

RIVELAZIONE DI n VELOCI E SPETTROSCOPIA

- Processo di conversione principale: **SCATTERING ELASTICO**
- Ciò che si rivela è il nucleo che rincula: **IL MIGLIORE È H**
- $E_n \gtrsim 1 \text{ keV}$ perché il rinculo sia rivelabile
- Possibilità di fare **SPETTROSCOPIA**

CONTATORI BASATI SULLA MODERAZIONE DEI n

Idea Rivelatore di n lenti' circondato da moderatore \rightarrow
(tipicamente PET o paraffina per l'alto contenuto di H)

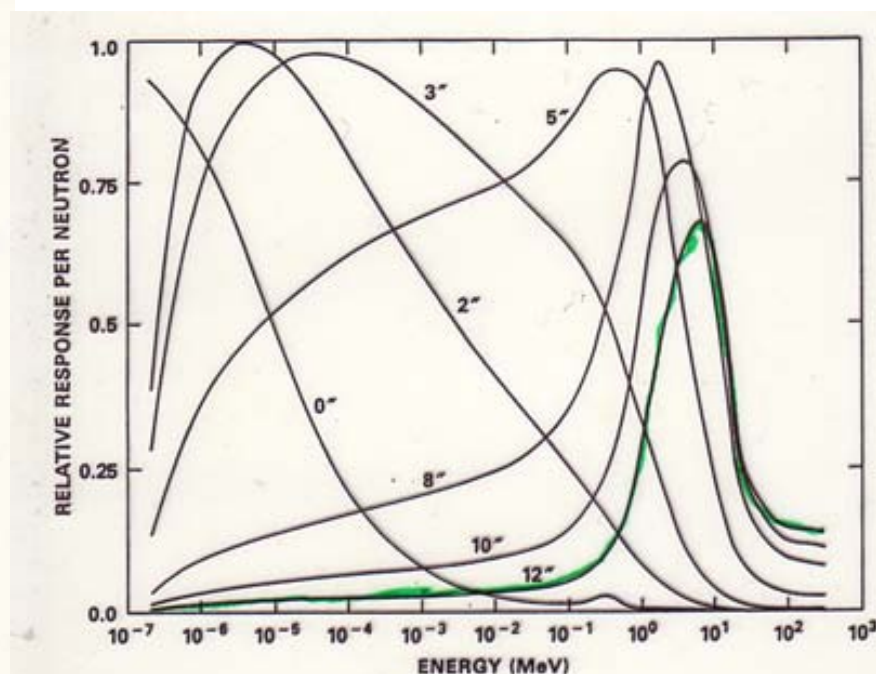
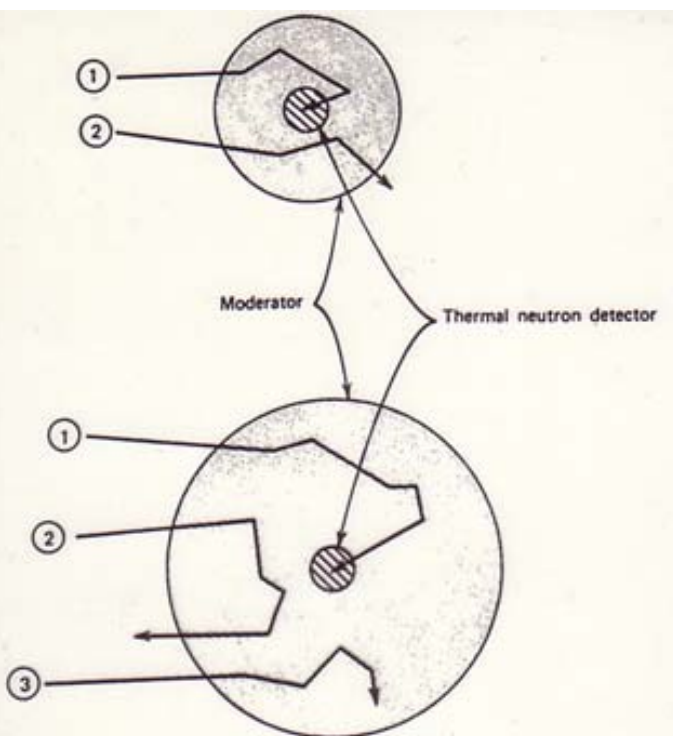
Spessore moderatore **OTTIMALE**

- troppo poco \rightarrow troppi n non moderati o comunque troppo energetici (o troppo piccola)
- troppo \rightarrow n assorbiti nel moderatore
e che non incontrano il riv. attivo

$E_i = E_i(E_n) \rightarrow$ Se fisso $E_n \rightarrow E_i$ ha un massimo
per un certo spessore del moderatore
($\sim 5 \text{ cm}$ per $E_n \sim 1 \text{ keV}$, $\sim 10 \text{ cm}$ per $E_n \sim 10 \text{ keV}$)



UN'ATTENTA SCELTA DELLO **SPESORE** E DELLA
COMPOSIZIONE DEL SISTEMA MODERATORE-RIVELATORE
PUÒ **OTTIMIZZARE** E_i PER UNA CERTA REGIONE
DI E_n D'INTERESSE.



IL DOSIMETRO SFERICO

SISTEMA MODERATORE (PET) - RIVELATORE (LiI(Eu))
DI FORMA SFERICA

↳ è esposta in funzione dell'energia
CAPACITÀ MOLTISSIMA con lo spessore del moderatore

