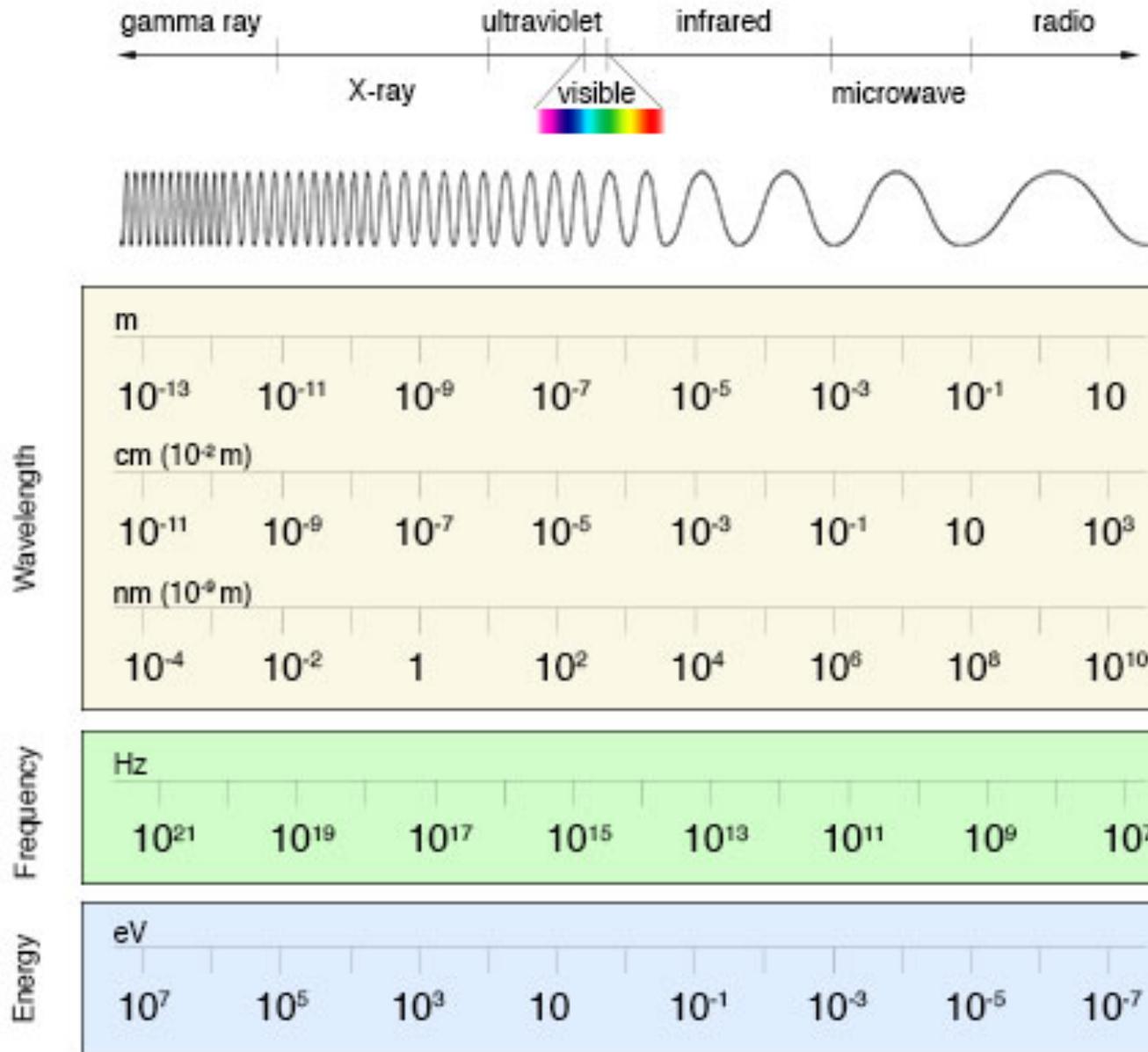


# **Rivelatori per astronomia X e gamma dallo spazio parte 1**

V. Fioretti, A. Bulgarelli  
(INAF/IASF Bologna)

# Il cielo in raggi X e Gamma: spettro elettromagnetico



Credits: NASA

$$E(\text{eV}) = hc/\lambda(\mu\text{m})$$

$$\approx 1.24/\lambda(\mu\text{m})$$

1 eV  $\approx$  11600 Kelvin deg.

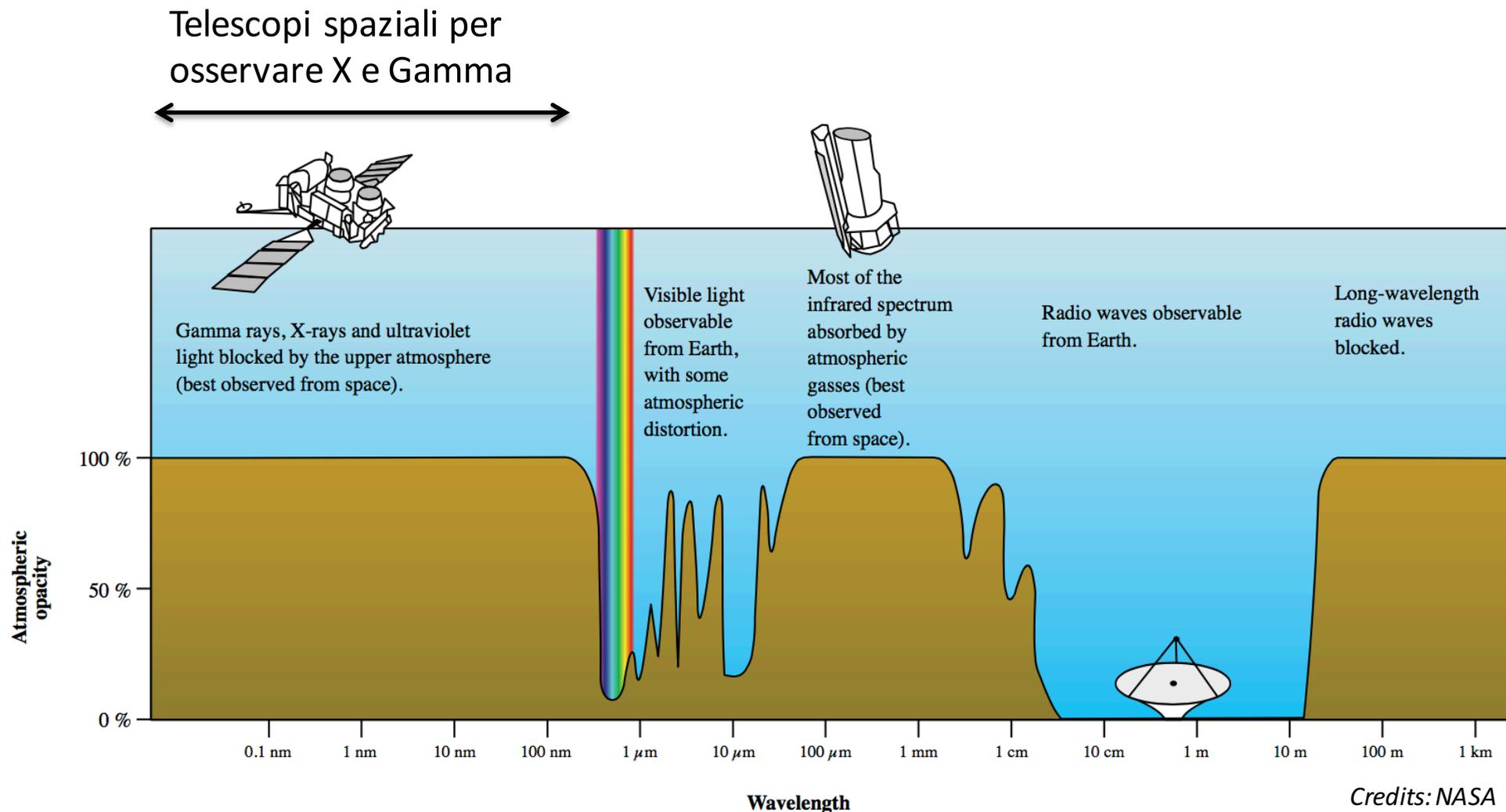
1000 eV = 1 keV

1000 keV = 1 MeV

1000 MeV = 1 GeV

# Il cielo in raggi X e Gamma: assorbimento atmosferico

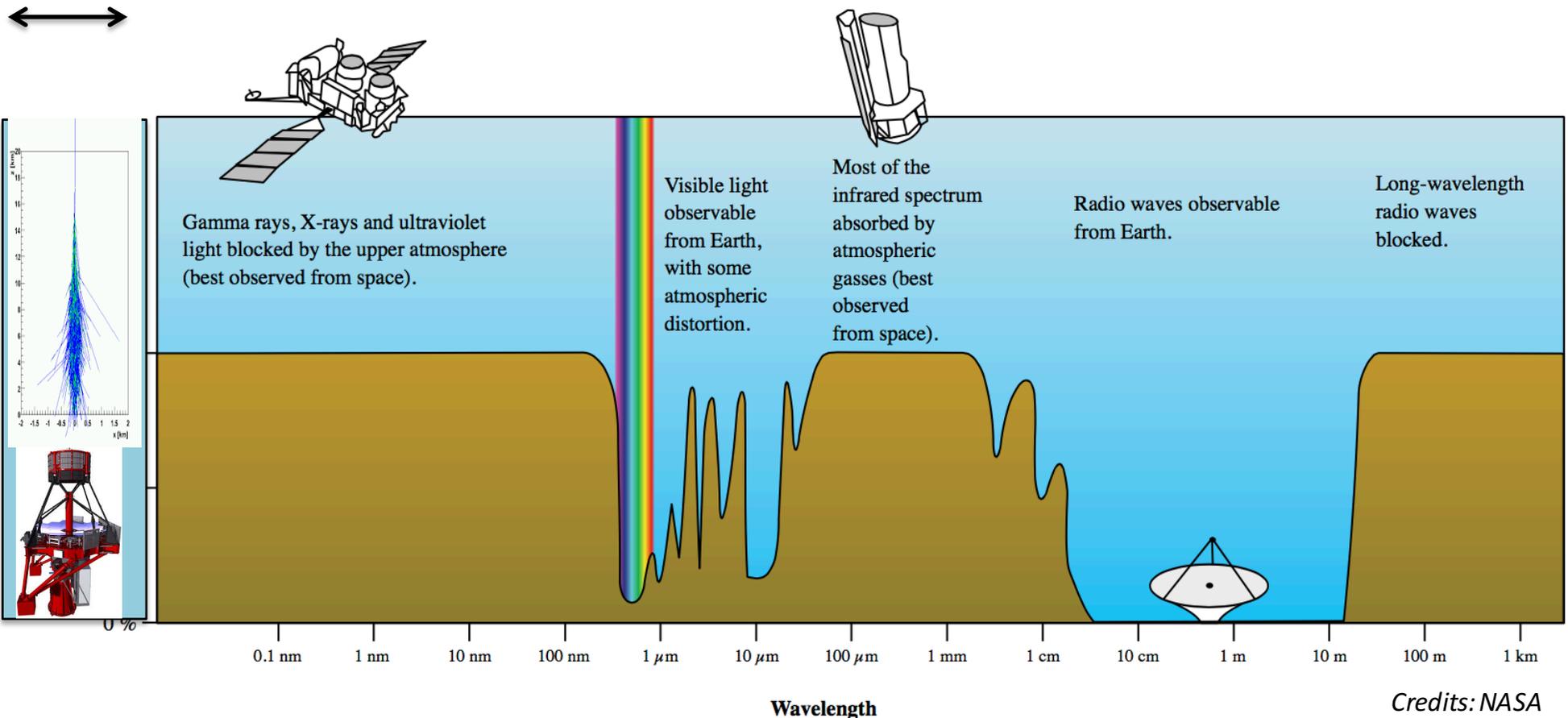
La banda osservativa (raggi X? Radio?) definisce il tipo di tecnologia (spazio o terra, tipo di rivelatori, etc.)

