



# Misura del coefficiente di assorbimento di vari materiali in funzione dell'energia del fascio dei fotoni incidenti

---

Dr. Adolfo Esposito  
Esperto Qualificato  
LNF - INFN

# Interazioni delle particelle indirettamente ionizzanti con la materia

Le particelle indirettamente ionizzanti, principalmente raggi X fotoni e neutroni, interagendo con la materia, mettono in moto particelle cariche secondarie, a loro volta effettivi responsabili della cessione di energia alla materia. Gli effetti quindi di questo tipo di radiazioni sono gli effetti dei secondari carichi prodotti.

I principali processi di interazione della radiazione elettromagnetica con la materia si possono dividere in processi di assorbimento e di diffusione.

Processi di assorbimento	Interazione con	Processi di diffusione	
		Elastica coerente	Inelastica incoerente
Effetto fotoelettrico	Elettroni atomici	Rayleigh	Compton
Reazioni fotonucleari	Nucleoni		
Creazione di coppie	Campo elettrico dei carichi circostanti		
Fotoproduzione di mesoni	Mesoni		

Misura del coefficiente di assorbimento di vari materiali in funzione dell'energia del fascio di fotoni incidenti

Esaminiamo con maggior dettaglio i seguenti tipi di interazione dei fotoni con la materia

- Assorbimento fotoelettrico
- Diffusione Compton
- Creazione di coppie

## Effetto fotoelettrico

In questo processo un fotone di energia  $E = h\nu$  interagisce con un sistema atomico cedendo in pratica tutta la sua energia ad uno degli elettroni più strettamente legati. L'elettrone viene quindi espulso dall'atomo con un'energia cinetica  $E_k$  pari a  $E_k = h\nu - E_b$  dove  $E_b$  è l'energia di legame dell'elettrone orbitale. Il fatto che l'elettrone sia legato è essenziale per soddisfare la legge di conservazione della quantità di moto. L'atomo infatti acquista la differenza tra la quantità di moto del fotone e quella dell'elettrone senza assorbire apprezzabilmente energia, a causa della sua relativamente grande massa.

A seguito dell'espulsione dell'elettrone e del riassetto dei livelli elettronici viene emesso un raggio x caratteristico. Sia il fotoelettrone che i raggi x caratteristici sono assorbiti nel mezzo dove l'effetto si è prodotto. L'effetto fotoelettrico è proporzionale a  $Z^5$  del mezzo e inversamente proporzionale a  $E^3$ . E' chiaro che l'effetto fotoelettrico è molto pronunciato in materiali densi e a basse energie ( $E \leq 0.5$  MeV).

