

Laboratorio di Astrofisica delle alte energie

Detectors per astronomia X e gamma

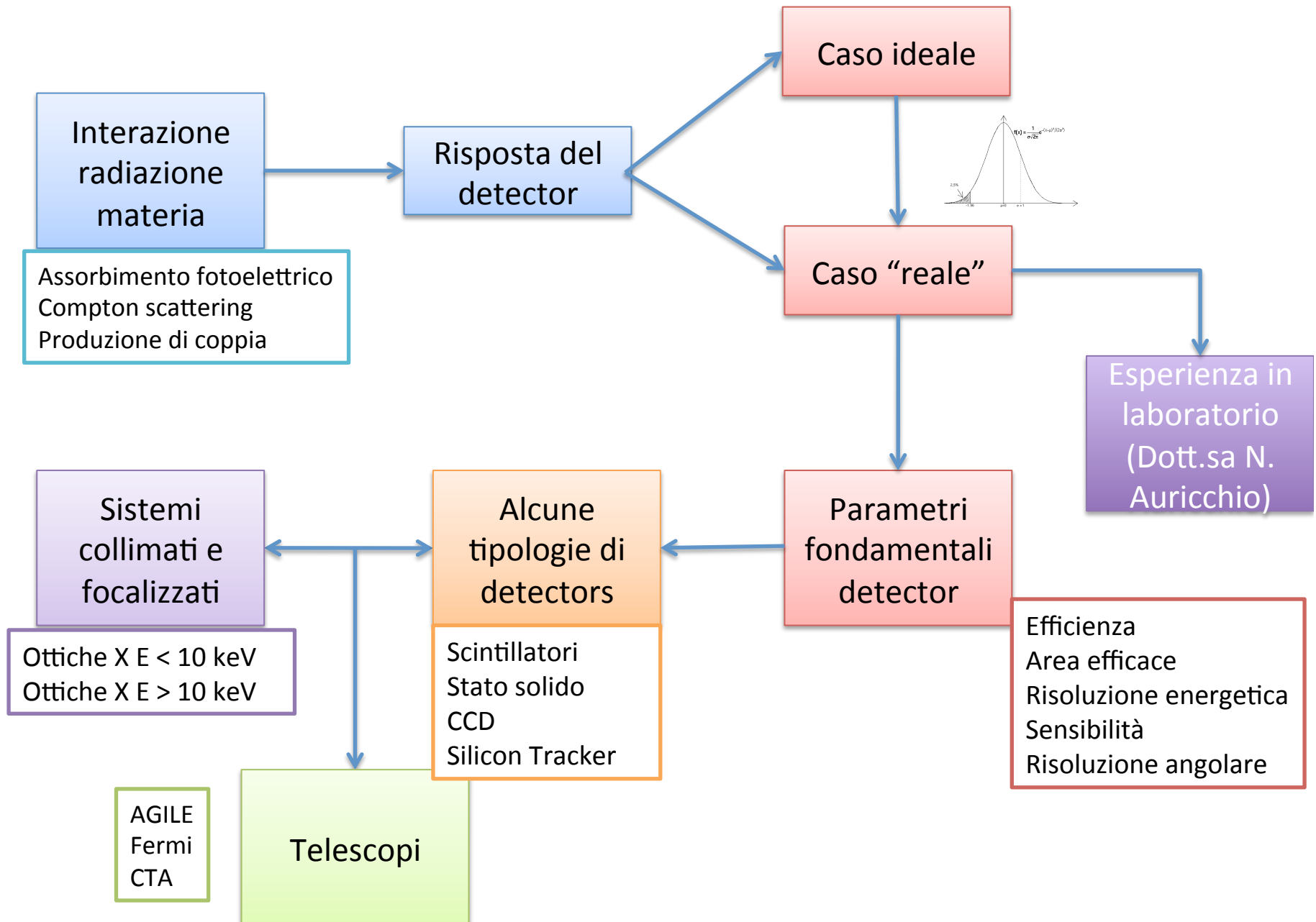
A. Bulgarelli (INAF/IASF Bologna)

Basato su una prestazione di P. Malaguti.

Simulazioni di V. Fioretti

Bologna, ottobre 2013

- Attività principali di INAF/IASF Bologna
 - Studi di astrofisica e cosmologia osservativa e teorica
 - Studio e costruzioni di detectors
 - Simulazioni di detectors
 - Gestioni di progetti spaziali
 - Partecipazione alla costruzione di satelliti per astronomia X e gamma
 - Test equipment
 - Test
 - Integrazione
 - Calibrazione
 - Campagna di lancio
 - Gestione di archivi dati



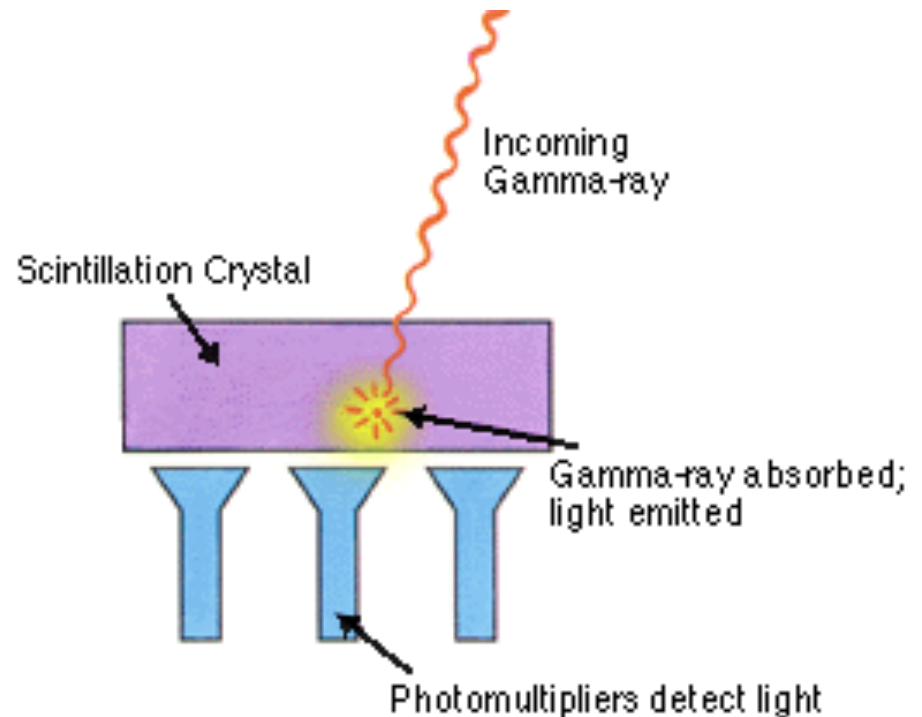
X- and γ -ray detectors

- Primary photon interaction within the detector
- Secondary particles (photons, e^- , e^+ , ...) converted in electric signal

Il principio di base

- intensity:
 - [Spectroscopy](#)
- Interaction position:
 - [Imaging](#)

Perché
usiamo i
detectors

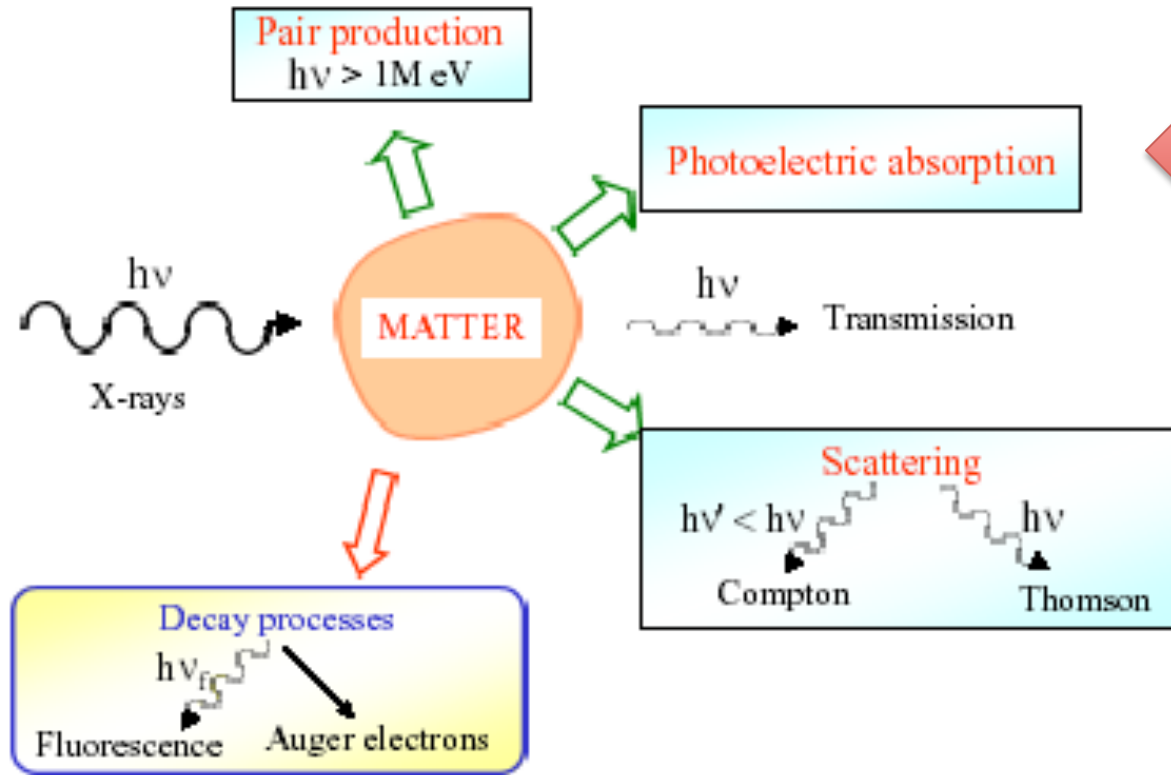


Prima parte

Il nostro preferito (γ) ...

I rivelatori X e γ -ray consistono di un materiale nel quale i fotoni di alta energia interagiscono mediante tre processi principali:

Interaction X-rays - Matter



Il nostro preferito (X) ...

Primary competing processes and some radiative and non-radiative decay processes



Definizioni

- Sia l lo spessore di un certo materiale (cm)
- Sia n la *densità di numero* del materiale (cm^{-3}) e ρ la densità (g/cm^{-3})
- La cross section σ è l'area che il materiale presenta al fotone per l'interazione (cm^2) \rightarrow esprime la probabilità che una certa interazione possa avvenire
- Coefficiente di assorbimento (lineare) $\lambda = \sigma n$ (cm^{-1}): *rappresenta la probabilità per unità di percorso che un fotone ha di interagire con la sostanza nella quale si propaga*
- Camino libero medio $1/\lambda$ (cm)
- L'intensità misurata I di radiazione che interagisce nel materiale di spessore l è legata all'intensità incidente I_0 in accordo con la legge di Beer-Lambert

$$I = I_0 e^{-\lambda l}$$

I è la radiazione emergente...

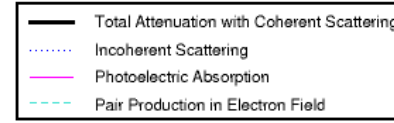
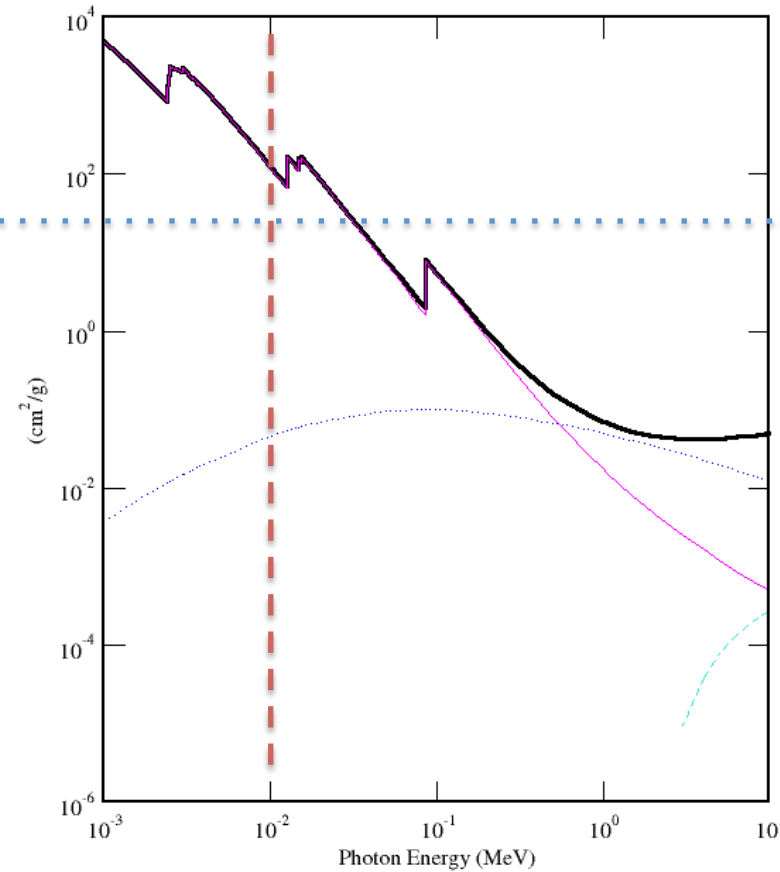
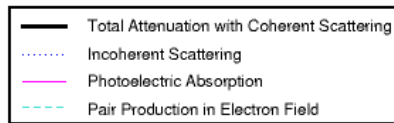
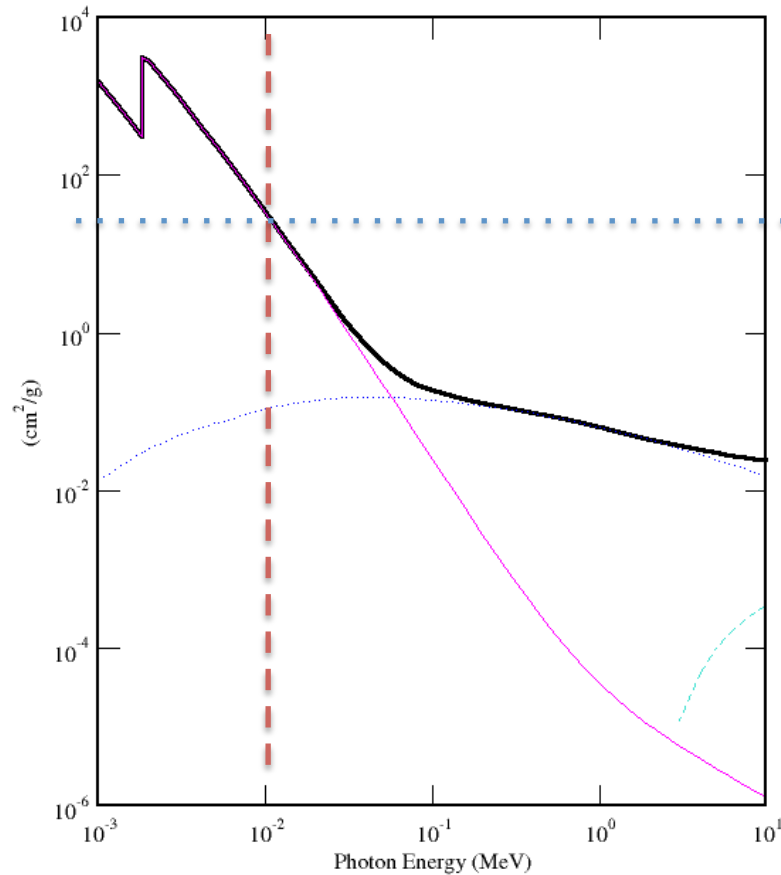
Coefficiente di assorbimento di massa

- Misura della capacità di un materiale di assorbire o “scatterare” fotoni di una data energia, per unità di massa
- $\mu = \lambda / \rho = \sigma \mathbf{n} / \rho$ (cm^2 / g)
- <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

$$I = I_0 e^{-\mu \rho l}$$

Silicon (Si) – Z=14

Thallium (Ti) – Z=81

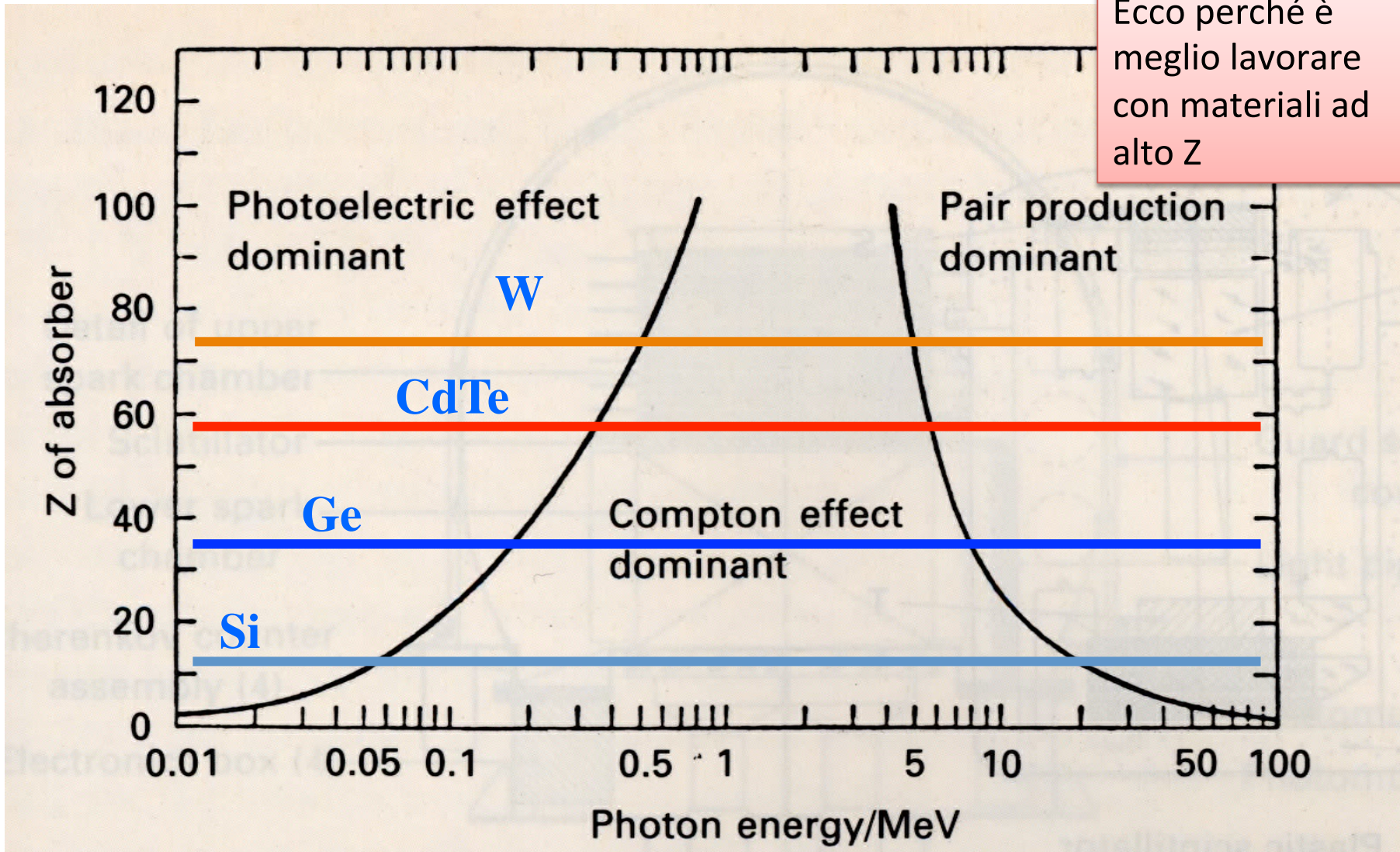


$$\mu_{total} = \mu_{PE} + \mu_{Compton} + \mu_{Pairproduction}$$

An **absorption edge** is a sharp discontinuity in the absorption spectrum of X-rays by an element that occurs when the energy of the photon corresponds to the energy of a shell of the atom.

Quale è la probabilità che questi fenomeni avvengano?

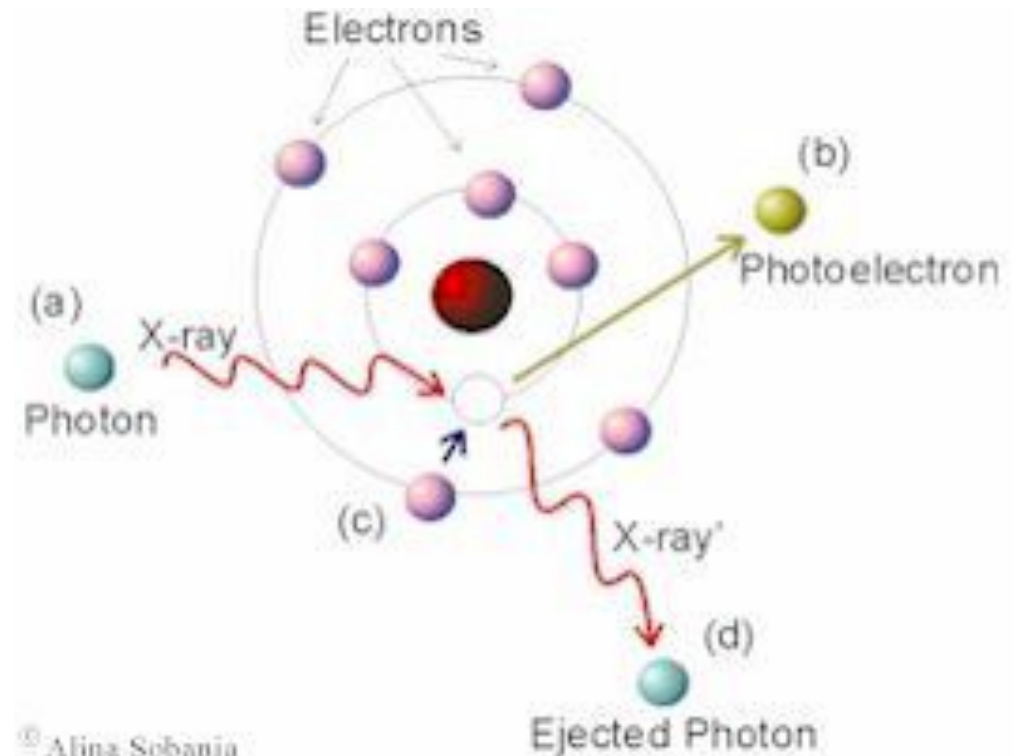
Ecco perché è meglio lavorare con materiali ad alto Z



Total cross section: the relative importance of different forms of energy loss mechanisms for X-ray and γ -ray as a function of photon energy and the atomic number of the material

Assorbimento fotoelettrico - 1

- E' l'interazione dominante nei range energetici X (1-100 keV e oltre);
- Avviene tra un fotone ed un atomo: il primo scompare essendo assorbito completamente nel processo;
- Al suo posto viene emesso un fotoelettrone da parte dell'atomo;
- Ad energie X e γ il foto- e^- proviene dalle shell più interne: K, L
- L'interazione avviene con l'atomo e non può aver luogo con e^- liberi
- Energia del fotoelettrone emesso, dove E_b è l'energia di legame del foto- e^- nella shell di provenienza e $h\nu$ è l'energia del fotone incidente

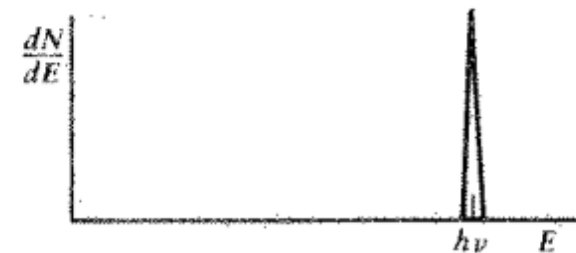


$$\Rightarrow E_{e^-} = h\nu - E_b$$

Assorbimento fotoelettrico - 2

- Oltre al foto- e^- viene a crearsi nell'assorbitore un **atomo ionizzato** a causa della lacuna determinatasi in una delle sue shell più interne
- Questo determina l'emissione di uno (o più) fotoni (o in alcuni casi e^-) di energia E_b corrispondente alla shell interessata (**meccanismo di diseccitazione**)
- Questi fotoni X secondari sopravvivono per brevissime distanze (~ 1 mm) all'interno dell'assorbitore, prima di essere a loro volta assorbiti per effetto fotoelettrico con gli e^- delle shell più esterne
 - Ma posso ancora uscire dal detector (**X-ray escape**)
 - In rivelatori pixellati \rightarrow righe di fluorescenza
- Poiché $\mu_{pE}(E) \propto Z^{4.5} \times E^{-3.5}$
 - \rightarrow Materiali ad alto Z preferiti
- Disponendo di un rivelatore di volume sufficiente, tutti gli eventi fotoelettrici causano un deposito di energia nel "fotopicco", situato all'energia del fotone gamma incidente. La risposta ideale è la seguente

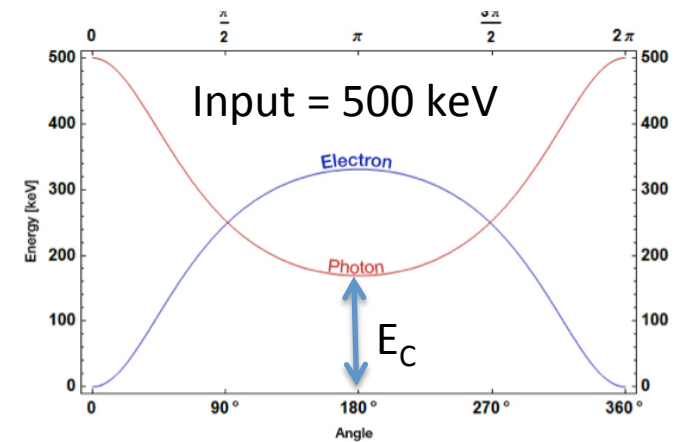
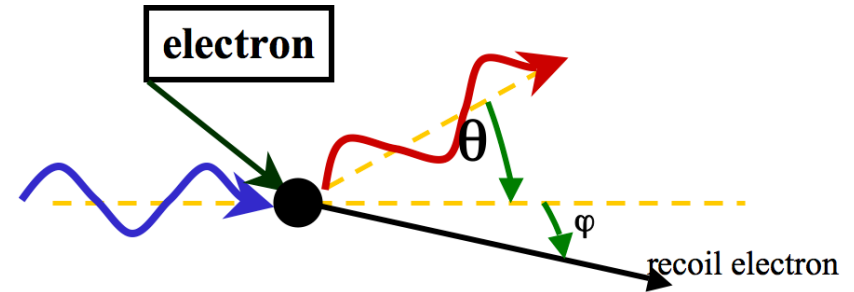
Questa è la risposta ideale che vogliamo



Quello sopra è un grafico di energia depositata

Diffusione Compton

- Creazione di un **recoil electron** e di uno **scattered photon**
- L'energia persa dal fotone varia da 0 ad una frazione importante dell'energia di partenza;
- Dato un fotone incidente di energia $h\nu$, energia del fotone diffuso è $h\nu'$ (*frequency change*) e dell'elettrone è E_{e^-}

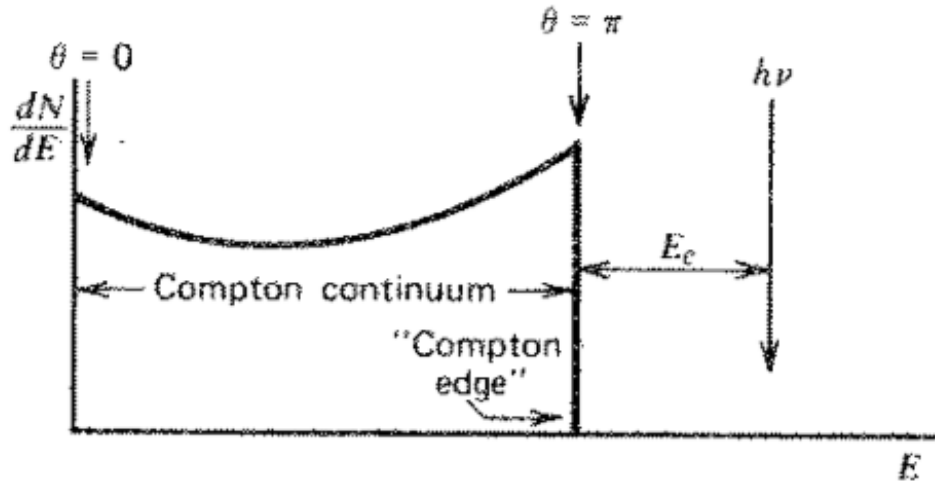


$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}$$

$$E_{e^-} = h\nu - h\nu' = h\nu \left(\frac{\frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \right)$$

dove m_0c^2 è l'energia a riposo dell'elettrone (511 keV);

