lambda = h/Mc$  – комптоновская длина волны частицы,  $\theta$  – угол между падающим и рассеянным гамма-квантами. Для электрона  $\Lambda_e = 3,86 \cdot 10^{-13}$  м, для нуклона и ядер меньше на три и более порядка. Для гамма-излучения с энергией квантов несколько МэВ длина волны



составляет  $10^{-12} \div 10^{-13}$  м, и заметные изменения длины волны и энергии гамма-квантов будут иметь место только при рассеянии последних на электронах. Качественно проследить изменение энергии гамма кванта при рассеянии можно по Рис. 4.

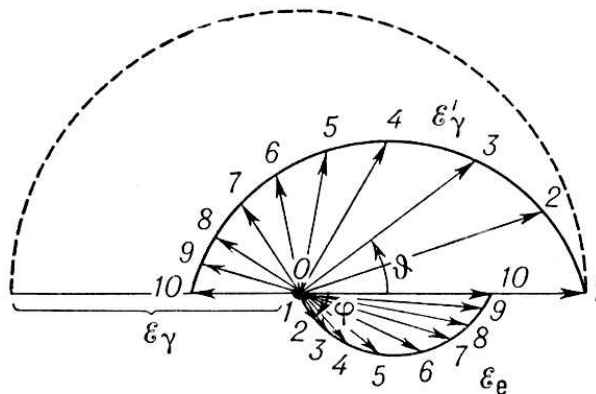


Рисунок 4. Схема эффекта Комптона.

В эффекте Комптона провзаимодействовавшие с фотонами электроны (электроны отдачи) приобретают кинетическую энергию равную

$$E_e = E_\gamma - E'_\gamma . \quad (5)$$

Спектр кинетической энергии электронов отдачи – непрерывный в интервале  $0 \leq E_e \leq E_{\max}$ ,  $E_{\max} = 2 E_\gamma \varepsilon / (1 + 2\varepsilon)$ ,  $\varepsilon = E_\gamma / m_e c^2$  (см. нижнюю полусферу на Рис. 4).

Эффективное сечение комптоновского рассеяния описывается достаточно сложной формулой Клейна-Тамма-Нишины, приведенной, в частности, в [2] (гл.IV, §30).

При  $\varepsilon \gg 1$  эффективное сечение эффекта Комптона в расчете на один атом изменяется прямо пропорционально отношению  $Z / E_\gamma$ :

$$\sigma_{\text{компт}} \propto Z / E_\gamma . \quad (6)$$

Кроме перечисленных выше наблюдается резонансное рассеяние гамма-квантов ядрами (резонансная флюоресценция). Ядро поглощает гамма-квант, переходя в возбужденное состояние с последующим излучением гамма-кванта или электрона конверсии. При  $E_\gamma < 100$  кэВ в твердых телах, содержащих соответствующие ядра, имеет место эффект Мёссбауэра – резонансная флюоресценция без потери энергии квантов на отдачу.

### 3. Ослабление гамма-излучения

При прохождении пучка гамма-квантов через вещество происходит их рассеяние и поглощение, приводящее к ослаблению пучка по экспоненциальному закону, подобному закону Ламберта для оптического диапазона:

$$N_\gamma(d) = N_\gamma(0) \exp(-\mu d), \quad (7)$$

где  $N_\gamma$  – число гамма-квантов,  $\mu$  – коэффициент ослабления, зависящий от энергии квантов и характеристик поглощающего вещества,  $d$  – толщина слоя вещества. В зависимости от характера расчетов толщина ослабляющего слоя может иметь размерность длины или размерность (масса/площадь). Соответственно коэффициент ослабления имеет размерность (длина)<sup>-1</sup> (*линейный коэффициент ослабления*) или (площадь/масса) (*массовый коэффициент ослабления*).