PER PURO CASO

$E_i(E_n)$ per 12" di moderatore e LiI da 4 mm x 4 mm

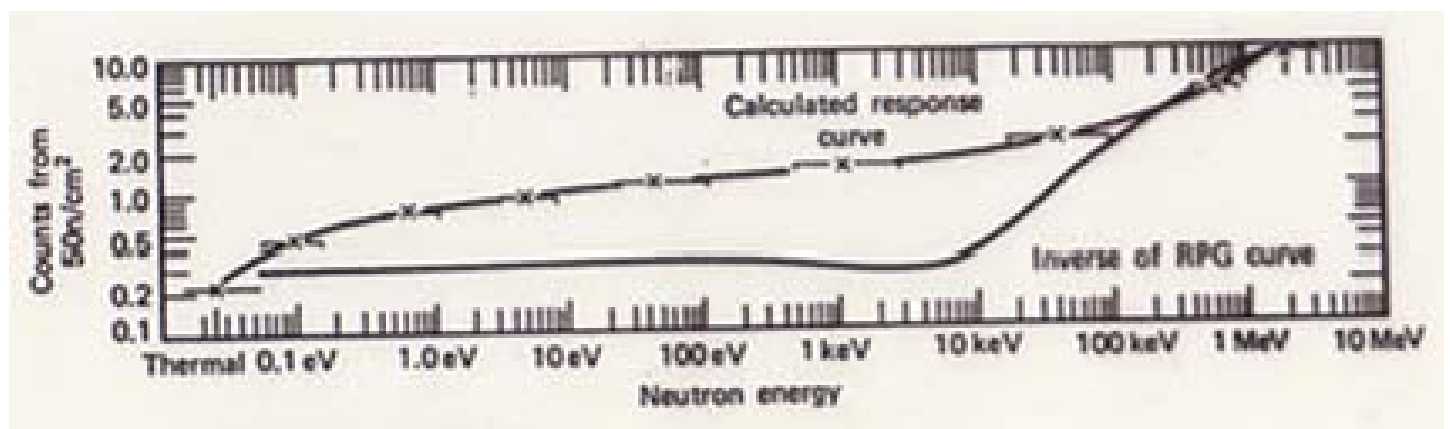
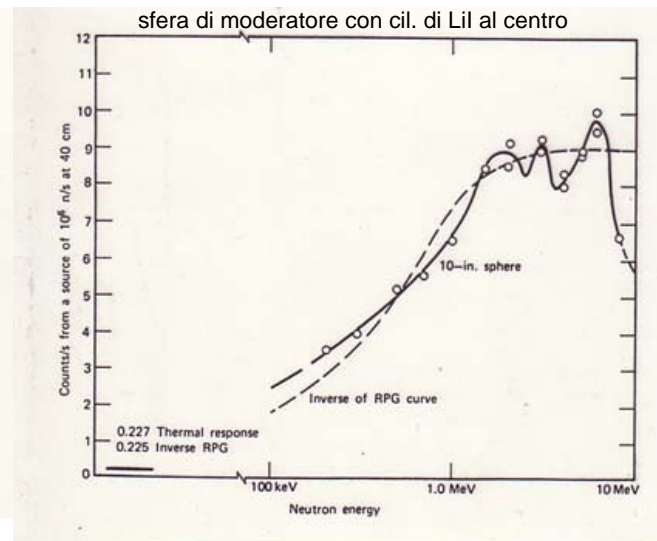
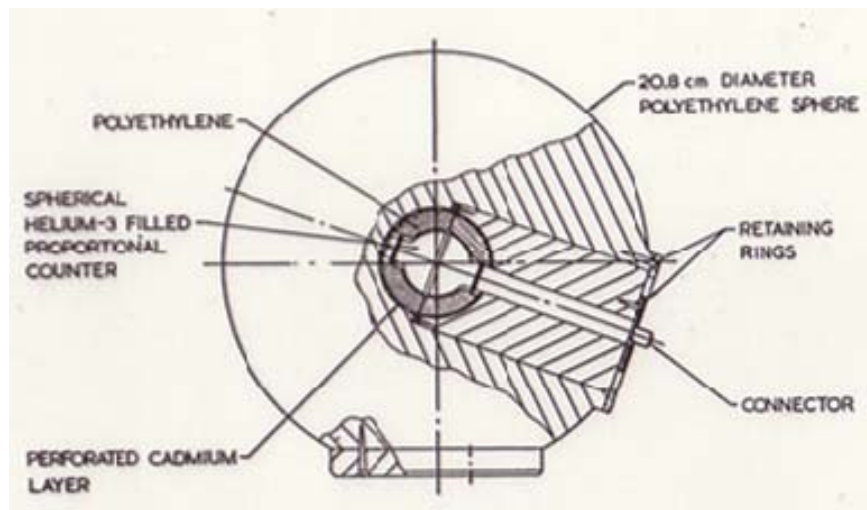
FORMA SIMILE AD $h_E(E_n)$

↳ **DOSIMETRO**: il conteggio INTEGRALE registrato per un'esposizione a n con energie \neq contiene già i giusti fattori di peso a tutte le energie per fornire una misura della **DOSE COMBINATA**

($\sim 3 \times 10^3$ c / m rem)

INOLTRE OTTIMA DISCRIMINAZIONE σ

$E_i^{\text{picco}} \sim 2,5 \times 10^{-4}$



IL CONTATORE LUNGO

N RIVELATORE A RISPOSTA PIATTA ($E_i \neq E_i(E_n)$)

- Va usato solo con fasci di n COLLIMATI
- RIVELATORE: BF_3
- MODERATORE FORATO (permette migliore penetrazione di n meno energetici)
- Buona discriminazione ma BASSA EFFICIENZA ($\sim 0.35\%$)
se ^3He anziché BF_3 $\epsilon_i \rightarrow 11.5\%$
discrim. & peggiore

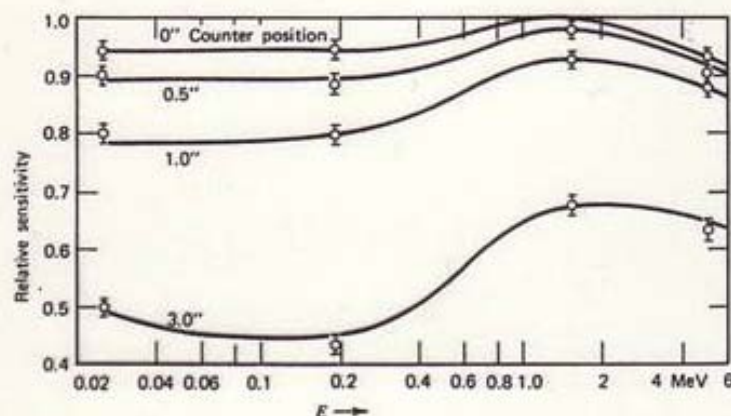
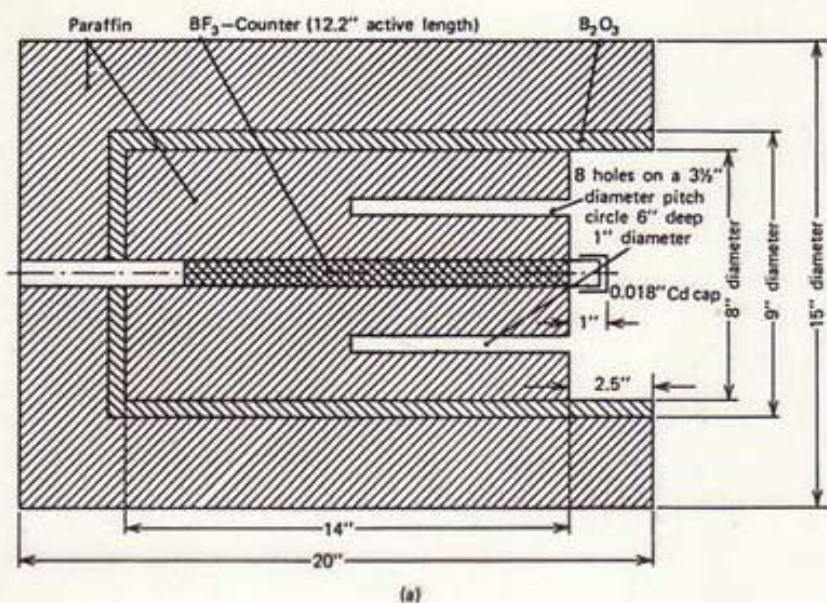
ALTRE ALTERNATIVE

Scintillatori $\left\{ \begin{array}{l} \text{NaI in moderatore sferico} \\ \text{plastico o liquido ad alto contenuto di H} \end{array} \right.$

