

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

Физический факультет

Кафедра Общей ядерной физики

Москва 2005 г.



Детектирование γ -квантов с помощью Ge-детектора

Аспирант : Чжо Чжо Тун

Руководитель : Профессор Б.С.Ишханов

СПЕКТРОМЕТР γ -ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЕТЕКТОРОМ ИЗ СВЕРХЧИСТОГО ГЕРМАНИЯ

Экспериментальное исследование энергетического спектра γ -излучения, возникающего при распаде возбужденных состояний ядра, является одним из основных методов изучения структуры атомных ядер.

В ядерной физике к настоящему времени разработан большой арсенал приборов, служащих для измерения спектров γ -излучения.

сцинтилляционные спектрометры

**высокую эффективность регистрации γ -квантов (до 100 %),
но низкое энергетическое разрешение ($> 10\%$)**

Энергетическое разрешение германиевых детекторов при регистрации γ -квантов достигает 0.1%, что в десятки раз выше, чем у сцинтилляционных детекторов.

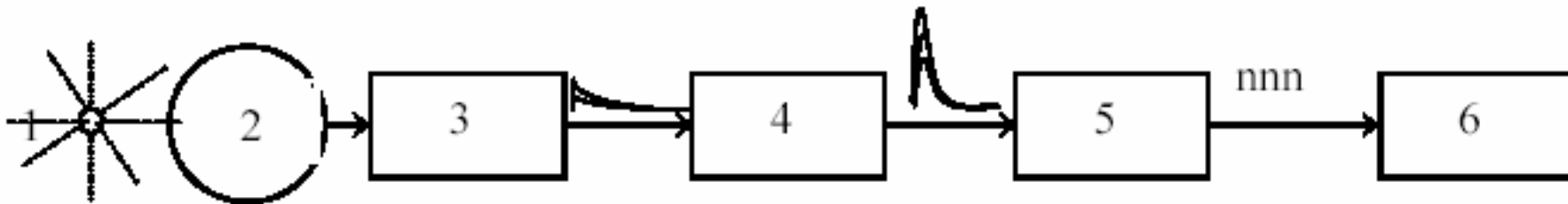


Рис. 6. Блок-схема спектрометра

1 – источник γ -излучений, 2 – детектор γ -излучений из сверхчистого германия (HPGe-детектор), 3 – предварительный усилитель (предусилитель), 4 – основной усилитель (ОУ), 5 – амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП), 6 – компьютер.

* Основу спектрометра составляет HPGe-детектор ядерных излучений, использующий взаимодействие γ -квантов с веществом. В результате такого взаимодействия на выходе детектора возникают электрические заряды, величина которых пропорциональна энергии, потерянной квантом в детекторе.

предварительный усилитель (ПУ) - Для преобразования величины заряда в пропорциональную амплитуду напряжения.

основной усилитель (ОУ) - для формирования сигналов по длительности и подавления шумов

Амплитудные распределения регистрируются и обрабатываются с помощью цифровой электронной техники, в частности, компьютеров.

Основное отличие детекторов γ -излучения от детекторов заряженных частиц

- * заряженная частица, попавшая в чувствительный объем детектора, регистрируется как правило с вероятностью, равной единице
- * вероятность регистрации γ -квантов значительно меньше единицы.

Эта вероятность существенно зависит от атомного номера рабочего вещества детектора, от объема чувствительной области и энергия γ -квантов.

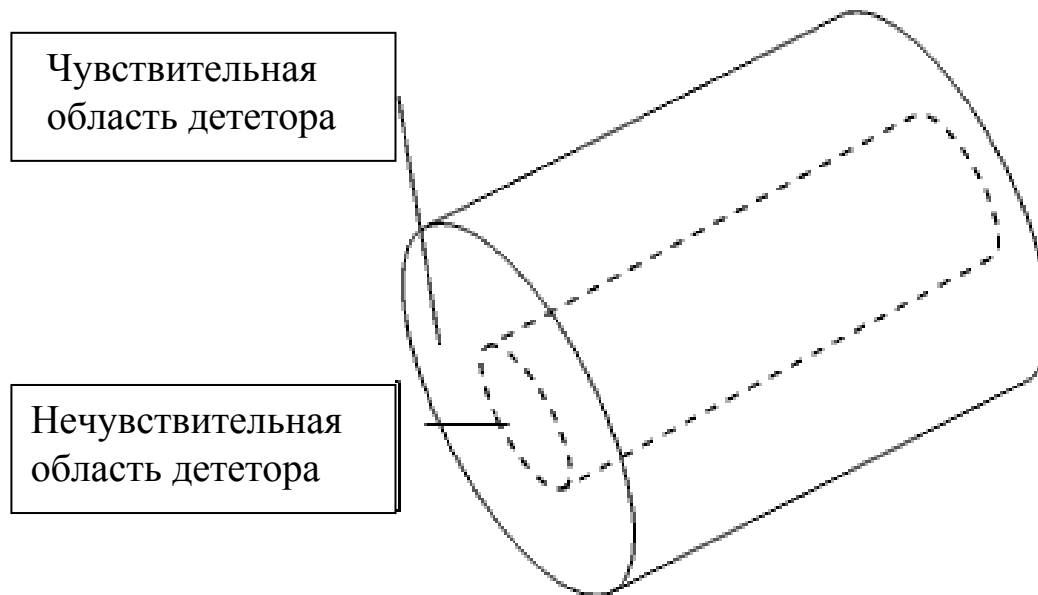


Рис.7

- * Детектор γ -излучения из сверхчистого германия (HPGe-детектор) представляет собой полупроводниковый диод с p-n переходом, изготовленный, для увеличения объема чувствительной области, в коаксиальной (цилиндрической) геометрии.
- * Коаксиальная геометрия детектора позволяет значительно повысить эффективность регистрации γ -квантов по сравнению с детектором в планарной (плоскостной) геометрии.