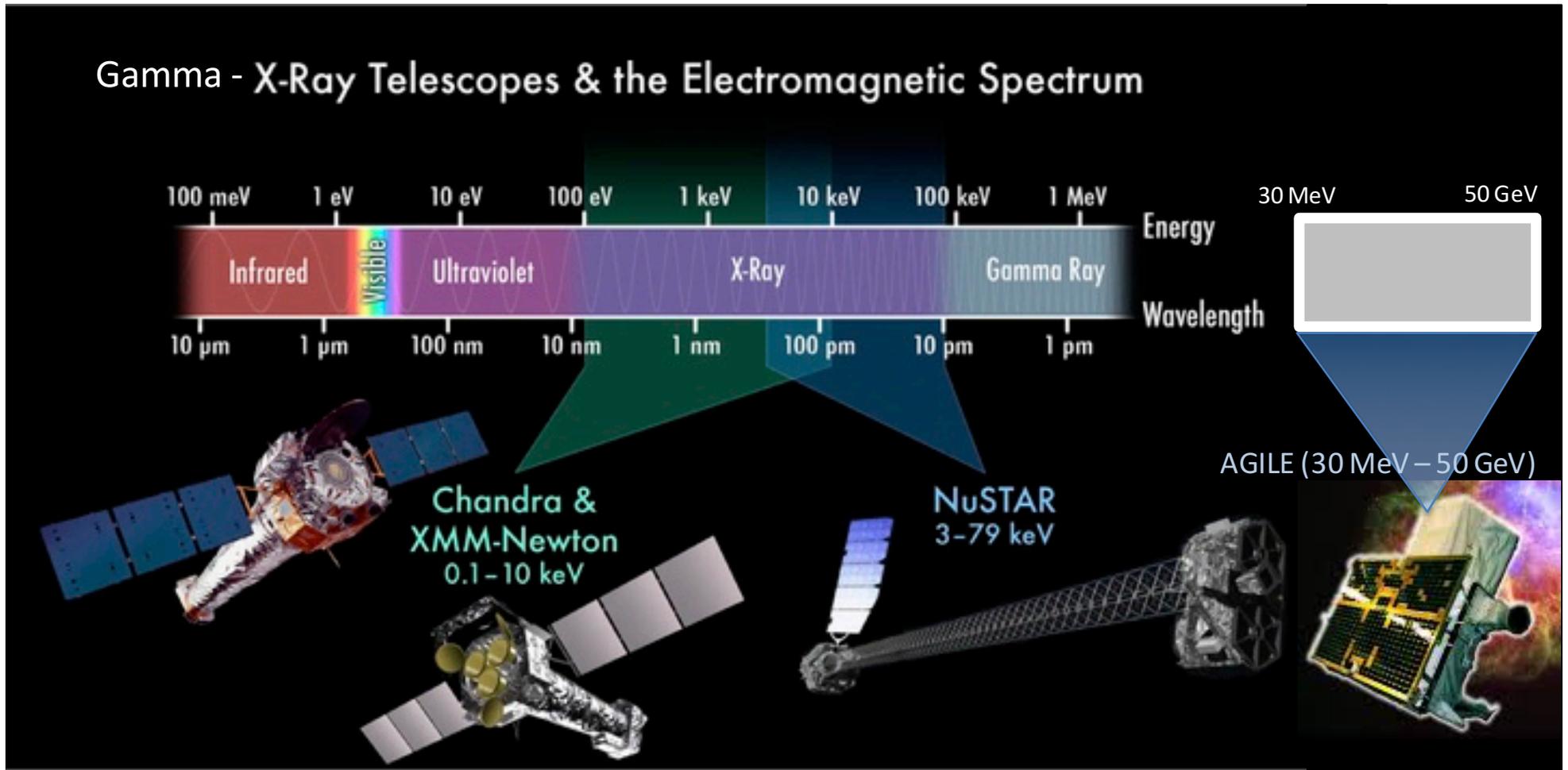


# Il cielo in raggi X e Gamma: assorbimento atmosferico

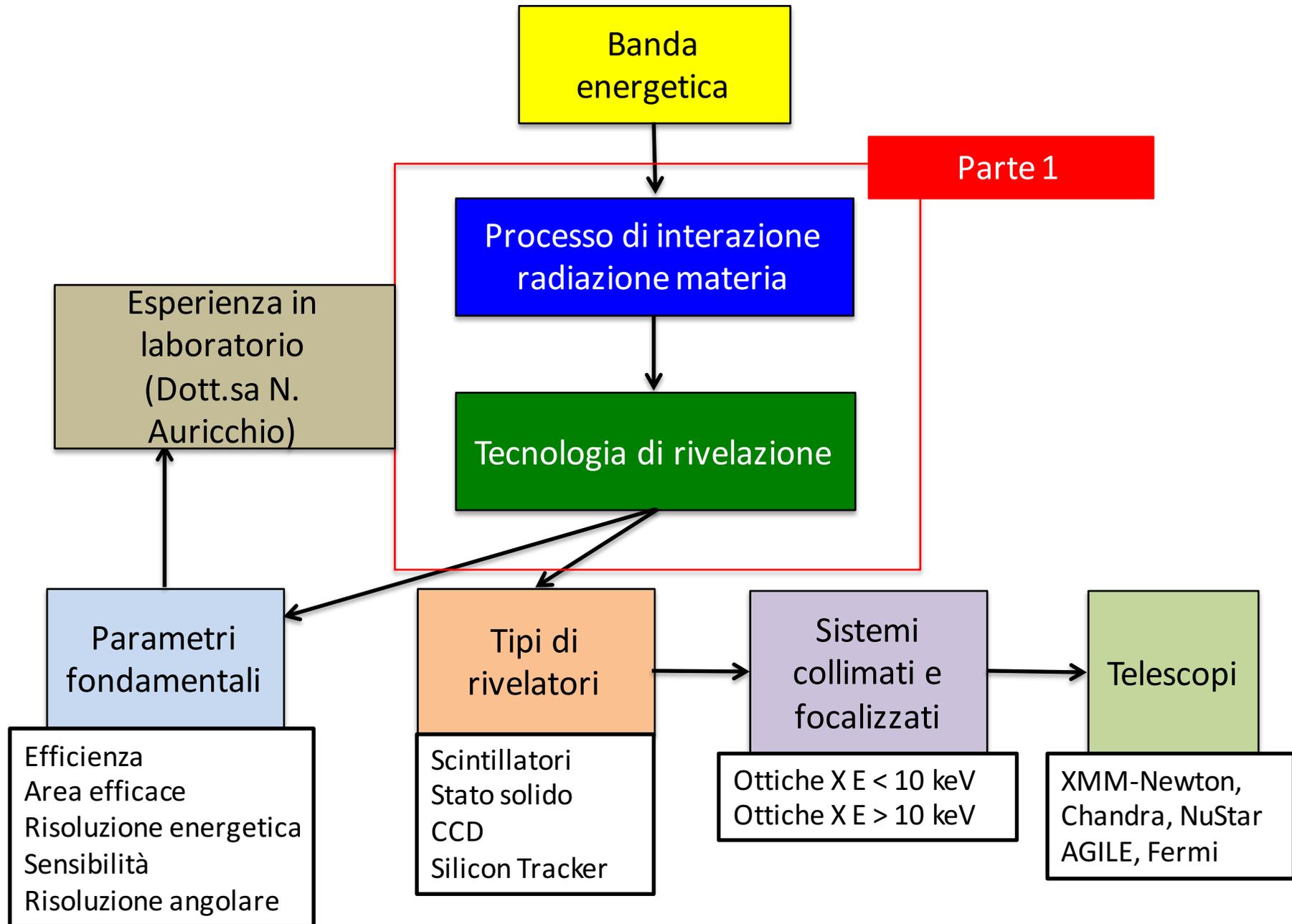
La banda osservativa (raggi X? Radio?) definisce il tipo di tecnologia (spazio o terra, tipo di rivelatori, etc.)

Nella banda  $E > 10$  GeV (Very High Energy Gamma-rays) si può sfruttare l'interazione dei raggi gamma con l'atmosfera (effetto Cherenkov) per osservare indirettamente da terra!





# Table of Contents



---

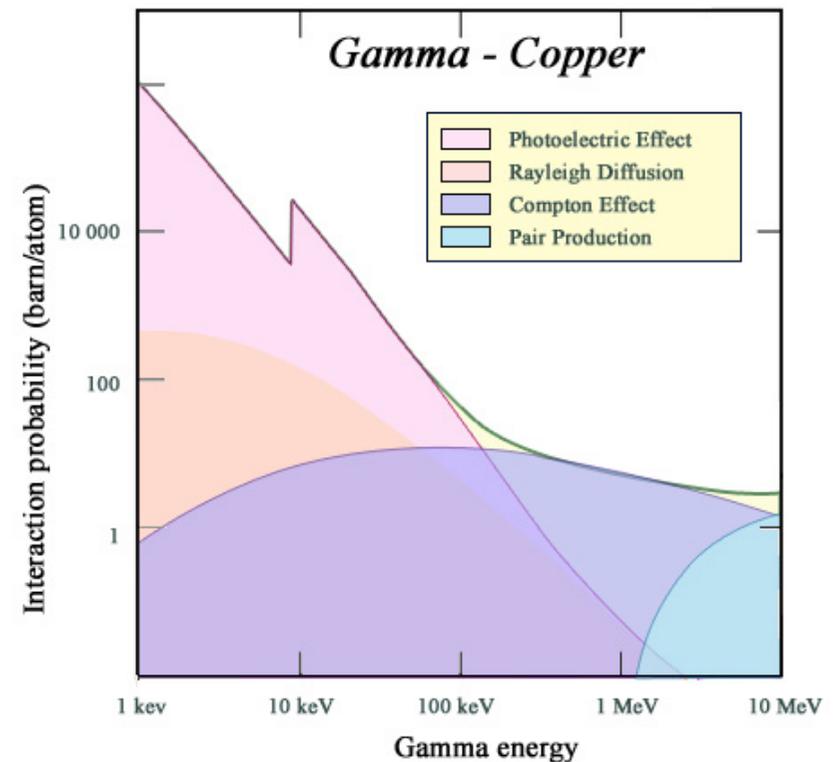
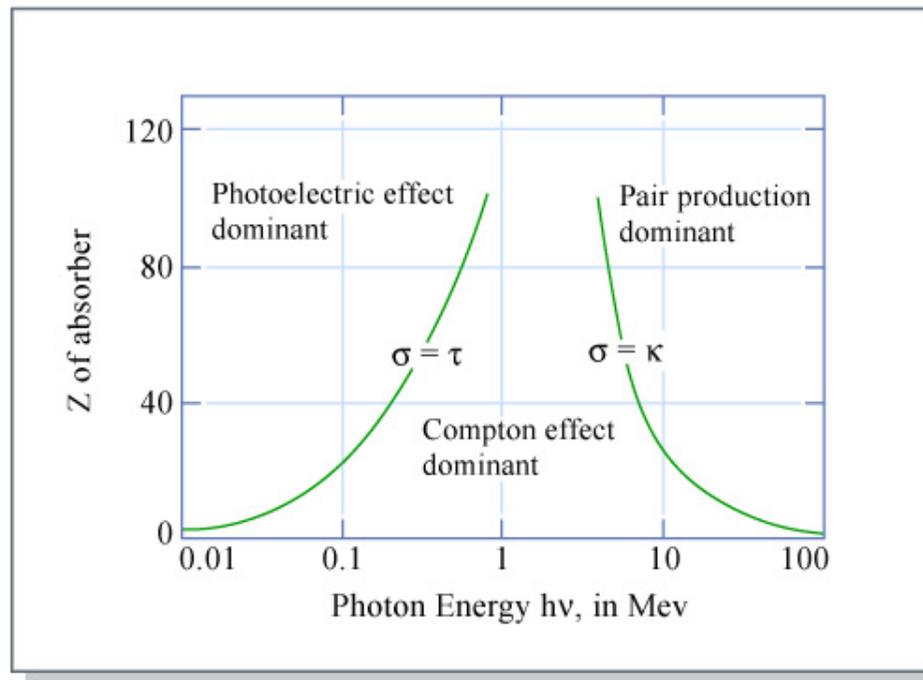
Prima parte:  
Interazione  
radiazione-materia

# Interazione radiazione-materia: concetti chiave

I processi di interazione radiazione-materia nella banda X-Gamma:

- Assorbimento fotoelettrico
- Scattering elastico (Thomson o Rayleigh) e inelastico (Compton)
- Produzione di coppie

Al variare dell'energia del fotone e del materiale, varia la probabilità (la sezione d'urto) che un processo di interazione sia dominante

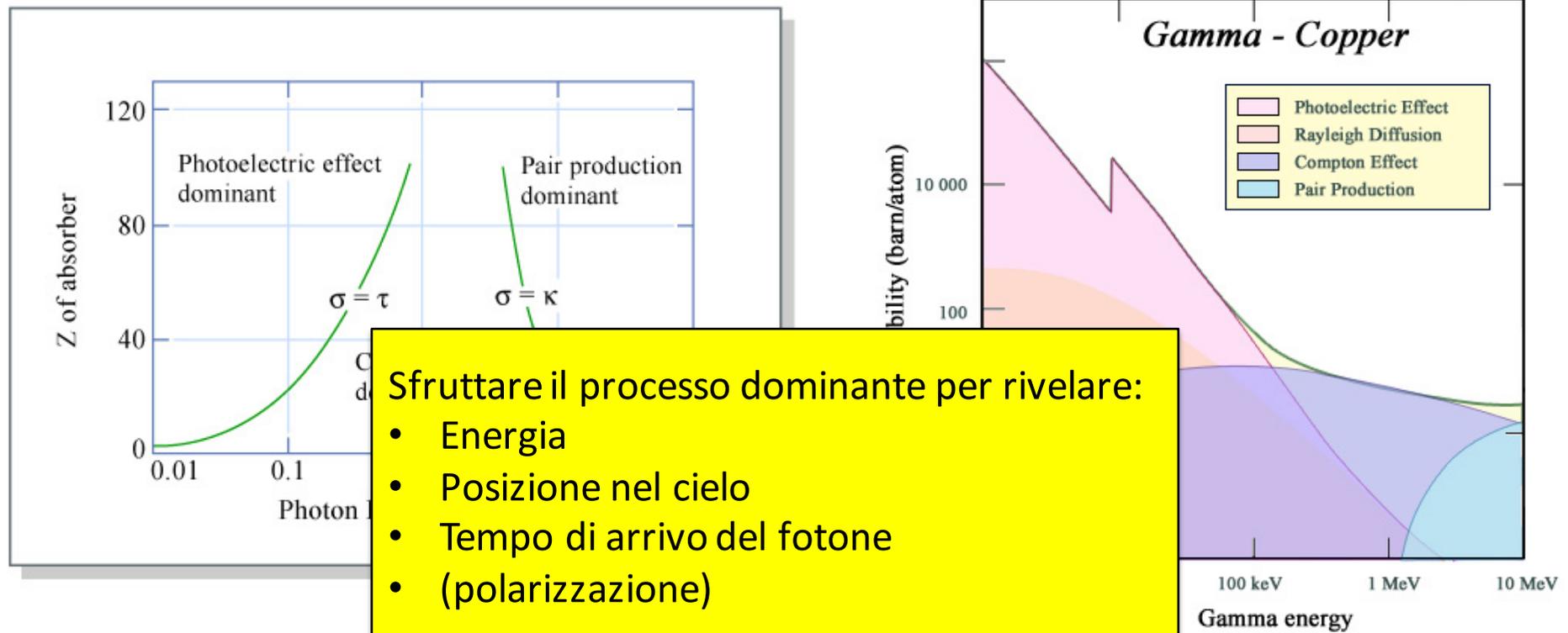


# Interazione radiazione-materia: concetti chiave

I processi di interazione radiazione-materia nella banda X-Gamma:

- Assorbimento fotoelettrico
- Scattering elastico (Thomson o Rayleigh) e inelastico (Compton)
- Produzione di coppie

Al variare dell'energia del fotone e del materiale, varia la probabilità (la sezione d'urto) che un processo di interazione sia dominante

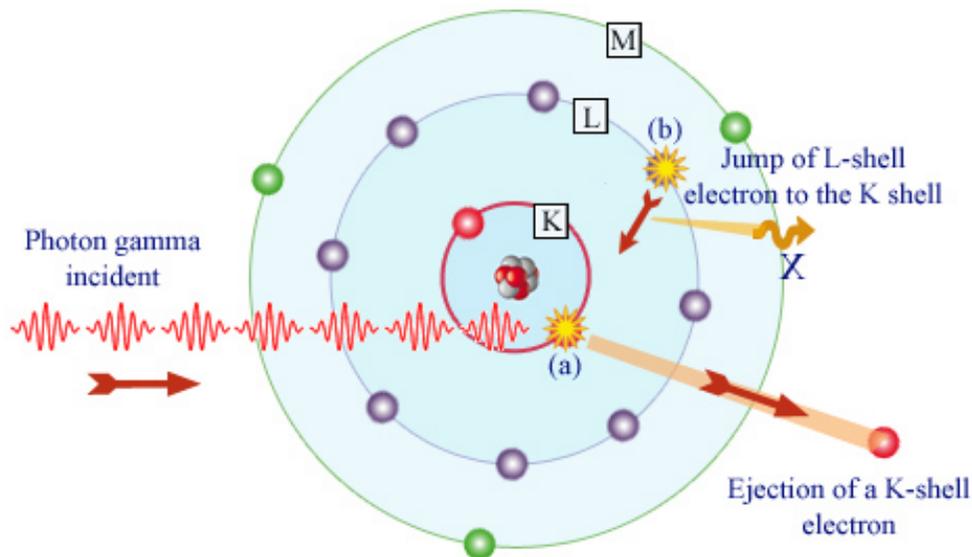


## Effetto fotoelettrico (o fotoionizzazione)

- L'interazione avviene tra il fotone e l'atomo.
- Il fotone viene completamente assorbito e la sua energia viene trasferita ad uno degli elettroni di legame dell'atomo, che può essere liberato e emesso (il cosiddetto fotoelettrone) o può passare ad una shell più esterna.
- L'energia cinetica del fotoelettrone è pari alla differenza tra l'energia del fotone incidente e l'energia di legame dell'elettrone:

$$E_{e^-} = \overset{\text{Energia del fotone}}{\hbar\nu} - \overset{\text{Energia di legame dell'elettrone}}{E_b}$$

- Circa l'80% degli assorbimenti nella banda X avviene nella shell più interna K, con emission di un elettrone della shell K
- E' il meccanismo predominante per i raggi X nella banda 1 – 100 keV e la probabilità (la sezione d'urto) aumenta con il numero atomico Z

