



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Misure di grandezze macroscopiche per la verifica di modelli codici e
dati nucleari in reattori di ricerca

Angelo Grossi

MISURE DI GRANDEZZE MACROSCOPICHE PER LA VERIFICA DI MODELLI CODICI E DATI NUCLEARI IN
REATTORI DI RICERCA

Angelo Grossi ENEA

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Governo, Gestione e Sviluppo, del Sistema Elettrico Nazionale

Progetto: Nuovo Nucleare da Fissione: Collaborazioni Internazionali e sviluppo Competenze in Materia
Nucleare

Responsabile del Progetto: Massimo Sepielli, ENEA



Titolo

Misure di grandezze macroscopiche per la verifica di modelli, codici e dati nucleari in reattori nucleari di ricerca.

Descrittori


Tipologia del documento:
Collocazione contrattuale:
Argomenti trattati: Fisica dei reattori nucleari, Reazioni nucleari

Sommario Sono descritte le modalità di misura del rateo di fluenza neutronica mediante attivazione di foglioline d'oro. Misure di temperatura neutronica .Confronto delle misure con calcoli con il codice MCNP5

Note


Copia n. In carico a:

2			Nom e			
			Firma			
1			Nom e			
			Firma			
0	EMISSIONE	18.7.12	Nom e	Angelo Grossi	Rocco Bove	Massimo Sepielli
			Firma	<i>Angelo Grossi</i>	<i>Rocco Bove</i>	<i>Massimo Sepielli</i>
REV.	Descrizione	Data		Redazione	Convalida	Approvazione

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 2 di 53
---	------------------------------	---	-----------	---------------	--------------

INDICE

1.	introduzione.....	3
2.	Misura del rateo di fluena neutronica termica equivalente a 2200 m/s	4
2.1	Coincidenze in cascata.....	5
2.2	Standard ASTM E262-08.....	6
2.3	calcolo dei parametri.....	9
3.	Caratterizzazione del rabbit.....	14
4.	Misure in colonna termica.....	24
5.	Misure con il tubo GEO.....	30
6.	Calibrazione del rivelatore di germanio.....	33
7.	Spettrometria gamma con NaI(Tl).....	38
8.	Calcolo dello spettro neutronico con MCNP5.....	42
9.	conclusioni.....	52
10.	bibliografia.....	53 c


	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 3 di 53
---	------------------------------	---	-----------	---------------	--------------

1. INTRODUZIONE

Nel presente lavoro si espone e si applica la metodologia di misura del rateo di fluenza neutronica termica equivalente a 2200 m/s secondo le norme ASTM E262-08.

Si sono sviluppati programmi MathCAD per il calcolo dei parametri (Westcott g-factors, resonance integrals) necessari per l'applicazione delle norme ASTM E262-08.

Misure del rateo di fluenza neutronica si sono effettuate per posizioni di irraggiamento del reattore TRIGA Mark II della Casaccia. Confronti misure calcoli effettuati con il codice montecarlo MCNP5 sono presentati in questo rapporto tecnico.

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 4 di 53
---	------------------------------	---	-----------	---------------	--------------

2. Misura del rateo di fluenza neutronica termica equivalente a 2200 m/s

Se un campione è sottoposto ad un rateo differenziale di fluenza neutronica $\phi(E)$ costante per un tempo t_{irr} il radionuclide si forma ad un tasso dato da:

$$R = N_t \int_0^{\infty} \phi(E) \sigma_a(E) dE$$

Dove

N_t è il numero totale di atomi precursori del radionuclide

N è il numero di atomi del radionuclide al tempo t

$\phi(E)$ rateo differenziale di fluenza neutronica

$\sigma_a(E)$ sezione d'urto di assorbimento (n, γ)

L'equazione differenziale che descrive nel tempo l'accumularsi del radionuclide nel campione è

$$\frac{dN}{dt} = R - \lambda N$$

la soluzione dell'equazione per condizioni iniziali

$$N(0) = 0$$

$$\left[\frac{dN}{dt} \right]_{t=\infty} = 0$$

per tempi $t < t_{irr}$ la soluzione è

$$N(t) = \frac{R}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

l'attività del campione è data da

$$A(t) = \lambda N(t)$$

per $t = \infty$ vale la seguente eguaglianza:

$$A_{\infty} = R$$

l'attività del campione per un tempo di irraggiamento infinito A_{∞} è uguale al tasso di reazione R

l'attività del campione per tempi successivi a t_{irr} è data dalla seguente

$$A(t) = R(1 - e^{-\lambda t_{irr}})e^{-(t-t_{irr})}$$

Per calcolare A_{∞} a partire dai conteggi cumulati N_c nel tempo di misura t_{real} si utilizza la seguente formula

$$A_{\infty} = \frac{(N_c/t_{live})}{\epsilon p_{\gamma} \cdot COI} \cdot \frac{\lambda \cdot t_{real}}{1 - e^{-\lambda t_{real}}} \cdot \frac{e^{\lambda t_a}}{1 - e^{-\lambda t_{irr}}} \cdot \frac{\mu \cdot l}{1 - e^{-\mu \cdot l}}$$

Dove

λ costante di disintegrazione del radionuclide (Au^{198})

ϵ efficienza dell'apparato di misura per l'energia 411 KeV emessa nel decadimento β dell' Au^{198}


p_{γ} efficienza di emissione della riga di 411 KeV, cioè numero di fotoni emessi per ogni disintegrazione ($p_{\gamma} = 0.9562$ per Au^{198})

t_{irr} tempo in cui il campione è sottoposto ad un rateo di flusso neutronico

t_a tempo di attesa, cioè il tempo che intercorre tra la fine dell'irraggiamento e l'inizio del conteggio nell'apparato di misura

t_{real} tempo di conteggio

t_{live} tempo di conteggio in cui è sottratto il tempo perduto per l'elaborazioni degli impulsi $t_{live} < t_{real}$

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 5 di 53
---	------------------------------	---	-----------	---------------	--------------

μ coefficiente di assorbimento massico della matrice del campione per l'energia dei gamma di 411 KeV $\left[cm^2/g\right]$

l spessore del campione o della fogliolina (oro puro o lega oro-alluminio) in $\left[g/cm^2\right]$

COI fattore di correzione per coincidenze in cascata.

$$R_s = \frac{A_\infty}{N_t}$$

Dove R_s è il tasso di reazione (n, γ) per atomo dell'isotopo di interesse (esempio Au^{197}), N_t è il numero di atomi di quell'isotopo nel campione.

2.1 Coincidenze in cascata

Se il decadimento gamma avviene almeno tramite due livelli eccitati (vedi figura 1) emittenti fotoni o elettroni di conversione a ogni passo, allora ad un singolo decadimento più di un fotone può essere emesso con differente angolo ed essi possono depositare la loro energia nel rivelatore simultaneamente. Questo effetto è conosciuto come coincidenze in cascata.

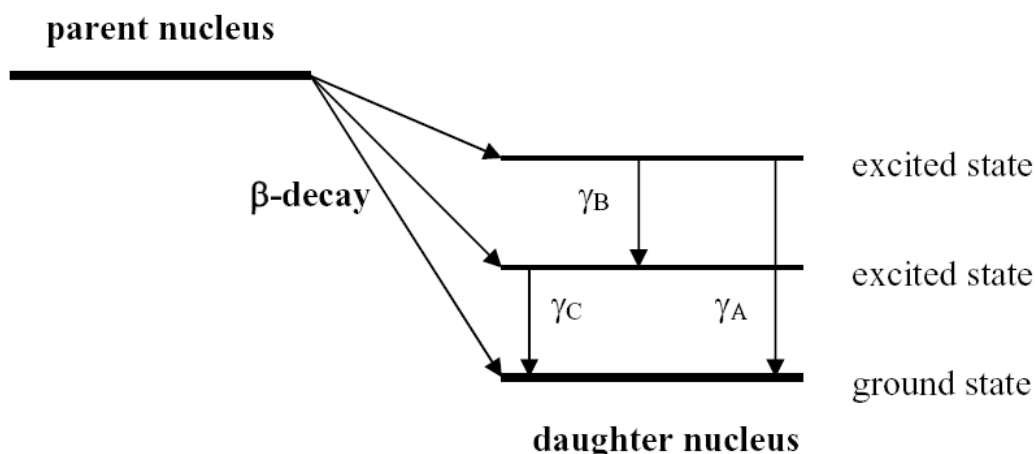



Fig. 1

Il fattore correttivo COI tiene conto di questo effetto. La correzione risulta trascurabile aumentando la distanza rivelatore-campione (per distanze $\geq 10\text{ cm}$, $COI \cong 1$). Se si vogliono utilizzare distanze inferiori inclusa quella a contatto con il rivelatore si deve usare un campione con quel radionuclide di cui si vuol conoscere l'efficienza per l'energia di fotopicco E_γ ; si deve determinare l'attività di quel radionuclide per una distanza rivelatore-radionuclide in cui le coincidenze in cascata sono trascurabili per poi porre lo stesso radionuclide nella posizione a contatto e determinare quella efficienza che ci dà quella attività precedentemente determinata, questa efficienza è valida per quel radionuclide, per quella posizione e per quelle dimensioni del campione se queste non sono puntiformi. Con questa tecnica si sono ricavate le efficienze delle foglioline di Au-Al al 0.019% del diametro di 10 mm poste a contatto del rivelatore NaI, per $E_\gamma = 411.80205\text{ KeV}$, $\varepsilon \cdot COI = 0.15$.

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 6 di 53
---	---------------------------	---	-----------	---------------	--------------

2.2 Standard ASTM E262-08

Nello standard ASTM E262-08 il rateo di fluena neutronica termica equivalente a 2200 m/s è dato dalla seguente formula:

$$\phi_0 = \frac{1}{g(T) \cdot \sigma_0 \cdot G_{th}} \cdot \left[R_s - R_{s,cd} \cdot \left(1 + \frac{g(T) \cdot \sigma_0}{G_{res}} \cdot f_1 + \frac{\sigma_0 \cdot w'}{G_{res} \cdot I_0} \right) \right]$$

Dove

- R_s tasso di reazione per atomo di una fogliolina d'oro sottoposta ad un rateo di fluena neutronica misto termico ed epitermico costante di cui si vuol misurare il valore.
- $R_{s,cd}$ tasso di reazione per atomo di una fogliolina d'oro in uno scatolino di cadmio posto in una posizione avente lo stesso rateo di fluena neutronica della precedente fogliolina.
- σ_0 sezione d'urto dell'oro a 2200 m/s (per l'oro è 98.70 barn)
- $g(T)$ fattore di Westcott ,dipende dalla temperatura neutronica T ;in genere maggiore della temperatura del mezzo in cui diffondono i neutroni.
- G_{th} fattore di autoschermo per i neutroni di energie termiche
- G_{res} fattore di autoschermo per i neutroni di energie epitermiche
- f_1 è una funzione che descrive l'attivazione di un rivelatore $\frac{1}{v}$ nell'intervallo di energie tra $5kT$ e E_{Cd} (energia di taglio del cadmio pari a 0.55 eV)
- w' è una funzione che tiene conto dello scostamento della sezione d'urto dalla legge $\frac{1}{v}$ per energie dei neutroni tra $5kT$ e E_{Cd} .
- T temperatura neutronica
- k costante di Boltzmann
- T_0 temperatura di riferimento pari a 293.4 °K corrispondente a $kT_0=0.0253$ eV ed ad una velocità del neutrone di 2200 m/s.

Passiamo ora alle espressione e calcolo dei parametri, a questo scopo abbiamo bisogno della descrizione matematica della sezione d'urto dell'oro in funzione della energia cinetica del neutrone. La sezione d'urto dell'oro presenta una regione di risonanze i cui parametri si reperiscono tramite il Software JANIS 3.3 della NEA (vedi fig. 2)

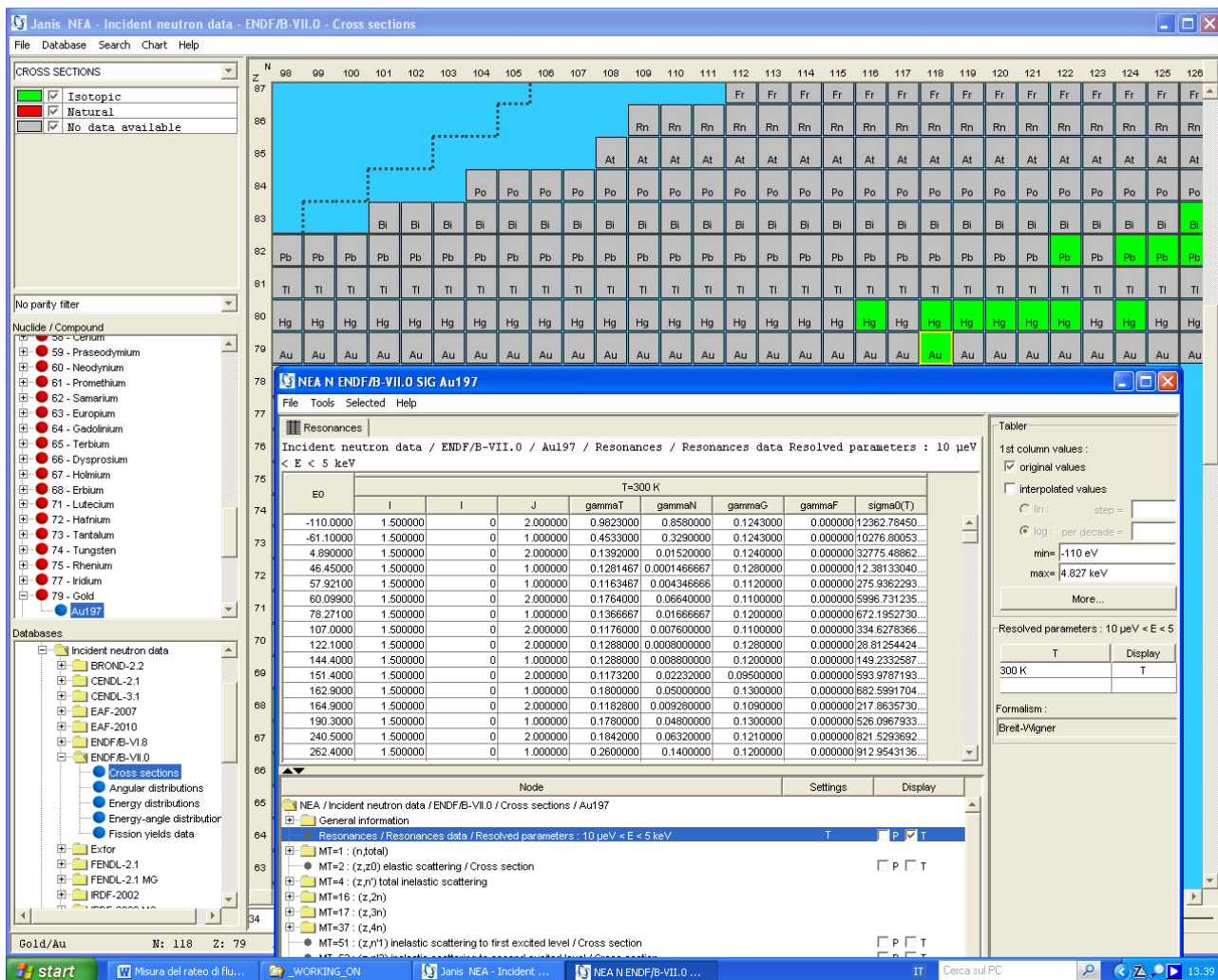


Fig. 2

Le colonne di nostro interesse sono la 1 ,2,4,6 e 7.

L'espressione della sezione d'urto dell'oro in funzione dell'energia è

$$\sigma_a(E) = \left(\frac{A+1}{A}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{E}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{2.608 \cdot 10^6 \cdot \frac{g_i \cdot \Gamma_{\gamma_i} \cdot \Gamma_{n_i}}{4 \cdot \sqrt{|E_i|}}}{\left(\frac{\Gamma_i}{2}\right)^2 + (E - E_i)^2}$$

Dove

$\sigma_a(E)$ sezione d'urto di assorbimento in *barn* in funzione dell'energia del neutrone

E Energia cinetica del neutrone


A numero atomico del nucleo bersaglio

E_i energia della i -esima risonanza in *eV*

g_i termine in relazione con lo spin del nucleo I e lo spin della risonanza J

$$g_i = \frac{2J+1}{2(2I+1)}$$

Γ_{γ_i} larghezza di cattura radiativa della i -esima risonanza in *eV*

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 8 di 53
---	---------------------------	---	-----------	---------------	--------------

Γ_{n_i} larghezza di cattura neutronica della i -esima risonanza in eV

Γ_i larghezza di cattura totale $\Gamma_i = \Gamma_{\gamma_i} + \Gamma_{n_i}$ in eV

$2.608 \cdot 10^6$ costante [$barn \cdot eV$]

Calcolo della correzione $g(T)$

$$g(T) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}} \cdot \frac{1}{\sigma_0} \cdot \int_0^{\infty} \sigma_a(E) \cdot \left(\frac{E}{kT}\right) \cdot e^{-\frac{E}{kT}} \cdot \frac{dE}{kT}$$

Calcolo di I_0

$$I_0 = \int_{E_{Cd}}^{\infty} \sigma_a(E) \cdot \frac{dE}{E} \quad E_{Cd} = 0.55 \text{ eV}$$


Calcolo di f_1

$$f_1 = \int_{5kT}^{E_{Cd}} \sqrt{\left(\frac{kT_0}{E}\right)} \cdot \frac{dE}{E}$$

Calcolo di w'

$$w' = \frac{1}{\sigma_0} \cdot \int_{5kT}^{E_{Cd}} \left[\sigma_a(E) - g(T) \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\frac{kT_0}{E}} \right] \cdot \frac{dE}{E}$$

I fattori di autoschermo G_{th} e G_{res} si calcolano con il programma MATSSF reperibile dal sito della IAEA “www-nds.iaea.org/naa/matssf/”.

