

CONSIDERAZIONI GENERALI SULLA SPETTROSC. γ

- MEMO**
- I γ VANNO SOGGETTI AD IMPROVVISI ED IMPORTANTI ALTERAZIONI DELLE LORO PROPRIETÀ, NELL'INTERAGIRE CON LA MATERIA
 - LE PARTICELLE CARICHE PERDONO INVECE LA LORO ENERGIA IN MODO CONTINUO, ATTRAVERSO MOLTE INTERAZIONI COL MEZZO
 - I γ SONO TRASPARENTI. NOI RIVELIAMO GLI e^{\pm} SECONDARI

BUONO SPETTROMETRO γ

- ALTA EFF. DI CONVERSIONE γ
- ALTA EFF. DI RIVELAZIONE e^{\pm}

IPOTESI DI BASE: COMPLETO ASSORBIMENTO e^{\pm} SECONDARI C
BREMSSTRAHLUNG
dim $\times 1$ cm \nearrow per i solidi

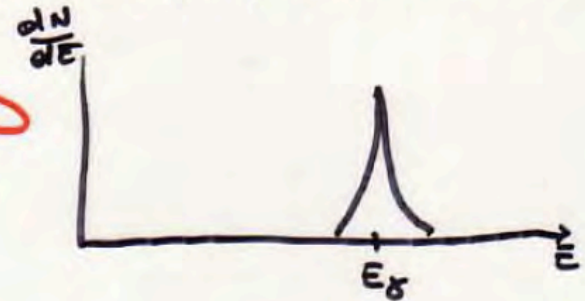
RICHIAMI

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

- DOMINA FINO A $E_\gamma \sim 100 \text{ keV}$
- $\sigma_{ph} \propto Z^{4.5}$ (MATERIALI AD ALTO Z)
- FOTOELETTRONE DA SHELL K (se energeticam. possibile)
- RAGGI X CARATTERISTICI O e^- AUGER SEMPRE

$E_{mis} = E_\gamma$ se 1) en. fotoelettrone completam. registrata
2) X e AUGER ed e^- successivi NON SFUGGONO

→ SPETTRO CARATTERISTICO



Effetto Compton

DOMINA AD ENERGIE INTERMEDIE ($\approx 100 \text{ keV} - 5 \text{ MeV}$)

DIPENDE DAL \uparrow
MATERIALE

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

$$E_{e^-}^{\text{MIN}} = 0 \quad (\text{INTERAZIONE DI STRISCIO, } h\nu \approx h\nu', \theta \approx 0)$$

$$E_{e^-}^{\text{MAX}} = h\nu \left(\frac{2\alpha}{1 + 2\alpha} \right) \quad (\text{COLLISIONE "KNOCK-OUT", } \theta = \pi)$$

$$E_c \equiv h\nu - E_{e^-}^{\text{MAX}} = \frac{h\nu}{1 + 2\alpha} \approx \frac{m_e c^2}{2} = 256 \text{ keV}$$

\uparrow SE $h\nu \gg \frac{m_e c^2}{2}$ ($E_c = 233 \text{ keV}$ se $E_\gamma = 2.6 \text{ MeV}$)

SPETTRO CARATTERISTICO



IN REALTÀ LA FORMA È UN PO' PIÙ STONDATA...

Produzione di coppie (e^- , e^+)

- DOMINA PER $E_\gamma \approx 5-10$ MeV
- ESISTE CN. DI SOGLIA $E_{min} = 1022$ KeV
- IL POSITRONE, A RIPOSO, SI ANNICHILO: 2γ DA 511 KeV l'uno
 $E_{e^-} + E_{e^+} = h\nu - 2m_e c^2$ ($R \approx$ qualche mm)

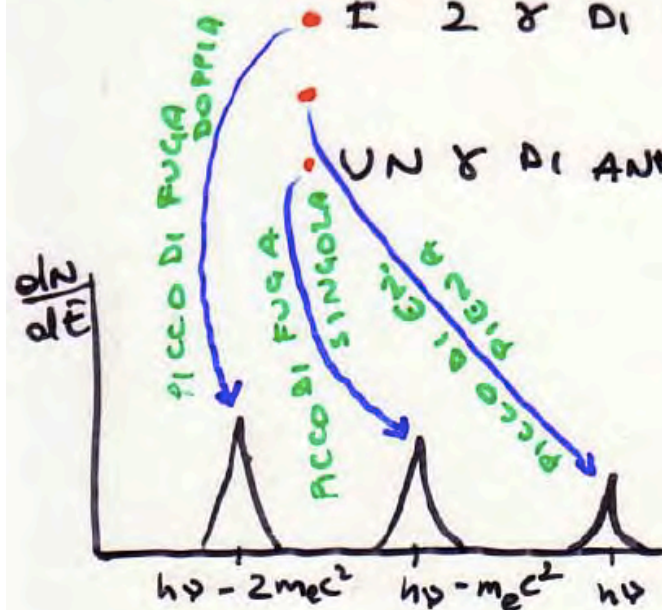
3 POSSIBILITÀ "ESTREME"