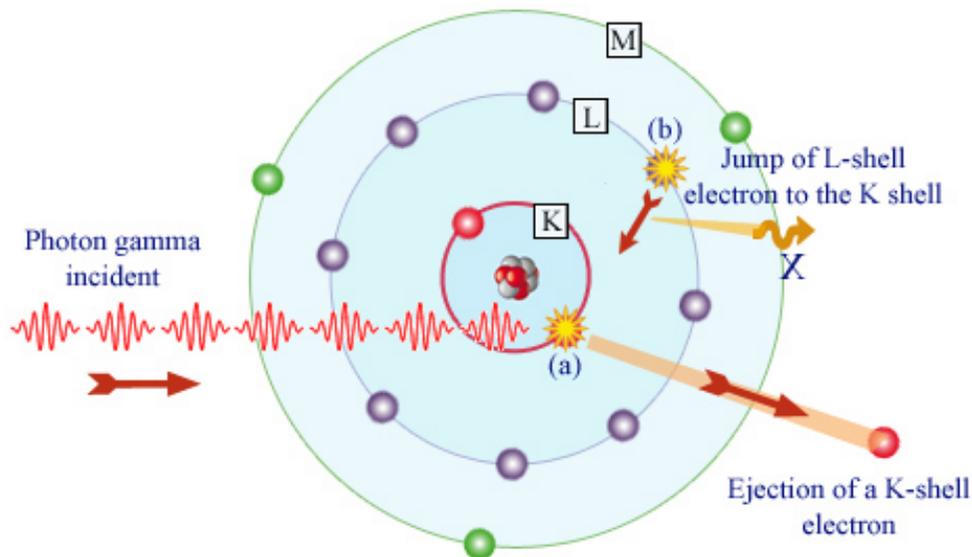


## Effetto fotoelettrico (o fotoionizzazione)

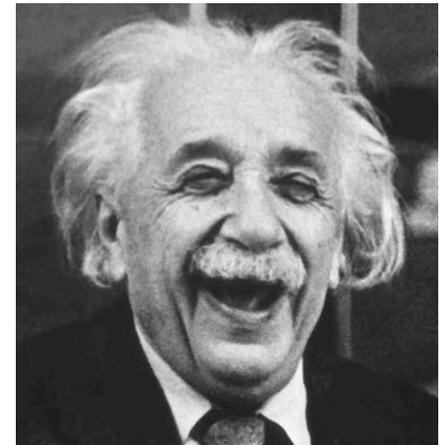
- L'interazione avviene tra il **fotone** e l'**atomo**.
- Il **fotone** viene completamente assorbito e la sua **energia** viene trasferita ad uno degli **elettroni di legame dell'atomo**, che può essere liberato e emesso (il cosiddetto **fotoelettrone**) e può **passare ad una shell più esterna**.
- **L'energia cinetica** del fotoelettrone è pari alla differenza tra l'energia del fotone incidente e l'energia di legame dell'elettrone:

$$E_{e^-} = \overset{\text{Energia del fotone}}{\hbar\nu} - \overset{\text{Energia di legame dell'elettrone}}{E_b}$$

- Circa l'80% degli assorbimenti nella banda X avviene nella shell più interna K, con emission di un elettrone della shell K
- E' il **meccanismo predominante per i raggi X nella banda 1 – 100 keV** e la **probabilità** (la sezione d'urto) aumenta con il numero atomico Z

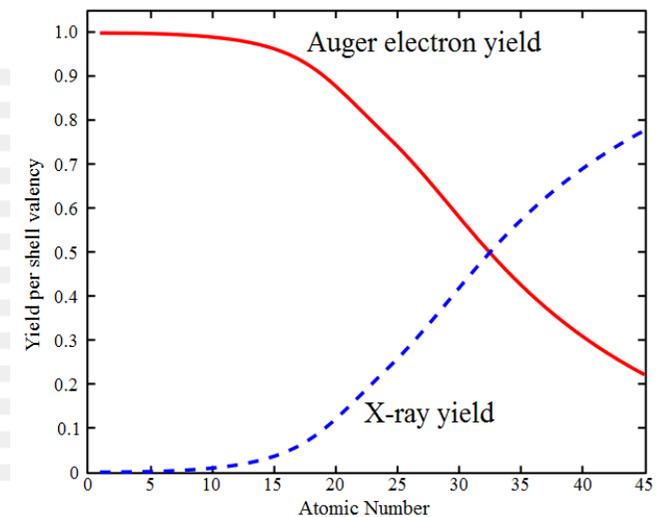
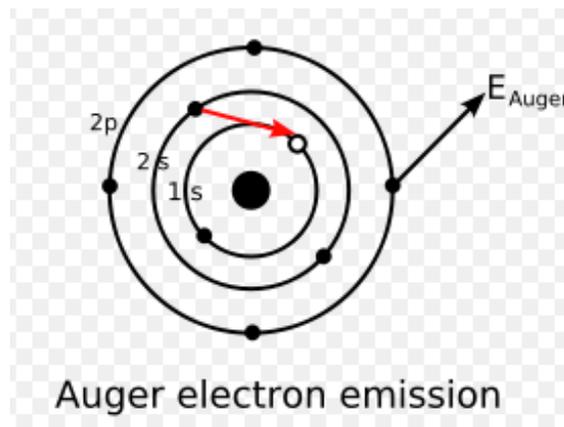
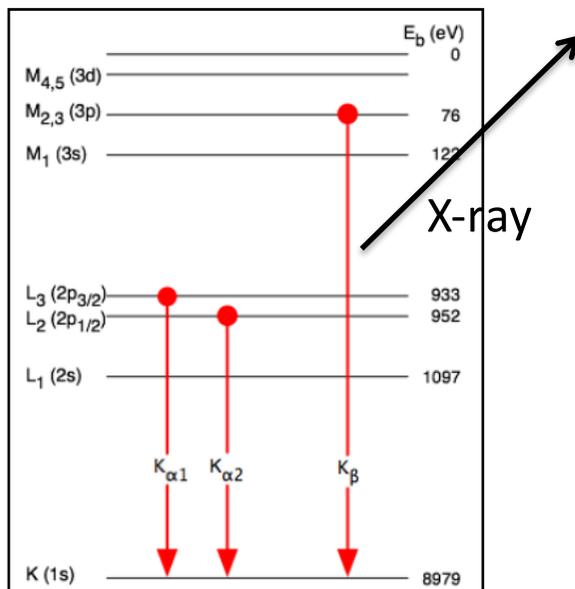


Nobel ad Einstein nel 1921 per la spiegazione quantistica dell'effetto fotoelettrico!



# Effetto fotoelettrico

- A causa dell'emissione del fotoelettrone, in seguito all'interazione l'atomo è in uno stato eccitato
- A questo stato può seguire **l'arrangiamento degli elettroni dalle shell più esterne**
- A seguito di questo arrangiamento **può essere emesso**:
  - un **fotone X (fluorescenza)**, in genere emissione di  $K\alpha$  essendo la K shell quella che espelle il fotoelettrone. L'energia del fotone di fluorescenza è pari alla differenza in energia tra le due shell.
  - Un elettrone da una shell esterna (**elettrone di Auger**). In questo caso l'energia dell'elettrone liberato è pari alla differenza tra la differenza in energia delle due shell e l'energia di ionizzazione dell'elettrone di Auger
- La probabilità ("fluorescence yield") di X-ray/Auger dipende dal numero atomico



## Scattering elastico e inelastico

### Scattering elastico (Thomson o Rayleigh)

Lo scattering elastico (o coerente) descrive l'interazione tra il fotone X e un elettrone libero (Thomson) o di legame (Rayleigh) per cui il fotone scatterato, come nelle collisioni elastiche, ha la stessa energia del fotone incidente (ma angolo diverso). Lo scattering elastico è valido solo per basse energie, quando l'energia del fotone incidente è molto minore dell'energia di massa della particella.

$$h\nu \ll mc^2$$

### Scattering inelastico (Compton)

Lo scattering inelastico (o incoerente) o scattering Compton descrive l'interazione tra il fotone X e un elettrone atomico per cui parte dell'energia del fotone viene ceduta all'elettrone (emesso dall'atomo), nei casi in cui l'energia di legame dell'elettrone sia molto minore dell'energia del fotone incidente.

$$h\nu \gg E_b$$

# Scattering elastico e inelastico

## Scattering elastico (Thomson o Rayleigh)

Lo scattering elastico (o coerente) descrive l'interazione tra il fotone X e un elettrone libero (Thomson) o di legame (Rayleigh) per cui il fotone scatterato, come nelle collisioni elastiche, ha la stessa energia del fotone incidente (ma angolo diverso). Lo scattering elastico è valido solo per basse energie, quando l'energia del fotone incidente è molto minore dell'energia di massa della particella.

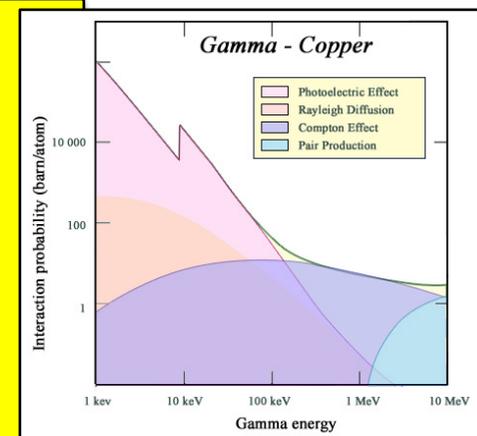
$$h\nu \ll mc^2$$

## Scattering inelastico (Compton)

Lo scattering inelastico (o incoerente) o scattering Compton descrive l'interazione tra il fotone X e un elettrone atomico per cui parte dell'energia del fotone viene ceduta all'elettrone (emesso dall'atomo), nei casi in cui l'energia di legame dell'elettrone sia molto minore dell'energia del fotone incidente.

$$h\nu \gg E_b$$

Nei rivelatori X e Gamma e in generale nelle tecnologie spaziali probabilità dello scattering elastico trascurabile rispetto al fotoelettrico



# Scattering Compton

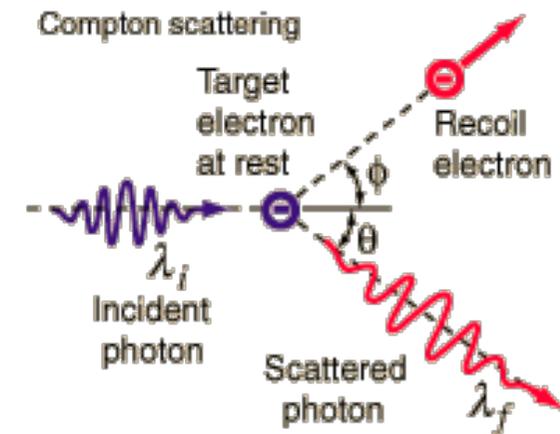
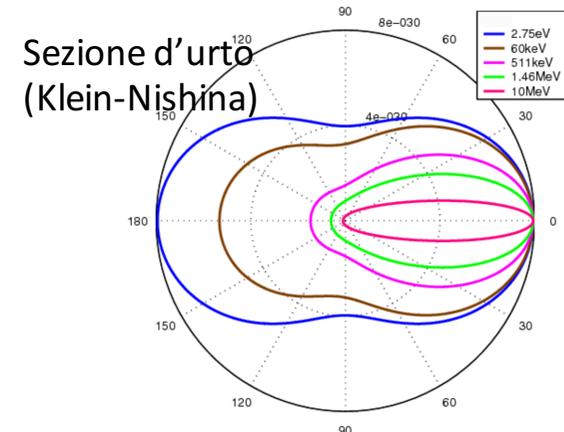
- E' il **meccanismo di interazione predominante nella banda energetica tra 100 keV e qualche MeV**
- Il fotone incidente viene deflesso di un angolo  $\theta$  rispetto alla direzione di partenza e trasferisce parte della sua energia all'elettrone
- L'energia del **fotone** scatterato dipende dall'angolo  $\theta$  e dall'energia di partenza secondo la relazione:

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

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

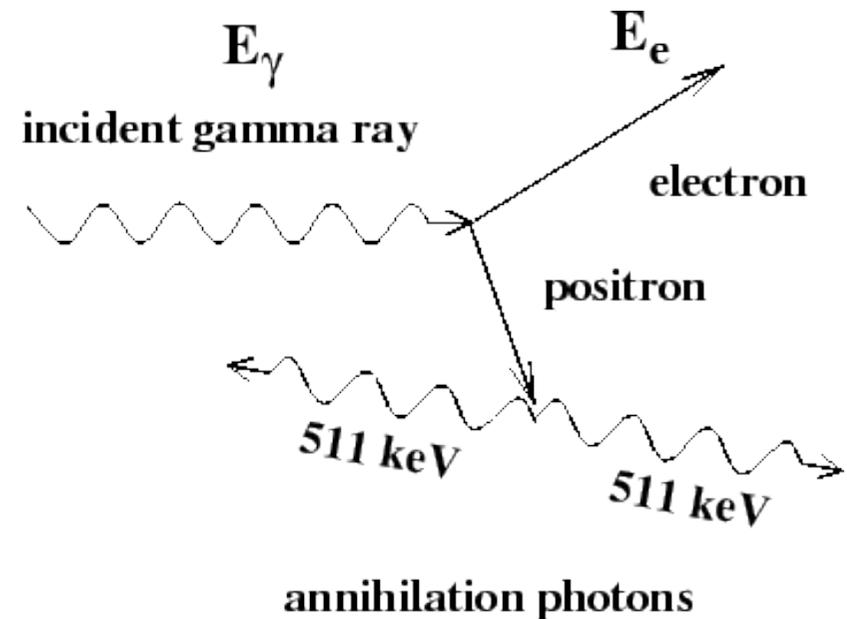
- L'energia dell'elettrone (**recoil electron**) è invece

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



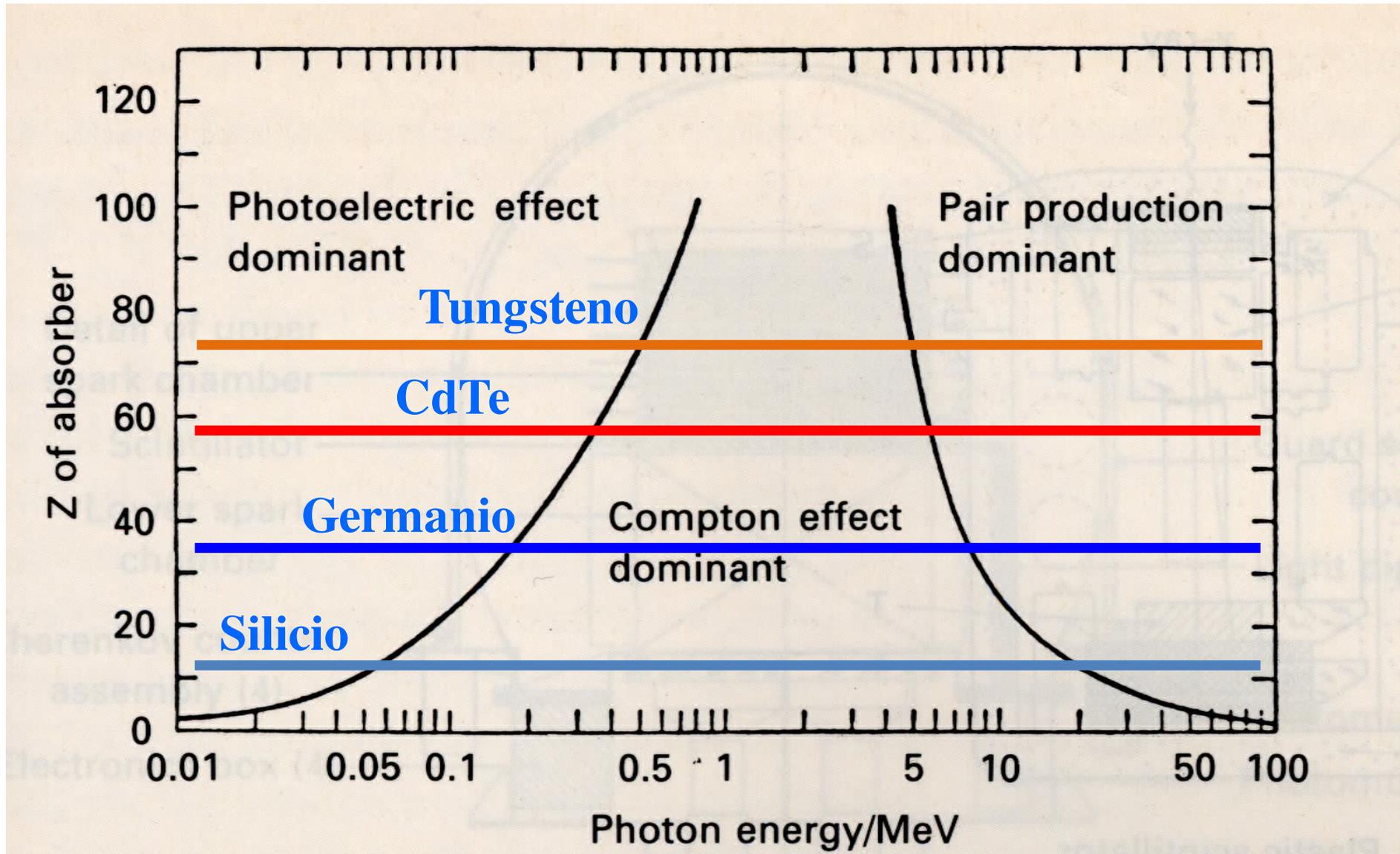
## Produzione di coppie

- Se l'energia del fotone supera il doppio dell'energia di riposo dell'elettrone (1.022 MeV), il fotone interagisce con il campo elettrico del nucleo atomico e produce una coppia elettrone-positrone
- Il fotone gamma incidente completamente 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;
- E' il processo dominante per energie maggiori di 10 MeV, a seconda del numero atomico del materiale



## Probabilità di interazione

Quale è la probabilità che queste interazioni avvengano?