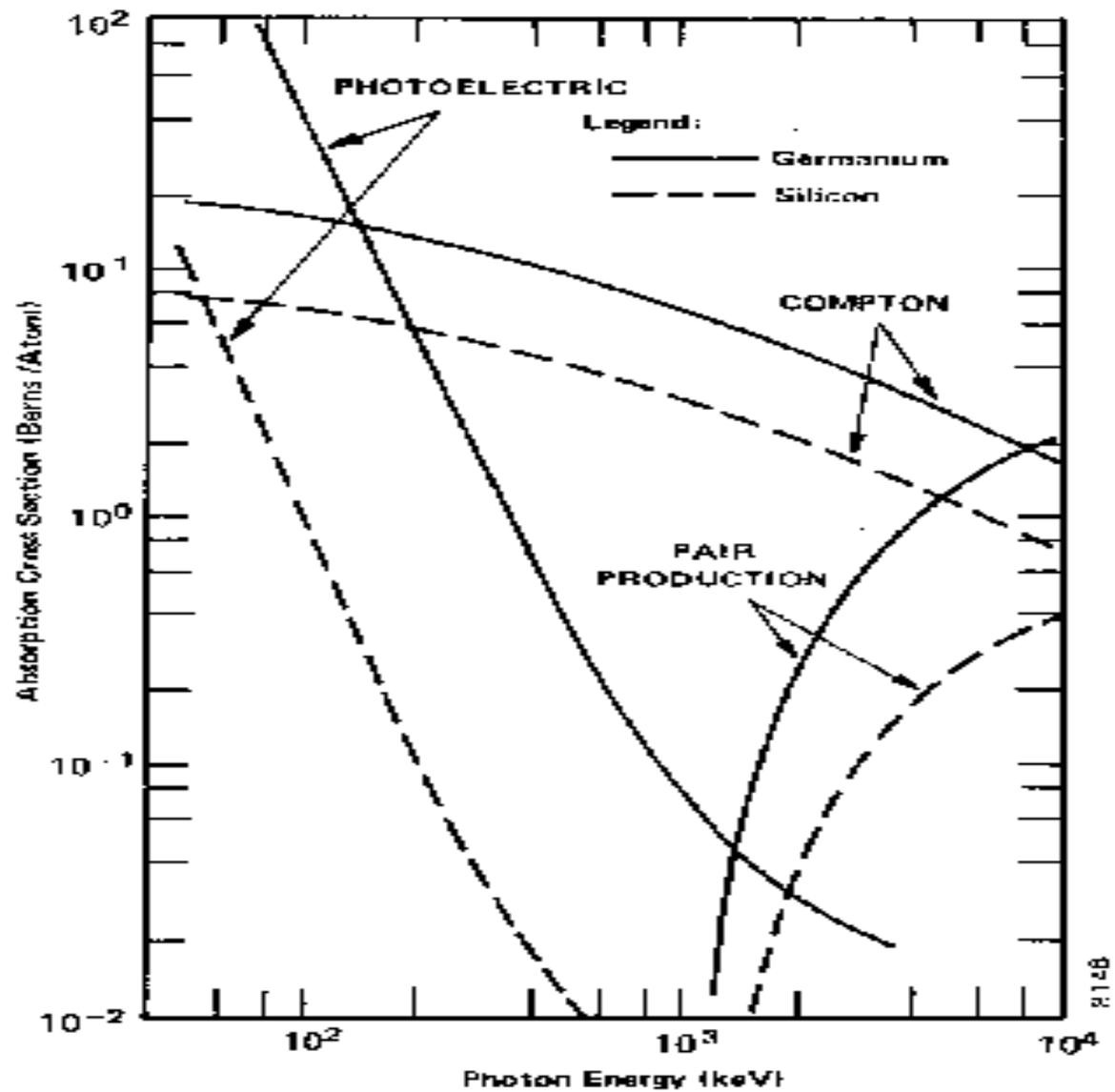
## Diffusione Compton

Trattasi di una collisione inelastica tra un fotone ed un elettrone libero. Nell'interazione il fotone viene deflesso dalla sua direzione iniziale con cambiamento di lunghezza d'onda e quindi di energia. La differenza d'energia tra il fotone incidente e quello deflesso viene impartita all'elettrone. La diffusione Compton e' importante fra 0.5 e 1 MeV ma predomina fino a 4 MeV. La diffusione Compton e' proporzionale a  $Z$  e inversamente proporzionale a  $E$ .

## Produzione di Coppie

Con questa espressione si intende il processo secondo cui un fotone interagisce con il campo elettrostatico che circonda una particella carica (normalmente un nucleo atomico, ma anche con minor frequenza un elettrone); in tal caso il fotone scompare dando origine ad una coppia di elettroni di segno opposto (un elettrone e un positrone). Affinché il processo sia energeticamente possibile, il fotone deve possedere un'energia almeno doppia di quella equivalente alla massa di riposo dell'elettrone ( $m_0c^2 = 0,511 \text{ MeV}$ ). L'energia del fotone in eccesso di  $2 m_0c^2$ , nel caso di produzione di coppie, viene distribuita sotto forma di energia cinetica tra le due particelle della coppia; solo una quantità trascurabile viene ceduta al nucleo per la conservazione della quantità di moto. Le particelle di coppia (elettrone e positrone) dissipano entrambi la loro energia cinetica in ionizzazione ed eccitazione degli atomi della materia: solo il loro destino finale è diverso, e cioè mentre l'elettrone, esaurita la sua energia cinetica, entra a far parte della popolazione degli elettroni liberi o legati negli atomi, il positrone si combina con un elettrone annichilandosi. Le due particelle infatti scompaiono e la loro massa è convertita in due fotoni aventi ciascuno un'energia di  $0,511 \text{ MeV}$  ed emessi in direzione opposta, per il principio della conservazione della quantità di moto.