- I 2γ DI ANNICHILOZ. SFUGGONO COMPLETAMENTE
VENGONO RIVELATI

- UN γ DI ANN. VIENE RIVELATO, L'ALTRO SFUGGE

ESISTONO POI TUTTI I CASI INTERMEDII

Il rapporto tra i picchi dipende dal rivelatore e da E_γ



FUNZIONI DI RISPOSTA DEGLI SPETTROMETRI γ

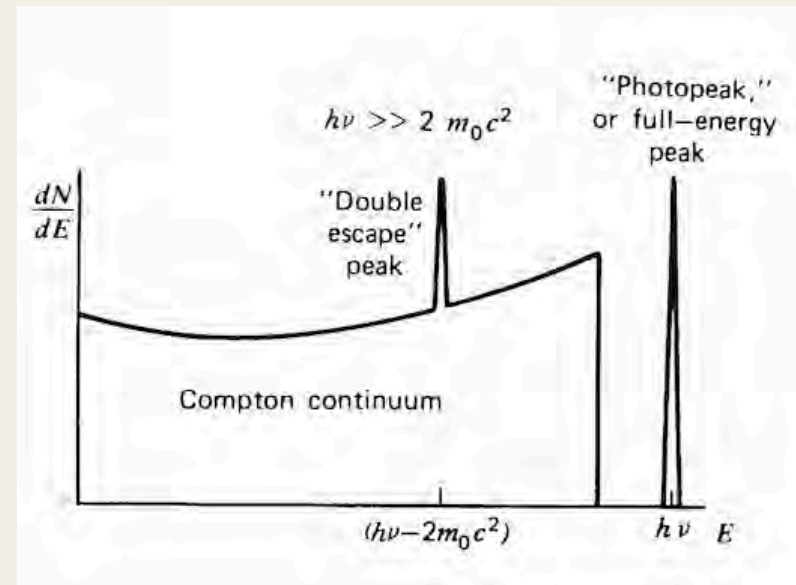
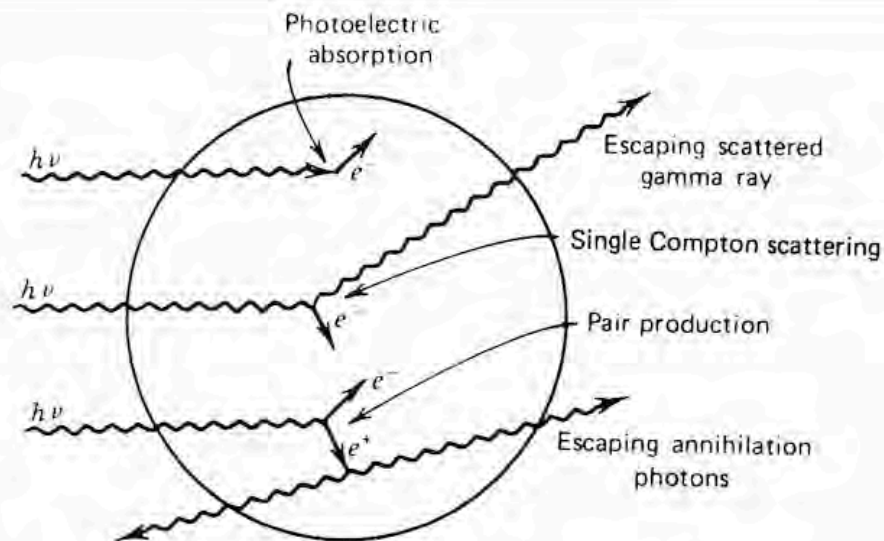
Ⓐ RIVELATORE "PICCOLO" (1-2 cm)

RISPETTO AL P.C.M. DEI γ SECONDARI (DA ANNICH. O DA COMPTON)

NB CONTINUIAMO A CONSIDERARE GLI e^\pm COMPLETAM. CONTENUTI

- 2 CASI : CON O SENZA PRODUZIONE DI COPPIE
- OGNI γ VA INCONTRO AD UNA SOLA INTERAZIONE

↳ rapporto picco-compton $\equiv \sigma_{ph} / \sigma_c$



③ RIVELATORE "MOLTO GRANDE" (diverse decine di cm ...) ← NON REALISTICO!

IP TUTTI I γ SECONDARI SONO CONTENUTI

↳ TUTTI I γ VENGONO RIVELATI NEL PICCO DI EN. PIENA

STORIE DIVERSE

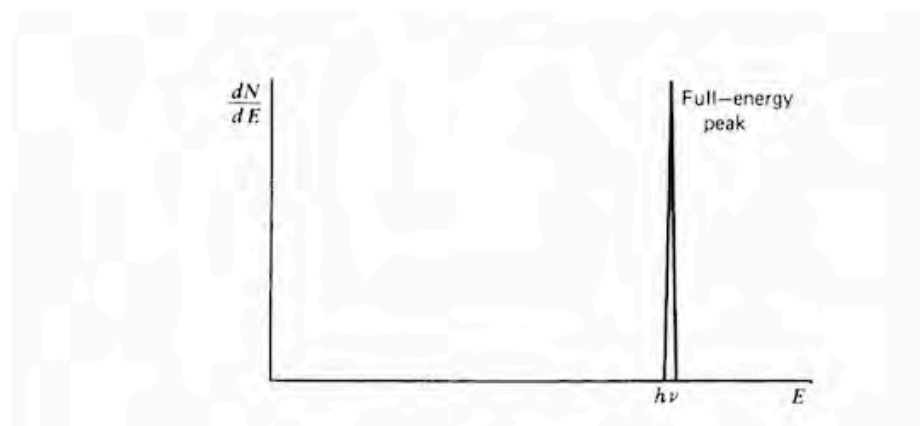
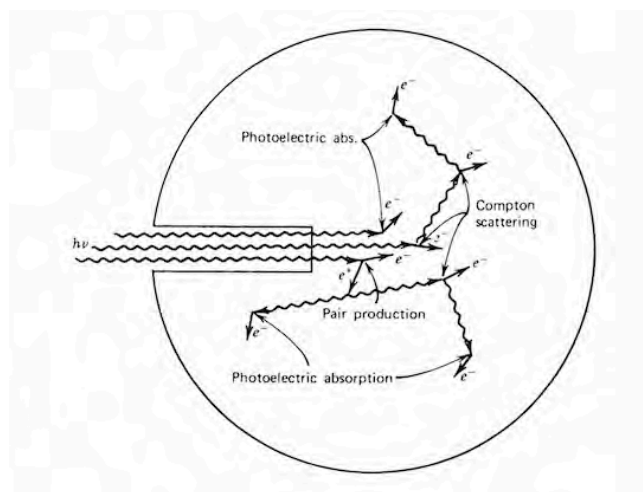
- SINGOLO EFFETTO FOTOELETTRICO SINGLE EV
- 1 COMPTON + 1 " "
- ALCUNI " + " " " MULTI SITE EVENT

TUTTI QUESTI EVENTI SONO CONTEMPORANEI ($\tau_{\gamma} = c$ $t_{TOT} \lesssim 1 ns$)

CONSIDERAZIONI DEL TUTTO ANALOGHE CON PRODUZIONE DI COPPIE

CASO ④ FOTOPICCO

CASO ⑤ PICCO DI EN. PIENA

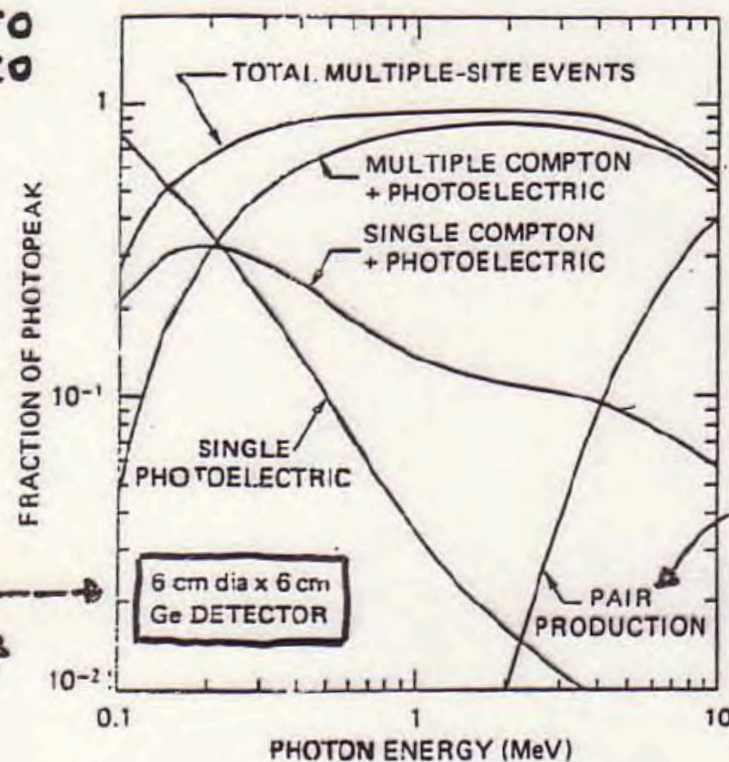


LA COMPOSIZIONE DEL PICCO DI ENERGIA PIENA (o "FOTOPICCO")