Risposta ideale - Continuo e spalla Compton



- La separazione, E_C , tra l'energia del fotone gamma incidente (fotopicco) e l'energia della spalla Compton ("Compton edge", $\theta=\pi$), è data da:

$$E_C \equiv h\nu - E_{e^-}|_{\theta=\pi} = \frac{h\nu}{1 + 2h\nu / m_0c^2}$$

che, per $h\nu \gg m_0c^2/2$, diviene costante e pari a:

$$E_C \xrightarrow{h\nu \gg m_0c^2/2} \frac{m_0c^2}{2} \quad (\cong 256 \text{ keV})$$

Uno spettro Compton

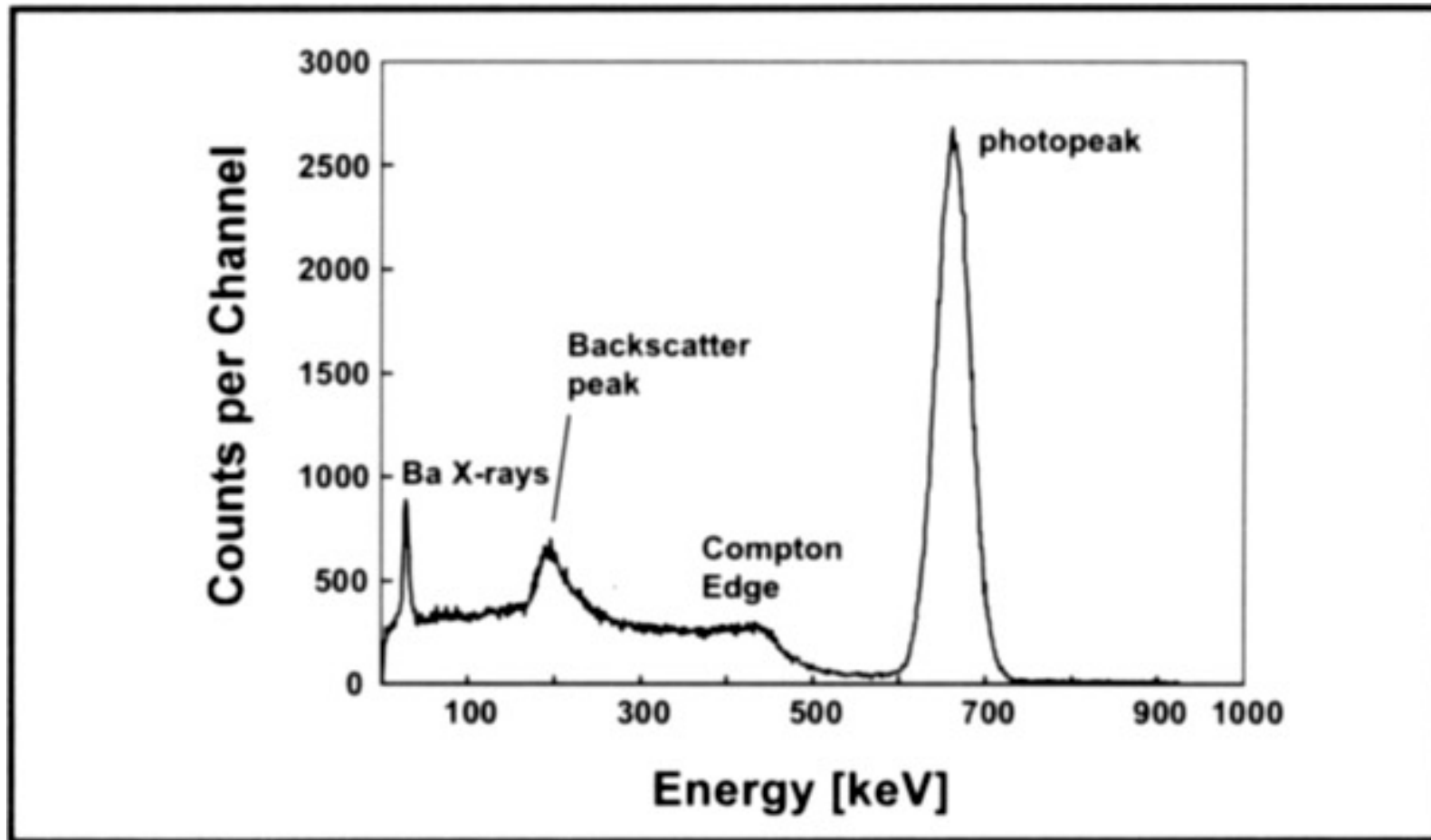


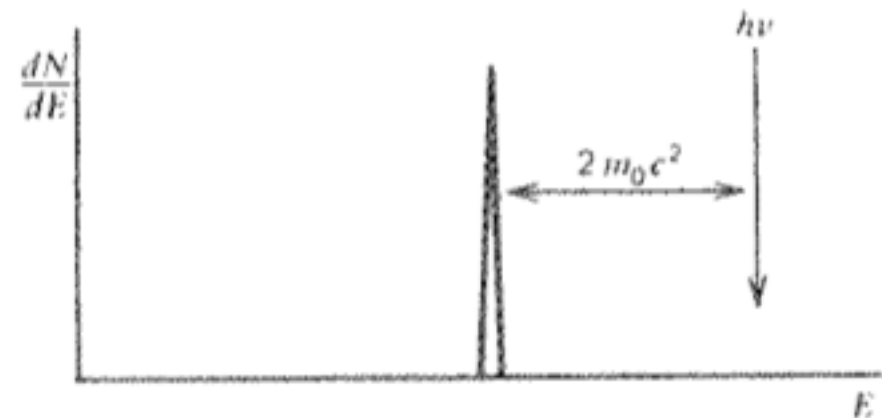
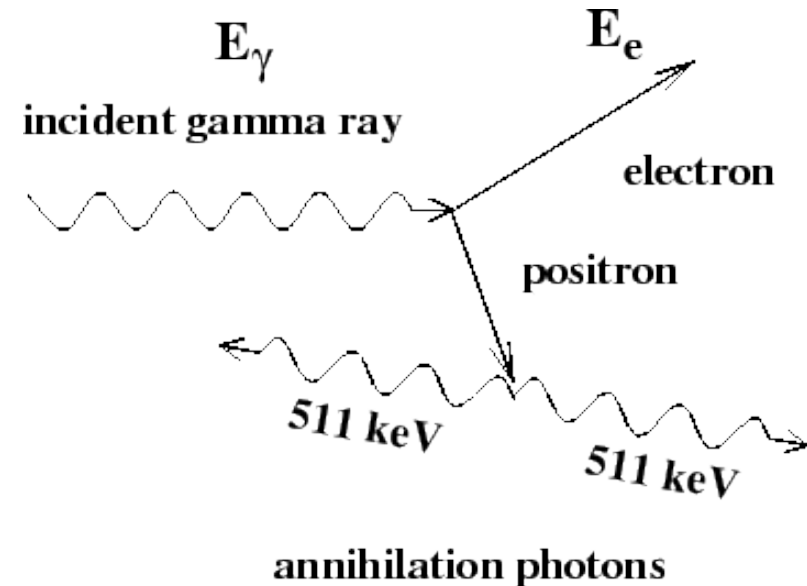
Fig. 2.1 *Typical pulse height spectrum of radiation emitted generated by a ^{137}Cs source detected in a 76 x 76 mm NaI(Tl) scintillation crystal.*

Andrea Bulgarelli (bulgarelli@iasfbo.inaf.it)

Produzione di coppie e^+e^-

- Energeticamente possibile per $E_\gamma > 1.02$ MeV ed in presenza di un campo elettrico di una particella (solitamente un nucleo atomico);
- Il fotone gamma incidente viene convertito in una coppia e^+e^- che assumono tutta l'energia in eccesso
- Il e^+ si annichila con un e^- dell'assorbitore e 2 fotoni gamma da 511 keV ciascuno vengono emessi in direzioni opposte;
- Presenza dei picchi di "fuga singola" e/o "doppia fuga" al variare delle dimensioni e della composizione del

$$E_{e^-} + E_{e^+} = h\nu - 2m_0c^2$$



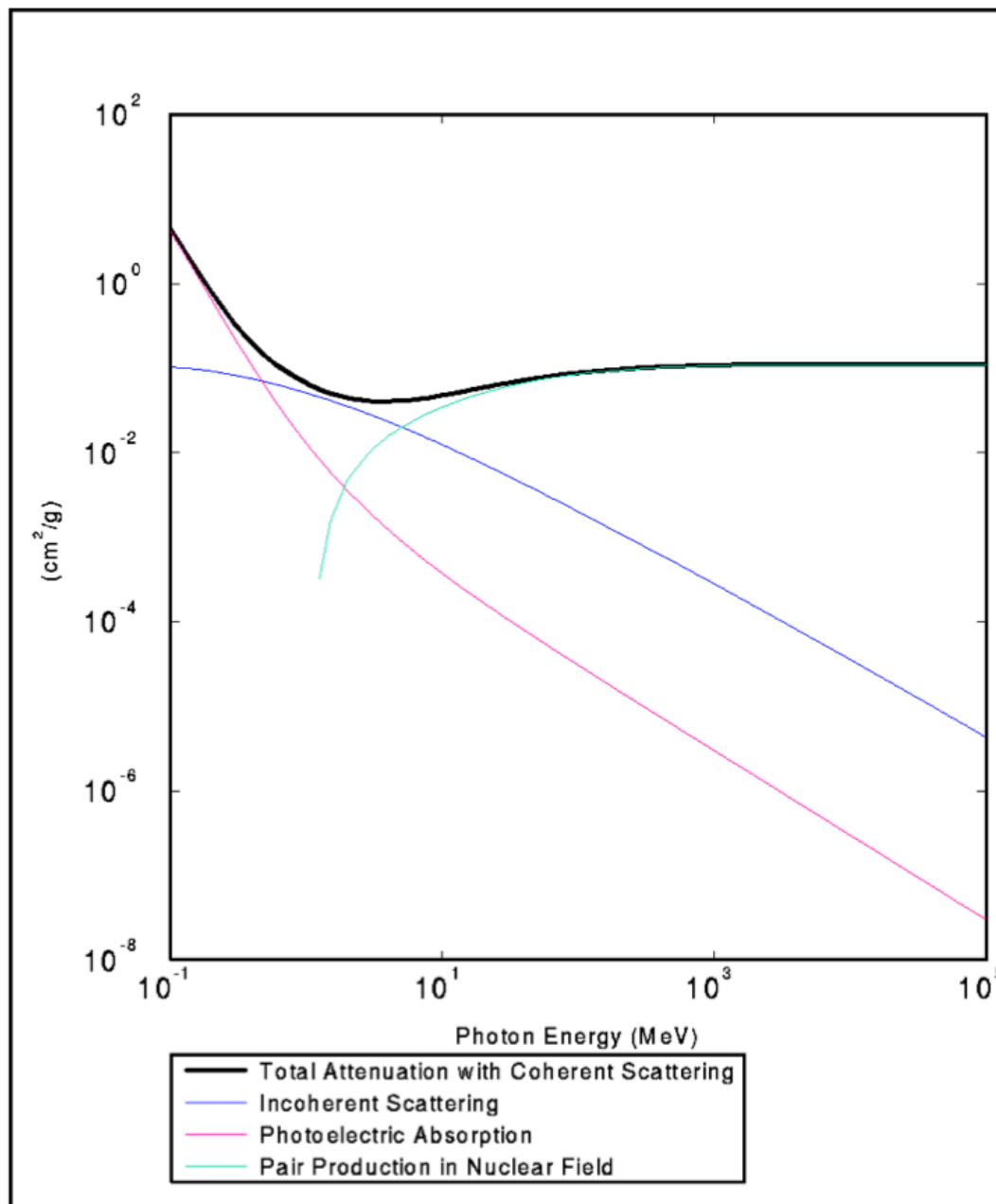
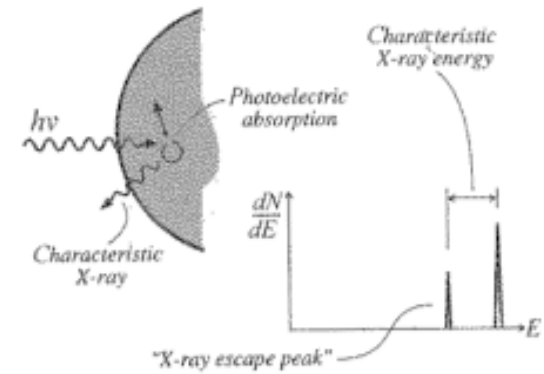
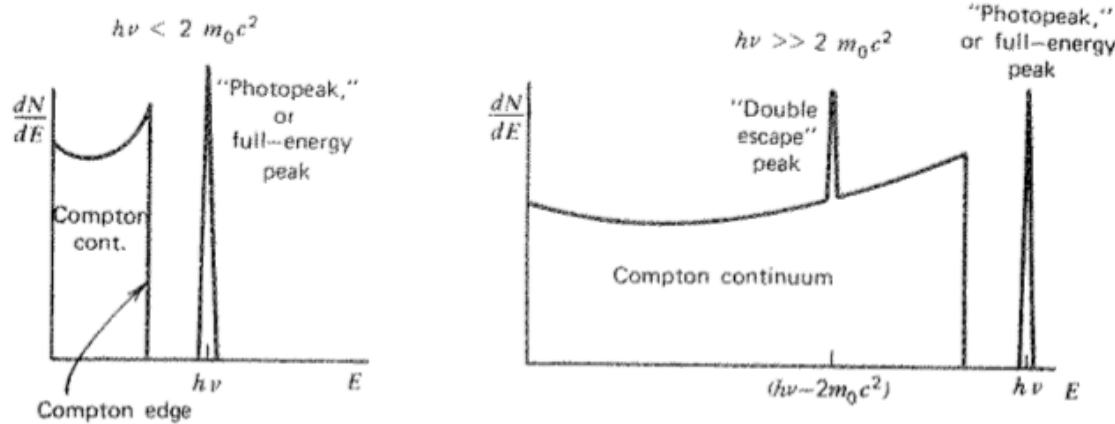
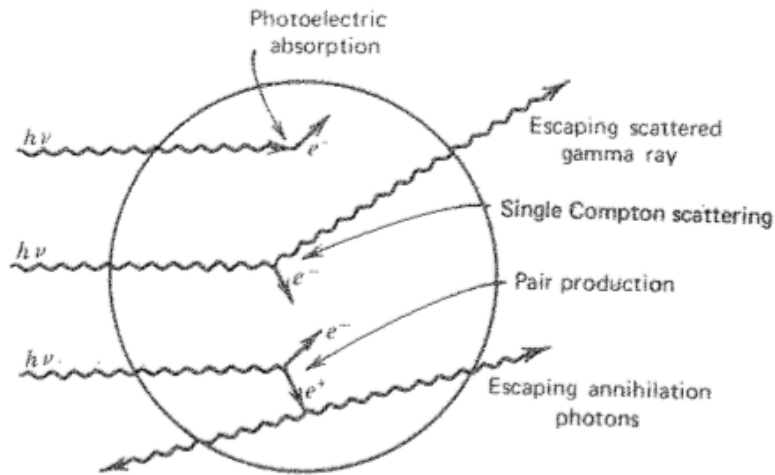


Figura 3.4: Sezione d'urto del Tungsteno relativa ai principali processi di perdita di energia per fotoni gamma. Per alte energie la produzione di coppie domina sugli altri processi.

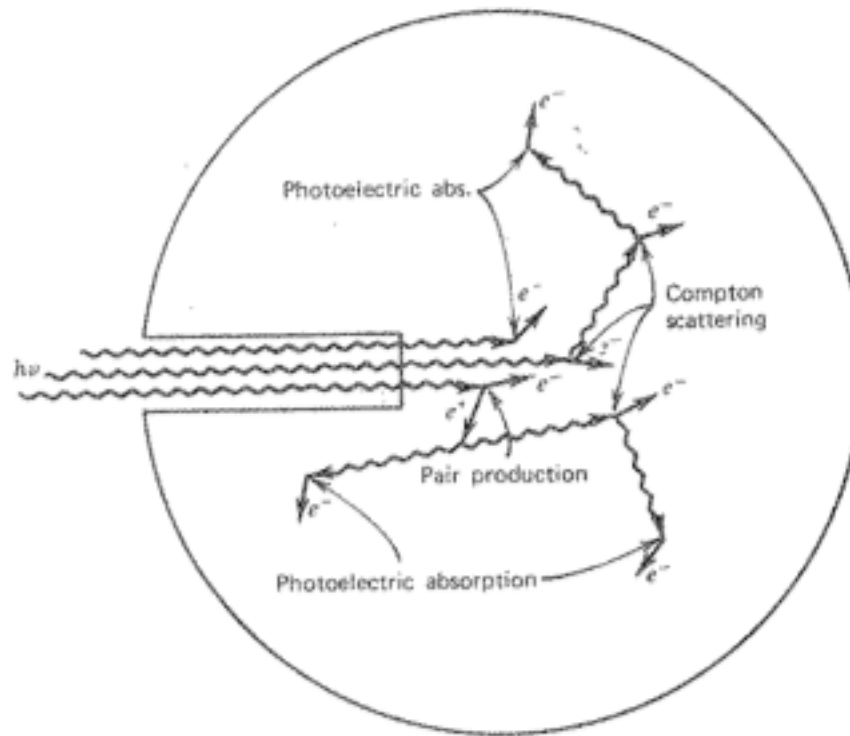
Risposta del rivelatore

Geometria = dove vanno i fotoni secondari?

Small detector



+ righe derivanti dagli X-ray escape per diseccitazione in conseguenza di assorbimento fotoelettrico



Big detector

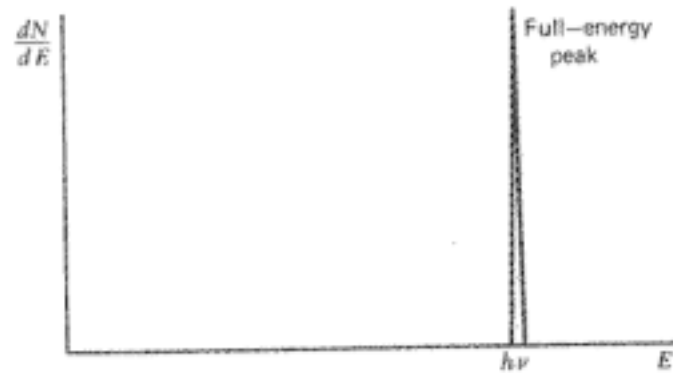
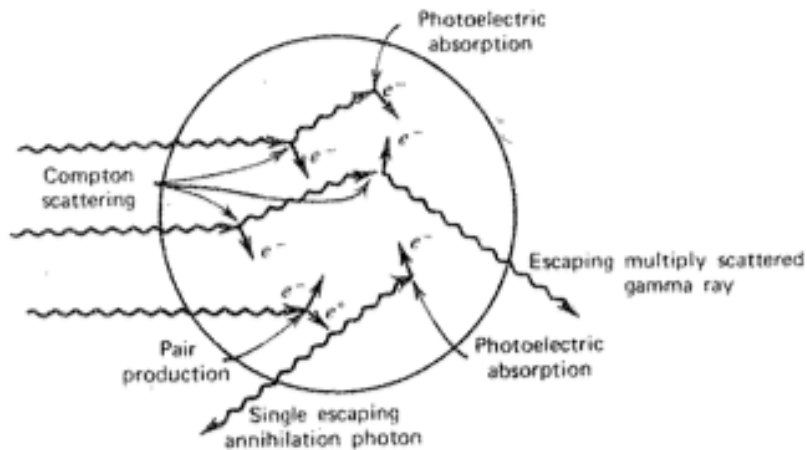
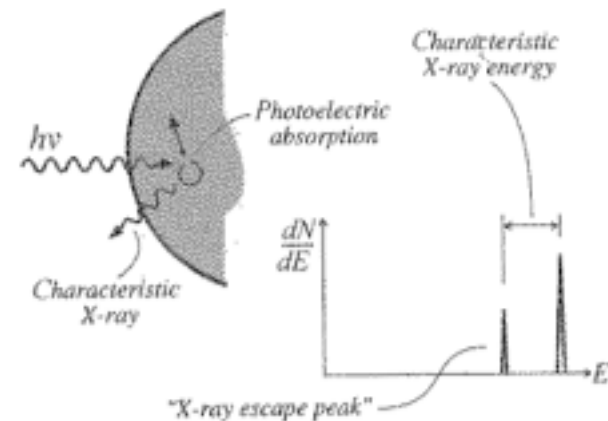
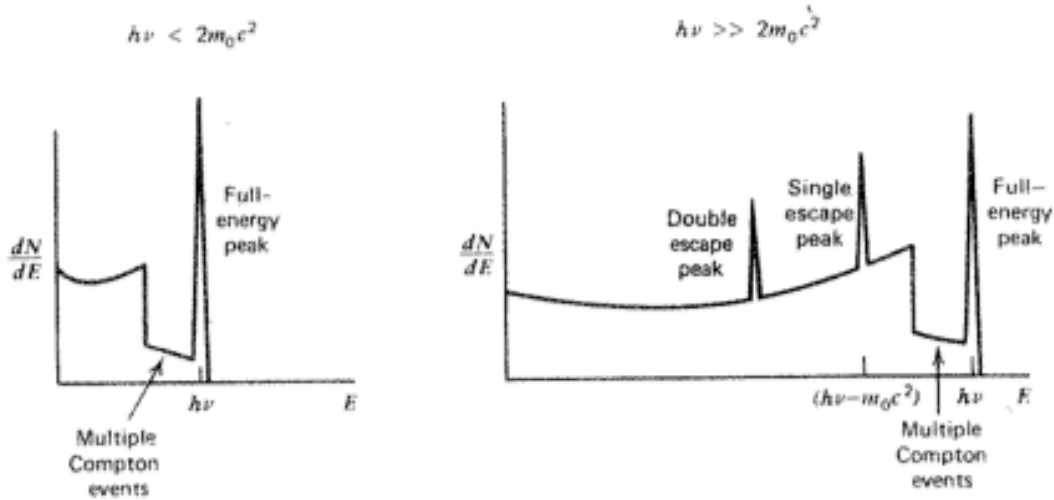


Figure 10.3 The “large detector” extreme in gamma-ray spectroscopy. All gamma-ray photons, no matter how complex their mode of interaction, ultimately deposit all their energy in the detector. Some representative histories are shown at the top.



Intermediate size detector



+ righe derivanti dagli X-ray escape per diseccitazione in conseguenza di assorbimento fotoelettrico

Figure 10.4 The case of intermediate detector size in gamma-ray spectroscopy. In addition to the continuum from single Compton scattering and the full-energy peak, the spectrum at the left shows the influence of multiple Compton events followed by photon escape. The full-energy peak also contains some histories that began with Compton scattering. At the right, the single escape peak corresponds to initial pair production interactions in which only one annihilation photon leaves the detector without further interaction. A double escape peak as illustrated in Fig. 10.2 will also be present in those pair production events in which both annihilation photons escape.

Effetto di materiale attorno al detector

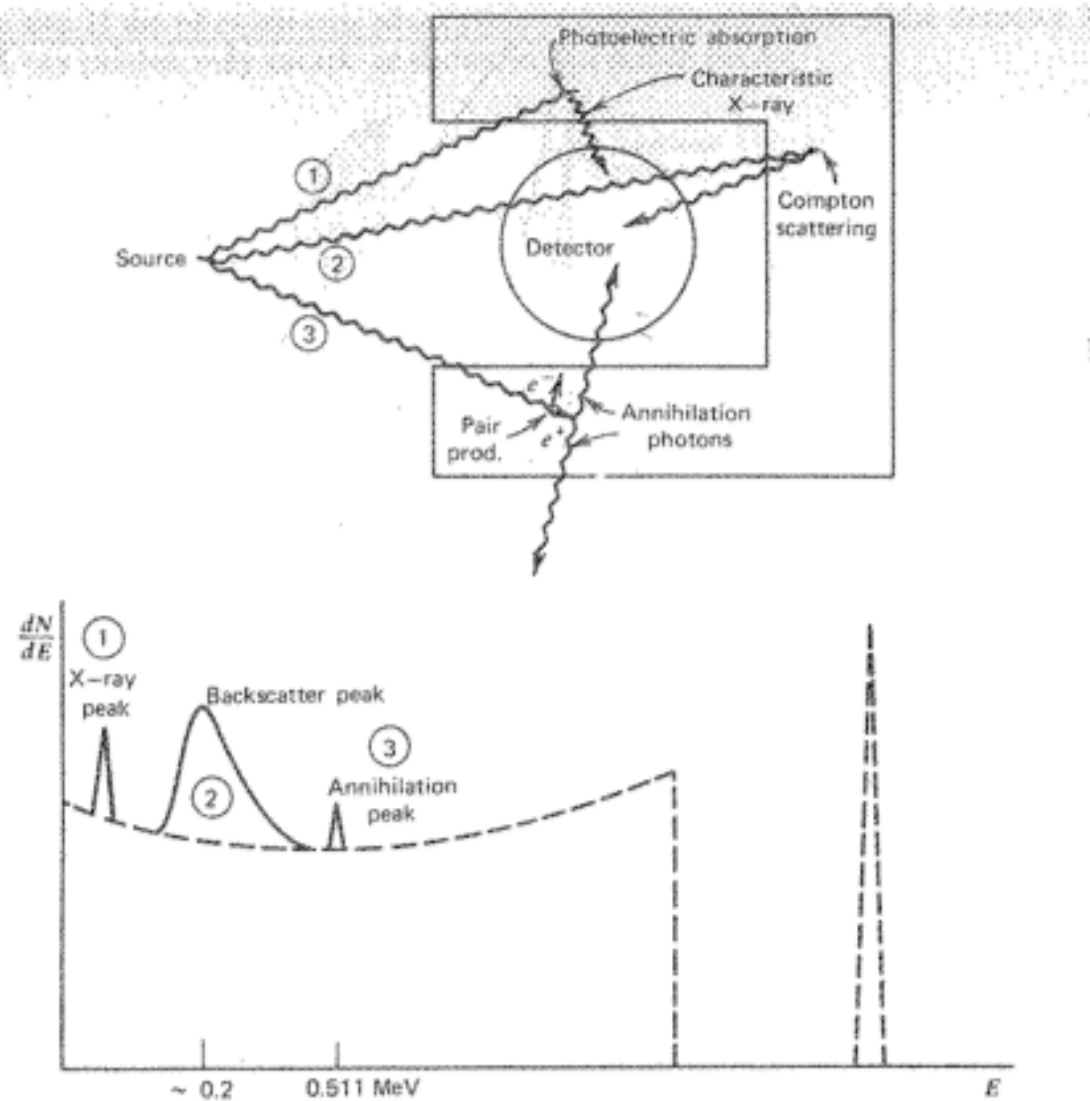
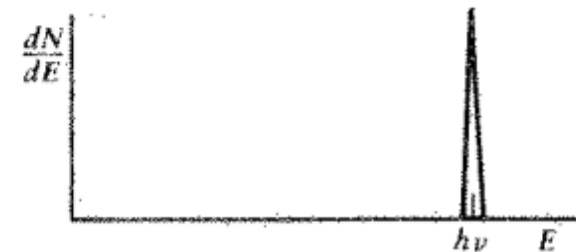


Figure 10.6 Influence of surrounding materials on detector response. In addition to the expected spectrum (shown as a dashed line), the representative histories shown at the top lead to the indicated corresponding features in the response function.

