

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
кафедра физики элементарных частиц

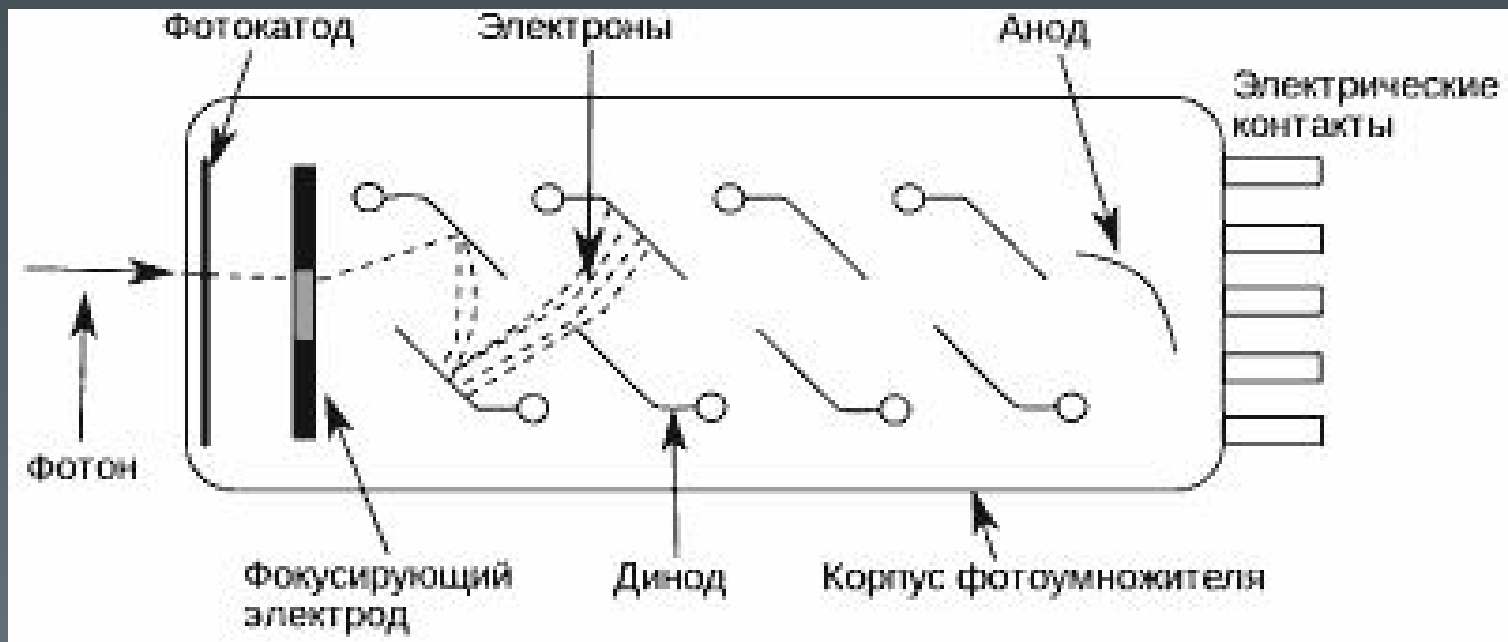
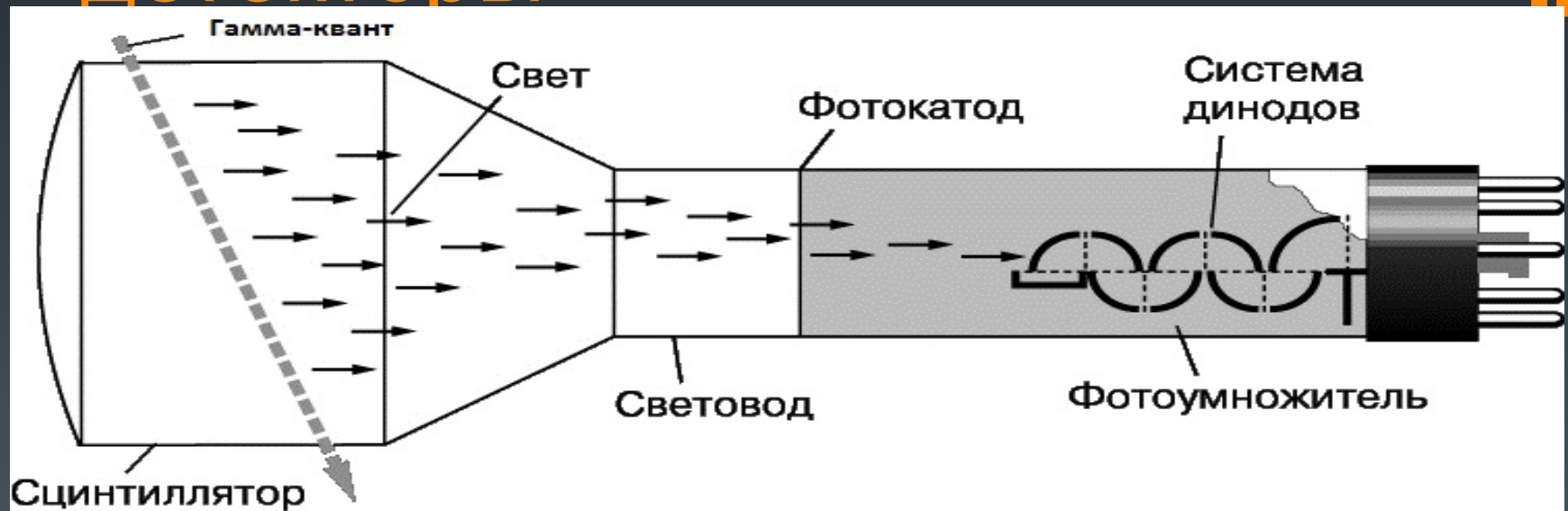
Гамма-спектроскопия