→ IN GENERALE FOTONI MONOCROMATICI DANNO:

ENERGIA PIENA + CONTINUO + PICCHI DI FUGA
(FOTOELETTRICO + (COMPTON) (SE $E_\gamma > 1.022 \text{ MeV}$)
EVENTI MULTIPLI)

CONTRIBUTO
AL FOTOPICCO
[log]



SIMULAZIONE
MONTECARLO

COASSIALE
DI MEGLIE
DIMENSIONI $\sim 170 \text{ cm}^3$

CON ASSORBIMENTO
DI ENTRAMBI I γ
DI ANNICILIAZIONE.

ENERGIA [MeV]

© RIVELATORE DI MEDIA GRANDEZZA (situazione tipica)

- 2 casi: **CON** o **SENZA** PRODUZIONE DI COPPIE
- RAPPORTO PICCO - COMPTON **MIGLIORE** (aggiunta dei multi eventi)
DIPENDENTE DALL'ENERGIA ($P >$ per $E_\gamma <$)
- PRESENZA DI EVENTI **MULTI, COMPTON** NELLA REGIONE TRA $E_{e^-}^{\text{MAX}}$ e E_γ
- COMPARSA DEL **PICCO DI FUGA SINGOLA**
- I CASI **INTERMEDI** FORMANO UN **CONTINUO**

LA FUNZIONE DI RISPOSTA SI SIMULA COI M.C.

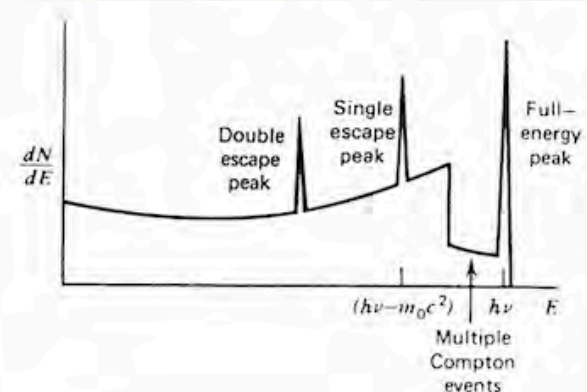
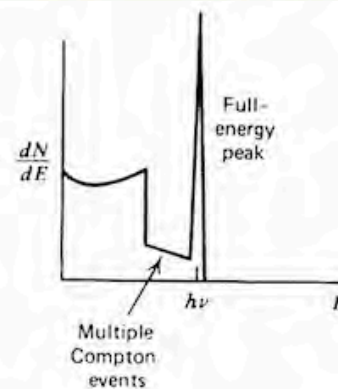
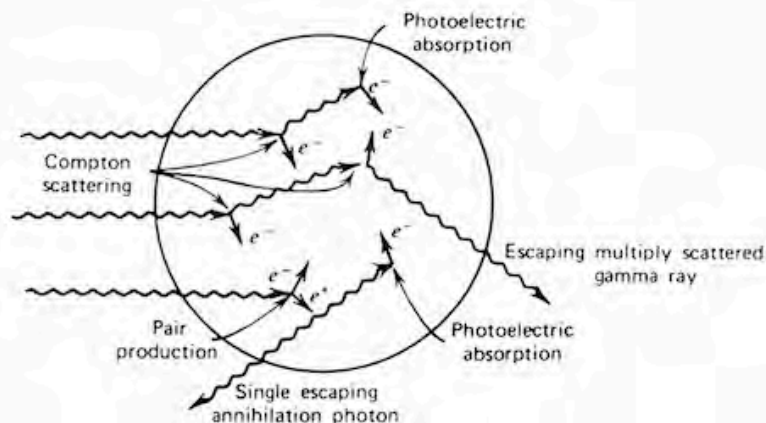
Nuovi parametri

$$\frac{\text{PICCO}}{\text{TOT}}$$

$$\frac{F. D.}{F. E.}$$

$$\frac{F. S.}{F. E.}$$

caratteristici del rivelatore
e della configurazione di misura



ALCUNE COMPLICAZIONI NELLA FUNZIONE DI RISPOSTA

FUGA DI e^- SECONDARI

- PIÙ IMPORTANTE SE $E_\gamma > 2\%$ SE RIV. PICCOLO
- CAMBIA LA FORMA DEL CONTINUO A FAVORE DELLE EN. + BASSE
- ABBASSA IL RAPPORTO PICCO - COMPTON

FUGA DI γ DA BREMSSTRAHLUNG

- IMPORTANTE PER $E_{e^-} \gtrsim 1 \text{ MeV}$
- $S_{\text{rad}} \propto Z^2$
- CAMBIA LA FORMA DEL CONTINUO

FUGA DI RAGGI X CARATTERISTICI

- APPAIONO I PICCHI DI FUGA DEGLI X $E = h\nu - K_{\alpha, \beta}$
- PIÙ IMPORTANTI NEI RIV. CON GRANDE RAPPORTO $\frac{\text{SUP}}{\text{VOL}}$
- PIÙ IMPORTANTI PER $E_\gamma <$

↙ \exists anche $L_{\alpha, \beta}$
ma non
sempre
risolti

RADIAZIONE SECONDARIA CREATA VICINO ALLA SORGENTE

- PRODUZIONE DI γ DI ANNICILIAZIONE + SORGENTE β^+
↳ PICCO A 511 keV OLTRE AI γ CARATTERISTICI 1022 (SE RIV. A "PORZETTO")
- BREMSSTRAHLUNG DA FRENAMENTO DEL β^- DELLA SORGENTE NELLA CAPSULA O NEI MATERIALI INTERPOSTI
↳ CONTINUO A BASSE EN. NON SOTTRAIBILE (sorgente di errore)

EFFETTI DOVUTI AI MATERIALI ESTERNI

- RAGGI X CARATTERISTICI DEI MATERIALI → PICCHI A BASSE EN.
- PICCO DI ANNICILIAZIONE ORIGINE DIVERSA DA PRIMA!
- γ DA BACKSCATTERING $E \sim 0.2 - 0.25 \text{ MeV} = (h\nu')^{\text{MIN}}_{\text{COMPTON}}$
↳ PICCO MOLTO LARGO, ADDENSAMENTO DI CONTEGGI

EFFETTI DOVUTI A SOMMA D'IMPULSI

COINCIDENZE REALI O CASUALI (\neq STATISTICA DI CONTEGGIO!)