La produzione di coppie è proporzionale a  $Z^2$

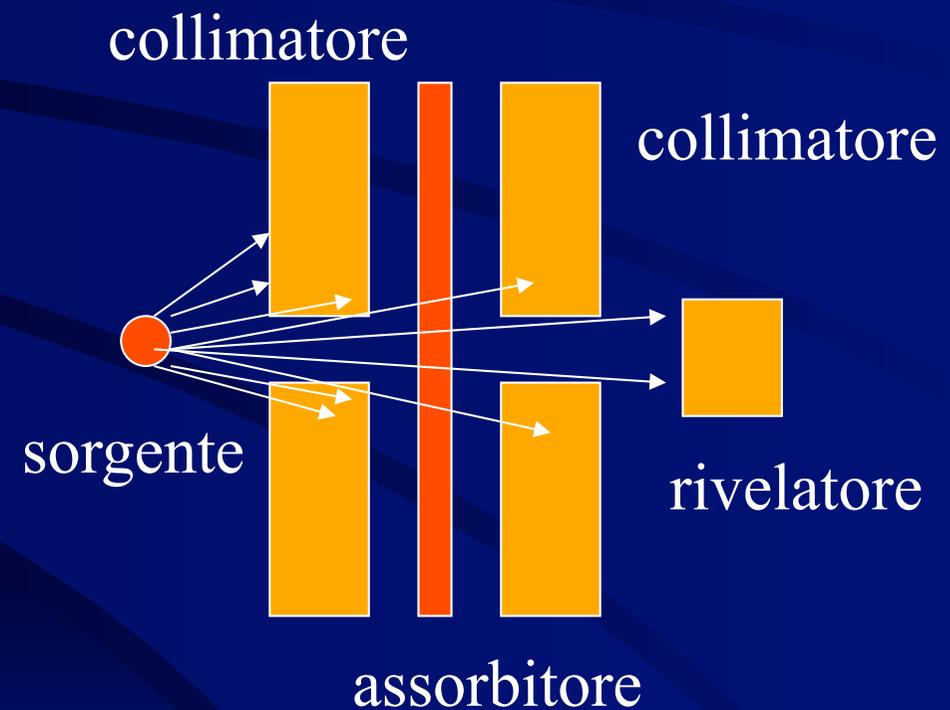


**Fig. 7.2. Relative Probability of Each of the Three Types of Interactions as a Function of Energy.**

Misura del coefficiente di assorbimento di vari materiali in funzione dell'energia del fascio di fotoni incidenti

Quando la radiazione elettromagnetica interagisce con un mezzo una parte è assorbita nel mezzo una parte lo attraversa senza alcuna interazione e una parte è diffusa come fotoni di bassa energia con direzioni differenti dalla radiazione primaria. L'attenuazione e l'assorbimento possono avvenire in condizioni di buona o cattiva geometria. I coefficienti di interazione che verranno di seguito illustrati sono validi in condizioni di buona geometria.

Condizioni di "buona" geometria



## Coefficiente d'attenuazione massico

Il coefficiente di attenuazione massico  $\mu/\rho$  per un materiale e per particelle neutre è dato dalla seguente relazione  $\mu/\rho$

$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho dl} \frac{dN}{N}$  dove  $\frac{dN}{N}$  è il numero di particelle che hanno subito l'interazione nell'attraversare un materiale di densità  $\rho$  per una lunghezza  $l$ .

L'unità di misura utilizzata è  $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ .  $\mu$  è il coefficiente di attenuazione lineare. La probabilità di interazione di una particella incidente normalmente su un materiale di spessore  $dl$  è  $\mu dl$ .

$1/\mu$  è detto cammino libero medio di una particella neutra.

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_a}{M} \sigma = \frac{N_A}{M} \sum_j \sigma_j$$

dove  $N_A$  è il numero di Avogadro e  $M$  la massa molare della targhetta.

