

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

Физический факультет

Кафедра Общей ядерной физики

Москва 2005 г.

Взаимодействие гамма-излучения с веществом

Аспирант : Чжо Чжо Тун

Руководитель : Профессор Б.С.Ишханов

Взаимодействие гамма-излучения с веществом

Зависит от их

типа

заряда

массы и энергии

- * Заряженные частицы ионизируют атомы вещества, взаимодействуя с атомными электронами.
- * Нейтроны и гамма-кванты, сталкиваясь с частицами в веществе, передают им свою энергию, вызывая ионизацию за счёт вторичных заряженных частиц.

- **Основные виды взаимодействия гамма -излучения с веществом**

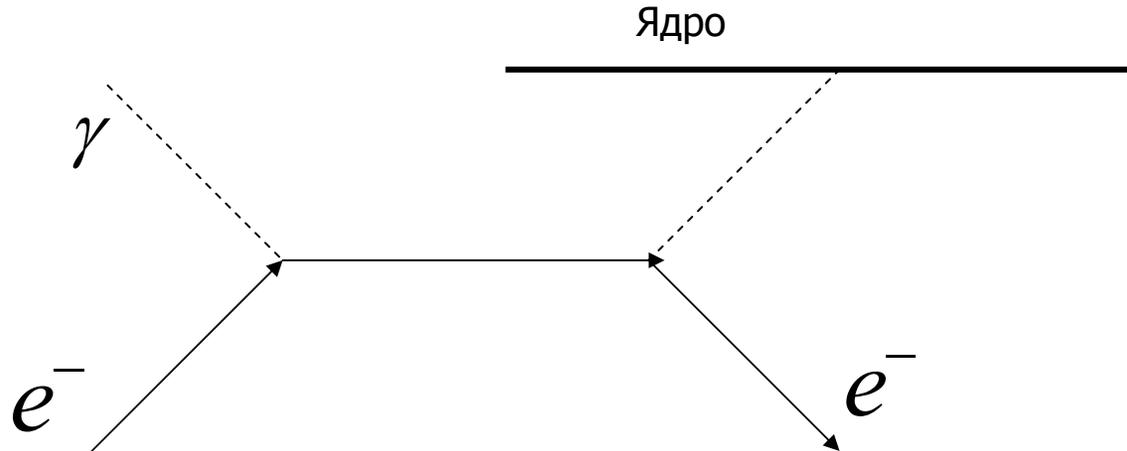
(1) фотоэлектрическое поглощение (фотоэффект)

**(2) рассеяние фотонов на свободных электронах
(комptonовское рассеяние)**

**(3) рождение фотоном в кулоновском поле ядра или
электрона пары позитрон-электрон (образование пар)**

• При энергии гамма-квантов больше 10 МэВ превышает порог фотоядерных реакций и становятся возможны реакции типа $(\gamma, p), (\gamma, n), (\gamma, \alpha)$.

Фотоэффект



* При котором фотон, целиком поглощаясь атомом, передает свою энергию одному из электронов атомных оболочек (чаще всего электронам К-оболочки)

Потому что поглощение γ -кванта свободной частицей невозможно, фотоэффект происходит с наибольшей вероятностью на электронах атомной оболочки, наиболее сильно связанной с ядром атома.

Кинетическая энергия вылетевшего электрона

$$E_e = E_\gamma - E_i$$

где

E_γ – энергия фотона

E_i – энергия связи электрона на i -ой оболочке атома

* Энергия отдачи атома ($\sim E_\gamma / M_{\text{ат}} \cdot c^2$) очень мало по сравнению с E_γ и E_i