ENTRambi \rightarrow RISPOSTA PIATTA

RIVELANDO IL γ A 2.2 MeV EMESSE DOPO LA CATTURA RAD. SU H

NESSUNO PUÒ FARE SPETTROSCOPIA



RIVELATORI BASATI SU REAZ. INDOTTE DA n VELOCI

Se $E_n \text{ non} \ll Q \rightarrow \sum_i E_f = Q + E_n$ da cui E_n

Tempi POTENZIALMENTE veloci

Sezioni d'urto MOLTO INFERIORI a quelle per n termici

→ RIVELATORI CON E_i MOLTO INFERIORI

Reazioni importanti per la spettroscopia di n veloci



(La FISSIONE è invece usata come CONTEGGIO di n veloci, con alto Q)

① • C'è una RISONANZA a $\sim 250 \text{ keV}$

• Poiché $Q = 4.78 \text{ MeV}$ $E_n^{\text{min}} \sim 100 \text{ keV}$

• Per $E_n \gtrsim 2.5 \text{ MeV}$ ${}^6\text{Li}(n, n'\alpha){}^4\text{He}$ ($Q = 1.47 \text{ MeV}$) DOLING
produce un CONTINUO (fondo INDISTINTO.)

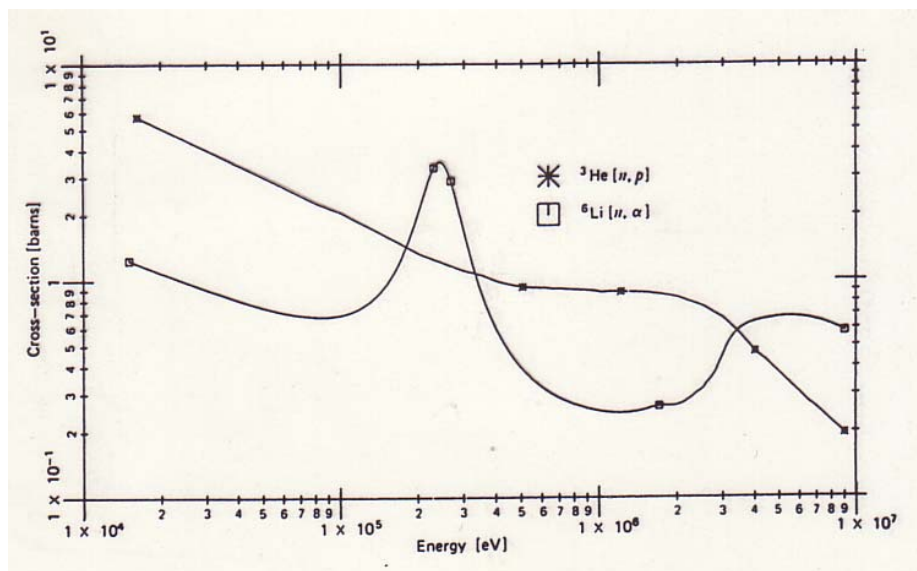
SPETTRO ASSETTATO:
PER FASCIO MONOEN.

PICCO a $E_n + Q$

+
PICCO EPITERMICO a Q

può dominare

↖ si sono sempre n LENTI!



RIVELATORI

LiI (Eu)

Non LINEARITÀ per ^3H e d a T_{amb} \rightarrow FWHM $\sim 40\%$
se raffreddato; FWHM $\sim 20\%$. ma un po' è... **NO!**

Vetri di Li

OK per T.O.F. (ris. temporale $\sim \text{ns}$)
Q.F. $\sim 0.25 \rightarrow$ DISCRIMINAZ. σ NON FACILE
sopra i 100 keV MOLTE RISONANZE

Fibre scint. di Li

$R_d \sim 7 \mu\text{m}$ $R_H \sim 40 \mu\text{m}$ $R_e \sim 1 \text{mm}$

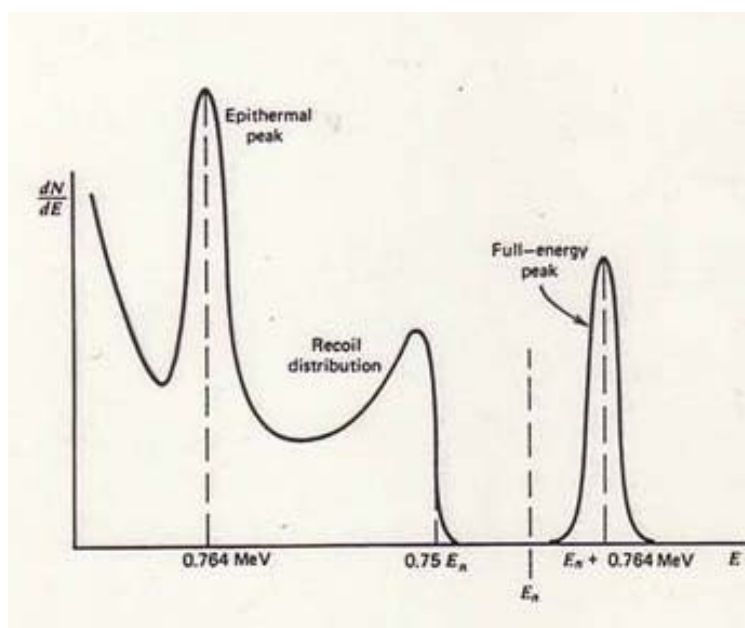
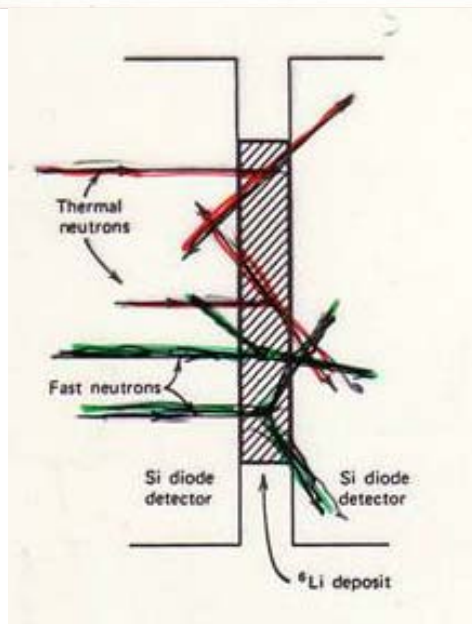
$\rightarrow \phi \sim 100 \mu\text{m}$ MASSIMIZZATA ΔH tra n e r di pari E
 \rightarrow DISCRIMINAZ. PIÙ AGEVOLE

Spettrometro a sandwich con Li

2 riv. a SEMICONDUCTORE con in mezzo Li

Uso in coine. Soliti pb dovuti a SPESORE FINITO

Non meno che E_n cresce, aumenta il # di ev. NON IN COINE
persi! \rightarrow



- ② • σ_R cele con E_n . Altre σ . σ_{el} DOMINA sopra $\sim 100 \text{ keV}$
• Fino a $\sim 10 \text{ MeV}$ IMPORTANTI SOLO σ_R e σ_{el}