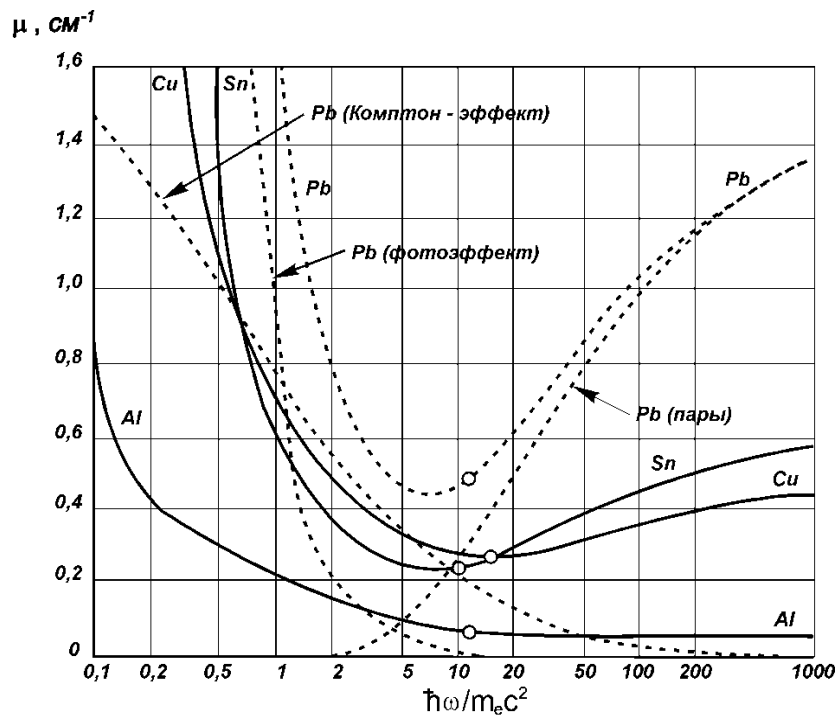


Рисунок 5. Коэффициент поглощения гамма-излучения  $\mu$  в зависимости от энергии кванта  $\hbar\omega$ . Для Pb приведено также поведение составляющих, обусловленных фотоэффектом, комптоновским рассеянием и эффектом рождения электронно-позитронных пар.

При расчетах ослабления интенсивности (7) в геометрии узкого пучка квантов предполагается, что любой вид взаимодействия приводит к удалению кванта из пучка, и коэффициент ослабления равен сумме парциальных коэффициентов ослабления:

$$\mu = \mu_{\text{фот}} + \mu_{\text{компт}} + \mu_{\text{пар}}. \quad (8)$$

Для вещества, содержащего атомы одного элемента,  $\mu_i = \sigma_i N$ , где  $N$  - число атомов в единице объема вещества (если  $\mu_i$  – линейный коэффициент ослабления) или в единице массы (при массовом коэффициенте ослабления). На Рис. 5 представлен график зависимости  $\mu(E_\gamma)$ .

Для расчетов величины энергии, переданной пучком гамма-квантов поглощающей среде, необходимо учитывать, что вклад каждого из процессов взаимодействия различен: при фотопоглощении почти вся энергия кванта передается фотоэлектроном атомам среды, при комптоновском рассеянии значительная часть энергии уносится рассеянным квантом в соседние области среды или за ее пределы, часть рассеянных квантов испытывает вторичное рассеяние или поглощение. В подобных расчетах применяется величина, называемая коэффициентом передачи (поглощения) энергии  $\mu_{\text{тр}}$ , входящая в виде слагаемого в полный коэффициент ослабления:

$$\mu = \mu_{\text{тр}} + \mu_s, \quad (9)$$

где  $\mu_s$  – слагаемое, характеризующее рассеянное фотонное излучение. Значения  $\mu_{\text{тр}}$  можно найти в справочниках (см. Табл. П2 Приложения 2).

## 4. Закон обратных квадратов

Закон обратных квадратов в общем случае применим, когда линия действия некоторой силы, энергия или другая, сохраняющая полное значение величина, расходится (распространяется) в радиальном направлении от источника. По мере того, как площадь сферы (которая определяется по формуле  $4\pi r^2$ ) растёт пропорционально квадрату расстояния от источника (радиуса сферы), интегральная интенсивность испущенного излучения остается неизменной (мы пренебрегаем поглощением излучения в среде) (см Рис. 6). Следовательно, интенсивность излучения, проходящего через одну и ту же площадь, обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника.