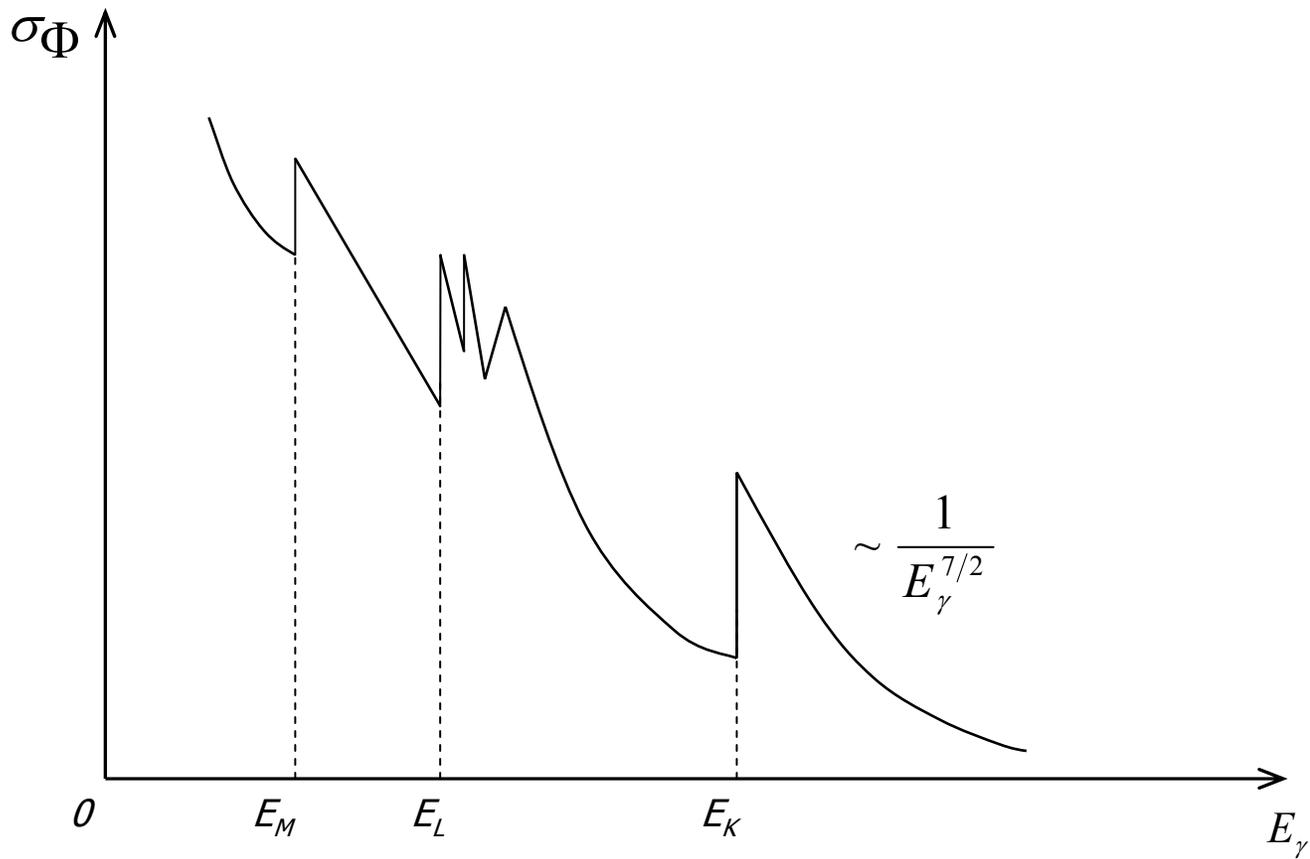


Рис.1 Зависимость сечения фотоэффекта от энергии гамма-излучения

* По мере убывания E_{γ} сечение возрастает до $E_{\gamma} = E_K$, начиная с $E_{\gamma} < E_K$ фотоэффект на К - оболочке становится невозможным.