CARATTERISTICHE SPETTRO PER FASCIO MONOENERGETICO

- Picco a $E = E_n + Q$ ($Q = 764 \text{ keV}$)
- Picco EPITERMICO a $E = Q$
- continuo con $E_{\text{max}} = 0.75 E_n$ \leftarrow è la E^{max} che si può rilasciare per sc. elastico al nucleo di ^3He
- continuo dovuto all'effetto parete + imp. spuri di varia origine

RIVELATORI

CNTATORE PROPORZIONALE

- Alta P per diminuire l'effetto parete + eventuale aggiunta di K_r
- PSD sul nistime: τ_R corto = ^3He diluito
 τ_R lungo = iometri da P
↳ Diff. NON NETTA ($E_p \text{ min} = 0$)
 τ_R MOLTO LUNGO \rightarrow effetto parete \rightarrow SI SCARSA
Buono anche per DISCRIMINATIONE σ

CAMERA A IONIZZAZIONE

Migliore ris. en. (20 keV @ 1 MeV). Più lento

SCINTILLATORE

Pochi % di Xe ALZANO LA RESA IN LUCE a livelli accettabili

$\tau_{\text{canal}} \approx ns \rightarrow$ MOLTO VELOCE

Ris. energetica: SCARSA

SPETTROMETRO A SANDWICH

Migliore E che \times il Li

σ + alta, senza risonanze

Milione Q \rightarrow discrimin. σ PIÙ DIFFICILE

Gas ad alte pressioni

RIVELATORI CHE USANO LA DIFFUSIONE DEI n VELOCI

- I bersagli devono essere NUCLEI LEGGERI e considerati A RIPOSO
- L'en. cinetica totale si conserva \leftarrow ionizzano \approx come $p \propto \alpha$
- Q-valore = ϕ (ovvio!)
- Usando PSD e/o RTD questi rivelatori possono funzionare per $E_n \gtrsim 1 \text{ MeV}$ discriminando abbastanza bene i γ
- I NEUTRONI TERMICI POSSONO ESSERE TRASCURATI, tranne in caso di reattore di cattura

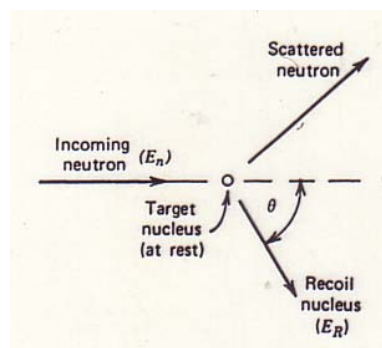
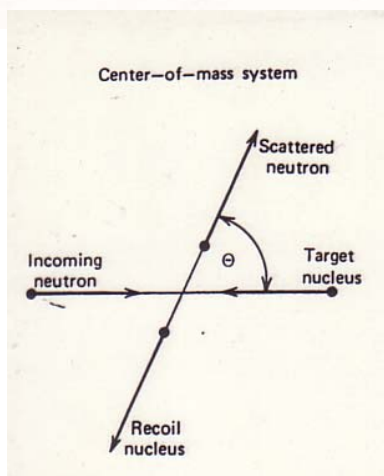
FORMULE per $E_n \ll 339 \text{ keV}$ e NON RELATIVISTICO

①

$$E_R = \frac{4A}{(1+A)^2} (\cos^2 \theta) E_n$$

$$E_R^{\min} = 0 \quad (\theta = \pi/2)$$

$$E_R^{\max} = \frac{4A}{(1+A)^2} E_n \quad (\theta = 0) \rightarrow \text{per protoni } E_R^{\max} = E_n$$



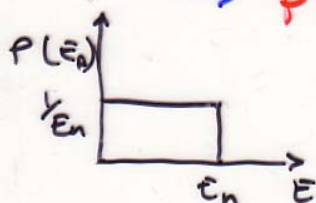
②

$$P(E_R) = \frac{(1+A)^2}{A} \frac{\sigma(\theta)}{\sigma_s} \cdot \frac{\pi}{E_n} \div \sigma(\theta)$$

Se il processo è ISOTROPICO (scattering su lt con $E_n < 10 \text{ MeV}$)

$$\rightarrow \sigma(\theta) = \frac{\sigma_s}{4\pi}$$

$$\rightarrow P(E_R) = \frac{(1+A)^2}{4A} \frac{1}{E_n} \stackrel{\text{per lt}}{=} \frac{1}{E_n}$$



$$\rightarrow \langle E_R \rangle = \frac{1}{2} E_n$$

3

1 solo tipo di nucleo \rightarrow spessore attraversato

$$E = 1 - \exp(-N \sigma_s x) = 1 - \exp(-\Sigma_s x)$$

\uparrow densità di bersagli

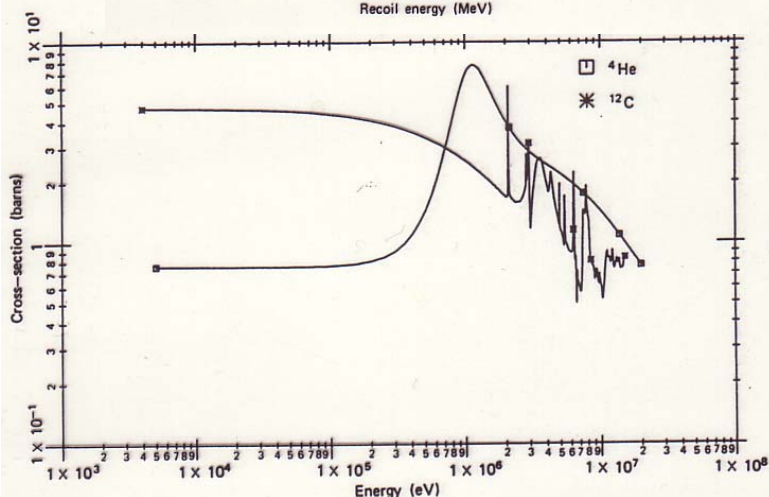
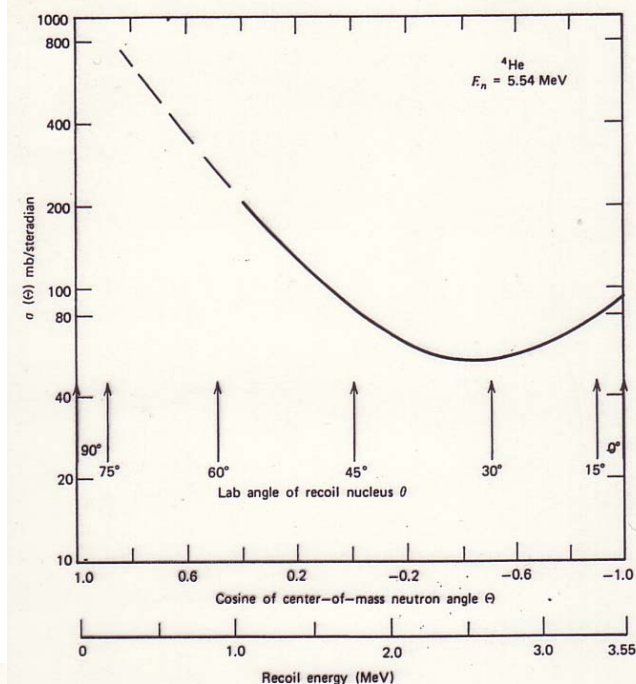
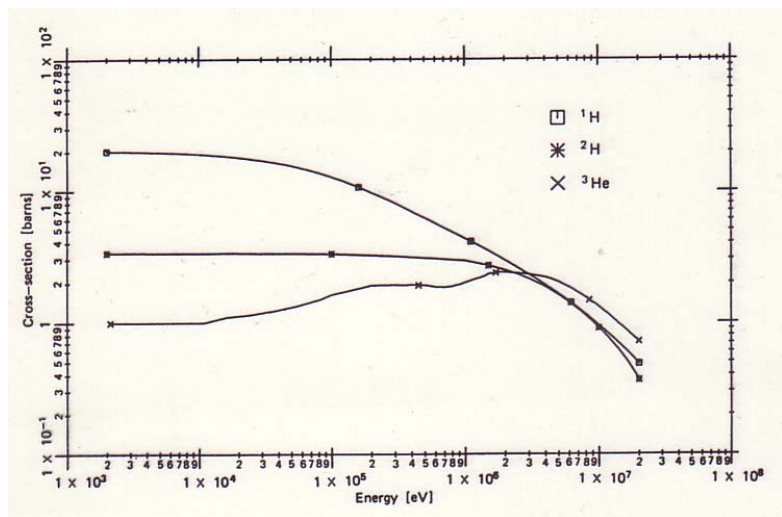
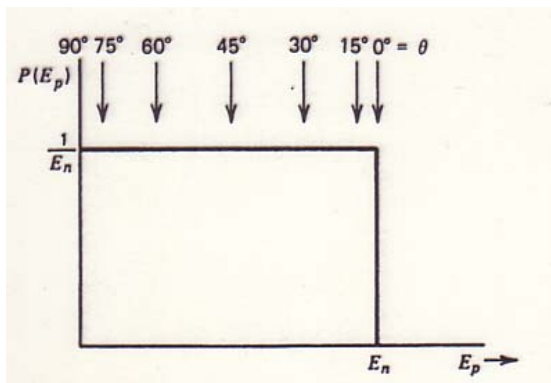
4