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 9 di 53
---	------------------------------	---	-----------	---------------	--------------

2.3 Calcolo dei parametri

Il calcolo dei parametri è eseguito con un programma MathCAD riportato di seguito nel caso dell'oro. Lo stesso programma calcola i parametri per temperature neutroniche diverse da 20 °C. Il programma legge due file ricavati con il software Janis dal data-bank della NEA.

Nel file Exel "Au-197.xls" si legge la sezione d'urto $\sigma_a(E)$, nel file ASCII "risonanze.txt" si leggono i parametri delle risonanze che servono per la rappresentazione analitica della sezione d'urto.


All'energia $X_{nt} = 4.9824 \cdot 10^3$ eV abbiamo la transizione tra le risonanze risolte e quelle non risolte, per i nostri calcoli è sufficiente prendere questo valore come limite superiore dell'energia.

Nel primo grafico è rappresentata la sezione d'urto calcolata analiticamente (in rosso). Nel secondo sono confrontate le sezioni d'urto calcolate analiticamente con quelle interpretate partendo da misure sperimentali (in blu).

Temperatura in °C	g_1	g_2	f_1	w'
20	1.007	1.007	0.4656	0.0442
70	1.0096	1.0096	0.3979	0.0406
100	1.0112	1.0111	0.364	0.0385

Risonanze per la reazione (n,γ) dell'oro-197 a t=20 °C

```

data :=  C:\..\Au-197.xls
X := data<0>
Y := data<1>

```

```
n := rows(data)    n = 4.3184 × 104
```

```
q := n - 1    Xq = 3 × 107    Yq = 9.2001 × 10-6
```

Resonance parameters from Interpreted ENDF/B-VII.0 file

```

data2 :=  C:\..\risonanze.txt
m := rows(data2)    m = 265

```

```

E := data2<0>    J := data2<3>    Γn := data2<5>    Γγ := data2<6>

```

```

Γ := Γγ + Γn    I := 3/2    g := (2·J + 1) / (2·(2·I + 1))    nt := 42829

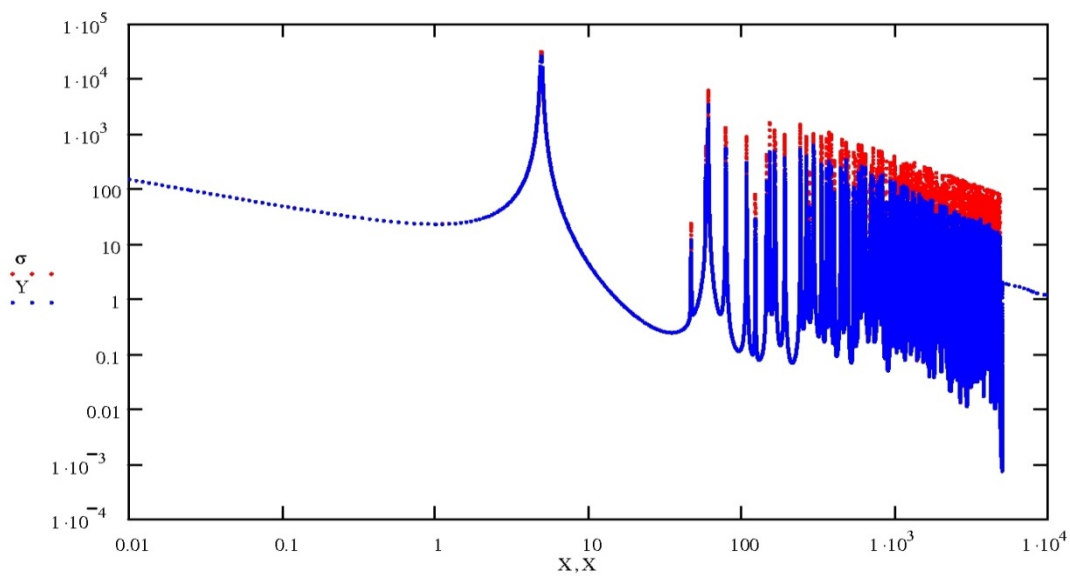
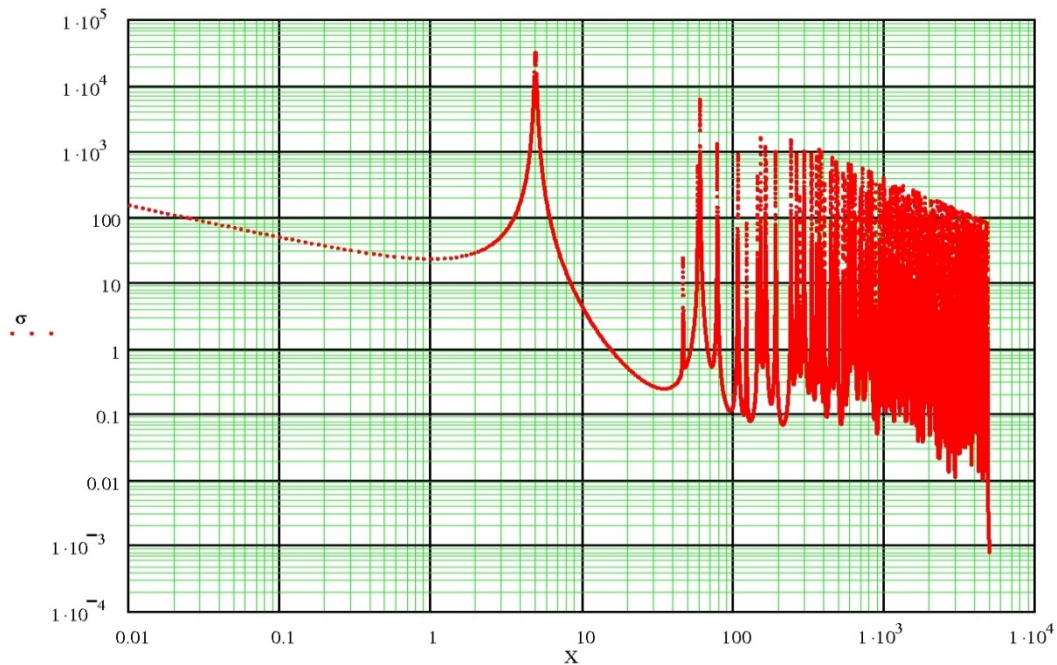
```

```
i := 0..nt    Xnt = 4.9824 × 103
```

```
AP := 1    A := 197
```

$$\sigma_i = \frac{AP}{\sqrt{X_i}} \left(\frac{A+1}{A} \right)^{2m-1} \sum_{j=0}^{m-1} \frac{2.608 \cdot 10^6 \cdot \frac{g_j \cdot \Gamma \gamma_j \cdot \Gamma_{nj}}{4 \cdot \sqrt{|E_j|}}}{\left(\frac{\Gamma_j}{2} \right)^2 + (X_i - E_j)^2}$$

```
xmin := 0.01    xmax := 10000    ymin := .0001    ymax := 100000
```



$$x0 := 0.0253 \quad \sigma1 := \frac{AP}{\sqrt{x0}} \left(\frac{A+1}{A} \right)^{2m-1} \sum_{j=0}^{m-1} \frac{2.608 \cdot 10^6 \cdot \frac{g_j \cdot \Gamma_j \cdot \Gamma_{nj}}{4 \cdot \sqrt{|E_j|}}}{\left(\frac{\Gamma_j}{2} \right)^2 + (x0 - E_j)^2} \quad \sigma1 = 98.8042$$

$$k := 8.6173468 \cdot 10^{-5} \quad T0 := 293.4 \quad \sigma0 := 98.7008 \quad T := 293.4 \quad kT := kT \quad kT = 0.0253$$

$$E2 := 4.982 \cdot 10^3 \quad kT0 := kT0$$

$$g1 := \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{T}{T0}} \cdot \frac{1}{\sigma0} \left[\sum_{k=1}^{nt} \left[\frac{X_k}{kT} \cdot Y_k \cdot e^{-\frac{X_k}{kT}} \cdot \frac{(X_{k+1} - X_{k-1})}{2 \cdot kT} \right] \right] \quad g1 = 1.007$$

$$g2 := \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{T}{T0}} \cdot \frac{1}{\sigma1} \sum_{k=1}^{nt} \left[\frac{X_k}{kT} \cdot \sigma_k \cdot e^{-\frac{X_k}{kT}} \cdot \frac{(X_{k+1} - X_{k-1})}{2 \cdot kT} \right] \quad g2 = 1.007$$

$$Ecd := 0.55$$

$$f1 := \int_{-5 \cdot kT}^{Ecd} \sqrt{\frac{kT0}{x}} \cdot \frac{1}{x} dx \quad f1 = 0.4656$$

$$w := \frac{1}{\sigma1} \left[\int_{-5 \cdot kT}^{Ecd} \left[\frac{AP}{\sqrt{x}} \left(\frac{A+1}{A} \right)^{2m-1} \sum_{j=0}^{m-1} \frac{2.608 \cdot 10^6 \cdot \frac{g_j \cdot \Gamma_j \cdot \Gamma_{nj}}{4 \cdot \sqrt{|E_j|}}}{\left(\frac{\Gamma_j}{2} \right)^2 + (x - E_j)^2} - g2 \cdot \sigma1 \cdot \sqrt{\frac{kT0}{x}} \right] \cdot \frac{1}{x} dx \right] \quad w = 0.0442$$

$$I0 := \int_{Ecd}^{E2} \frac{AP}{\sqrt{x}} \left(\frac{A+1}{A} \right)^{2m-1} \sum_{j=0}^{m-1} \frac{2.608 \cdot 10^6 \cdot \frac{g_j \cdot \Gamma_j \cdot \Gamma_{nj}}{4 \cdot \sqrt{|E_j|}}}{\left(\frac{\Gamma_j}{2} \right)^2 + (x - E_j)^2} \cdot \frac{1}{x} dx \quad I0 = 1.5655 \times 10^3$$

$$X_{112} = 0.5108$$

$$I1 := \sum_{k=112}^{nt} \frac{\sigma_k}{X_k} \cdot 1 \cdot \frac{(X_{k+1} - X_{k-1})}{2}$$

$$I1 = 1.5716 \times 10^3$$

$$I2 := \sum_{k=112}^{nt} \frac{Y_k}{X_k} \cdot 1 \cdot \frac{(X_{k+1} - X_{k-1})}{2}$$

$$I2 = 1.5684 \times 10^3$$

$$h := \frac{I0}{g2 \cdot \sigma1}$$

$$h = 15.7347$$

3. Caratterizzazione del rabbit

La postazione d'irraggiamento denominata "rabbit" nel nocciolo del reattore TRIGA Mark II RC1 è illustrata nella schematizzazione fatta per MCNP nelle fig.3 e 4.

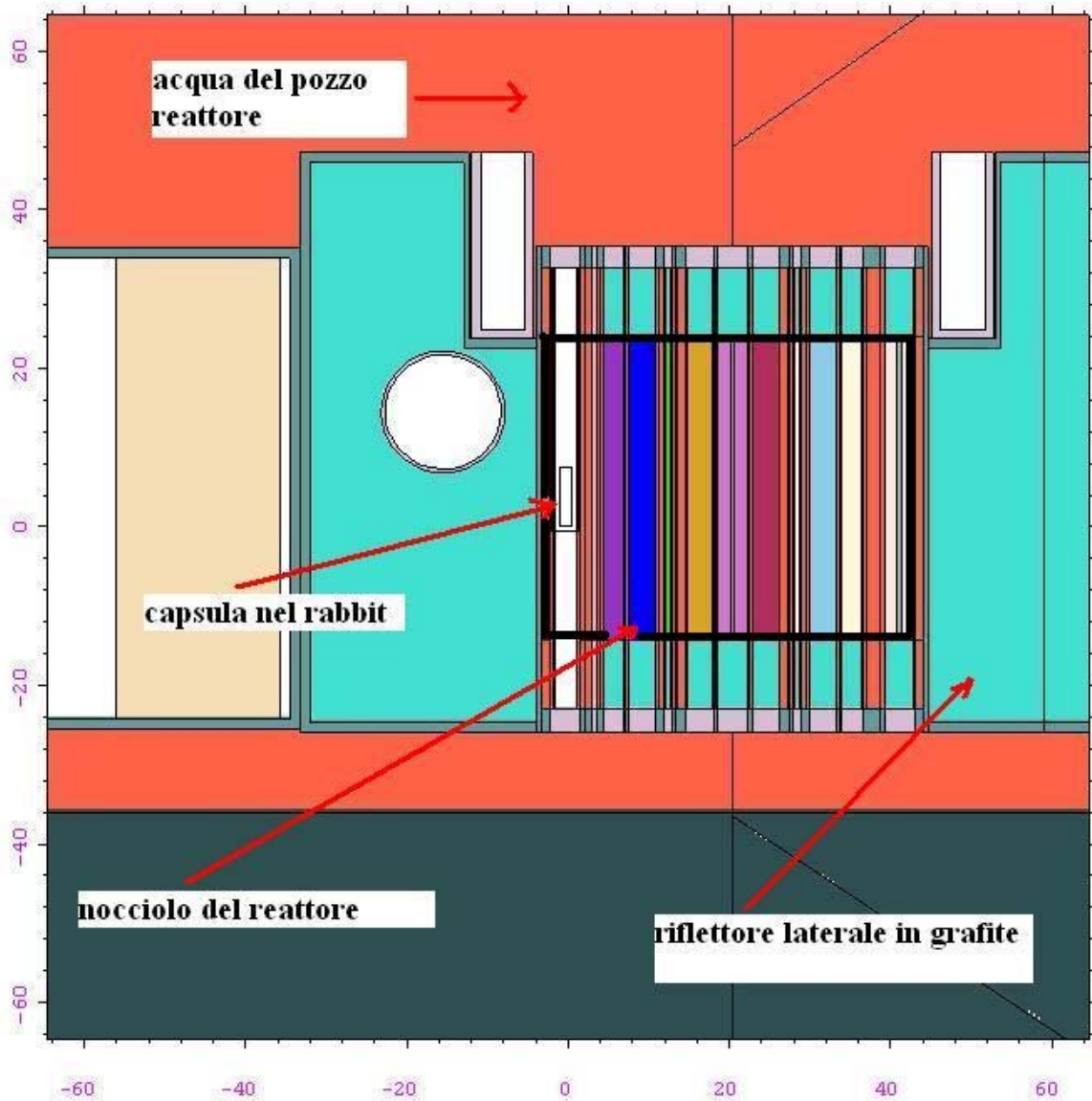


Fig. 3

Le dimensioni riportate nelle figure 1 e 2 sono in centimetri.