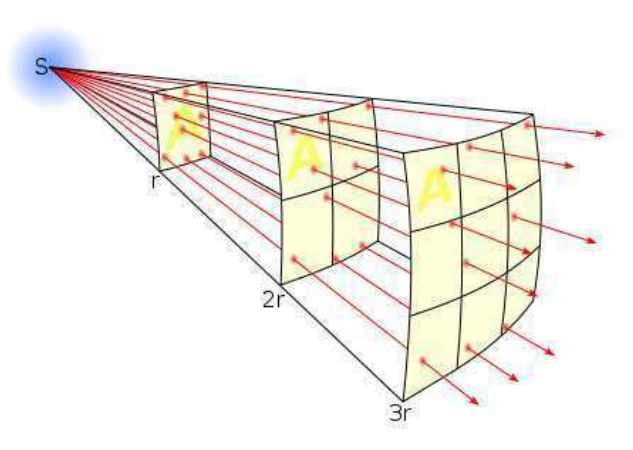


Рисунок 6. Увеличение площади поверхности по мере удаления от источника излучения.

Закон обратных квадратов расстояний справедлив для гравитационного взаимодействия, электростатики, распространения звука в однородной среде, электромагнитных волн и т.д. В нашем случае он может быть записан в следующем виде:

$$N_{\gamma}(d_1)/N_{\gamma}(d_2) = d_2^2/d_1^2, \quad (10)$$

или, если перейти к дозовым характеристикам:

$$K = A\Gamma_{\delta}t/d^2. \quad (11)$$

Здесь  $K$  – керма,  $A$  – активность источника гамма-излучения,  $\Gamma_{\delta}$  – керма постоянная (для цезия  $^{137}\text{Cs}$  она равна  $\Gamma_{\delta} = 21,24 \text{ аГр}\cdot\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{Бк})$ ),  $d$  – расстояние от источника до точки наблюдения.

При практических применениях важно помнить, что выражения (10) и (11) справедливы для точечного источника (т.е. размеры источника должны быть намного меньше расстояния до источника), а также при отсутствии поглощения излучения в среде. Кроме того, на Земле всегда имеет место естественный радиационный фон, который также будет вносить свои поправки.

## 5. Схема экспериментальной установки

Основные узлы экспериментальной установки показаны на Рис. 7.

