

**Titolo**

**II MODELLO MONTECARLO  
DEL NOCCIOLO-RIFLETTORE  
DEL REATTORE NUCLEARE TRIGA-RC1  
DELL'ENEA**

**Descrittori**

 Tipologia del documento: **RAPPORTO TECNICO**

 Argomenti trattati: Nocciolo Reattore TRIGA-RC1  
 Modello Eterogeneo MCNP  
 Modello Omogeneo MCNP  
 Neutroni-gamma-elettroni

**Sommario**

E' stato sviluppato il modello MCNP del nocciolo-riflettore del reattore nucleare TRIGA-RC1 dell'ENEA nelle versioni Eterogeneo, Eterogeneo Semplificato, Omogeneo.

I risultati delle simulazioni e del confronto tra modelli si possono riassumere in due parti .  
 La prima evidenzia l'influenza che alcuni componenti del nocciolo hanno sulla economia neutronica del reattore : forte assorbimento guaine inox delle barrette, proprietà di Eterogeneità nella direzione della criticità, saturazione della azione del riflettore, avvicinamento alla criticità nell'assemblaggio del nocciolo (sistemi sub-critici ).

La seconda parte tratta le proprietà del nocciolo derivanti dall'impiego del modello MCNP Eterogeneo : fenomeno di Accumulo neutroni termici nel riflettore, profili multi-gruppo ( uscite MCNP ) e spettri continui con l'energia per neutroni-gamma-elettroni, rapporto di conversione, constatata congruenza tra uscite MCNP e approccio deterministico ( fisica reattore ) , ma MCNP è la fisica. Il modello MCNP possiede enormi potenzialità.

**Note**

 Autore : **Carlo Innarella**
**Copia n.**
**In carico a:**

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	5-2-2015	NOME	<b>C.Innarella</b>	<b>E.Negrenti</b>	<b>M.Sepielli</b>
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE



# INDICE

<b>Introduzione</b>	10
---------------------	----

## CAPITOLO PRIMO

### **IL REATTORE TRIGA RC-1 DELL'ENEA E I MODELLI MCNP DEL NOCCILOLO-RIFLETTORE**

#### **Introduzione**

1. Reattore Nucleare TRIGA dell'ENEA	12
2. Introduzione al codice MCNP	14
3. Interiorizzazione del codice MCNP	15
4. Modelli MCNP del nocciolo-riflettore del reattore TRIGA RC1	17
5. Alcuni Tallies utilizzati in MCNP	17
6. Le Cross-Section Tables ENDF/B of Los Alamos National Laboratory	18

## CAPITOLO SECONDO

### **SCHEMATIZZAZIONE GEOMETRICA DEI MODELLI MCNP NOCCILOLO-RIFLETTORE : ETEROGENEO, ETEROGENEO SEMPLIFICATO E OMOGENEO**

#### **Introduzione**

1. Il modello Eterogeneo MCNP	20
2. Il modello Eterogeneo Semplificato MCNP	20
3. Il modello Omogeneo MCNP	20
4. Applicazioni e Confronto tra Modelli	26
4.1 Il modello Eterogeneo MCNP e gli arricchimenti del combustibile	26
4.2 Confronto modelli MCNP : la cattura neutronica e la proprietà di eterogeneità	29
4.3 Azione riflettente della grafite all'aumentare dello spessore del riflettore	30
4.4 Assemblaggio nocciolo reattore : avvicinamento alla criticità	31

## **CAPITOLO TERZO**

### **INTERAZIONE DEI NEUTRONI CON I MATERIALI DEL NOCCIOLO-RIFLETTORE**

#### **Introduzione**

1. Fenomeno di accumulo neutroni termici nel riflettore : uscita MCNP a due gruppi di energia 36
2. Profili multigruppo MCNP e spettri continui con l'energia 41
  - 2.1 Scelta del numero di gruppi nei modelli MCNP 41
  - 2.2 Relazione tra profili multigruppo e spettri continui con l'energia 41
3. Spettri neutronici nel nocciolo-riflettore : attenuazione e deformazione 46
  - 3.1 Il fattore di deformazione dello spettro 47
4. Energia di fissione depositata nelle barrette 50
5. Energia depositata dai neutroni per rallentamento 52