Автор: Амвросов Вениамин Владимирович, 203 группа физического факультета МГУ, 2015-2016 г.
Научный руководитель: Глав. н.с. ЛФВЭ Никитин Владимир Алексеевич

Список литературы

- 1) Ляпидевский, В.К. Методы детектирования излучений. М.: Энергоатомиздат, 1987.
- 2) Акимов, Ю.К. Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006.
- 3) Акимов Ю.К. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Дубна: ОИЯИ, 2009.
- 4) Гамма-спектроскопия // [Электронный ресурс] - Ядерная физика в Интернете. Режим доступа - <http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e039.htm>, свободный. Язык - русс.
- 5) Излучение Вавилова-Черенкова // [Электронный ресурс] - сайт Томского политехнического института.
- 6)) Гамма-спектроскопия // [Электронный ресурс] - Ядерная физика в Интернете. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/calorim/index.html>,
- 7) Денисов, С.П. Излучение «сверхсветовых частиц» (эффект Черенкова) // Соросовский образовательный журнал- 1996. - №26 – стр. 89-97

Сцинтилляционные детекторы



Фотоэлектронный умножитель



Основные характеристики

Сцинтилляционный детектор:

- Конверсионная эффективность $\eta = \frac{L}{E}$ - доля энергии фотона, перешедшая в свечение
- Оптическая эффективность ω – доля собранных на фотокатод квантов света
- Квантовая эффективность QE – вероятность фотоэффекта
- Коэффициент сбора μ - отношение числа электронов, достигших первого динода, к числу эмитированных электронов фотокатодом

С учетом этой поправки квантовая эффективность $\varphi = QE * \mu$

- Коэффициент размножения M – отношение числа электронов на выходе из сцинтиллятора к числу эмитированных фотокатодом электронов. Его можно вычислить следующим образом:

$$M = \delta_1 \delta_2 \dots \delta_n,$$

δ_i – коэффициент вторичной эмиссии i -го динода

Заряд, образовавшийся на выходе из ФЭУ:

$$Q = \varphi * \omega * M * \eta * e * E/E_0$$

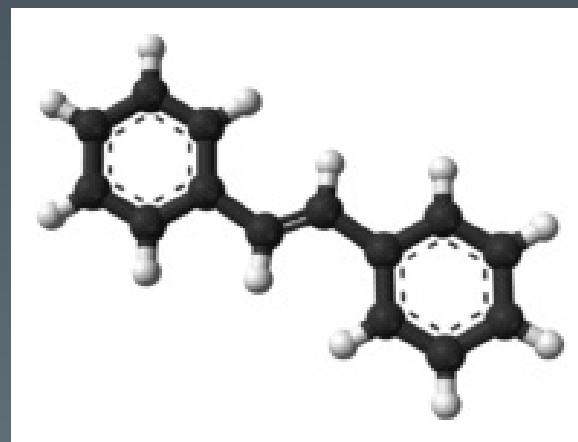
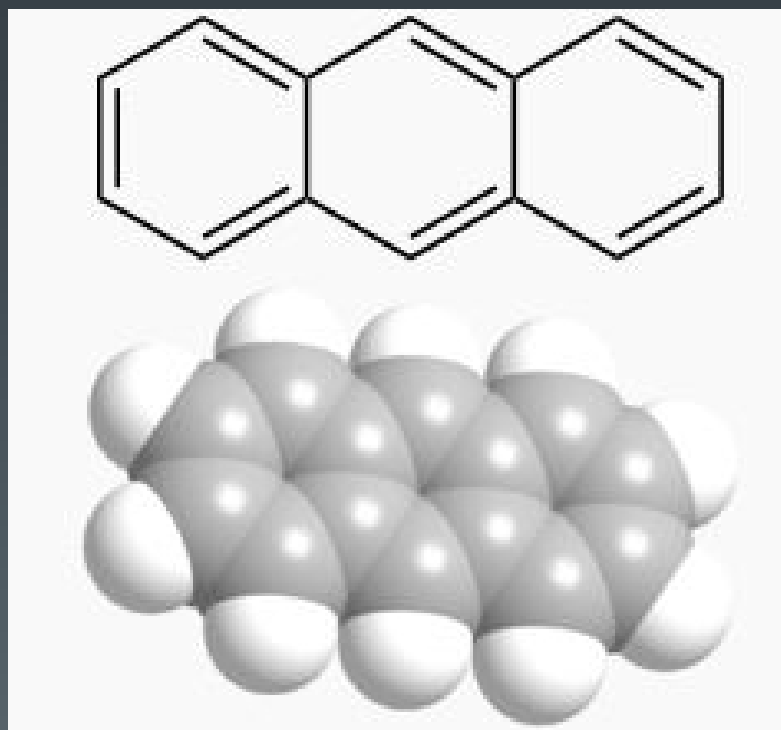
E_0 – средняя энергия фотонов, e – заряд электрона.