- Выбор германия в качестве исходного материала для изготовления детектора, несмотря на бóльшие трудности в изготовлении, связан с тем, что сечение взаимодействия γ -квантов сильно зависит от атомного номера вещества Z .

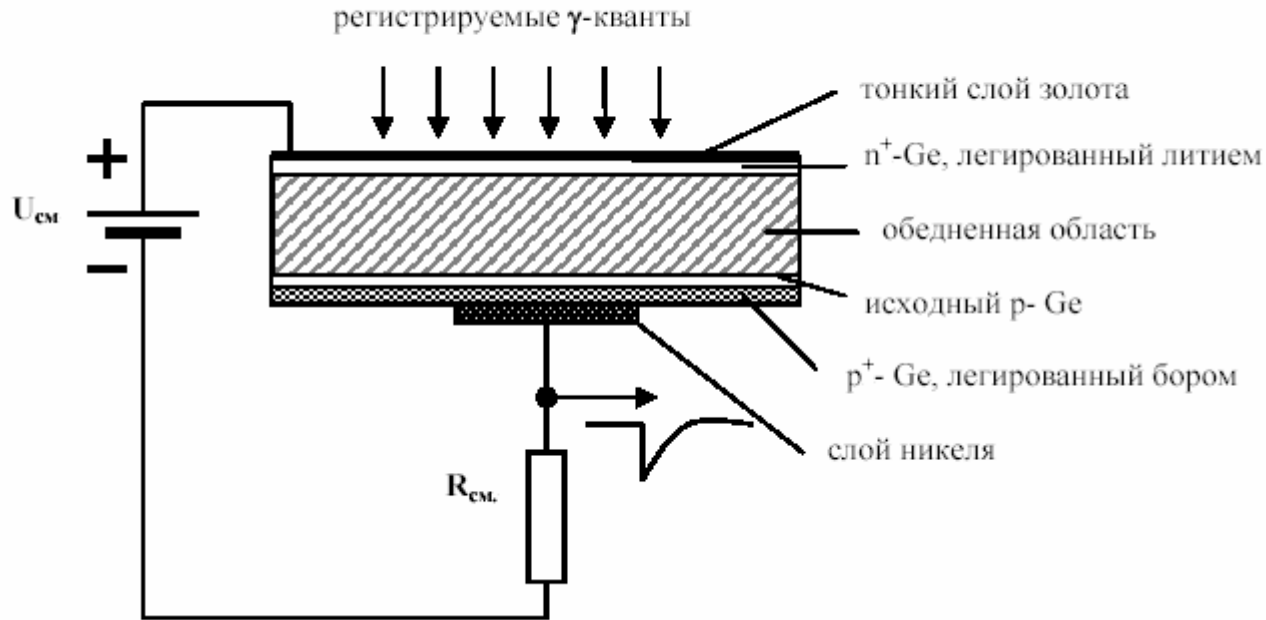


Рис. 8. Структура HPGe-детектора

- Наиболее распространенными материалами, из которых изготавливаются полупроводниковые детекторы, в настоящее время являются кремний и германий. Для регистрации γ -квантов обычно используются детекторы из германия.

* Больше значение Z у германия ($Z(\text{Ge}) = 32$, а $Z(\text{Si}) = 14$) и определяет выбор этого материала, поскольку обеспечивает более высокую эффективность регистрации γ -квантов детектором.

Эффективность спектрометра

Эффективность ε определяет вероятность получения на спектрометре сигнала при попадании частицы с чувствительный объем детектора.

Эффективность спектрометра определяется как отношение числа зарегистрированных импульсов $N_{рег}$ к числу попадающих в чувствительный объём детектора фотонов $N_{дет}$ в определенный интервал времени.

$$\varepsilon = \frac{N_{рег}}{N_{дет}} \quad где \quad N_{дет} = Ak\Omega;$$

A - число фотонов, испускаемых источником изотропно по всем направлениям

k - коэффициент, учитывающий поглощение и рассеяние излучения на пути источник - чувствительный объем детектора (коэффициент k равен отношению числа частиц, попавших в чувствительный объем детектора, к числу частиц, испущенных в его направлении)

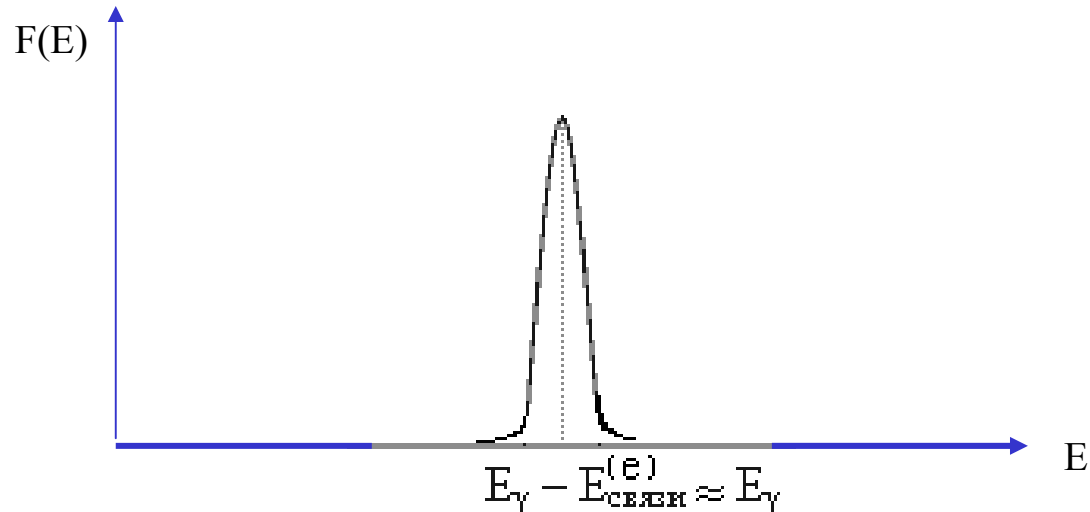
$\Omega = \omega/(4\pi)$ - относительный телесный угол,

