

Взаимодействие рентгеновского и гамма-излучения с веществом

Оптическая толщина

$$dI_\nu = -\alpha_\nu I_\nu ds$$

где α_ν [см⁻¹] – коэффициент ослабления (рассеяние, поглощение)

$$I_\nu(s) = I_\nu(0) \exp \left[- \int_{s_0}^s \alpha_\nu ds' \right]$$

$$\tau_\nu = \int_{s_0}^s \alpha_\nu ds' - \text{оптическая толщина}$$

$$I_\nu(s) = I_\nu(0) \exp(-\tau_\nu)$$

$$\alpha_\nu = n\sigma_\nu$$

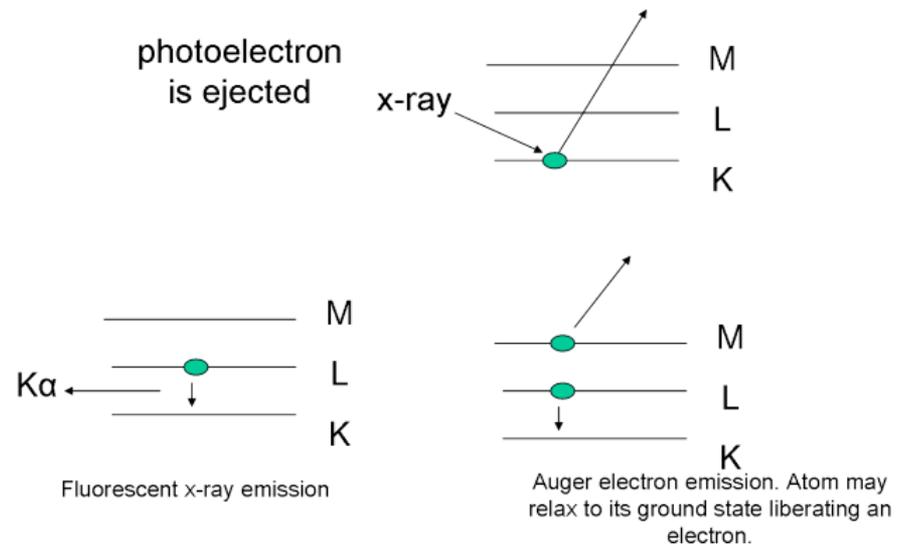
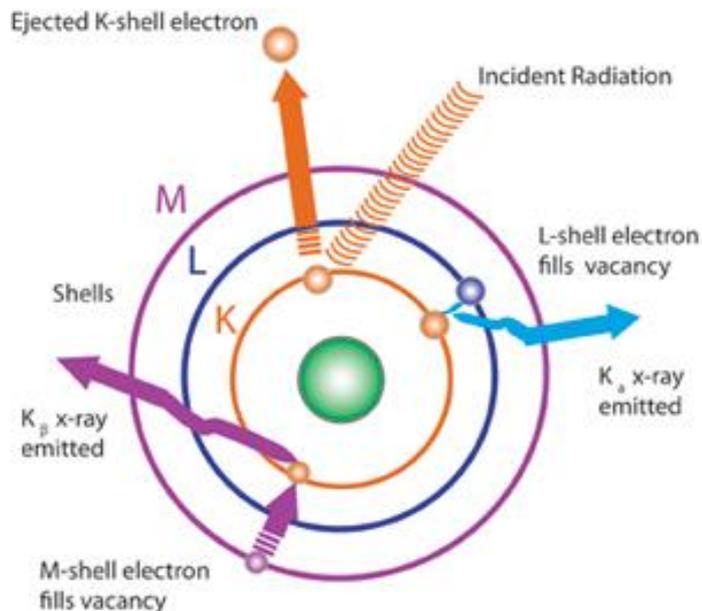
$$l_\nu = \frac{1}{\alpha_\nu} = \frac{1}{n\sigma_\nu} - \text{длина свободного пробега}$$