$\mu/\rho = \tau/\rho + \sigma_c/\rho + \sigma_{coh}/\rho + \kappa/\rho$  dove le componenti indicate sono relative ai coefficienti di attenuazione massici rispettivamente per:

- effetto fotoelettrico
- diffusione coerente
- diffusione incoerente
- creazione di coppie

Nel caso il mezzo sia costituito da più di un elemento

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \mu_i / \rho_i$$

dove  $w_i$  è la frazione in peso dell'elemento  $i$ -esimo

La misura del coefficiente di assorbimento di energia massico dei raggi X di bassa energia è diventato nel corso degli ultimi anni di fondamentale importanza specialmente nel campo delle applicazioni afferenti l'area medica (diagnosi e piani di trattamento). Infatti con l'introduzione degli scanner a raggi X. I dati digitali forniti da questo tipo di strumenti sono strettamente correlati ai coefficienti di assorbimento. Per programmare questo tipo di strumenti è pertanto necessario conoscere con la dovuta precisione detti coefficienti con particolare riguardo ai materiali composti. L'obiettivo dell'esperimento che vi preparate ad affrontare è proprio la misura del coefficiente di assorbimento massico di energia di raggi x di bassa energia.

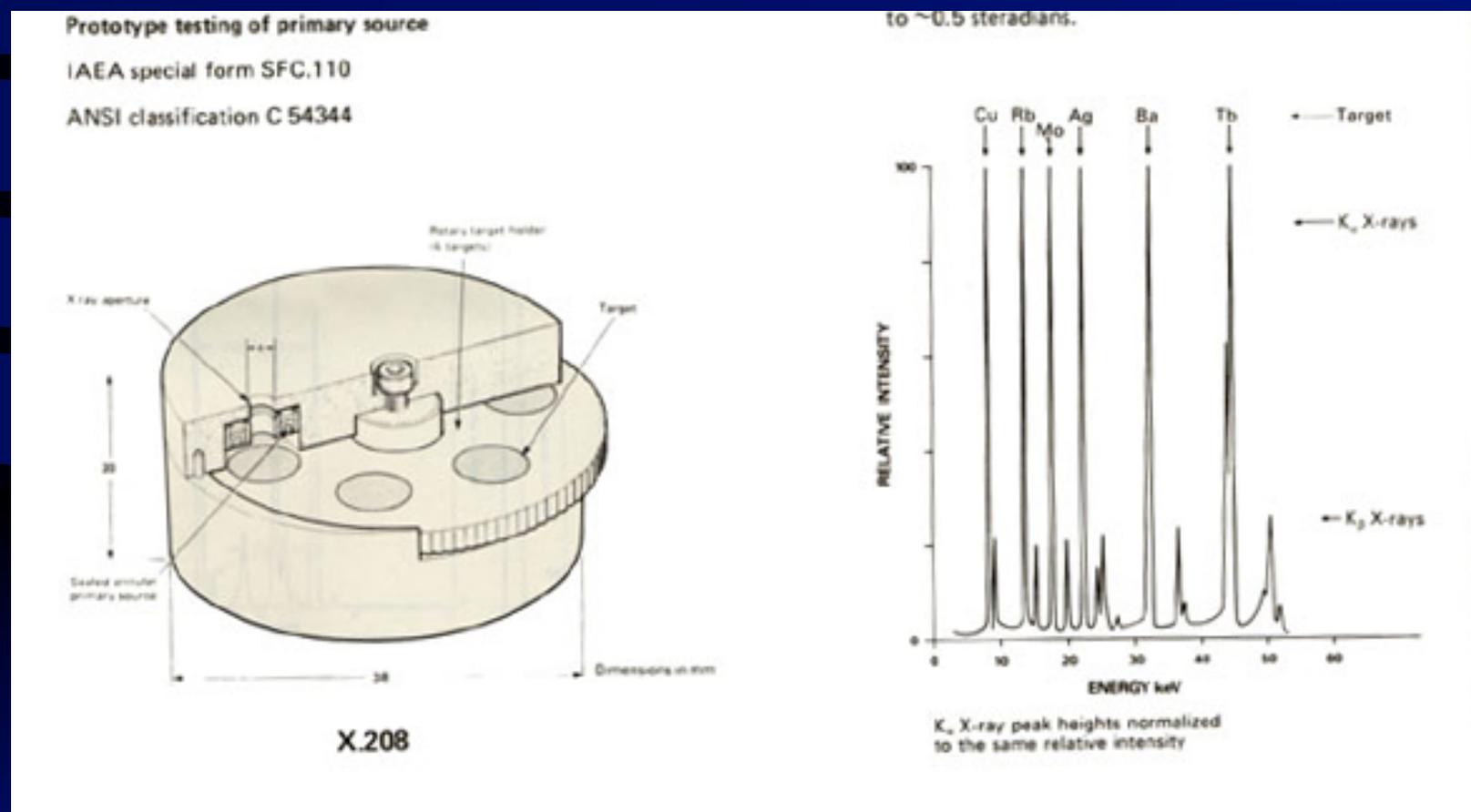
Quando un fascio monoenergetico di raggi X con intensità  $I_0$  attraversa un materiale di spessore  $x$  e densità  $\rho$ , in condizioni di buona geometria, emerge con intensità  $I$ .  $I$  ed  $I_0$  sono legati fra loro dalla legge di attenuazione esponenziale  $I = I_0 \exp[-(\mu/\rho) \cdot \rho x]$ .