FIT EMPIRICO

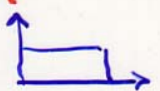
$$\sigma_s^H = \frac{4.83}{\sqrt{E_n}} - 0.578 \text{ barn per } 0.3 \leq E_n \leq 30 \text{ eV}$$

Table 15.2 Maximum Fractional Energy Transfer in Neutron Elastic Scattering

Target Nucleus	A	$\frac{E_R}{E_n} \Big _{\max} = \frac{4A}{(1+A)^2}$
^1_1H	1	1
^2_1H	2	$8/9 = 0.889$
^3_2He	3	$3/4 = 0.750$
^4_2He	4	$16/25 = 0.640$
$^{12}_6\text{C}$	12	$48/169 = 0.284$
$^{16}_8\text{O}$	16	$64/289 = 0.221$



SCINTILLATORI PER RINCUOLO DI PROTONI

- Range piccolo: completamente contenuti \rightarrow spettro: 
- Materiali: moltissimi. Cristalli organici, sc. plastici o liquidi
- Scelta delle dim. dello scintillatore

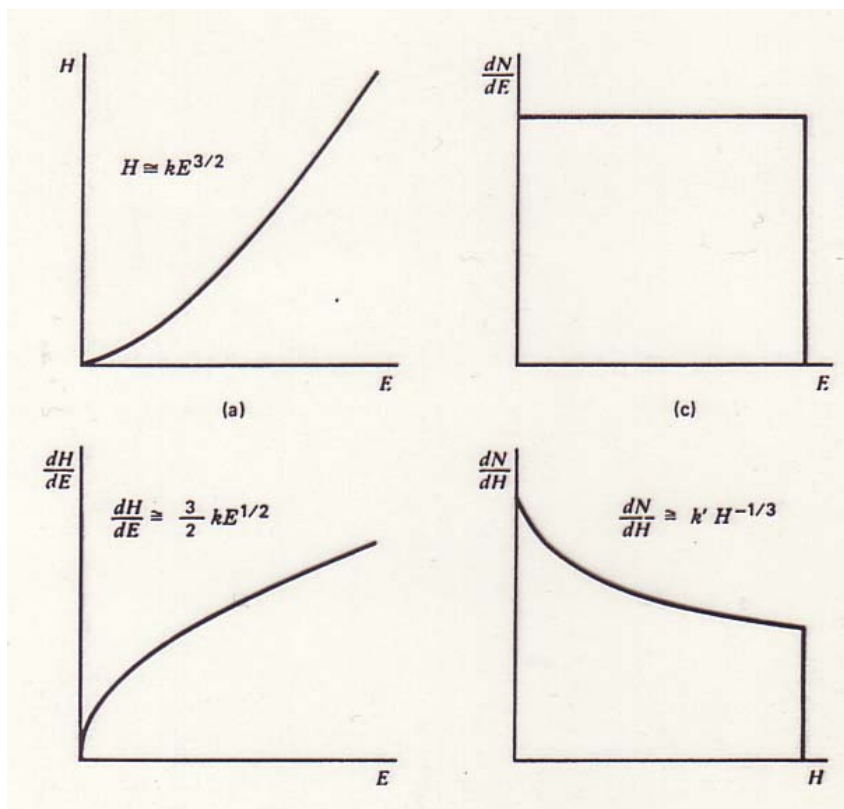
Compromesso tra E e $FWHM$

AUMENTA CON LE DIM.
DIMINUISCE CON E_n

- difficoltà di raccolta della luce uniforme su grandi volumi
- pb di fondo σ (pile-up...) se riv. troppo grande
- scattering multiplo \rightarrow risposta non più semplice

EFFETTI CHE DISTORCONO LA FUNZIONE DI RISPOSTA

- Δ Non linearità con l'energia $H \approx KE^{3/2}$ $\frac{dN}{dH} \approx K' H^{-1/3}$ E' UN' APPROSSIMAZIONE!
- Δ Effetti di barile: fuga dei p dallo scintillatore
 - \rightarrow eventi spostati a en. inferiori
 - \rightarrow pendenza di $\frac{dN}{dH}$ maggiore
- Δ Scattering multiplo: Importante solo per riv. di dim. non piccole
Le en. rilasciate si sommano (eventi in conc.)
 \rightarrow AUMENTANO gli ev. ad en. γ a scapito di quelli ad en α



Δ Scattering su C: n perde tra ϕ e il 28% della sua en.