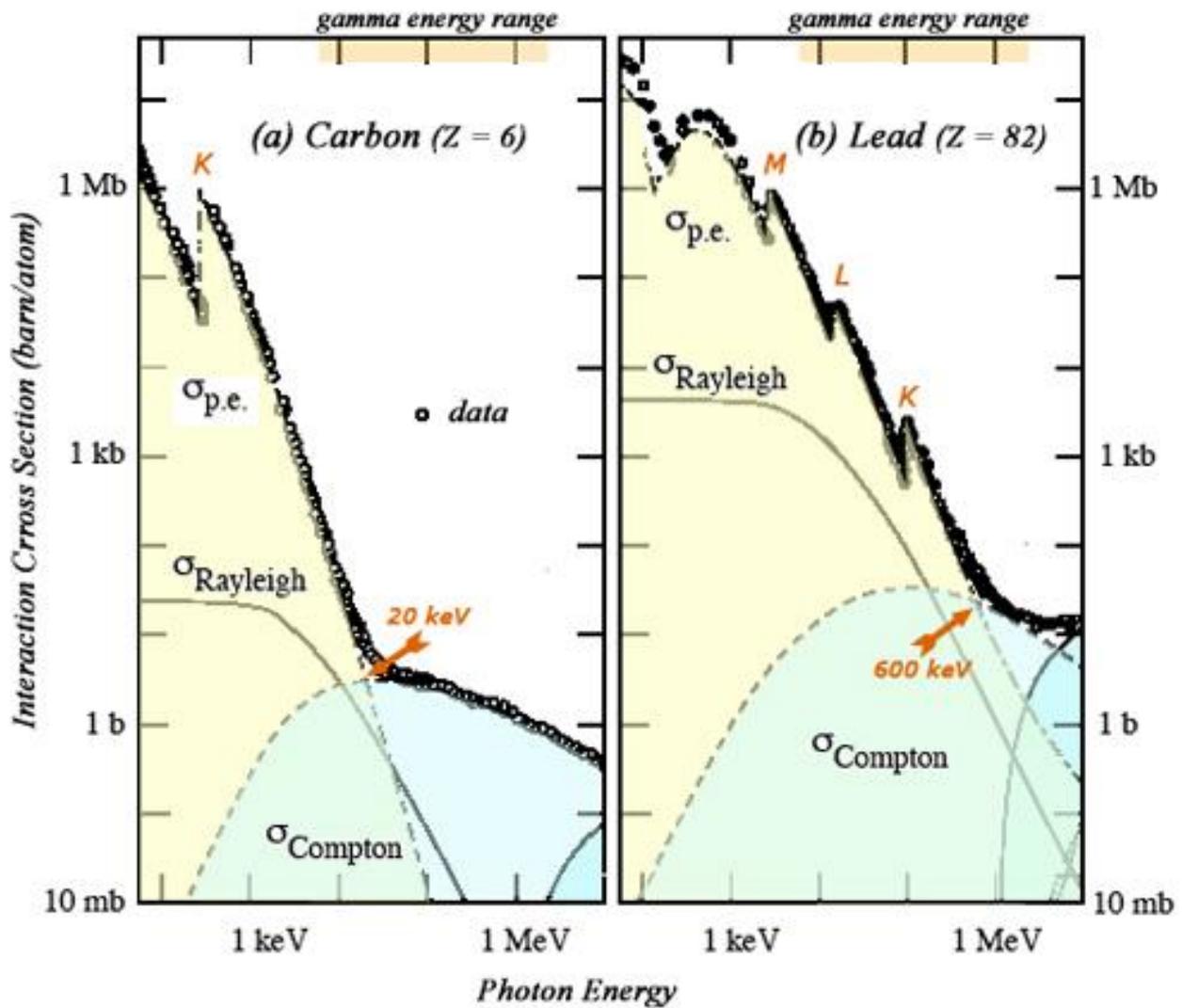
Фотопоглощение

$$Ry = \frac{me^4}{2\hbar^2} = \frac{1}{2}\alpha^2 mc^2 = 13.6 \text{ эВ}$$

Сечение фотопоглощения водородоподобной системы:

$$\sigma_a(E_\gamma, n) \propto \frac{Z^4}{E_\gamma^3 n^5}$$





Комптоновское (неупругое) рассеяние

$$x \equiv \frac{\hbar\omega_0}{mc^2}$$

$$\sigma \approx \sigma_T \left(1 - 2x + \frac{26x^2}{5} + \dots \right), \quad x \ll 1,$$

$$\sigma = \frac{3}{8} \sigma_T x^{-1} \left(\ln 2x + \frac{1}{2} \right), \quad x \gg 1.$$

Рождение $e^+ e^-$ пар в поле ядра

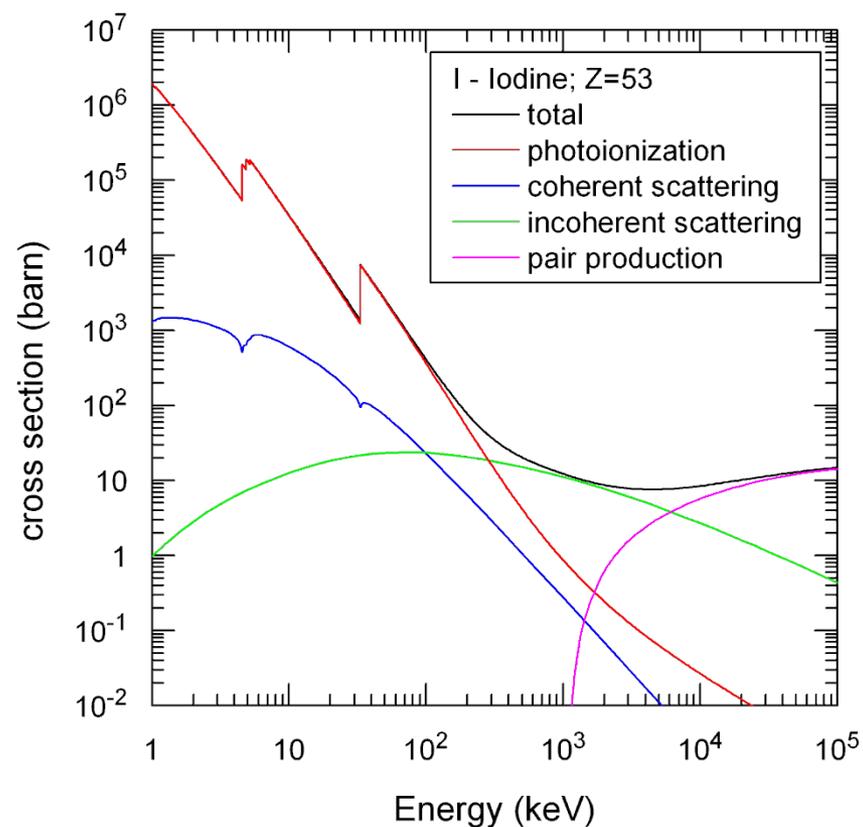
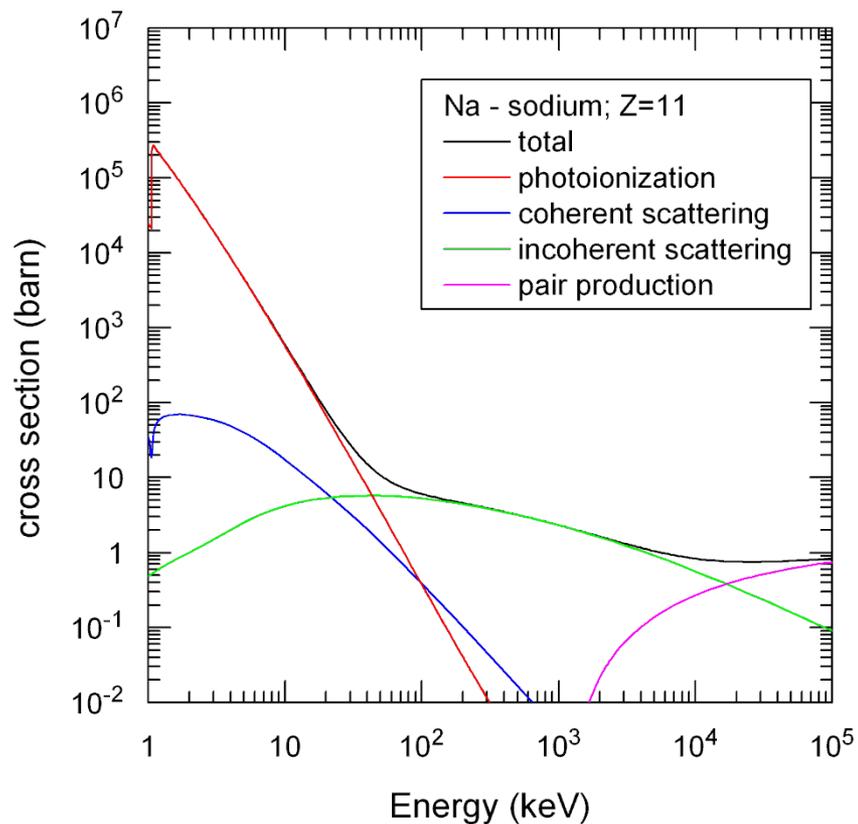
$$E_\gamma > 2mc^2$$

$$\sigma(E_\gamma) \simeq 4\alpha Z^2 r_e^2 \left[\frac{7}{9} \ln \left(\frac{2E_\gamma}{mc^2} \right) - \frac{109}{54} \right] \quad \text{при} \quad E_\gamma \ll \frac{mc^2}{\alpha Z^{1/3}}$$