Сцинтилляционный процесс

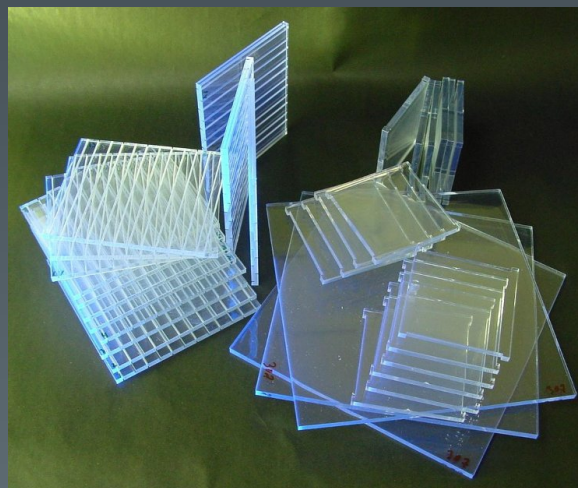
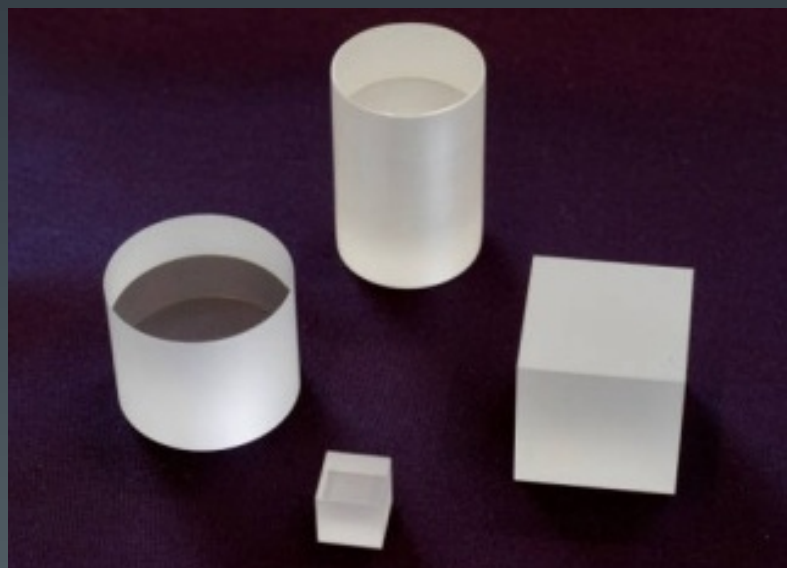
Три этапа:

- Возбуждение гамма-квантами частиц основного вещества, находящегося в каком-либо агрегатном состоянии (генерационный этап)
- Перенос энергии, потерянной гамма-квантом в объеме вещества, к центрам свечения (миграционный этап)
- Возбуждение и высвечивание центра свечения

Органические сцинтилляторы

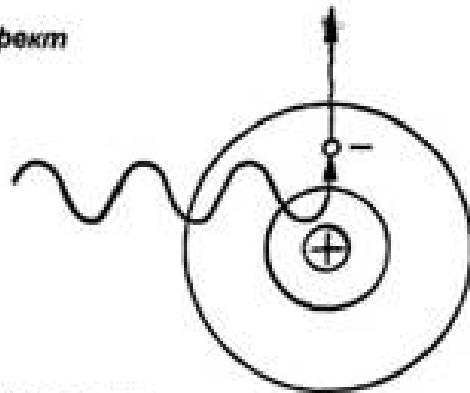


Неорганические сцинтилляторы

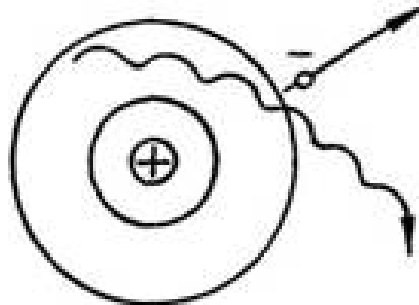


Взаимодействие γ -квантов с веществом

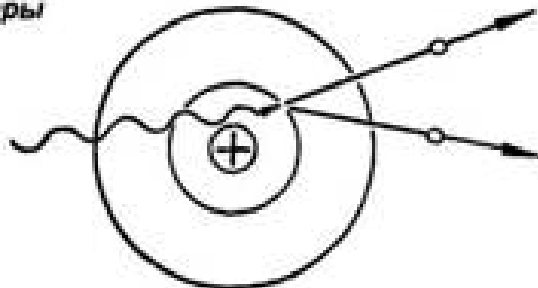
Фотоэффект



Эффект Комптона



Образование электронно-позитронной пары



Фотоэффект:

$$h\nu = I + K,$$

где I – энергия ионизация атома, K –
где I – энергия ионизация атома, K –
кинетическая энергия электрона. K –
кинетическая энергия электрона.

Комптон-эффект:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\vartheta)$$

Комптон-эффект:

где $\lambda_c = \frac{h}{mc}$ – комптоновская длина

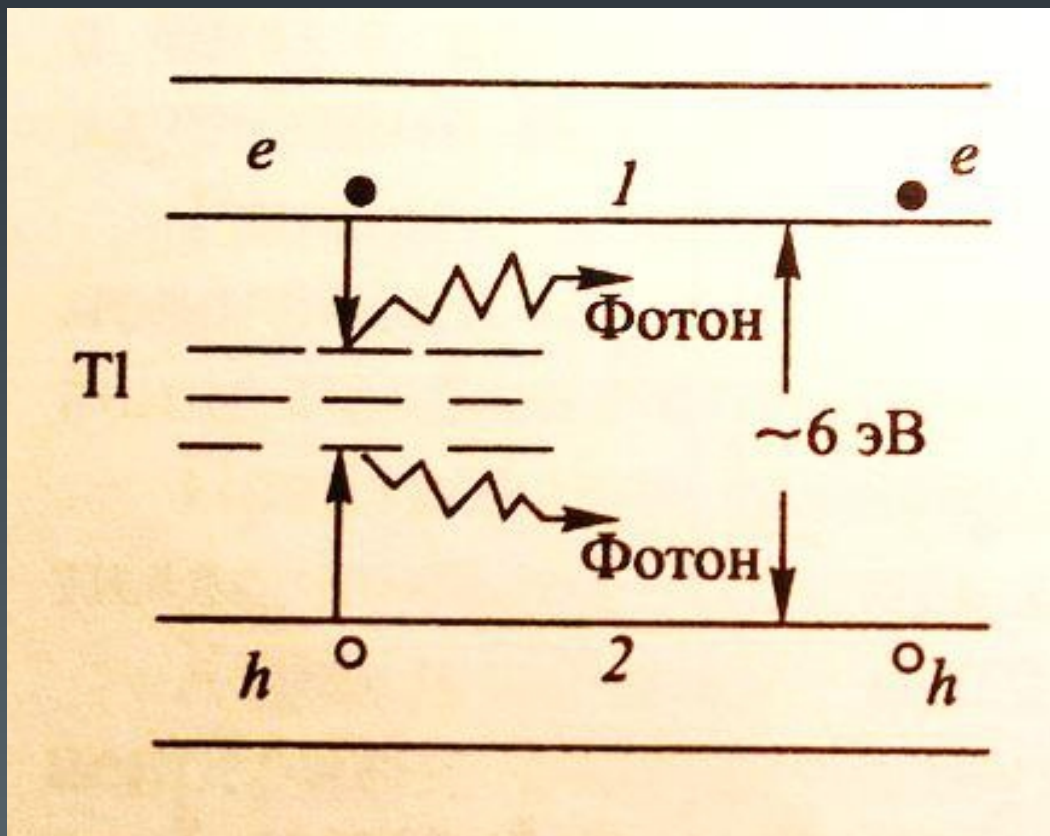
волны, ϑ – угол рассеяния фотона.