Andrea Bulgarelli (bulgarelli@iasfbo.inaf.it)

Riassunto prima parte

- I materiali
 - $\mu = \lambda / \rho$ (cm^2/g)
- I processi di interazione radiazione/materia
 - Assorbimento fotoelettrico: fotoelettrone (+ characteristic X-ray)
 - Compton scattering (recoil electron + scattered photon)
 - Produzione di coppia ($e^+/e^- \rightarrow$ anichilazione $e^+ \rightarrow 2$ fotoni da m_0c^2)
- La risposta (Edep) del rivelatore



Seconda parte

Efficienza di rivelazione - teorica

- Probabilità che un fotone gamma incidente depositi energia nel rivelatore

$$\epsilon = 1 - \frac{I}{I_0} = 1 - e^{-\mu\rho l}$$

- Dipende da: energia, spessore, materiale

Esempio:

$\rho = 5.81 \text{ g/cm}^3$

$\mu(\text{PE}) = 3.78\text{E-}01 \text{ cm}^2/\text{g}$ a 150 keV

Se $l = 0.003 \text{ cm} \rightarrow \epsilon * 100 = 0.66$

Se $l = 0.03 \text{ cm} \rightarrow \epsilon * 100 = 6.4$

Se $l = 0.3 \text{ cm} \rightarrow \epsilon * 100 = 48.3$

Se $l = 3 \text{ cm} \rightarrow \epsilon * 100 = 99.8$

Risposta del rivelatore – Caso “ideale” e “reale”

- Ideale = delta function al full energy peak
- Rumore proveniente da diverse fonti

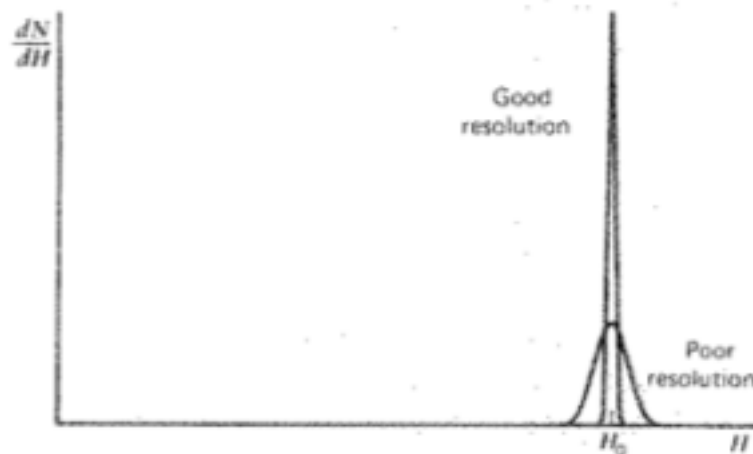


Figure 4.4 Examples of response functions for detectors with relatively good resolution and relatively poor resolution.

large amount of fluctuation are recorded from pulse to pulse even though the same energy was deposited in the detector for each event

it is important to make these fluctuation smaller

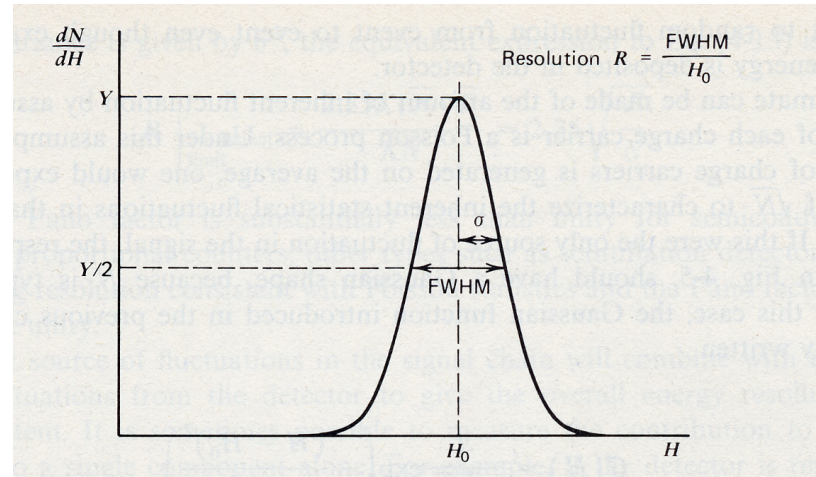
Risoluzione energetica – definizione e statistical noise

- Parametro fondamentale: capacità di discriminare fotoni di energie diverse
- La risoluzione energetica di un detector e' espressa in termini di larghezza (FWHM) del foto-picco

$$R = \frac{FWHM}{H_0} = \frac{2.35\sigma}{H_0}$$

Risoluzione sperimentale

This ratio is normally expressed as a percentage, and small values correspond to narrow peaks and good energy resolution



- Se ipotizziamo $H_0 = KN$ (risposta lineare)

- $\rightarrow \sigma = K \sqrt{N}$



$$R_{Poisson} = \frac{FWHM}{H_0} = \frac{2.35K\sqrt{N}}{KN} = \frac{2.35}{\sqrt{N}}$$

- Attenzione ! Processi di creazione coppia ione- e^- non indipendenti

- \rightarrow Poisson semplice non applicabile

- Fattore di Fano:

- $F = \frac{\text{varianza osservata in } N}{\text{varianza Poissoniana attesa}}$

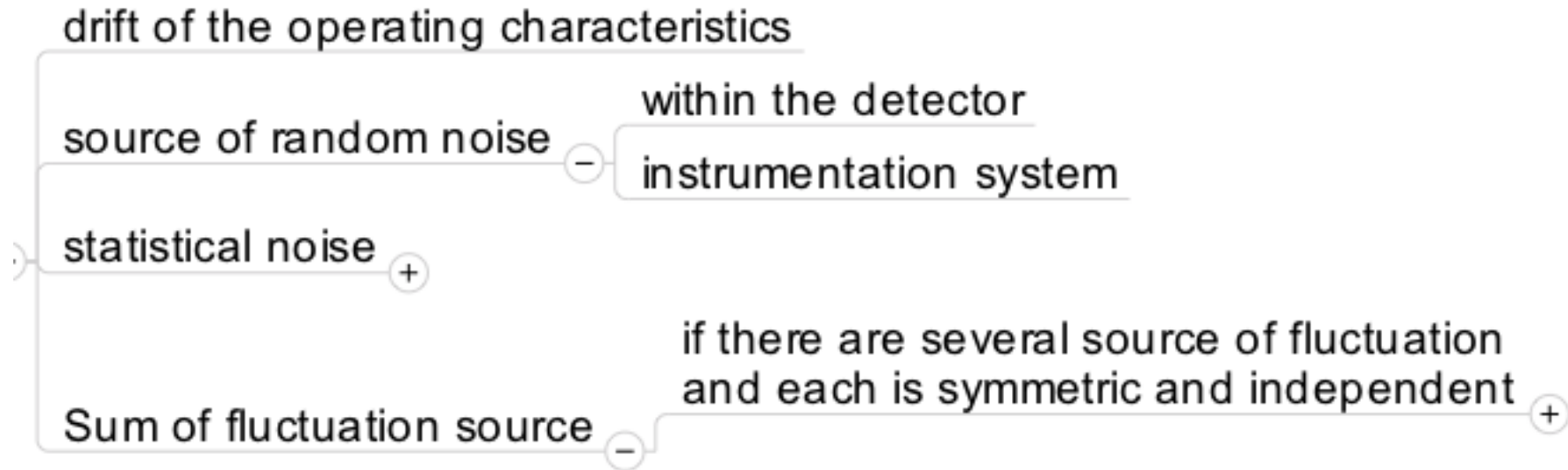
$$R_{Stat.Limit} = \frac{2.35K\sqrt{N}\sqrt{F}}{KN} = 2.35\sqrt{\frac{F}{N}}$$

Andrea Bulgarelli (bulgarelli@iasfbo.inaf.it)



Limite statistico

Risoluzione energetica - sorgenti di fluttuazione



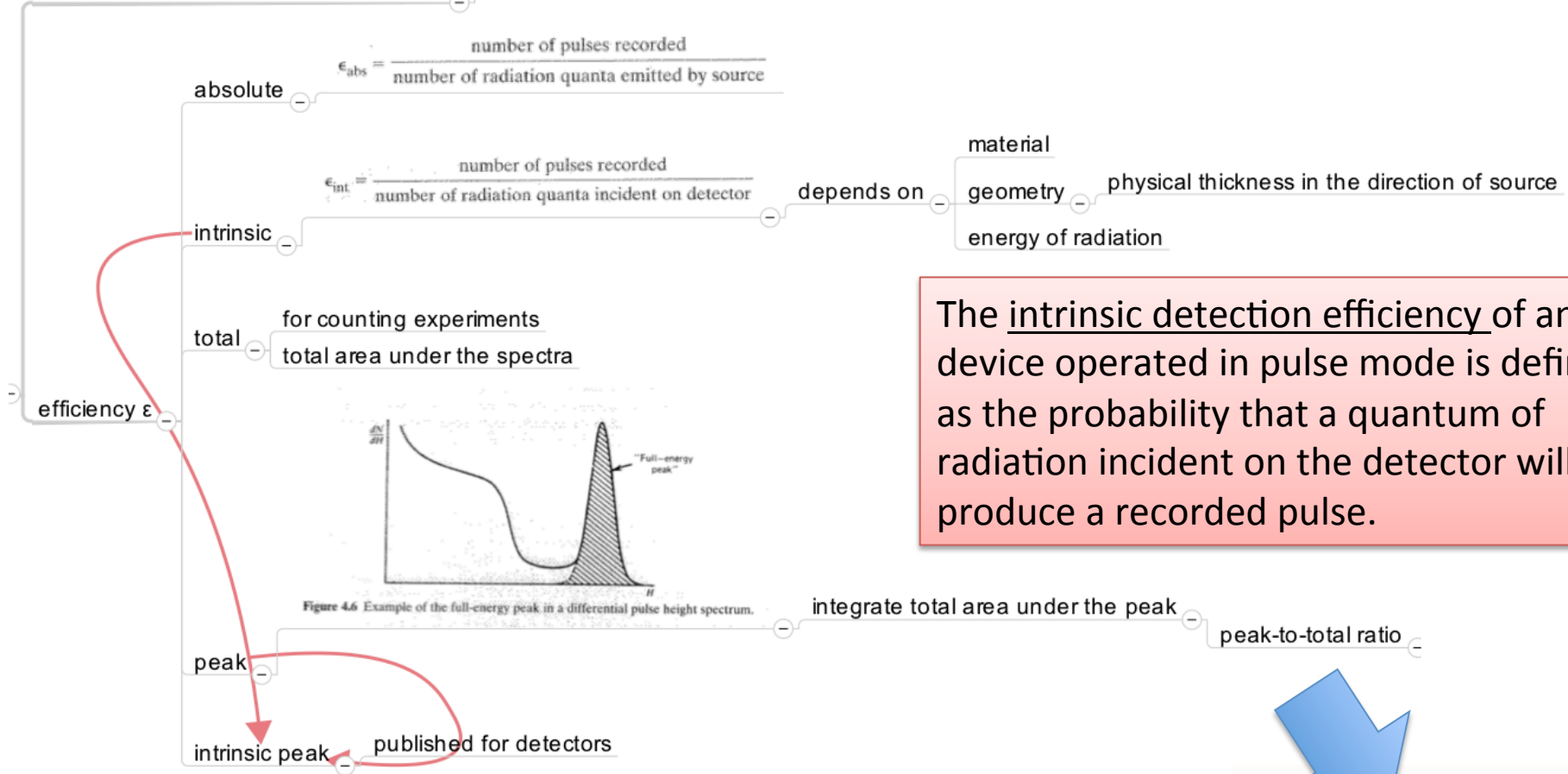
$$(\text{FWHM})_{\text{overall}}^2 = (\text{FWHM})_{\text{statistical}}^2 + (\text{FWHM})_{\text{noise}}^2 + (\text{FWHM})_{\text{drift}}^2 + \dots$$

La misura della risoluzione energetica definita in precedenza ci permette comunque di capire il nostro detector anche senza entrare nel dettaglio della comprensione di tutte le componenti

Efficienza di rivelazione - reale

the photons can travel large distances between interactions

detection are often less than 100% of efficiency



The intrinsic detection efficiency of any device operated in pulse mode is defined as the probability that a quantum of radiation incident on the detector will produce a recorded pulse.

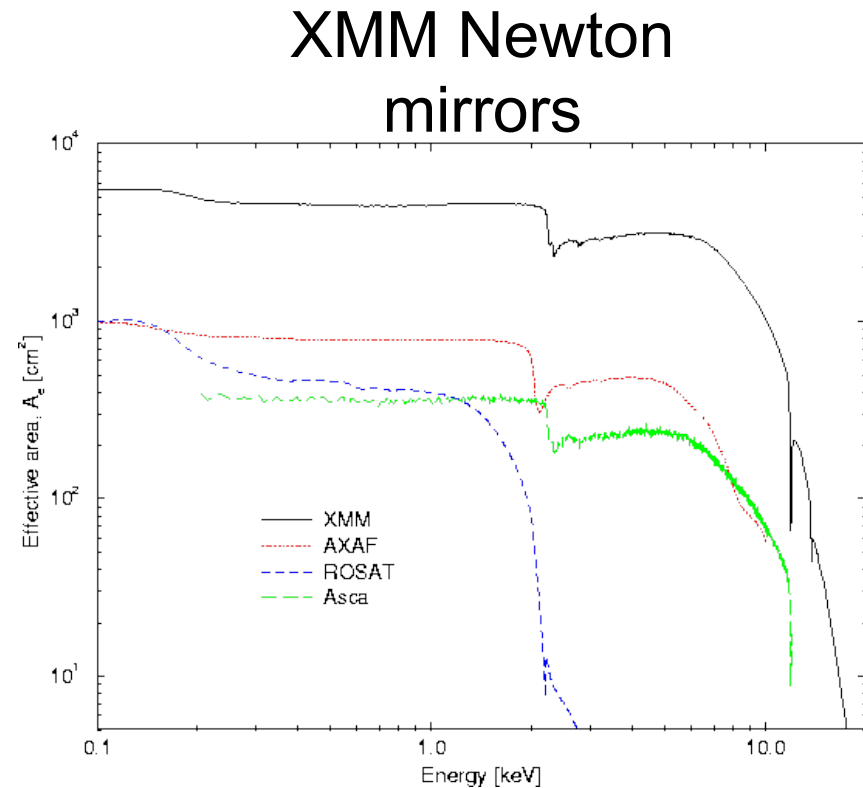
$$r = \frac{\epsilon_{peak}}{\epsilon_{total}}$$

QE = Quantum efficiency = percentage of photons hitting the **photoreactive** surface that will produce an electron-hole pair

Andrea Bulgarelli (bulgarelli@iasfbo.inaf.it)

Area efficace: $A \times \varepsilon$

- effective area, reflects the ability of the detectors/mirrors to collect radiation at different photon energies.



Sensibilità (Sensitivity)

- Sensibilità = flusso minimo rivelabile di una sorgente;
 - Emissione nel continuo: fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{keV}^{-1}$
 - Emissione di righe: fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
- C_S = Tasso di conteggi di sorgente (photons)
- C_{Bkg} = Tasso di conteggi di fondo (cts) assumendo una statistica poissoniana: $f(k; \lambda) = \text{Pr}(X = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$,

$$\mathbf{SNR} = \mathbf{n}_\sigma = \frac{C_S}{\sqrt{C_S + C_{Bkg}}}$$

Sensibilità (collimato)

- $C_s = \varepsilon \times A \times T \times \Delta E \times F$
- $C_B = A \times T \times \Delta E \times B$
- Nel caso di sorgenti deboli ($\varepsilon F < B$):

$$\mathbf{SNR} = \mathbf{n}_\sigma = \frac{\mathbf{C}_s}{\sqrt{\delta\mathbf{B}}} = \frac{\varepsilon \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{T} \cdot \Delta\mathbf{E} \cdot \mathbf{F}}{\sqrt{\mathbf{A} \cdot \mathbf{T} \cdot \Delta\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}}}$$

F = flusso di fotoni incidenti dalla sorgente
(photons/cm²/s/keV)

B = C_{bkg} (cts/cm²/s/keV)

A = Area sensibile (cm²)

ΔE = intervallo energetico (keV)

ε = efficienza di rivelazione

T = tempo di integrazione (s)

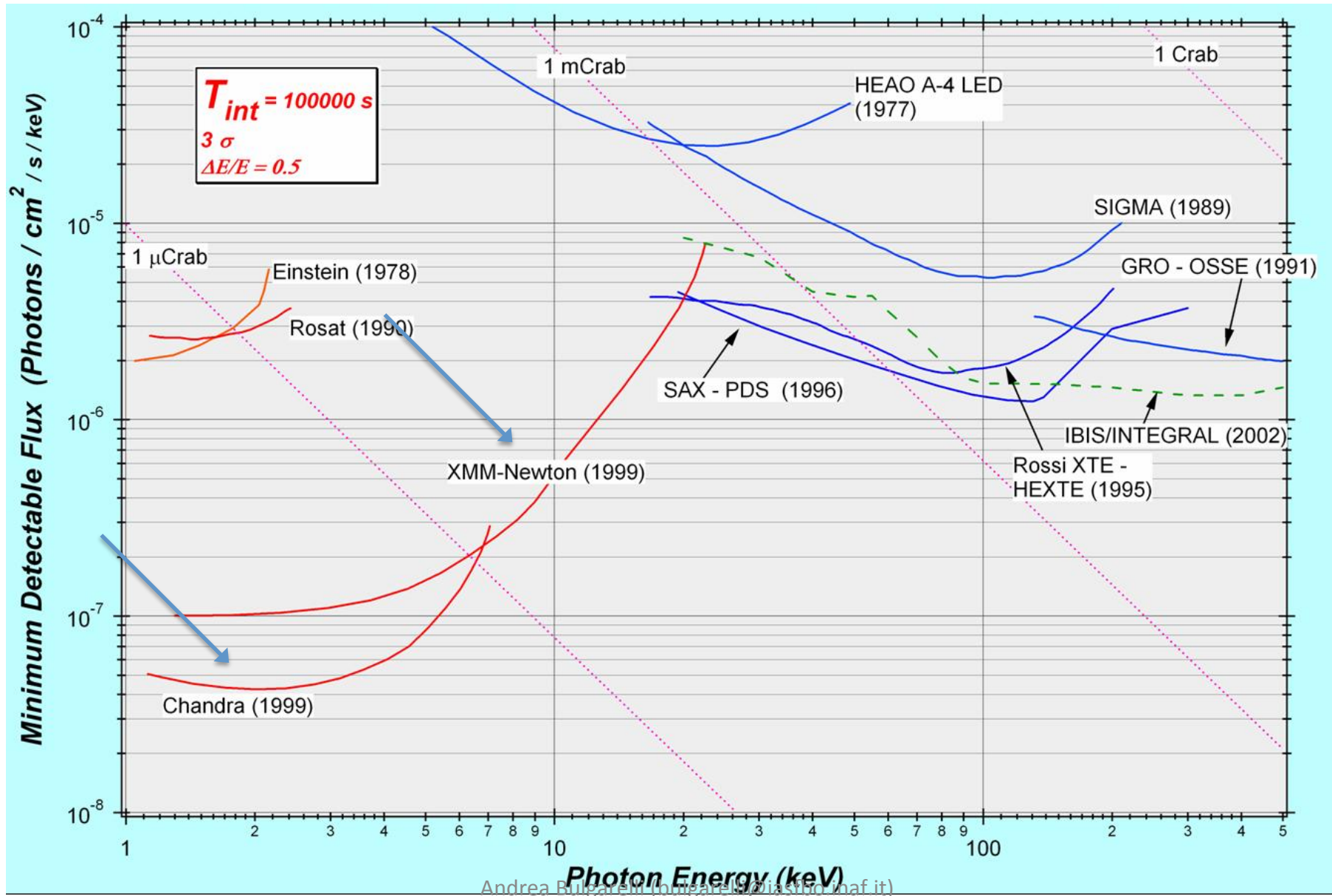


Estraiamo F

$$\mathbf{F}_{\text{Min}} = \frac{\mathbf{n}_\sigma}{\varepsilon} \sqrt{\frac{\mathbf{B}}{\mathbf{A} \mathbf{T} \Delta\mathbf{E}}}$$

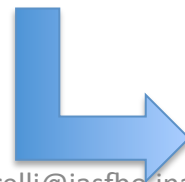
Il minimo flusso rivelabile è quindi proporzionale a $A^{-1/2}$. Cio` significa che per migliorare di un fattore 10 la sensibilità occorrerebbe aumentare la superficie del rivelatore di un fattore 100.

Sensibilità

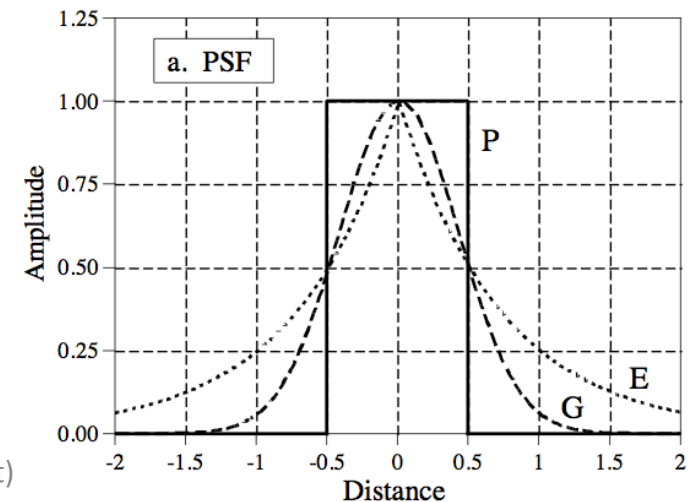


Risoluzione angolare/spaziale

- Descrive l'abilità del detector nel separare oggetti puntiformi
- La risoluzione angolare di uno strumento è determinata dalla Point Spread Function (PSF), che dipende da (1) posizione della sorgente sul detector (2) dall'energia dei fotoni emessi dalla sorgente
- Encircled energy fraction: % di fotoni che cadono in un cerchio di un dato raggio centrato sul centroide della PSF --> 50% → HEW (Half Energy Width)
- Si dà anche FWHM, ma HEW è più rappresentativo perché spesso la PSF non è una gaussiana



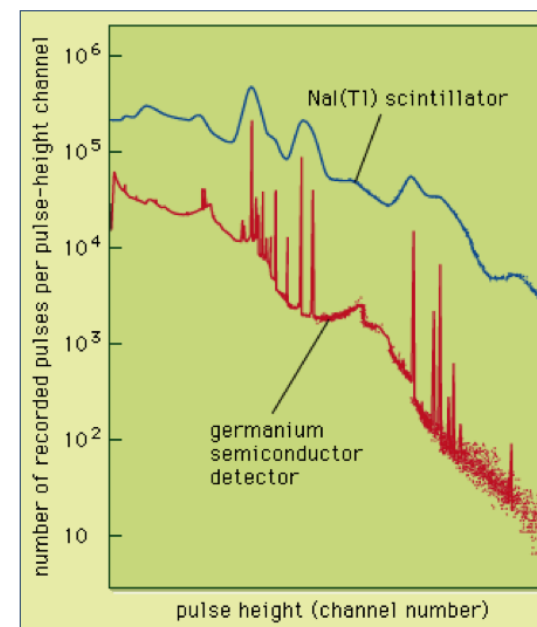
Andrea Bulgarelli (bulgarelli@iasfbo.inaf.it)



Terza parte

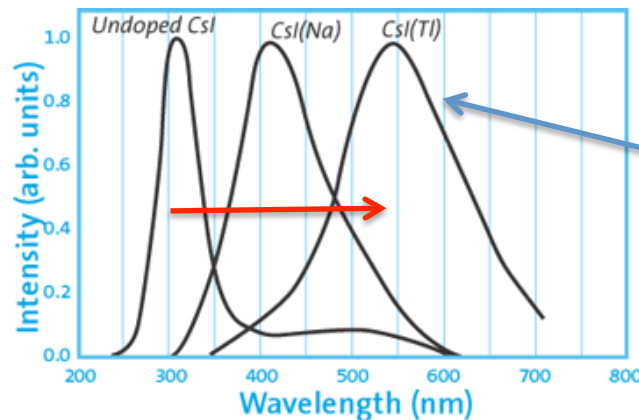
Rivelatori per astronomia X/ γ

- Basse-medie energie (1-20 keV)
 - Microchannel plates
 - Contatori proporzionali
 - Microcalorimetri
 - CCD
- Energie intermedie (15 keV – MeV)
 - Scintillatori
 - Alta efficienza, moderata $\Delta E/E$, $\Delta x \sim 0.5\text{cm}$
 - Rivelatori a stato solido
 - Alta efficienza, alta $\Delta E/E$, problema cooling, $\Delta x \sim 0.1\text{mm}$
 - Vantaggio Si: processo di produzione consolidato
- Alte energie (MeV – GeV)
 - Spark chambers
 - Converteri / Tracker

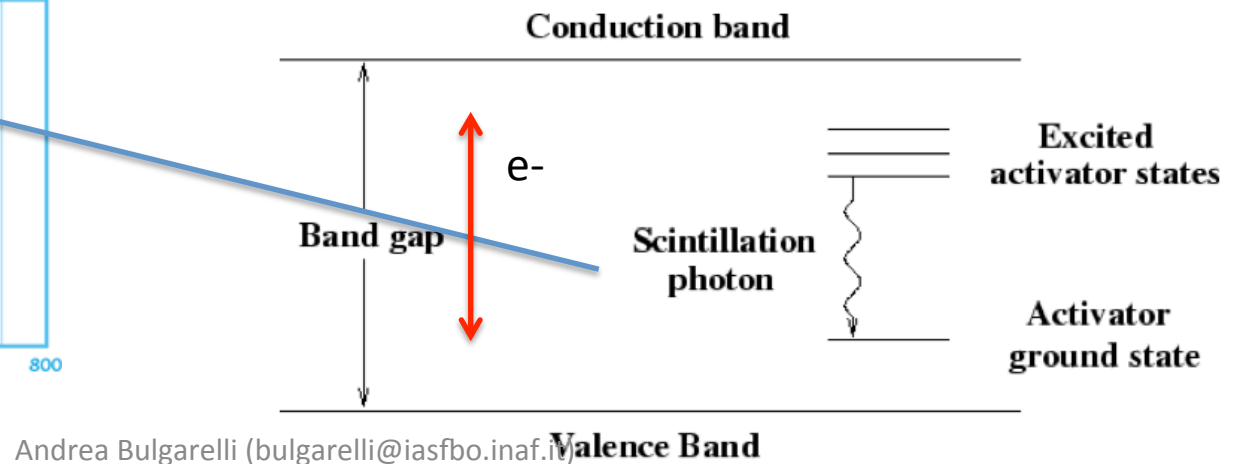


Scintillators

- **Scintillatore** = Materiale che presenta scintillazione (luminescenza quando eccitato da radiazione elettromagnetica)
 - Sono composti in genere da alogenuri alcalini, ad esempio NaI
- Il γ incidente interagisce nel cristallo creando un elevato numero di fotoni ottici \rightarrow (come avviene?) il γ incidente cede parte della propria energia allo scintillatore causando **l'eccitazione di un elettrone della banda di valenza** che si sposta in un livello ad energia superiore nella **banda di conduzione**. Quando **l'elettrone decade** al livello che occupava prima dell'eccitazione **emette un fotone** di energia relativamente bassa, tipicamente nel visibile.
- I livelli energetici sono determinati dalla struttura del reticolo cristallino \rightarrow la band gap separa la banda di valenza dalla banda di conduzione
- Processo inefficiente \rightarrow Il "drogaggio" del reticolo cristallino con impurità rende più efficiente il processo (riduce band gap), riduce autoassorbimento, avere luce in uscita della lunghezza d'onda voluta
- Scintillatori a cristalli inorganici



(luce di scintillazione)



Andrea Bulgarelli (bulgarelli@iasfbo.inaf.it)

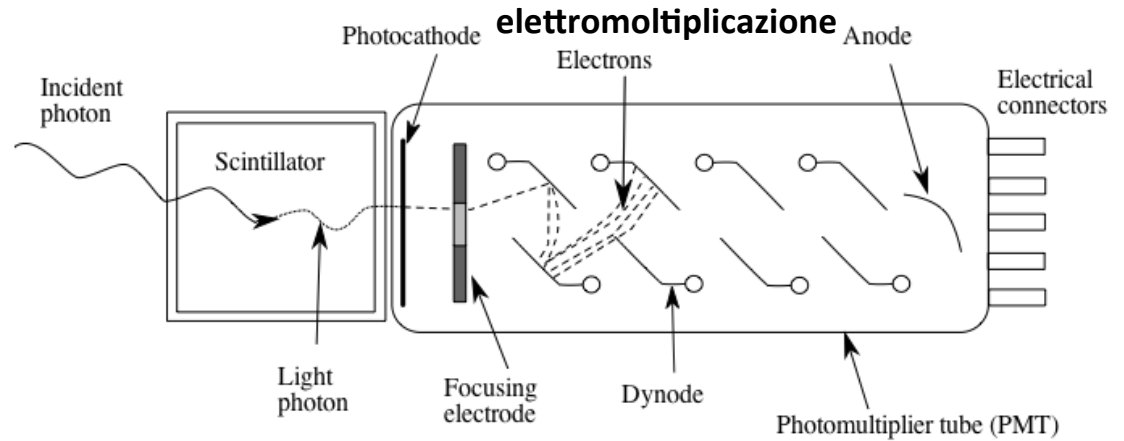
Valence Band

Scintillatore - requisiti

- Elevata efficienza di conversione dell'energia dei fotoni in luce di fluorescenza (**efficienza di scintillazione**);
- L'intensità della luce deve essere linearmente proporzionale all'energia delle particelle e quindi all'energia persa dal fotone gamma primario (**linearità**);
- **Trasparenza** alla λ della propria luce di fluorescenza (picco a ~ 550 nm per il CsI(Tl));
- Elevati ρ e $Z \Rightarrow$ elevato μ_{pe} \Rightarrow elevata ε e potere spettroscopico;
- Indice di rifrazione vicino a quello del vetro per ottimizzare l'accoppiamento ottico con dispositivi per la lettura della luce (PMT, PD);

A **scintillation detector** or **scintillation counter** is obtained when a scintillator is coupled to an electronic light sensor such as a **photomultiplier tube (PMT)** or a **photodiode**.