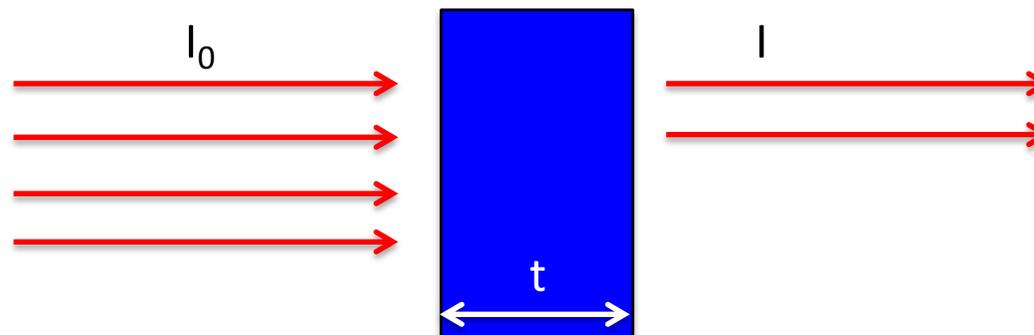
## La sezione d'urto e il coefficiente di attenuazione

- Sia  $t$  lo spessore di un certo materiale (cm)
- Sia  $n$  la *densità di numero* del materiale ( $\text{cm}^{-3}$ ) e  $\rho$  la densità ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
- La **sezione d'urto**  $\sigma$  è l'area che il materiale presenta al fotone per l'interazione ( $\text{cm}^2$ ) e esprime la probabilità che una certa interazione possa avvenire quando un fascio di particelle colpisce un target (ad esempio il rivelatore). La sezione d'urto è una proprietà del materiale.
- Il coefficiente di attenuazione lineare  $\mu = \sigma n$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) *rappresenta la probabilità per unità di percorso che un fotone ha di interagire con il materiale nel quale si propaga*
- L'inverso del coefficiente di attenuazione lineare è il cammino libero medio, cioè la lunghezza media percorsa dal fotone prima di interagire

$$\text{Cammino libero medio} = \lambda = 1/\mu \text{ (cm)}$$

- L'intensità  $I$  di radiazione che "sopravvive" all'interazione con il materiale di spessore  $t$  è legata all'intensità incidente  $I_0$  in accordo con la legge di Beer-Lambert

$$I = I_0 \times e^{-\mu t}$$



## Coefficiente di attenuazione di massa

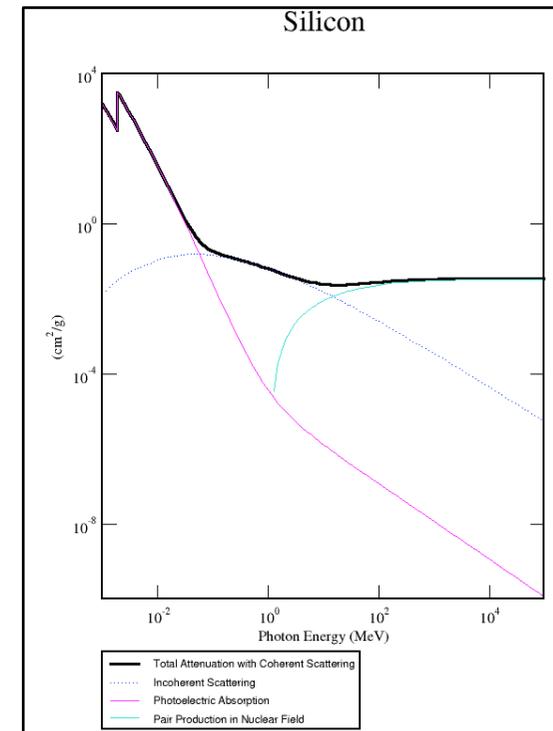
- Dividendo il coefficiente di attenuazione lineare per la densità  $\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) si ottiene il **coefficiente di attenuazione di massa**

$$(\mu/\rho) = (\sigma n/\rho) = \text{cm}^2/\text{g}$$

- Misura la **capacità di un materiale** di assorbire o scatterare fotoni di una data energia, per unità di massa
- Il coefficiente di attenuazione (di massa o lineare) di un materiale è dato dalla somma delle probabilità (dei coefficienti di attenuazione) dei tre possibili meccanismi di interazione:

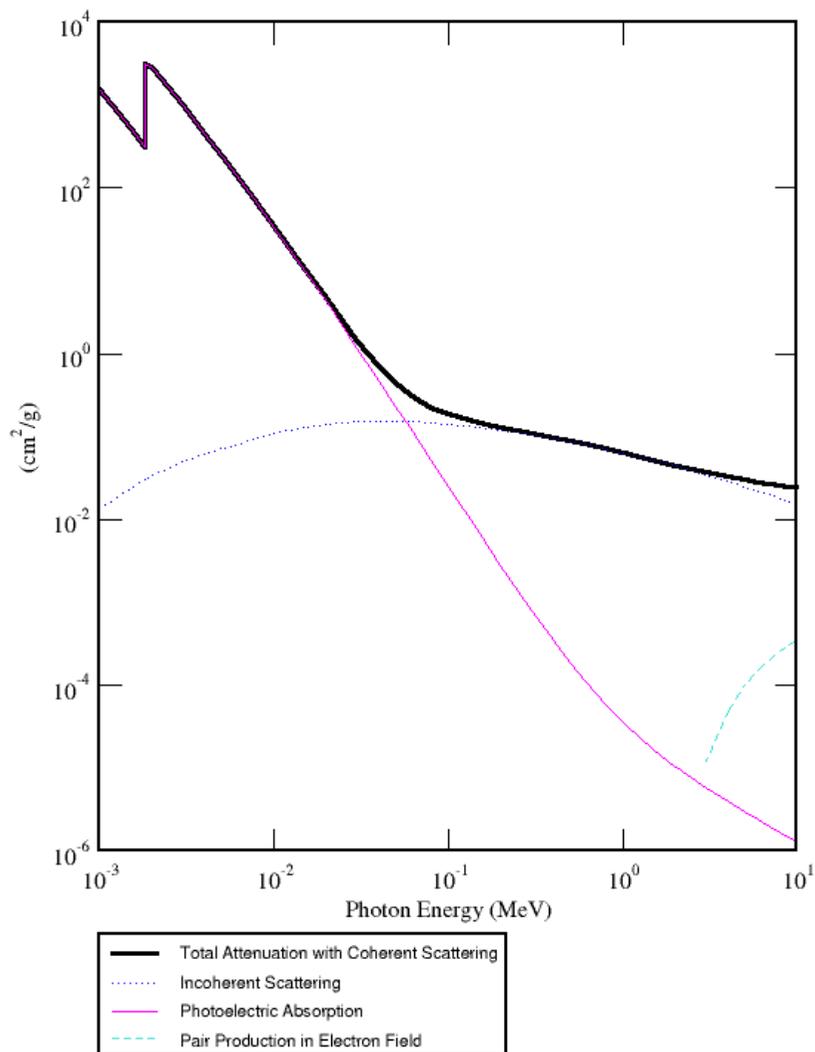
$$\mu = \mu_{\text{ph}} + \mu_{\text{compt}} + \mu_{\text{pair}}$$

Il sito del **NIST** (National Institute of Standards and Technology) dove è possibile accedere ai coefficienti di attenuazione di massa di materiali e composti:  
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

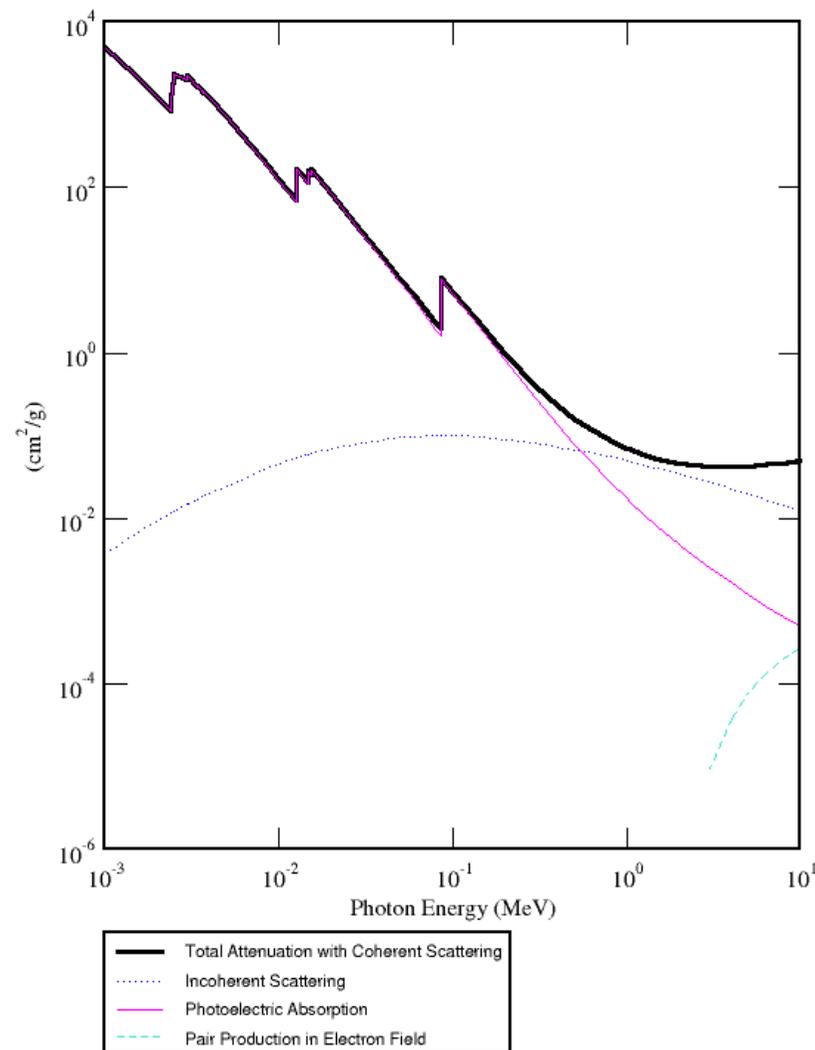


# Attenuazioni a confronto

Silicon  $Z=14$



Thallium  $Z=81$



L'edge di assorbimento è una discontinuità nello spettro di assorbimento X e si verifica quando l'energia del fotone incidente corrisponde all'energia di transizione elettronica dell'atomo

## A ciascuna banda il suo rivelatore

---

La determinazione dell'energia e del tempo di arrivo del fotone può essere:

Diretta



- Il fotone X interagisce direttamente con il materiale di rivelazione attraverso **ionizzazione (o fotoionizzazione)**.
- Gli elettroni ionizzati collidono con altri atomi e liberano altri elettroni
- Il risultato finale è un impulso elettrico il cui voltaggio è proporzionale all'energia depositata nel mezzo dal fotone.

Esempi: contatori proporzionali, semiconduttori allo stato solido, scintillatori

Indiretta



- Il fotone Gamma interagisce con un tracciatore che induce la produzione di elettroni e positroni **da scattering Compton o produzione di coppie**
- I secondari vengono tracciati e assorbiti
- Lo studio delle tracce lasciate da elettroni e positroni e della loro energia permette di ricostruire indirettamente l'energia, il tempo di arrivo e anche la posizione del fotone

Esempi: il tracker di Silicio con annesso calorimetro

# A ciascuna banda il suo rivelatore

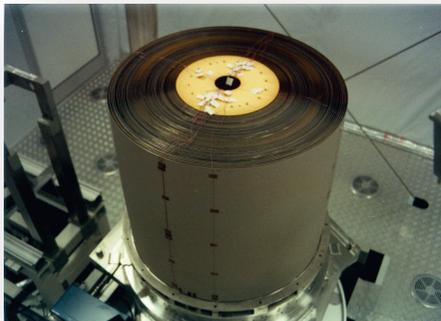
La determinazione dell'origine del fotone (le coordinate celesti) per fare imaging:

Diretta



Utilizzo di ottiche per raggi X che permettono di focalizzare i fotoni verso un rivelatore di piccole dimensioni ( $E < 100$  keV)

Esempio: XMM-Newton, Chandra

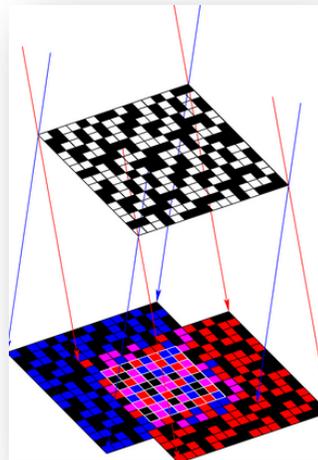


$E < 100$  keV

Indiretta



Utilizzo di pattern (maschera codificata) e materiali opachi nella banda  $100$  keV –  $10$  MeV  
Esempio: INTEGRAL



$100$  keV  $E < 10$  MeV

- Utilizzo del tracciatore Compton/coppie e di uno scintillatore. A partire da qualche MeV.