где λ_c – комптоновская длина волны, ϑ –
– угол рассеяния фотона.

Характеристики спектрометра

- Разрешающая способность R - это минимальная ширина спектральной линии, при которой детектор еще может разделить два различных пика в каком-либо спектре.
- Световыход — количество фотонов, излучаемых сцинтиллятором при поглощении определённого количества энергии.
- Время высвечивания сцинтиллятора – время, в течение которого энергия, переданная сцинтиллирующему веществу, преобразуется в световую вспышку.
- Удельный вес – отношение веса вещества к занимаемому им объему.

Детекторы, работающие на NaI(Tl)



Эффективный атомный номер NaI(Tl) $Z_{\text{эф}}=50$.

На рис. представлена зонная структура йодида натрия.

Ширина запрещенной зоны NaI ~ 6 эВ. Введенный в него

таллий имеет энергетические

уровни внутри этой запрещенной зоны.

Некоторые свойства NaI

Плюсы:

- Световой выход максимален при комнатной температуре и составляет $4 \cdot 10^4$ фотонов на МэВ
- Максимум спектра люминесценции – 415 нм, что хорошо соответствует спектральной чувствительности стандартных фотокатодов
- Максимум спектра люминесценции – 415 нм, что хорошо соответствует спектральной чувствительности стандартных фотокатодов

Минусы:

- Время высвечивания зависит от температуры

Минусы:

- Разрешающая способность ухудшается с увеличением размеров
- Время высвечивания зависит от температуры
- Гигроскопичность
- Разрешающая способность ухудшается с увеличением размеров
- Гигроскопичность

Таблица сцинтилляторов

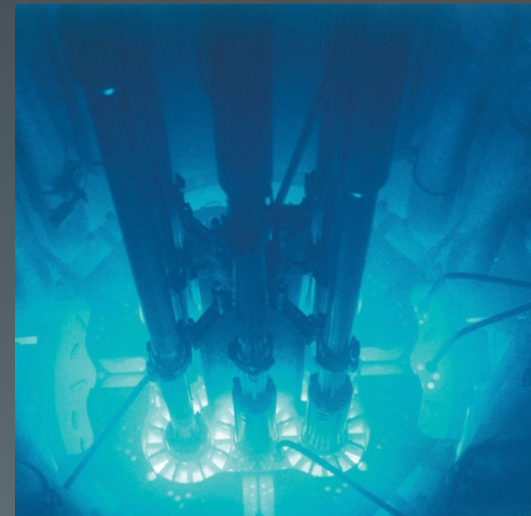
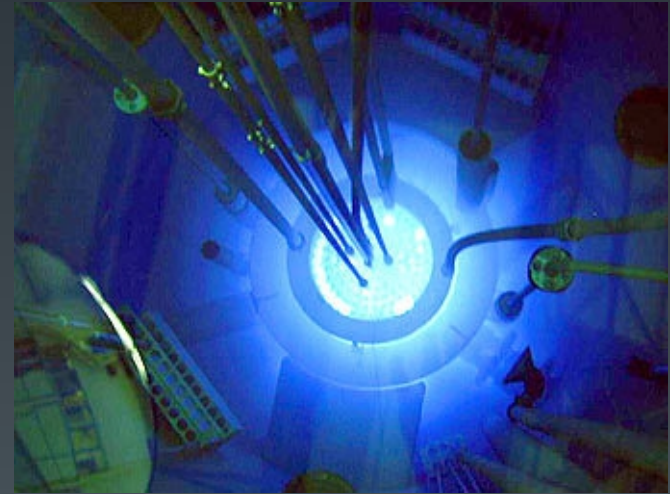
| Сцинтиллятор | Удельный вес | λ_{max} эмиссии [нм] | Световыход [фотон/МэВ] | Время высвечивания, мкс |
|--------------------|--------------|---|------------------------|-------------------------|
| NaI(Tl) | 3.67 | 415 | 38.000 | 0.23 |
| CsI(Tl) | 4.51 | 540 | 65.000 | 0.68(64%), 3.34(36%) |
| CsI(Na) | 4.51 | 420 | 39.000 | 0.46, 4.18 |
| BGO | 7.13 | 480 | 8.200 | 0.30 |
| BaF2 (fast) | 4.89 | 220 | 1.400 | 0.0006 |
| BaF2 (slow) | 4.89 | 310 | 9.500 | 0.63 |
| ZnSe(Te) | 5.42 | 640 | 60000 | 10-40 |
| LSO:Ce | 7.4 | 420 | 25.000 | 0.047 |

Итог работы

В результате данного небольшого литературного обзора были рассмотрены основные физические процессы, использующиеся для детектирования гамма-излучения, некоторые методы и приборы (и их устройство), использующиеся для регистрации гамма-квантов.