При $E_\gamma > E_K$

$$\sigma_\phi^{[K]} \sim \frac{Z^5}{(E_\gamma)^{7/2}}$$

где $\sigma_\phi^{[K]}$ – сечение фотоэффекта на K- оболочке

Z - заряд атома

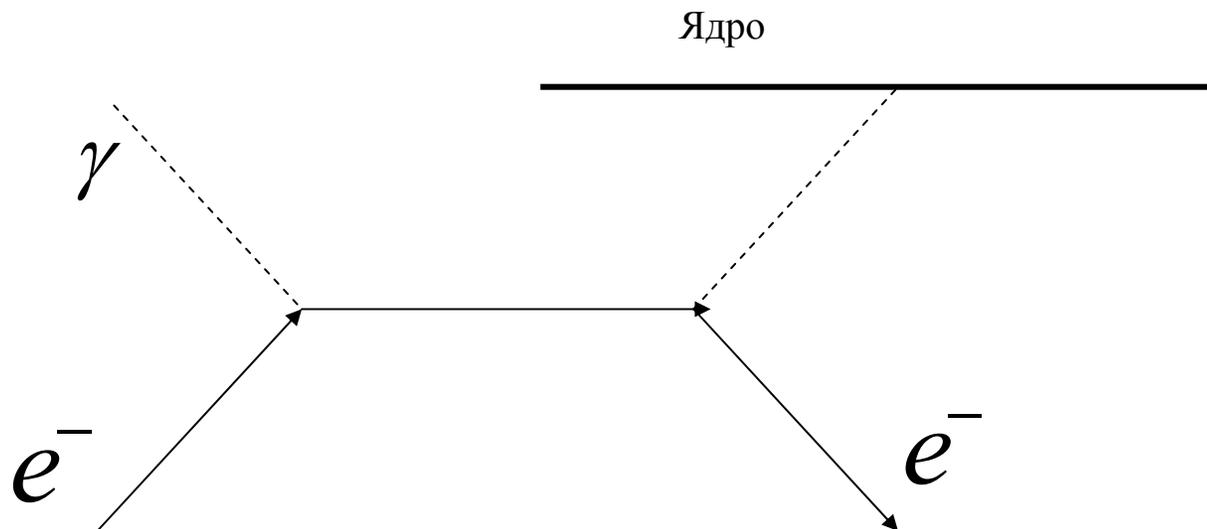
* Вероятность фотоэффекта очень резко зависит от заряда атома

Полное сечение фотоэффекта,

$$\sigma_\phi \approx \frac{5}{4} \cdot \sigma_\phi^{[K]},$$

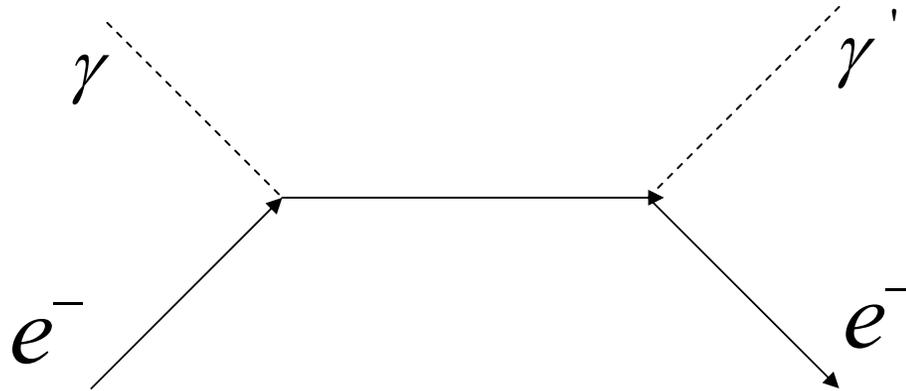
Причем,

$$\sigma_\phi^{[L]} \approx \frac{1}{5} \sigma_\phi^{[K]} \quad \text{и} \quad \sigma_\phi^{[M]} \approx \frac{1}{4} \cdot \sigma_\phi^{[L]}$$



- Угловое распределение фотоэлектронов зависит от их энергии.
- При малых энергиях (десятки кэВ) фотоэлектроны испускаются преимущественно в направлении, перпендикулярном пучку фотонов.
- С ростом энергии угол вылета фотоэлектронов уменьшается.