PMT: photoelectric effect and secondary emission

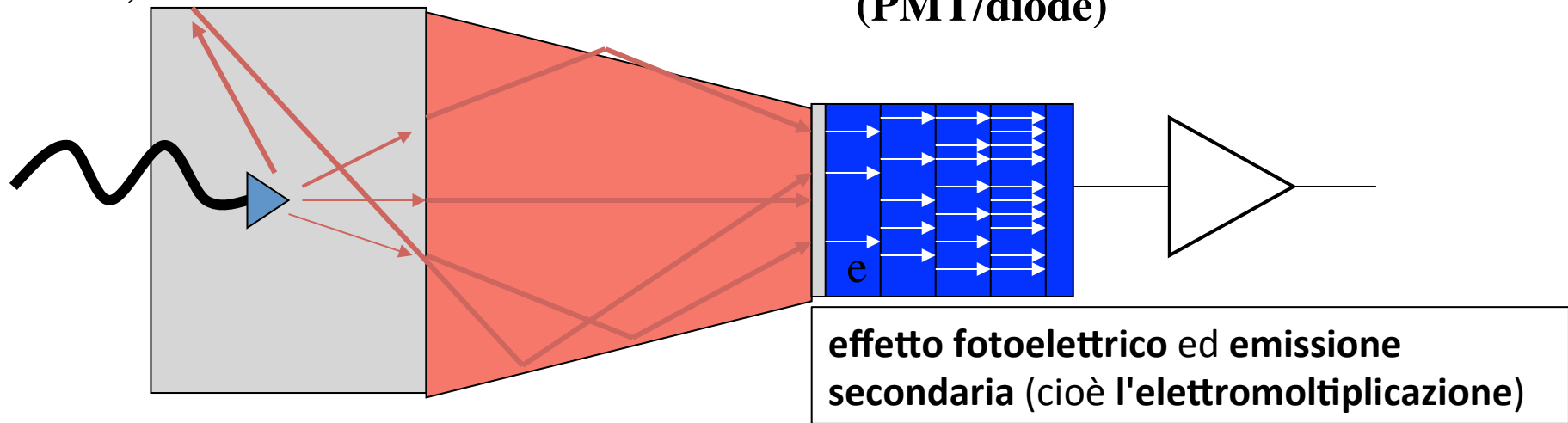


X-ray/gamma-ray absorber - e.g. CsI, NaI, BGO

Light guide

Light → e⁻ converter (PMT/diode)

Electronic signal



Scintillation crystal NaI (Tl)
0.5 MeV → 3 eV photons,
~12% efficiency:
20000 γ

Light guide
70% efficient:
14000 γ

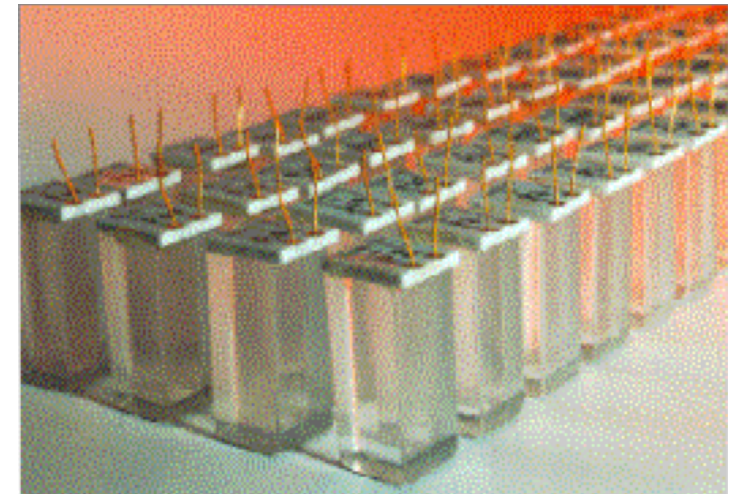
Alkali photocath.
10% efficient:
 $N_{e^-} = 1400$

PMT

$$Noise_{Poisson} = \frac{1}{\sqrt{N_{e^-}}}$$

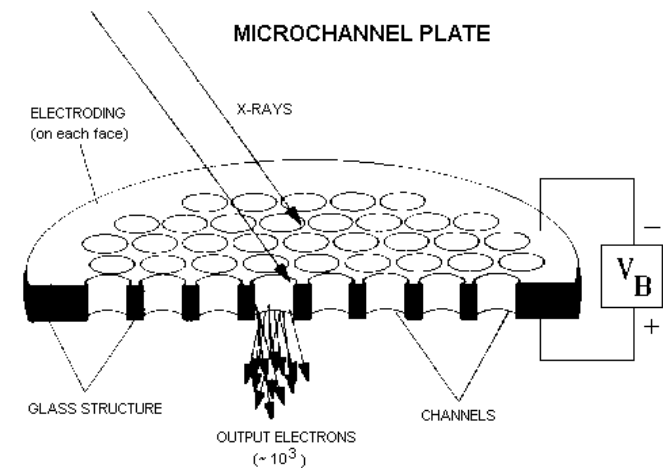
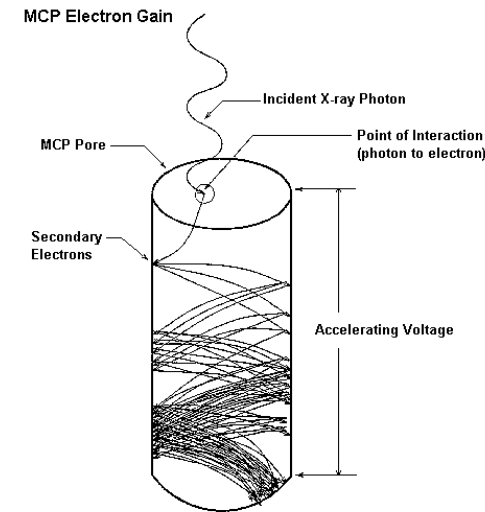
Position sensitive scintillation counter

- E' possibile costruire array di scintillatori con accoppiata la loro elettronica di lettura
- E' possibile usare anche un migliaio di questi elementi, ma richiede l'impiego di molta elettronica



Microchannel plate (Chandra)

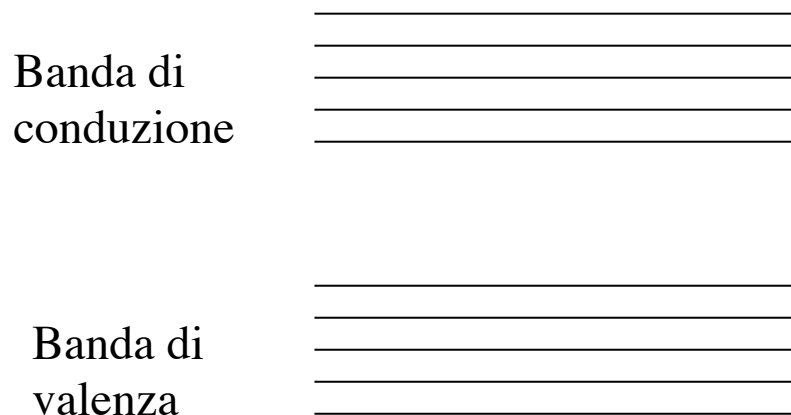
- Componente planare usato per catturare la radiazione
- Moltiplicatore di e- via emissione secondaria (**elettromoltiplicazione**)
- Matrice di $\sim 10^7$ elementi
- $10\mu/1\text{mm}$
- $G \sim 3 \times 10^7$
- Chandra:
 - 6.9×10^7
 - $10\mu/1.2\text{mm}$
 - 10cm^2
- Vetro al Pb ($\rho = 3.3 \div 4.3 \text{ g/cm}^3$):
 - PbO, SiO₂
- Single-channel mode up to $\sim 5 \text{ keV}$



Rivelatori a stato solido

Rivelatori **basati su materiali semiconduttori** che per rivelare la radiazione sfruttano le caratteristiche della struttura a bande dei cristalli (banda di valenza, banda di conduzione, band gap).

Per effetto di **processi di eccitazione** (ad esempio agitazione termica o assorbimento di radiazione) gli elettroni dalla banda di valenza (BV) vengono promossi in banda di conduzione (BC) e possono essere raccolti come segnale utile.

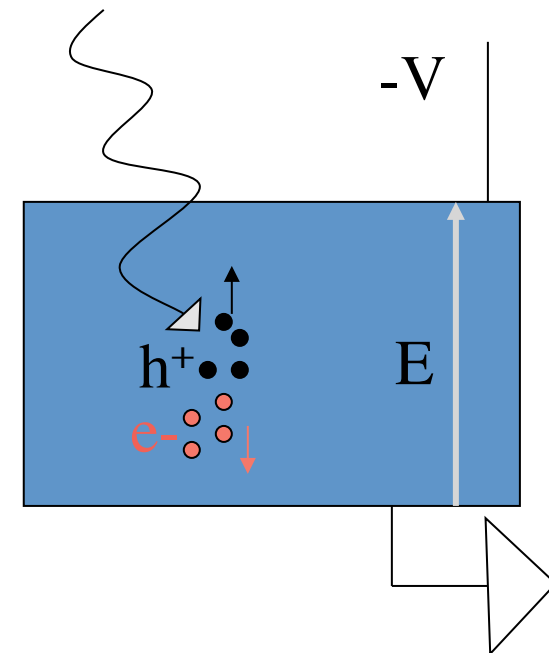


Band gap:

~1 eV: Ge, Si (raffreddati, ~80 °K)

≥1.5 eV “ room temperature semiconductor”

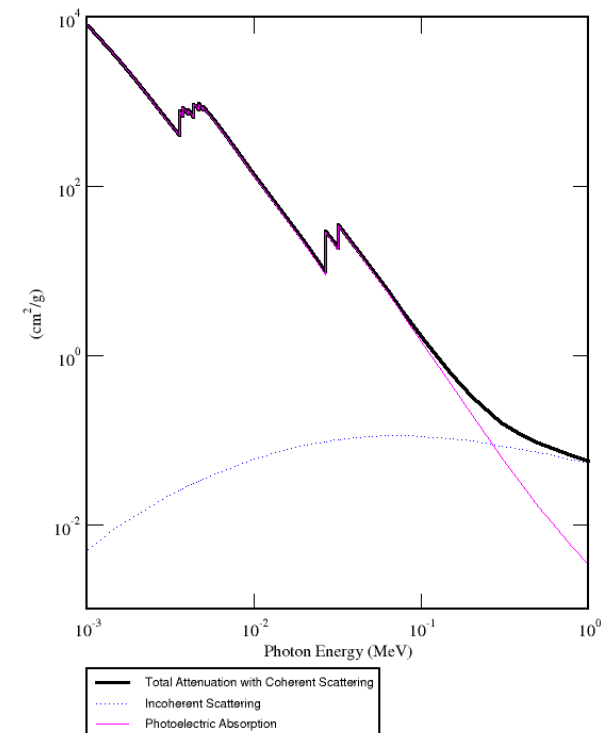
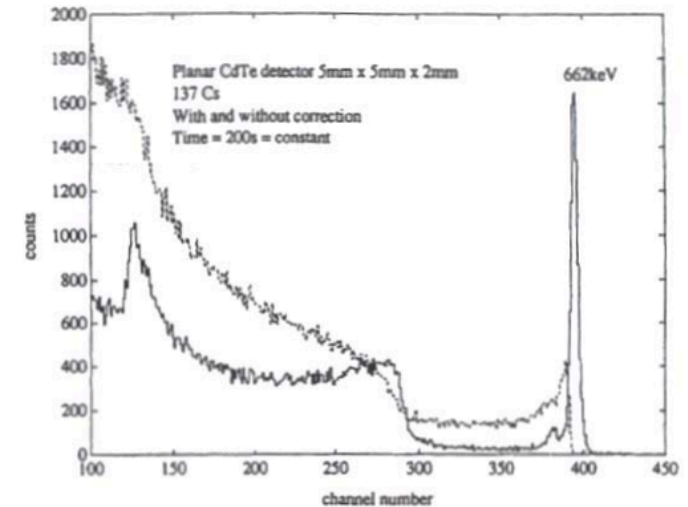
CdZnTe, CdTe, HgI₂



Rumore = capacità parassite, fluttuazioni statistiche produzione di carica, elettronica

Rivelatori a stato solido – CdTe

- Tellurio di Cadmio (CdTe)
- Energy gap (1.52 eV)
 - Non necessaria criogenia ->
 - corrente di buio contenuta
- Alta ρ ($\sim 6 \text{ g cm}^{-3}$) per efficienza
- Alto Z (48, 52) per effetto fotoelettrico:
 - 10 volte il μ_{Compt} fino a 110 keV (60 il Ge, 25 il Si);
 - buona efficienza di assorbimento fotoelettrico (per unità di lunghezza) - fino a 4 o 5 volte superiore al Ge e 100 volte maggiore a quella del Si
 - Single site ok per imaging
- Facilmente segmentabile a piccole dimensioni:
 - \Rightarrow risoluzione spaziale
- **bassa efficienza di raccolta delle cariche** (mobilità bassa rispetto a Si e Ge), comporta che la risoluzione energetica raggiungibile con il CdTe resta al di sotto di quella del Si o del Ge \rightarrow

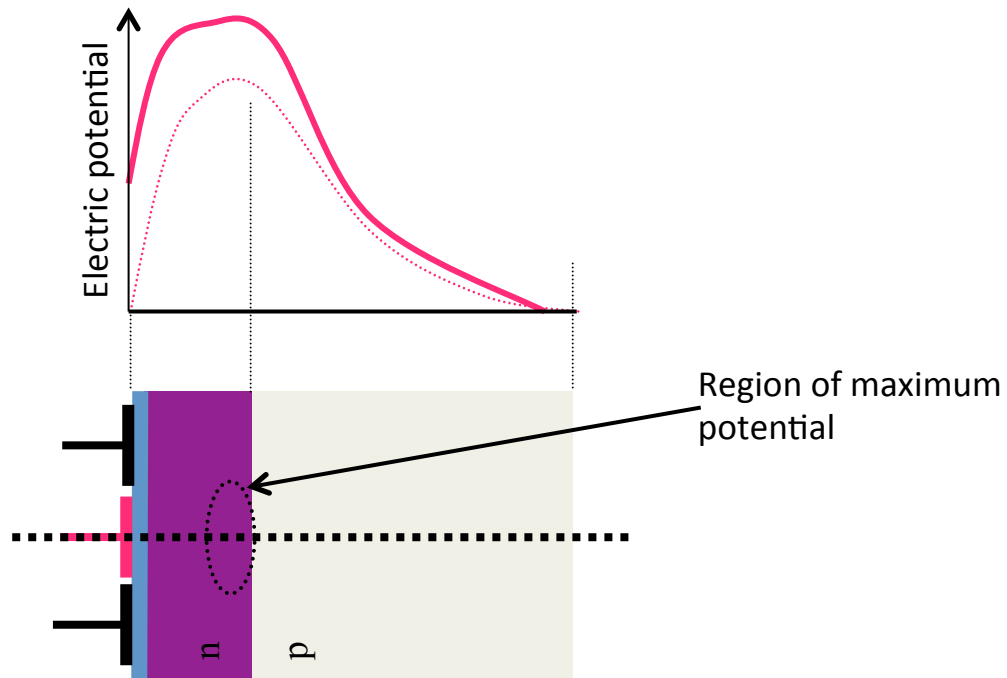


CZT

- CdZnTe -> CZT
- differenza con il CdTe puro consiste nell'inserire nella fase di crescita del cristallo, una certa quantità di ZnTe; con questo si ottiene un semiconduttore con un gap tipico di 1,5÷1,6 eV
- La corrente di buio del CZT è inferiore a quella del CdTe e questo ha come effetto la possibilità di applicare al semiconduttore campi elettrici relativamente intensi che rendono più veloce la raccolta del cariche

CCD - 1

During integration of the image, one of the electrodes in each pixel is held at a positive potential. This further increases the potential in the silicon below that electrode and it is here that the photoelectrons are accumulated. The neighboring electrodes, with their lower potentials, act as potential barriers that define the vertical boundaries of the pixel. The horizontal boundaries are defined by the channel stops.

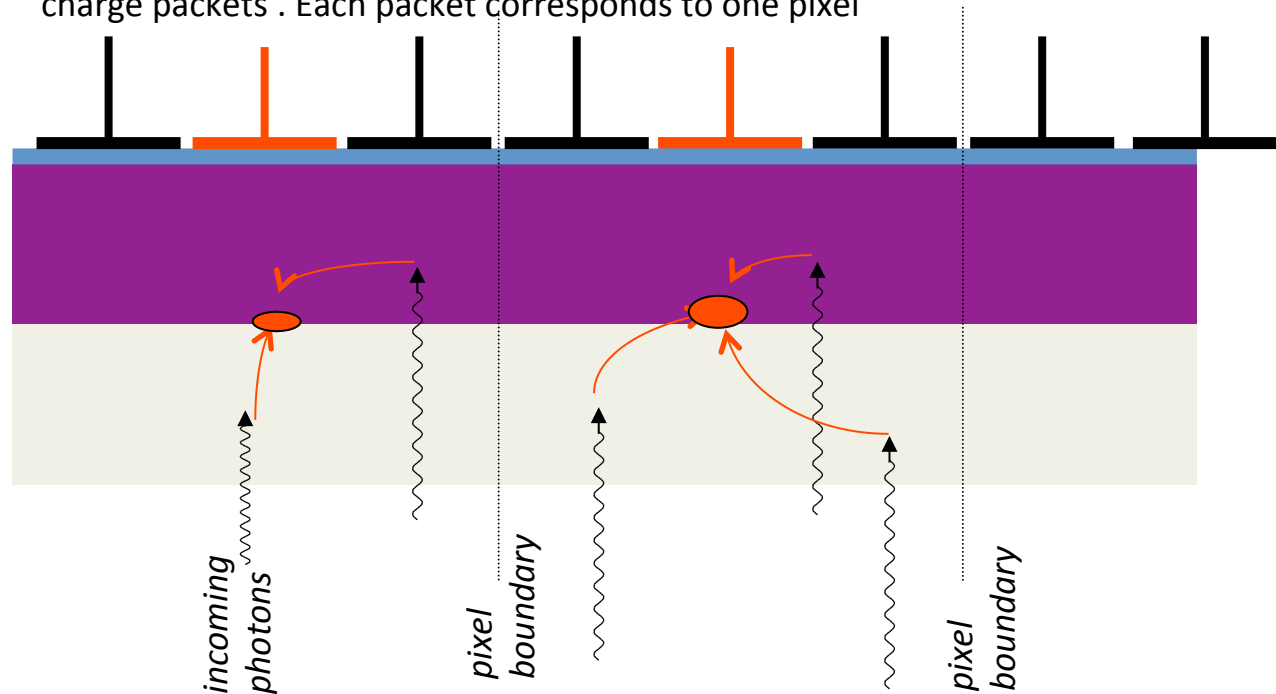
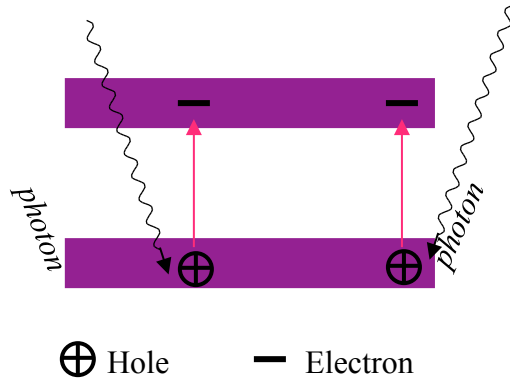


CCD - 2

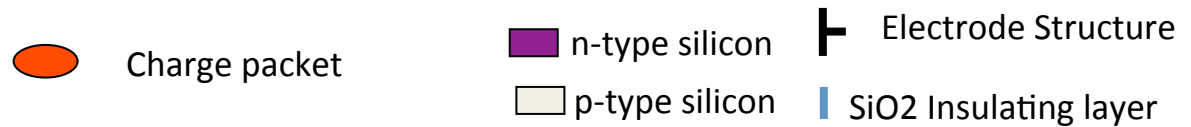
Si semiconductors come array detectors
Lavora per integrazione

CCDs are electronic devices, which work by converting light into electronic charge in a silicon chip (integrated circuit).

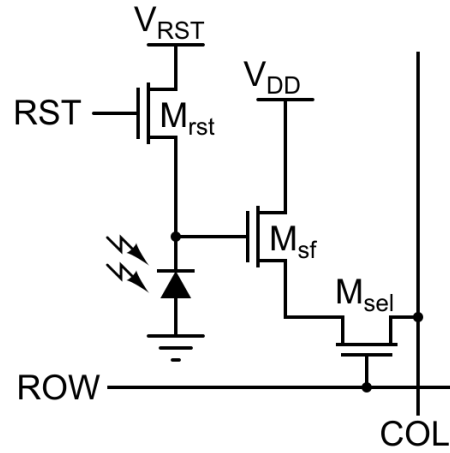
Photons entering the CCD create electron-hole pairs. The electrons are then attracted towards the most positive potential in the device where they create 'charge packets'. Each packet corresponds to one pixel



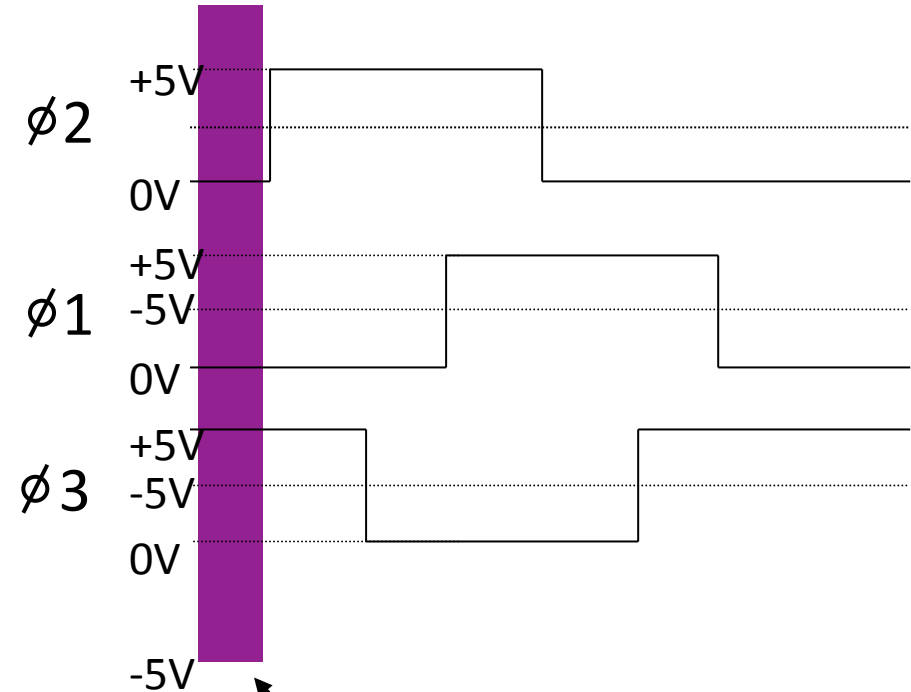
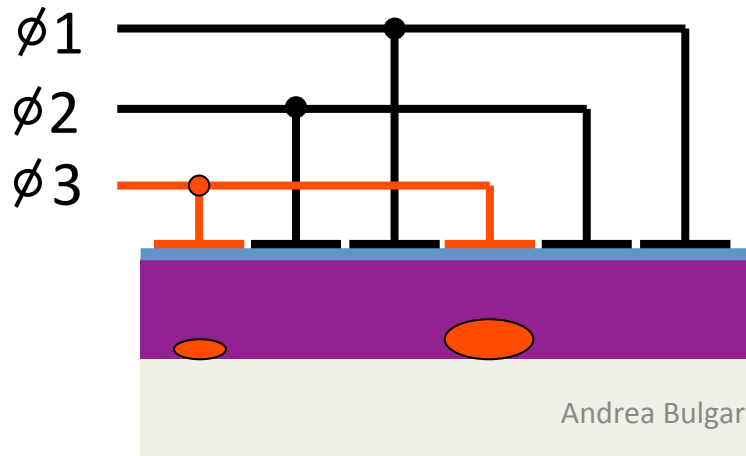
The charge which builds up in the potential wells is **proportional** to the X-ray flux density incident upon that part of the array



Charge transfer in a CCD



CMOS sensor



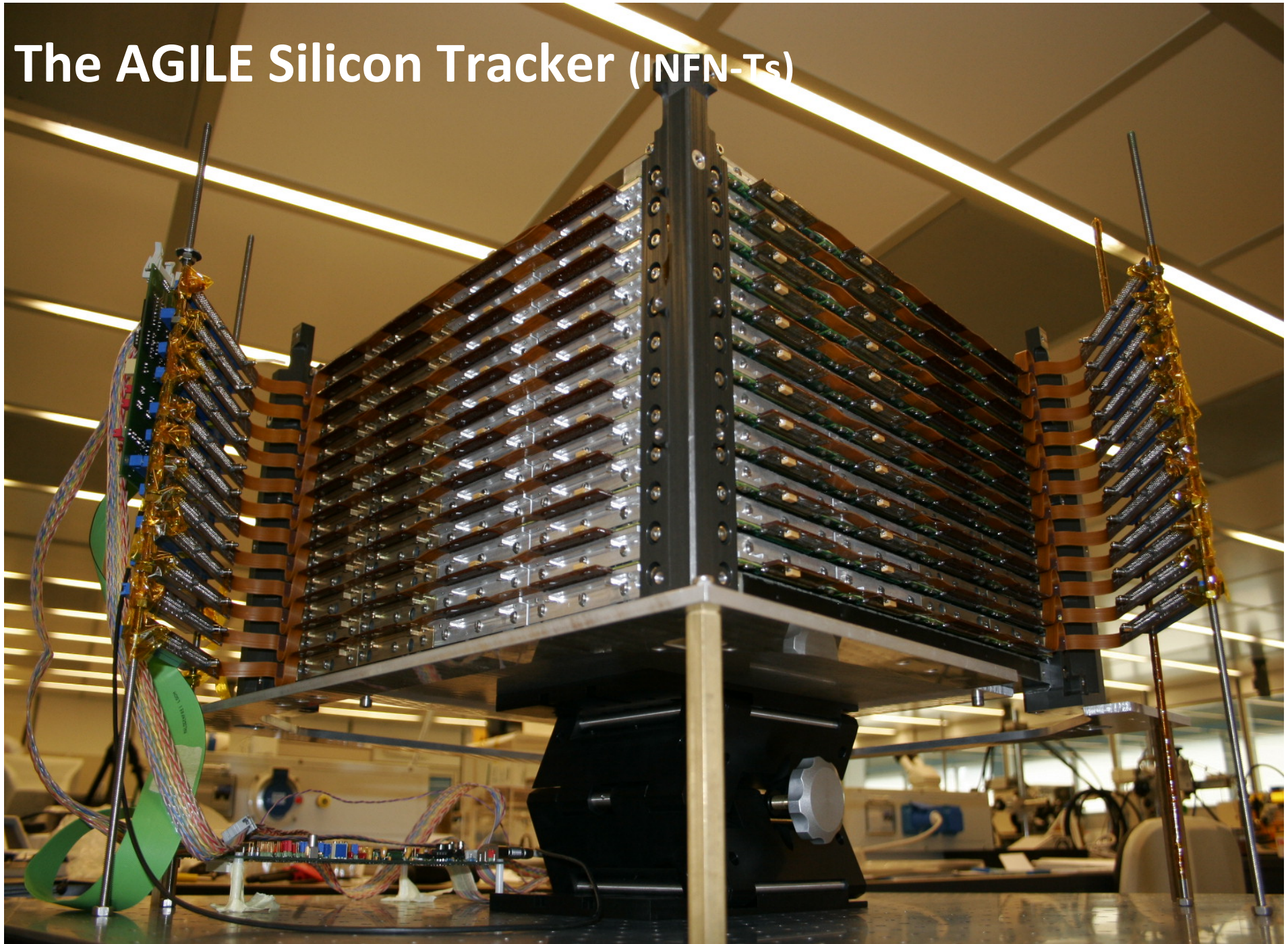
Time-slice shown in diagram

CCD - Properties

- Excellent imaging resolution but usually small FOV
 - Small pixels
- Good energy resolution
 - Order of magnitude improvement over proportional counters
- Poor timing resolution
 - Slow readout time
 - Improvement at the expense of imaging capability
- Photon “pile-up”

$$\Delta E(\text{FWHM})/E \propto E^{-1/2} \quad E \text{ in keV}$$

The AGILE Silicon Tracker (INFN-Ts)



- The main purpose of the Silicon Tracker is to provide a compact **imager** for gamma-ray photons of energy **above 30 MeV**.
- The Tracker plays two roles at the same time:
 - **it converts the gamma-rays** in heavy-Z material layers (245 μm of Tungsten), where the photon interacts producing an electron/ positron pair in the detector,
 - and **records the electron/ positron tracks** by a sophisticated combination of Silicon microstrip detectors and associated readout.
- An event is a collection of all the electron/positron interactions into the microstrips of the silicon detector (each interaction generates a cluster that is a group of neighboring strips collecting the charge deposited by the particle)
- A complete representation of the event topology allows the reconstruction of the incoming direction and energy of the gamma-ray.