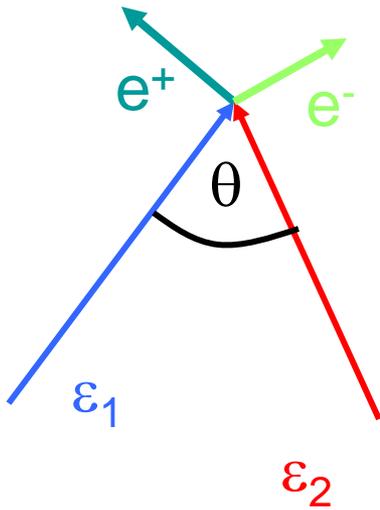
$$\sigma(E_\gamma) \simeq 4\alpha Z^2 r_e^2 \left[\frac{7}{9} \ln \left(\frac{191}{Z^{1/3}} \right) - \frac{1}{54} \right] \quad \text{при} \quad E_\gamma \gg \frac{mc^2}{\alpha Z^{1/3}}$$

$$4\alpha r_e^2 \simeq 2.3 \times 10^{-27} \text{ см}^2$$

Вклад различных взаимодействий



Рождение e^+e^- при взаимодействии γ - γ



$$\epsilon_{\text{thr}} = \frac{2 (m_e c^2)^2}{\epsilon_1 (1 - \cos\theta)}$$

$$\sigma(\omega) = \frac{\pi r_e^2}{2} (1 - \beta^2) \left[2\beta(\beta^2 - 2) + (3 - \beta^4) \ln \left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta} \right) \right]$$

$$\beta = \left[1 - \left(\frac{mc^2}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \omega = \sqrt{\epsilon_1 \epsilon_2 (1 - \cos \theta) / 2}$$

$$\omega \simeq mc^2 \quad \sigma \simeq \frac{\pi r_e^2}{2}$$

Взаимодействие γ - γ (продолжение)

$$\varepsilon_1 \simeq 6 \cdot 10^{-4} \text{ eV} \quad \varepsilon_2 > 4 \cdot 10^{14} \text{ eV}$$

$$400 \text{ cm}^{-3}$$

$$\tau = n_\gamma \sigma l$$

$$l_{\tau \sim 1} = \frac{1}{n_\gamma \sigma} \approx 2 \cdot 10^{22} \text{ cm}$$

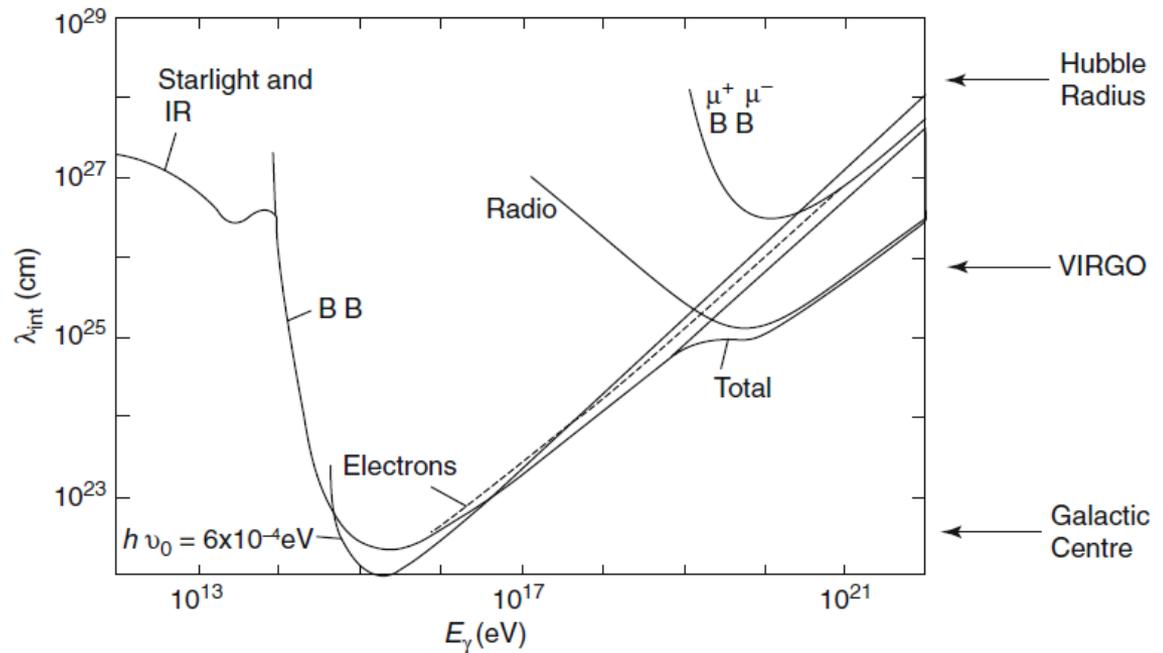


Fig. 8.1 Interaction length of γ -rays on the various background radiation fields (Wdowczyk et al. 1972). Unless otherwise stated the process concerned is electron pair production. BB denotes the 2.7 K black body radiation ($\sim 400 \text{ photons cm}^{-3}$). Several important distances are indicated on the right-hand side; Virgo denotes the distance to the important cluster of galaxies at the centre of our supercluster

Детектирование гамма-излучения

- I Сцинтилляционные детекторы (~10 кэВ – десятки МэВ)
- II Полупроводниковые детекторы (~кэВ -МэВ)

Сцинтилляционные детекторы

Наиболее распространенные.

Сцинтилляция – флуорисценция (быстрая компонента) и фосфорисценция (медленная компонента).