## **CAPITOLO QUARTO**

### **INTERAZIONE DEI RAGGI GAMMA E DEGLI ELETTRONI CON I MATERIALI DEL NOCCIOLO-RIFLETTORE**

#### **Introduzione**

1. Spettri gamma continui con l'energia 57
2. Spettri di elettroni continui con l'energia 60

## **CAPITOLO QUINTO**

### **RAPPORTO DI CONVERSIONE E SEZIONI D'URTO MEDIE**

#### **Introduzione**

1. Il rapporto di conversione del combustibile fresco del reattore TRIGA-RC1

2. Sezioni d'urto microscopiche mediate sull'energia calcolate dal Modello MCNP 70

## **CAPITOLO SESTO**

### **LE VERSIONI DEL MODELLO MCNP DEL NOCCIOLO REATTORE TRIGA-RC1**

1. VERSIONI MODELLO ETEROGENEO 72  
2. VERSIONI MODELLO ETEROGENEO SEMPLIFICATO 73  
3. VERSIONI MODELLO OMOGENEO 73

### **DEMO CON MODELLO DINAMICO DELLO IMPIANTO DEL REATTORE TRIGA-RC1**

- 1 D . Eccesso di reattività fondamentale nel funzionamento del Reattore 76  
2 D . Il margine\_manovra\_reattività e l'eccesso\_reattività 76

### **CONCLUSIONI 78**

**Potenziali Sviluppi Futuri 79**

**Bibliografia 80**

**Appendice : 81**

La locandina del seminario : “ Il modello MCNP del nocciolo del reattore nucleare TRIGA-RC1 dell'ENEA “

#### **Allegato :**

Carlo Innarella. “ Profili Multigruppo MCNP e Spettri Continui con Energia dei Neutroni-Gamma-Elettroni prodotti dal Modello Montecarlo del Nocciolo-Riflettore del Reattore Nucleare TRIGA-RC1 dell'ENEA “  
Rapporto Tecnico SIMING-2015-02

## INDICE FIGURE

- Fig. 1.1** Vista del nocciolo del reattore TRIGA RC-1 dell'ENEA
- Fig. 1.2** Il programma di calcolo della massa critica di sistemi moltiplicanti in ambiente MATLAB
- Fig. 2.1** Configurazione Nocciolo Reattore TRIGA-RC1 ENEA CASACCIA  
Non è stato riportato il riflettore e lo schermo gamma
- Fig. 2.2** Vista sezione piana xy a metà altezza
- Fig. 2.3** Particolare barretta combustibile
- Fig. 2.4** Particolare barrette combustibile e grafite sezione assiale yz
- Fig. 2.5** Vista sezione piana xy a metà altezza
- Fig. 2.6** Particolare barretta combustibile : assenza guaina inox
- Fig. 2.7** Vista sezione piana xy a metà altezza
- Fig. 2.8** Vista sezione assiale yz
- Fig. 2.9** Keff in funzione delle distribuzioni spaziali Arricchimento
- Fig. 2.10** Andamento Keff e Std dev in funzione dei run per la distribuzione n. 7
- Fig. 2.11** Riflettore di grafite (red) e di acqua
- Fig. 2.12** Caricamento del combustibile e sistemi sottocritici : fasi 1 e 2.1
- Fig. 2.13** Caricamento del combustibile e sistemi sottocritici : fasi 2.2 e 3
- Fig. 2.14** Caricamento del combustibile e sistemi sottocritici : fasi 4 e 5
- Fig. 2.15** Caricamento del combustibile : nocciolo completo ( fase 6 )
- Fig. 3.1** Configurazione Nocciolo Reattore TRIGA-RC1 ENEA CASACCIA  
Non è stato riportato il riflettore e lo schermo gamma
- Fig. 3.2** Flusso neutronico veloce (blue) e termico sul diametro A1-A2 :  
nocciolo, riflettore , schermo gamma
- Fig. 3.3** Flussi neutronici veloce e termico nella barretta e in acqua
- Fig. 3.4** Flusso neutronico veloce (blue) e termico nel riflettore :  
fenomeno di accumulo
- Fig. 3.5** Schema di generazione delle librerie applicative del codice ECCO operante in ERANOS
- Fig. 3.6** Profilo neutronico normalizzato fuel rod B-2 (nero) e cella h20 (rosso) intorno rod
- Fig. 3.7** Flusso neutronico normalizzato continuo con l'energia : fuel rod B-2
- Fig. 3.8** Spettro neutronico normalizzato fuel rod B2, C3, D4, E5, F6, cella centrale riflettore ( blu ) nel campo termico-epitermico
- Fig. 3.9** Spettro neutronico normalizzato fuel rod B2, C3, D4, E5, F6, grafite rod G7 ( blu ), cella centrale riflettore ( blu ) e schermo gamma ( verde )
- Fig. 3.10** Profilo neutronico normalizzato fuel rods B-2, C-3, D-4, E-5, F-6 e grafite rod G-7 (blue)
- Fig. 3.11** Fattore di deformazione dello spettro neutronico sul diametro A1-A2 :  
nocciolo-riflettore-schermo gamma (rosso), h2o (blu)