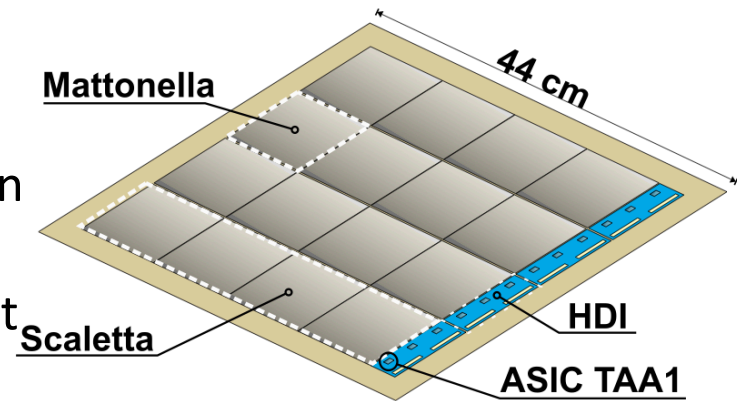
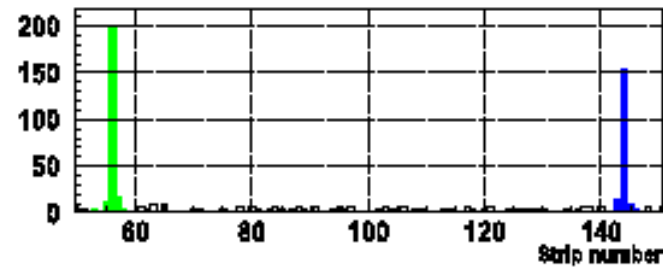
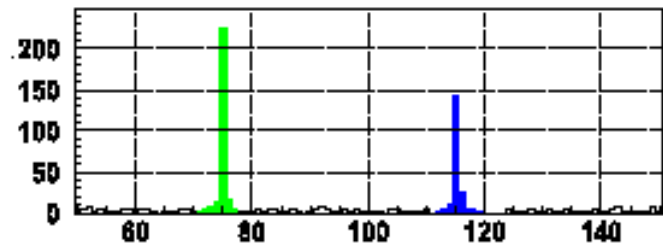
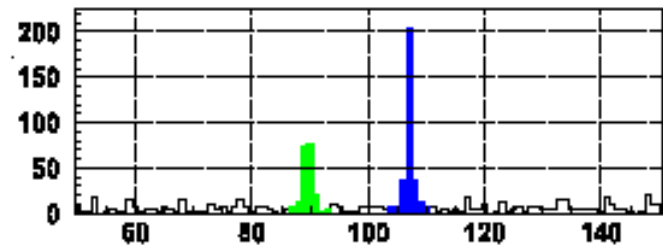
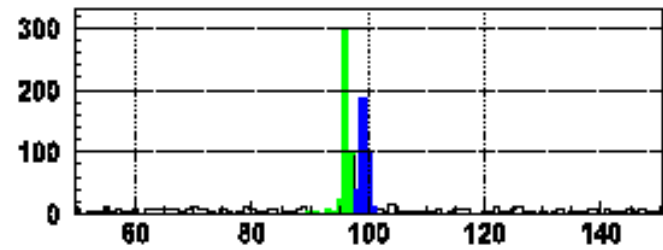
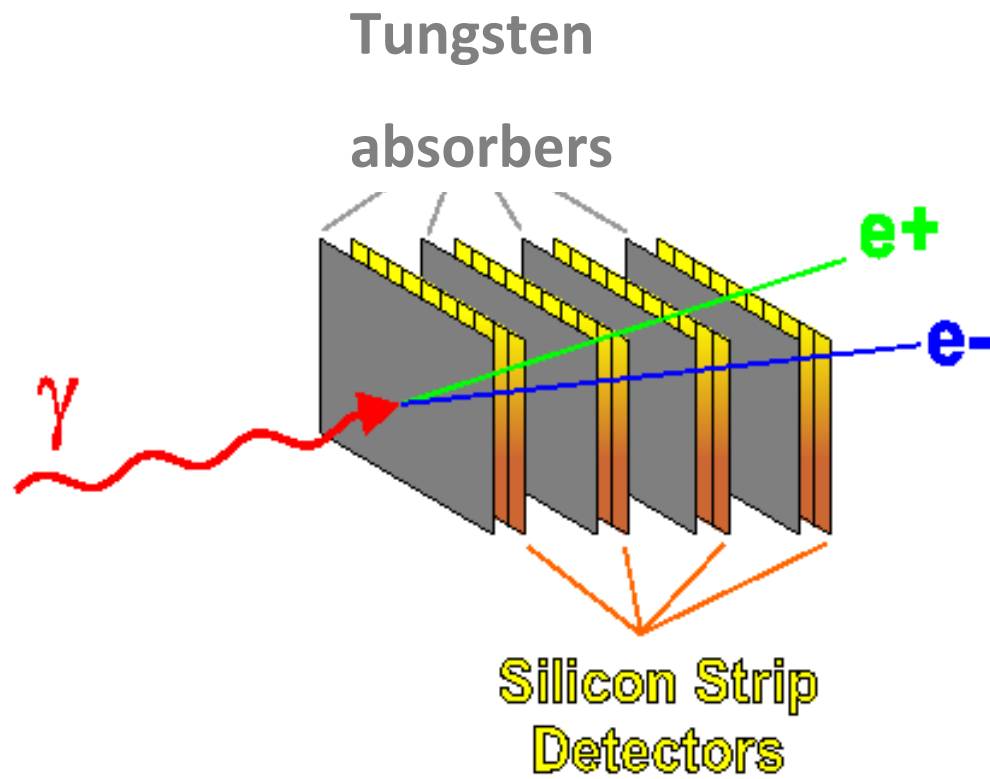


Figura 3.2: Vista di un piano assemblato del tracciatore: sono evidenziati, sopra lo strato di kapton, le singole mattonelle di silicio e le scalette, di fronte alle quali si notano gli ASIC di lettura posti sull'HDI.



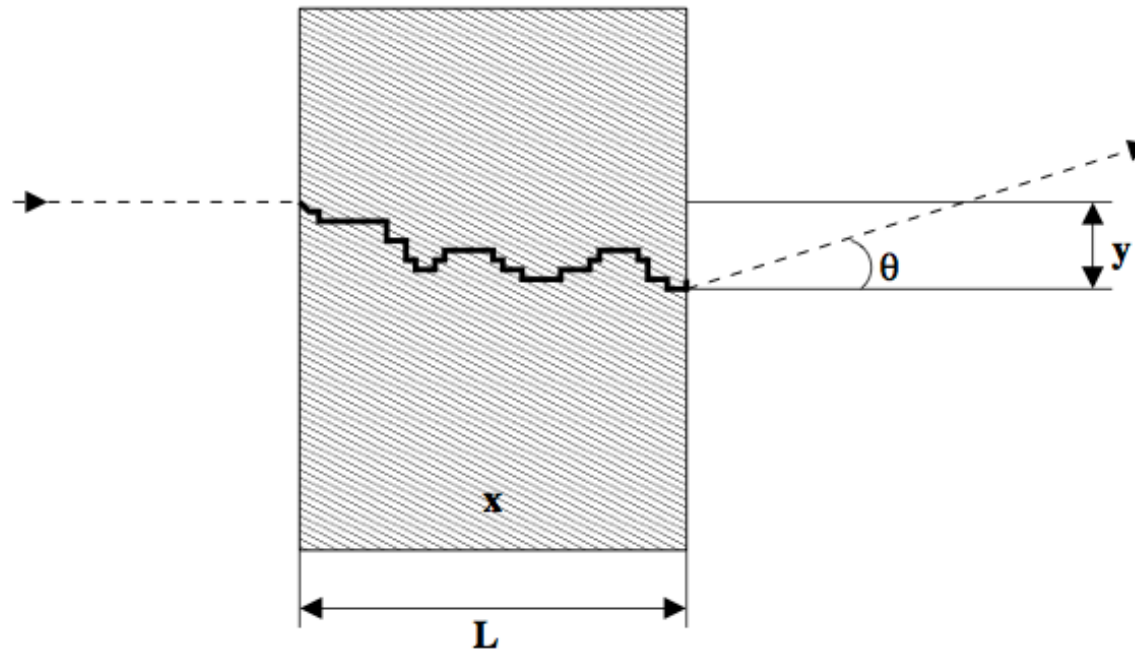
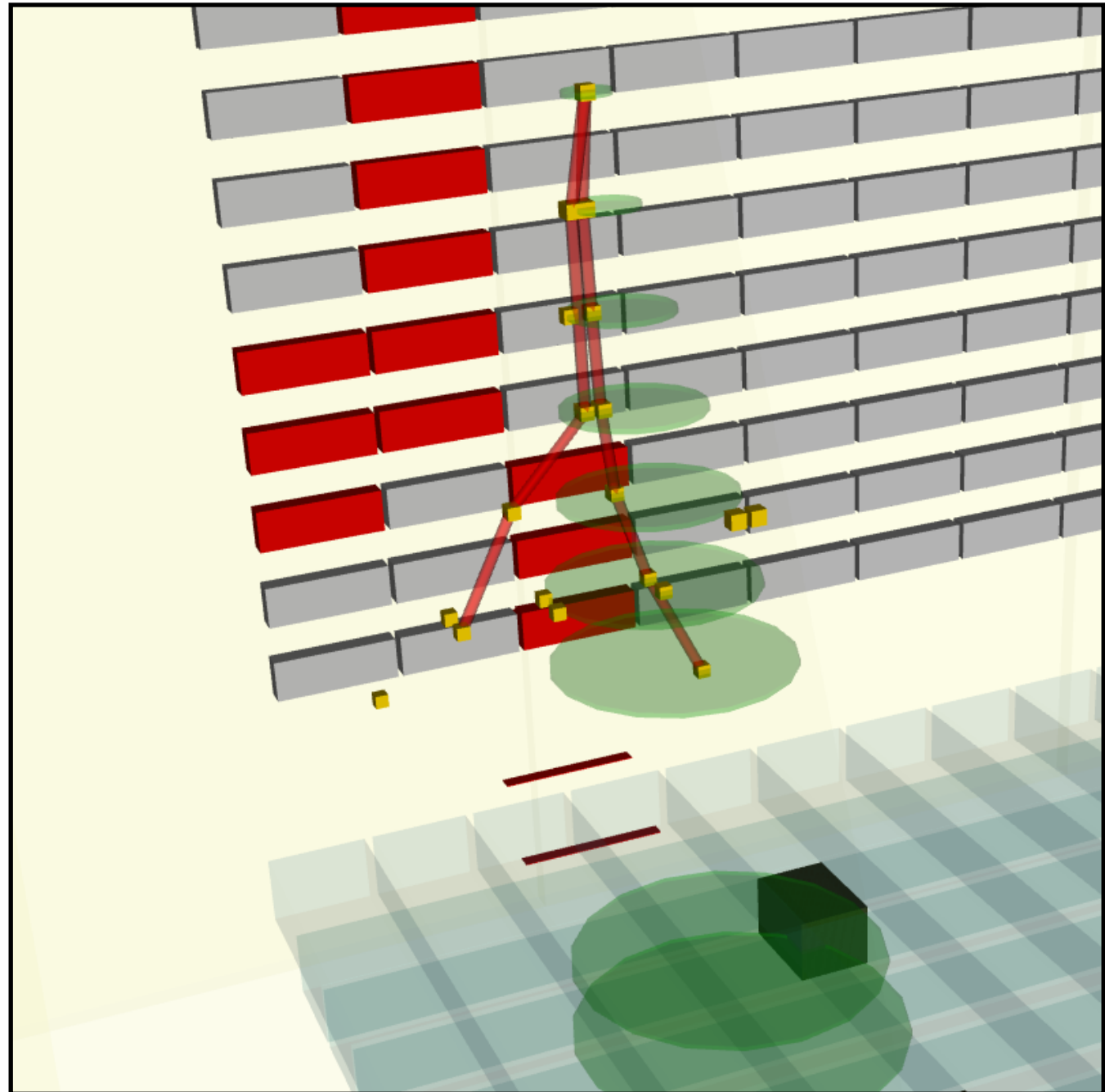


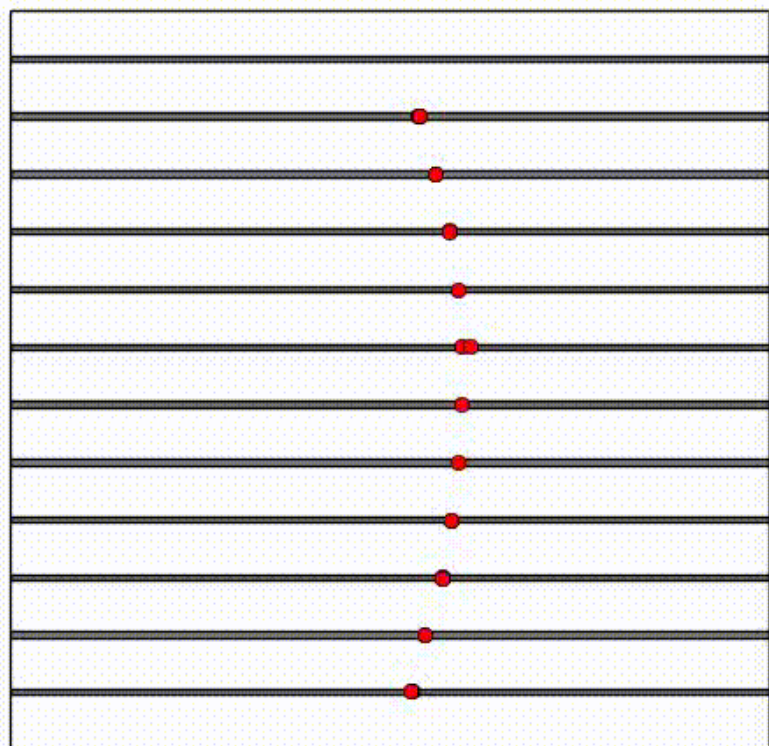
Figura 3.9: Multiplo scattering: spostamento dalla traiettoria (y) di una particella c attraverso uno spessore di x lunghezze di radiazione e lunghezza L .

L'elettrone e il positrone, interagendo con la materia presente lungo il loro cammino, sono soggetti a variazione di traiettoria dovuta allo **scattering multiplo di tipo coulombiano**. Questo effetto ha luogo soprattutto nel tungsteno, che se da un lato è necessario per la conversione, dall'altro causa una perdita progressiva dell'informazione sulla direzione del fotone incidente.

AGILE last
photon
detected on
Earth
(Apr. 15,
2007)



AGILE V2.0, E = 100 MeV, theta = 30 deg., Event ID = 1, RAW file

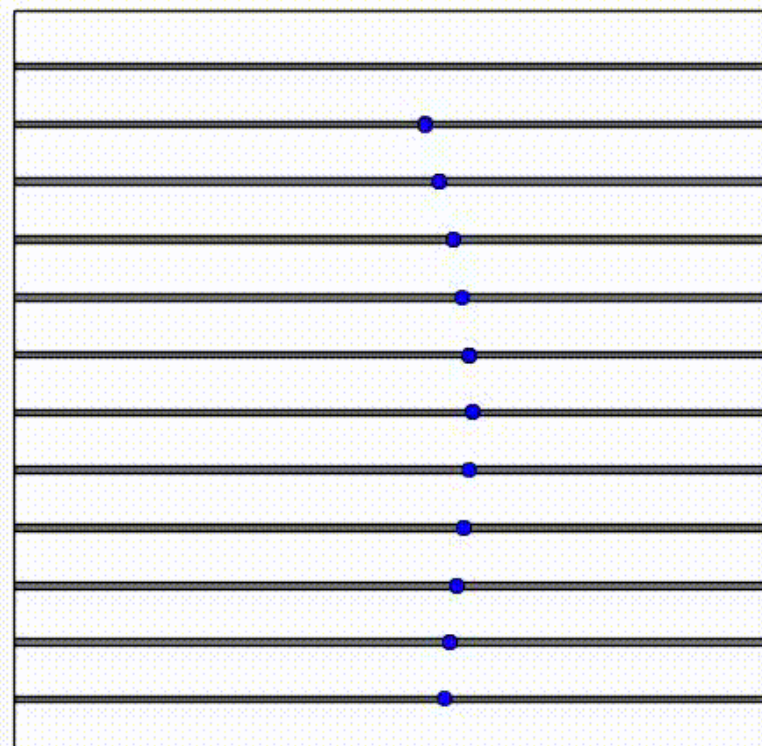


X position



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

X BAR



Y position

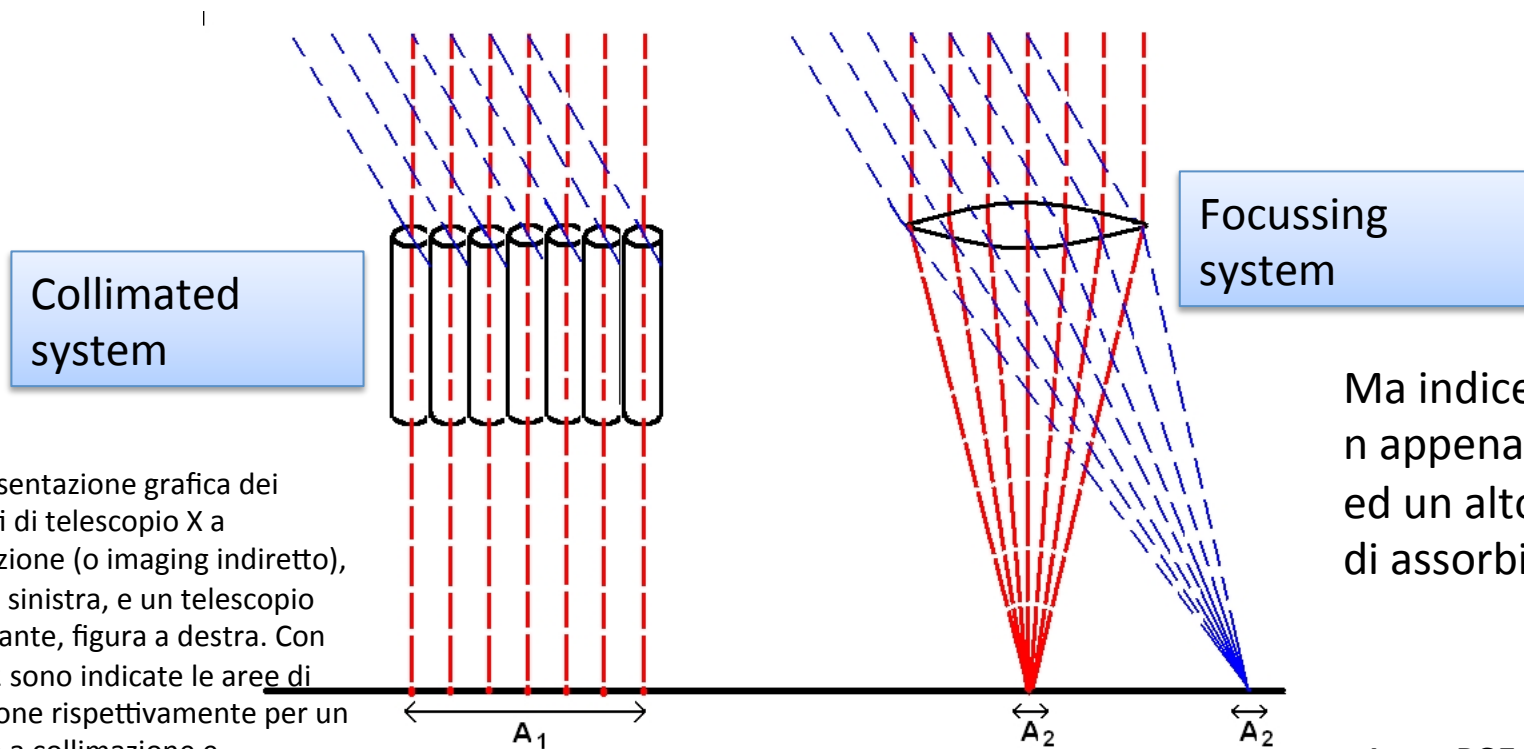


1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Y BAR

Quarta parte

(direct) imaging “is” (flux) sensitivity



Rappresentazione grafica dei concetti di telescopio X a collimazione (o imaging indiretto), figura a sinistra, e un telescopio focalizzante, figura a destra. Con A1 e A2 sono indicate le aree di rivelazione rispettivamente per un sistema a collimazione e focalizzante. Si noti come nel secondo caso l'area del rivelatore si riduce notevolmente, il che si traduce in una corrispondente diminuzione del fondo.

$$F_{\text{Min}} = \frac{n_{\sigma}}{\epsilon} \sqrt{\frac{B}{AT\Delta E}}$$

$$F_{\text{min}} = n_{\sigma} \frac{\sqrt{BA_d}}{A_{\text{eff}} \sqrt{T_{\text{int}} \Delta E}}$$

il sistema focalizzato in figura (rappresentato con una lente), concentra il segnale di un fattore A1/A2, permettendo così di rilevare segnali molto deboli.

Ma indice di rifrazione n appena inferiore a 1 ed un alto coefficiente di assorbimento.

A_d -> PSF proiettata sul piano focale (in cm²).

F_{min} -> A_{eff}⁻¹ -> aumentare la sensibilità senza aumentare le dimensioni

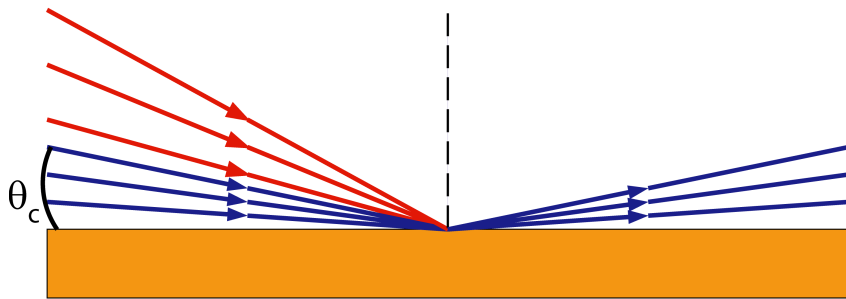
Ottiche X - Materiali

- Missioni attuali: fino a 10 keV
- **difficoltà** principale nella costruzione di ottiche per raggi X = tutti i materiali hanno nei raggi X un **indice di rifrazione n appena inferiore a 1** ed un **alto coefficiente di assorbimento**. Ciò **esclude** la possibilità di sfruttare la **rifrazione per realizzare lenti**;
- è possibile invece produrre ottiche a riflessione grazie al fenomeno della **riflessione totale dei raggi X in incidenza radente**: applicando la **legge di Snell** della rifrazione, **se l'angolo tra fascio e superficie diviene inferiore all'angolo critico** $\theta_c = \arccos(n)$ ($n =$ indice di rifrazione del materiale di coating) per la riflessione totale, il fascio viene totalmente riflesso dallo strato. In milliradiani

$$\theta_c \approx 28 (\rho Z / A)^{1/2} E^{-1}$$

- esso cresce perciò con la densità ρ (espressa in g/cm³) del materiale usato per lo strato riflettente e decresce con l'energia E (espressa in keV) dei fotoni, oltre a dipendere dal rapporto Z (numero atomico)/ A (peso atomico) dell'elemento
- Facilitare la riflessione totale = riflettere ad angoli meno radenti
 - vengono quindi **usati materiali ad alta densità**, come *Oro, Platino, Iridio*, per i quali *l'angolo critico è più grande (ed è di alcuni gradi per fotoni di 1 keV)*.

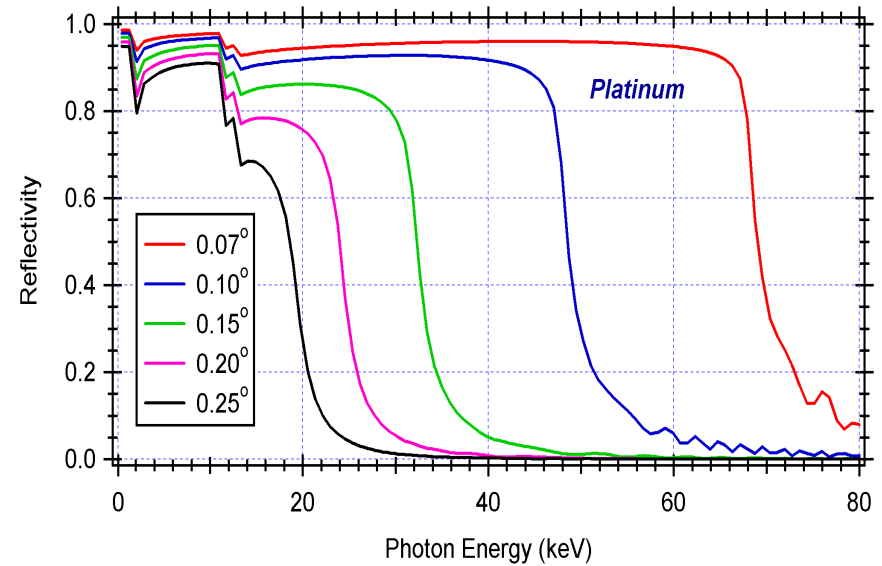
X-ray reflection



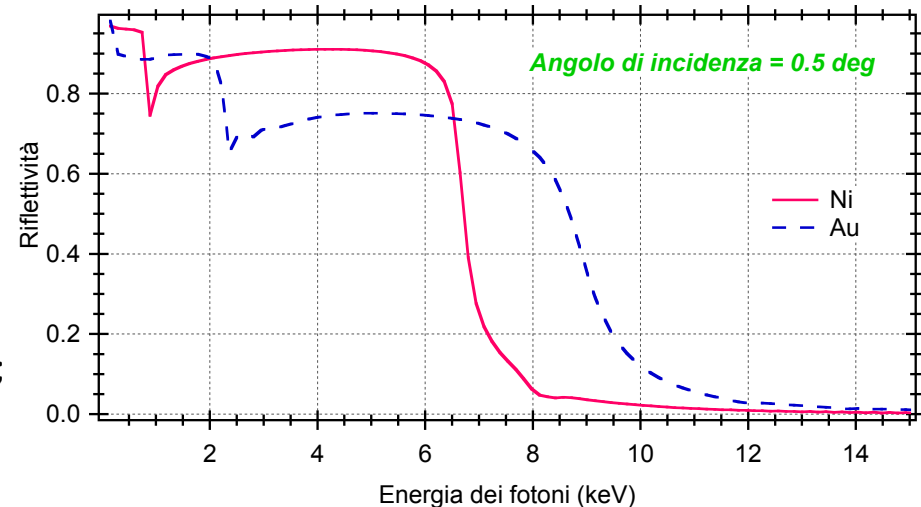
$$\theta_{crit} \propto \frac{\sqrt{\rho}}{E}$$

Per una fissata energia, quindi, i fotoni incidenti sullo strato sarebbero teoricamente riflessi al 100% (in realtà, parte dei fotoni vengono assorbiti dalla superficie e la riflettività è sempre leggermente inferiore a 1).

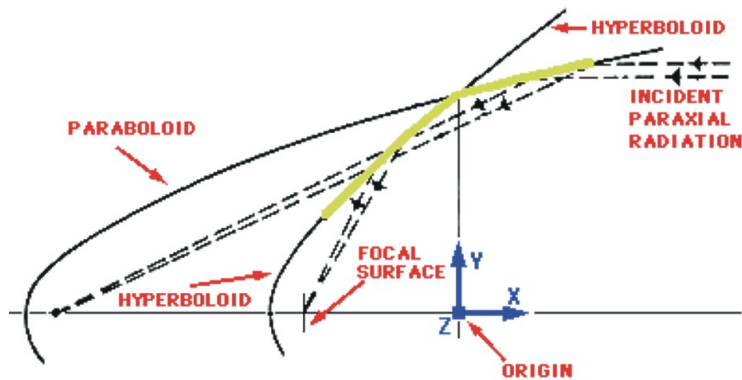
Similmente, **per un angolo di incidenza fissato**, è immediato verificare che esiste **un'energia critica** al di sotto della quale la riflettività è poco inferiore a 1; superato l'angolo critico e l'energia critica, la riflettività decade rapidamente a zero.