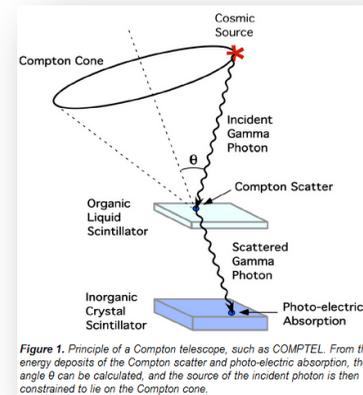
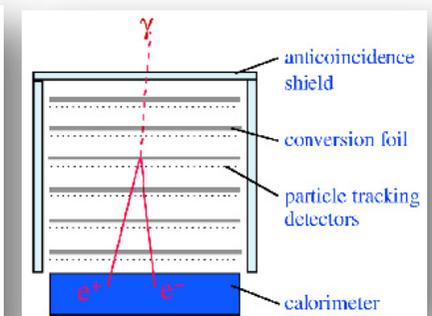


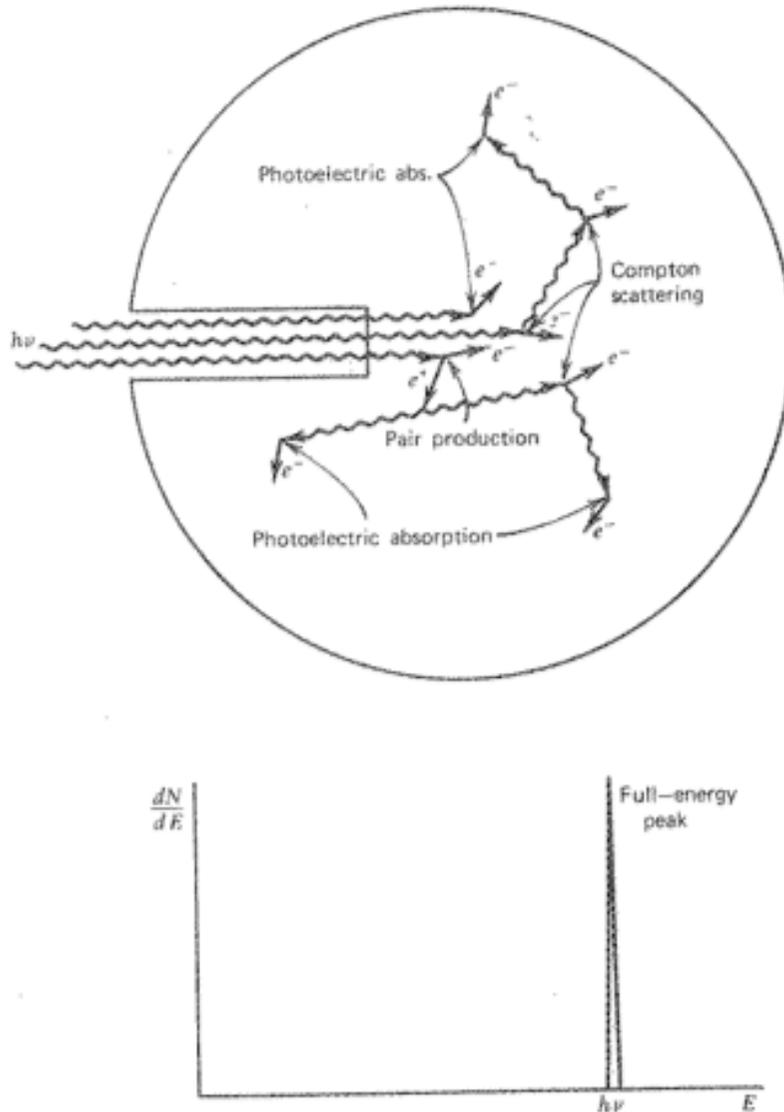
Figure 1. Principle of a Compton telescope, such as COMPTEL. From the energy deposits of the Compton scatter and photo-electric absorption, the angle  $\theta$  can be calculated, and the source of the incident photon is then constrained to lie on the Compton cone.

$E > 10$  MeV



Energy

# La risposta ideale del rivelatore diretto

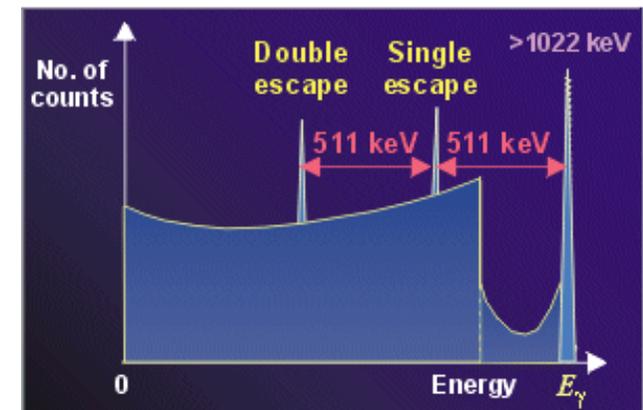
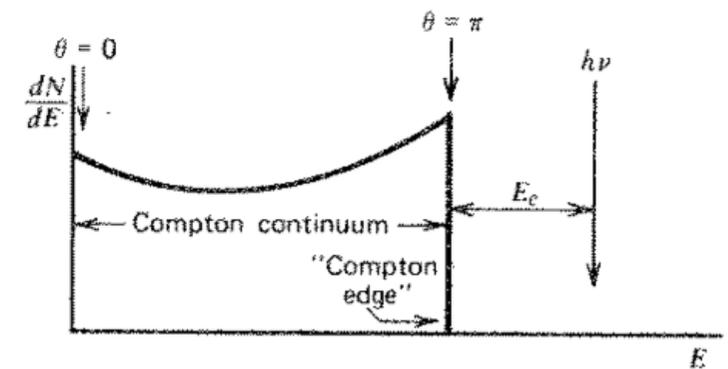
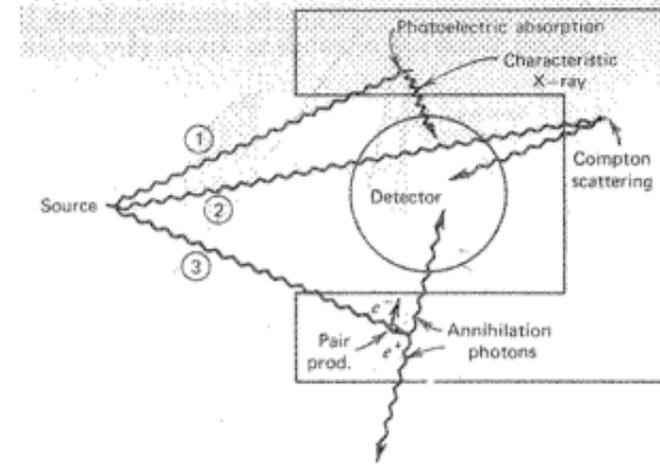


La risposta ideale:  
tutti i fotoni vengono assorbiti e  
nello spettro della sorgente  
appare un unico picco in  
corrispondenza dell'energia del  
fotone incidente

**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.

## La risposta del rivelatore diretto nella realtà: problematiche comuni

- *Effetto fotoelettrico*: se da una parte permette di ionizzare e rivelare il fotone, allo stesso tempo i fotoni di fluorescenza X dal materiale circostante o dal rivelatore stesso possono disturbare la rivelazione
- Se il fotone interagendo con il detector scattera (Compton), solo una parte della sua energia viene rilasciata nel detector e l'energia rilasciata all'elettrone dipende dall'angolo di scattering: l'effetto nello spettro rivelato è un continuo da un minimo pari a  $\theta=0$  a un massimo pari a  $\theta=\pi$ , il *Compton edge*.
- Se uno o entrambi dei fotoni a 511 keV escono dal rivelatore, lo spettro presenta dei picchi (single e double escape peaks) ad energia pari all'energia del fotone primario meno 511 keV o 1.02 MeV.



---

Seconda parte:  
I parametri fondamentali dei  
rivelatori

**L'efficienza di rivelazione** spesso descritta in termini di percentuale o di frazione della radiazione incidente.

Dipende da:

- coefficiente di attenuazione (dal materiale)
- dall'energia del fotone
- dallo spessore del rivelatore

Può essere:

- Assoluta (il numero di eventi rivelati/numero assoluto di eventi della sorgente)
- Intrinseca o quantum efficiency (il numero di eventi rivelati/numero di eventi della sorgente che colpiscono il rivelatore)
- Relativa (rispetto a un altro rivelatore)
- Full-Energy Peak o al fotopicco (il numero di eventi rivelati con energia pari al fotone incidente/numero di eventi della sorgente che colpiscono il rivelatore)

# Efficienza di rivelazione

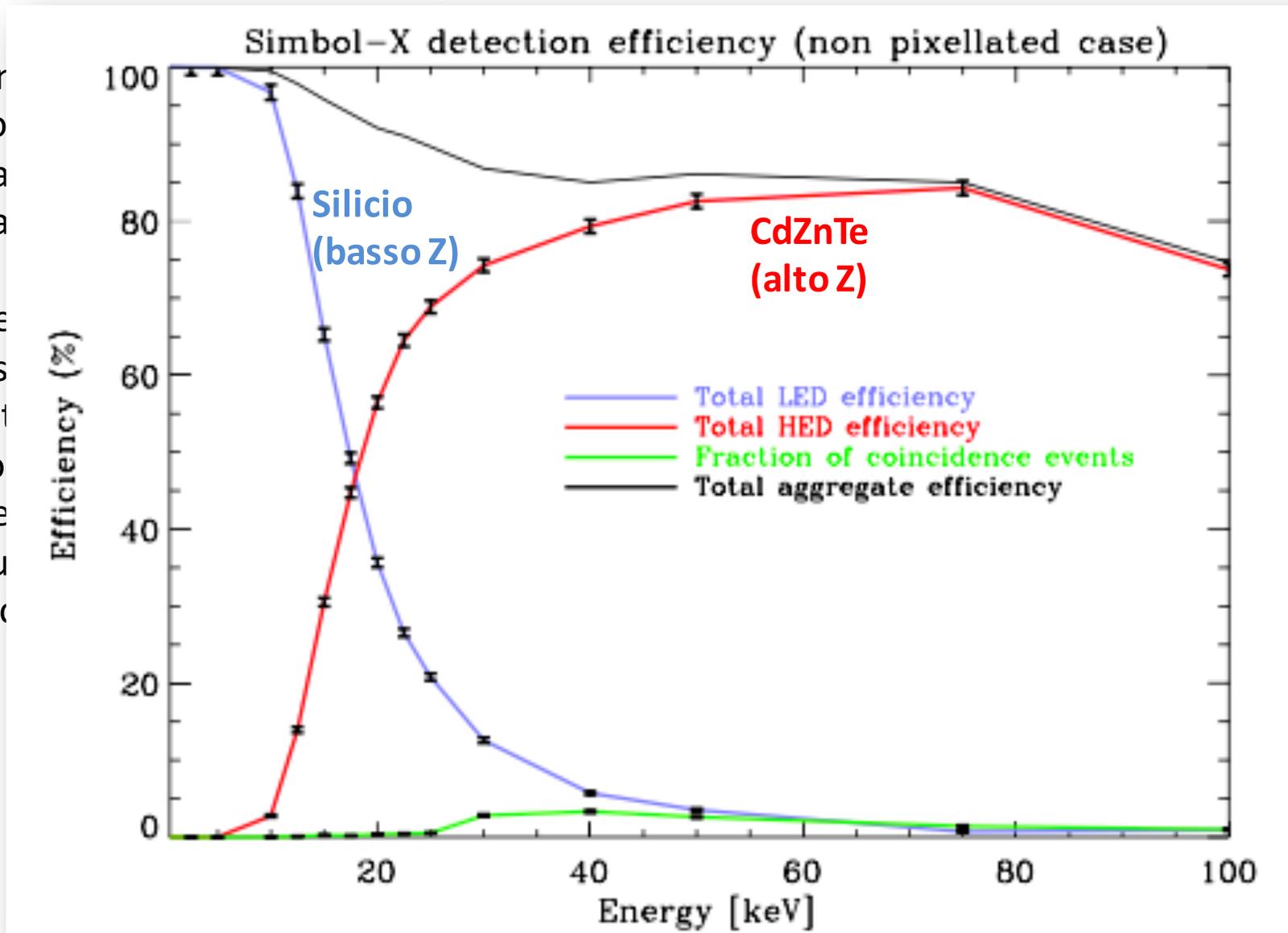
E' spesso descritta in termini di percentuale o di frazione della radiazione incidente.

Diper

- co
- da
- da

Può e

- As
- Int
- so
- Re
- Fu
- inc



# Risoluzione energetica

- Parametro fondamentale: capacità di discriminare fotoni di energie diverse
- La risoluzione energetica di un detector e' espressa in termini di larghezza a mezza altezza (FWHM) della forma gaussiana del foto-picco.
- E' solitamente espressa come il rapporto:

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

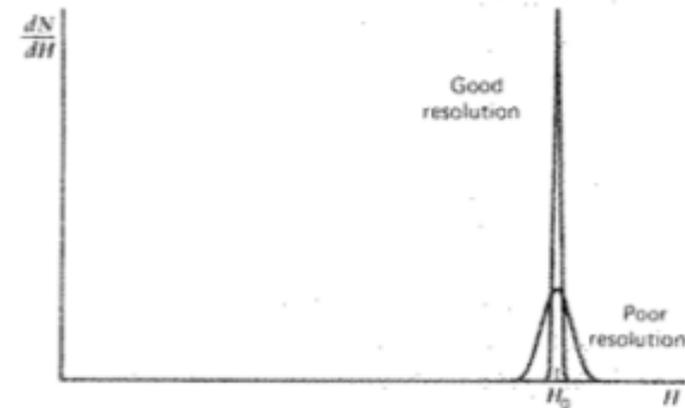
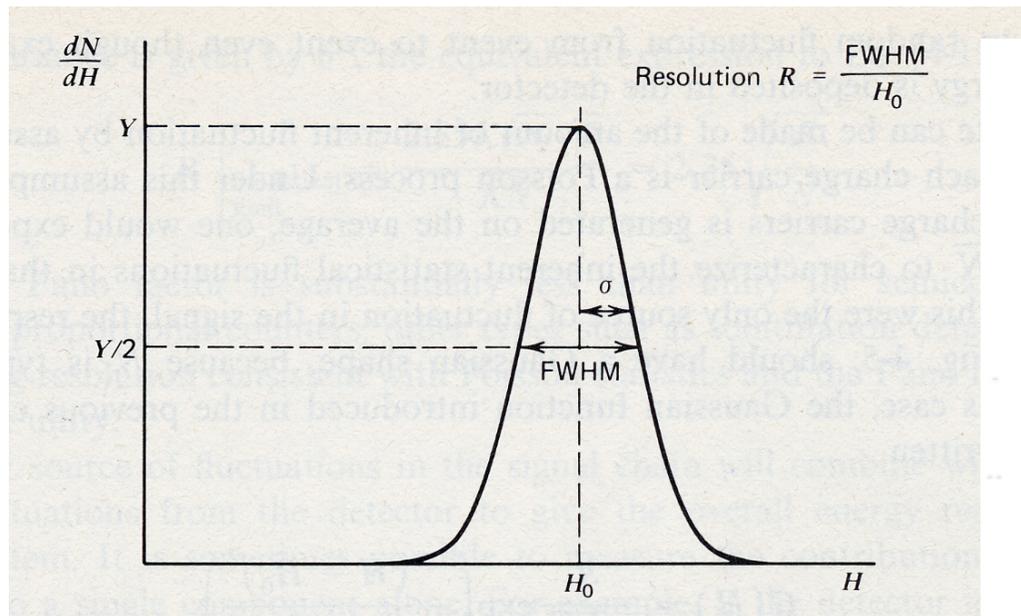


Figure 4.4 Examples of response functions for detectors with relatively good resolution and relatively poor resolution.