^{60}Co ↙

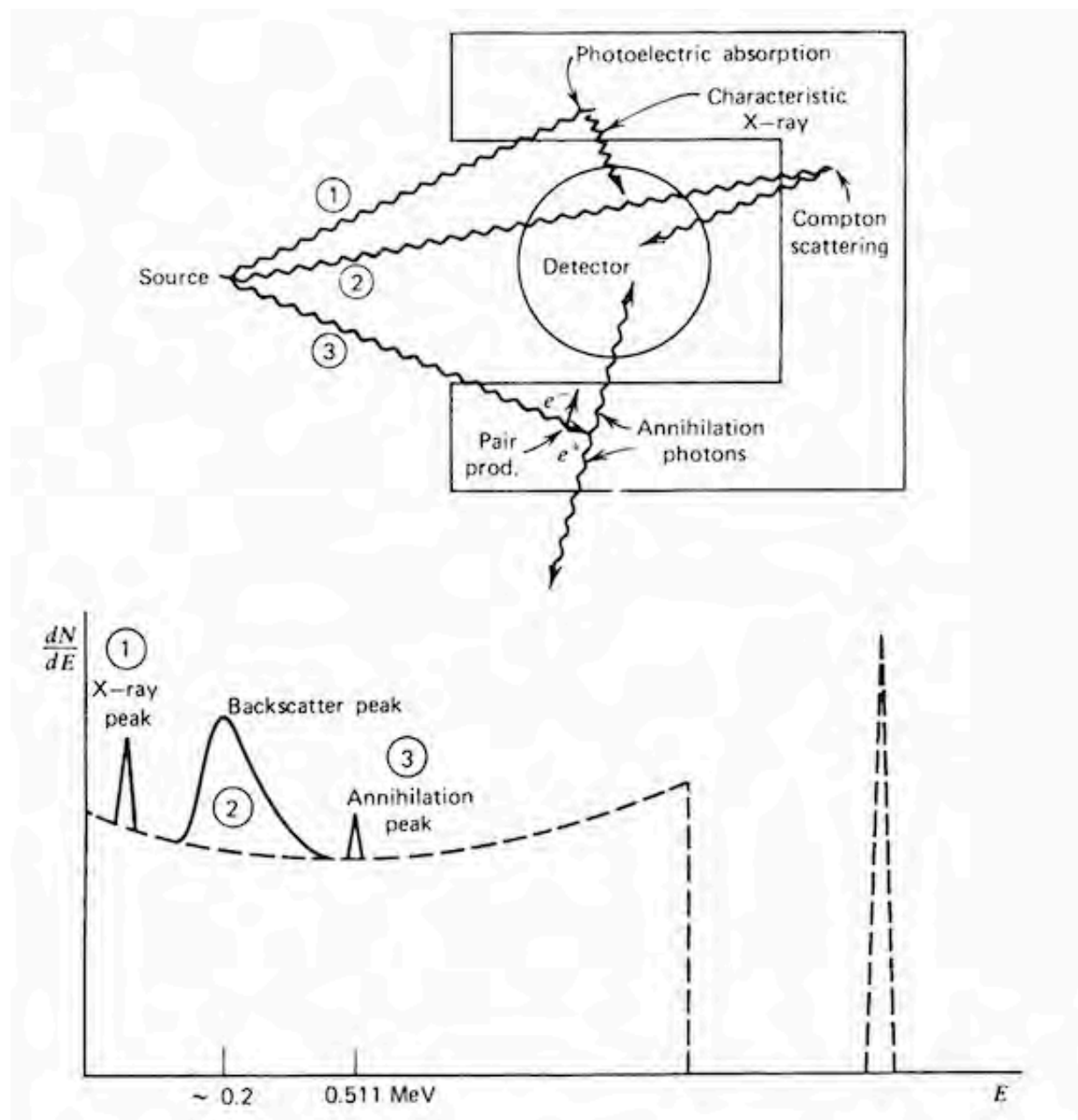
1173, 1333 → 2506 picco
+ continuo

→ STUDIO DELLE PROBABIL.
DI "PILE UP"