$\omega = S_{дет}/R^2$ – телесный угол, под которым виден детектор из источника

Функция отклика детектора

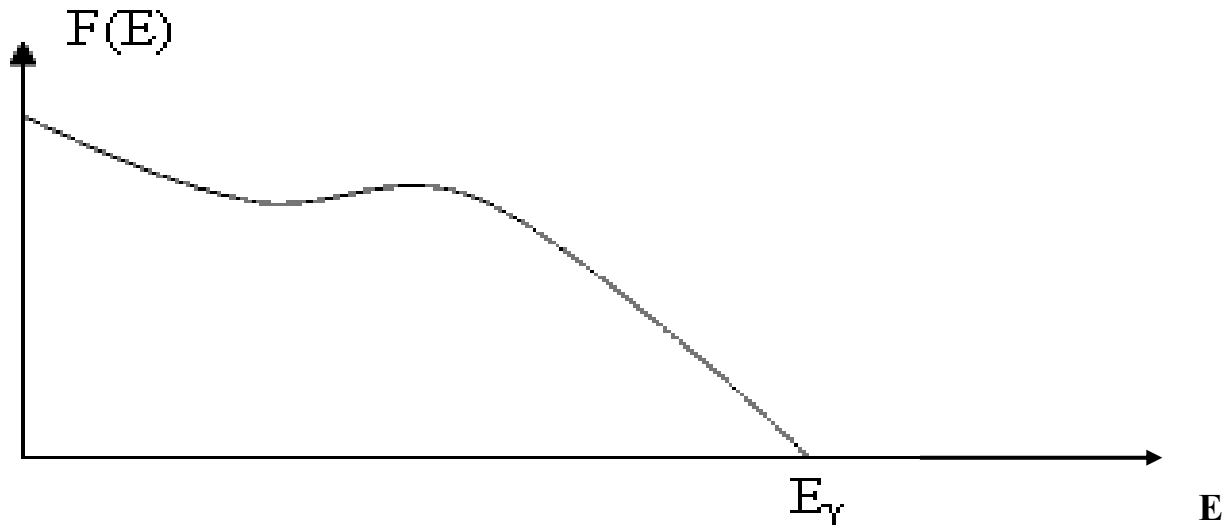
* Функция отклика – одна из важнейших характеристик любого спектрометра. Она описывает амплитудное распределение импульсов на выходе детектора для монохроматического γ -излучения, падающего на детектор.

* Фотоэффект в конечном счете дает в амплитудном распределении пик, положение максимума которого соответствует энергии γ -квантов.



• Гамма-кванты, испытавшие комптоновское рассеяние, образуют в веществе детектора электроны с энергиями от 0 до E_{max} , где

$$E_{max} = E_{\gamma} \left(1 - \frac{m_e c^2}{2E_{\gamma}} \right)$$



Величина E_{max} в зависимости от E_{γ} принимает значение на $150 \div 250$ кэВ меньше E_{γ} .

Таким образом, функция отклика для энергий E_{γ} , меньших порога образования пар, состоит из плавного распределения и пика, часто называемого фотопиком.