Спасибо за внимание!

Черенковское излучение



Черенковское излучение

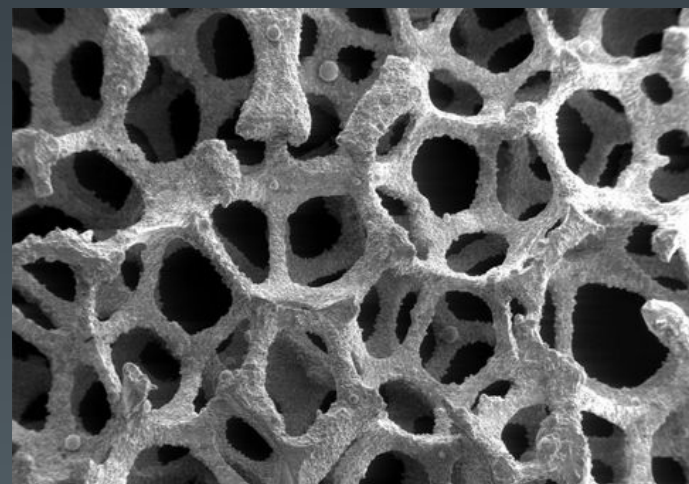
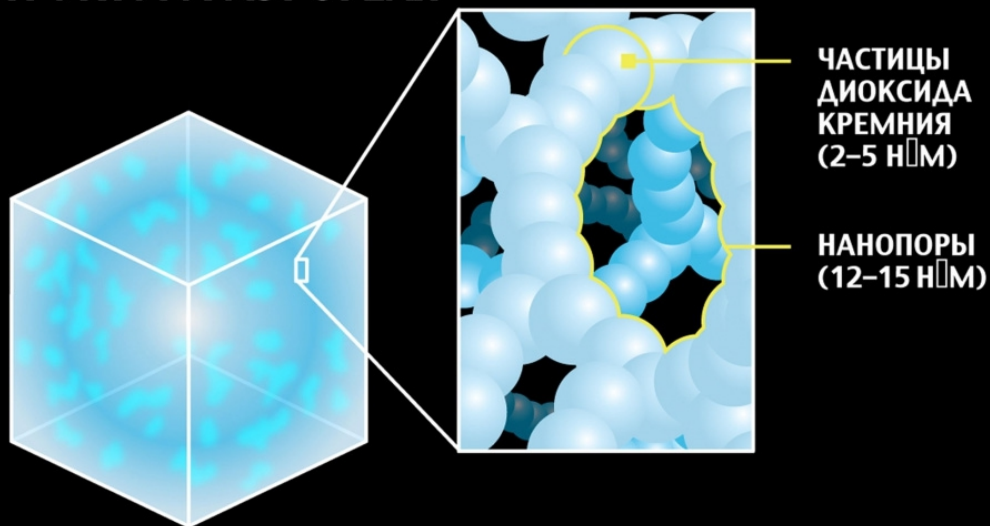
Основные свойства:

- Наличие определенной поляризации
- Направленность (угол распространения определяется из соотношения $\cos \theta = \frac{c}{\beta n}$, θ – угол распространения, β – скорость частицы, n – скорость света)
- Имеет непрерывный спектр излучения с максимумом в синей части видимого диапазона
- Наличие порога образования; для регистрируемых частиц ($\beta n \equiv 1$)

Аэрогель

Аэрогель диоксида кремния (аэрогель) – легкий высокопористый материал, обладающий низким показателем преломления

СТРУКТУРА АЭРОГЕЛЯ



Основные характеристики

Зависимость показателя преломления от плотности аэрогеля:

$$n \equiv 1 + k(\lambda) \rho;$$

$k(\lambda)$ – коэффициент, который в области 300-700 нм равен 0,21.
 $k(\lambda)$ равен коэффициент, который в области 300-700 нм равен 0,21.

Пропускающая способность аэрогеля выражается формулой

Пропускающая способность аэрогеля выражается формулой

$$T(\lambda) = \frac{I}{I_0} = A e^{-Cl/\lambda^2},$$

где I_0, I – интенсивности после и до прохождения образца, l – толщина образца,

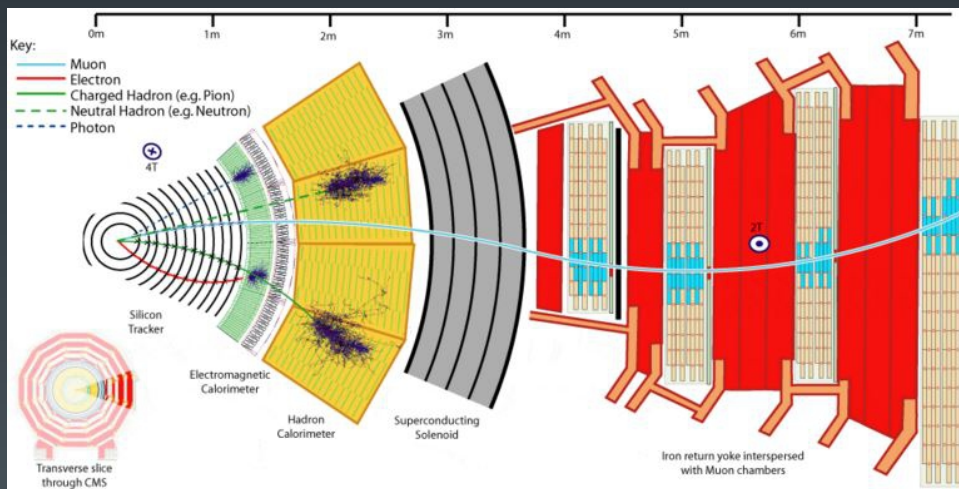
где I_0, I – интенсивности после и до прохождения образца, C – некоторая константа.
образца, C – некоторая константа.