INOLTRE

N_1 | $< N_1$
con somma

POSSIBILITÀ DI CORRELAZIONI ANGOLARI



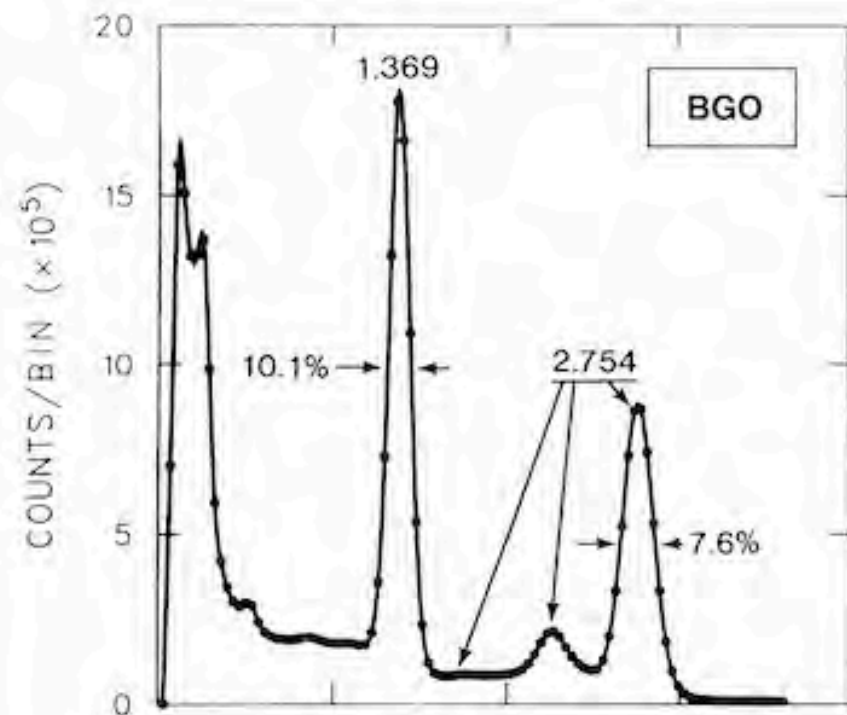
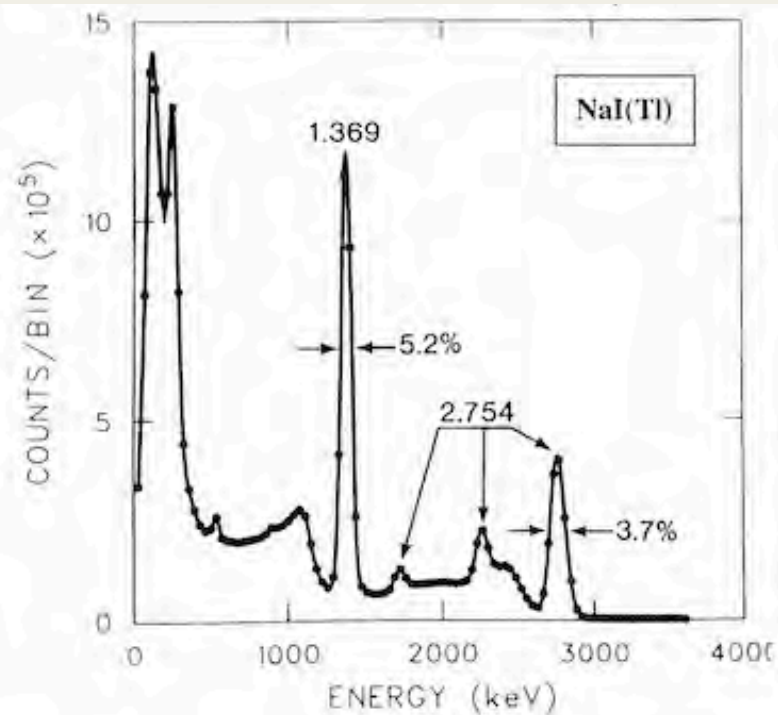
SCINTILLATORI COME SPETTROMETRI γ

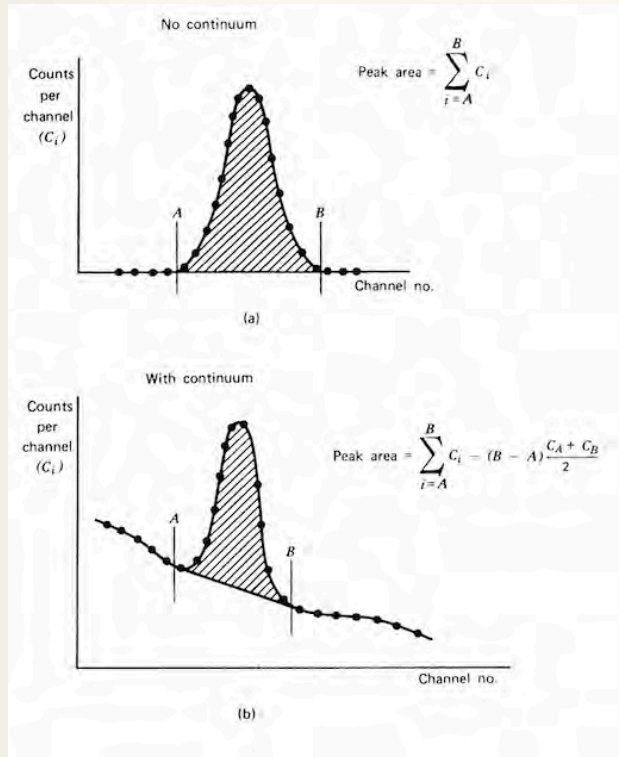
FUNZIONE DI RISPOSTA

NaI(Tl) : $Z_I = 53 \rightarrow G_{ph}$ ALTO

CsI(Tl) , CsI(Na) , BGO: BASSO YIELD E/O ALTO Z_0

CONFRONTO SPETTRO NaI - BGO: NaI migliore risoluzione
BGO maggiore R_{ph}
↳ minor COMPTON
picchi FD, FS <