## Sensibilità (sensitivity)

- La sensibilità è il flusso minimo rivelabile dal telescopio
- Si esprime solitamente come fotoni per unità di tempo, area, e energia (photoni/(cm<sup>2</sup> s keV)) o in unità di Crab (flusso integrato della Crab) o in energia per unità di tempo e area (erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

Banda energetica [keV]	1 $\mu$ Crab [erg cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
2–10	$2.16 \times 10^{-14}$
10–30	$1.28 \times 10^{-14}$
20–40	$7.71 \times 10^{-15}$

Tabella 2.1: L'unità di flusso,  $\mu$ Crab, integrata nelle bande energetiche 2-10 keV, 10-30 keV, 20-40 keV, espressa in erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>.

- Migliore è la sensibilità, minore è il flusso minimo e maggiore è la distanza di osservazione raggiungibile
- Si esprime anche come un rapporto del segnale sul rumore:

$$\text{SNR} = \mathbf{n}_\sigma = \frac{\mathbf{C}_S}{\sqrt{\mathbf{C}_S + \mathbf{C}_{\text{Bkg}}}}$$

Signal-to-noise ratio

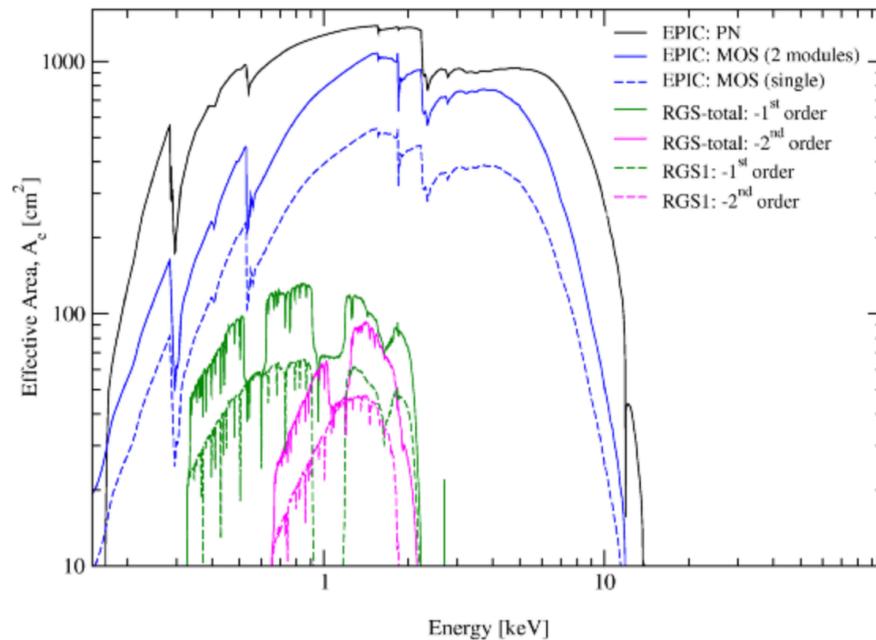
## Area Efficace

- L'area efficace ("effective area") è l'area geometrica (area di raccolta dei fotoni) moltiplicata per un'efficienza che tiene conto dell'effettiva rivelazione dei fotoni

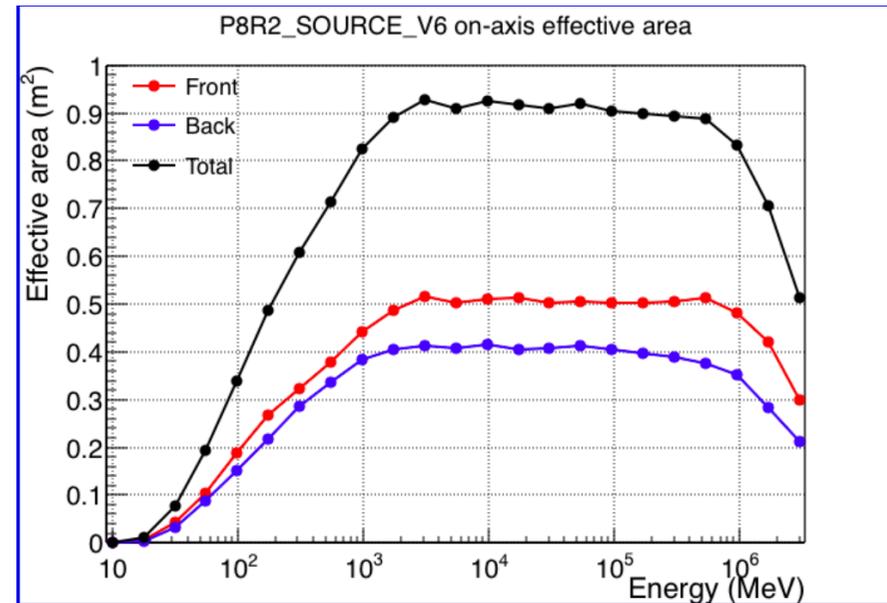
$$A_{\text{eff}} = A_{\text{geom}} \times \varepsilon$$

- Tale efficienza dipende dalla riflettività delle ottiche (telescopi X), efficienza quantica del rivelatore, campo di vista, etc.

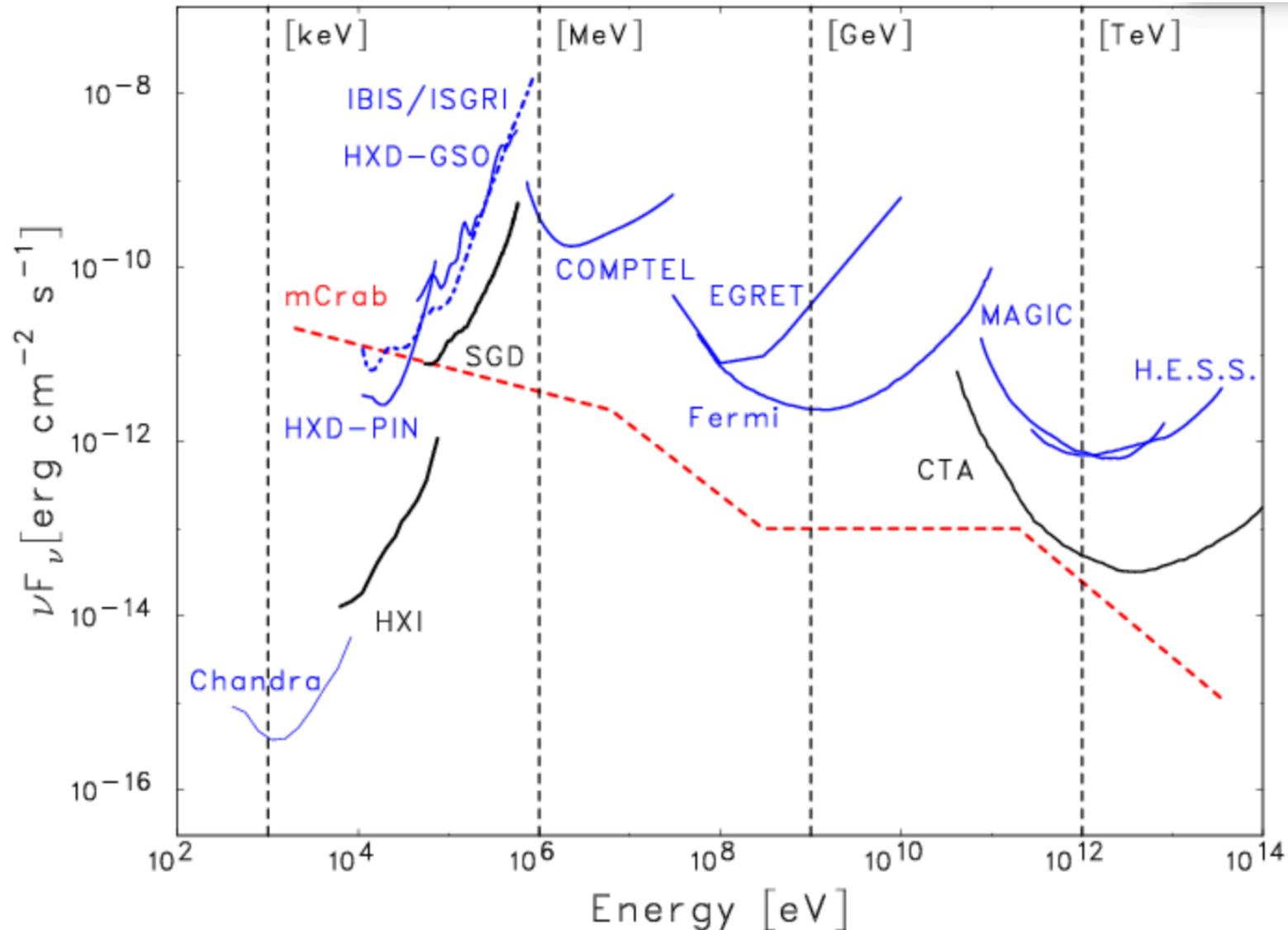
### XMM-Newton



### FERMI



## Sensibilità (sensitivity)



*Chandra*/ACIS-S, *Suzaku*/HXD (PIN and GSO), *INTEGRAL*/IBIS, *ASTRO-H*/HXI,SGD:  $3\sigma$  sensitivity curves for 100 ks exposures.

COMPTEL and EGRET: all-lifetime all-sky survey of *CGRO*.

*Fermi*-LAT: pre-launch sensitivity evaluated for the  $5\sigma$  detection limit at high Galactic latitudes, 1 year exposure.

*MAGIC* Stereo system, *H.E.S.S.*, *CTA*:  $5\sigma$  detection with  $> 10$  excess photons after 50 h exposure.

(Takahashi+2012)

---

Terza parte:  
Tecnologie di rivelazione

Classi principali di rivelatori:

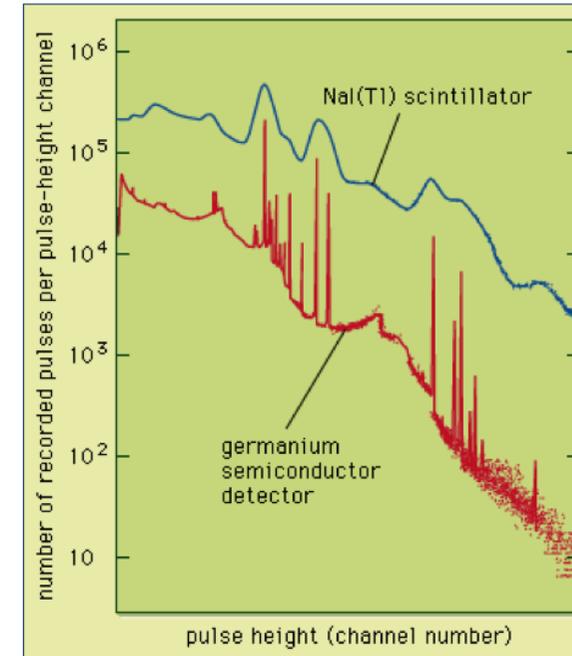
- Contatori proporzionali e CCD -> misurano la carica della nuvola elettronica prodotta dalla fotoionizzazione
- Scintillatori -> misurano la luce prodotta dal fotone primario
- Calorimetri -> misurano il calore prodotto nel materiale dal fotone X

Quale tecnologia da selezionare?

Dipende dalla scienza che si vuol fare:

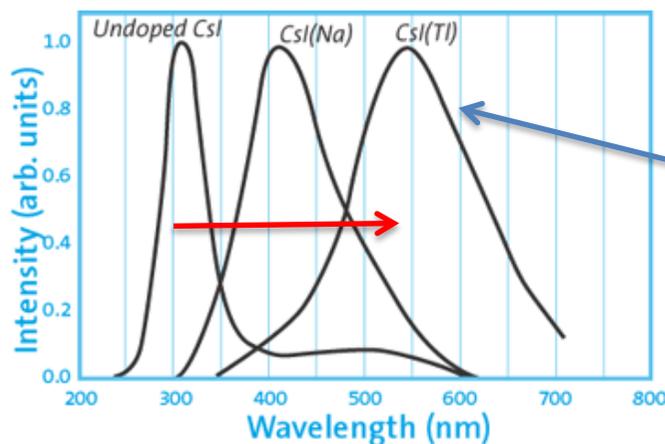
- imaging?
- Spettroscopia?
- Timing?

- Basse-medie energie (1-20 keV)
  - Microchannel plates (Chandra)
    - alta risoluzione spaziale
  - Contatori proporzionali
  - Microcalorimetri (ATHENA)
  - CCD (XMM e Chandra)
    - piccole dimensioni (basso background), buona capacità di immagine e spettroscopica
- Energie intermedie (15 keV – MeV)
  - Scintillatori
    - Alta efficienza, moderata  $\Delta E/E$
  - Semiconduttori (NuStar)
    - Alta efficienza, alta  $\Delta E/E$ , problema cooling per alcuni materiali (Ge)
    - Vantaggio Si: processo di produzione consolidato
- Alte energie (MeV – GeV)
  - Convertitori / Tracker basati sull'utilizzo di semiconduttori (AGILE e FERMI)

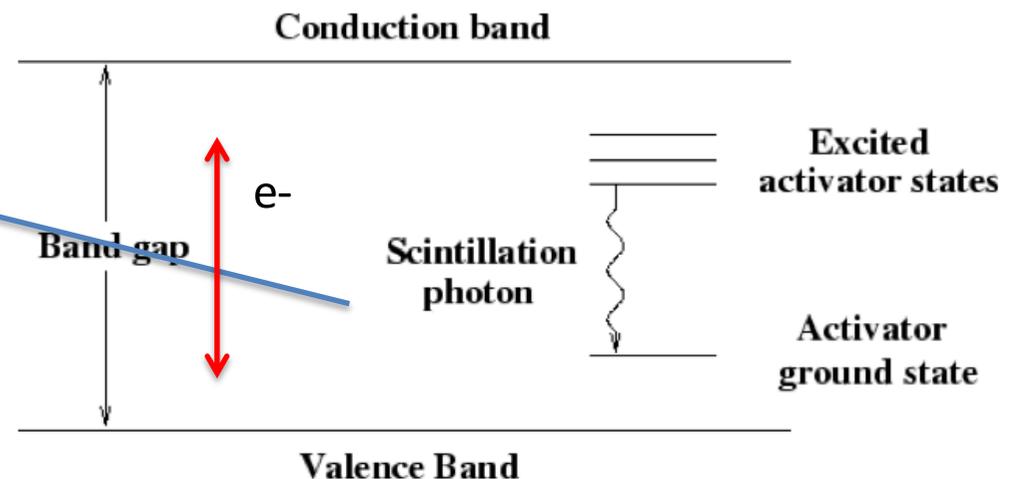


# Scintillatori

- **Scintillatore** = Materiale che presenta scintillazione (luminescenza quando eccitato da radiazione elettromagnetica)
- In seguito all'interazione con il fotone, gli atomi eccitati ionizzati decadono emettendo luce ad energie basse, tipicamente ottica
- La luce di scintillazione incide sul fotocatodo di un fotomoltiplicatore liberando elettroni per effetto fotoelettrico
- Il segnale prodotto è proporzionale all'energia del fotone incidente
- Processo inefficiente → Il “drogaggio” del reticolo cristallino con impurità rende più efficiente il processo (riduce band gap), riduce autoassorbimento
- Gli scintillatori possono essere sia organici (plastico) che inorganici (NaI, CsI)