Комптовское рассеяние



• при котором вся энергия γ -кванта передается атомному электрону, взаимодействие γ -излучения со средой может приводить к его рассеянию.

(т.е отклонению от первоначального направления распространения на некоторый угол- θ)

энергия рассеянного фотона E'_γ

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)},$$

энергия комптоновского электрона E_e

$$E_e = \frac{E_\gamma \gamma}{\left(1 + 2\gamma + (1 + \gamma)^2 \operatorname{tg} \varphi\right)},$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) = \operatorname{ctg}(1 + \gamma),$$

$$\text{где } \gamma = \frac{E_\gamma}{m_e c^2}.$$

θ – угол рассеяния γ – кванта

φ – угол вылета электрона

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)},$$

* Из приведенных соотношений следует, что фотоны, рассеянные на углы $\theta=90^\circ$, всегда имеют энергию 0,511 МэВ независимо от начальной энергии,

• при $\theta=180^\circ$ - в диапазоне от 0,17 до 0,25 МэВ.

* Максимальную кинетическую энергию имеют комптоновские электроны, вылетающие в направлении движения первичных фотонов, т.е. при $\varphi = 0$. Эту максимальную энергию можно найти из соотношения

$$(E_e)_{\max} = m_e c^2 \frac{2\gamma^2}{1 + 2\gamma}.$$

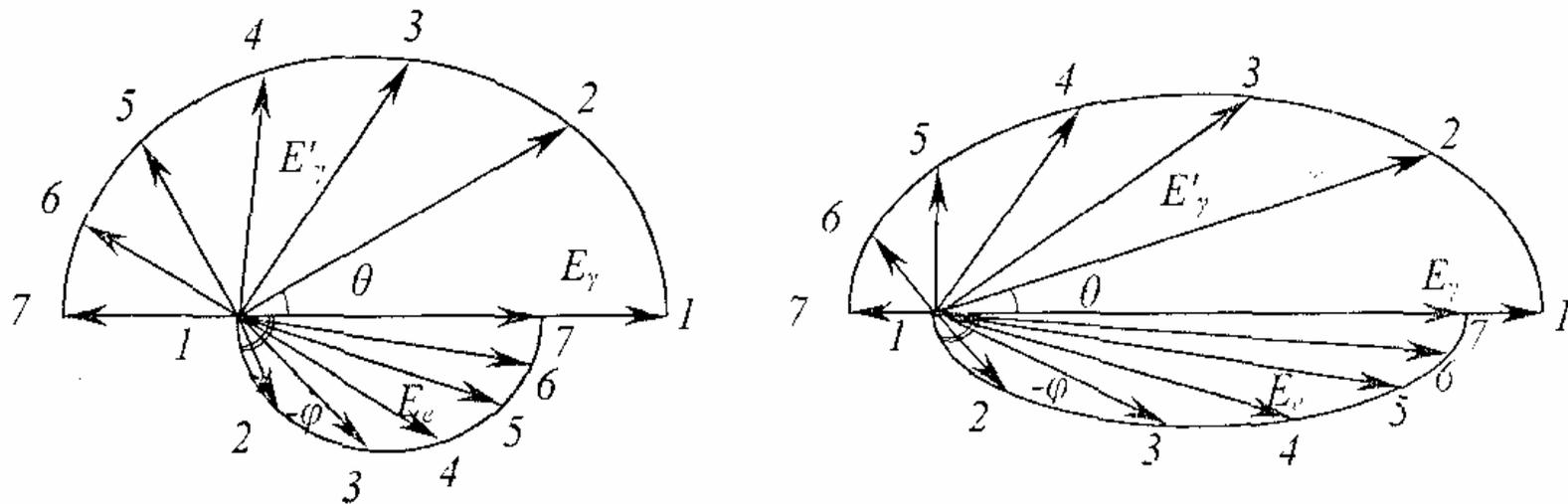


Рис.2 Полярные диаграммы рассеяния фотонов на свободных электронах, где а) $E_\gamma = 0,64$ МэВ. и б) $E_\gamma = 2.55$ МэВ