Аэрогелевые счетчики

Аэрогель применяется в следующих детекторах черенковского излучения

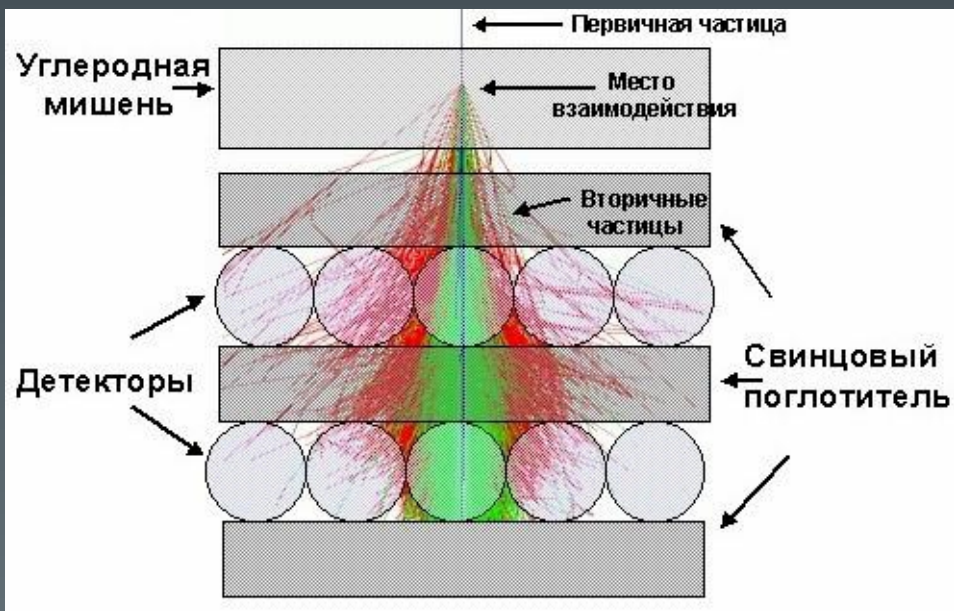
- Пороговые детекторы – регистрируют частицы со скоростью из определенного интервала
- RICH – детекторы – детекторы, регистрирующие кольца черенковского излучения

Калориметры

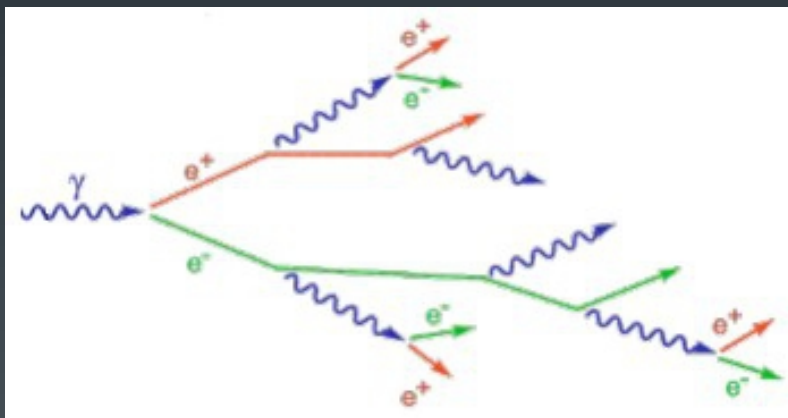


Типы калориметров:

- Адронные – регистрируют адроны или адронные струи
- Электромагнитные – регистрируют гамма-кванты, Электроны, позитроны



Электромагнитные калориметры



Основной принцип работы:

«Конвертирование» гамма-квантов в

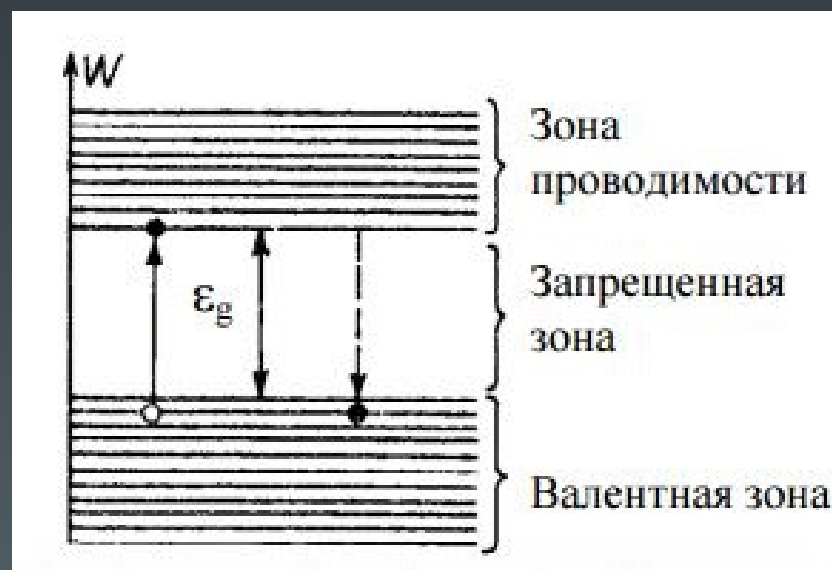
электроны и позитроны, которое сопровождается возникновением вторичных фотонов и т.д. Процесс продолжается до тех пор, пока

энергия каждого фотона больше, чем критическая энергия. Затем, основным результатом взаимодействия является ионизация вещества.