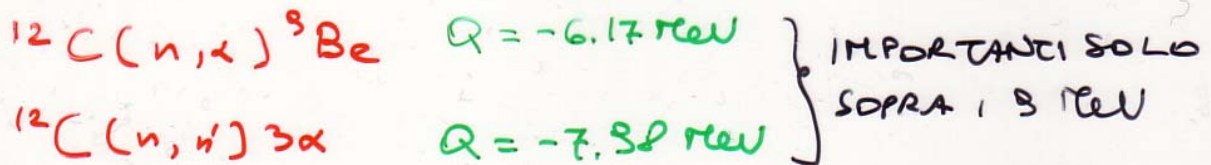
$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_C > \left(\frac{dE}{dx}\right)_p \rightarrow \text{resa in luce} < : \text{NON IMPORT.}$$

Ma con $\exists n$ con $E_n <$ che scatterano su p
 \hookrightarrow deformazione dello spettro

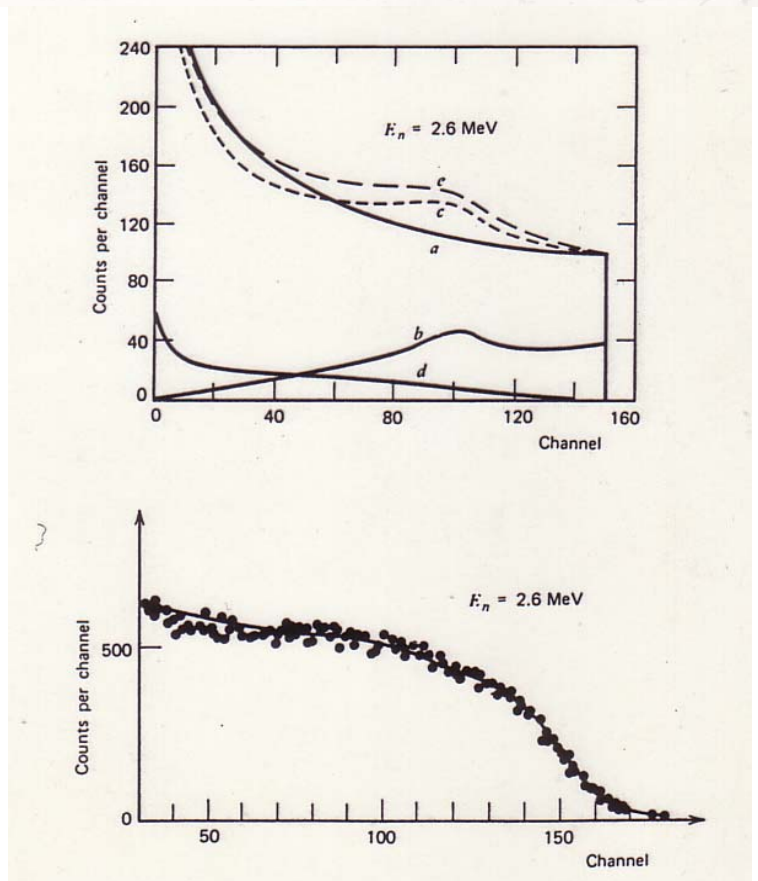
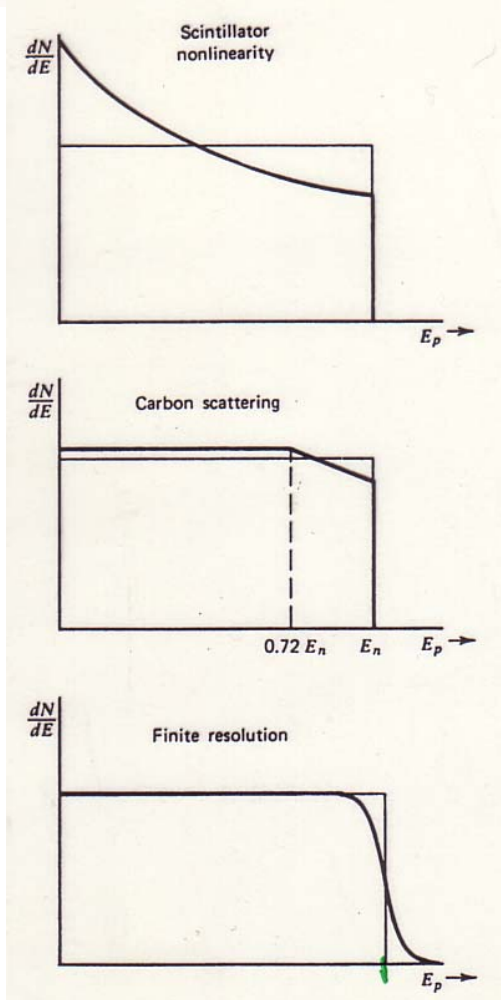
Δ Riduzione del rivelatore: NON ci può essere un CUT-OFF NETTO

Δ Reazioni in competizione ad alte en.

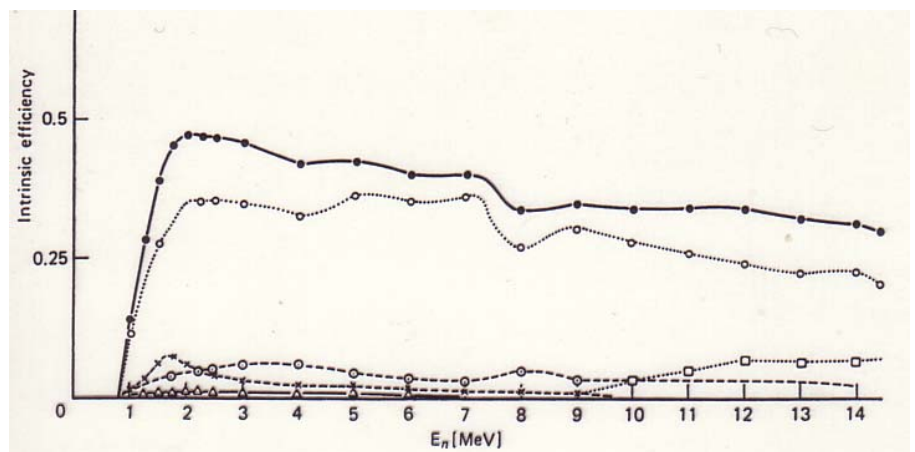
Sopra gli 8-9 MeV entrano in gioco anche le reazioni



MA RESA IN LUCE PER $\alpha <$ CHE PER p RINGULANTI



- eff. combinata di tutti i processi
- diffusione singola su H
- × diffusione doppia su H
- ⊙ diffusione doppia n-C, n-H
- △ diffusione doppia n-C, n-H, n-H
- reazioni (n, α) e $(n, n') {}^3\alpha$