- Верхняя половина диаграммы характеризует энергию E_γ' фотонов, рассеянных под углом θ , нижняя - кинетическую энергию электронов отдачи (комптоновских электронов), вылетающих под углом φ , соответствующим θ
- Значения энергий пропорциональны длинам соответствующих радиус-векторов. В соответствии с законом сохранения энергии сумма векторов верхней и нижней половины, отмеченных одинаковыми цифрами, равны радиусу полуокружности

Дифференциальное сечение комптоновского рассеяния, может быть найдено по формуле Клейна-Нишиньт-Тамма,

$$\frac{d\sigma_k}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \left(\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \right)^2 \left(\frac{E_\gamma}{E'_\gamma} + \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} - \sin^2 \theta \right) Z,$$

где $r_0 = e^2 / mc^2$ – классический радиус электрона

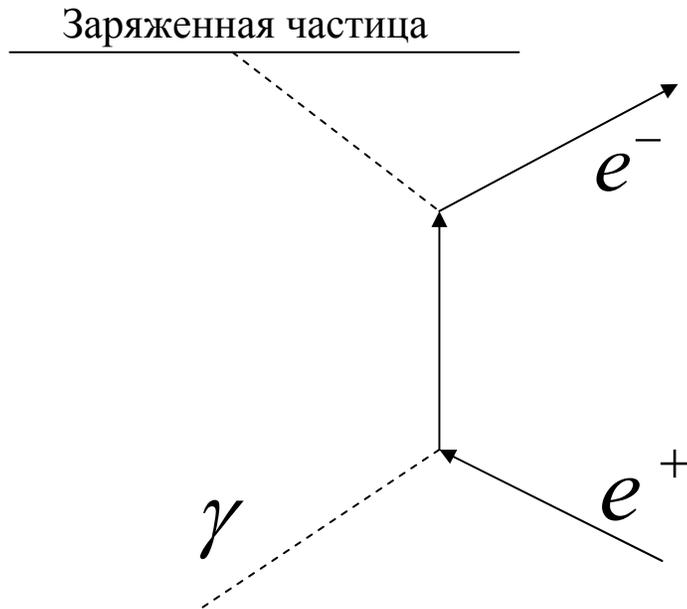
Z - заряд атома.

Полное сечение комптоновского рассеяния может быть получено интегрированием предыдущего соотношения по всему телесному углу:

$$\sigma_k = \pi \cdot r_0^2 \left\{ \left[1 - 2 \frac{(\gamma + 1)}{\gamma^2} \right] \ln(2\gamma + 1) + \frac{1}{2} + \frac{4}{\gamma} - \frac{1}{2} (2\gamma + 1)^2 \right\} \frac{Z}{\gamma}.$$

Комптоновское рассеяние преобладает в диапазоне энергий $0.6 \text{ МэВ} < E_\gamma < 5 \text{ МэВ}$ для Рb и $0.06 \text{ МэВ} < E_\gamma < 15 \text{ МэВ}$ для Al.

Образование электрон-позитрон пар



Процесс образования пар, может происходить только при энергиях фотонов, превышающих суммарную энергию покоя электрона и позитрона, т.е. при

$$E_{\gamma} > 2m_0c^2$$

Процесс может идти в поле ядра, в поле электрона, при взаимодействии двух фотонов и при соударении двух электронов.

Сечение образования электрон-позитронных пар,

$$\sigma_{\Pi} \sim Z^2 \ln E_{\gamma}$$

$$E_{\gamma} = 2m_e c^2 + E_{e^-} + E_{e^+}$$

•В этом случае образования электрон-позитронных пар энергия первичного фотона преобразуется в кинетическую энергию электрона и позитрона и в энергию аннигиляции.