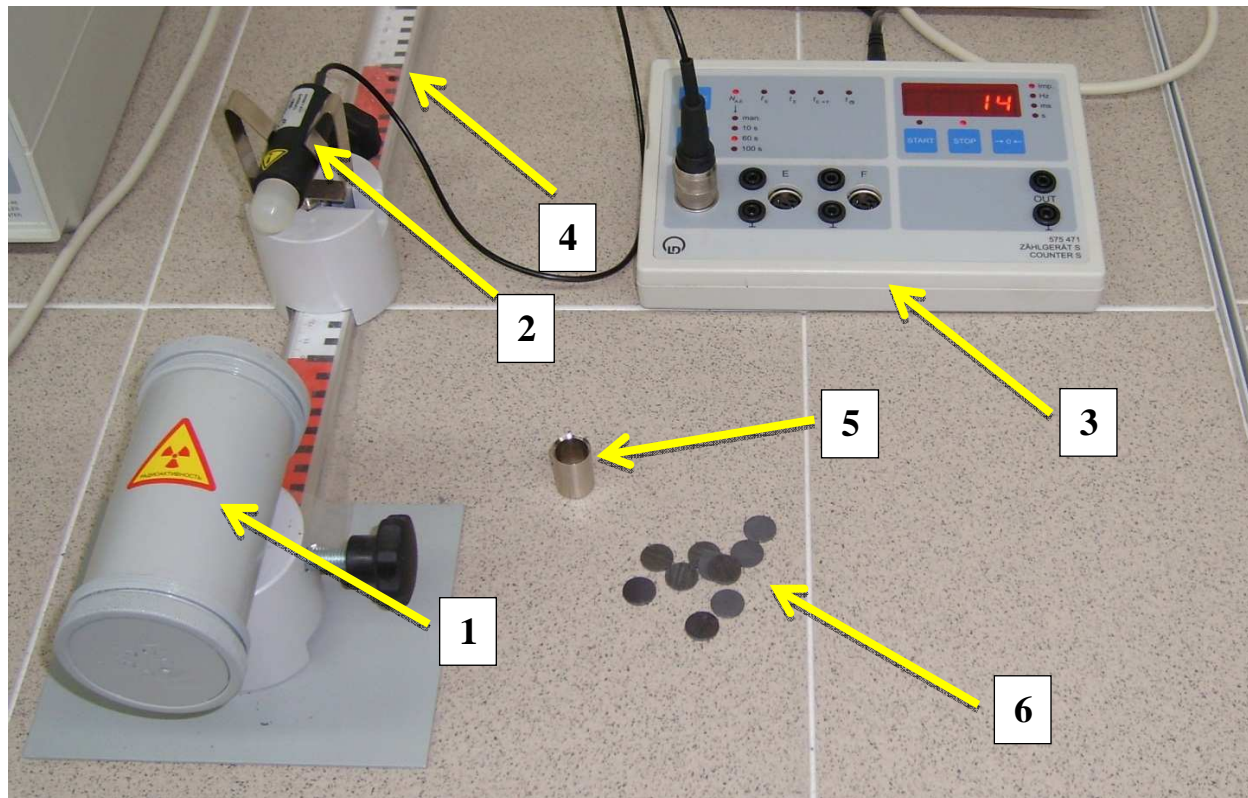


Рисунок 7. 1) Контейнер с препаратом  $^{137}\text{Cs}$ ; 2) счетчик Гейгера-Мюллера; 3) пересчетное устройство; 4) линейка; 5) кювета для пластин; 6) пластины из свинца толщиной 1мм.

В настоящей работе, для регистрации гамма-излучения от препарата  $^{137}\text{Cs}$ , находящегося в контейнере **1**, используется счетчик Гейгера-Мюллера **2**. Интенсивность гамма-излучения  $N$  регистрируется с помощью пересчетного устройства **3**. Расстояние от источника до счетчика  $R$  контролируется с помощью линейки **4**. Помещая необходимое количество пластин **6** в кювету **5**, и закрепляя последнюю на контейнере **1**, можно изучать закон ослабления интенсивности гамма-излучения от толщины поглотителя  $d$  (в данном случае свинца).

## 6. Порядок выполнения работы

Перед началом работы убедитесь в наличии всех необходимых узлов установки и соединений между ними в соответствии с предыдущим разделом.

*Внимание! Самостоятельное вскрытие или другие манипуляции с источником радиоактивного излучения запрещены и являются нарушением законодательства РФ в области радиационной безопасности. Доступ к содержимому контейнера, включающему источник на основе  $^{137}\text{Cs}$ , имеет только персонал лаборатории, относящийся к группе А.*

Убедитесь, что кабель от счетчика 2 надежно подключен к разъему А на пересчетном устройстве 3 (см. Рис. 7). Включите установку в сеть.