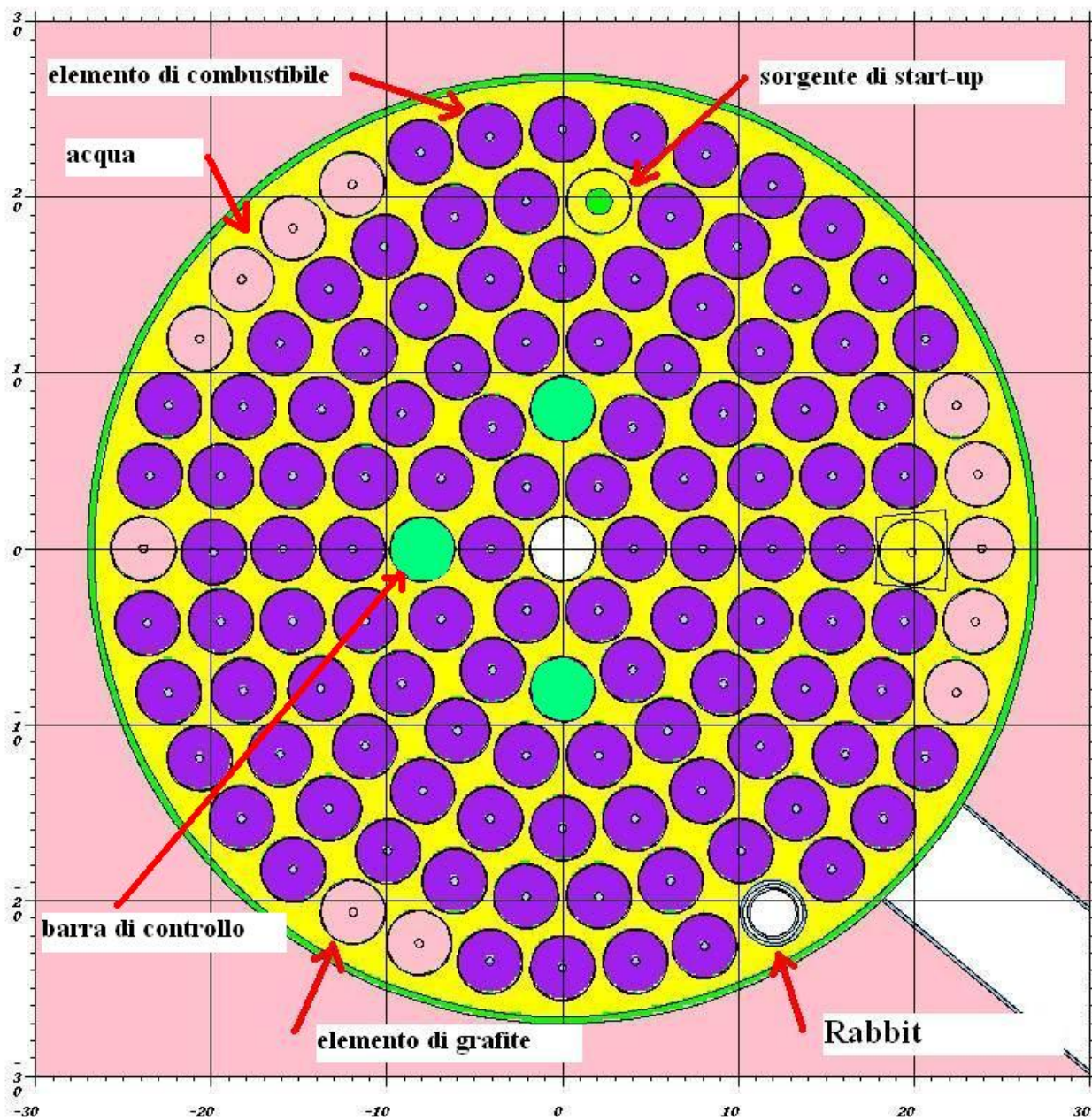



Fig. 4

Sezione orizzontale del nocciolo del reattore, notare la posizione periferica del rabbit, in questa configurazione è circondato da elementi di combustibile, in altre è possibile sostituire l'elemento di combustibile con elementi in cui al posto dell'uranio vi è la grafite.

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 16 di 53
---	------------------------------	---	-----------	---------------	---------------

Capsula usata per il rabbit (Fig. 5) ha un diametro interno 1.7 cm. ed altezza interna 8.8 cm.



Fig. 5

Nella capsula durante gli irraggiamenti a 1 MW esiste un gradiente nel rateo di fluenza neutronica termica equivalente a 2200 m/s dato dal seguente grafico di fig. 6

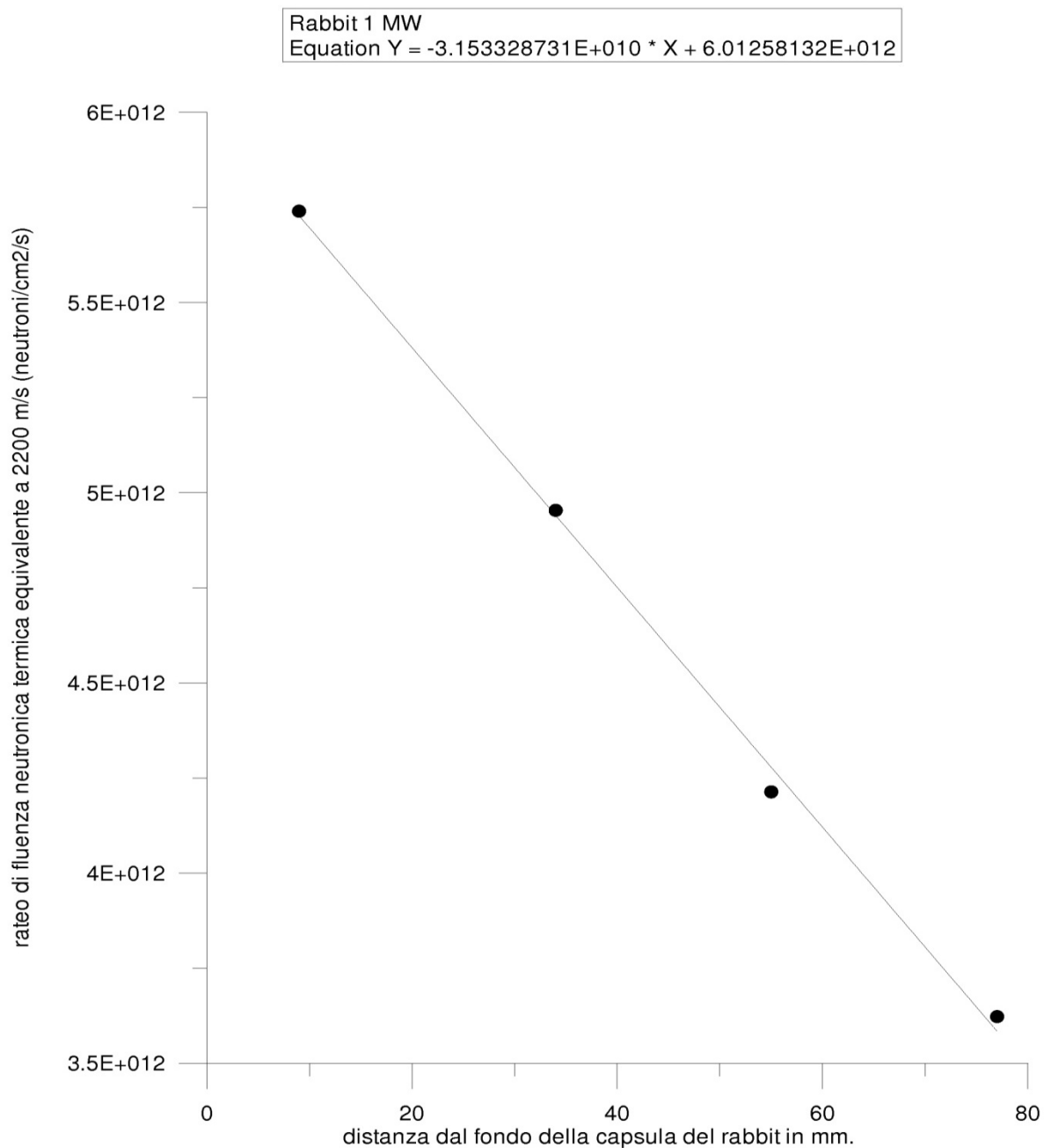


Fig. 6

Dalle misure con foglioline d'oro (lega oro-alluminio al 0.019%) nude e sotto cadmio si è determinato insieme ad una misura di temperatura neutronica con una fogliolina di Lutezio-Alluminio al 4.4 % lo

spettro del rateo di fluenza neutronica così rappresentato.

$$\Phi(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \Phi_0 \cdot \sqrt{\frac{T_n}{T_0}} \cdot \frac{E}{(kT_n)^2} e^{-\frac{E}{kT_n}} + \Phi_e \cdot \frac{\Delta(E)}{E} \quad (1.0)$$

Dove

$$\Delta = 1 \text{ per } E \geq 5kT \text{ e } \Delta = 0 \text{ per } E < 5kT$$

Dalle misure con foglioline di Lutezio, T_n temperatura neutronica, è risultata essere di $125 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$

Da misure di foglioline d'oro nude e sotto cadmio si sono determinati i valori di Φ_0 e Φ_e che sono risultate essere per potenze del reattore di 1 MW e posizione di fondo nella capsula i seguenti valori:

$$\Phi_0 = 6.0 \cdot 10^{12} \left[\frac{n}{\text{cm}^2\text{s}} \right] \text{ (errore } \pm 10\%)$$

$$\Phi_e = 3.7 \cdot 10^{11} \left[\frac{n}{\text{cm}^2\text{s}} \right] \text{ (errore } \pm 15\%)$$

Nella figura 7 è graficato lo spettro dei neutroni in funzione dell'energia del neutrone

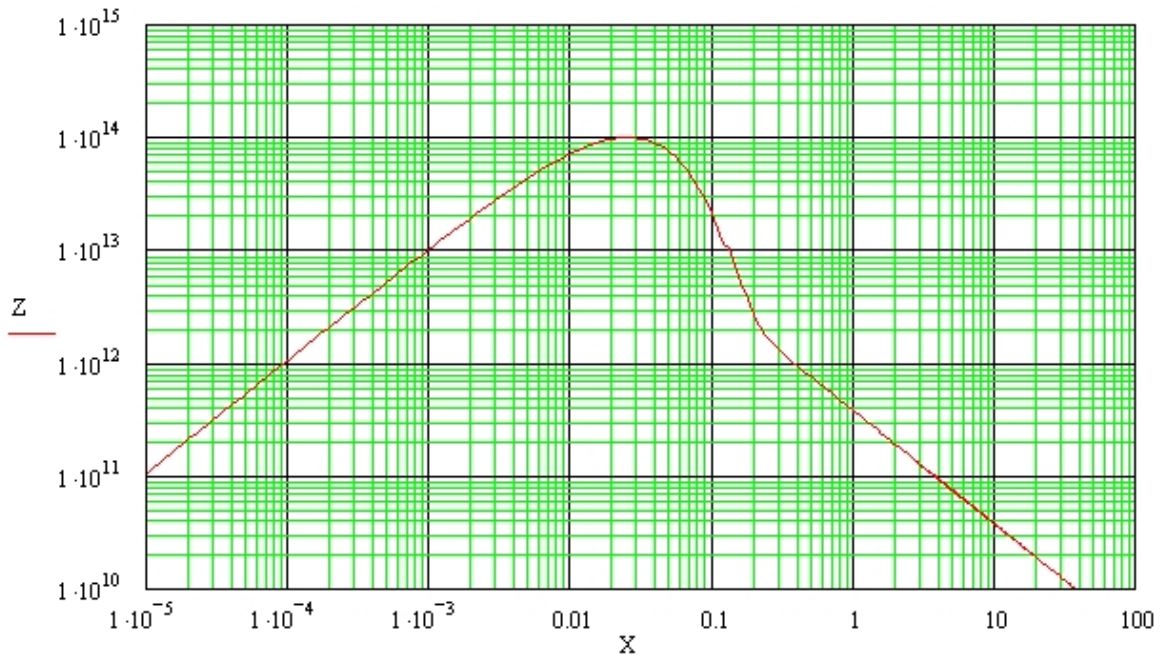



Fig. 7

Dall'equazione (1) si può calcolare il tasso di reazione di un qualsiasi isotopo la cui sezione d'urto in funzione dell'energia del neutrone sia disponibile (nel nostro caso ottenuta usando JANIS 3.3 della NEA, software di acquisizione dei dati nucleari per la librerie di sezioni d'urto ENDF/B-VII)

$$R_s = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \Phi_0 \cdot G_{th} \cdot \sqrt{\frac{T_n}{T_0}} \cdot \int_0^\infty \sigma(E) \cdot \frac{E}{(kT_n)^2} e^{-\frac{E}{kT_n}} \cdot dE + \Phi_e \cdot G_{res} \cdot \int_{5 \cdot kT_n}^\infty \sigma(E) \cdot \frac{dE}{E} \quad (1)$$

Dove G_{th} è il fattore di autoschermo per i neutroni termici e G_{res} è il fattore di autoschermo per la regione delle risonanze (si calcolano con il programma MATSSF della IAEA).

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 19 di 53
---	---------------------------	---	-----------	---------------	---------------

L'equazione (2) segue le norme ASTM E262-08 ed è equivalente alla equazione (1)

$$R_s = G_{th} \cdot \phi_0 \cdot g(T_n) \cdot \sigma_0 + \phi_e \cdot (f_1 \cdot g(T_n) \cdot \sigma_0 + w' \cdot \sigma_0 + G_{res} \cdot I_0) \quad (2)$$

isotopo	A_s attività asintotica per atomo Bq/atomo	R_s reaction rate per atom (1.2)	R_s reaction rate per atom (1.1)	Percentuale di attivazione da neutroni epicaldmi $E_n \geq 0.55 eV$
Zr-94	$4.6 \cdot 10^{-13}$	$4.2 \cdot 10^{-13}$	$4.2 \cdot 10^{-13}$	30 %
Zr-96	$2.1 \cdot 10^{-12}$	$2.0 \cdot 10^{-12}$	$2.0 \cdot 10^{-12}$	93
Co-59	$2.34 \cdot 10^{-10}$	$2.37 \cdot 10^{-10}$	$2.35 \cdot 10^{-12}$	10
Lu-175 (1)	$2.27 \cdot 10^{-10}$	$3.48 \cdot 10^{-10}$	$3.47 \cdot 10^{-10}$	62
Lu-176	$2.92 \cdot 10^{-8}$	$2.92 \cdot 10^{-8}$	$2.92 \cdot 10^{-8}$	2.4

(1) L'efficienza di fotopicco per $E_\gamma = 88 KeV$ dell'isotopo Lu-176m è stata stimata per interpolazione con un'incertezza elevata.

Simulazioni con il codice montecarlo MCNP5 del TRIGA per la posizione rabbit sono state elaborate con il seguente programma MathCAD.

**Calcolo dello spettro neutronico
nel rabbit dati MCNP5
flusso nella cella 60002 tally F34**

data :=

C:\..\rabbit.xls

X := data<0>

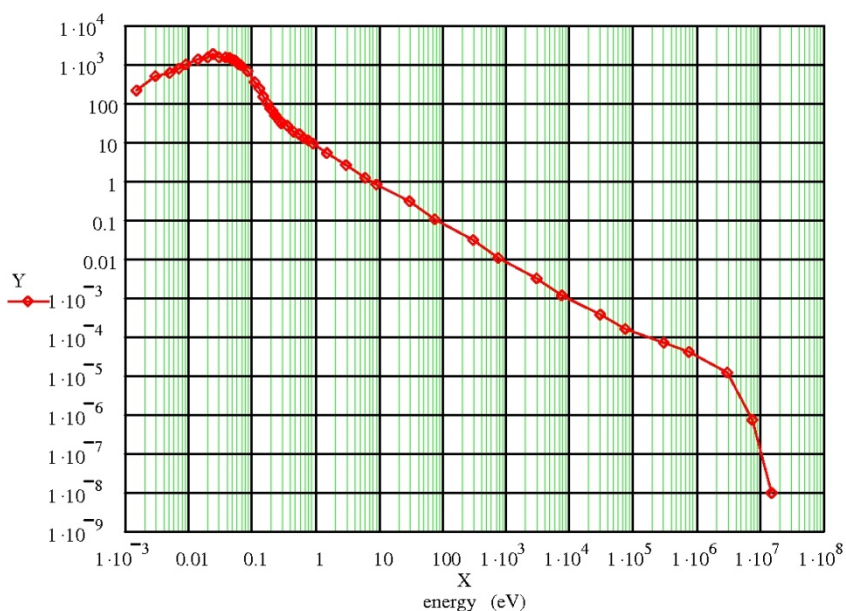
Y := data<1>

n := rows(data)

n = 50

$X_0 = 1.5 \times 10^{-3}$

$X_{49} = 1.5 \times 10^7$



m := 100000

k := $8.617347 \cdot 10^{-5}$ **costante di Boltzmann**

i := 0..m

$x_i := 0.0001 \cdot i^2 + 0.0001$

$x_m = 1 \times 10^6$

T := 324

a := $1.60 \cdot 10^5$

kT := k · T

b := $8.4 \cdot 10^0$

kT = 0.028

$$y_i := \left[a \cdot e^{\frac{-x_i}{kT}} \cdot x_i + \left(\Phi(x_i - 5 \cdot kT) \cdot \frac{b}{x_i} \right) \right]$$