- High Z materials (Au, Pt, Ir)
- critical angle (few degrees for $E = 1$ keV)

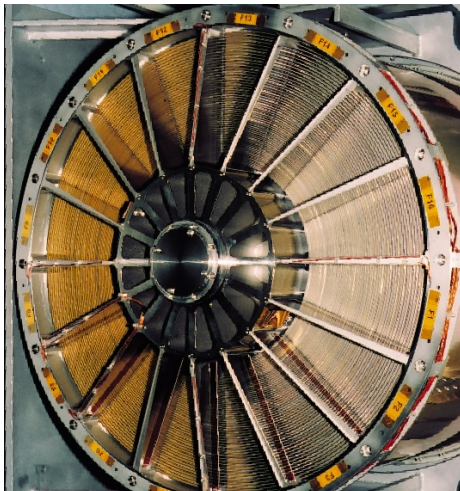


Wolter 1 profile for X-ray astronomy



F = focal length **R** = reflectivity
L = mirror height θ = incidence angle

$$A_{eff} \approx F^2 \times \theta_c^2 \times R^2$$



L'incidenza radente vincola la geometria dello specchio: un profilo usato per **minimizzare** le aberrazioni di coma ed aumentare il campo di vista del telescopio sfrutta una doppia riflessione su un paraboloide e su un iperboloide di rivoluzione

Con questo profilo si minimizza la lunghezza focale F



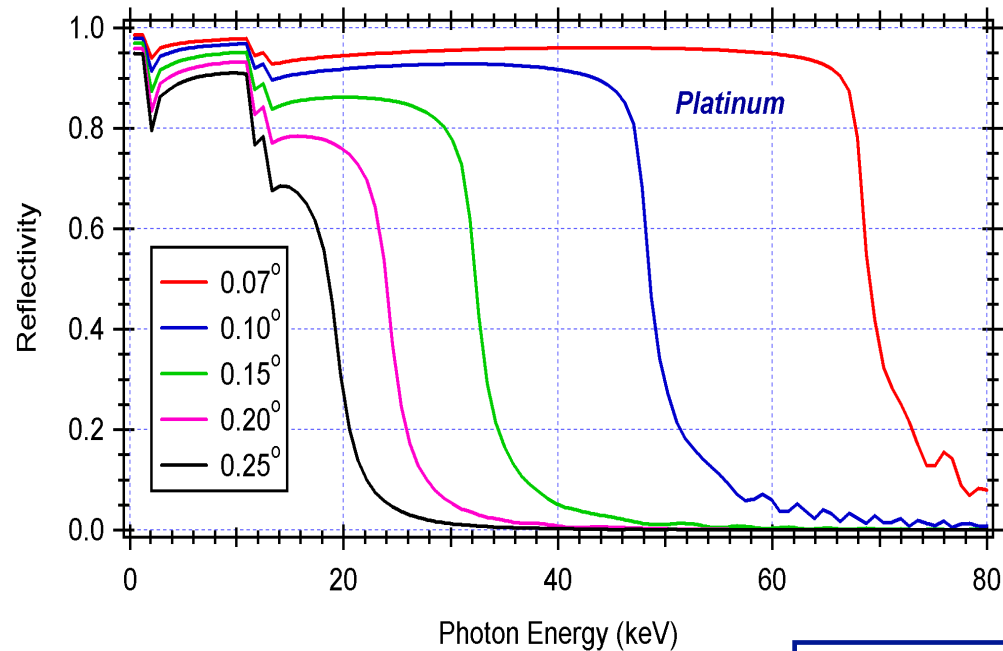
Co-focal mirror nesting

Sistemi di specchi di questo tipo, confocali e di diametro decrescente, vengono innestati uno dentro l'altro. Per nidificare molti specchi -> molto sottili (0.5 – 1 mm), ma sufficientemente rigidi da conservare il profilo corretto.

Problema della massa

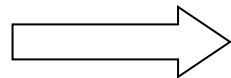
Andrea Bulgarelli (bulgarelli@iasfbo.inaf.it)

X-ray focussing at $E > 10$ keV



but →

$$\vartheta_{crit} \propto \frac{\sqrt{\rho}}{E}$$

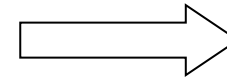


At photon energies > 10 keV the cut-off angles for total reflection are very small also for heavy metals

the attained geometrical areas are in general negligible

Possible solutions...

$$A_{\text{eff}} \approx F^2 \times \theta_c^2 \times R^2$$

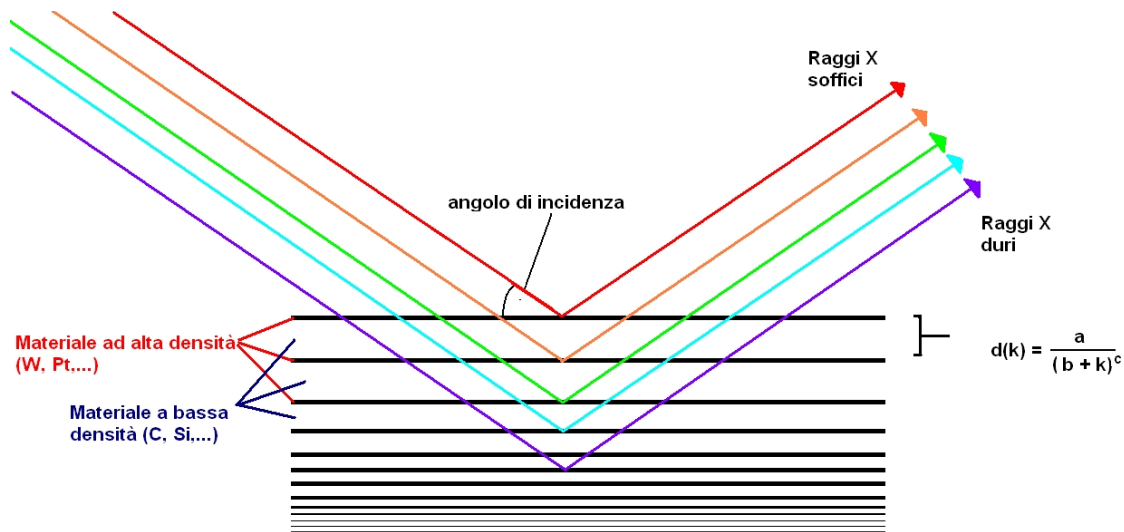


- large number of modules operating in parallel
- large focal lengths (10 - 100 m)
- use of very high density single-layer reflecting coatings (Ir or Pt)
- use of supermirror multilayer coatings →

Multi-layers for hard X-ray astronomy

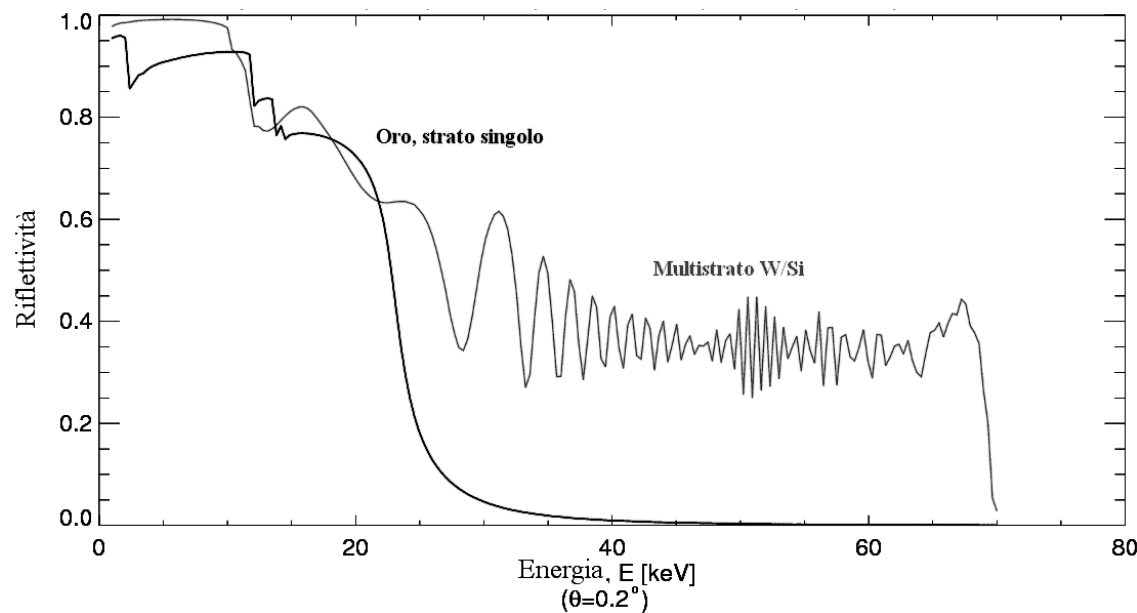
- Anche utilizzando materiali ad alta densità, poco oltre i 10 keV l'angolo critico per l'incidenza radente diventa troppo piccolo ($< 0.25^\circ$) da rendere insufficiente l'area utile di raccolta dell'ottica, a meno di ricorrere a focali superiori ai 10 m, difficili da utilizzare su telescopi costituiti da un singolo satellite.
- Multilayer coating \rightarrow tecnica utilizzabile per riflettere raggi X oltre i 10 keV ad angoli di incidenza di $0.2^\circ - 0.4^\circ$
- strati alternati (bistrati) di un materiale ad alta densità (ad esempio Platino o Tungsteno) e di uno a bassa densità (Silicio o Carbonio); lo spessore degli strati è dell'ordine di qualche nanometro
- Riflettività ottenuta per *interferenza costruttiva*

Multi-layers for hard X-ray astronomy (>10 keV)



Multilayer coatings allow high reflectance beyond the critical angle by **constructive interference** of rays reflected at properly spaced Pt/C or W/Si bi-layers (200 bilayers, $60\text{\AA} * 200 = 1\text{micron}$).

If the **d-spacing is changed in continuous way** along the sequence, and the photoelectric absorption is not too large, it is possible to get reflection windows 3-4 times larger than in total reflection regime.



The optimal distribution of layer spacing follows in general a power law (a, b, c are parameters that should be optimized):

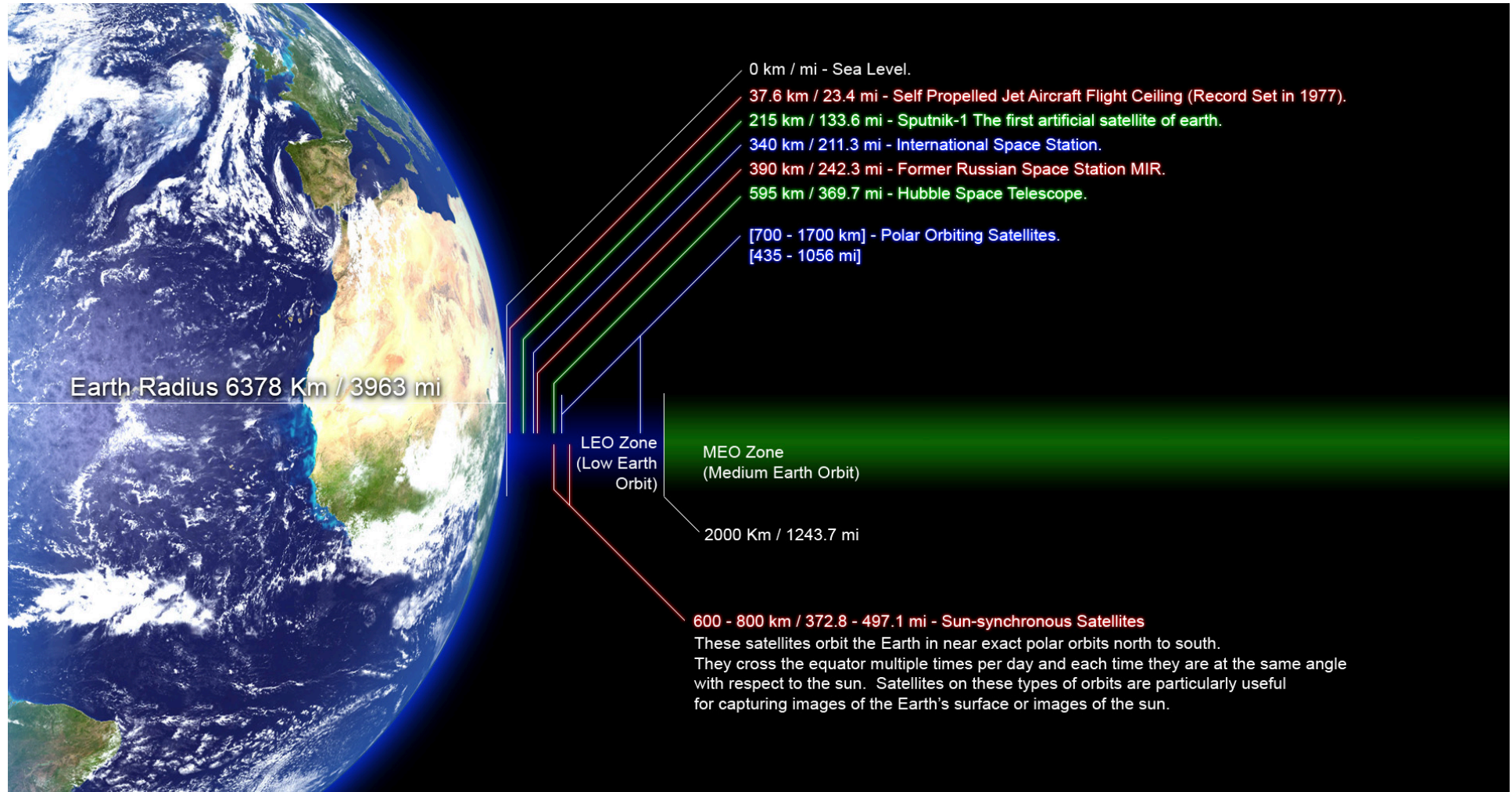
$$d(i) = a / (b+i)^c$$

i = bilayer index

$$a \approx \lambda / (2 \sin \theta_{inc}) \quad c \approx 0.25 \quad b > -1$$

Quinta parte

Altitude classification: LEO, MEO, HEO



20,350 km
GPS (Global Positioning System) Satellites
These Satellites are on a Semi-synchronous Orbit (SSO)
meaning that they orbit the earth in exactly 12 hours (twice per day).

35,786 km
Geosynchronous (GEO) and Geostationary (GSO) Satellites
Geosynchronous satellites orbit the Earth at the same rate that the Earth rotates. Thus they remain stationary over a single line of longitude. A geostationary satellite will remain in a fixed location as observed from the earth's surface, allowing a satellite dish to be aligned to them. This particular altitude marks the border between the MEO and HEO Zones.

HEO Zone
(High Earth Orbit) →

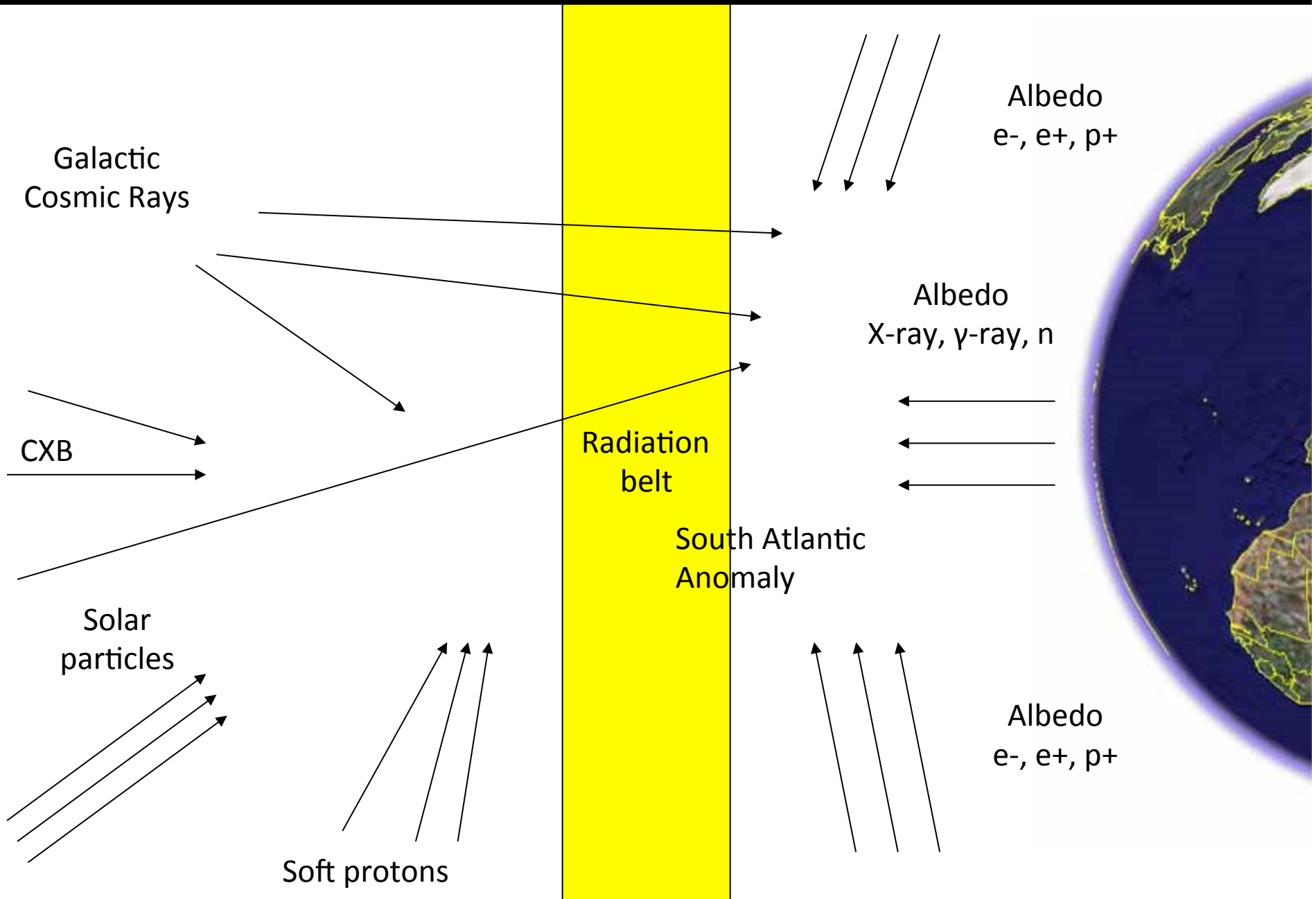
A geosynchronous orbit (sometimes abbreviated GSO) is an orbit around the Earth with an orbital period of one sidereal day (approximately 23 hours 56 minutes and 4 seconds), matching the Earth's sidereal rotation period.[1] The synchronization of rotation and orbital period means that, for an observer on the surface of the Earth, an object in geosynchronous orbit returns to the exactly same position in the sky after a period of one sidereal day

A geostationary orbit, or Geostationary Earth Orbit (GEO), is a circular orbit 35,786 kilometres (22,236 mi) above the Earth's equator and following the direction of the Earth's rotation. An object in such an orbit has an orbital period equal to the Earth's rotational period (one sidereal day), and thus appears motionless, at a fixed position in the sky, to ground observers. Communications satellites and weather satellites are often given geostationary orbits

LEO

- Objects in LEO encounter atmospheric drag in the form of gases in the thermosphere (approximately 80–500 km up) or exosphere (approximately 500 km and up), depending on orbit height.
- LEO is an orbit around Earth between the atmosphere and below the inner Van Allen radiation belt. The altitude is usually not less than 300 km because that would be impractical due to the larger atmospheric drag.
- Equatorial low Earth orbits (ELEO) are a subset of LEO. These orbits, with low inclination to the Equator, allow rapid revisit times and have the lowest delta-v requirement of any orbit. Orbits with a high inclination angle are usually called polar orbits.

① Space radiation environment



Space radiation environment

The first requirement for every planned high energy space mission is the minimization of the time spent in the radiation (Van Allen) belts. Three different orbits have been chosen/planned so far for the X-ray space missions:

Low Earth Orbit (LEO) – (e.g. AGILE, Fermi, Suzaku, Swift, LOFT, ASTRO-H, NuSTAR)

- nearly equatorial orbit (altitude = 500 - 600 km)
- the spacecraft is shielded by solar particles and most of the Galactic cosmic rays, but it interacts with low energy albedo particles from the Earth's atmosphere

High Elliptical Orbit (HEO) – (e.g. XMM-Newton, Chandra)

- high eccentricity (apogee > 100000 km)
- most of the time beyond the radiation belts (> 90% of observing time) but high fluxes of high energy cosmic particles.

L2 orbit – (e.g. ATHENA)

- Halo orbit around the second lagrangian point (1.5×10^6 km from the Earth)
- easier calibration and thermal control, almost uninterrupted view of the sky but exposure to high fluxes of solar particles

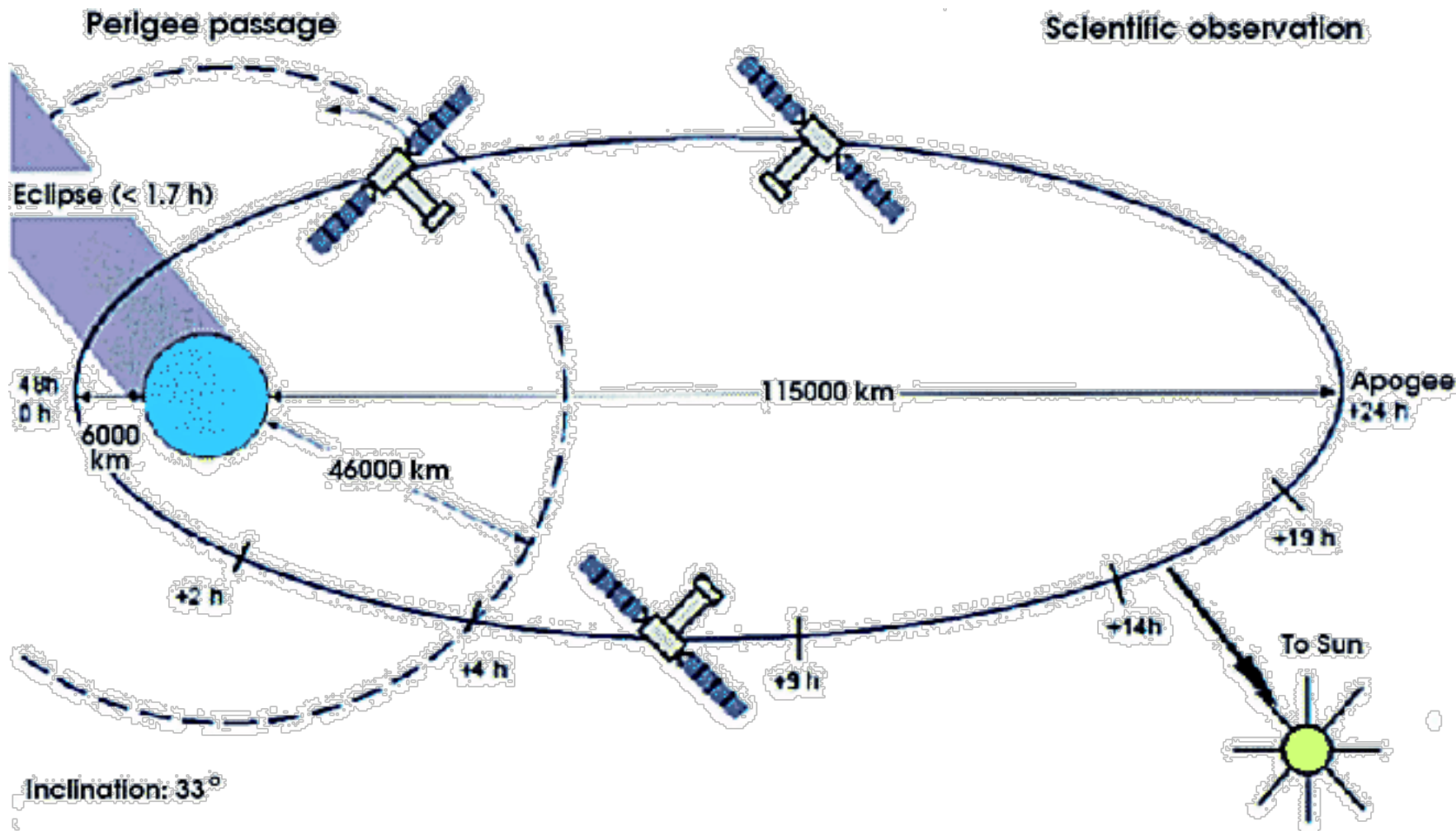
Fermi was launched in June 11, 2008, from Cape Canaveral by a Delta 2920H- into an initial orbit of ~565 km altitude at an 25.6 degree inclination with an eccentricity <0.01. The orbital period is 96.5 minutes,

AGILE was launched by the Indian PSLV-C8 rocket from the Sriharikota base on 2007 April 23 - into an initial orbit of ~560 km altitude at an 2.5 degree inclination. The orbital period is 95 minutes.

Eccentricity classifications

- **Circular orbit:** An orbit that has an eccentricity of 0 and whose path traces a circle.
- **Elliptic orbit:** An orbit with an eccentricity greater than 0 and less than 1 whose orbit traces the path of an ellipse.
 - Geosynchronous transfer orbit: An elliptic orbit where the perigee is at the altitude of a Low Earth orbit (LEO) and the apogee at the altitude of a geosynchronous orbit.
 - Geostationary transfer orbit: An elliptic orbit where the perigee is at the altitude of a Low Earth orbit (LEO) and the apogee at the altitude of a geostationary orbit.
 - Molniya orbit: A highly elliptic orbit with inclination of 63.4° and orbital period of half of a sidereal day (roughly 12 hours). Such a satellite spends most of its time over two designated areas of the planet (specifically Russia and the United States).
 - Tundra orbit: A highly elliptic orbit with inclination of 63.4° and orbital period of one sidereal day (roughly 24 hours). Such a satellite spends most of its time over a single designated area of the planet.