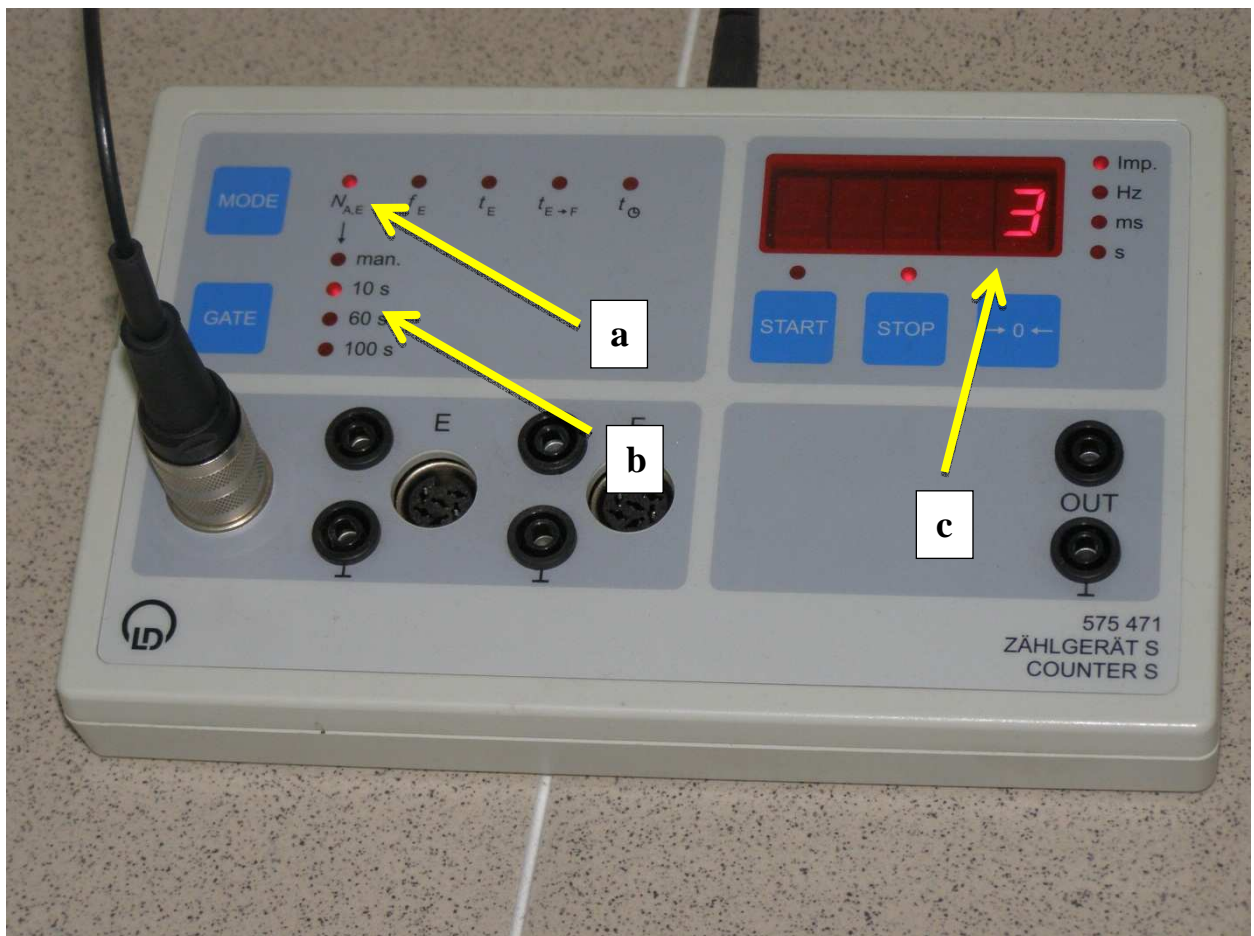


Рисунок 8. Пересчетное устройство: а) индикатора режима работы; б) индикатор времени счета импульсов; с) экран.

С помощью кнопки «Mode» установите индикатор режима работы **a** в положение « $N_{A,E}$ », что соответствует интегральному режиму работы (см. Рис. 8). Кнопкой «Gate» можно, при необходимости, выбрать время счета импульсов. Результат считывается с экрана **c**.

### 6.1. Упражнение 1. Проверка закона обратных квадратов.

Установите счетчик **2** на минимальном расстоянии  $r$  от контейнера **1**. Кювета **5** с пластинами **6** **не должна** быть закреплена на контейнере **1**. Нажмите кнопку «Start» на пересчетном устройстве **3**, при этом над ней загорится индикатор, что означает начало регистрации гамма-квантов. После того, как загорится индикатор над кнопкой «Stop», можно снимать показания с экрана  $s$ .

Передвиньте счетчик **2** вдоль линейки **4** и повторите измерения при другом значении расстояния источника от детектора. Результаты измерений занесите в таблицу.

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	...
$r$									
$N$									

Выбор времени счета импульсов (10, 60 или 100 секунд) производится, исходя из соображений статистической достоверности результатов и времени выполнения работы. При занесении результатов в итоговую таблицу делается поправка на время счета импульсов, в случае, если оно менялось по ходу выполнения упражнения. В случае необходимости, измерения для заданного расстояния можно провести несколько раз, с последующим усреднением результатов.

### 6.2. Упражнение 2. Ослабление гамма-излучения веществом.

Выберете определенное расстояние между источником и детектором и не меняйте его в ходе выполнения упражнения **2**. Проведите измерения интенсивности счета без установленной кюветы **5**.

Поместите одну пластину **6** в кювету **5** и закрепите ее на контейнере **1**. Проведите измерения интенсивности счета. Повторите измерения с другим количеством пластин **6**. Результаты занесите в таблицу.

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	...
$d$									
$N$									

## 7. Анализ и представление результатов

Представьте результаты в произвольной печатной форме, с включением графиков зависимости интенсивности гамма излучения  $N$  от расстояния до источника  $r$  и от толщины слоя поглощающего вещества (свинца)  $d$ .

С помощью первого графика сделайте вывод о выполнении закона обратных квадратов. Объясните его поведение при больших  $r$ .