$t := T - 273.15$

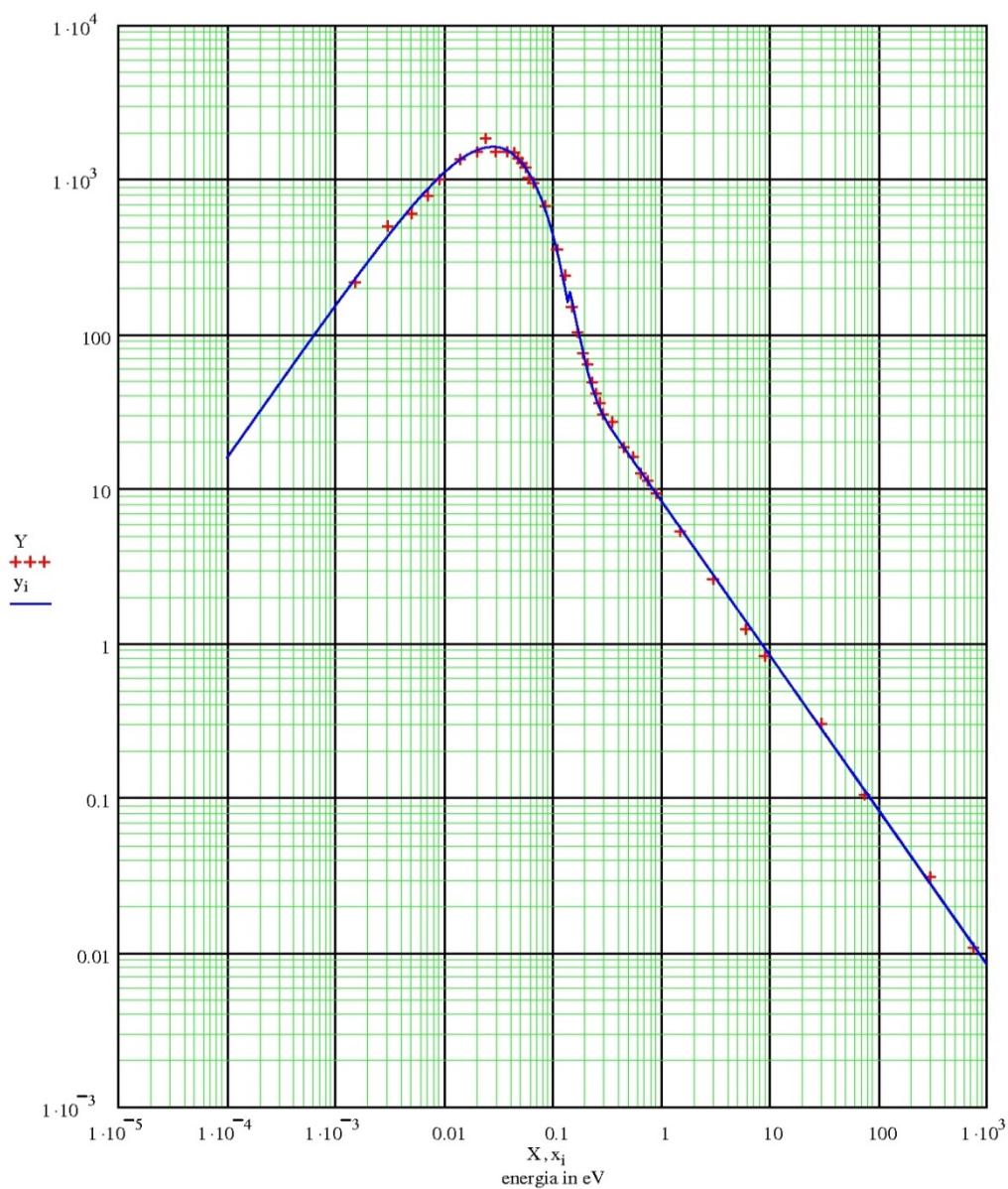
$t = 50.85$ gradi °C

$y_{max} := 10000$

$x_{max} := 1000$

$y_{min} := 0.001$

$x_{min} := 10^{-5}$



data2 :=

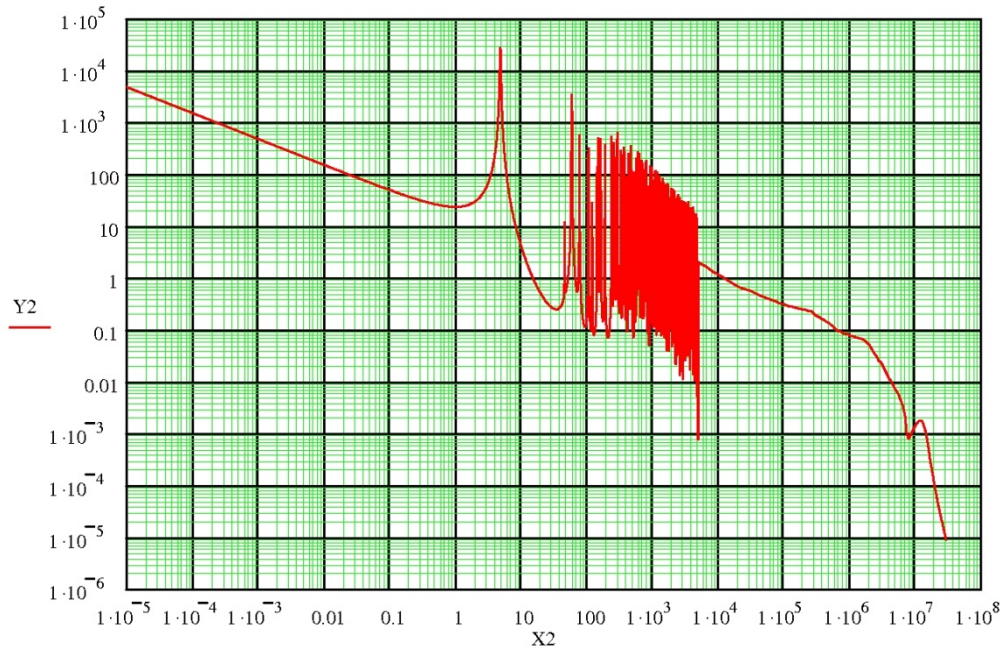
C:\...\Au-197.xls

X2 := data2<0>

Y2 := data2<1>

n2 := rows(data2)

n2 = 4.318 × 10⁴



in ascisse energia del neutrone in eV, in ordinate sezione d'urto (n,g) in barn

$$R1 := \sum_{i=0}^{n2-3} \left(\frac{Y2_{i+1} + Y2_i}{2} \right) \cdot \left[a \cdot \frac{(X2_{i+1} + X2_i)}{2} \cdot e^{-\frac{(X2_{i+1} + X2_i)}{2kT}} + \Phi \left(\frac{X2_i + X2_{i+1}}{2} - 5 \cdot kT \right) \cdot \frac{2 \cdot b}{X2_{i+1} + X2_i} \right] \cdot (X2_{i+1} - X2_i)$$

tasso di reazione totale

n0 := 113

X2_{n0} = 0.571

n2 = 4.318 × 10⁴


$$R2 := \sum_{i=n0}^{n2-3} \left(\frac{Y2_{i+1} + Y2_i}{2} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot b}{X2_{i+1} + X2_i} \right) \cdot (X2_{i+1} - X2_i)$$

tasso di reazione per energie maggiori di 0.55 eV (epicadmiche)

Rcd := $\frac{R1}{R2}$

Rcd = 1.823

rapporto al cadmio dell'oro nel rabbit

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 23 di 53
---	------------------------------	---	-----------	---------------	---------------

Dalla elaborazione precedente si deduce che la temperatura neutronica è di 51 °C partendo da una simulazione MCNP in cui tutti i materiali sono alla temperatura di 20°C. Da quello spettro si è calcolato un rapporto al cadmio di 1.8 per l'oro mentre il valore sperimentale è di 2.0 per una potenza del reattore di 1MW

4. Misure in colonna termica

In data 17/7/2012 si è irraggiata in colonna termica a potenza 1 MW, la fogliolina Cd1 di oro puro $m=0.2079$ g. , diametro $D=20$ mm. Inizio irraggiamento 13:45 (apertura shutter), fine ore 14:05:12 (chiusura shutter). Il conteggio successivo è riportato nella tabella 1.

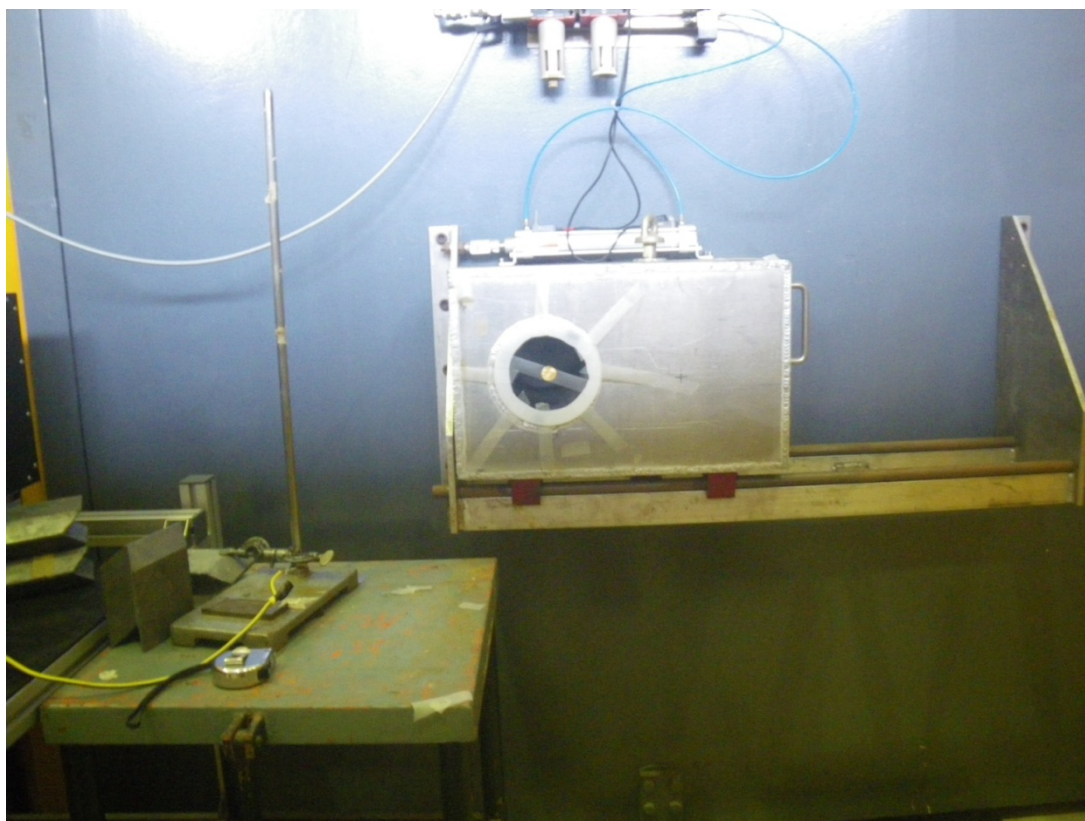



Fig. 8

Posizione fogliolina a 2 cm circa dalla superficie esterna dello shutter.

data	ora	Real time in sec.	Tempo di attesa in min.	Rateo di conteggio cps	Errore in %	Attività A t0 in Bq	note
17/7/2012	14:26	708	1461	49.56	0.9	446	Nal-contatto K=0.74
“ “	14:39	731.6	1474	49.33	0.9	445	Nal-contatto K=0.75
“ “	14:53	1378.4	1488	49.18	0.6	445	Nal-contatto K=0.75
18/7	8:05:26	2738.8	2520	40.24	0.6	439	Nal-contatto K=0.66
18/7	9:15	13440	2590	0.9864	0.9	464	Ge-R Pos. Eu_10m

Tabella 1

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 25 di 53
---	------------------------------	---	-----------	---------------	---------------

Risultati:

da misure precedenti $R_{Cd} = 8.5$

$$A_s = 2.06 \cdot 10^{-16} \text{ Bq/atomo}$$

$$\phi_0 = 1.85 \cdot 10^6 \frac{n}{cm^2/s}$$

Calcolo dell'attività dell'oro al tempo t0 Germanio Rosada posizione Eu10m

$\lambda := 0.000178629$ **costante di disintegrazione Au-198 (/min.)**

$\varepsilon := 3.6 \cdot 10^{-3}$ **Germanio Rosada posizione Eu10m 411 KeV**

$p := 0.9562$

$t_c := 13440.05$ **secondi** $t_c := \frac{t_c}{60}$ **minuti**

$t_a := 2590$ **minuti**

$R := 0.9864$ **cps**

$$A_0 := \frac{\lambda \cdot t_c}{1 - e^{-\lambda t_c}} \cdot e^{\lambda t_a} \cdot \frac{R}{p \cdot \varepsilon}$$

$$f := \frac{\lambda \cdot t_c}{1 - e^{-\lambda t_c}} \quad f = 1.02$$

$A_0 = 464.288$ **Bq**

Calcolo della attività asintotica per atomo di una fogliolina di oro nudo

$\lambda := 0.000178629$ **costante di disintegrazione Au-198 (/min.)**

$\mu := 0.211$ **coefficiente di attenuazione massico
per gamma di 411 KeV in oro**

$\theta := 1$ **frazione di oro in peso**

$D := 20$ **diametro in mm**

$t_{irr} := 20$ **tempo di irraggiamento in minuti**

$m := 0.2079$ **peso in grammi**

$A_0 := 464.3$ **attività al tempo zero in Bq**

$N_t := \frac{m \cdot \theta \cdot 6.022 \cdot 10^{23}}{196.9666}$ **atomi di oro**
 $N_t = 6.3563 \times 10^{20}$

$x := \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot \left(\frac{D}{10}\right)^2}$ **spessore di oro in g/cm²**
 $x = 0.0662$

$F_g := \frac{\mu \cdot x}{1 - e^{-\mu x}}$ **correzione per l'autoassorbimento
dei gamma emessi di 411 KeV dalla
matrice di oro**
 $F_g = 1.007$

$A := A_0 \cdot F_g \cdot \frac{1}{(1 - e^{-\lambda \cdot t_{irr}})}$ **attività alla saturazione in Bq**

$A = 1.3111 \times 10^5$

$A_s := \frac{A}{N_t}$

$A_s = 2.0626 \times 10^{-16}$ **Bq/atomo**

Calcolo del rateo di fluensa neutronica termica dato da un irraggiamento di una fogliolina di oro puro e sotto cadmio a 1MW in colonna termica

$$\sigma := 98.7008 \cdot 10^{-24}$$

$$\lambda := 0.000178629$$

costante di disintegrazione Au-198 (/min.)

$$T_n := 293.4$$

temperatura neutronica in °K

$$g := 1.0051$$

Westcott g-factor for Au

$$w1 := 0.050$$

$$I0 := 1551 \cdot 10^{-24}$$

integrale di risonanza dell'oro

$$f1 := 0.468$$

$$G_{th} := 0.976$$

fattore di autoschermo termico

$$G_{res} := 0.3247$$

fattore di autoschermo di risonanza

$$A_s := 2.06 \cdot 10^{-16}$$

attività specifica dis./s/atomo

$$A_{cd} := \frac{A_s}{8.5}$$

attività specifica sotto cadmio dis./s/atomo

$$\phi_e := \frac{A_{cd}}{I0 \cdot G_{res}}$$

$$\phi_e = 4.812 \times 10^4$$

$$\left(1 + \frac{g \cdot \sigma}{G_{res} \cdot I0} \cdot f1 + \frac{\sigma \cdot w1}{G_{res} \cdot I0} \right) = 1.102$$

$$\phi_{th} := \frac{1}{G_{th} \cdot g \cdot \sigma} \cdot \left[A_s - A_{cd} \cdot \left(1 + \frac{g \cdot \sigma}{G_{res} \cdot I0} \cdot f1 + \frac{\sigma \cdot w1}{G_{res} \cdot I0} \right) \right]$$

$$\phi_{th} = 1.852 \times 10^6$$

neutroni/cm2/s

equivalent 2200 m/s thermal fluence rate

neutron fluence rate per unit energy nella colonna termica luglio 2012

data := C:\.Au-197.xls X := data <0> Y := data <1>

n := rows(data) n = 4.3184 × 10⁴ k := 8.6173468 · 10⁻⁵ T0 := 293.6 T := 293.6

kT := k · T kT = 0.0253

φ0 := 1.85 · 10⁶ neutroni/cm2/s **equivalent 2200 m/s thermal fluence rate**

φe := 4.8 · 10⁴ neutroni/cm2/s

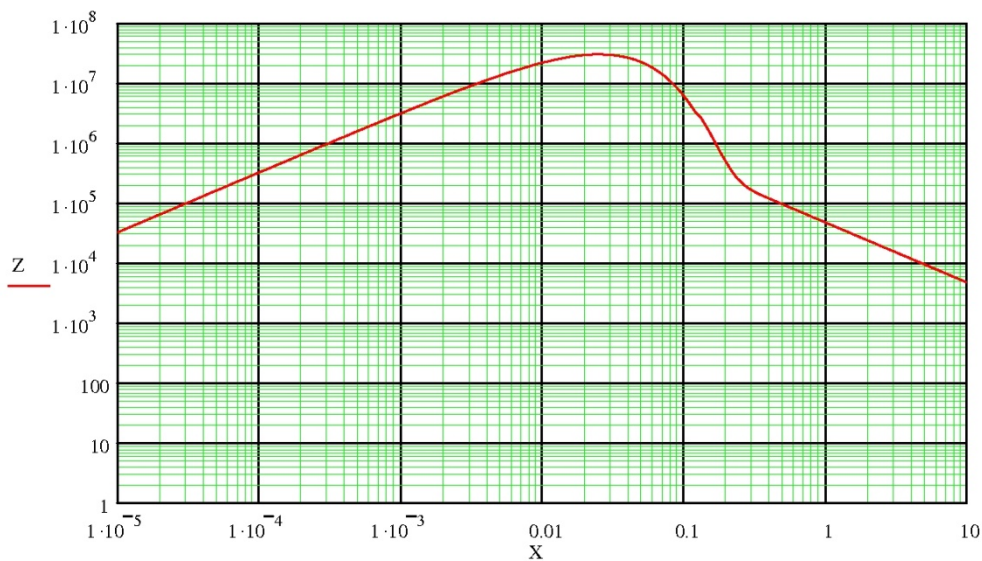
i := 0..n - 1

$$Z_i := \left[\left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \phi_0 \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}} \cdot \frac{X_i}{kT^2} \cdot e^{-\frac{X_i}{kT}} \right) + \phi_e \cdot \Phi \left(X_i - 5 \cdot kT \right) \cdot \frac{1}{X_i} \right] \quad \Phi \text{ Heaviside function}$$