POSIZIONE
DEL PICCO

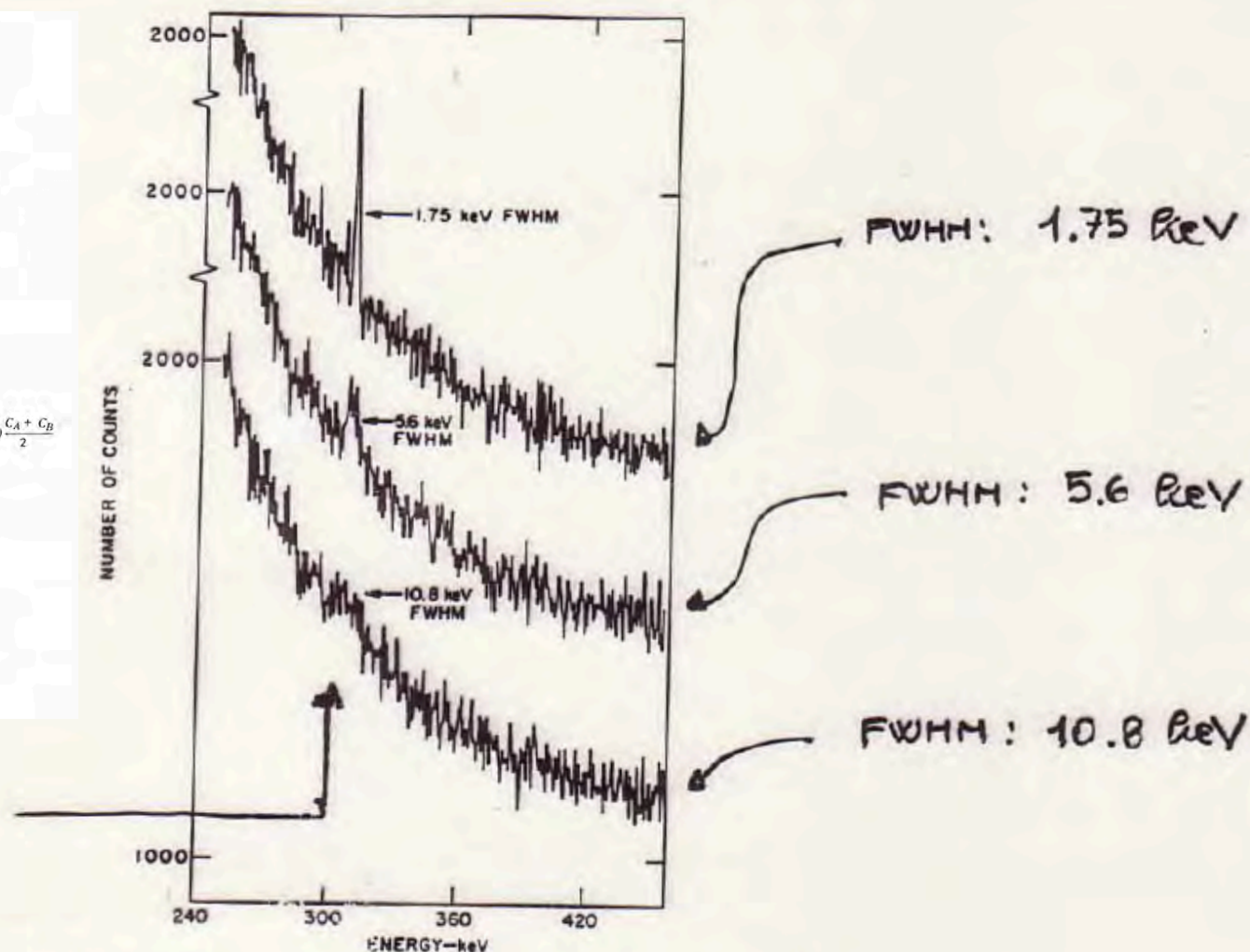


Figure 12-13 The effect of energy resolution on the ability to identify a weak peak superimposed on a statistically uncertain continuum. The area under the peak is the same in all three cases. (From Armantrout et al.²⁸)

IMPORTANZA DELLA RISOLUZIONE PER RICONOSCERE
UN PICCO CHE CRESCE SU DI UN FONDO CONTINUO

FUNZIONE DI RISPOSTA $\rightarrow E_\gamma$

Ad alte en. (2 MeV \rightarrow 20 MeV) :

- DOMINA σ_{pp} E E_{e^\pm} CRESCE

$\rightarrow S_{rad}$ CRESCE, CON $E_{\gamma_{brem}}$

\rightarrow MAGGIORI PERDITE DALLE SUPERFICI

\rightarrow PICCO FE DIMINUISCE

- AUMENTANO LE FLUTTUAZIONI STATISTICHE NEL
DI FOTO ELETTRONI PRODOTTI

\rightarrow PICCHI FD E FS SI ALLARGANO

STRUTTURA DEI
PICCHI DI FUGA
AL VARIARE
DI E_γ

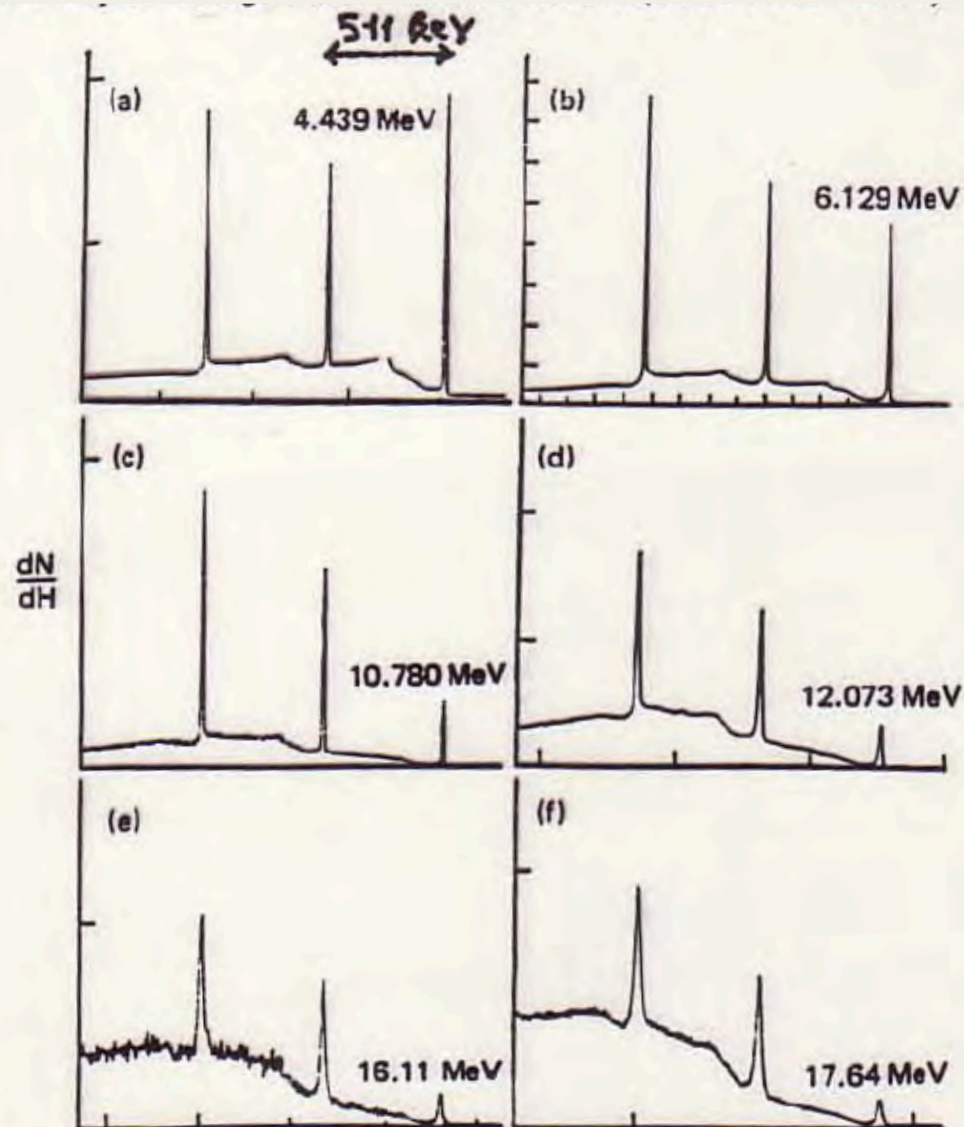


Figure 12-16 The relative intensity of the full-energy, single escape, and double escape peaks for a 100 cm³ Ge(Li) detector for gamma-ray energies from 4.439 to 17.64 MeV. (From Berg et al.³²)