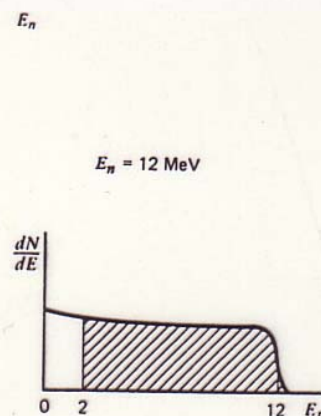
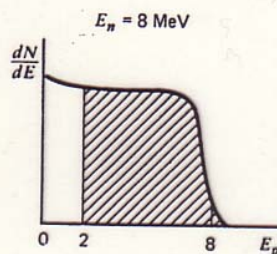
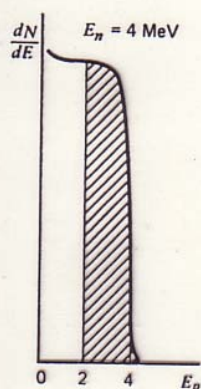
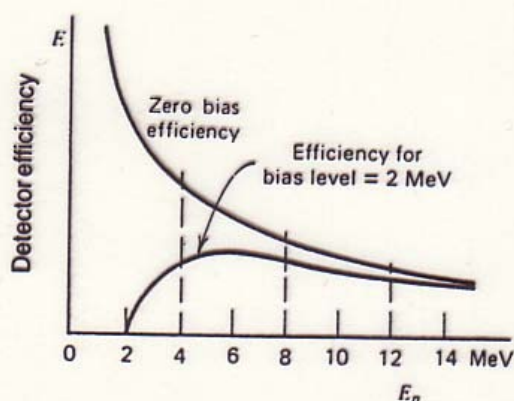


EFFICIENZA DI CONTEGGIO vs BIAS DEL DISCRIMINATORE

- Eliminazione solo del rumore \rightarrow SOGLIA ABBASTANZA BASSA
- " anche di γ ed altri ev. di fondo \rightarrow SOGLIA PIU' ALTA
- MA $E_p(p)$ ANCHE $\approx \phi \rightarrow$ SOGLIA ELIMINA ANCHE MP. BUONI

$\rightarrow E_{\text{soglia}} < E_{\phi}$ (detta "a zero bias")
 \leftarrow senza soglia

Differenza fra le 2 tanto $>$ quanto $<$ è E_n



CALIBRAZIONE IN ENERGIA CON RAGGI γ

temo La RESA IN LUCE di e^{\pm} SEMPRE $>$ che per p, α, d, t, \dots

$$H(E_n \sim 2-3 \text{ MeV}) = H(E_{\gamma} \sim 1 \text{ MeV})$$

\rightarrow se calibriamo con γ scriviamo MeVee (electron equivalent)

Siccome $\langle Z \rangle$ negli sc. organici è basso

$\rightarrow G_c \gg G_{ph} \rightarrow$ NIENTE FOTOPICCHI

CALIBRAZIONE CON SPALLA COMPTON (delicatissima!)

PSD PER RITROVERE I γ

Può essere relativamente efficiente con gli sc. organici

Può servire per discriminare i γ e farne SPETTROSCOPIA

\uparrow NON ci sono picchi!! Metodi di CONVERSIONE degli spettri spettrali

Ci può essere una leggera NON LINEARITÀ anche negli spettri

CONTATORI PROPORZIONALI

- Gas H , CH_4 , He con H : spettro a box (+ distorsioni vite)
- E inferiore che negli scintillatori ($\leq 1\%$ per $E_n \approx 1 \text{ MeV}$)
- Quasi scomparsi gli eventi di scattering multiplo
- Meno semplici da assemblare ed utilizzare
- Effetto parete molto più accentuato

SENSIBILITÀ AI RAGGI γ E PSD

Il n lascia tutta la loro E , i γ NO, siccome la risposta NON DIPENDE dalla Punticella \rightarrow DISCRIMINAZIONE γ - n RAGGIONEVOLMENTE FACILE

PB: i γ possono interagire con le pareti e dare lo stesso un segnale
 \rightarrow TASSO DI $\gamma >$ CHE IN SCINT. ma segnali più piccoli

PSD OK! Gli imp. da n hanno ridetime + corto (ionizz. molto concentrata)

SCELTA DEL GAS E DELLA GEOMETRIA DEL RIVELATORE

$H \rightarrow$ piccolo p , piccolo S_{coll}

$CH_4 \rightarrow$ pb col C ($E_{max} = 28\% E_n$): rinculo che ionizza $\approx 75\%$ di un p di pari E

$He \rightarrow$ risposta NON A BOX

Geometria tipica CILINDRO

Distorsione di E^+ nelle regioni finali del tubo COMPLICA L'ANALISI

PB dei protoni che scappano **Soluzioni:**

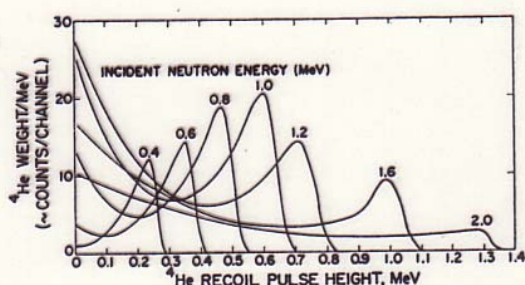
- CATODO A GRIGLIA con contatori ext.
- ANTICINC. con i "tubi di campo"

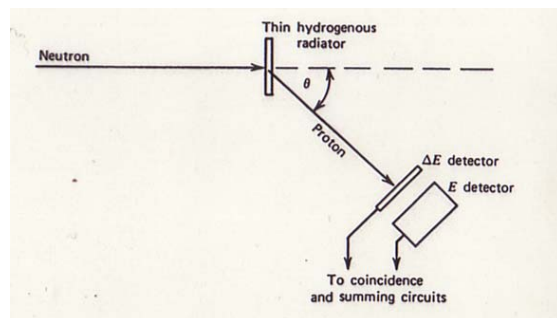
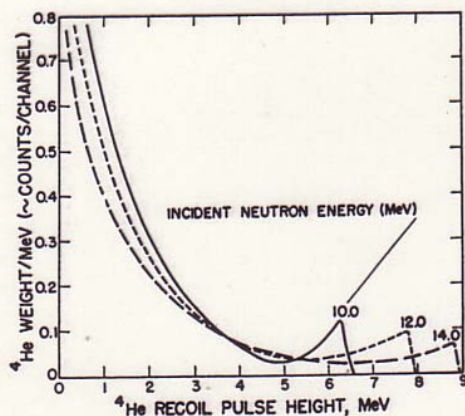
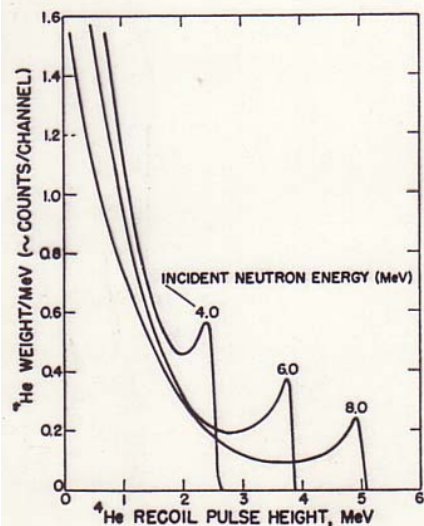
CALIBRAZIONE IN ENERGIA E LINEARITÀ

- Non si possono usare sorgenti γ (pli e^- non vengono fermati)
- Se si aggiunge un po' di 3He si possono usare i Termici (picco a $E=Q$)
MA possibili errori di cal. se risposta $p \neq$ risposta 3H
- A basse energie: ^{37}Ar (X con $E = 2,82 \text{ KeV}$)
MA: contaminante
Differenze potenzialmente importanti tra e^- e p

SOPRA 10 KeV RISPOSTA LINEARE SOTTO NO!