X neutron energy (eV)

Z neutron fluence rate per unit energy (eV)

xmin := 0.00001 xmax := 10 ymin := 1 ymax := 100000000



$$P_i := \phi e \cdot \Phi(X_i - 0.55) \cdot \frac{1}{X_i} \quad \text{Gth} := 0.976 \quad \text{Gres} := 0.3247$$

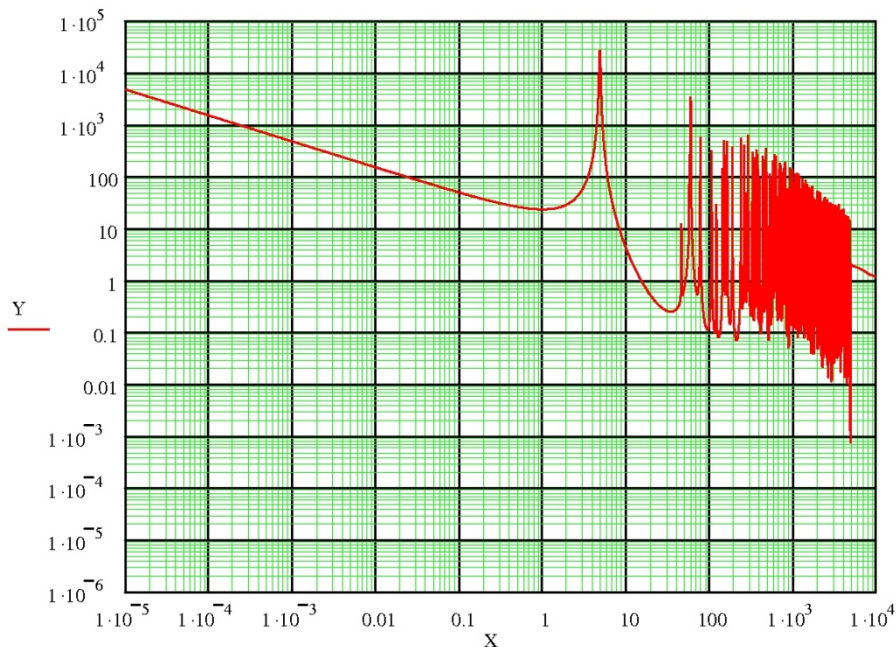
$$Q_i := \text{Gth} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \phi \cdot \sqrt{\frac{T}{T0}} \cdot \frac{X_i}{kT^2} \cdot e^{-\frac{X_i}{kT}} \right) + \text{Gres} \cdot \left(\phi e \cdot \Phi(X_i - 5 \cdot kT) \cdot \frac{1}{X_i} \right)$$


$$n0 := n - 3 \quad X_{n0} = 2.9 \times 10^7$$

$$Rs := \sum_{i=0}^{n0} \left(\frac{Y_i + Y_{i+1}}{2} \right) \cdot \left(\frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \right) \cdot (X_{i+1} - X_i) \cdot 10^{-24} \quad Rs = 2.04532 \times 10^{-16}$$

$$\text{Rcd} := \sum_{i=0}^{n0} \left(\frac{Y_i + Y_{i+1}}{2} \right) \cdot \left(\frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right) \cdot (X_{i+1} - X_i) \cdot 10^{-24} \cdot \text{Gres} \quad \text{Rcd} = 2.44469 \times 10^{-17}$$

$$q := \frac{Rs}{\text{Rcd}} \quad q = 8.36639 \quad \text{rapporto al cadmio calcolato}$$



	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 30 di 53
---	------------------------------	---	-----------	---------------	---------------

5. Misure con il tubo GEO

Il tubo GEO è un dispositivo per l'irraggiamento di oggetti di dimensioni massime: lunghezza 170 mm, diametro 65 mm.

Posto sopra il riflettore laterale in grafite a reattore ad 1 MW di potenza si ha un rateo di fluensa termico equivalente 2200 m/s (ASTM)

$\Phi_{th} = 1.9 \cdot 10^{11} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ ed un rapporto al cadmio $R_{Cd} = 2.5$ alla base del tubo, mentre a 73 mm più in alto si ha $\Phi_{th} = 1.0 \cdot 10^{11} \text{ n/cm}^2/\text{s}$.



Fig 9

Tubo "GEO"

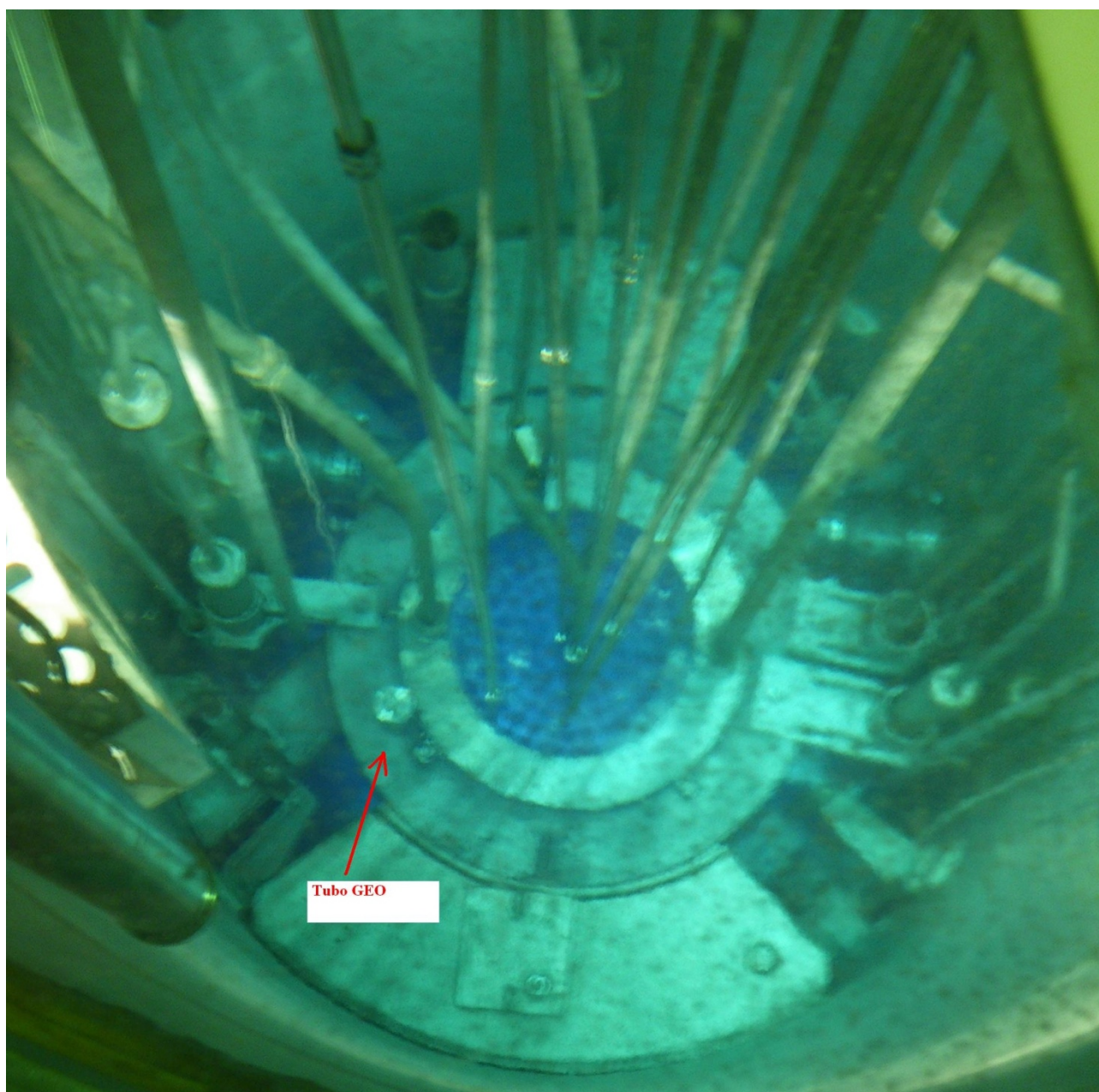


Fig. 10

Posizionamento del tubo GEO sul riflettore laterale in grafite, il reattore è alla potenza di 1MW e si nota la luce Cerencov.

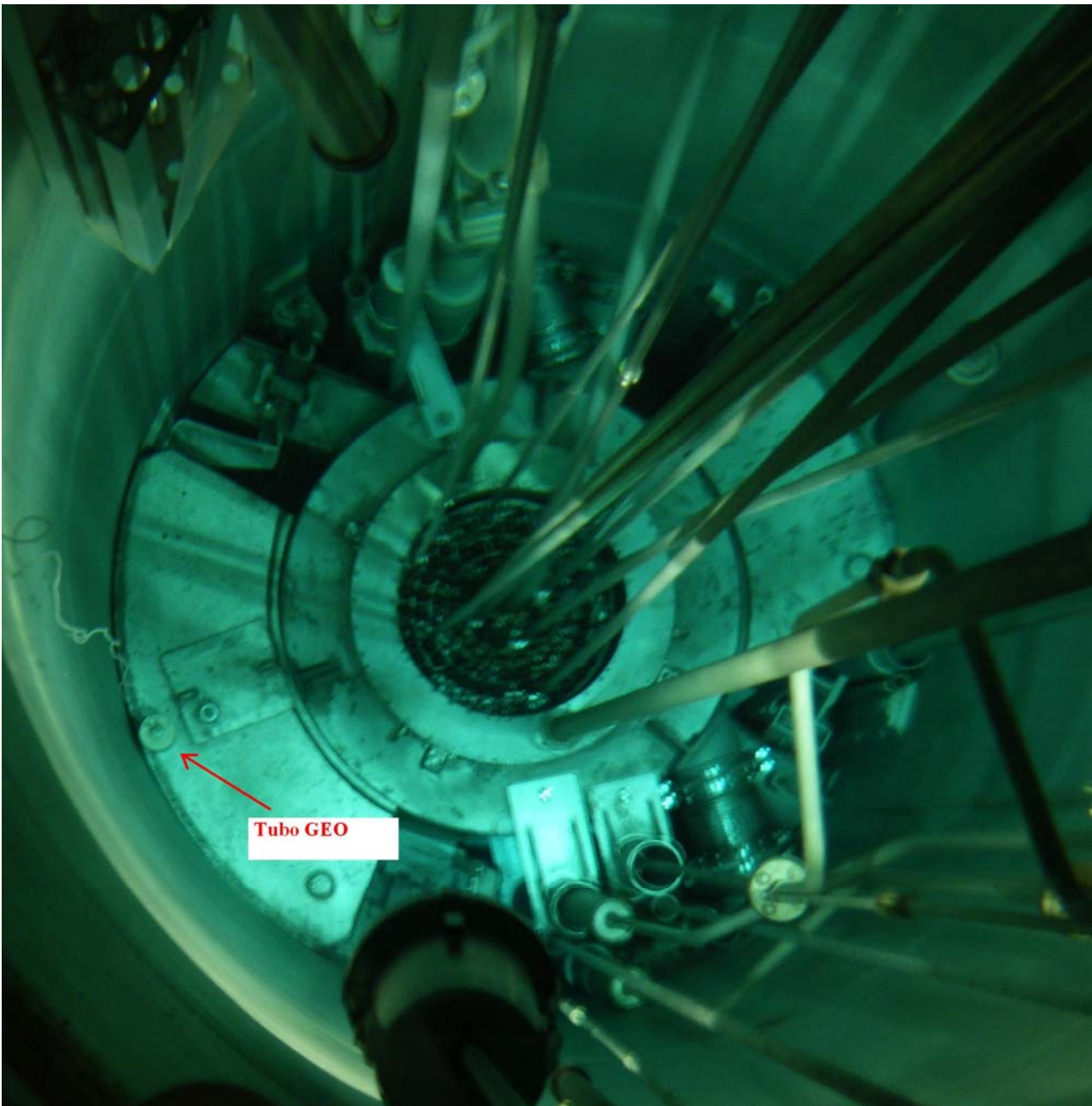
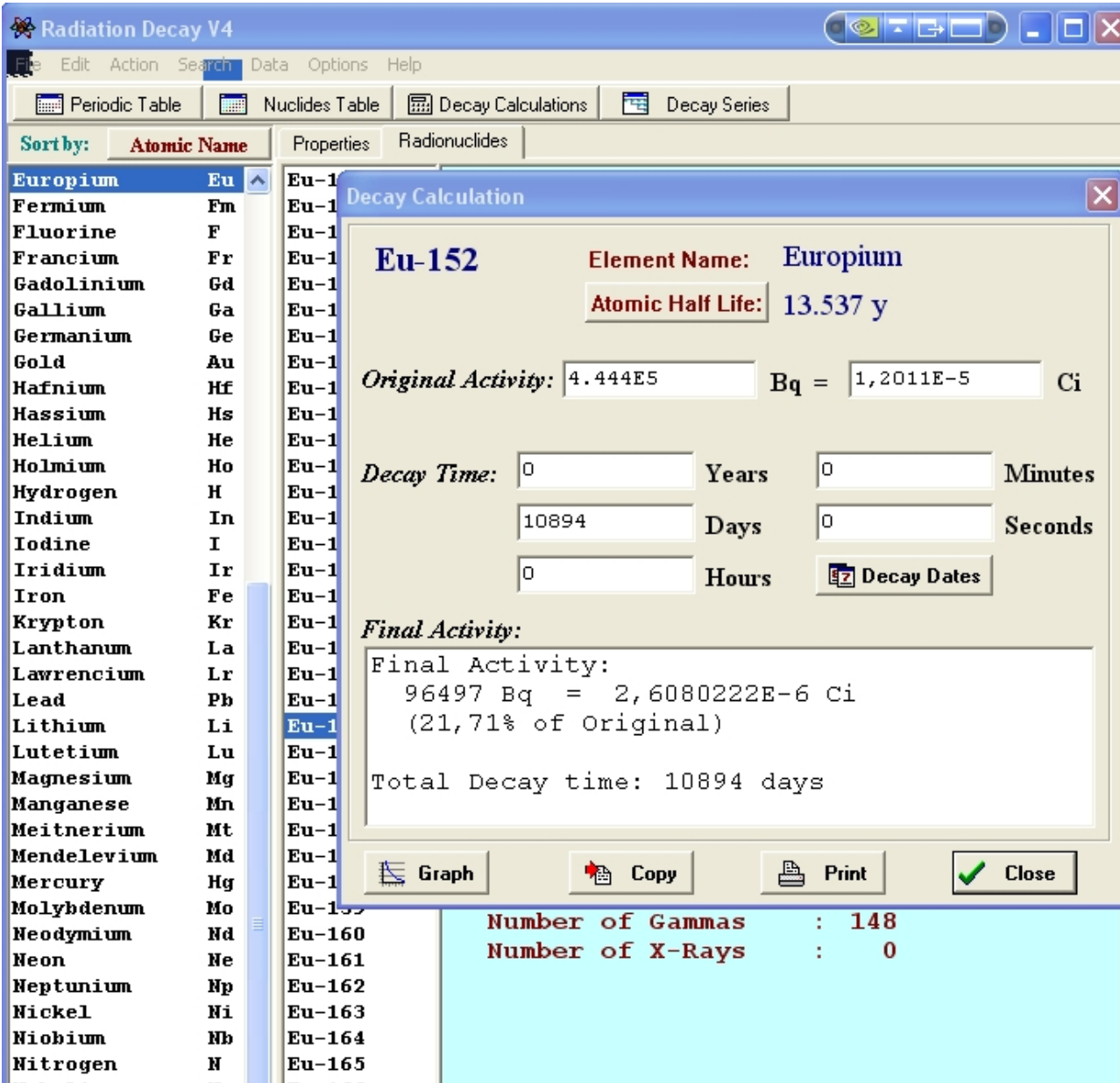


Fig 11

Nella foto si vede il tubo GEO appoggiato sulla colonna termica vicino al contenitore del pozzo reattore.

6. Calibrazione del rivelatore di germanio

Per la calibrazione si utilizza l'europio-152 del reattore Tapiro, attività al 7/7/1981 $4.444 \cdot 10^5$ Bq



The screenshot shows the "Radiation Decay V4" software interface. A "Decay Calculation" dialog box is open, displaying the following information:

- Eu-152** (Element Name: Europium)
- Atomic Half Life:** 13.537 y
- Original Activity:** 4.444E5 Bq = 1,2011E-5 Ci
- Decay Time:** 0 Years, 0 Minutes, 10894 Days, 0 Seconds
- Final Activity:** 96497 Bq = 2,6080222E-6 Ci (21,71% of Original)
- Total Decay time:** 10894 days

At the bottom of the dialog box, there are buttons for "Graph", "Copy", "Print", and "Close". Below the dialog box, a cyan-colored box displays the following data:

- Number of Gammas :** 148
- Number of X-Rays :** 0

Fig. 12

Il programma "Radiation Decay" liberamente scaricabile dalla rete, calcola l'attività dell'Europio-152 alla data della misura 5/5/2011 che stata di 96497 Bq.