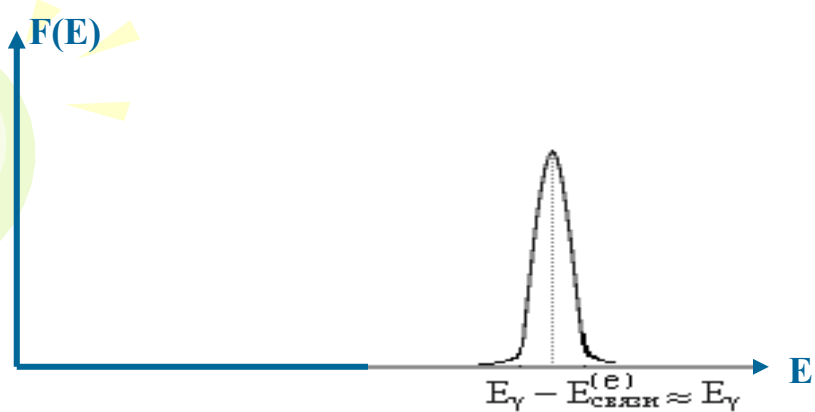


Рис (а) Фотоэффект с функцией отклика

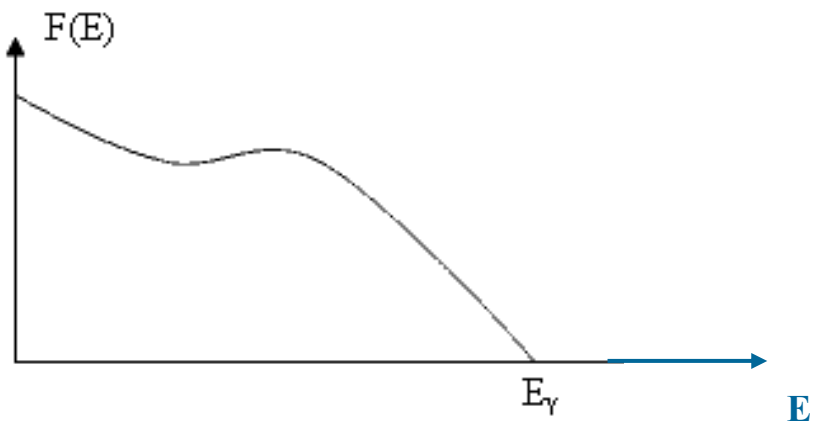


Рис (б) Комптон-эффект с функцией отклика

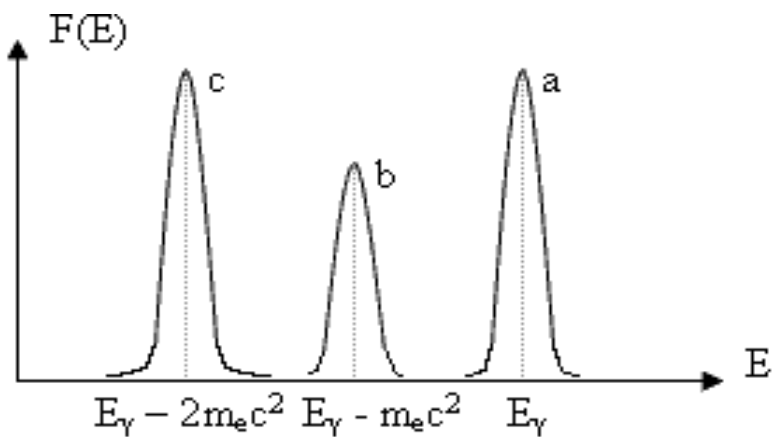
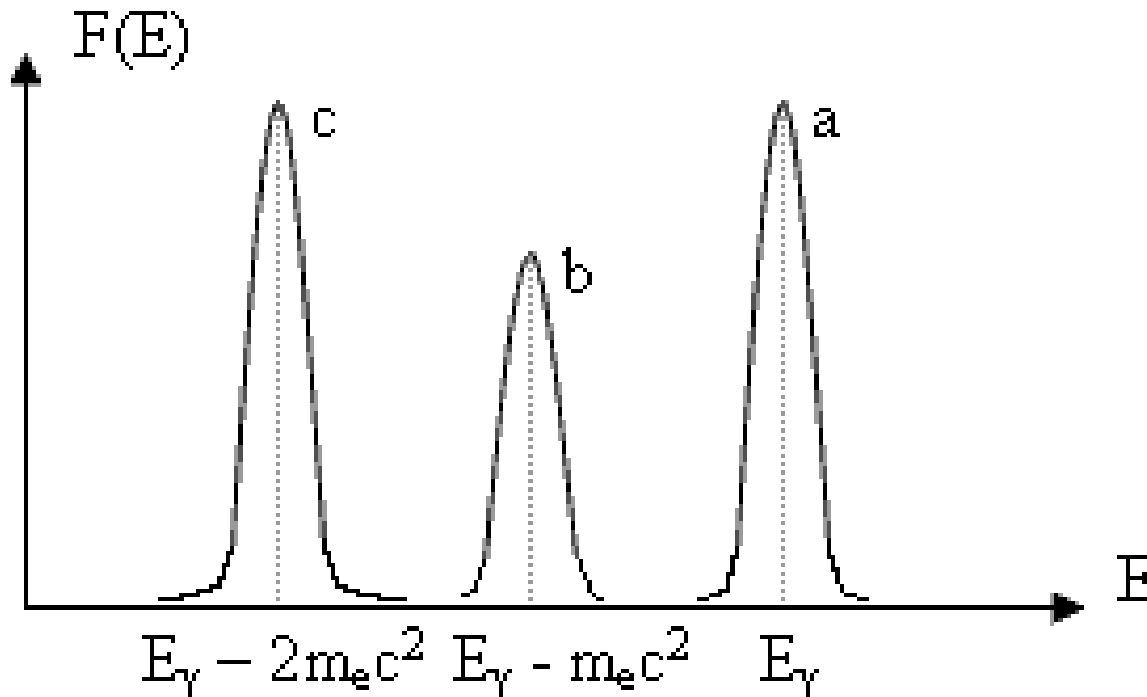


Рис (с) Эффект рождения e^+e^- -пар с функцией отклика

- При энергиях γ -квантов, больших энергии порога образования пар (1022 кэВ), функция отклика дополнительно будет иметь еще два пика, наличие которых связано с вылетом из детектора одного или двух аннигиляционных квантов.

- * Они находятся при меньших, чем фотопик, амплитудах на расстояниях, соответствующих энергиям $m_e c^2$ (511 кэВ) и $2m_e c^2$ (1022 кэВ) до фотопика.