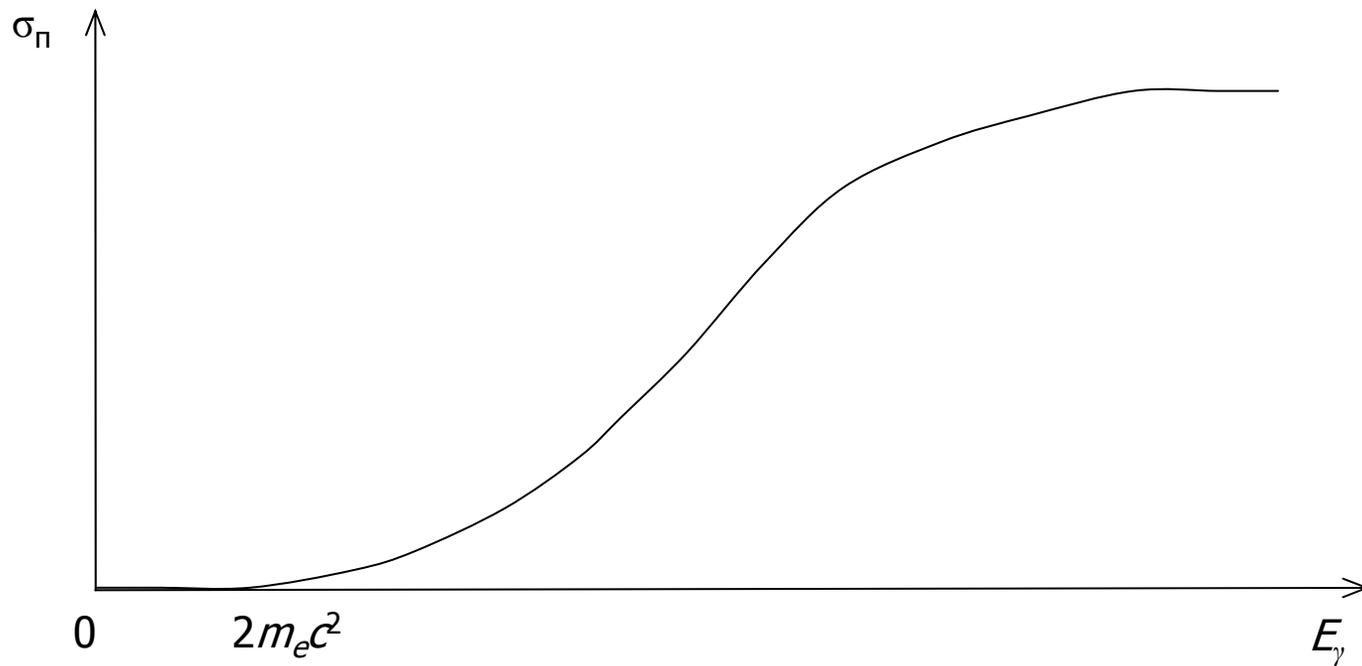


Рис.3. Зависимость сечения образования пар от энергии гамма-излучения

* В начале сечение образования пар растет очень быстро, затем рост замедляется и при очень большой энергии

$$\left(E_\gamma \gg 137 m c^2 Z^{1/3} \right)$$

достигает постоянного значения, зависящего от атомного номера материала.

Полный коэффициент ослабления гамма-излучения в веществе

Полное микроскопическое сечение взаимодействия γ -излучения с веществом,

$$\sigma = \sigma_{\phi} + \sigma_{\text{К}} + \sigma_{\text{П}}$$

Макроскопические сечения взаимодействия излучения с веществом получаются из микроскопических (см²/атом) умножением на число ядер в единице объема N . Поэтому

1) для фотоэффекта

$$\mu_{\phi} = \sigma_{\phi} N$$

2) для комптоновского взаимодействия

$$\mu_{\text{К}} = \sigma_{\text{К}} N$$

3) для образования пар

$$\mu_{\text{П}} = \sigma_{\text{П}} N$$

•Макроскопические сечения μ_{ϕ} , $\mu_{\text{К}}$ и $\mu_{\text{П}}$ называются *линейными коэффициентами фотоэффекта комптоновского взаимодействия и образования пар* соответственно.