LINEARITÀ

EFFICIENZA DI SCINTILLAZIONE $S \equiv \frac{dL}{dE}$

DIPENDE DA E E DAL TIPO DI PARTICELLA

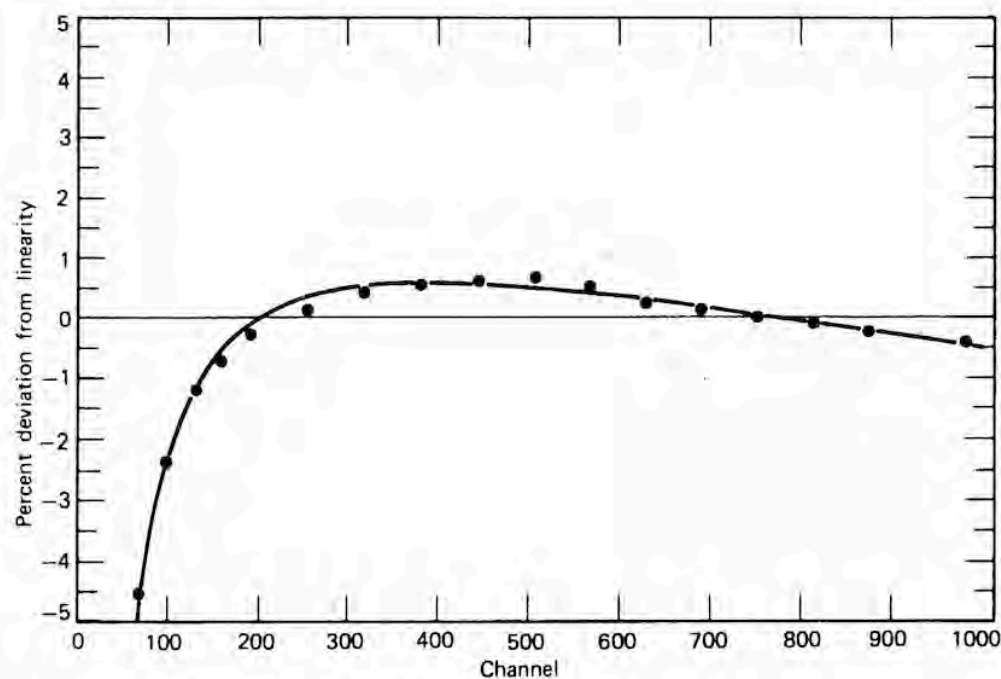
NON LINEARITÀ IN E_{e^-} : DEBOLE

NON LINEARITÀ IN E_γ : MINORE

⇒ PETTRO DEGLI e^- SECONDARI VARIABILE

↳ MEDIA DI MOLTI S DIFFERENTI PER UNA SOLA E_γ

↳ VARIAZIONI CON E_γ RIDOTTE



CALIBRAZIONE IN ENERGIA

SORGENTI DI CALIBRAZIONE

LINEARITÀ DEL RIVELATORE NON PERFETTA

↳ CALIBRAZIONE CON γ MULTIPLI BEN SPAZIATI SU TUTTO IL RANGE DI E D'INTERESSE

NB LA CALIBRAZIONE PUÒ NON RIMANERE COSTANTE NEL TEMPO

↳ CALIBRAZIONI PERIODICHE

PRECISIONE MASSIMA SPERIM. NELLA MISURA DI E: $1:10^5$

↳ LE SORGENTI DI CAL. DEVONO AVERE γ DI EN. NOTA A 10^{-5} ALMENO

γ STANDARD K_{α} (W) ~ 5.9 KeV $^{198}\text{Au} \sim 412$ KeV $^{60}\text{Co} \sim 1333$ KeV

NON USARE $\gamma_{\text{ANN.}}$!

- Se F.D. cade in una regione BEN CALIBRATA \rightarrow F.E. UTILIZZABILE
- Se γ IN CASCATATA in una " " " \rightarrow PICCOLA SOMMA "

CURVA DI CALIBRAZIONE

- POLINOMIALE $E_i = \sum_{n=0}^N a_n C_i^n$ TRAMITE FIT DEI PTI SPERIM.
(metodo dei minimi quadrati)
per i Ge N 4-5

- COSTRUZIONE DEL PLOT DI DEVIAZIONE DALLA LINEARITA'

DIPENDENZA DALLA DIREZIONE D'INCIDENZA SUL RIVELATORE

Si sono osservate delle differenze fino a 100 eV

→ CALIBRARE ILLUMINANDO IL RIV. DALLO STESSO LATO ESPOSTO POI IN MISURA

↓ CAUSE? $\neq E_{raccolta}$ nelle varie regioni del rivelatore

leggero guadagno di en. nel campo E per gli e⁻ secondari, dipendente dall'orientazione rispetto ad E

EFFICIENZE DEGLI NaI

RIPRODUCIBILITÀ E STANDARDIZZAZIONE DEI RIVELATORI

↳ MOLTI GRAFICI E TABELLE

2 TIPI PRINCIPALI DI FORNE

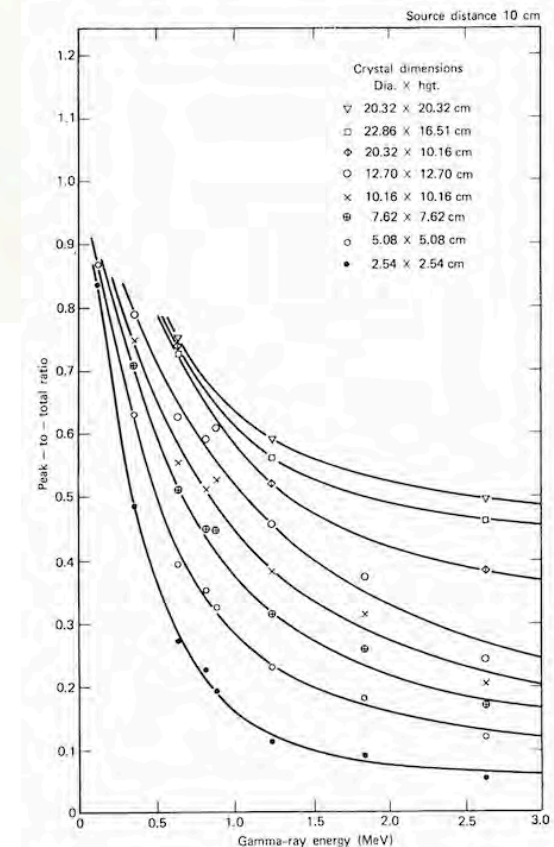
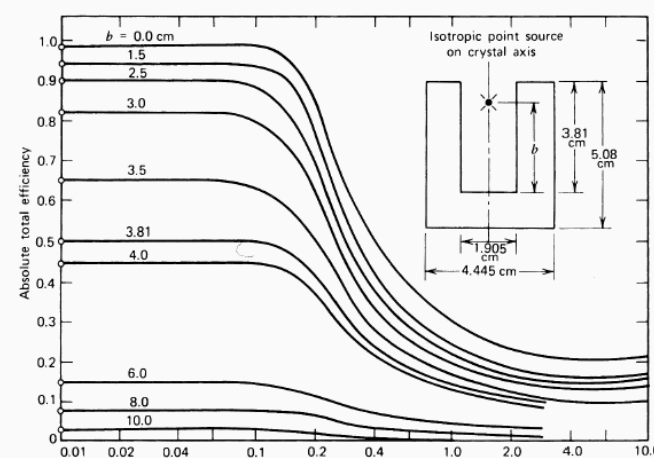
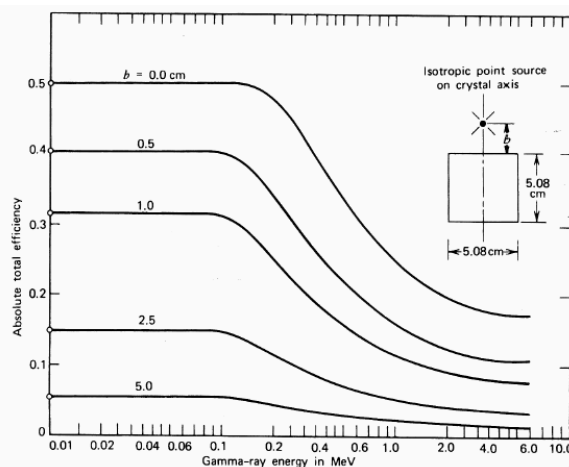
CILINDRO