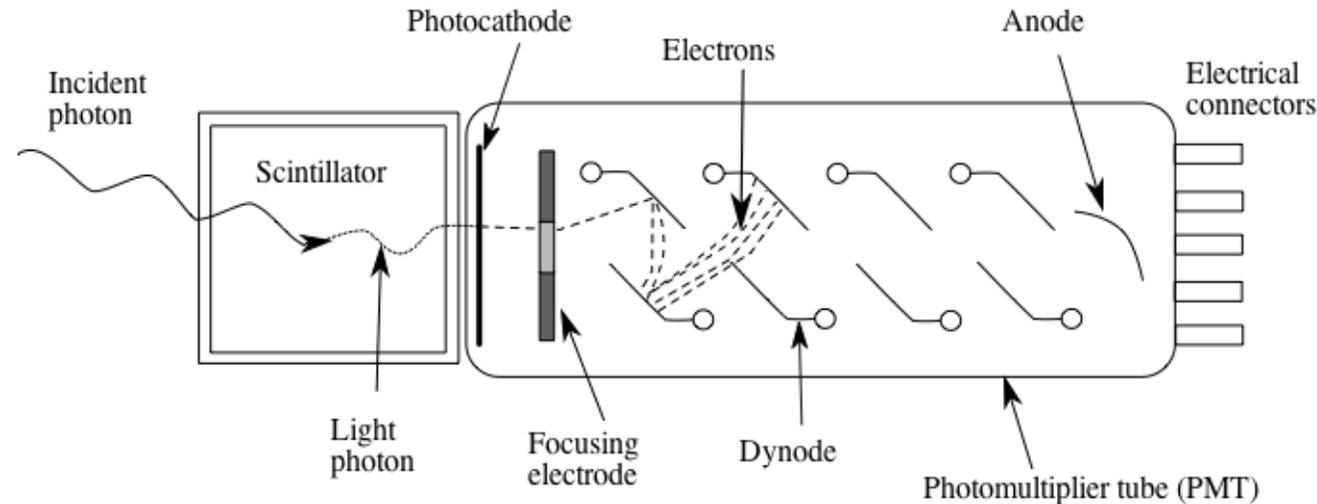


(luce di scintillazione)



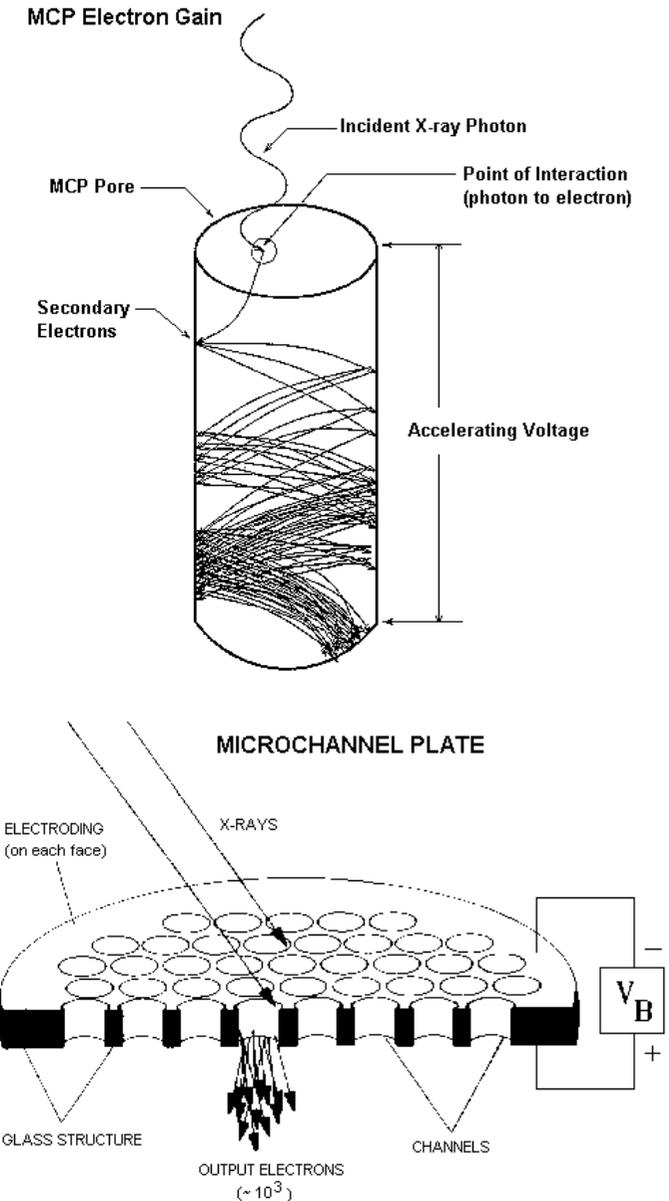
## Scintillatori - requisiti

- 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  $\lambda$  della propria luce di fluorescenza (picco a  $\sim 550$  nm per il CsI(Tl) );
- Elevati  $\rho$  e  $Z \Rightarrow$  elevato  $\mu_{pe}$   $\Rightarrow$  elevata  $\varepsilon$  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);



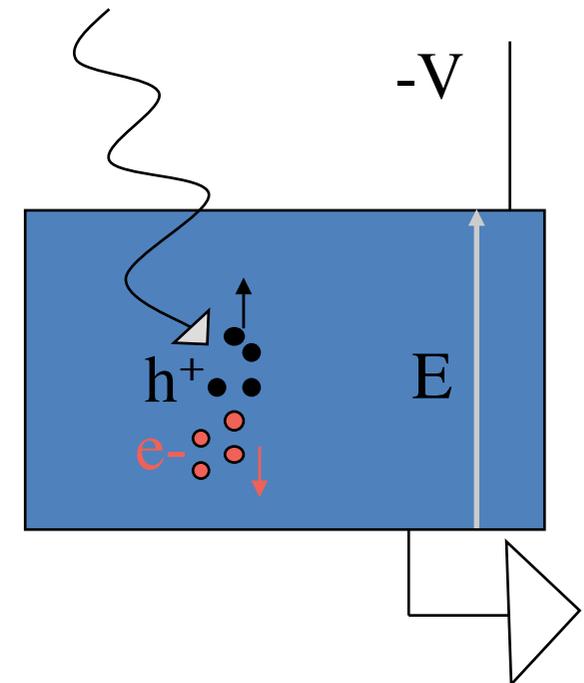
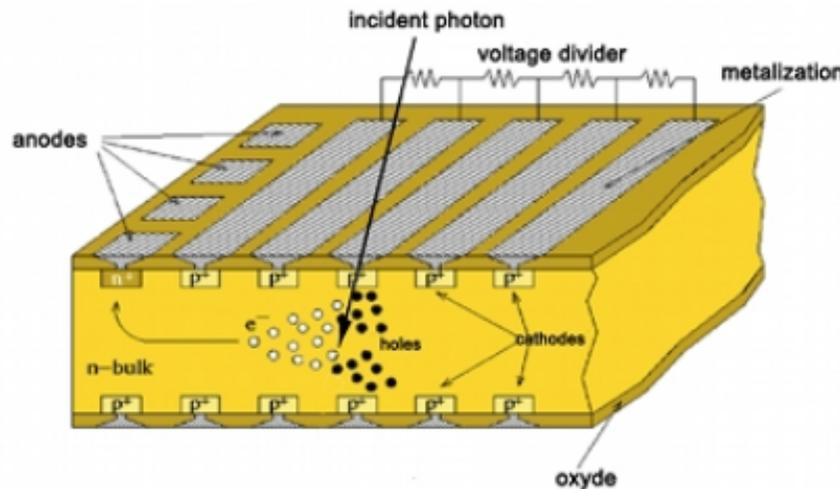
- This x-ray photon flux strikes the cluster of 69 million lead-oxide coated glass tubes (each are only 10 micrometers in diameter and just over a millimeter long).
- When an x-ray photon hits the side of one of these tubes, an electron is emitted. The resulting charge is then amplified by orders of magnitude by a cascade effect within the tube which is held at an electrical potential. The electron flux out the bottom of the microchannel plate impinges onto the cross grid detector. The location of charges on the grid is processed to build an image of the source of X-rays.

Moltiplicatore di e<sup>-</sup> via emissione secondaria (**elettromoltiplicazione**)



## 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.
- La rivelazione della carica è diretta



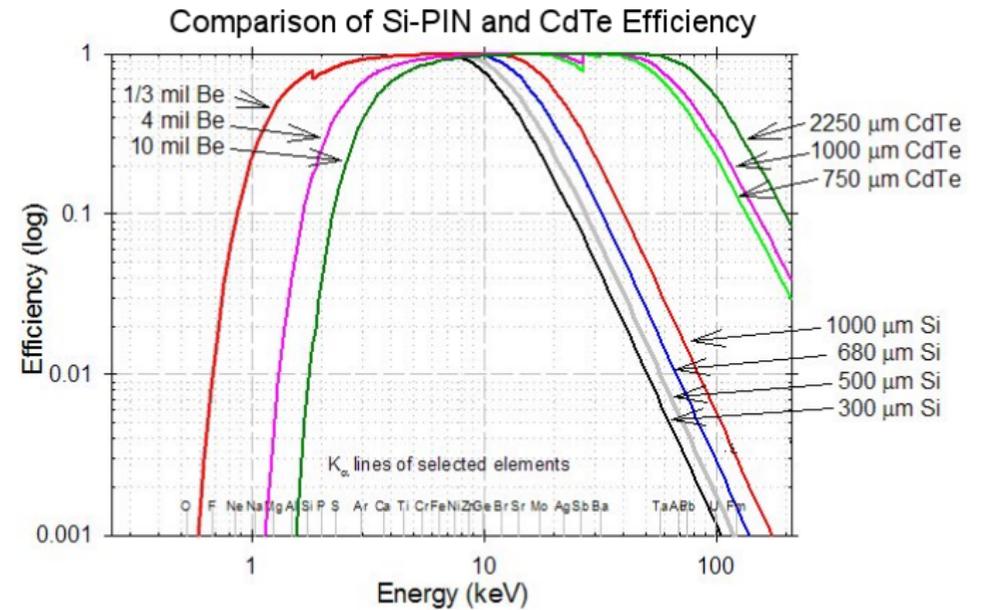
Band gap:

$\sim 1$  eV: Ge, Si (raffreddati,  $\sim 80$  °K)

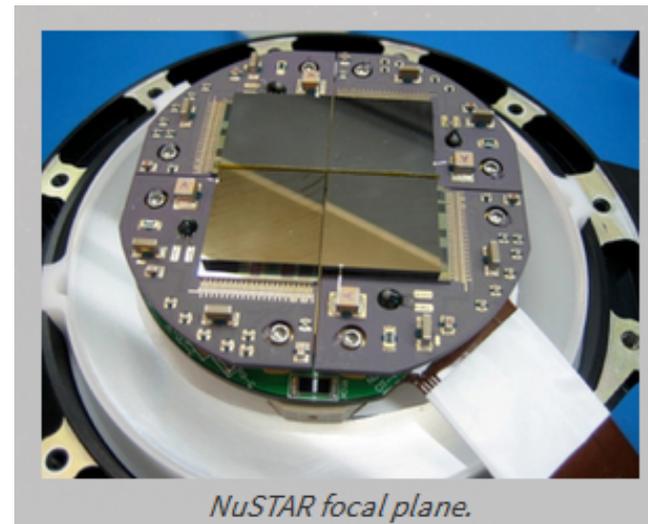
$\geq 1.5$  eV “room temperature semiconductor”

CdZnTe, CdTe, HgI<sub>2</sub>

- Tellurio di Cadmio (CdTe)
- Energy gap (1.52 eV)
  - Non necessaria criogenia ->
  - corrente di buio contenuta
- Alta  $\rho$  ( $\sim 6 \text{ g cm}^{-3}$ ) per efficienza
- Alto Z (48, 52) per effetto fotoelettrico:
  - 10 volte il  $\mu_{\text{Compt}}$  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



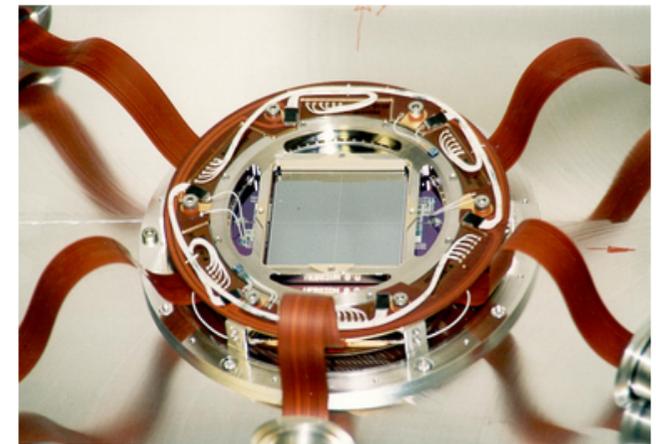
- CdZnTe  $\rightarrow$  CZT
- differenza con il CdTe puro consiste nell'inserire nella fase di crescita del cristallo, una certa quantità di ZnTe; con questo si ottiene un semiconduttore con un gap tipico di  $1,5 \div 1,6$  eV
- La corrente di buio del CZT è inferiore a quella del CdTe e questo ha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



Il CCD (Charge Coupled Device) consiste in un circuito integrato formato da una riga, o da una griglia, di elementi semiconduttori in grado di accumulare una carica elettrica proporzionale all'energia del fotone che li colpisce. Questi elementi sono accoppiati (*coupled*) in modo che ognuno di essi, sollecitato da un impulso elettrico, possa trasferire la propria carica ad un altro elemento adiacente.

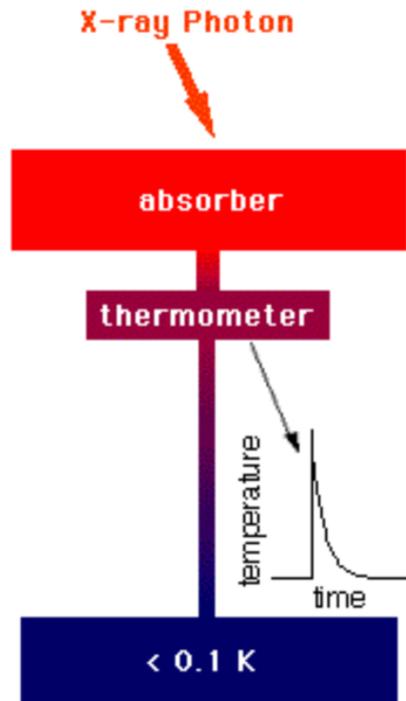
Caratteristiche:

- 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”



*The CCDs of the pn camera: The picture shows the twelve chips mounted and the connections to the integrated preamplifiers.*

# microcalorimetri



Un microcalorimetro è uno strumento termico costituito da:

- **assorbitore:**
  - trasforma il fotone X (< 10 - 15 keV) assorbito in calore (termalizza l'energia)
  - materiale con bassa capacità termica e alta efficienza di assorbimento
    - HgTe (ASTRO-H/SXS), Cu/Bi absorber (ATHENA/X-IFU)
- **termoresistenza** (thermistor)
  - resistenza altamente sensibile alle modifiche in temperatura (un "termometro")
  - Silicon wafer in ASTRO-H/SXS
  - Transition-edge sensor (TES, ATHENA/X-IFU), sfruttano il passaggio da stato normale a superconduttore
- **sistema di raffreddamento** (heat sink) per mantenere bassa la capacità termica
  - criogenia per ATHENA/X-IFU (50 mK o -268°C!)