Сумму этих парциальных макроскопических сечений называют линейным коэффициентом ослабления γ -излучения в веществе:

$$\mu = \mu_{\phi} + \mu_{\text{К}} + \mu_{\text{П}}$$

Три коэффициента зависят от Z атомов вещества и энергии гамма-излучения,

$$\mu_{\phi} \sim (\rho/A)[Z/(E_{\gamma})^{7/2}]$$

$$\mu_{\text{К}} \sim (\rho/A)(Z/E_{\gamma})$$

$$\mu_{\text{П}} \sim (\rho/A)(Z^2 \ln E_{\gamma})$$

Закон ослабления потока гамма-излучения при прохождении через вещество

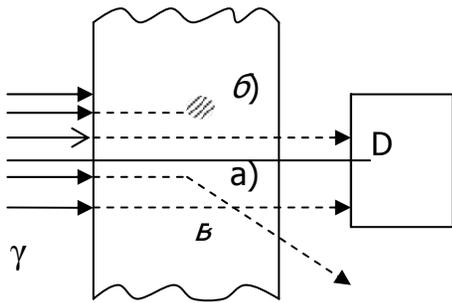


Рис. 4.

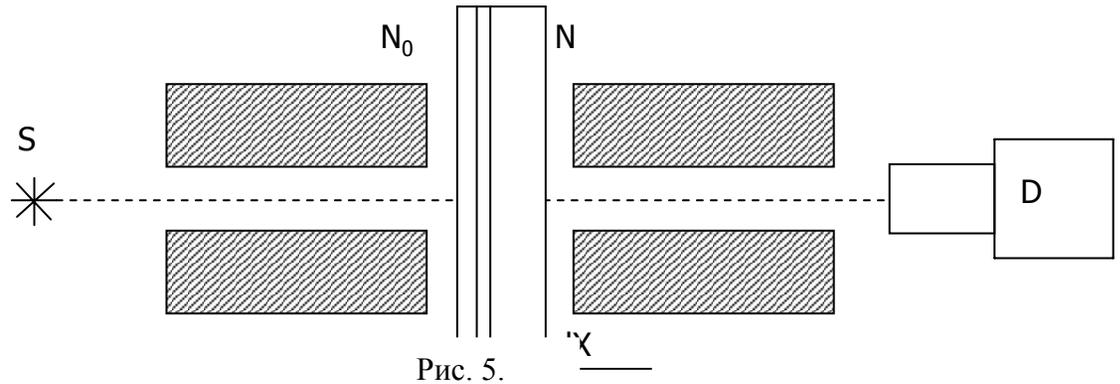


Рис. 5.

экспоненциальный закон ослабления гамма-излучения веществом для узкого пучка:

$$N(x) = N_0 e^{-\mu x}$$

где x - Толщина слоя, поглощающего вещества
 μ - линейный коэффициент ослабления

Список литературы

- (1) Частицы и атомные ядра. Практикум./ О. И. Василенко, В. К. Гришин, Н. Г. Гончарова, Ф. А. Живаписцев, Б. С. Ишханов, И. М. Капитонов и др. 5-е изд. М. 2004.
- (2) Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика: Учебник для вузов. В 2-х т. Т. I. Физика атомного ядра- 4-е изд., перераб. и доп.- М.: Энергоатомиздат, 1983.- 616 с.
- (3) <http://nuclphys.sinp.msu.ru/>
- (4) Лабораторная работа № 31 (спектрометр гамма-излучения с детектором из сверхчистого германия)

Конец