Ярким примером электромагнитного калориметра является детектор на NaI. Был изготовлен гигантские монокристаллы диаметром 77 см и высотой 25 см и диаметром 51 см и высотой 77 см. До этого монокристаллы NaI для детекторов изготавливались размерами в несколько раз меньше.

Полупроводниковые детекторы

Свойства полупроводников описываются на основе зонной теории (рис.). Имеется две группы уровней – валентная зона и зона проводимости. Они разделены запрещенной зоной – областью энергии, в которой не могут находиться электроны и дырки. Наиболее широко применяемыми полупроводниками являются германий (Ge) и кремний (Si), которые имеют полностью заполненные валентные зоны.

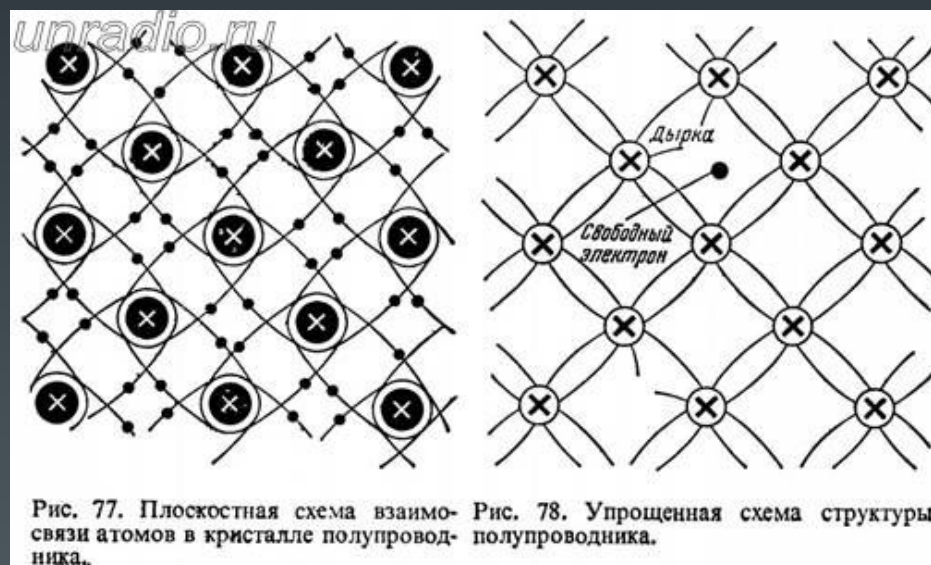


Полупроводниковые детекторы

Носители заряда в полупроводниках:

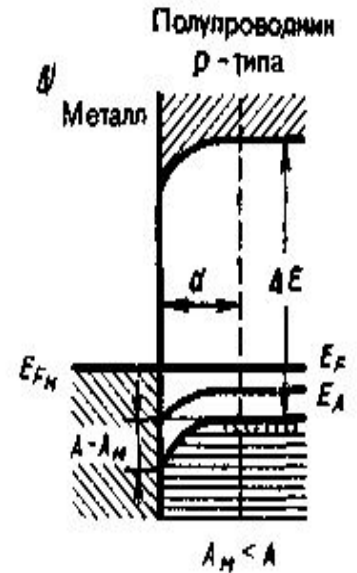
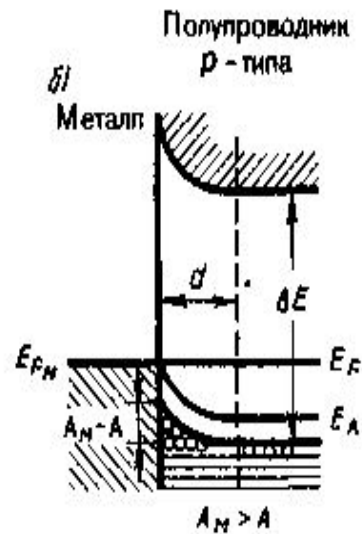
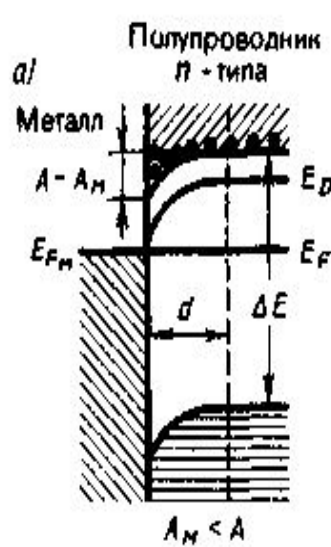
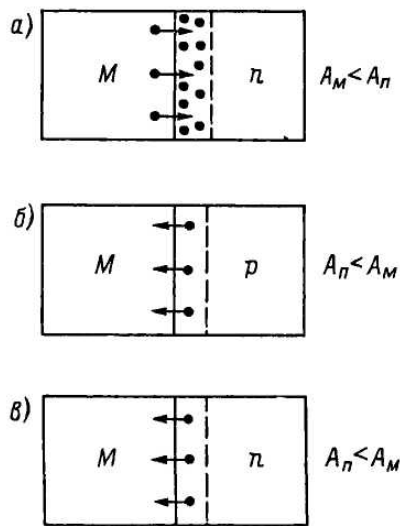
- Электроны
- «Дырки» – квазичастицы с зарядом $+e$

На рисунке представлена упрощенная схема пространственной структуры полупроводника.