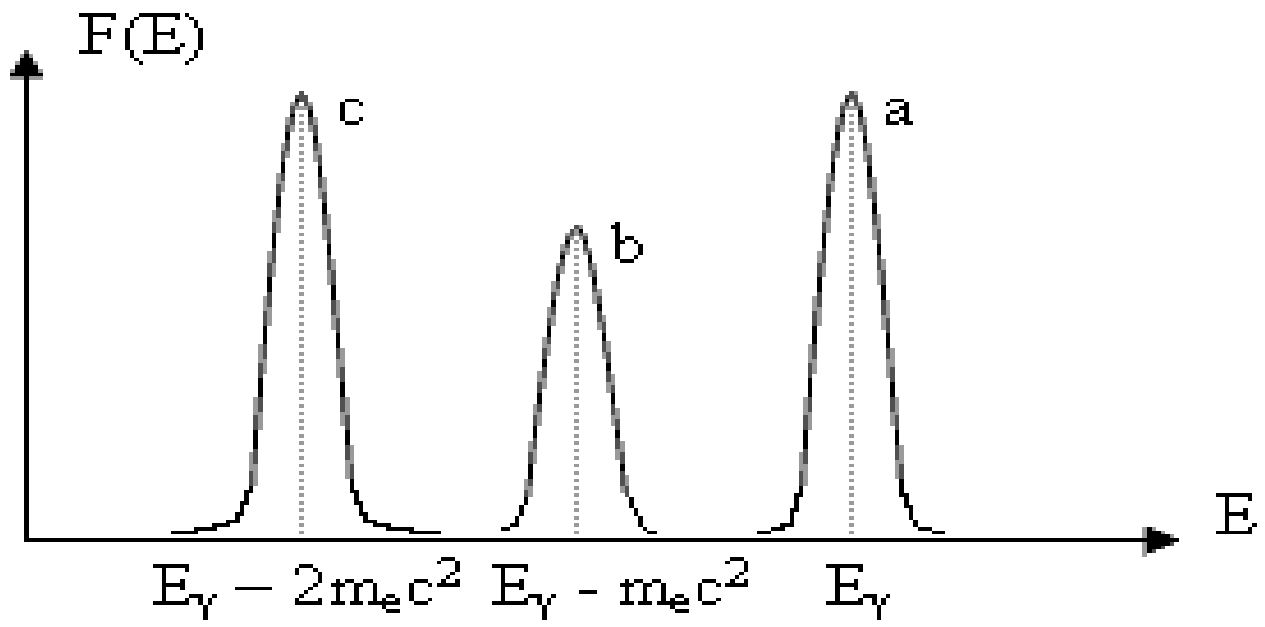
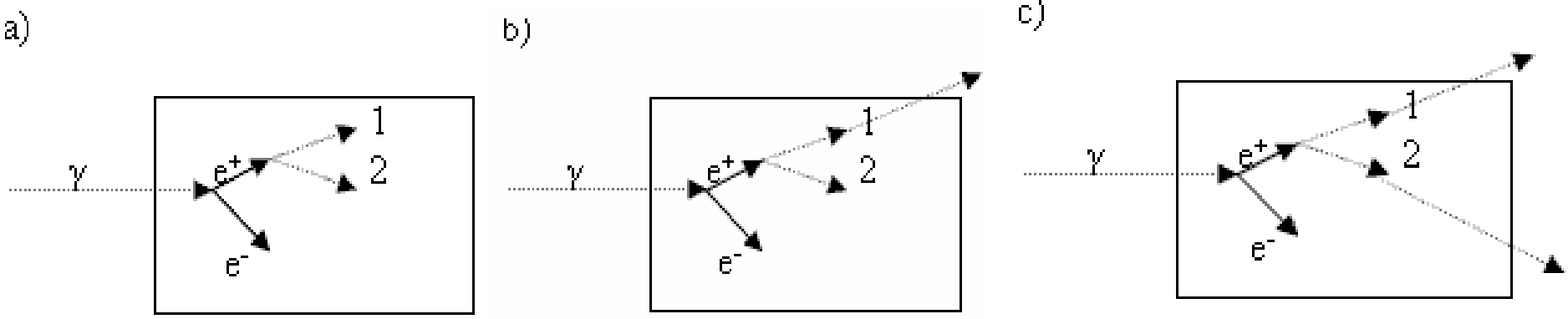
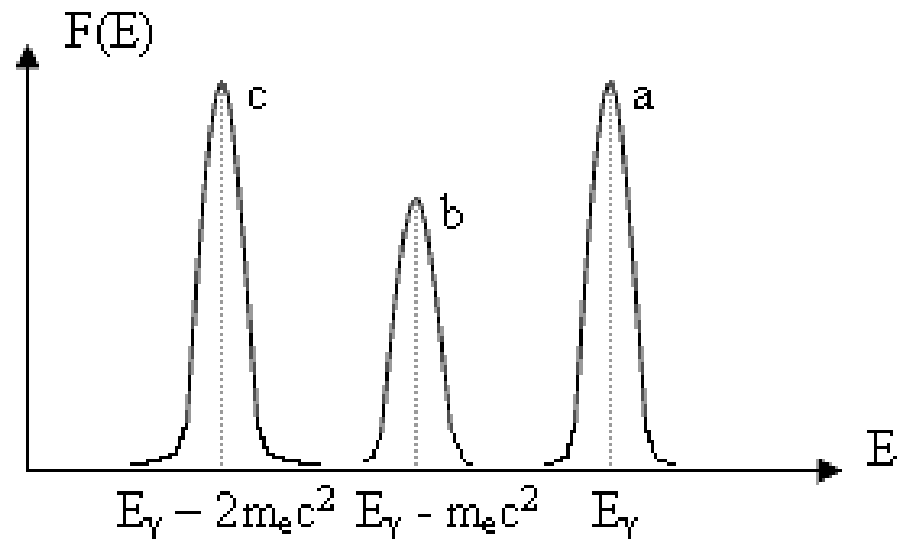


Рис Эффект рождения e^+e^- пар с функцией отклика





a)

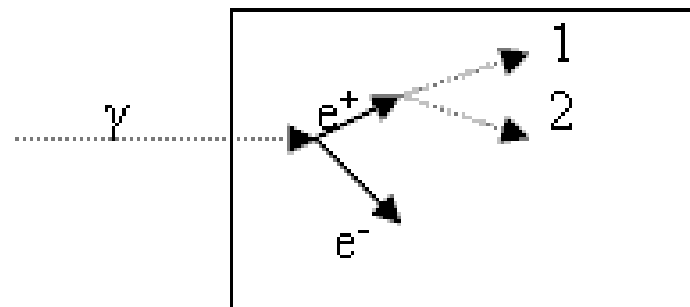
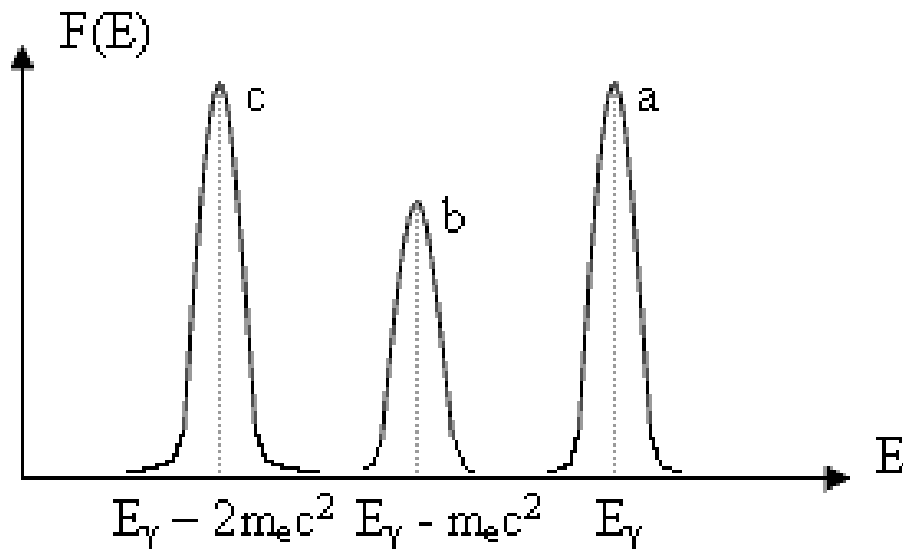