In tabella 2 calcolo dell'efficienza in funzione dell'energia dei gamma

E_γ (KeV)	p_γ (%)	γ /s	R (cps)	ε (efficienza)
40.118	37.9	36572	45.04	1.23e-3
45.9	13.47	12998	22.77	1.75e-3
121.7817	28.67	27666	214.7	7.76e-3
244.6975	7.61	7343.4	40.19	5.47e-3
344.2785	26.6	25668	107.3	4.18e-3
778.9040	12.96	12506	25.64	2.05e-3
964.079	14.65	14137	24.48	1.73e-3
1408.006	21.07	20332	25.70	1.26e-3

Tabella 2

Nella prima colonna vi sono le energie dei gamma emessi dall'eurobio-152 (scelti con il criterio di una consistente efficienza di emissione “n° di fotoni gamma emessi per ogni 100 decadimenti”). La fonte da cui sono ricavati i dati nucleari è www.nndc.bnl.gov. In colonna due vi sono le efficienze di emissione relative alle varie energie dei gamma. In colonna tre vi sono i gamma emessi al secondo calcolati moltiplicando l'attività al momento della misura per l'efficienza di emissione (esempio: prima riga colonna tre, $96497 \cdot \frac{37.9}{100} = 36572$). Nella colonna quattro vi sono i ratei di conteggio misurati con il sistema di conteggio con il rivelatore di Germanio. La quinta colonna viene calcolata dividendo il valore in colonna quattro con il corrispondente valore in colonna tre.

Esempio: $\frac{45.04}{36572} = 1.23 \cdot 10^{-3}$

Le efficienze in colonna cinque sono relative ad una posizione denominata “Eu10m” che posiziona i materiali attivati ad una distanza dal Ge di circa 12 cm.

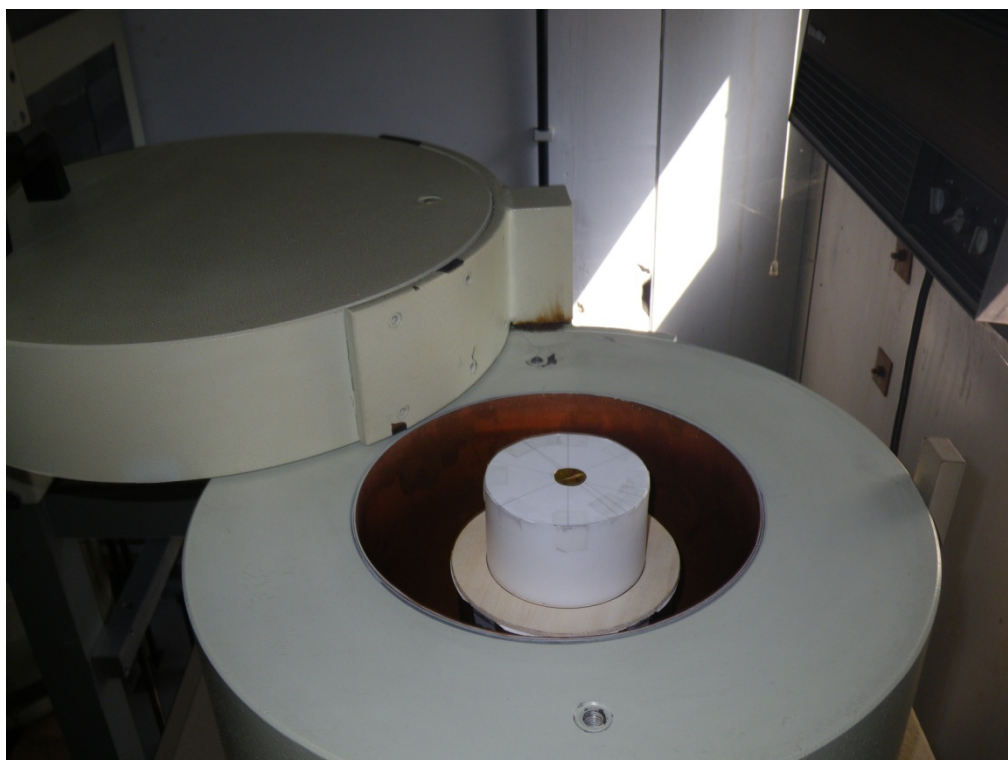


Fig. 13

Fogliolina di oro puro del diametro di 20 mm posizionata con il sistema denominato “Eu10m”

L’elaborazione dei primi 5 dati dalla tabella 2 per mezzo del programma “LAB fit” di Wilton and Cleide Diniz Pereira da Silva e Silva ha portato alla curva di fit della figura 14

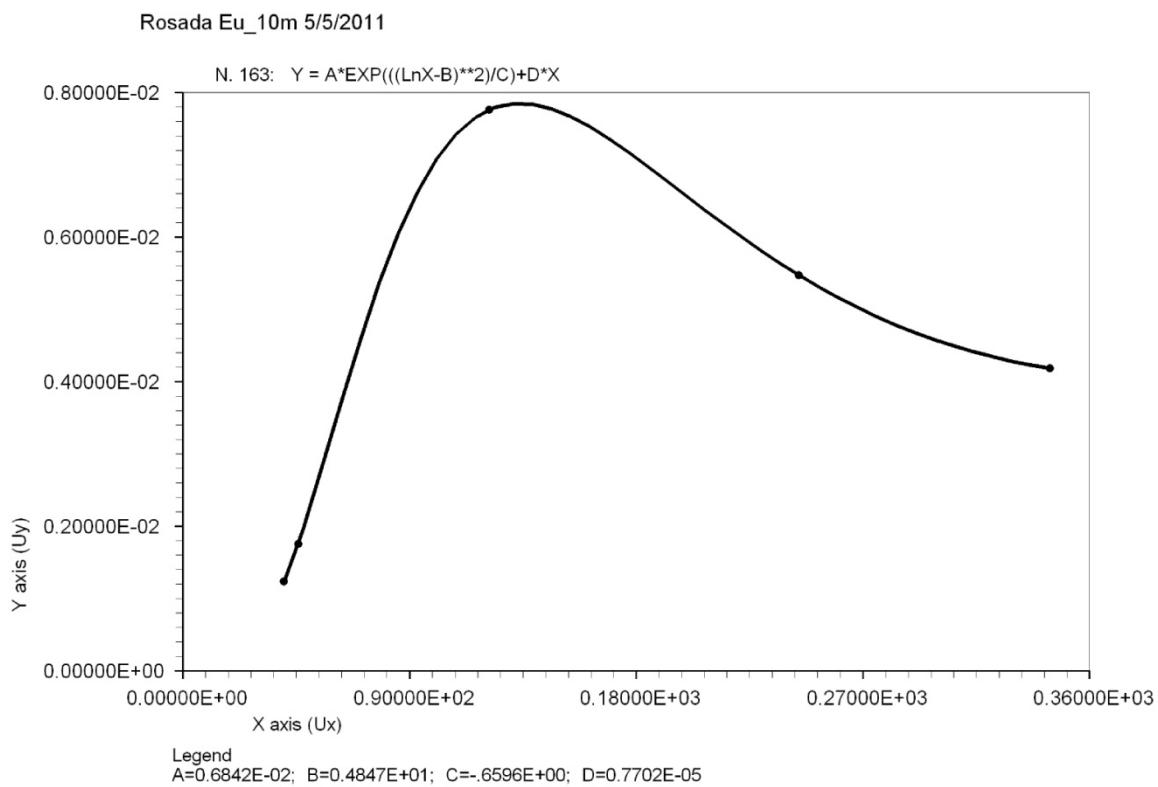


Fig. 14

Sull'asse X l'energia dei gamma il *KeV*, sull'asse Y l'efficienza ϵ relativa alla posizione "Eu10m"

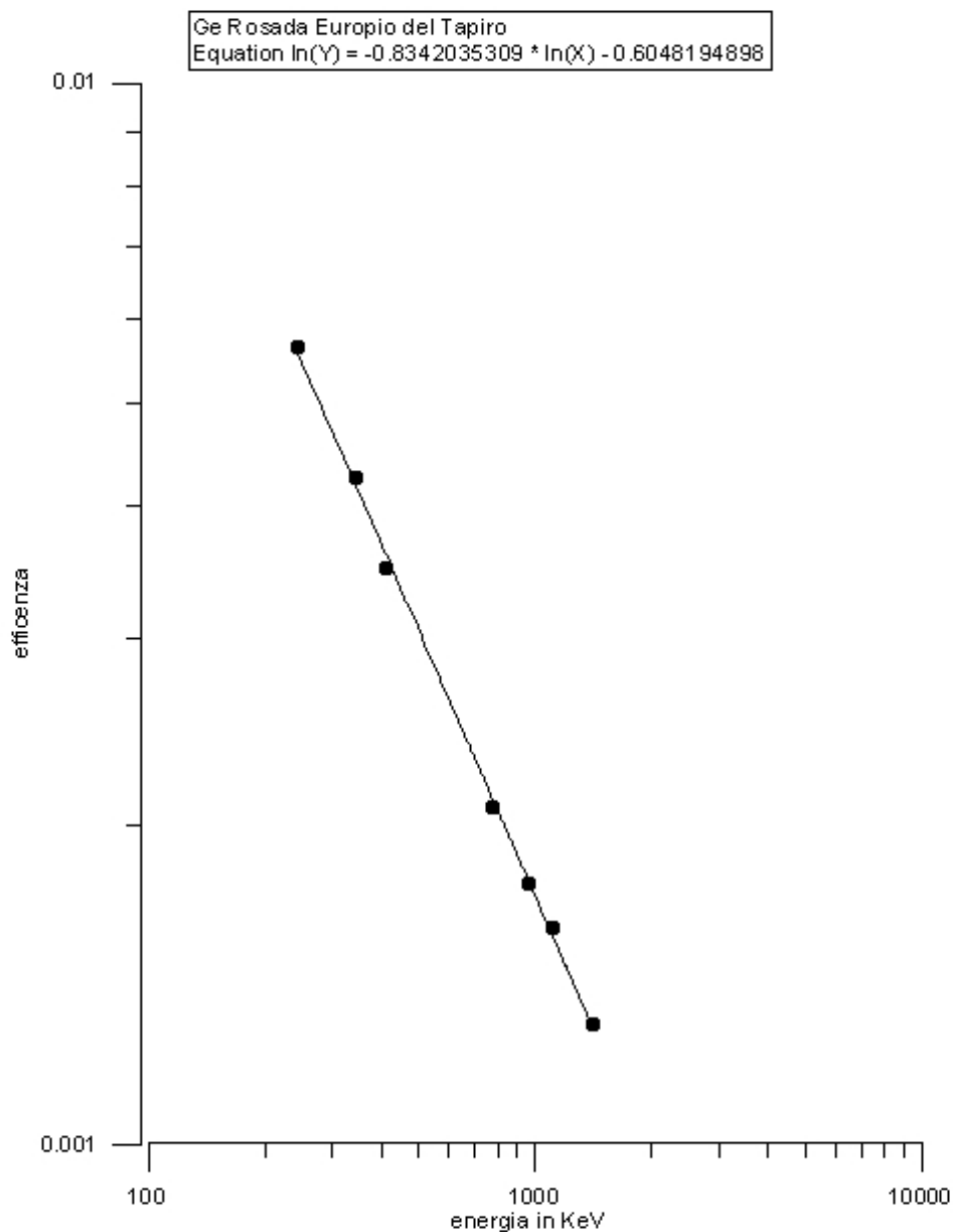


Fig. 15

Tabella delle efficienze

E_γ (KeV)	efficienza
88.361	5.59e-3
208.3662	4.75e-3
411.80	3.54e-3

8. Spettrometria gamma con NaI(Tl)



Fig. 16

Sistema di misura con scintillatore NaI(Tl) per la misura dell'attività di foglioline d'oro attivate con neutroni nel reattore

TRIGA – MARK II ENEA-Casaccia, Roma - Italia



Fig. 17

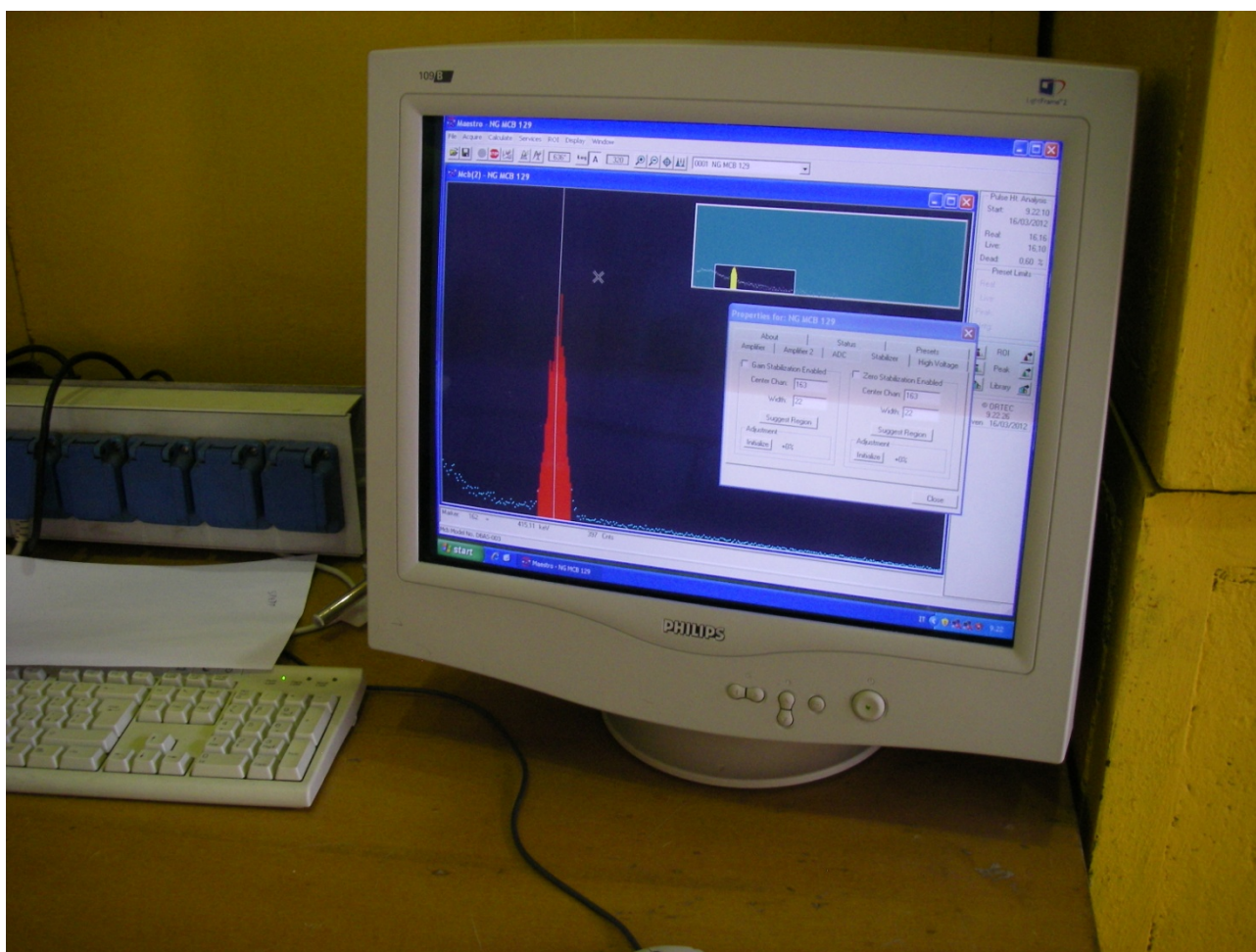


Fig. 18

Computer con software di acquisizione Maestro-32 della Ortec
L'area in rosso è relativa al fotopicco dei gamma emessi dal radionuclide
Au-198 di energia 411 Kev

Spettrometria gamma con NaI(Tl)