С помощью второго графика определите слой половинного ослабления  $d_{1/2}$  гамма-излучения в свинце. Сравните полученный результат с табличными данными.

## 8. Вопросы для самоподготовки

1. Чем отличается рентгеновское и гамма излучение с одинаковой длиной волны?
2. Какое вещество наиболее эффективно поглощает гамма-излучение и почему?
3. Какая мера эффективнее уменьшит дозу ионизирующего излучения: уменьшение времени в 2 раза или увеличение расстояния в 2 раза и почему?
4. Почему при взаимодействии гамма-квантов с кулоновским полем ядра (или электронов) появляются электронно-позитронные пары и не появляются другие частицы?
5. С чем связан тот факт, что волновые свойства гамма излучения наблюдались только при энергиях  $E_\gamma < 1$  МэВ?
6. С чем может быть связано нарушение закона обратных квадратов расстояний на практике?
7. Покажите, что поглощение фотона частицей без изменения массы покоя последней действительно приводит к нарушению закона сохранения энергии и/или импульса.
8. С чем связан минимум на графике 5 и к чему он приводит на практике?

## Литература

1. Введение в физику ядра и частиц [Текст] / И.М.Капитонов // М.: УРСС. – 2004. – 383 с.
2. Экспериментальная ядерная физика. Книга 1 Физика атомного ядра. [Текст] / К.Н. Мухин // М.: Энергоатомиздат. – 1993. – 376 с.



3. 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. – 391 p.

## Приложение 1

Таблица П1. Массовый  $(\mu_{en})_m$  и линейный  $\mu_{en}$  коэффициент поглощения энергии для различных материалов в зависимости от энергии фотонного излучения

$E_\gamma$ , МэВ	$(\mu_{en})_m$ , см <sup>2</sup> /г	$\mu_{en}$ , см <sup>-1</sup>	$(\mu_{en})_m$ , см <sup>2</sup> /г	$\mu_{en}$ , см <sup>-1</sup>	$(\mu_{en})_m$ , см <sup>2</sup> /г	$\mu_{en}$ , см <sup>-1</sup>
	Вода, $\rho=1,0$ г/см <sup>3</sup>		Воздух, $\rho=1,2928 \cdot 10^{-3}$ г/см <sup>3</sup>		Алюминий, $\rho=2,70$ г/см <sup>3</sup>	
0,01	4,84	4,84	4,65	6,01	25,4	68,6
0,015	1,34	1,34	1,30	1,68	7,32	19,8
0,02	0,536	0,536	0,527	0,681	3,06	8,26
0,03	0,152	0,152	0,150	0,194	0,857	2,31
0,04	0,0680	0,0680	0,0671	0,0867	0,353	0,953
0,05	0,0415	0,0415	0,0404	0,0522	0,181	0,489
0,06	0,0315	0,0315	0,0301	0,0889	0,108	0,292
0,08	0,0258	0,0258	0,0239	0,0309	0,0542	0,146
0,1	0,0254	0,0254	0,0232	0,0300	0,0373	0,101
0,145	0,0273	0,0273	0,0247	0,0319	0,0281	0,0759
0,15	0,0276	0,0276	0,0249	0,0322	0,0277	0,0748
0,2	0,0297	0,0297	0,0267	0,0345	0,0272	0,0734
0,279	0,0316	0,0316	0,0284	0,0367	0,0279	0,0753
0,3	0,0319	0,0319	0,0287	0,0371	0,0281	0,0759
0,4	0,0328	0,0328	0,0295	0,0381	0,0286	0,0772
0,412	0,0329	0,0329	0,0295	0,0381	0,0286	0,0772
0,5	0,0330	0,0330	0,0297	0,0384	0,0290	0,0783
0,6	0,0328	0,0328	0,0295	0,0381	0,0283	0,0764
0,662	0,0326	0,0326	0,0294	0,0380	0,0281	0,0759
0,8	0,0320	0,0320	0,0288	0,0372	0,0277	0,0748
1,0	0,0310	0,0310	0,0279	0,0361	0,0268	0,0724
1,25	0,0296	0,0296	0,0266	0,0344	0,0255	0,0688
1,5	0,0283	0,0283	0,0254	0,0328	0,0243	0,0656
2,0	0,0260	0,0260	0,0234	0,0302	0,0225	0,0608
2,75	0,0235	0,0235	0,0212	0,0274	0,0206	0,0556
3,0	0,0228	0,0228	0,0206	0,0266	0,0202	0,0545
4,0	0,0206	0,0206	0,0187	0,0242	0,0188	0,0508
5,0	0,0192	0,0192	0,0174	0,0225	0,0180	0,0486
6,0	0,0180	0,0180	0,0165	0,0213	0,0175	0,0472
8,0	0,0166	0,0161	0,0152	0,0196	0,0170	0,0459
10,0	0,0156	0,0156	0,0144	0,0186	0,0168	0,0454