- $\frac{\Phi}{h} \sim 1$ (MIGLIORE RACCOLTA DI LUCE)

- $\frac{\Phi}{h} \neq 1 \rightarrow$ GUIDA DI LUCE
X MEDIARE SULLE FLUTTUAZIONI DI Q.E. DEL FOTOMOLTIPLICATORE
(es: scintillatori a LASTRA)

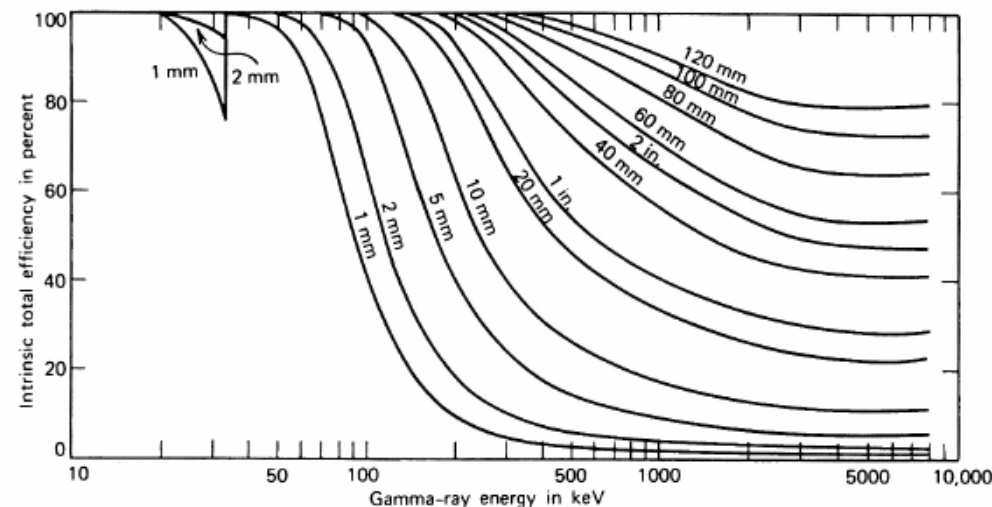
A POZZETTO

$E_{TOT} \sim 100\%$ per $E_\gamma < 100 \text{ keV}$



UTILIZZO DEI DATI TABULATI

- CONTROLLARE SEMPRE QUALE E È PLOTTATO (E_{abs} , E_i)
- QUALI TIPI DI EVENTI CI INTERESSANO (tutti $\rightarrow E_{TOT}$
di en. fix $\rightarrow E_p$)
- DIMENSIONI E FORMA
conta molto lo spessore ma un po' anche la geometria
- DIMENSIONI, POSIZIONE E TIPO DI SORGENTE
 - sorgente PUNTFORME o ESTESA
 - SULL'ASSE o DECENTRATA
 - FASCIO DI γ o PENNELLO SOTTILE
- ASSORBIMENTO E/O AUTOASSORBIMENTO



CONVENZIONI SULLE EFFICIENZE X SPETTRON. γ

RAPPORTO PICCO-COMPTON R_{p-c}

Ufficialmente

$$\begin{aligned} &^{137}\text{Cs} \text{ (662 keV)} \quad R_{p-c} = \frac{\frac{\text{conteggi}}{\text{canale}} \text{ al canale del MAX}}{\frac{\text{conteggi MED}}{\text{canale}} \text{ tra 358 e 382 keV}} \\ &^{60}\text{Co} \text{ (1333 keV)} \quad = \frac{\text{idem}}{\dots \text{ tra 1040 e 1096 keV}} \end{aligned}$$

È UNA MISURA DELL'EFFETTO COMBINATO DELLA FWHM CON LA FOTOFRAZIONE

$$\left(\text{Def: FOTOFRAZIONE} = \frac{\text{AREA PICCO P.E.}}{\text{AREA TOT SPETTRO}} \equiv R_{ph} \right)$$

R_{p-c} VIENE PEGGIORATO DALLA PRESENZA DI γ SCATTERATI DAI MATERIALI CIRCOSTANTI (AUMENTA IL COMPTON)

- A PARITÀ DI FOTOFRAZIONE $R_{p-c} \propto \frac{1}{FWHM}$
- A PARITÀ DI FWHM $R_{p-c} \propto R_{ph}$

EFFICIENZA ASSOLUTA DEL PICCO DI EN. PIENA E_{ap} INTRINSECA E_{ip}

Se si usa E_{ip} ci si svincola dal fattore geometrico
TIPICAMENTE si quota E_{ip} per γ da 1333 keV (^{60}Co)

VOLUME ATTIVO

AD ALTE ENERGIE $E_{ip} \div \text{Volume}$

↳ VOLUME ATTIVO È UN BUON PARAMETRO PER L'EFF. DEL RIVELATORE,
almeno per i γ con $P(E_\gamma) \sim 20-30\%$, e non di più

EFFICIENZA RELATIVA E_{REL}

4 volte si quota (in%) il rapporto $E_{Ge} / E(\text{NaI})$ dove lo standard
è dato dall' E di un NaI di $3'' \times 3''$ con sorgente posta a 25 cm
per γ da 1333 keV ed è $E_{ap}^{\text{NaI}} = 1.2 \times 10^{-3}$

REGOLA DEL POLUCE (per HPGe coax)

$$E_{REL} \sim \frac{\text{VOLUME [cm}^3\text{]}}{5} \%$$