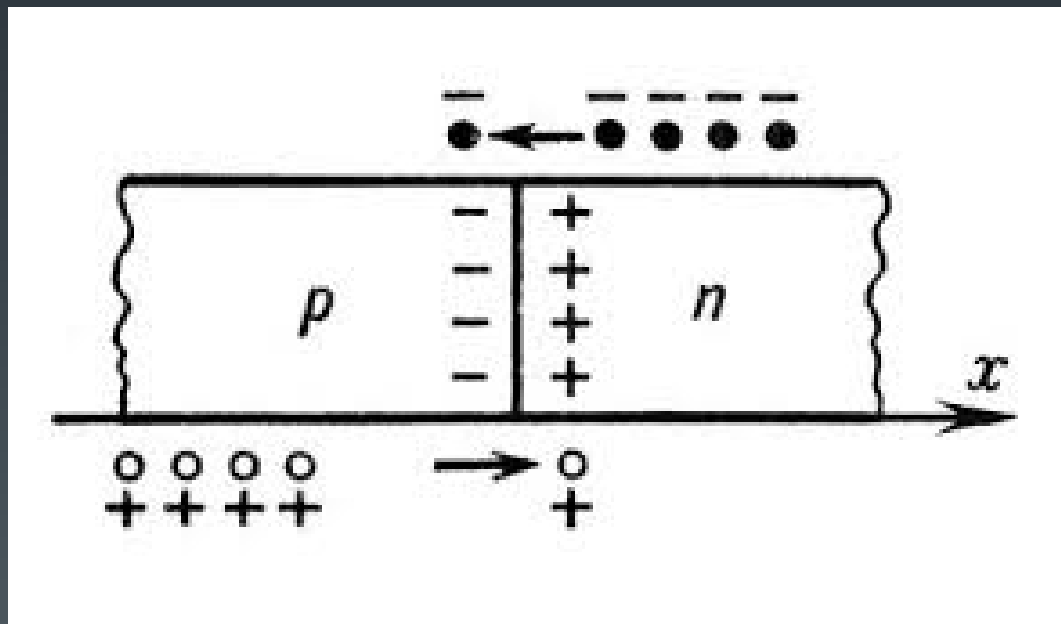
Полупроводники разделяют по типу электропроводности на полупроводники n-типа (преобладают электроны) и полупроводники p-типа (преобладают «дырки»). В связи с этим ПП разделяют на однородные (у которых электропроводность по всему объему одинакова) и неоднородные (в некоторых областях преобладает проводимость n-типа, а в некоторых – p-типа).

Контакт металла и ПП



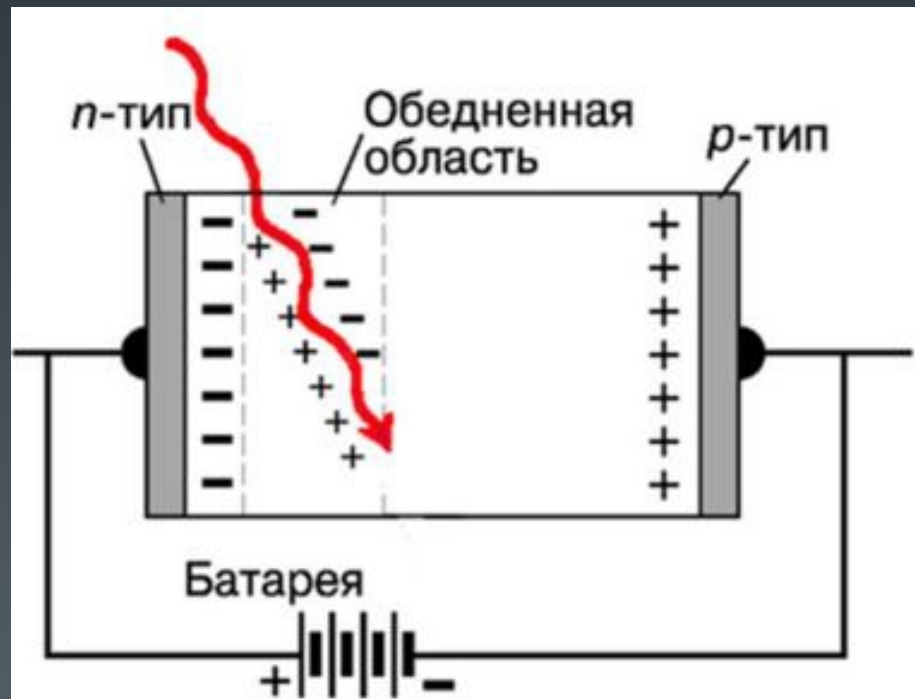
P-N переход

P-N – переход – область, обедненная зарядом, возникающая вместе с контактом полупроводников P и N типа вследствие диффузии электронов и дырок к ПП P и N типа соответственно. На границах этой области возникает запирающая разность потенциалов (потенциальный барьер), препятствующая дальнейшей диффузии носителей заряда.



Принцип работы ПП детекторов

Основной принцип работы следующий: гамма-квант, попадая в область р-п-перехода создает электрон-позитронные пары, которые созданным в этой области напряжением направляются в электродам. Таким образом возникает токовый импульс, который далее направляется в усилитель, а затем регистрируется, после чего соответствующая информация появляется в устройстве обработки данных



Классификация детекторов

По технологии изготовления детекторы классифицируются следующим образом:

- Поверхностно – барьерные – на переднюю поверхность напыляется очень тонкий слой металла, а на задний устанавливается алюминиевый электрод. В области контакта увеличивают число электронов для уменьшения сопротивления
- Диффузионные и имплантированные детекторы – в ПП внедряется примесь с противоположной проводимостью при помощи диффузии при повышенной температуре и дрейфе в электрическом поле с целью увеличения чувствительной области
- Планарная технология – позволяет на одной ПП пластине получать несколько детекторов. При помощи термического окисления при высокой температуре, фотолитографии и вытравливания разделяют поверхность ПП на полоски, которые и являются приемниками.
- Эпитаксиальные слои – формирование эпитаксиальных пленок (наращивание одного кристаллического материала на другом кристаллическом материале)