Основные характеристики: плотность (Z), световыход, энергетическое разрешение, время высвечивания: $I = I_0 \exp(-t/\tau)$

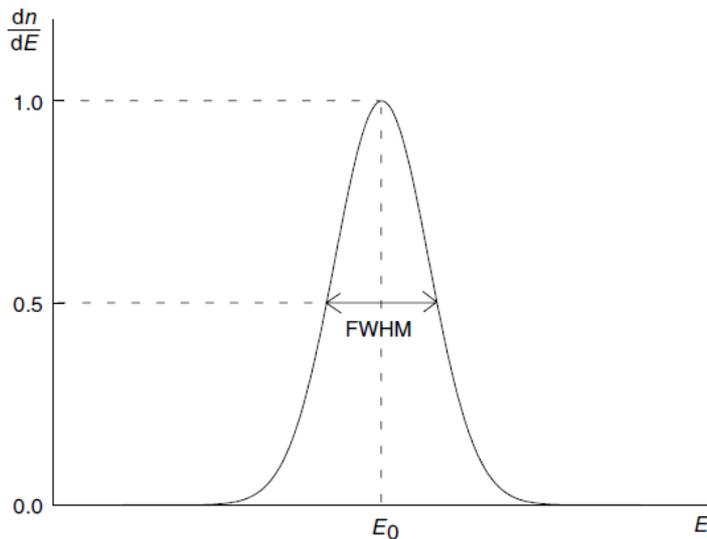


Fig. 4.7. Statistical broadening of the energy peak centred at E_0 measured by a detection system. The FWHM of the peak is commonly used as indication of the energy resolution of the system

Сцинтилляционные детекторы

Органические и неорганические.

Органические: сцинтилляции вызваны переходами между уровнями энергии молекул. Низкая плотность (малые Z), плохой световыход (безызлучательное снятие возбуждения), но быстрое высвечивание ($\tau \sim \text{нс}$).

Кристаллы: антрацен ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ $\rho=1.25$ г/см³ $\tau \sim 30$ нс),
стильбен ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}$ $\rho=1.16$ г/см³ $\tau \sim 4.5$ нс).

Жидкие растворы.

Пластиковые сцинтилляторы (разная форма, большой объем)

Сцинтилляционные детекторы

Неорганические:

Кристаллы с активаторами.
Переход е из валентной зоны
в зону проводимости
(создание пары электрон-
дырка);

добавление активатора
создает уровни энергии
в запрещенной зоне (центры
люминисценции).

1948: NaI(Tl)

CsI(Tl), CsI(Na), BGO
(Bi₄Ge₃O₁₂), LaBr₃(Ce)