Рис Эффект рождения e^+e^- пар с функцией отклика

* Позитрон e^+ в детекторе быстро тормозится и затем сталкивается с одним из электронов и аннигилирует с образованием двух аннигиляционных фотонов 1 и 2 с энергиями по 0.511 МэВ, причем оба этих фотона поглощаются в детекторе и он выдает сигнал с фиксированной амплитудой, соответствующей энергии E_γ : $A = E_\gamma$



b)

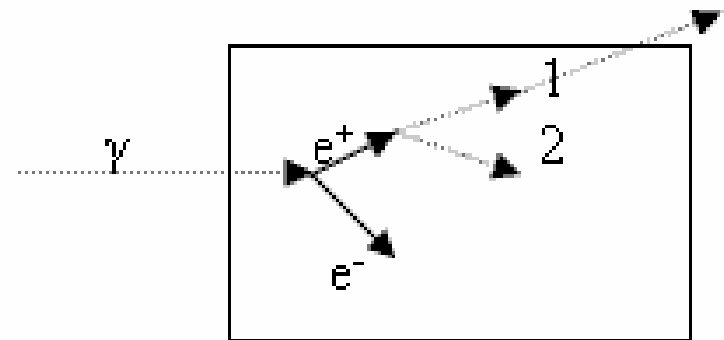


Рис Эффект рождения e^+e^- пар с функцией отклика

- Один из аннигиляционных фотонов выходит из детектора без регистрации (ускальзает- escape). Его энергия вычитается из E_γ и амплитуда $A = E_\gamma - 0.511 \text{ МэВ}$.

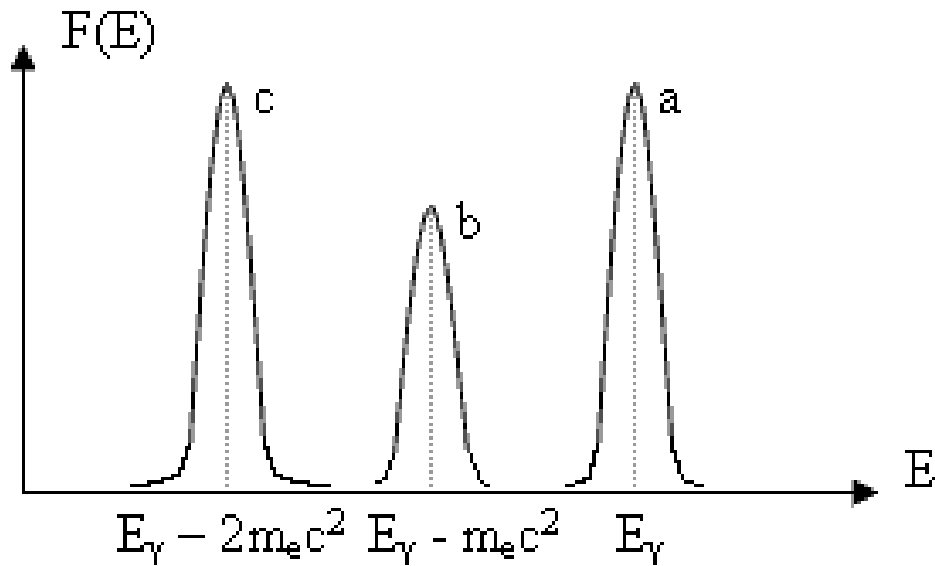
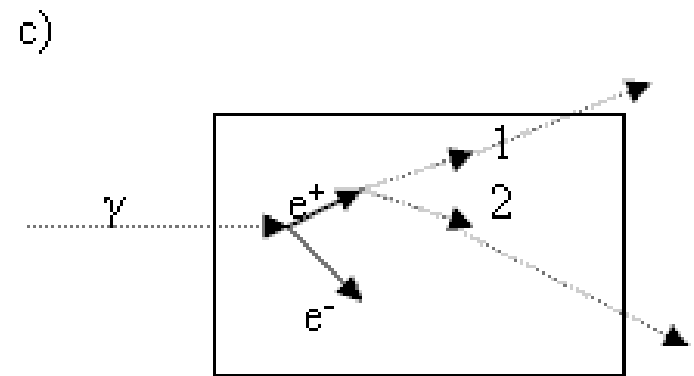
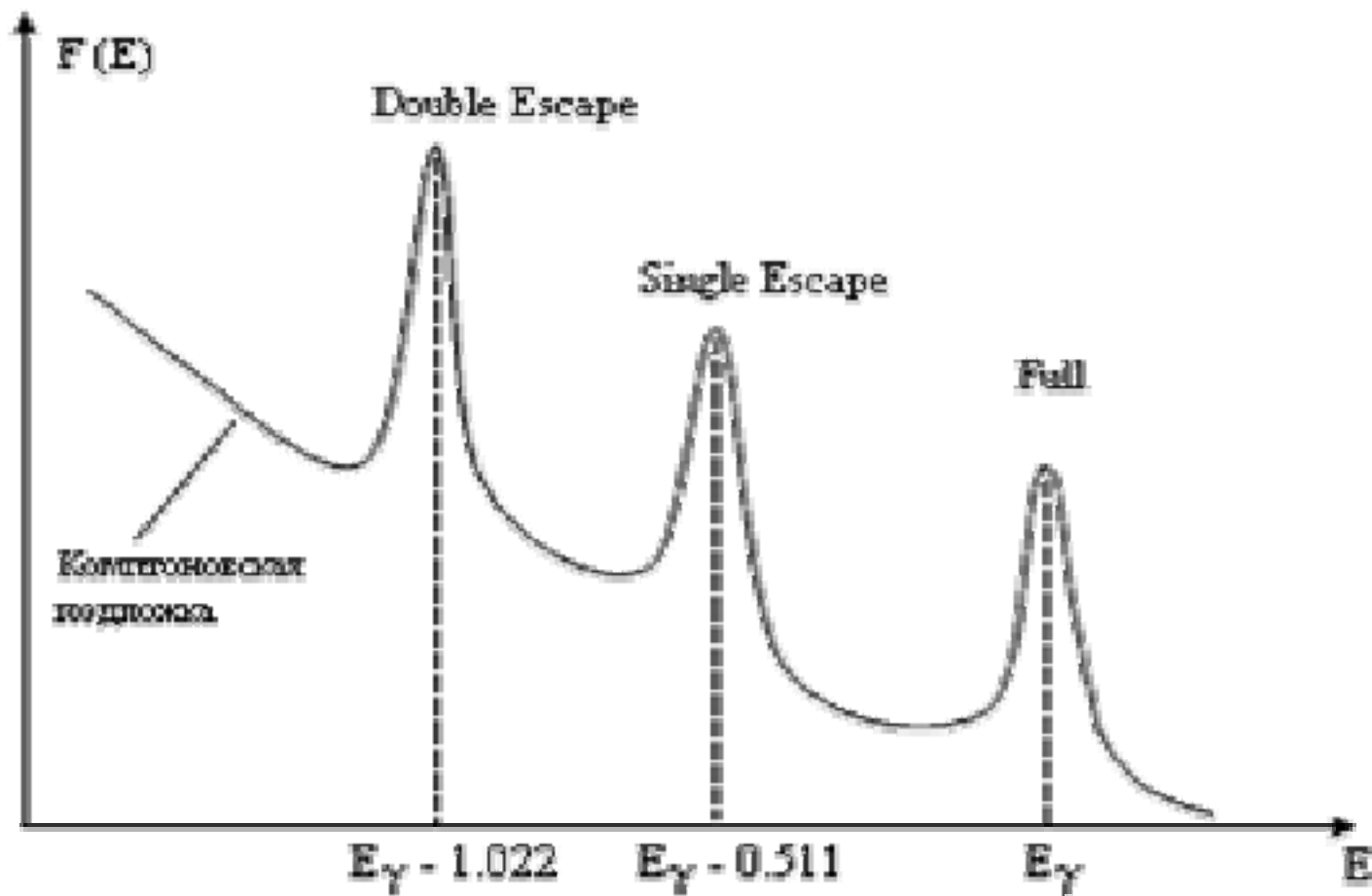