Таблица П1. Массовый  $(\mu_{\text{en}})_m$  и линейный  $\mu_{\text{en}}$  коэффициент поглощения энергии для различных материалов в зависимости от энергии фотонного излучения (продолжение)

$E_\gamma$ , МэВ	$(\mu_{\text{en}})_m$ , см <sup>2</sup> /Г	$\mu_{\text{en}}$ , см <sup>-1</sup>	$(\mu_{\text{en}})_m$ , см <sup>2</sup> /Г	$\mu_{\text{en}}$ , см <sup>-1</sup>	$(\mu_{\text{en}})_m$ , см <sup>2</sup> /Г	$\mu_{\text{en}}$ , см <sup>-1</sup>
	Бетон, $\rho=2,3$ г/см <sup>3</sup>		Железо, $\rho=7,86$ г/см <sup>3</sup>		Свинец, $\rho=11,34$ г/см <sup>3</sup>	
0,01	25,1	57,7	138	1080	123	1390
0,015	7,65	17,6	49,2	387	88,4	1000
0,02	3,21	7,38	22,6	178	68,3	774
0,03	0,910	2,09	7,21	56,7	25,1	285
0,04	0,384	0,883	3,14	24,7	12,0	136
0,05	0,198	0,455	1,62	12,7	6,66	75,5
0,06	0,117	0,269	0,952	7,48	4,10	46,5
0,08	0,0591	0,126	0,408	3,21	1,90	21,5
0,1	0,0407	0,0936	0,217	1,70	2,23	25,3
0,145	0,0301	0,0693	0,0850	0,668	1,22	13,8
0,15	0,0298	0,0685	0,0787	0,618	1,14	12,9
0,2	0,0286	0,0658	0,0479	0,376	0,625	7,09
0,279	0,0291	0,0669	0,0361	0,284	0,300	3,40
0,3	0,0293	0,0674	0,0335	0,263	0,259	2,94
0,4	0,0298	0,0685	0,0303	0,238	0,144	1,63
0,412	0,0298	0,0685	0,0301	0,236	0,137	1,55
0,5	0,0299	0,0688	0,0292	0,230	0,0956	1,08
0,6	0,0296	0,0681	0,0284	0,223	0,0715	0,811
0,662	0,0293	0,0674	0,0280	0,220	0,0645	0,731
0,8	0,0287	0,0660	0,0272	0,214	0,0485	0,550
1,0	0,0278	0,0639	0,0260	0,204	0,0378	0,429
1,25	0,0266	0,0612	0,0249	0,196	0,0320	0,363
1,5	0,0254	0,0584	0,0238	0,187	0,0276	0,313
2,0	0,0236	0,0543	0,0221	0,174	0,0244	0,277
2,75	0,0211	0,0485	0,0208	0,163	0,0237	0,269
3,0	0,0208	0,0478	0,0205	0,161	0,0236	0,268
4,0	0,0194	0,0446	0,0199	0,156	0,0248	0,281
5,0	0,0183	0,0421	0,0198	0,156	0,0264	0,299
6,0	0,0177	0,0407	0,0200	0,157	0,0276	0,313
8,0	0,0170	0,0391	0,0207	0,163	0,0299	0,339
10,0	0,0166	0,0382	0,0213	0,167	0,0317	0,359

## Приложение 2

Таблица П2. Линейный коэффициент ослабления гамма-излучения  $\mu$  ( $\text{см}^{-1}$ ) и массовый коэффициент передачи энергии  $\mu_{\text{тр}}$  ( $\text{см}^2/\text{г}$ ) для алюминия, железа и свинца.