б) кристаллы без активаторов
– низкий световыход, очень
быстрое

время высвечивания: BaF₂,
CsI

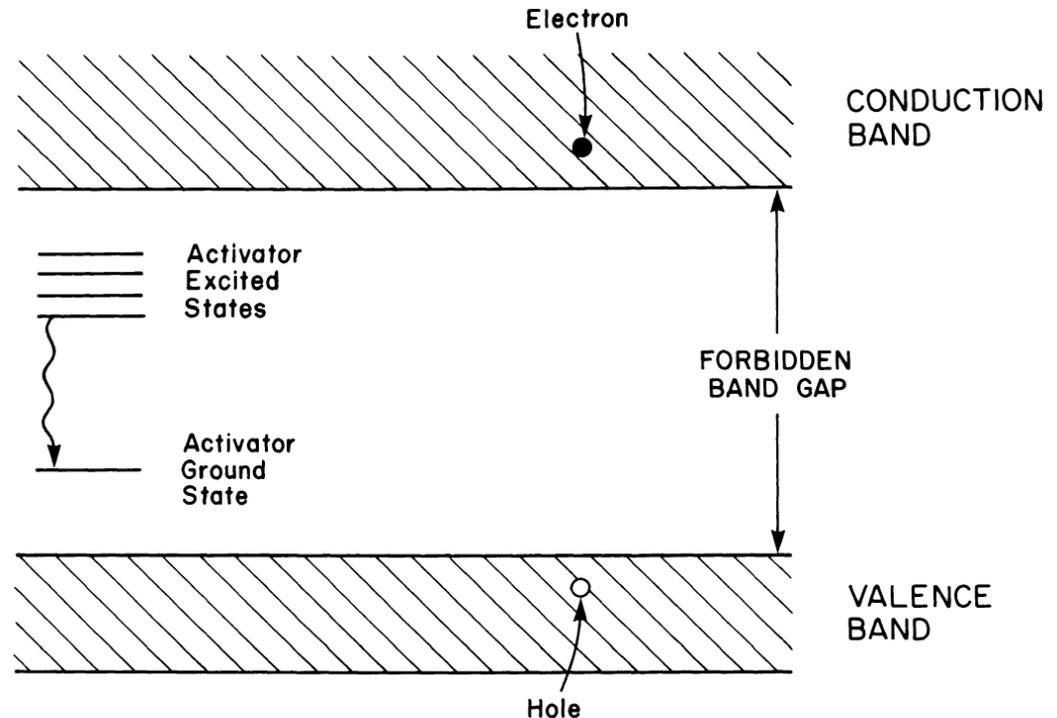


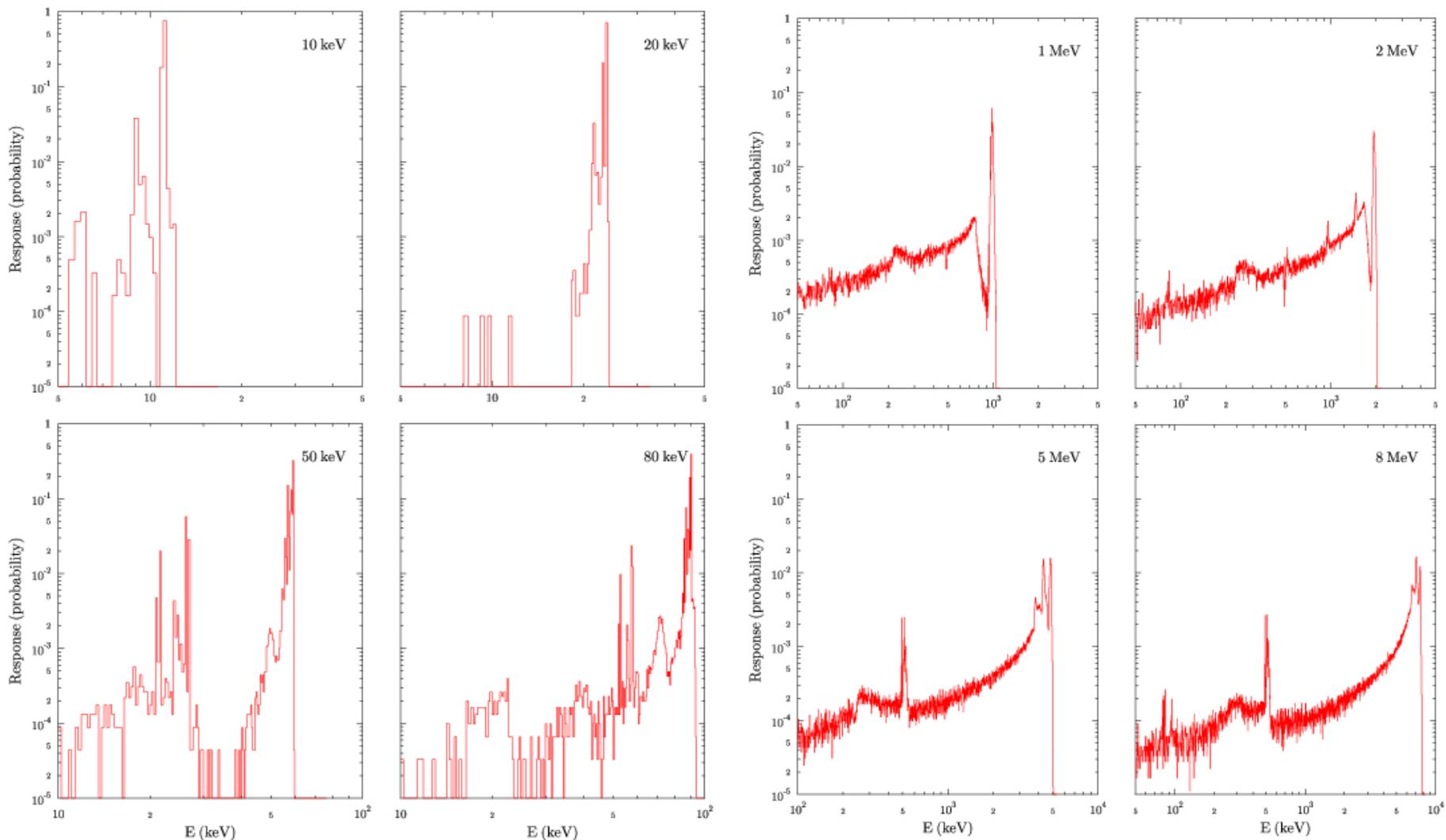
Fig. 1. Energy level diagram for a typical inorganic scintillator.

Неорганические сцинтилляторы (сравнение)

Материал	Световыход, %	Темп.коэфф., %/°C	Постоянная времени спада, нс	Разрешение на 662 кэВ, %	Плотность, г/см ³	Гигроско- пичность
NaJ(Tl)	100	- 0,3	250	6-8	3,67	да
CsJ(Tl)	45	0,01	1000	7-8,5	4,51	слабая
CsJ(Na)	85	-0,05	630	7-8,5	4,51	да
CsJ	4-6	- 0,3	16	30-32	4,51	нет
CdWO ₄	30-50	-0,1	14000		7,9	нет
YAlO ₃ (Ce)	40	-0,1	27		5,55	нет
Y ₃ AlO ₅ O ₂₂ (Ce)	15	-	70		4,55	нет
BGO	20	- 1,2	300	9,5-12	7,13	нет
LYSO	75	0,04	41	7-11	7,1	нет
BaF ₂	3	0	0,6 – 0,8		4,88	слабая
LaBr ₃ (Ce)	130	0	26	2,5-3,5	5,29	да
LaCl ₃ (Ce)	70-90	0,7	28	2,5-3,5	3,79	да

NaI(Tl): 4×10^4 фотонов/МэВ (~12%) ($E_{ph}=3$ эВ: $\lambda=415$ нм)

Матрица отклика детектора



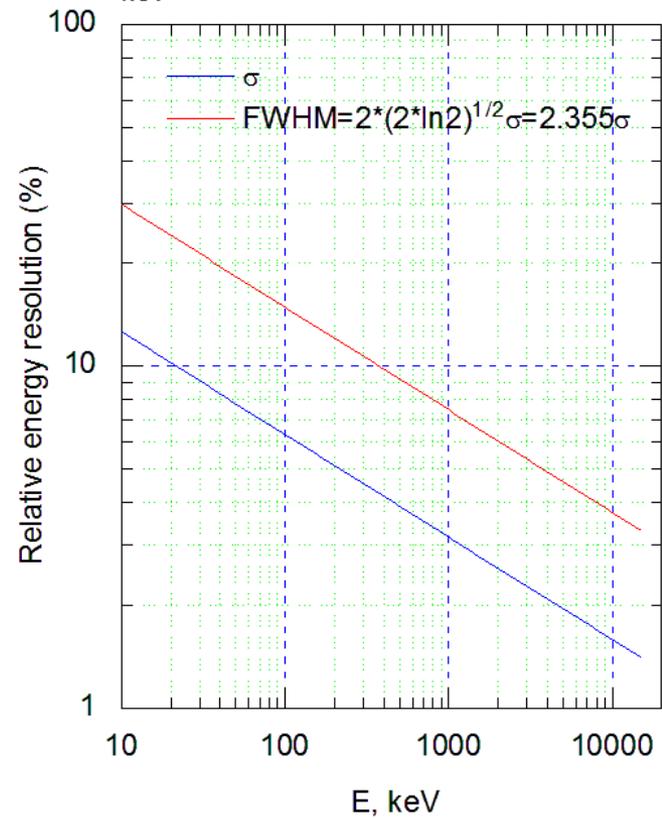
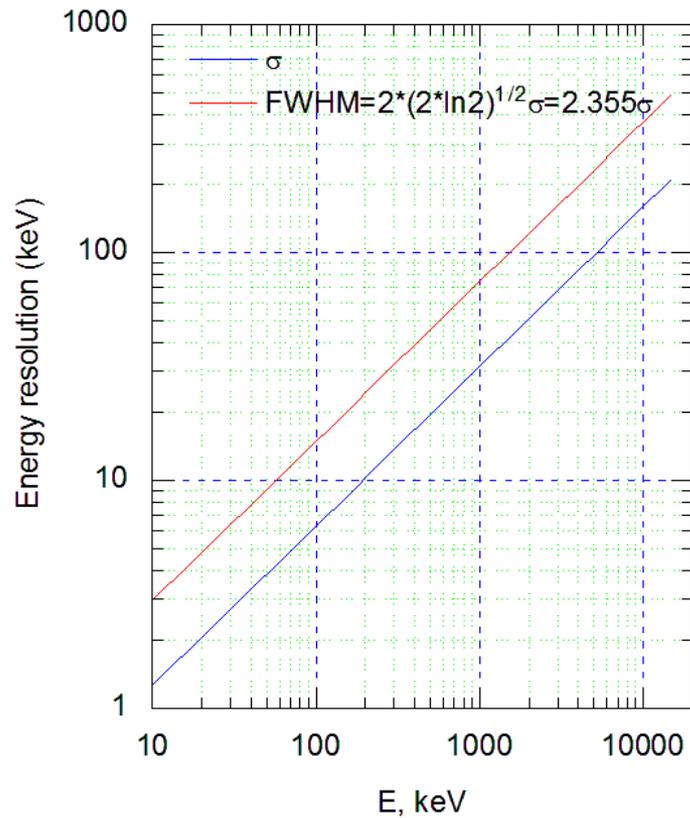
Матрица отклика детектора Конус-Винд (NaI(Tl)+Al контейнер)