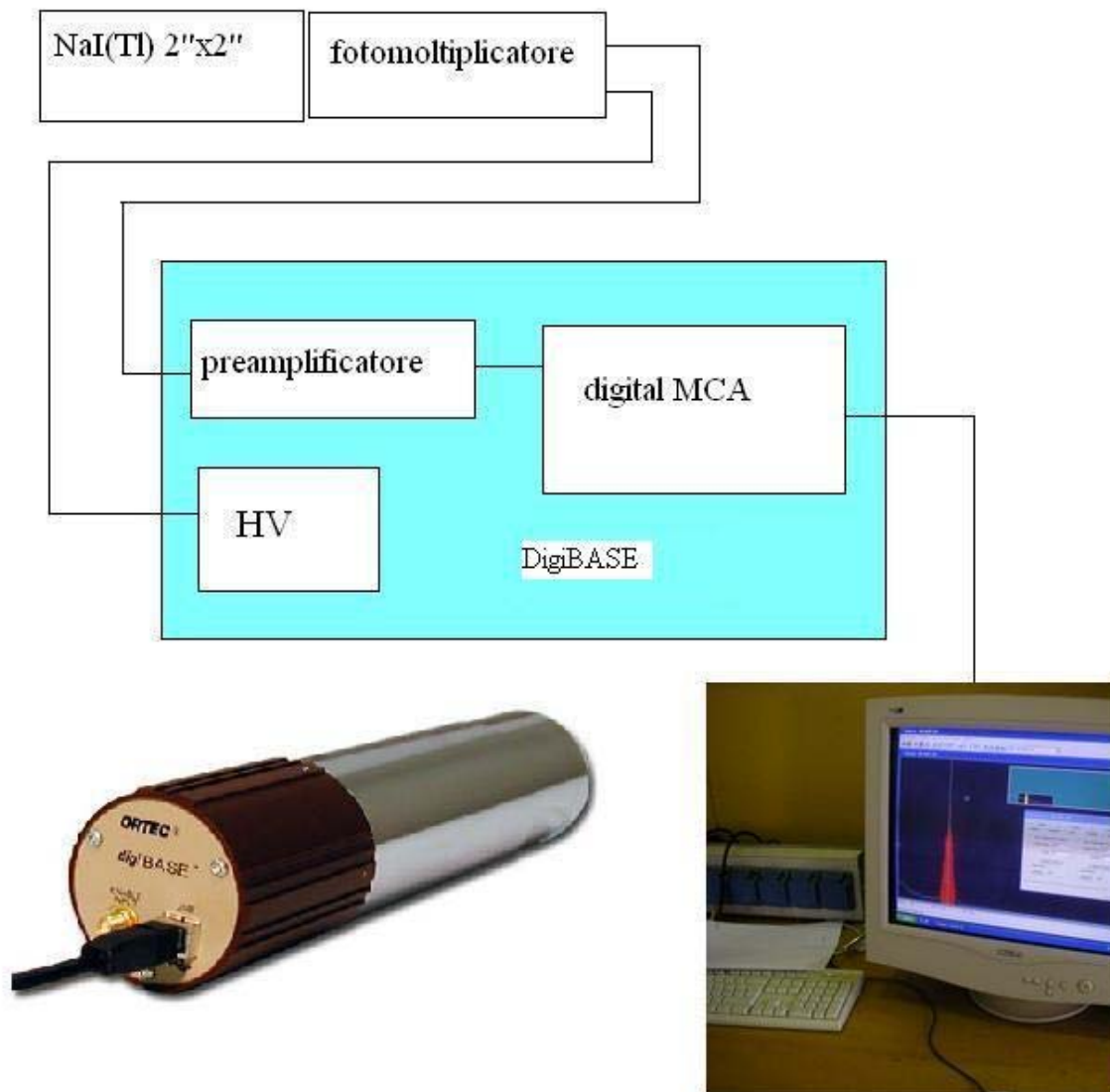


Fig.19

DigiBASE incorpora uno stabilizzatore di guadagno che diminuisce sensibilmente la dipendenza dell'amplificazione dalle variazioni di temperatura.

9. Calcolo dello spettro neutronico con MCNP5

Il codice montecarlo MCNP5 fornisce tramite il tally del tipo F4 il flusso neutronico normalizzato per intervalli di energia dei neutroni scelti da input, per le celle di interesse. Nel caso specifico si è richiesto al codice il calcolo del flusso neutronico per le celle di tipo sferico nei punti di interesse illustrati nella figura 20

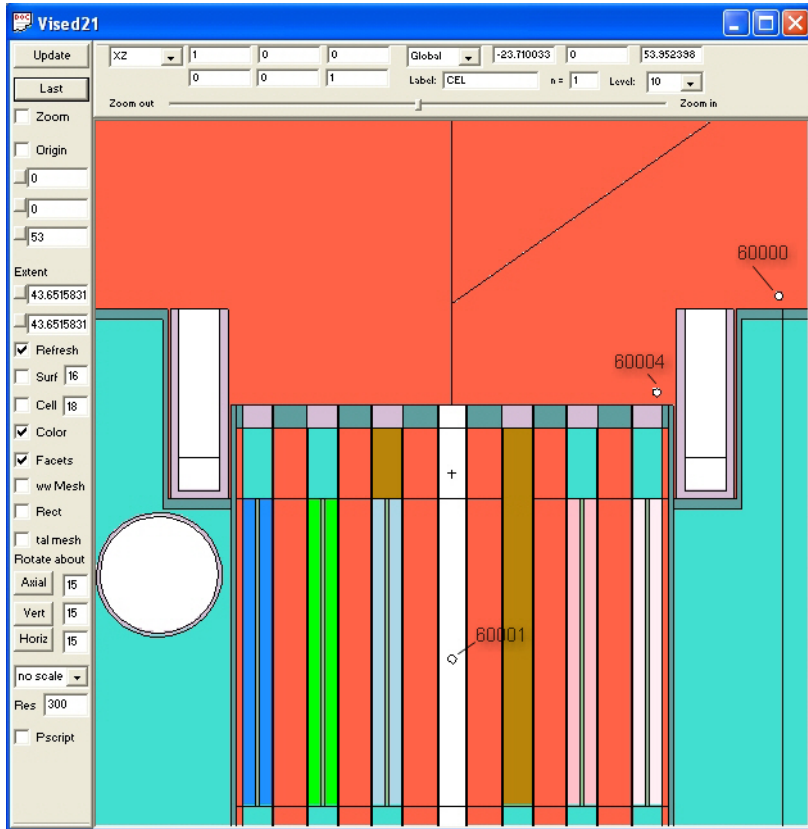


Fig 20

La cella 60000 vuol simulare una misura di flusso neutronico con il tubo GEO posizionato sopra il riflettore laterale in grafite, la cella 60004 il flusso neutronico con il tubo GEO posizionato sopra il nocciolo. La cella 60001 il flusso neutronico nella posizione di irraggiamento nel canale centrale. La cella 60002 per la posizione di irraggiamento nel rabbit. La scelta dei “bin” di energia per il calcolo del flusso dati nell’input a MCNP5 sono illustrati nella fig. 21

```

s1302      .24  1.815
sp302     -21   1
C
C      ----- erg -----
C
C      watt fission, for parameters see MCNP4C manual, page H-3.
sp2 -3    0.988  2.249
C
C      -----
C
C      following for scalar (currently afs-ax)
C
ctme  900
C      prdmp   j j 1  2
C
C      following for parallel (currently afs-linux)
C
C nps      3000000
C      prdmp   j 999999999 1 j j
C
print  -128
C
e0  1-10  2-10  4-10  6-10  8-10
      1-9  2-9  4-9  6-9  8-9  1-8  1.8-8  2.2-8  2.6-8  3.4-8  4.2-8  4.6-8  5.0-8
      5.4-8  5.8-8  6.2-8  7.0-8  1.0-7  1.2-7  1.4-7  1.6-7  1.8-7  2.0-7  2.2-7
      2.4-7  2.6-7  2.8-7  3.0-7  4.0-7  5.0-7  6.0-7  7.0-7  8.0-7  1.0-6  2.0-6
      4.0-6  8.0-6  1.0-5  5.0-5  1.0-4  5.0-4  1.0-3  5.0-3  1.0-2  5.0-2  1.0-1
      5.0-1  1.0  5.0  10.  20.0
C
C      ----- tallies -----
C
F1:n 60000
F4:n 60000
F14:n 30007
F21:n 60001
F24:n 60001
F31:n 60002
F34:n 60002
C F44:n 60003
F51:n 60004
F54:n 60004
F61:n 60005
F64:n 60005
F71:n 60006
F74:n 60006
C
C
C      ***** end of input *****

```

Fig. 21

L'output del calcolo MCNP per il rabbit cella 60002 è illustrato in fig 22.

```

total 3.28992E-04 100.000.-----10-----20-----30-----40-----50-----60-----
tally 34 nps = 632962790
tally type 4 track length estimate of particle flux. units 1/cm**2
tally for neutrons

volumes
cell: 60002
5.23599E-01

cell 60002
energy
1.0000E-10 0.00000E+00 0.0000
2.0000E-10 0.00000E+00 0.0000
4.0000E-10 8.84272E-09 0.5243
6.0000E-10 2.53755E-08 0.3181
8.0000E-10 9.84496E-09 0.4378
1.0000E-09 1.74912E-08 0.3599
2.0000E-09 2.17746E-07 0.1035
4.0000E-09 1.00655E-06 0.0475
6.0000E-09 1.21342E-06 0.0430
8.0000E-09 1.58367E-06 0.0377
1.0000E-08 2.01481E-06 0.0336
1.8000E-08 1.08788E-05 0.0145
2.2000E-08 6.08134E-06 0.0193
2.6000E-08 7.44378E-06 0.0175
3.4000E-08 1.22347E-05 0.0137
4.2000E-08 1.21825E-05 0.0136
4.6000E-08 6.02793E-06 0.0194
5.0000E-08 5.49028E-06 0.0203
5.4000E-08 5.19224E-06 0.0209
5.8000E-08 4.83687E-06 0.0217
6.2000E-08 4.13186E-06 0.0233
7.0000E-08 7.68106E-06 0.0173
1.0000E-07 2.03996E-05 0.0106
1.2000E-07 7.09374E-06 0.0178
1.4000E-07 4.83574E-06 0.0217
1.6000E-07 3.01950E-06 0.0273
1.8000E-07 2.07515E-06 0.0332
2.0000E-07 1.51022E-06 0.0387
2.2000E-07 1.28806E-06 0.0422
2.4000E-07 9.82766E-07 0.0484
2.6000E-07 8.30918E-07 0.0527
2.8000E-07 7.22039E-07 0.0567
3.0000E-07 6.11119E-07 0.0609
4.0000E-07 2.71645E-06 0.0290
5.0000E-07 1.86395E-06 0.0348
6.0000E-07 1.62008E-06 0.0375
7.0000E-07 1.26099E-06 0.0424
8.0000E-07 1.13152E-06 0.0449
1.0000E-06 1.87604E-06 0.0348
2.0000E-06 5.31945E-06 0.0206
4.0000E-06 5.21164E-06 0.0209
8.0000E-06 4.94346E-06 0.0214
1.0000E-05 1.65912E-06 0.0369
5.0000E-05 1.21485E-05 0.0137
1.0000E-04 5.28588E-06 0.0207
5.0000E-04 1.23923E-05 0.0135
1.0000E-03 5.35675E-06 0.0206
5.0000E-03 1.27310E-05 0.0134
1.0000E-02 5.74342E-06 0.0200
5.0000E-02 1.50678E-05 0.0123
1.0000E-01 7.98395E-06 0.0169
5.0000E-01 2.83553E-05 0.0089
1.0000E+00 2.07412E-05 0.0105
5.0000E+00 4.81363E-05 0.0069
1.0000E+01 3.62609E-06 0.0251
2.0000E+01 9.80400E-08 0.1531
total 3.36917E-04 0.0026

```

Fig. 22

Nella prima colonna vi sono i limiti superiori dei bin di energia espressi in MeV, nella seconda colonna è il flusso neutronico in unità relative, mentre la terza colonna è l'errore statistico relativo sul flusso neutronico. Dai dati si evince che le prime sei righe vanno scartate perché l'errore è maggiore del 0.15 (cioè il 15%) copiando i dati in un file Exel ed elaborandoli abbiamo i seguenti dati:

	A1	E in eV									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	E in eV	dF/dE	dE	E-inf (in MeV)	E-sup (in MeV)		relative error				
2	1,5000E-03	2,1775E+02	1,0000E-09	1,0000E-09	2,0000E-09	2,1775E-07	0,1035				
3	3,0000E-03	5,0327E+02	2,0000E-09	2,0000E-09	4,0000E-09	1,0065E-06	0,0475				
4	5,0000E-03	8,0671E+02	2,0000E-09	4,0000E-09	6,0000E-09	1,2134E-06	0,043				
5	7,0000E-03	7,9183E+02	2,0000E-09	6,0000E-09	8,0000E-09	1,5837E-06	0,0377				
6	9,0000E-03	1,0074E+03	2,0000E-09	8,0000E-09	1,0000E-08	2,0148E-06	0,0336				
7	1,4000E-02	1,3599E+03	8,0000E-09	1,0000E-08	1,8000E-08	1,0879E-05	0,0145				
8	2,0000E-02	1,5203E+03	4,0000E-09	1,8000E-08	2,2000E-08	6,0813E-06	0,0193				
9	2,4000E-02	1,8609E+03	4,0000E-09	2,2000E-08	2,6000E-08	7,4438E-06	0,0175				
10	3,0000E-02	1,5293E+03	8,0000E-09	2,6000E-08	3,4000E-08	1,2235E-05	0,0137				
11	3,8000E-02	1,5228E+03	8,0000E-09	3,4000E-08	4,2000E-08	1,2183E-05	0,0136				
12	4,4000E-02	1,5070E+03	4,0000E-09	4,2000E-08	4,6000E-08	6,0279E-06	0,0194				
13	4,8000E-02	1,3726E+03	4,0000E-09	4,6000E-08	5,0000E-08	5,4903E-06	0,0203				
14	5,2000E-02	1,2981E+03	4,0000E-09	5,0000E-08	5,4000E-08	5,1922E-06	0,0209				
15	5,6000E-02	1,2092E+03	4,0000E-09	5,4000E-08	5,8000E-08	4,8369E-06	0,0217				
16	6,0000E-02	1,0330E+03	4,0000E-09	5,8000E-08	6,2000E-08	4,1319E-06	0,0233				
17	6,6000E-02	9,6013E+02	8,0000E-09	6,2000E-08	7,0000E-08	7,6811E-06	0,0173				
18	8,5000E-02	6,7999E+02	3,0000E-08	7,0000E-08	1,0000E-07	2,0400E-05	0,0106				
19	1,1000E-01	3,5469E+02	2,0000E-08	1,0000E-07	1,2000E-07	7,0937E-06	0,0178				
20	1,3000E-01	2,4179E+02	2,0000E-08	1,2000E-07	1,4000E-07	4,8357E-06	0,0217				
21	1,5000E-01	1,5098E+02	2,0000E-08	1,4000E-07	1,6000E-07	3,0195E-06	0,0273				
22	1,7000E-01	1,0376E+02	2,0000E-08	1,6000E-07	1,8000E-07	2,0751E-06	0,0332				
23	1,9000E-01	7,5511E+01	2,0000E-08	1,8000E-07	2,0000E-07	1,5102E-06	0,0387				
24	2,1000E-01	6,4403E+01	2,0000E-08	2,0000E-07	2,2000E-07	1,2681E-06	0,0422				
25	2,3000E-01	4,9138E+01	2,0000E-08	2,2000E-07	2,4000E-07	9,8277E-07	0,0484				
26	2,5000E-01	4,1546E+01	2,0000E-08	2,4000E-07	2,6000E-07	8,3092E-07	0,0527				
27	2,7000E-01	3,6102E+01	2,0000E-08	2,6000E-07	2,8000E-07	7,2204E-07	0,0567				
28	2,9000E-01	3,0556E+01	2,0000E-08	2,8000E-07	3,0000E-07	6,1112E-07	0,0609				
29	3,5000E-01	2,7165E+01	1,0000E-07	3,0000E-07	4,0000E-07	2,7165E-06	0,029				
30	4,5000E-01	1,8640E+01	1,0000E-07	4,0000E-07	5,0000E-07	1,8640E-06	0,0348				
31	5,5000E-01	1,6201E+01	1,0000E-07	5,0000E-07	6,0000E-07	1,6201E-06	0,0375				
32	6,5000E-01	1,2610E+01	1,0000E-07	6,0000E-07	7,0000E-07	1,2610E-06	0,0424				
33	7,5000E-01	1,1315E+01	1,0000E-07	7,0000E-07	8,0000E-07	1,1315E-06	0,0449				
34	9,0000E-01	9,3802E+00	2,0000E-07	8,0000E-07	1,0000E-06	1,8760E-06	0,0348				
35	1,5000E+00	5,3195E+00	1,0000E-06	1,0000E-06	2,0000E-06	5,3195E-06	0,0206				
36	3,0000E+00	2,6058E+00	2,0000E-06	2,0000E-06	4,0000E-06	5,2116E-06	0,0209				
37	6,0000E+00	1,2359E+00	4,0000E-06	4,0000E-06	8,0000E-06	4,9435E-06	0,0214				
38	9,0000E+00	8,2956E-01	2,0000E-06	8,0000E-06	1,0000E-05	1,6591E-06	0,0369				
39	3,0000E+01	3,0371E-01	4,0000E-05	1,0000E-05	5,0000E-05	1,2149E-05	0,0137				
40	7,5000E+01	1,0572E-01	5,0000E-05	5,0000E-05	1,0000E-04	5,2659E-06	0,0207				
41	3,0000E+02	3,0981E-02	4,0000E-04	1,0000E-04	5,0000E-04	1,2392E-05	0,0135				
42	7,5000E+02	1,0713E-02	5,0000E-04	5,0000E-04	1,0000E-03	5,3568E-06	0,0206				
43	3,0000E+03	3,1828E-03	4,0000E-03	1,0000E-03	5,0000E-03	1,2731E-05	0,0134				
44	7,5000E+03	1,1487E-03	5,0000E-03	5,0000E-03	1,0000E-02	5,7434E-06	0,02				
45	3,0000E+04	3,7669E-04	4,0000E-02	1,0000E-02	5,0000E-02	1,5068E-05	0,0123				
46	7,5000E+04	1,5968E-04	5,0000E-02	5,0000E-02	1,0000E-01	7,9840E-06	0,0169				
47	3,0000E+05	7,0888E-05	4,0000E-01	1,0000E-01	5,0000E-01	2,8355E-05	0,0089				
48	7,5000E+05	4,1482E-05	5,0000E-01	5,0000E-01	1,0000E+00	2,0741E-05	0,0105				
49	3,0000E+06	1,2034E-05	4,0000E+00	1,0000E+00	5,0000E+00	4,8136E-05	0,0069				

Fig. 23

Dalle colonne A della fig. 23 (energia media del bin in eV) e B (densità di flusso neutronico $\frac{n}{cm^2 \cdot s \cdot eV}$) si grafica la densità di flusso neutronico in funzione dell'energia del neutrone.