Il tempo di crescita della temperatura ( $\Delta T$ ) proporzionale all'energia del fotone incidente ( $E$ ) e inversamente proporzionale all capacità termica ( $C$ )

$$\Delta T \approx E/C$$

- PROS: spettrometria X di alta precisione (risoluzione energetica = 2.5 eV per ATHENA/X-IFU)
- CONS: basso campo di vista (5' X-IFU), bisogno di sistema di raffreddamento

---

Quarta parte:  
Simulazioni Monte Carlo di  
Telescopi X e Gamma

## Costruire un telescopio X/Gamma

---

Telescopi X e Gamma sono caratterizzati da:

- Intenso e complesso fondo strumentale
- Sorgenti deboli

---

Lo sviluppo di un telescopio per alte energie richiede:

Telescopi X e Gamma sono caratterizzati da:

- Intenso e complesso fondo strumentale
- Sorgenti deboli

---

Lo sviluppo di un telescopio per alte energie richiede:



Astronome/i

- Obiettivi scientifici  
↓
- Requisiti scientifici  
(e.g. sensibilità, risoluzione  
angolare)  
↓
- Requisiti tecnologici  
(e.g. area efficace, lunghezza  
focale)

# Costruire un telescopio X/Gamma

---

Telescopi X e Gamma sono caratterizzati da:

- Intenso e complesso fondo strumentale
- Sorgenti deboli

---

Lo sviluppo di un telescopio per alte energie richiede:



Astronome/i

- Obiettivi scientifici  
↓
- Requisiti scientifici  
(e.g. sensibilità, risoluzione angolare)  
↓
- Requisiti tecnologici  
(e.g. area efficace, lunghezza focale)



Ingegneri

- Budget di massa
- Design del satellite
- Studio di fattibilità  
(e.g. materiali, tolleranza, controllo termico)

# Costruire un telescopio X/Gamma

Telescopi X e Gamma sono caratterizzati da:

- Intenso e complesso fondo strumentale
- Sorgenti deboli

Lo sviluppo di un telescopio per alte energie richiede:



Astronome/i

- Obiettivi scientifici
- ↓
- Requisiti scientifici  
(e.g. sensibilità, risoluzione angolare)
- ↓
- Requisiti tecnologici  
(e.g. area efficace, lunghezza focale)



- ✓ Studio della radiazione cosmica e del fondo strumentale
- ✓ Definizione del sistema di schermaggio e del sistema di rivelazione
- ✓ Calibrazione e analisi dati



Ingegneri

- Budget di massa
- Design del satellite
- Studio di fattibilità  
(e.g. materiali, tolleranza, controllo termico)

# Costruire un telescopio X/Gamma

Telescopi X e Gamma sono caratterizzati da:

- Intenso e complesso fondo strumentale
- Sorgenti deboli

Lo sviluppo di un telescopio per alte energie richiede:



Non possiamo riprodurre l'environment spaziale in laboratorio e non possiamo riparare il telescopio dopo il lancio

La simulazione del telescopio, del satellite e della loro interazione con le particelle spaziali è fondamentale per lo sviluppo della missione

- |   |   |  |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Requisiti scientifici<br/>(e.g. sensibilità, risoluzione angolare)</li><li>• Requisiti tecnologici<br/>(e.g. area efficace, lunghezza focale)</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Definizione del sistema di schermaggio e del sistema di rivelazione</li><li>✓ Calibrazione e analisi dati</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Budget di massa</li><li>• Design del satellite</li><li>• Studio di fattibilità<br/>(e.g. materiali, tolleranza, controllo termico)</li></ul> |
|---|---|--|

Il metodo Monte Carlo è un algoritmo computazionale stocastico (sviluppato a partire dagli anni 30) basato sulla generazione di numeri randomici ed è usato per risolvere problemi di cui si conosce la distribuzione di probabilità ma di cui non è possibile conoscere la soluzione analitica (Metropolis & Ulam 1949).

Un esempio è la direzione angolare dei fotoni dopo lo scattering Compton!

Oggi lo sviluppo di codici di “particle tracking” basati su simulazioni Monte Carlo unito alla possibilità di sviluppare modelli 3D del telescopio permette di sviluppare un **modello virtuale** del telescopio e simularne l’interazione nell’ambiente spaziale, allo scopo di:

- Ottimizzare lo schermaggio e la performance del rivelatori
- Caratterizzare il fondo strumentale
- Validare la calibrazione e l’analisi dati

**Geant4 toolkit** (Agostinelli et al. (2003), Allison et al. (2006)) è un insieme di librerie C++, sviluppato dal CERN. Oggi è la libreria più usata nello sviluppo di simulazioni Monte Carlo di telescopi X e Gamma.



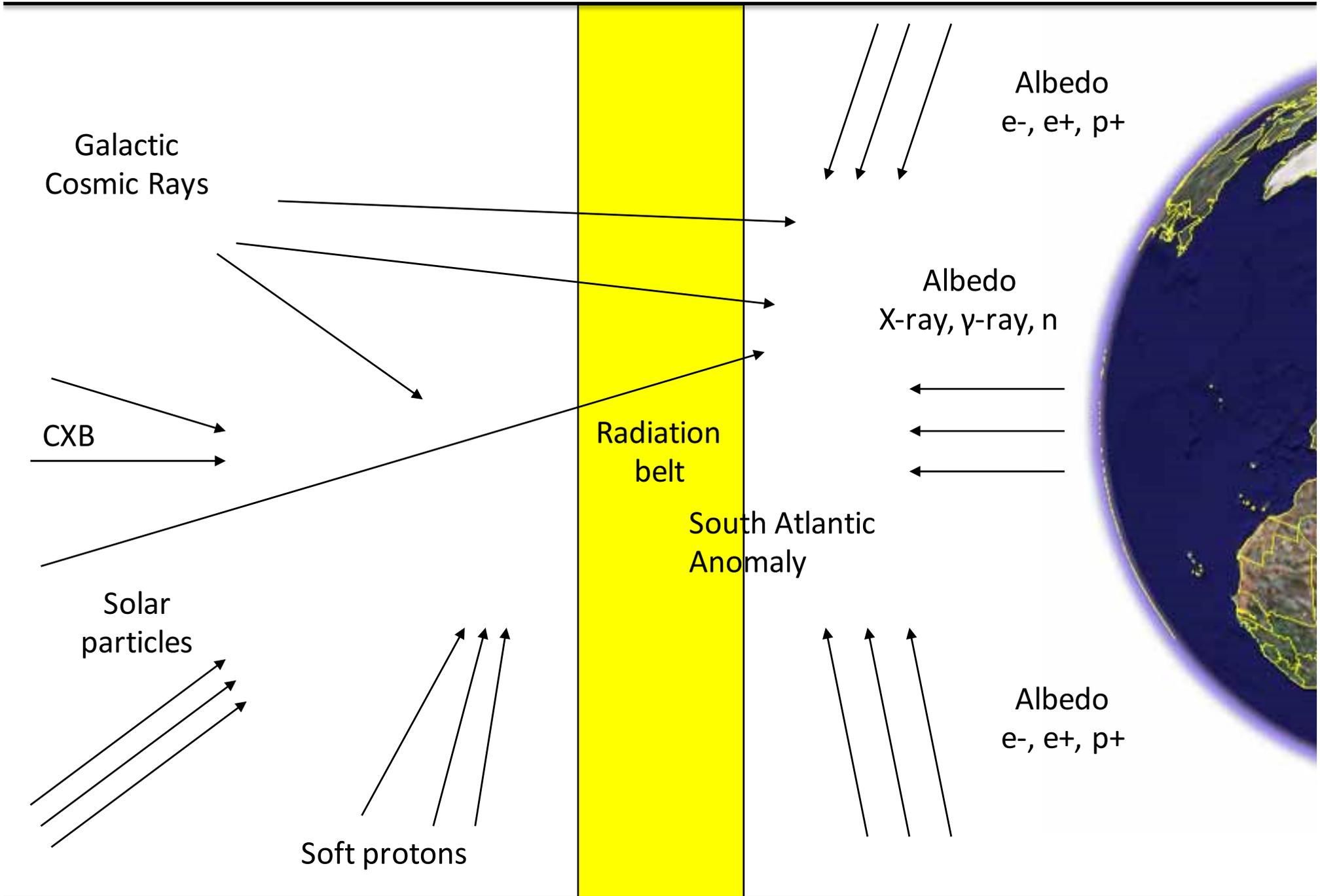
- Ingredients:
  - ✓ Background requirement as the goal
  - ✓ Modeling of the space radiation environment
  - ✓ Shielding and detectors design
  - ✓ Development of a Monte Carlo simulator for particle transport

Cooking time: it depends on the statistics you want and on the CPU power

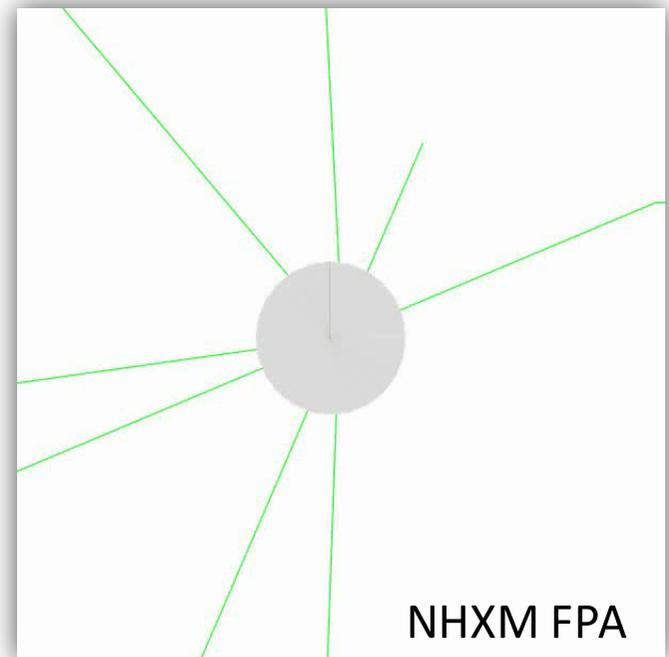
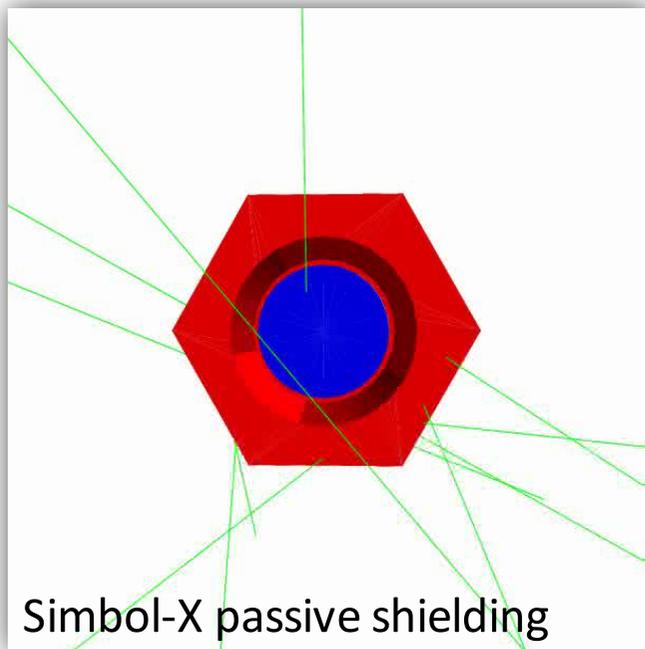


- Final products:
  - ✓ Background spectra
  - ✓ Shielding feasibility study
  - ✓ Instruments performances
  - ✓ ...

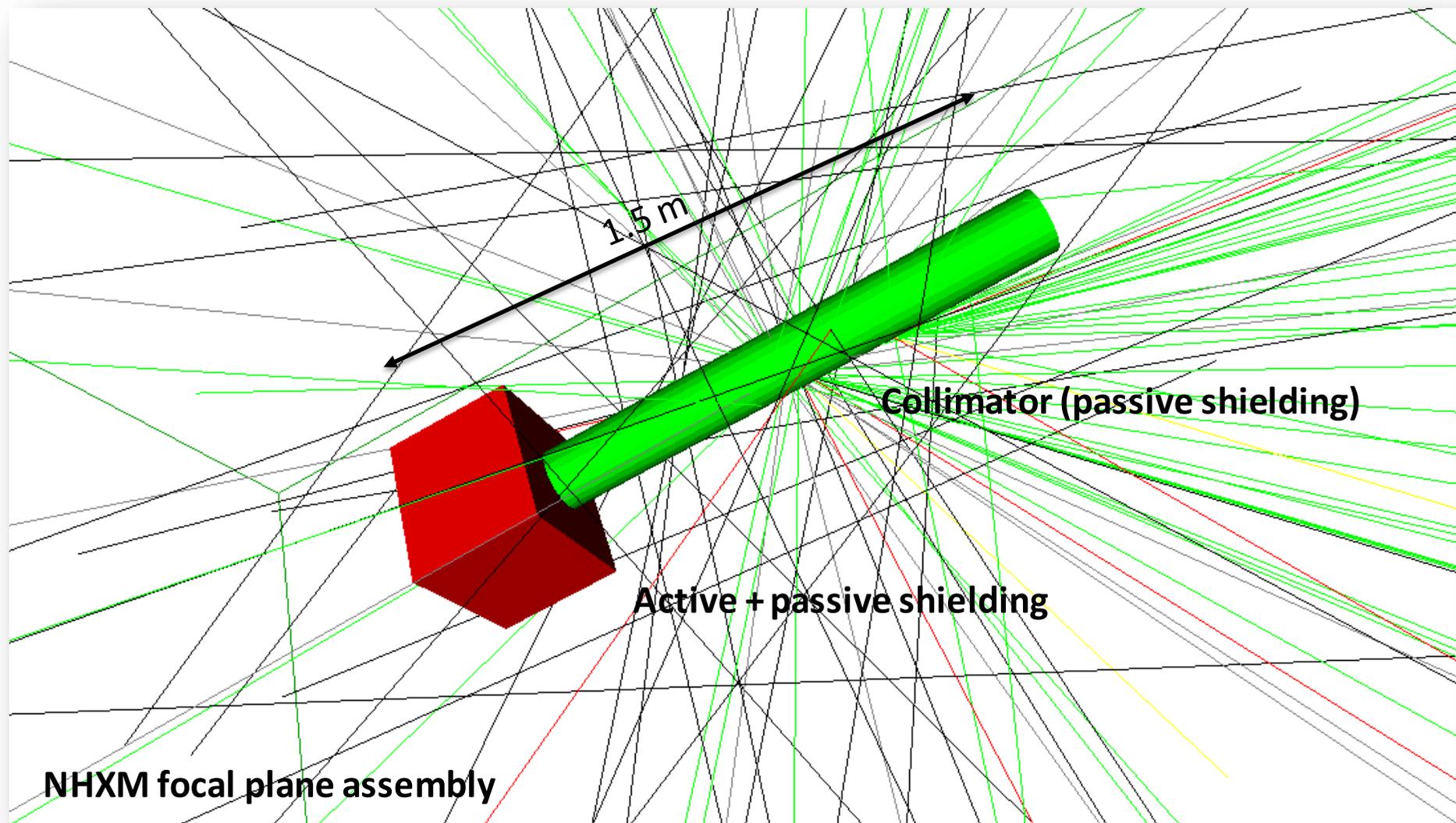
# 1. Studio dell'environment spaziale



## 2. Design dei rivelatori e degli schermi



## 2. Design dei rivelatori e degli schermi



### 3. Simulazione dello spettro del fondo strumentale

Background spectra on a CdTe based hard X-ray detector (HED):

- Energy range = 5 – 100 keV
- Telescope geometry = BOX