Энергетическое разрешение

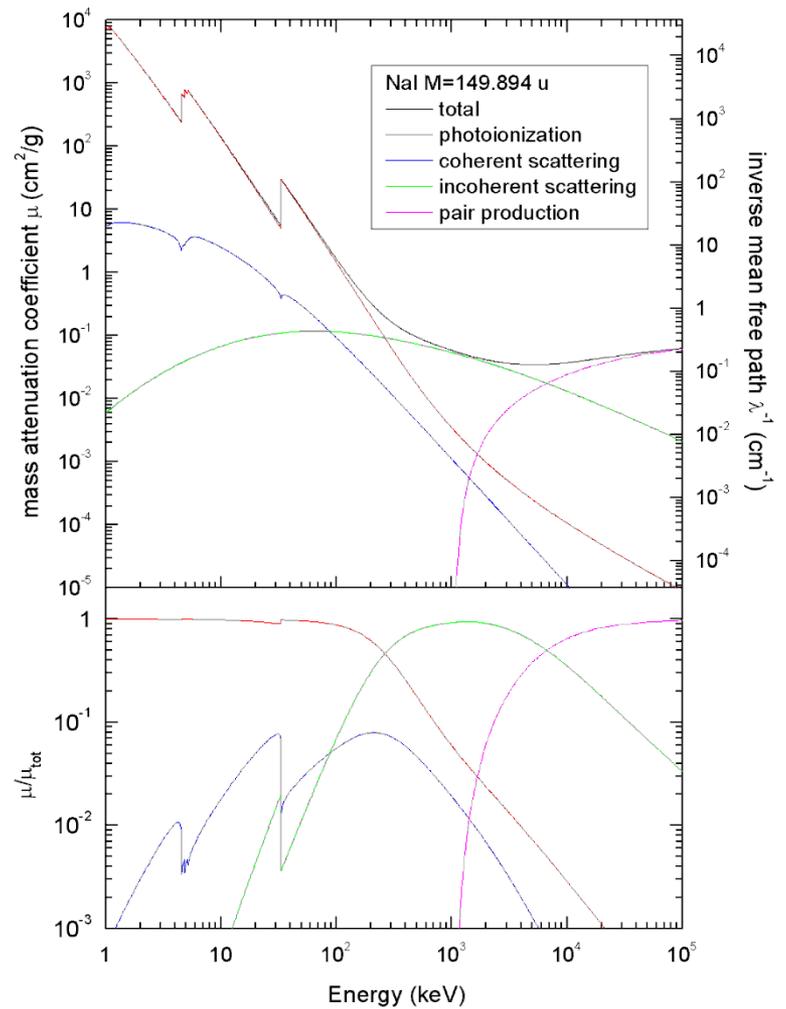
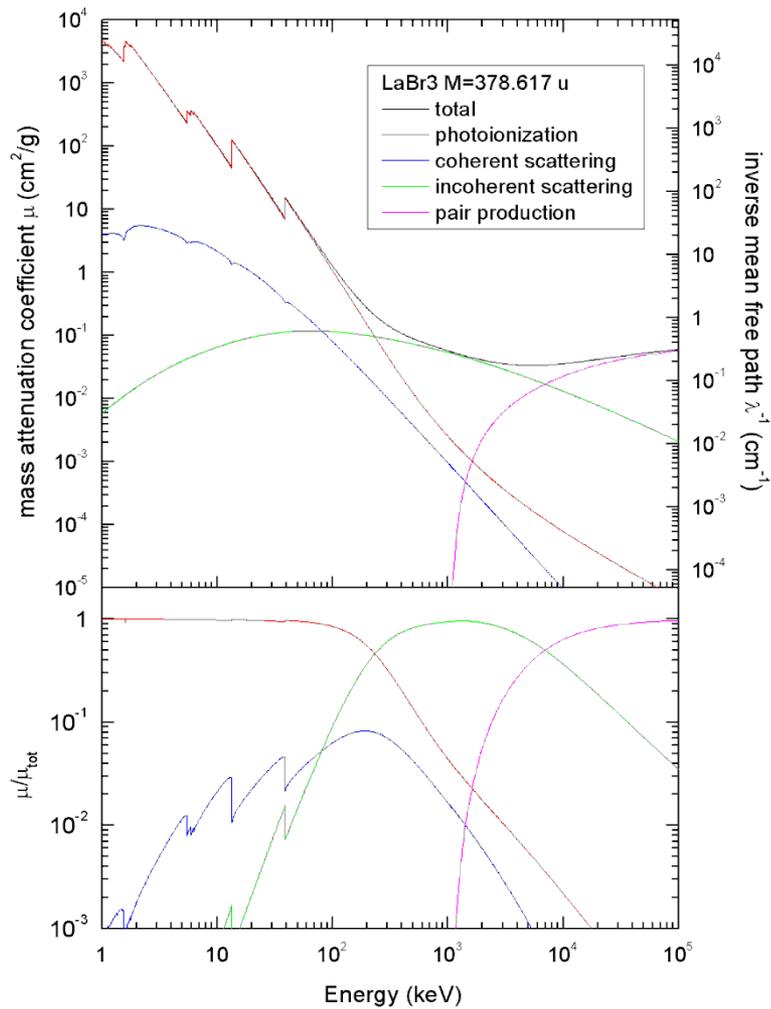
Konus-Wind energy resolution:

$$\sigma(E) = 0.251 * E_{\text{keV}}^{0.7} \text{ (keV)}$$

$$\sigma(E)/E = 25.1 * E_{\text{keV}}^{-0.3} \text{ (\%)}$$



массовый коэффициент поглощения $\mu = \sigma/M = \sigma/(\rho/n)$ ($\tau = \rho\mu$)
и обратная длина свободного пробега $\lambda^{-1} = \rho\mu$



Полупроводниковые детекторы

- В сцинтилляторах нужно >100 эВ на создание фотоэлектрона
- Только несколько эВ нужно для создания электрон-дырочной пары в полупроводнике \rightarrow в ~ 100 раз больше переносчиков заряда \rightarrow лучшее энергетическое разрешение
- 60-ые годы – высокочистые Si ($Z=14$) и Ge ($Z=32$) детекторы.