Рис Эффект рождения e^+e^- пар с функцией отклика

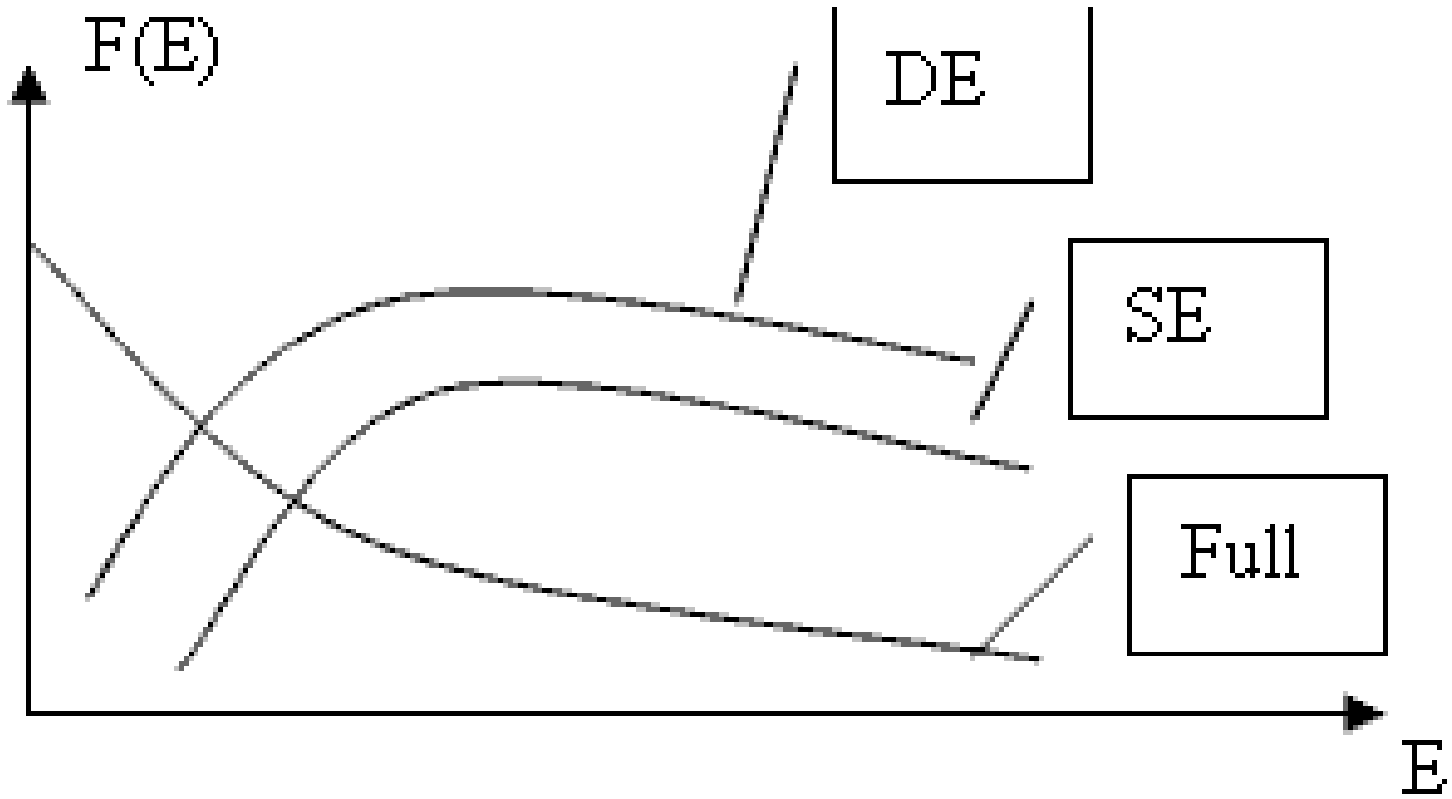


Оба аннигиляционных фотона ускользают из области детектора и $A = E_\gamma - 1.022 \text{ МэВ}$.