L'equazione può essere riscritta nel seguente modo:

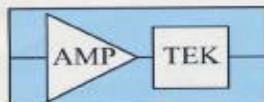
$I/I_0 = \exp[-(\mu/\rho) \cdot \rho x]$ . E quindi  $\ln(I/I_0) = \ln\{\exp[-(\mu/\rho) \cdot \rho x]\}$  da cui  $\ln(I/I_0) = -\mu/\rho \cdot \rho x$  che diventa  $\mu/\rho = \ln(I_0/I) / \rho x$

Lo scopo dell'esercitazione è quello di misurare il coefficiente di assorbimento massico di un materiale a piacere a partire da una sorgente nota di radiazioni e di un rivelatore di particelle. Le condizioni di buona geometria sono ottenute a mezzo di idonei collimatori.

La sorgente che verrà utilizzata nell'esperimento in parola è una sorgente di raggi X ad energia variabile.



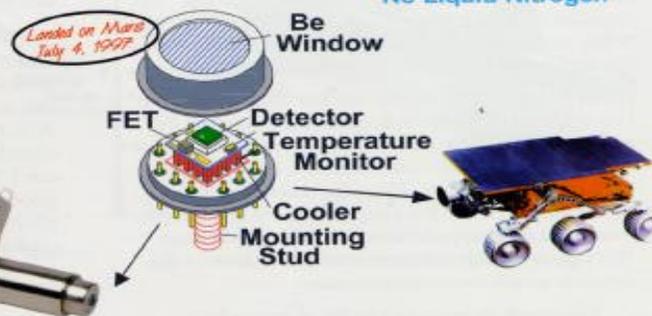
Misura del coefficiente di assorbimento di vari materiali in funzione dell'energia del fascio di fotoni incidenti



# X-RAY DETECTOR

## XR-100CR

All Solid State Design  
No Liquid Nitrogen



### FEATURES

- Si-PIN Photodiode
- Thermoelectric Cooler
- Beryllium Window
- Hermetic Package (TO-8)
- Wide Detection Range
- Easy to Operate

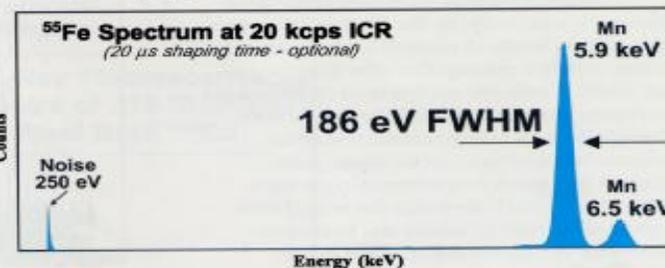
### APPLICATIONS

- X-Ray Fluorescence
- Nuclear Medicine
- X-Ray Lithography
- Portable Instruments
- OEM
- Teaching & Research
- Mössbauer Spectrometers
- Space and Astronomy
- Environmental Monitoring
- Nuclear Plant Monitoring
- Archeology
- Toxic Dump Site Monitoring
- PIXE
- Process Control

Model *XR-100CR* is a new high performance X-Ray Detector, Preamplifier, and Cooler system which uses a thermoelectrically cooled Si-PIN Photodiode as an X-Ray detector. Also mounted on the cooler are the input FET and a novel feedback circuit. These components are kept at approximately  $-30^{\circ}\text{C}$ , and can be monitored by an internal temperature sensor. The hermetic TO-8 package of the detector has a light tight, vacuum tight 1 mil ( $25\ \mu\text{m}$ ) Beryllium window to enable soft X-Ray detection.