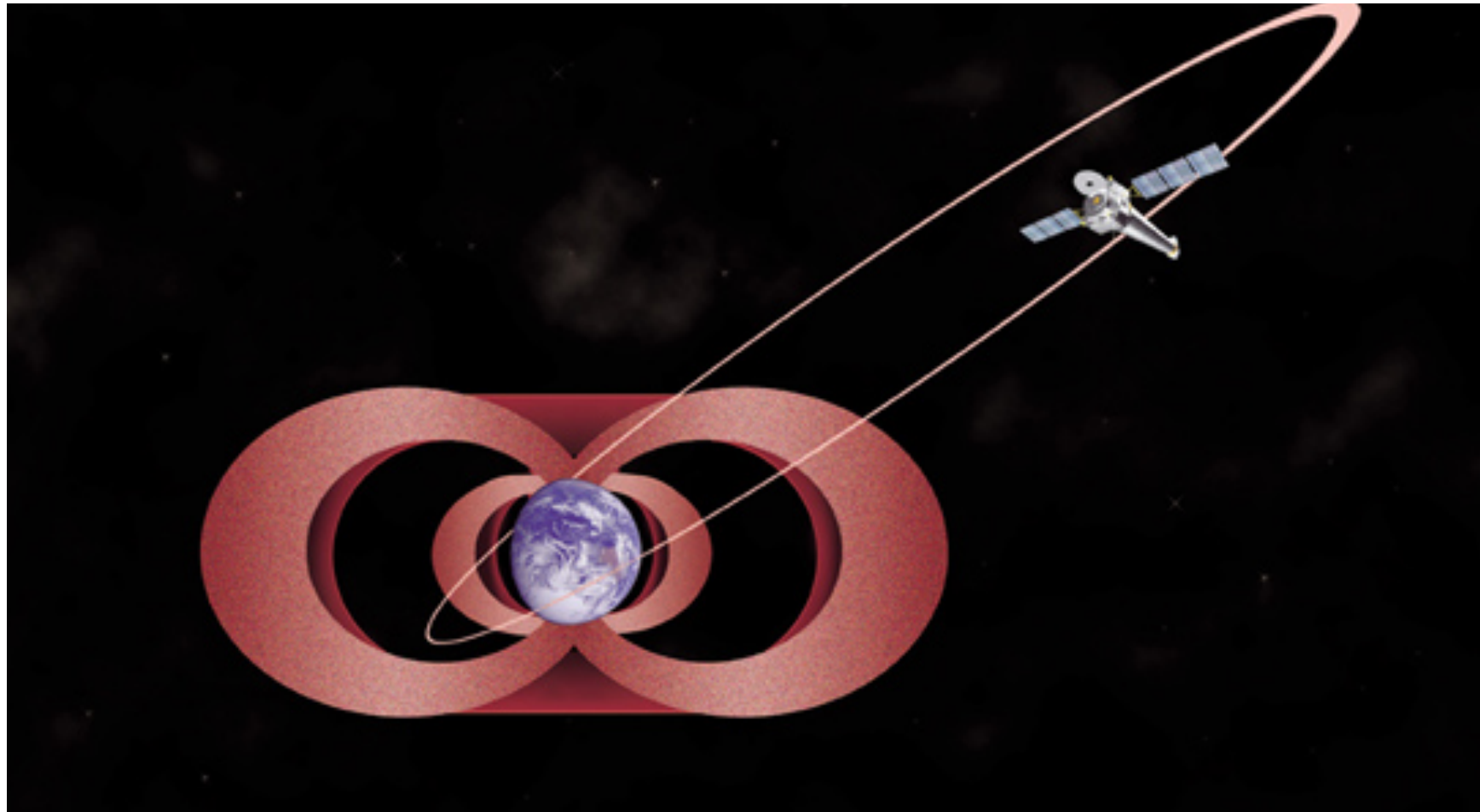
XMM-Newton orbit



highly elliptical orbit, with an apogee of about 115,000 km and a perigee of ca. 6000 km
XMM is operated with three ground stations, located at Perth, Kourou and Santiago

Andrea Bulgarelli (bulgarelli@iasfbo.inaf.it)

Chandra orbit

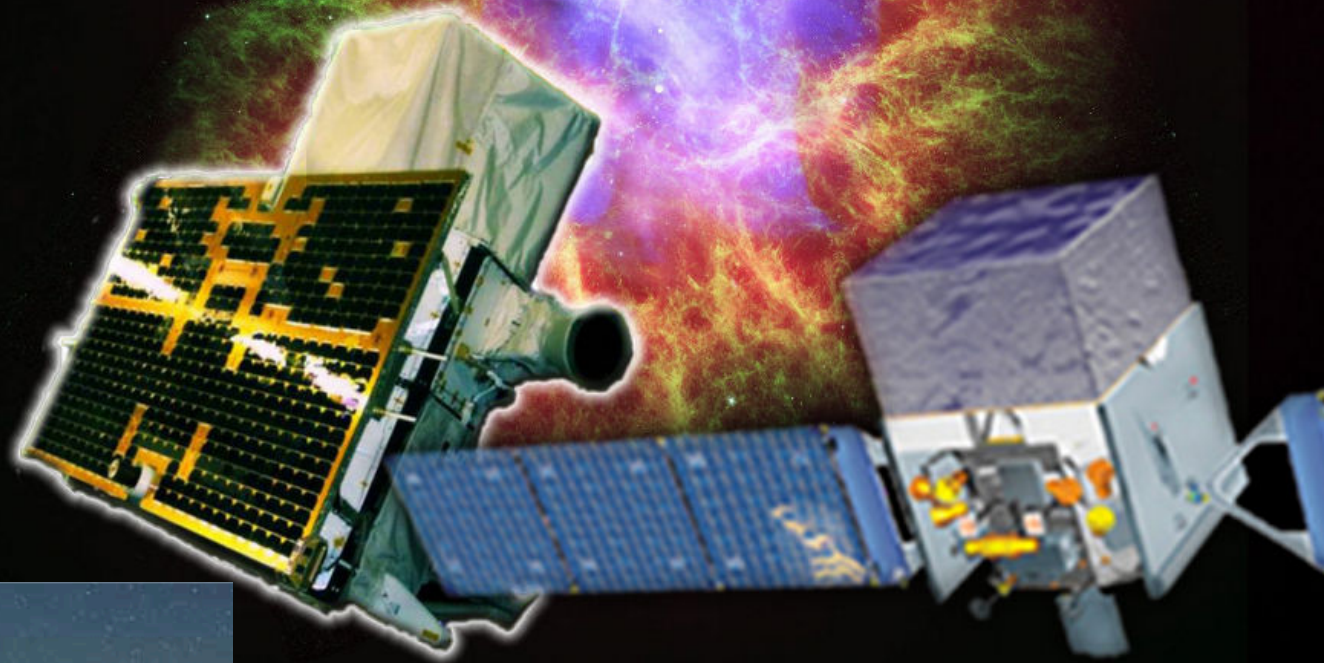


This elliptical orbit takes the spacecraft to an altitude of 133,000 km (82,646 mi) - more than a third of the distance to the moon - before returning to its closest approach to the Earth of 16,000 kilometers (9,942 mi). It takes approximately 64 hours and 18 minutes to complete an orbit.

Andrea Bulgarelli (bulgarelli@iasfbo.inaf.it)

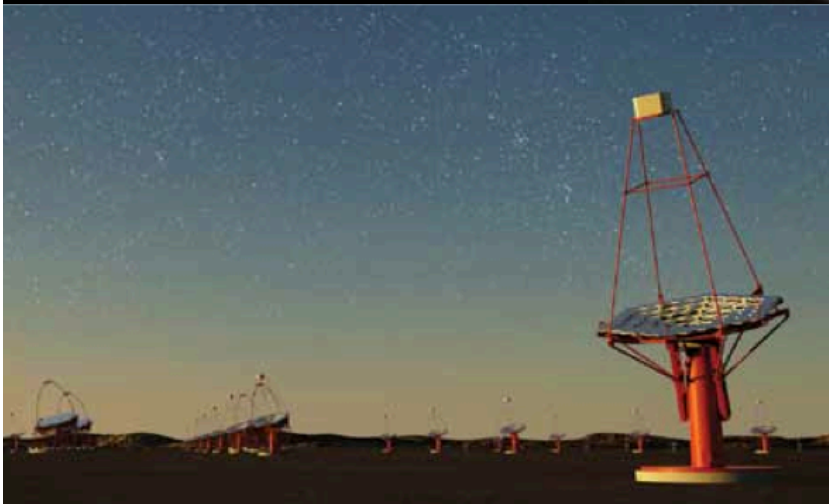
Sesta parte

**ASI/
AGILE**



**NASA/
Fermi**

CTA



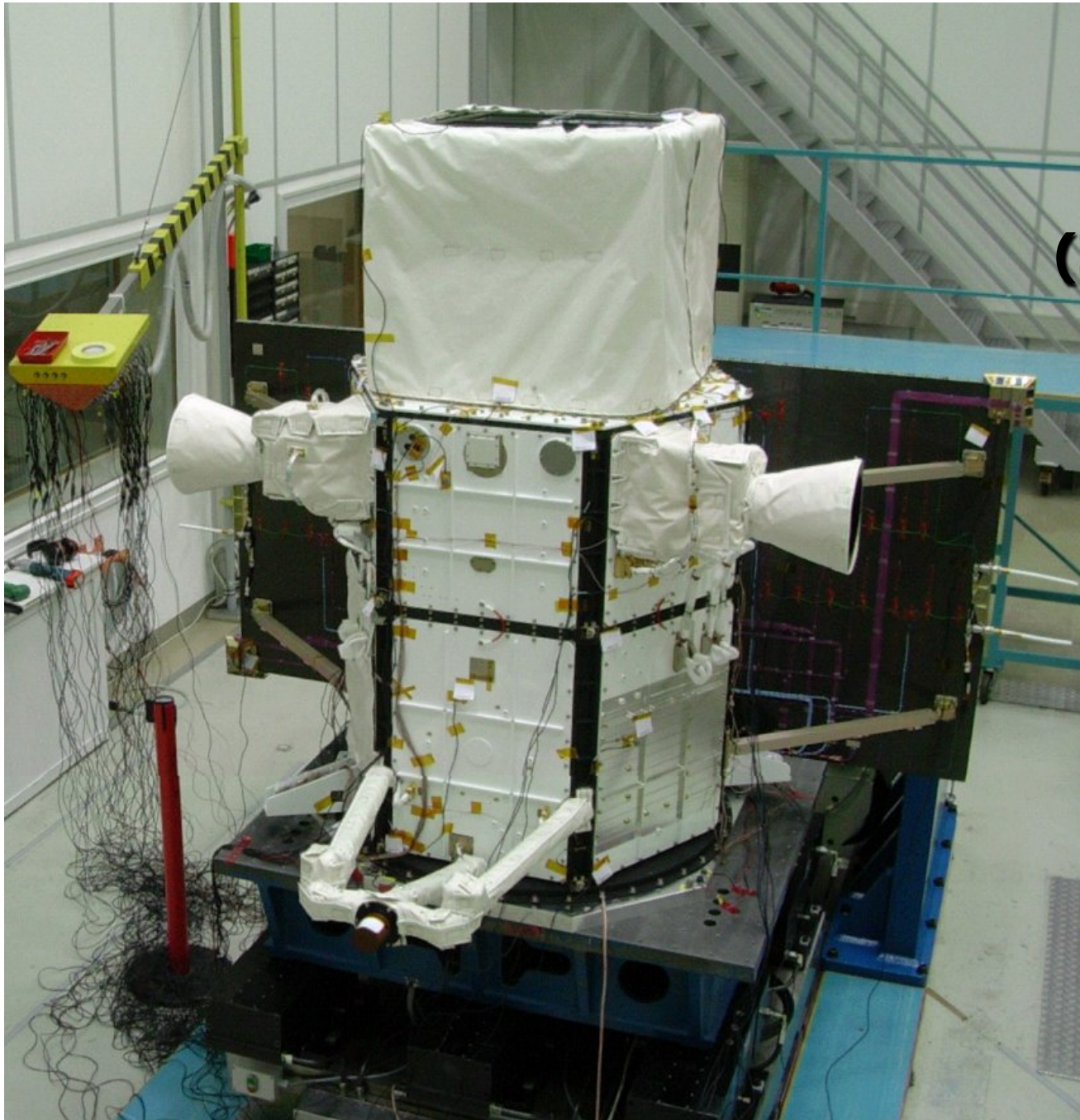
AGILE



KEY FEATURES

- Italian gamma-ray telescope
- **Similar to the Fermi Large Area Telescope, but about 1/16 the size**
- Launched April 23, 2007, from ISRO facility in Sriharikota, India
- **Indian PSLV rocket**
- AGILE is a gamma-ray observatory that work in the energy range 100 MeV – 50 GeV
- LEO orbit
- PSF at 30° off-axis for $E > 100 \text{ MeV}$ of 2.1°, for $E > 400 \text{ MeV}$ of 1.1°, and for $E > 1 \text{ GeV}$ of 0.8°



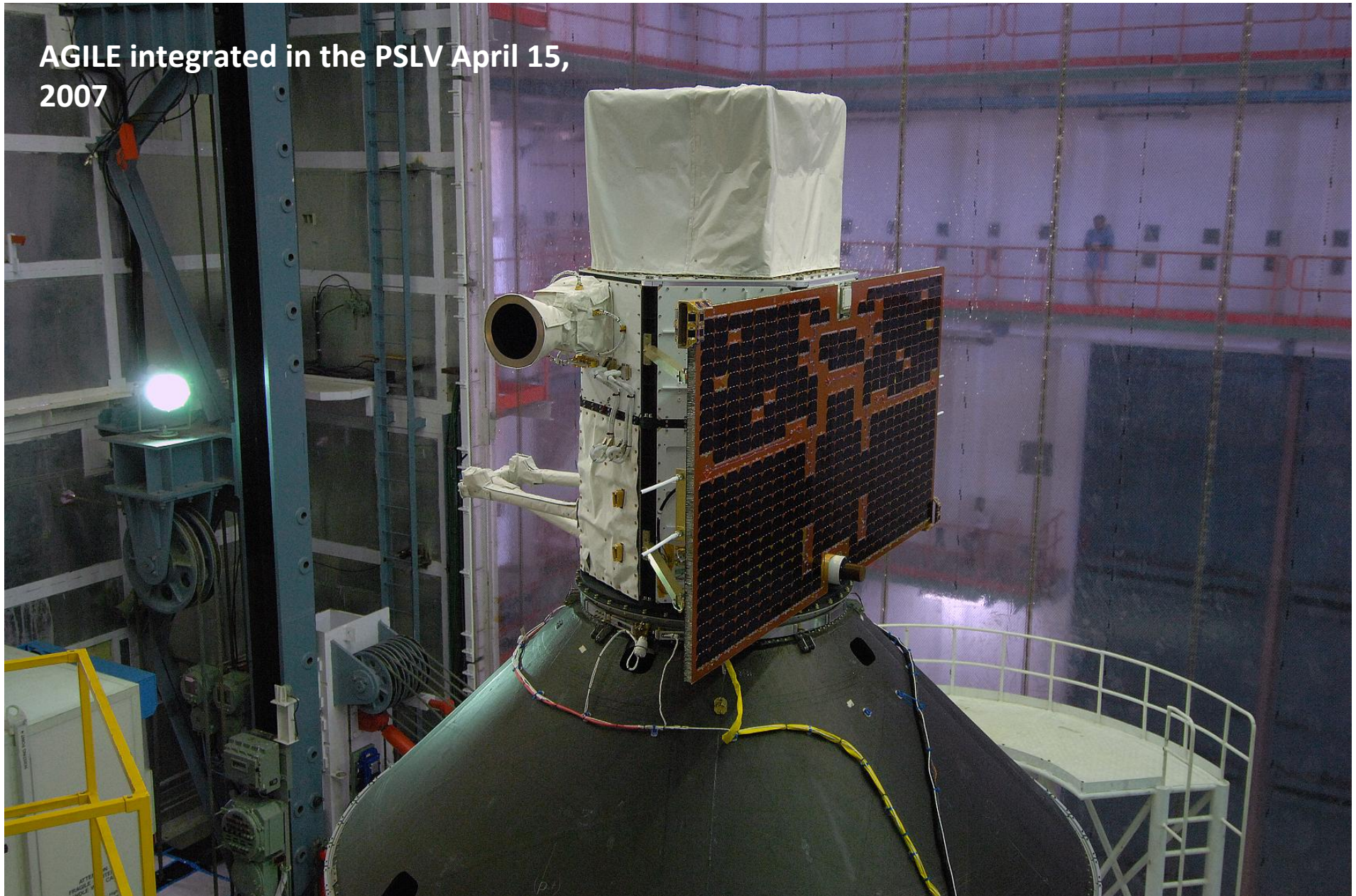


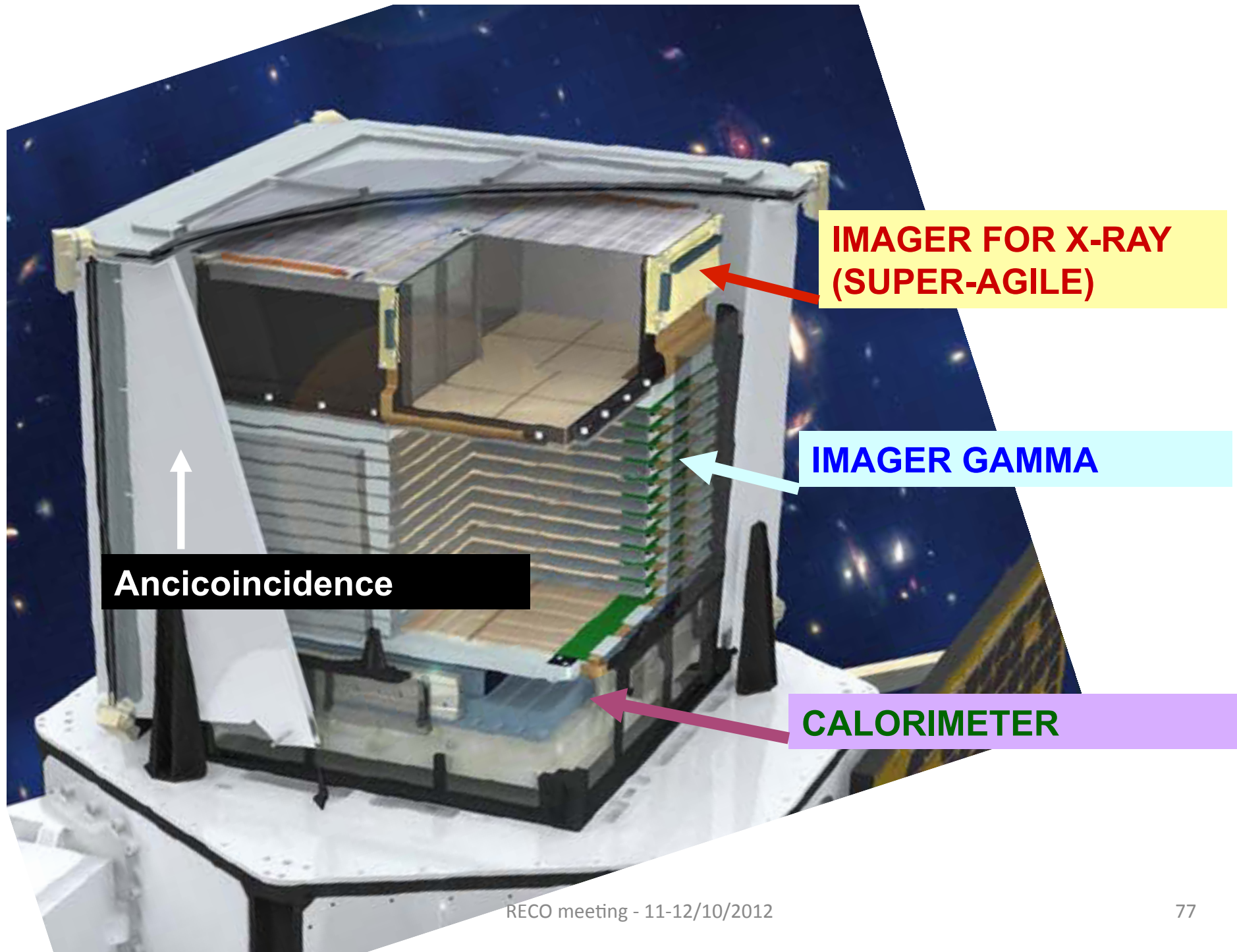
**AGILE Satellite
(IABG, Munich
16 June, 2006)**

330 kg satellite

**ASI
INAF
INFN**

AGILE integrated in the PSLV April 15,
2007





**IMAGER FOR X-RAY
(SUPER-AGILE)**

IMAGER GAMMA

Ancicoincidence

CALORIMETER

AGILE



INAF



Carlo Gavazzi Space SpA



OERLIKON
CONTRAVES



ALCATEL ALENIA SPACE
An Alcatel/Finmeccanica company



telespazio
A Finmeccanica/Alcatel company



Galileo Avionica



ENEA

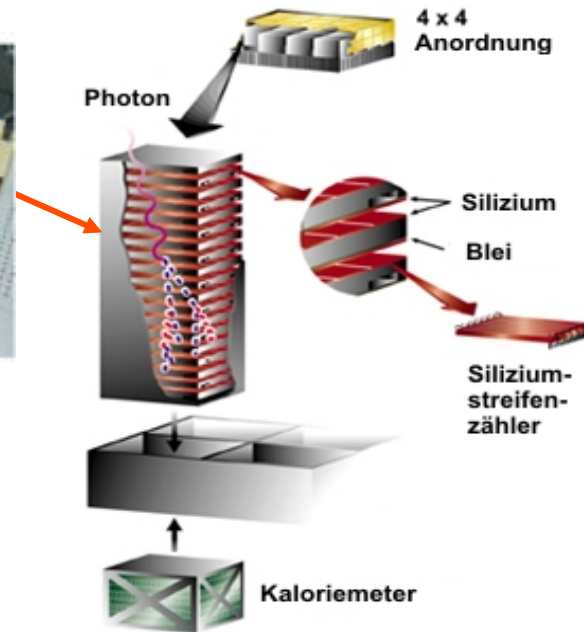
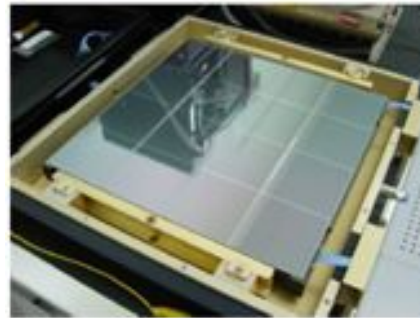


Fermi, NASA



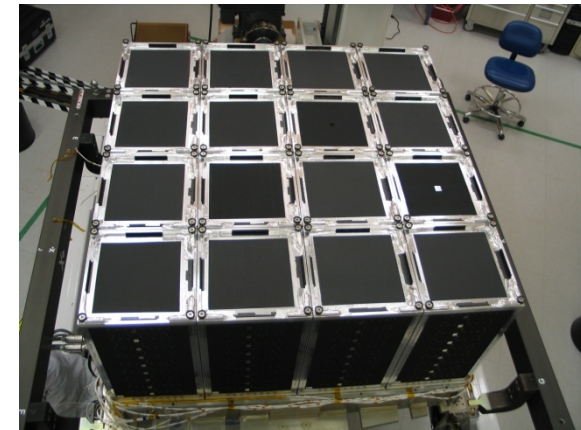
Fermi – LAT

from G. Kanbach



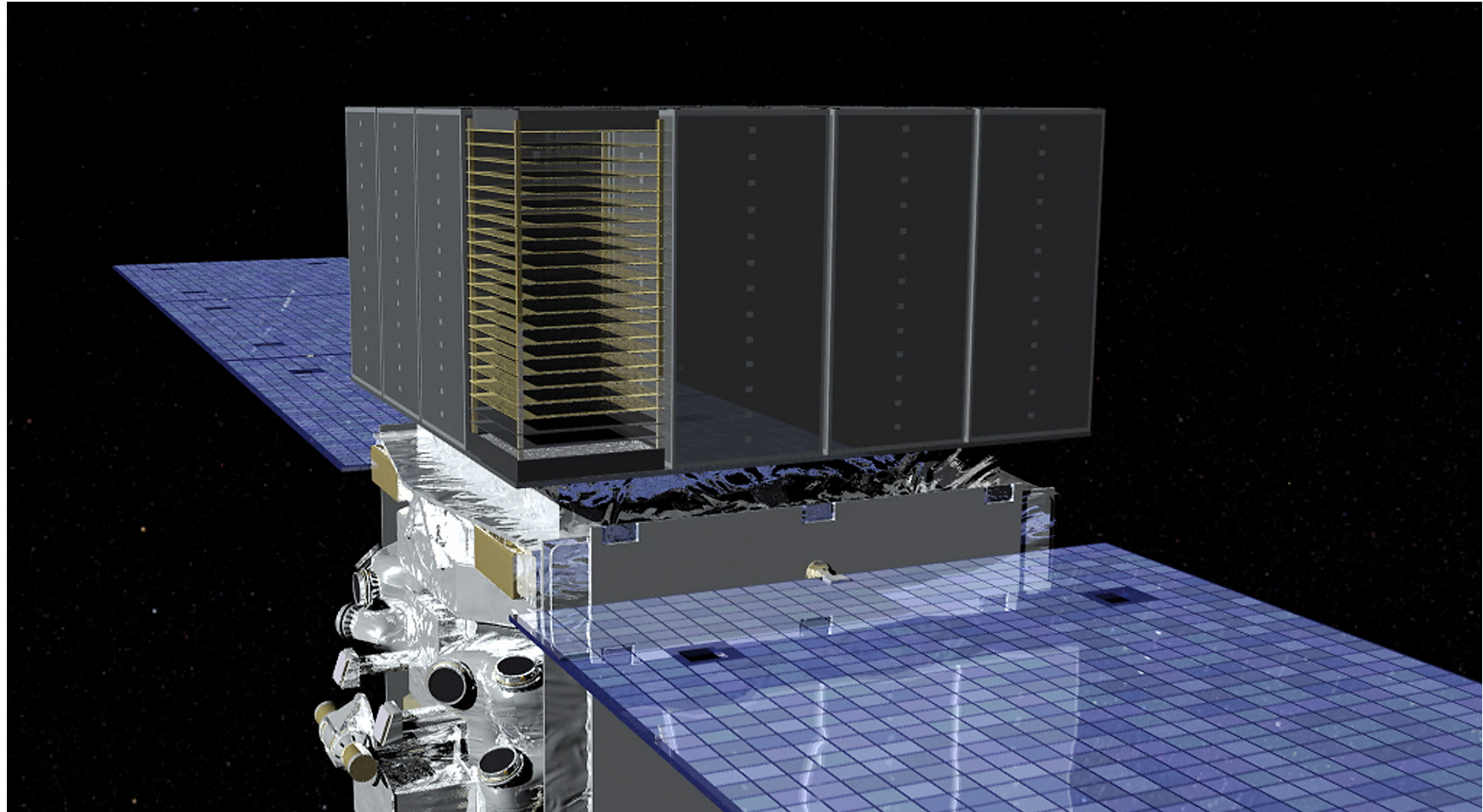
The 18 tungsten converter layers and 16 dual silicon tracker planes are stacked in 16 modular "towers" (37 cm square and 66 cm tall). Each of the 16 calorimeter modules consists of 96 long, narrow CsI scintillators, stacked in 8 layers, alternating in orientation so that the location and spread of the deposited energy can be determined. The plastic anticoincidence scintillator around the outside is made of 89 individual sections so that it can distinguish charged particles coming from the direction of the incident gamma ray and ignore others.

The LAT is 0.72 m deep and 1.8 m square. Its total mass is **2789 kg**. It uses 650 W of electric power.