\rightarrow complicazione in fase di anal.





TELESCOPI PER RINCUOLO DI PROTONI

Per fare spettroscopia sarebbe meglio conoscere θ ($E_n = E_p \frac{1}{\cos^2 \theta}$)

MA

- DEVO COLLIMARE I n (per conoscerne la direzione di provenienza)
- DEVO SELEZIONARE I p SCATTERATI CON ANGOLO θ (telescopio)
- DEVO MISURARE E_p (c'è un picco se i n sono MONOENERGETICI)
- IL MEZZO RADIATORE DEVE ESSERE SOTTILE (film di polimero organico)
- I PROTONI NON DEVONO ESSERE ATTENUATI (vuoto)
- L'ANGOLO θ VIENE SCELTO PICCOLO MA NON NULLO (non fascio!)
- 2 nu. INCOINC. MEGLIO DI UNO SOLO (abbattimento del fondo)

• Formula di Bethe (p NON RELATIVISTICO)

$$\frac{dE}{dx} = C_1 \frac{m^2}{E} \ln C_2 \frac{E}{m}$$

$\hookrightarrow E \times \frac{dE}{dx} \propto m^2$ DISTINGUE p DA ALTRE PARTICELLE

$$E_p \propto H(T_1) + H(T_2)$$

• Vale anche (formula FENOMENOLOGICA)

$$(E_1 + E_2)^b - E_2^b = \frac{\Delta E}{a}$$

con ΔE = spessore nu. sottile

$b = 1.73$ per p (1.65 per C)

↑
Riconoscim. della p. $\rightarrow a \propto \frac{1}{m^2}$

- EFFICIENZA $\sim 10^{-5}$!! MA CALCOLABILE

SPETTROMETRO PER NEUTRONI CON "GATE" DA CATTURA

Scintillatori plastici con ^{10}B suff. grandi da moderare e catturare i n

- Tempi per la moderazione $\leq 50 \text{ ns}$ \rightarrow 1 solo imp. di scintill.

$\rightarrow E_{\text{TOT}} (\text{protoni}) = E_n$ (SE n NON SCAPPA)

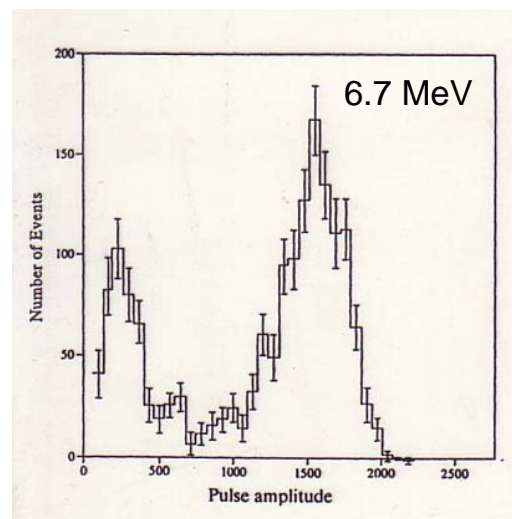
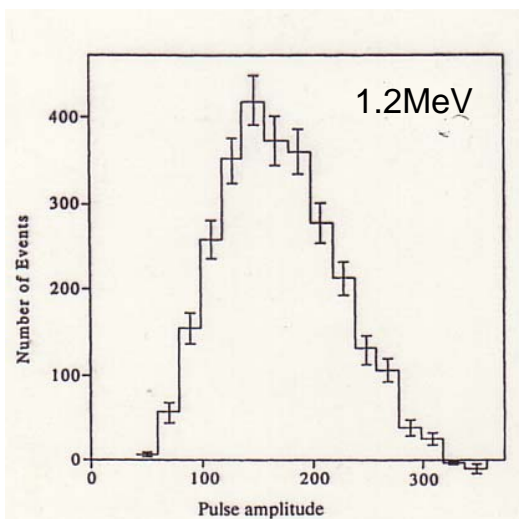
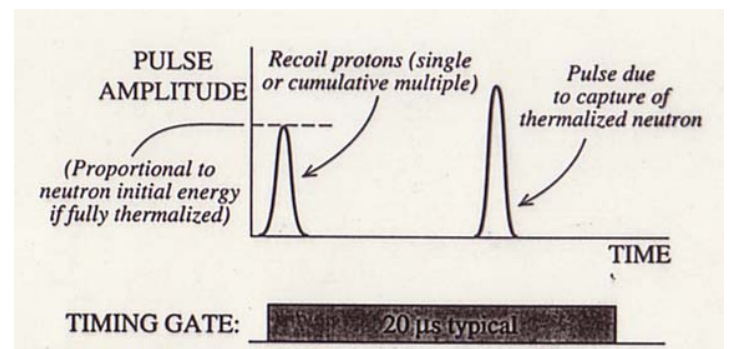
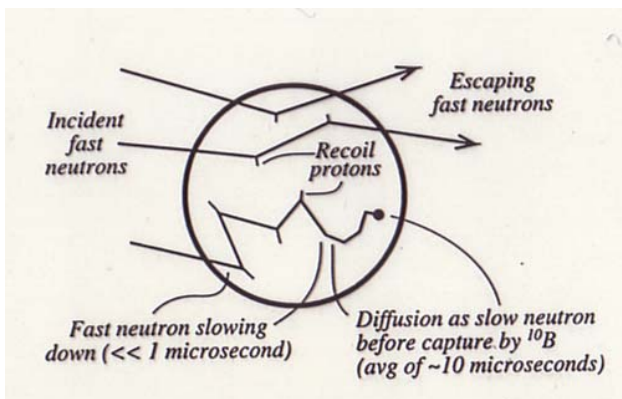
SENZA ^{10}B : $n_{\text{moderato}} + \gamma = \alpha + \gamma$ (2.2 MeV)
 \uparrow ALTA PROB. DI FUGA

CON ^{10}B : $+^{10}\text{B} = {}^7\text{Li}^* + \alpha$ (Q = 2.3 MeV)
 \rightarrow non scappano

\rightarrow 2° IMPULSO DOPO $\langle \Delta t \rangle \sim 10 \mu\text{s}$
 \uparrow da 2.3 MeV

SEGNAURA CHIARA DI n COMPLETAMENTE MODERATO
 purché flusso di n non troppo elevato

- Coincidenze casuali: VALUTABILI (come nella PET)



RIVELATORI ALTERNATIVI

▣ scintillatore LIQUIDO caricato con ^{10}B

▣ combinazione di sc., plastico e sc. al vetro con ^6Li

In questo caso i tempi di scint. \neq permettono PSD

per riconoscere l'impulso da moderazione da quello per cattura

VANTAGGIO

ϵ fino a 10% per $E_n < 1 \text{ MeV}$

1%

14 MeV

SVANTAGGIO

Risoluzione energetica SCADENTE (non linearità per p)

Scattering inelastico su C (per $E_n \gtrsim 5 \text{ MeV}$)