Power to the XR-100CR is provided by the PX2CR Power Supply. The PX2CR is AC powered and includes a spectroscopy grade Shaping Amplifier. The XR-100CR/PX2CR system ensures stable operation in less than one minute from power turn-on.

The resolution for the 5.9 keV peak of  $^{55}\text{Fe}$  is 220 eV FWHM with 12  $\mu\text{s}$  shaping time constant (standard) and 186 eV FWHM with 20  $\mu\text{s}$  shaping time (optional).



**AMPTEK INC.** 6 DE ANGELO DRIVE, BEDFORD, MA 01730-2204 U.S.A.

Tel: +1 (781) 275-2242 Fax: +1 (781) 275-3470 email: sales@amptek.com http://www.amptek.com

## XR-100CR X-RAY DETECTOR



Figure 12. XR100CR, MCA8000A, and Laptop Computer

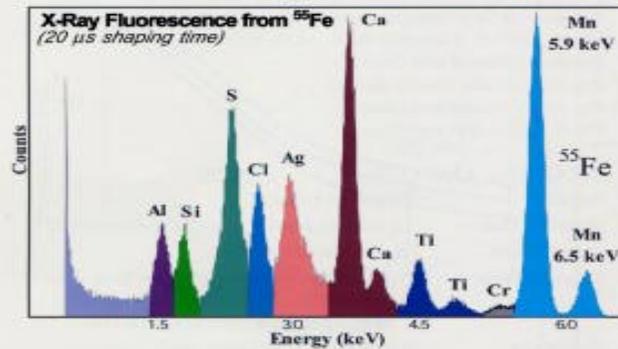


Figure 13. Sample Spectrum

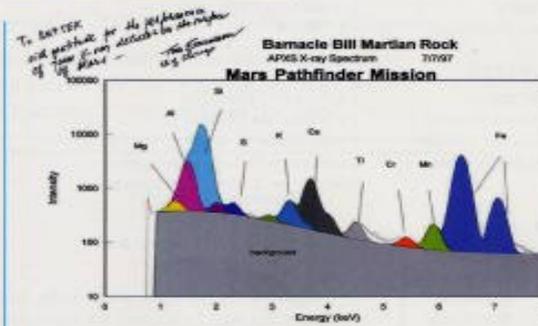


Figure 14. First X-Ray Spectrum from Mars Using XR-100T Detector, Courtesy of the University of Chicago

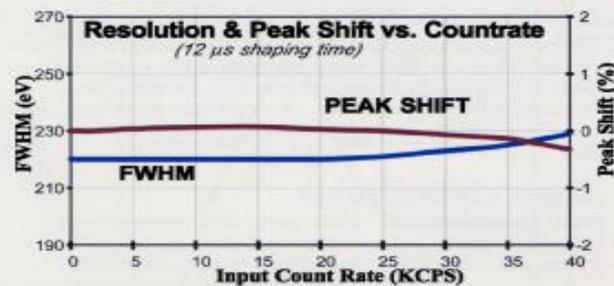


Figure 15. Resolution and Peak Shift vs. Count Rate for  $^{55}\text{Fe}$ , 5.9 keV, 12  $\mu\text{s}$  Shaping

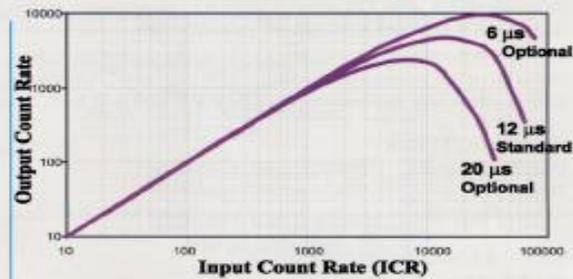
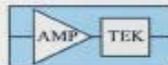


Figure 16. Output vs. Input Rate for Different Shaping Time Constants



**AMPTEK INC.** 6 DE ANGELO DRIVE, BEDFORD, MA 01730-2204 U.S.A.  
 Tel: +1 (781) 275-2242 Fax: +1 (781) 275-3470 email: sales@amptek.com http://www.amptek.com

Noto il materiale e il suo spessore misurato  $I$  e  $I_0$  si ricava il coefficiente massico di energia

$$\mu/\rho = \ln(I_0 / I) / \rho x$$