... a tracker of stacked Si strip detectors

Fermi/NASA



Andrea Bulgarelli (bulgarelli@iasfbo.inaf.it)

The Fermi Observatory



Large Area Telescope (LAT)
20 MeV - >300 GeV

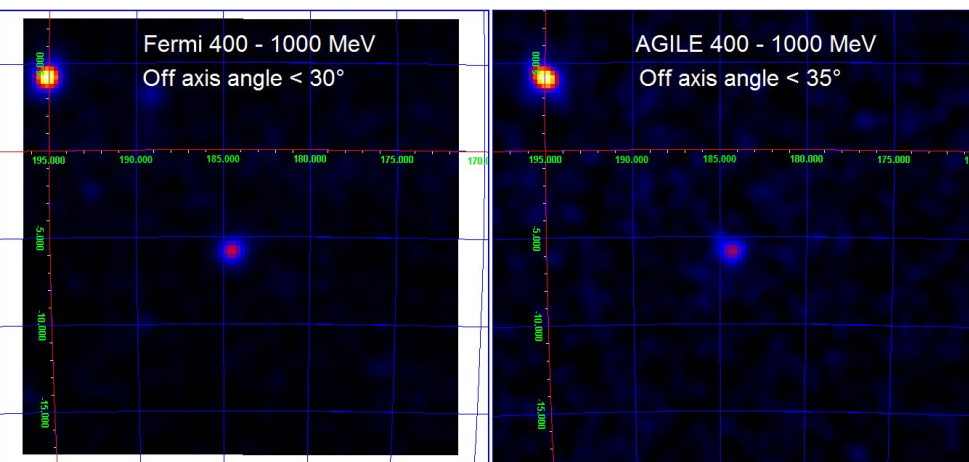
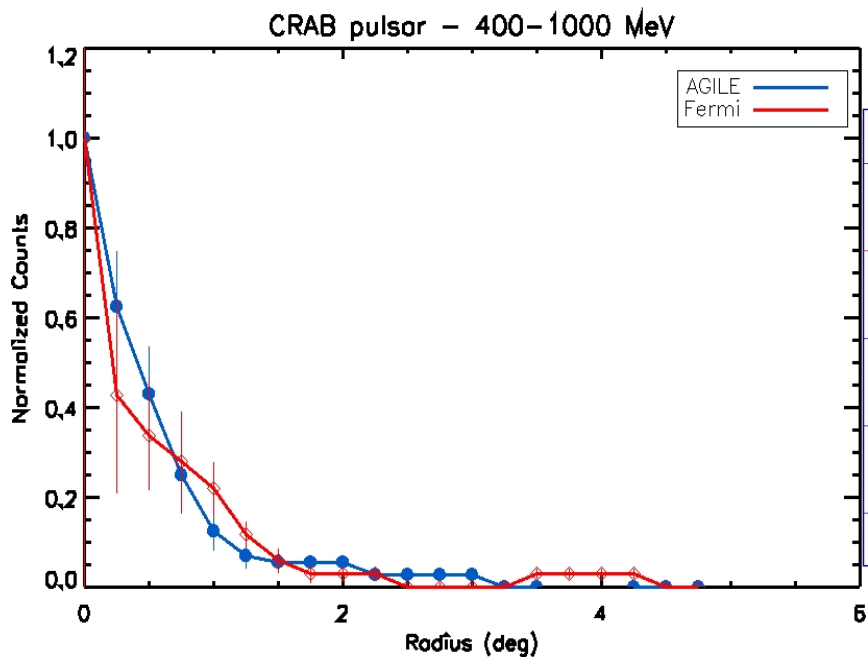
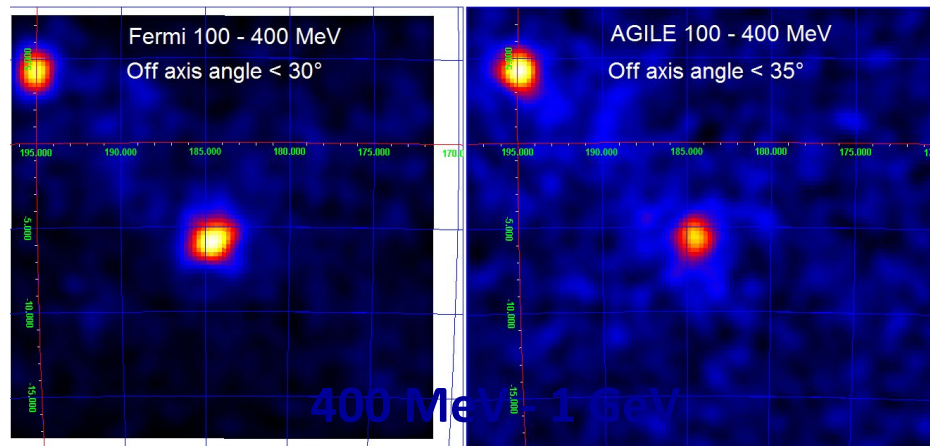
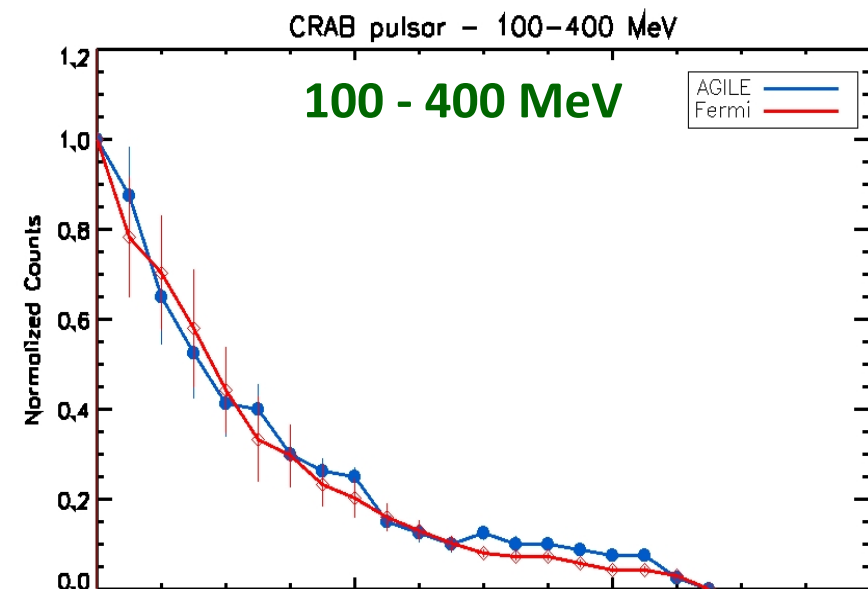
Gamma-ray Burst Monitor (GBM)
NaI and BGO Detectors
8 keV - 40 MeV

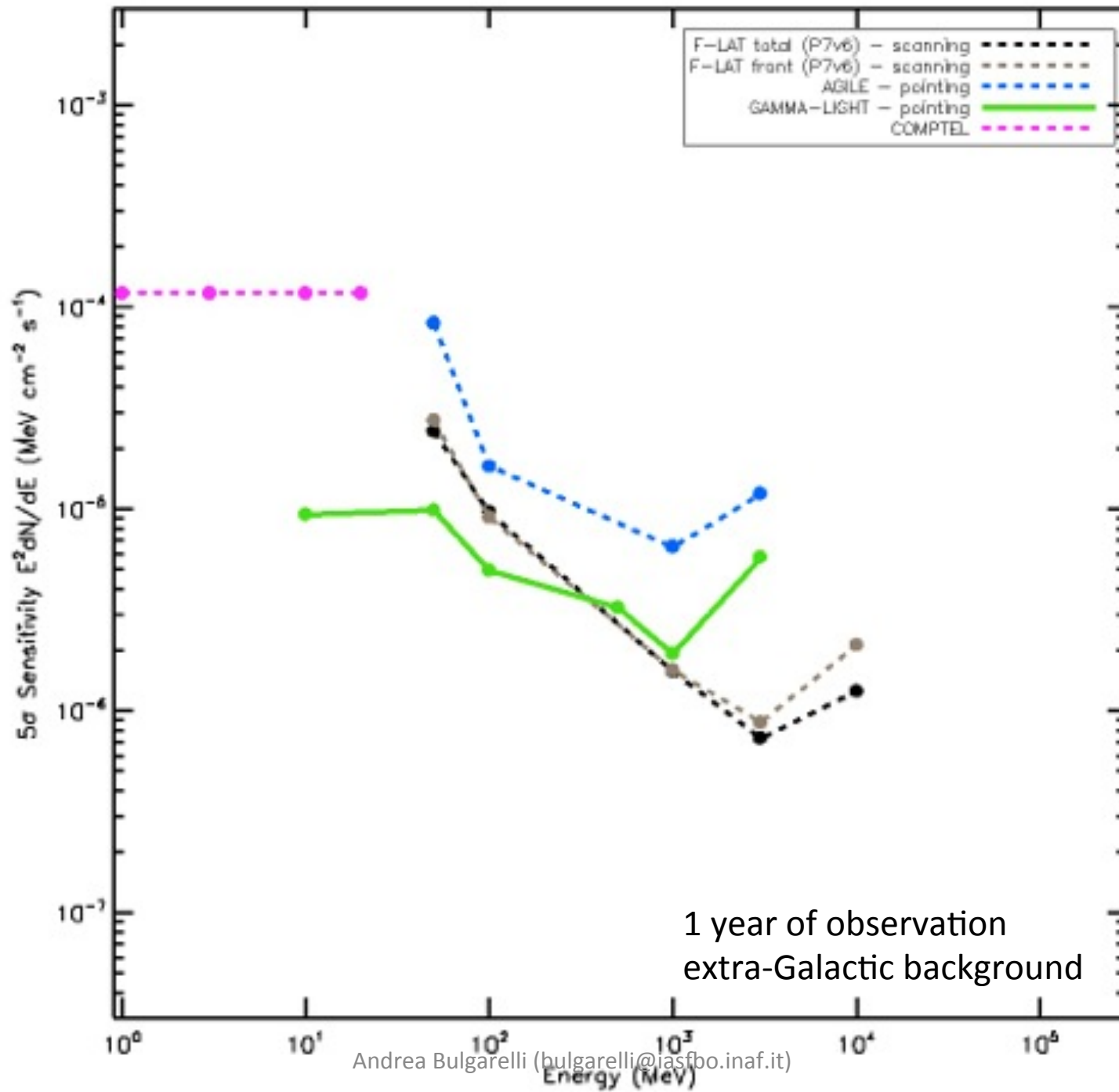
KEY FEATURES

- **Field of view**
 - LAT: 2.4 sr; 20% of the sky at any instant (the same of AGILE);
 - GBM: whole unocculted sky at any time.
- **Every photon can be time-tagged.**
 - 1 microsecond accuracy

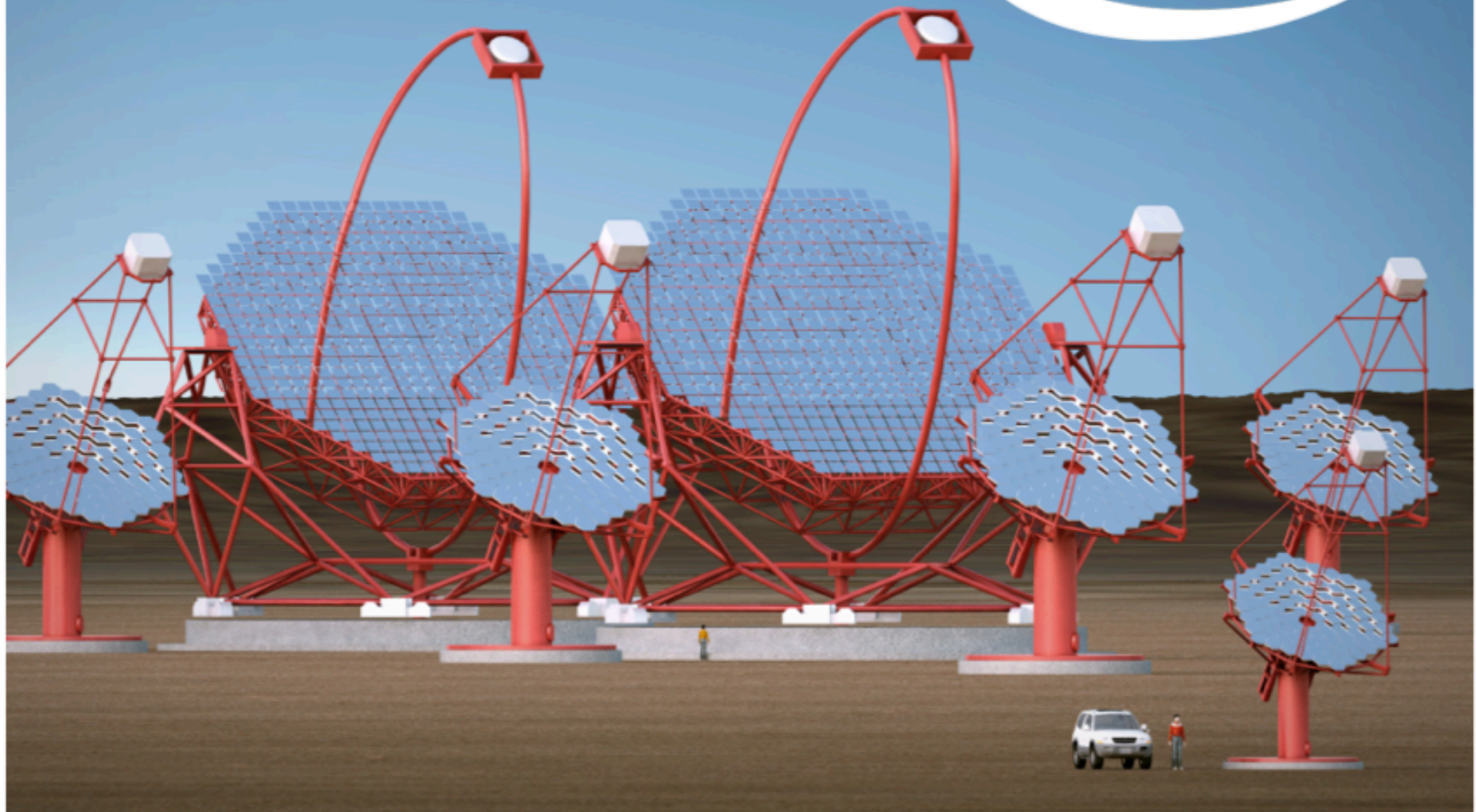
Launched June 11, 2008

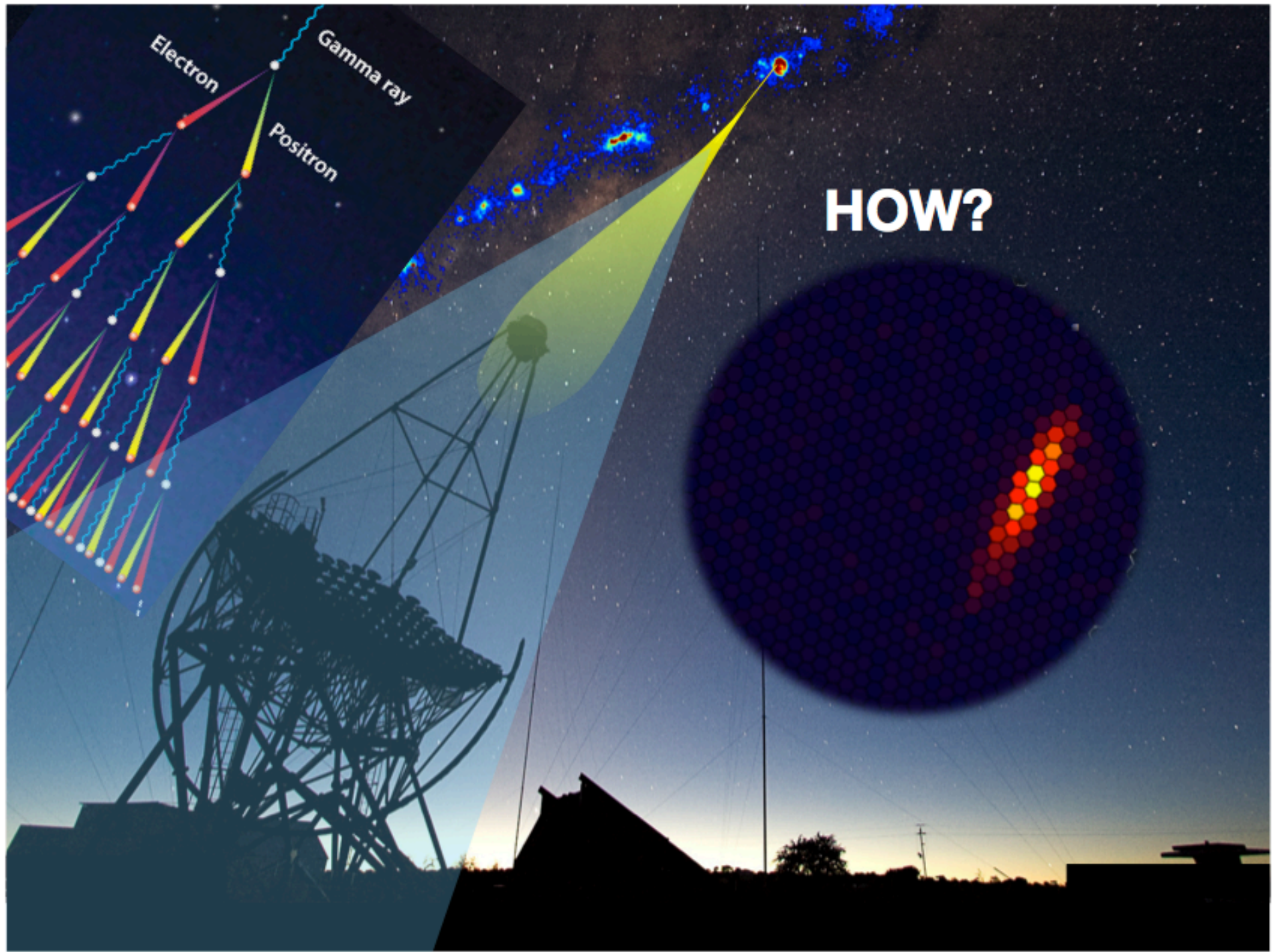
Gamma-Ray PSF: AGILE vs. Fermi (front-LAT) - Crab





CTA – A NEW WINDOW ONTO THE VIOLENT UNIVERSE





Electron

Gamma ray

Positron

HOW?

La luce Čerenkov

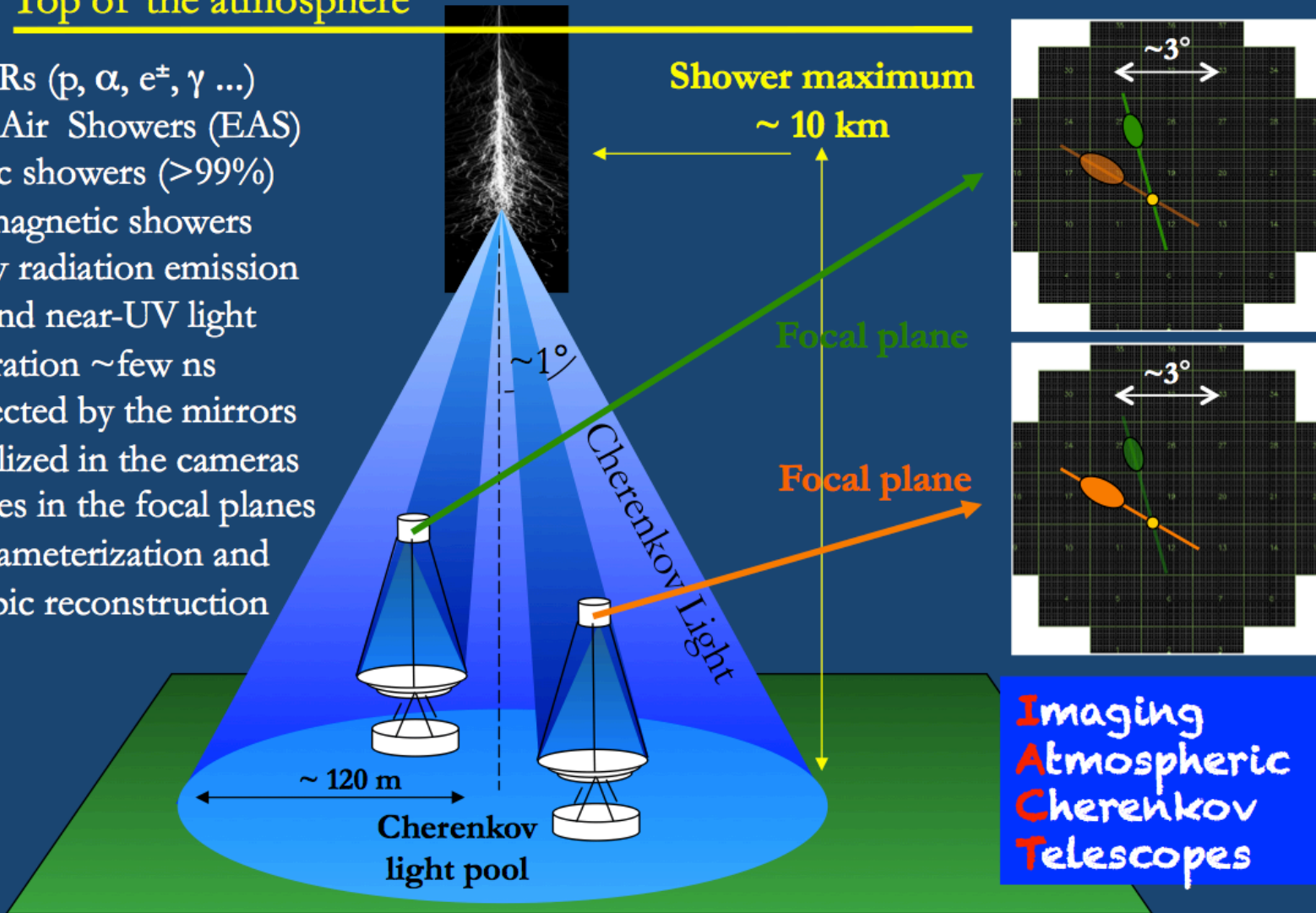
L'emissione di luce Čerenkov avviene quando una particella carica si muove in un mezzo con una velocità superiore a quella che avrebbe un fotone nello stesso mezzo. Non può quindi avvenire nel vuoto, dove la luce viaggia alla massima velocità indicata con c ; ma in un mezzo con indice di rifrazione n (con n sempre maggiore di 1) la velocità della luce scende a c/n e questo permette a una particella carica con velocità $v=\beta c$ (con β sempre minore di 1) di produrre luce Čerenkov quando $\beta > 1/n$. L'indice di rifrazione dell'aria al livello del mare è pari a 1,00029, da cui si ottiene $\beta_{\min} = 0,99971$. La velocità di una particella può essere convertita in energia conoscendo la sua massa a riposo m ; nel nostro caso si ottiene $E_{\min} = 1/\sqrt{1 - \beta^2} \cdot mc^2$. Da questa formula si ricava che l'energia minima per l'emissione di luce Čerenkov si ha per la particella carica più leggera, l'elettrone (negativo e positivo), ed è pari a 21 MeV, corrispondente al-

very dim – few light quanta per m^2
short flash of a few nano-seconds

IAC Technique

Top of the atmosphere

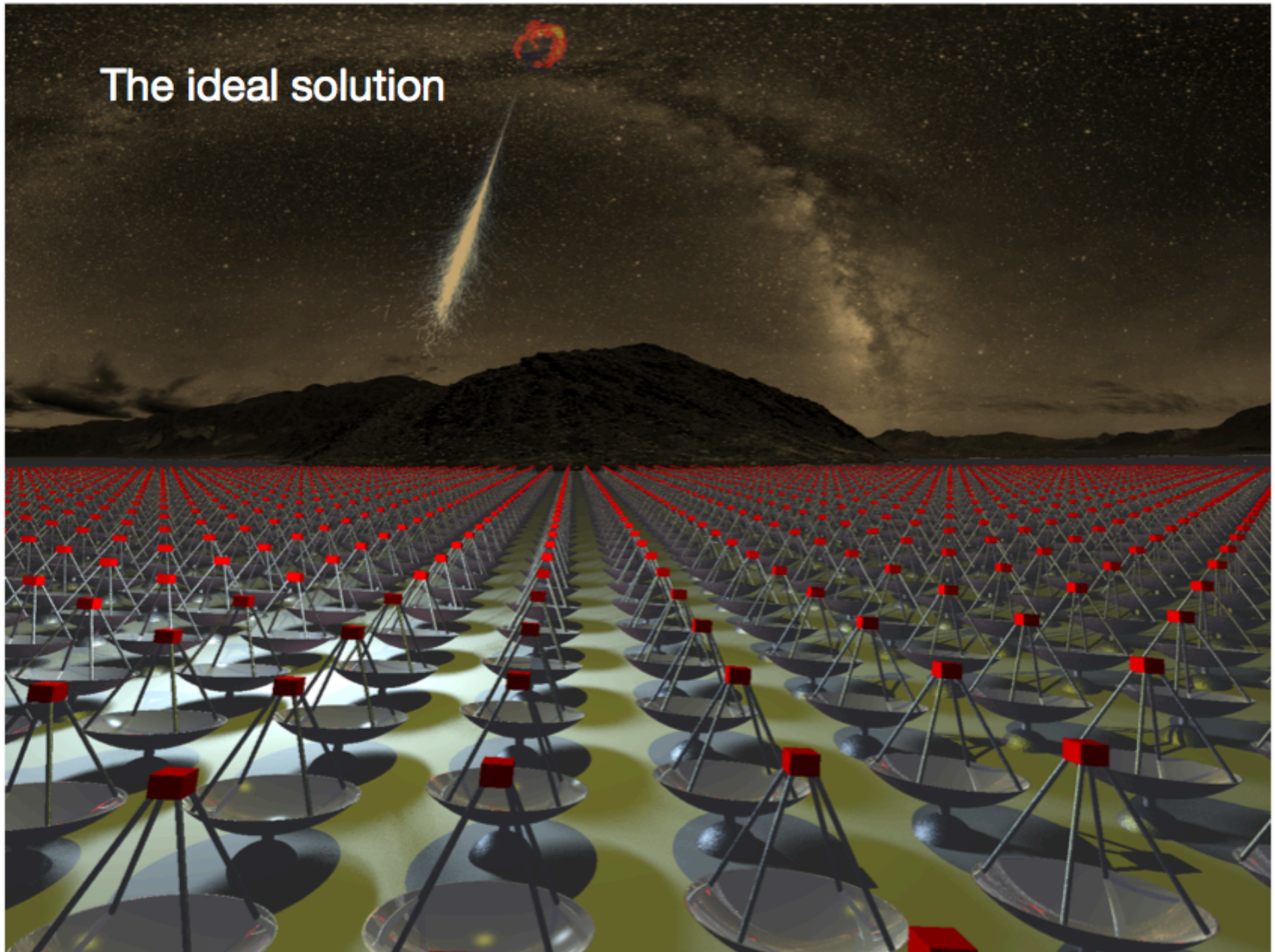
- Primary CRs (p , α , e^\pm , γ ...)
- Extended Air Showers (EAS)
 - Hadronic showers (>99%)
 - Electromagnetic showers
- Cherenkov radiation emission
 - optical and near-UV light
 - flash duration \sim few ns
- Light collected by the mirrors
- Light focalized in the cameras
- EAS images in the focal planes
- Image parameterization and
- Stereoscopic reconstruction



The High Energy Stereoscopic System Cherenkov telescopes (H.E.S.S.)



The ideal solution



Science-optimization under budget constraints:

- **Low-energy γ** high γ -ray rate, low light yield
→ require small ground area, large mirror area
- **High-energy γ** low γ -rate, high light yield
→ require large ground area, small mirror area

few large telescopes
for lowest energies,
for 20 GeV to 1 TeV

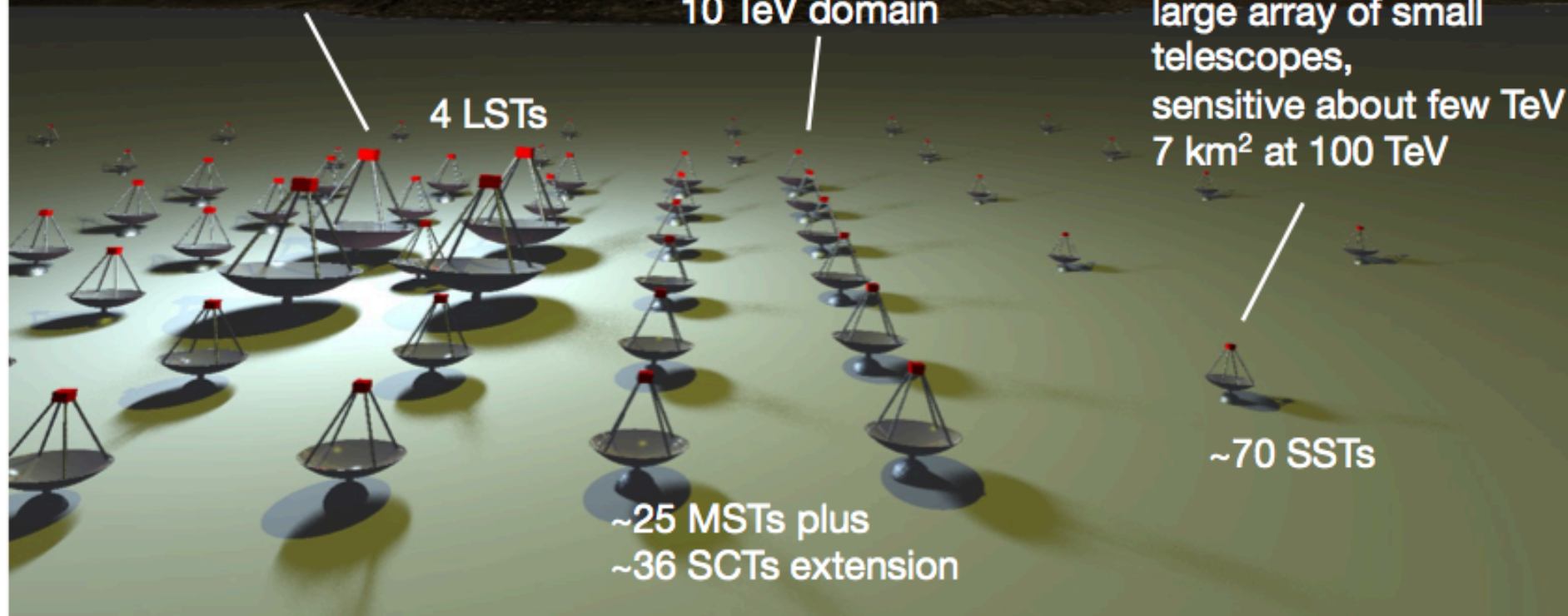
~km² array of
medium-sized
telescopes for
the 100 GeV to
10 TeV domain

large array of small
telescopes,
sensitive about few TeV
7 km² at 100 TeV

4 LSTs

~70 SSTs

~25 MSTs plus
~36 SCTs extension



References

- Giacconi, R., et al. 1968, *Observational Techniques in X-Ray Astronomy*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 6, p. 373
- Gursky, H., & Schwartz, D. 1974, in *X-Ray Astronomy*, R. Giacconi & H. Gursky eds., (Boston: D. Reidel), Chapter 2, pp. 44-52
- Peterson, L.E. 1975, *Instrumental techniques in X-ray astronomy*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 13, p. 423
- Zombeck, M.V., 1990, *Handbook of Space Astronomy & Astrophysics*, 2nd ed., Cambridge University Press
- Fraser, G.W., 1989, *X-ray Detectors in Astronomy*, Cambridge University Press, 1989
- Knoll, G.F., 2000, *Radiation Detection and Measurement*, 3rd ed., John Wiley 2000
- http://xmm.esac.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/technical/
- <http://cxc.harvard.edu/proposer/POG/html/index.html>
- http://space.mit.edu/~jonathan/xray_detect.html
- <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayTrans/Html/search.html>