Пик полного поглощения при рождении пар сливается с фотопиком и полная функция отклика детектора имеет примерно следующий вид



Детектор имеет разную эффективность к трем разным γ -пикам



Энергетическое разрешение Ge - детекторов

- Энергетическое разрешение определяет, насколько близко могут находиться в спектре две линии, которые спектрометр позволяет идентифицировать как разные.

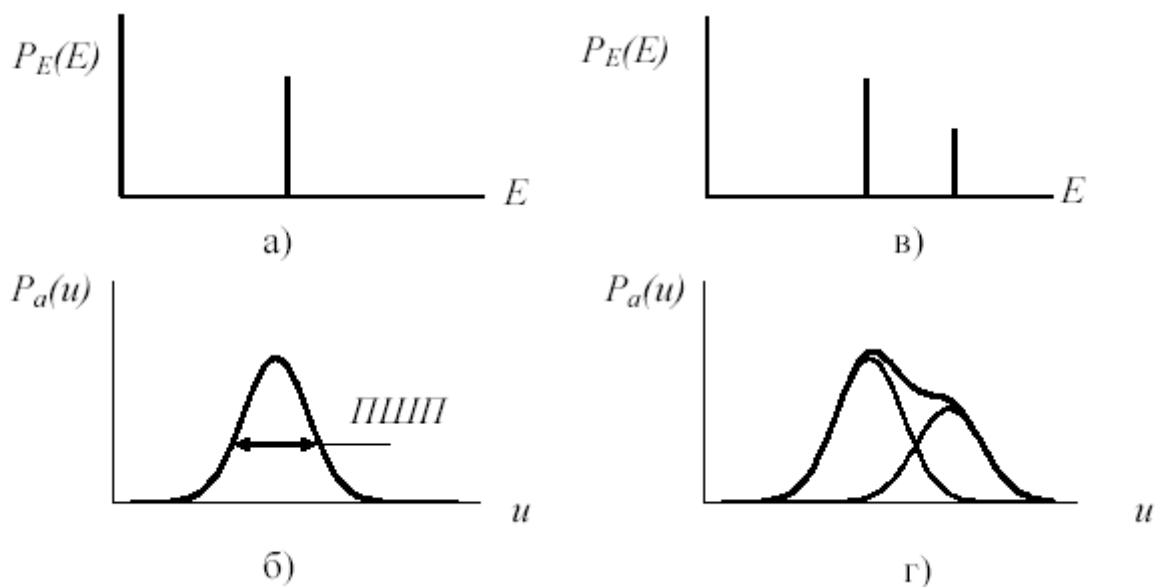


Рис.. Энергетический спектр и амплитудное распределение:

а) монохромный спектр (синглет), б) амплитудное распределение одиночной линии, в) две близкие линии (дублет), г) амплитудное распределение дублета.

* пики амплитудного распределения в этом случае частично перекрываются и идентификация линий по ним затруднена, а иногда и невозможна.



Энергетическим разрешением детектора называют отношение ширины ΔE на полувысоте распределения к энергии E , соответствующей максимуму распределения.

$$\eta = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100 \%$$

Обычно энергетическое разрешение детекторов γ -квантов определяют по γ -линиям радиоактивного источника



На образование одной пары "электрон-дырка" в германии требуется порядка 3 эВ (в цинтилляторе около 350 эВ, в ионизационной камере около 35 эВ).

Энергетическое разрешение детектора зависит от флуктуаций в числе N пар носителей зарядов.

Амплитуда сигнала пропорциональна N . Распределение числа носителей - это распределение Пуассона. Его дисперсия D

определяется соотношением

$$D = \overline{N} \approx N$$

Откуда

$$\Delta E / E = \Delta N / N = D^{1/2} / N \approx N^{1/2} / N = N^{-1/2}$$

N (числа носителей) для германиевого детектора в случае $E_\gamma = 1.2-1.3$ МэВ (т.е. для линий ^{60}Co).

$$N(\text{Co}) = 1.2 \cdot 10^6 \text{ эВ} / 3 \text{ эВ} = 4 \cdot 10^5$$

$$\Delta E / E = \Delta N / N = N(\text{Co})^{-1/2} \approx (4 \cdot 10^5)^{-1/2} \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$$

Таким образом

$$\Delta E_{\gamma} = (1.2 - 1.3 \text{ МэВ}) \cdot 1.5 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ МэВ}$$

Предельное разрешение Ge - спектрометра по крайне мере в 3 раза выше, чем у лучшей ионизационной камеры и в 10 раз выше, чем у лучшего сцинтилляционного детектора (на практике это различие достигает нескольких десятков).

Временные характеристики спектрометра

Мертвое время

импульсы распределены во времени статистически, то при любом быстродействии устройств возможен приход очередного импульса в тот момент, когда происходит анализ предыдущего. В этом случае может произойти искажение результата. Чтобы избежать этого, после поступления импульса вход АЦП (амплитудно-цифрового преобразователя) закрывается на время, необходимое для обработки сигнала. Это время называется **мертвым**.

Оно может иметь значение от микросекунд до десятков миллисекунд.



живое время

Время, в течение которого амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП) в полной готовности ждет прихода очередного импульса, называется **ЖИВЫМ** временем.



Список литературы

- (1) Частицы и атомные ядра. Практиум./ 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