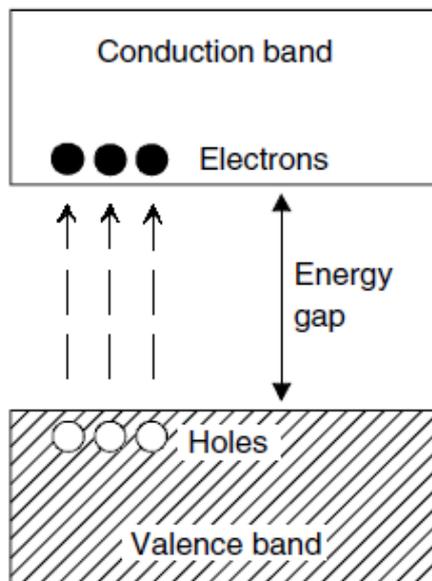


Fig. 4.12. Band structure of a semiconductor material

Si: $E_g=1.12$ эВ
Ge: $E_g = 0.74$ эВ

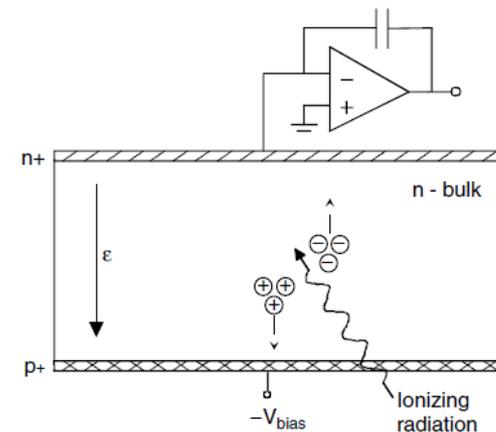
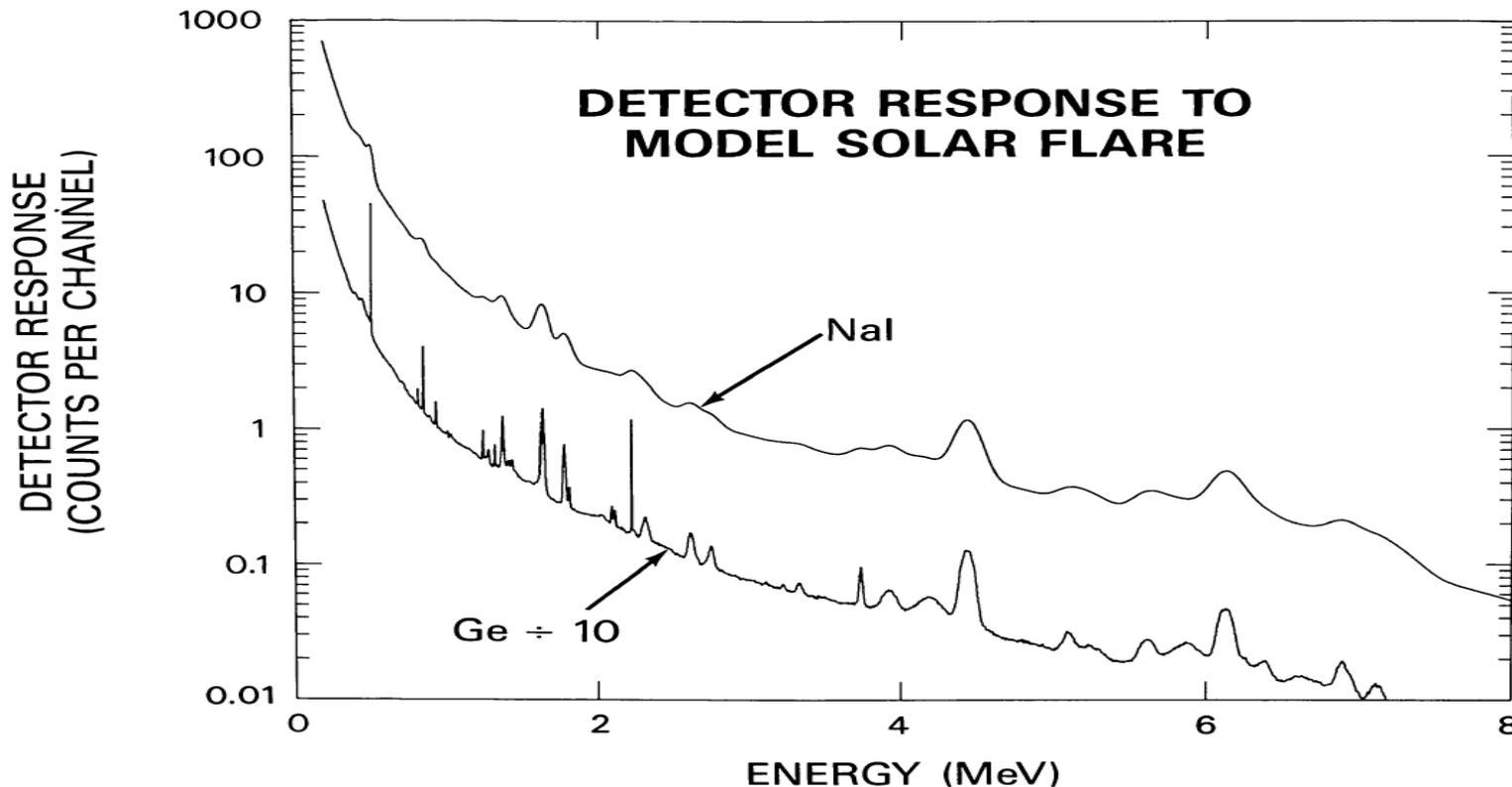


Fig. 4.13. Working principle of a pn diode detector. The same voltage applied to the device provides the depletion of the semiconductor bulk and the drift field ϵ responsible for the collection of the charge carriers, created by the ionizing radiation, by the electrodes

HPGe (high-purity Ge detectors)