$E_{\gamma}$ , МэВ	Вода		Алюминий		Железо		Свинец	
	$\mu$	$\mu_{\text{тр}}$	$\mu$	$\mu_{\text{тр}}$	$\mu$	$\mu_{\text{тр}}$	$\mu$	$\mu_{\text{тр}}$
0,01	4,87	4,72	69,44	25,70	1328	139	1407	124
0,02	0,68	0,50	8,16	3,06	192	22	943	66
0,04	0,23	0,06	1,27	0,33	27	3,2	151	12
0,08	0,17	0,02	0,48	0,05	4,2	0,4	23,5	1,9
0,10	0,16	0,02	0,42	0,04	2,6	0,2	60,4	2,1
0,20	0,13	0,03	0,32	0,03	1,06	0,05	10,6	0,6
0,30	0,12	0,03	0,28	0,03	0,82	0,03	4,2	0,25
0,40	0,10	0,03	0,25	0,03	0,72	0,03	2,44	0,14
0,50	0,10	0,03	0,23	0,03	0,65	0,03	1,70	0,10
0,60	0,09	0,04	0,21	0,03	0,60	0,03	1,33	0,07
0,80	0,08	0,03	0,18	0,03	0,52	0,03	0,95	0,05
1,00	0,07	0,03	0,16	0,03	0,47	0,03	0,77	0,04
1,25	0,06	0,03	0,15	0,02	0,42	0,02	0,67	0,03
1,50	0,06	0,03	0,13	0,02	0,38	0,02	0,56	0,03
2,00	0,05	0,03	0,12	0,02	0,33	0,02	0,51	0,02

## РЕЦЕНЗИЯ

### На учебно-методическое пособие Аринина В.В. и Хрипунова Д.М. «Ослабление гамма-излучения веществом. Проверка закона обратных квадратов расстояний.»

Пособие рассчитано на студентов Казанского федерального университета, изучающий курс «Ядерная физика» в рамках общефизического практикума.

Структура пособия построена по классическому принципу подачи материала: сначала приводится теоретическая часть, затем описание технической части и процедуры выполнения лабораторной работы. В разделах 1-4 емко, но достаточно информативно описаны современные представления о природе гамма-излучения, взаимодействии гамма-излучения с веществом и о распространении гамма-излучения в пространстве. Разделы 5-7 касаются практической части. В них дано описание экспериментальной лабораторной установки для измерения интенсивности гамма-излучения в зависимости от расстояния или при его прохождении через набор образцов из свинца определенной толщины. Далее приведены описание процедуры выполнения лабораторной работы и формы предоставления результатов.

Выбранные автором стиль изложения и глубина технической подробности при описании материала адекватны поставленной задаче и учитывают круг читателей данного пособия. Пособие снабжено достаточным количеством вопросов для самоподготовки, направленных на закрепление изучаемого материала. В пособии приводятся справочные таблицы которые будут использоваться на практике.

Рецензируемое пособие, безусловно, полезно как учебное пособие для студентов Казанского федерального университета, изучающих ядерную физику и рекомендую данное пособие к изданию.

Младший научный сотрудник  
лаборатории «Радиохимия» КНИТУ,

к.ф.-м.н.

удостоверяется

Начальник

Октябрьского ВПО «КНИТУ»

О.А.Перельгина

«17» 02

2014

Р.А. Назипов

17.02.2014г.

### ВЫПИСКА ИЗ ПРОТОКОЛА № 3

от 27 февраля 2014

заседания Учебно-методической комиссии Института физики КФУ

ПРИСУТСТВОВАЛИ: проф. Таюрский Д.А. (председатель комиссии), доц. Шерстюков О.Н. (зам. председателя комиссии), Хуснутдинов Н.Р., Ильясов К.А., Воронина Е.В., Тюрин В.А., Корчагин П.А., Дуглав А.В., Мокшин А.В., Гарнаева Г.И., Шиманская Н.Н., Соколова М.Г.

СЛУШАЛИ: рекомендацию в печать учебно-методического пособия «Ослабление гамма-излучения веществом. Проверка закона обратных квадратов расстояний» (авторы: Аринин В.В., Хрипунов Д.М.)

ПОСТАНОВИЛИ: на основании положительной рецензии к.ф.-м.н., м.н.с. лаборатории «Радиохимия» ФГБОУ ВПО «КНИТУ» Назипова Р.А. рекомендовать вышеуказанное пособие к опубликованию в электронном виде на сайте Института физики.

Председатель Учебно-методической комиссии  
Института физики, профессор

Таюрский Д.А.