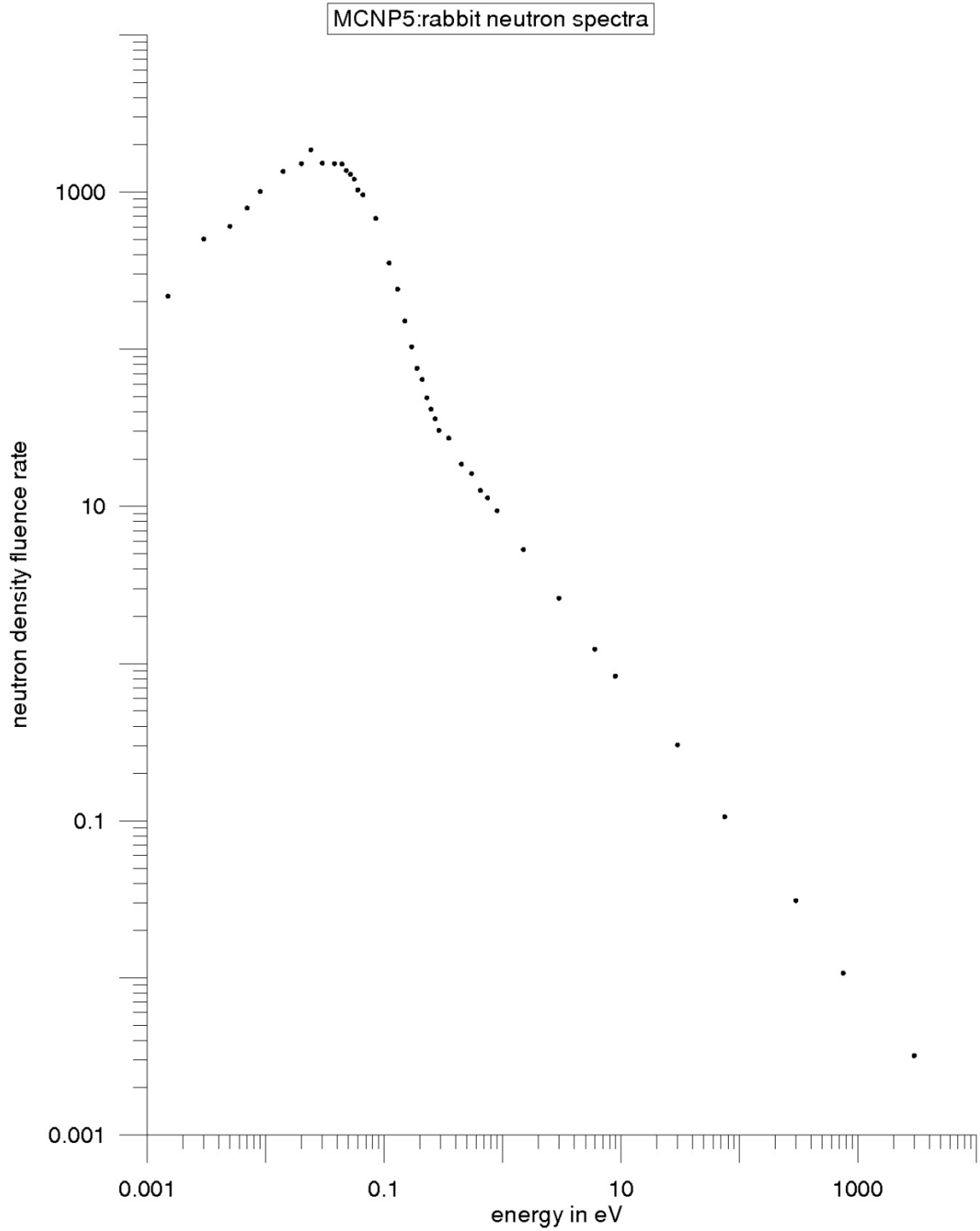



Fig. 24


	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 47 di 53
---	------------------------------	---	-----------	---------------	---------------

Da questi dati per mezzo del programma MathCAD che segue si calcola tramite un fit della funzione

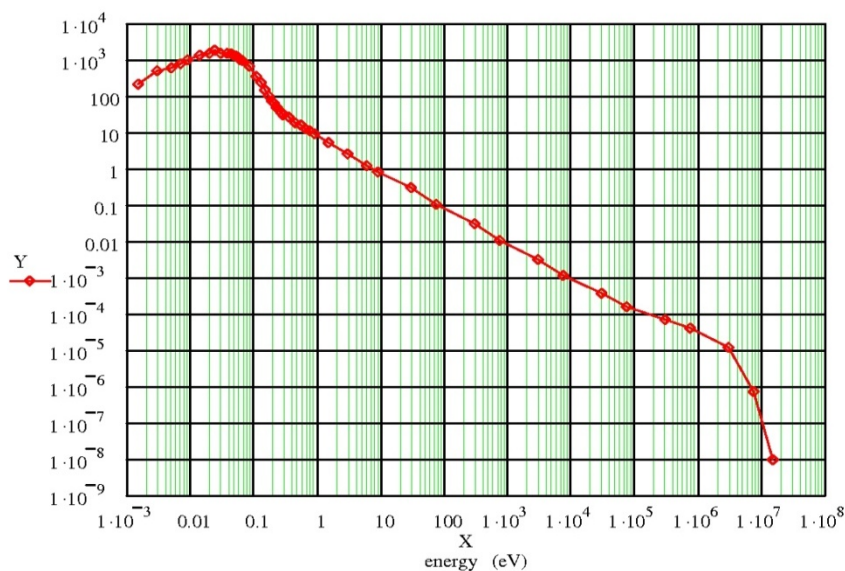
$$\phi(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \phi_0 \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}} \cdot \frac{E}{(kT)^2} \cdot e^{-\frac{E}{kT}} + \phi_e \cdot \Phi(E - 5kT) \cdot \frac{1}{E}$$

$\Phi(x)$ funzione a gradino per $x < 0$ $\Phi = 0$, per $x \geq 0$ $\Phi = 1$.

**Calcolo dello spettro neutronico
nel rabbit dati MCNP5
flusso nella cella 60002 tally F34**

data :=  K:\..\rabbit.xls X := data <0> Y := data <1>

n := rows(data) n = 50 $X_0 = 1.5 \times 10^{-3}$ $X_{49} = 1.5 \times 10^7$



m := 100000 k := 8.617347 · 10⁻⁵

i := 0..m $x_i := 0.0001 \cdot i^2 + 0.0001$ $x_m = 1 \times 10^6$

T := 324 a := 1.60 · 10⁵ kT := k · T b := 8.4 · 10⁰

kT = 0.028

$$y_i := \left[a \cdot e^{\frac{-x_i}{kT}} \cdot x_i + \left(\Phi(x_i - 5 \cdot kT) \cdot \frac{b}{x_i} \right) \right]$$

t := T - 273.15

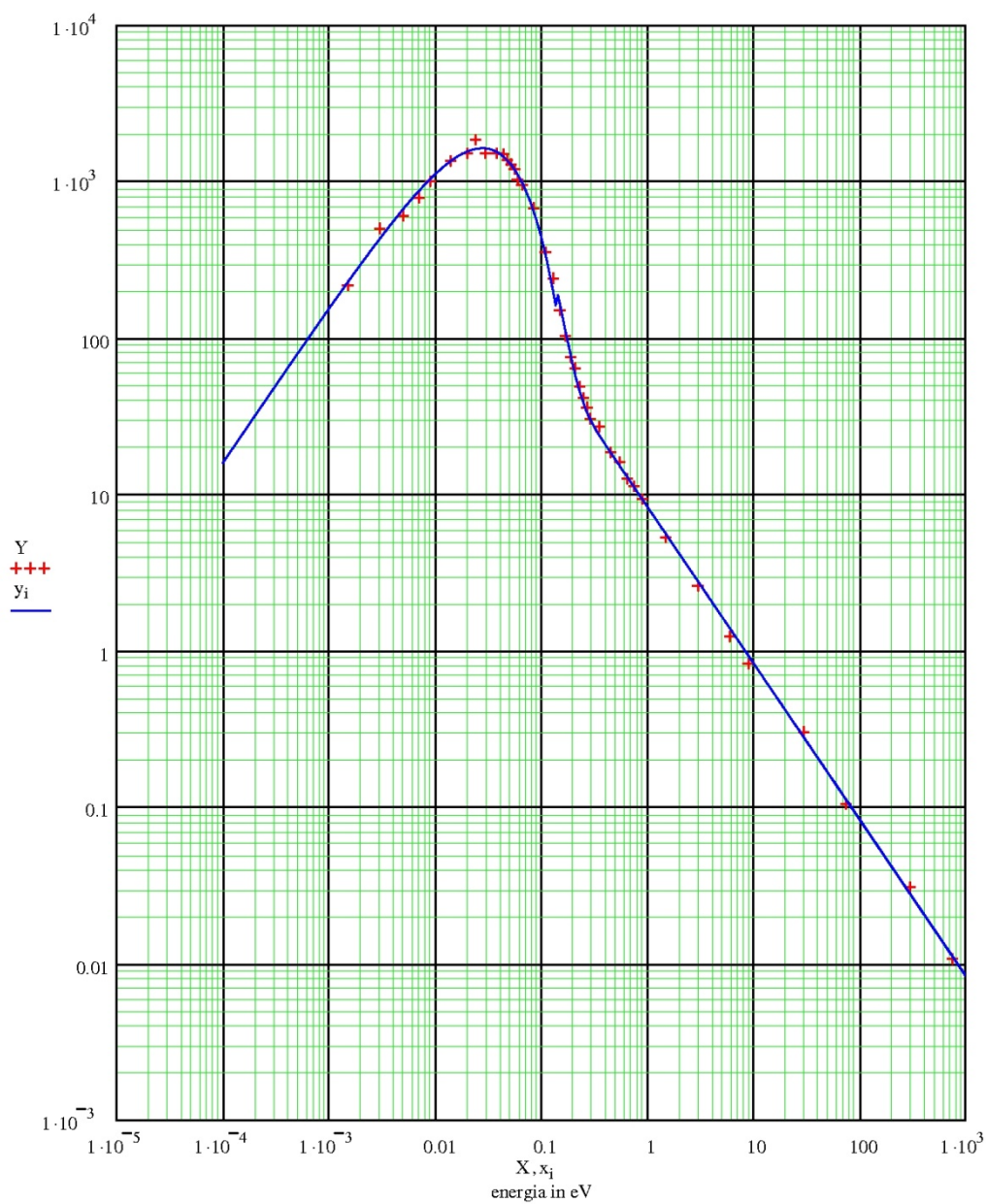
t = 50.85 gradi °C

y_{max} := 10000

x_{max} := 1000

y_{min} := 0.001

x_{min} := 10⁻⁵



data2 :=

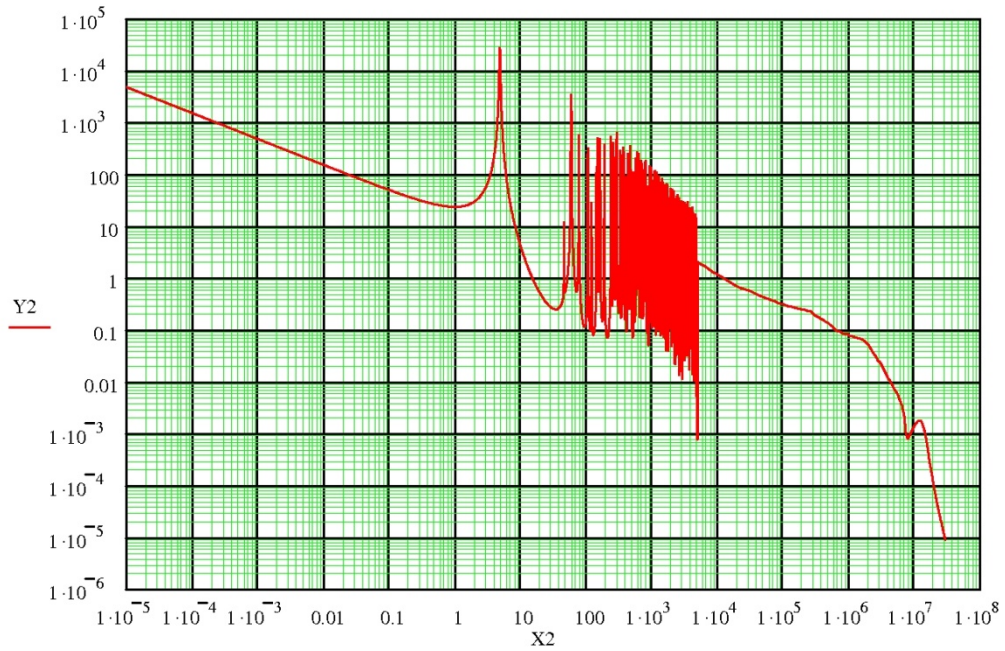
K:\.\Au-197.xls

X2 := data2⁽⁰⁾

Y2 := data2⁽¹⁾

n2 := rows(data2)

n2 = 4.318 × 10⁴



$$R1 := \sum_{i=0}^{n2-3} \left(\frac{Y2_{i+1} + Y2_i}{2} \right) \cdot \left[a \cdot \frac{(X2_{i+1} + X2_i)}{2} \cdot e^{-\frac{(X2_{i+1} + X2_i)}{2kT}} + \Phi \left(\frac{X2_i + X2_{i+1}}{2} - 5 \cdot kT \right) \cdot \frac{2 \cdot b}{X2_{i+1} + X2_i} \right] \cdot (X2_{i+1} - X2_i)$$

n0 := 113


X2_{n0} = 0.571

n2 = 4.318 × 10⁴

$$R2 := \sum_{i=n0}^{n2-3} \left(\frac{Y2_{i+1} + Y2_i}{2} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot b}{X2_{i+1} + X2_i} \right) \cdot (X2_{i+1} - X2_i)$$

Rcd := $\frac{R1}{R2}$


Rcd = 1.823

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 51 di 53
---	------------------------------	---	-----------	---------------	---------------

$$Q := \sum_{i=0}^{n-1} \left| Y_i - \left[a \cdot e^{\frac{-X_i}{kT}} \cdot (X_i)^l + \Phi(X_i - 5 \cdot kT) \cdot \frac{b}{(X_i)} \right] \right|$$


$$Q = 1.005 \times 10^3$$

Nel programma MathCAD precedente si minimizza la funzione Q variando i parametri **T**, **a** e **b**

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 52 di 53
---	------------------------------	---	-----------	---------------	---------------

7. Conclusioni

Risultato della ricerca è il buon accordo dei calcoli MCNP5 dello spettro dei neutroni del reattore TRIGA con le misure, per le posizioni usate per gli irraggiamenti.

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 53 di 53
---	------------------------------	---	-----------	---------------	---------------

8. Bibliografia

1. “Neutron Physics” K.H. Beckurts ,K. Wirtz -Springer-Verlag 1964
2. RSICC-MCNP5 Monte Carlo N-Particle Transport Code System, Los Alamos National Laboratory and Oak Ridge National Laboratory.
3. E. Martinho, I. F. Gonçalves, J. Salgado:Universal curve of epithermal neutron resonance self-shielding factors in foils, wires and spheres. Applied Radiation and Isotopes 58(2003) 371-375
4. E. Martinho, J. Salgado ,I. F. Gonçalves,:Universal curve of thermal neutron self-shielding factors in foils, wires, spheres and cylinders. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 261 (2004) 637-643
5. “Radiation Detection and Measurement” Glenn F. Knoll – JOHN WILEY & SONS
6. “Gamma and X-ray Spectrometry with Semiconductor Detectors” K. Debertin, R. G. Helmer 1988- NORTH-HOLLAND
7. “Standard Test Method for Determining Thermal Neutron Reaction Rates and Thermal Neutron Fluence Rates by Radioactivation Techniques” ASTM E262-08