- Малая ширина запрещенной зоны -> высокий темновой ток-> нужно охлаждать (<120 K)
- $l = 2.9$ см (1 МэВ)
- Разрешение <1%
- RHESSI, INTEGRAL SPI



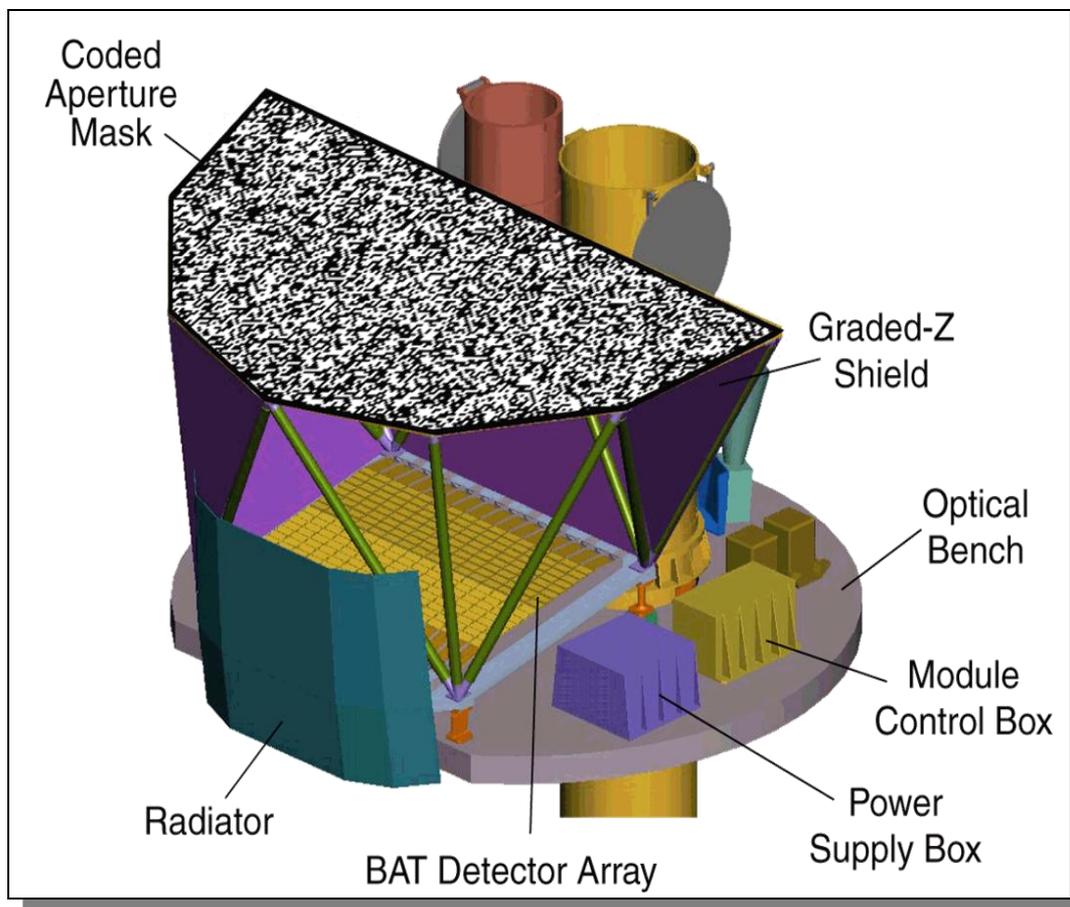
Гамма-телескопы

- Телескопы с кодирующей маской
- Комптоновские телескопы
- Пар-конверсионные телескопы
- Линзы Лауэ
- Телескопы высоких энергий

Общие характеристики: диапазон энергий, поле зрения, угловое разрешение, энергетическое разрешение, чувствительность

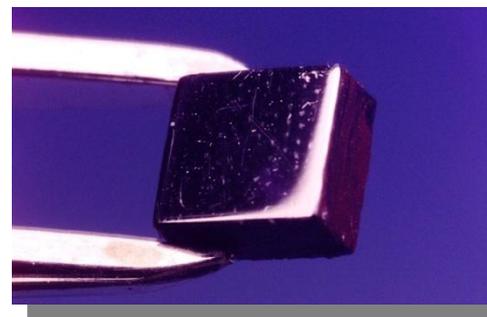
Телескопы с кодирующей маской

- Swift-BAT (Burst Alert Telescope)

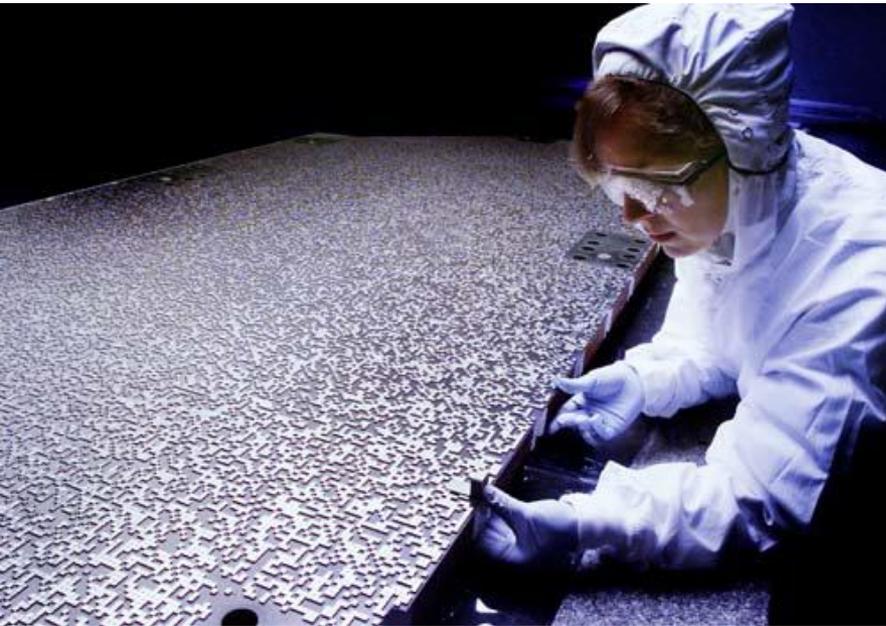


of ~52,000 pieces
of lead ($5 \times 5 \times 1$ mm)

32,768 pieces of CdZnTe ($4 \times 4 \times 2$ mm)



Swift-BAT (продолжение)



E: 15-150 кэВ
Ang.res: 1-4'
FoV: 1.4 стерадиан
En.res: 7 кэВ
Seff = 5240 см²