- Fig. 3.12** Energia prodotta (depositata ) fissione fuel rod B-2
- Fig. 3.13** Energia prodotta fissione nelle fuel rods B-2 (blu) ,  
C-3 , D-4 ,E-5 , F-6
- Fig. 3.14** Energia depositata neutrone nella cella rod B-2
- Fig. 3.15** Profilo neutronico e energia depositata neutrone in acqua :  
cella 5001 intorno rod B-2
- Fig. 3.16** Profilo neutronico e energia depositata neutrone nella cella  
grafite rod G-7
- Fig. 3.17** Profilo neutronico e energia depositata neutrone nella cella 5013  
di grafite del riflettore
- Fig. 4.1** Flusso gamma normalizzato fuel rod B-2
- Fig. 4.2** Spettro gamma normalizzato cella h20 intorno fuel rod B-2
- Fig. 4.3** Profilo gamma normalizzato cella centrale grafite riflettore
- Fig. 4.4** Flusso gamma normalizzato cella alluminio involucro esterno
- Fig. 4.5** Flusso elettroni normalizzato fuel rod B-2
- Fig. 4.6** Flusso elettroni normalizzato cella H2O intorno fuel rod B-2
- Fig. 4.7** Flusso elettroni normalizzato grafite rod G-7
- Fig. 4.8** Flusso elettroni normalizzato cella alluminio
- Fig. 5.1** Il vettore densità della corrente angolare
- Fig. 5.2** Le sezioni d'urto microscopiche mediate sullo spettro termico
- Fig. 1D** Potenze prodotta fissione, trasmessa, rilascita dopo scram : RUN 2 (8 h)
- Fig. 2D** Reattività Xenon dopo scram : RUN 2 ( 8 h )
- Fig. 3D** Reattività totale dopo scram : RUN 2 ( 8 h )
- Fig. 4D** Potenze del nocciolo per nuova accensione reattore : RUN3 ( 8 h )
- Fig. 5D** Dinamica dei parametri R.D.M. e E.R. con il bruciamento del  
combustibile

## INDICE TABELLE

- Tabella n. 2.1** Confronto modelli reattore TRIGA-RC1
- Tabella n. 2.2** I modelli dei sistemi moltiplicanti sottocritici del nocciolo  
del TRIGA-RC1
- Tabella n. 3.1** Lower limits (eV) of the 179/49 group neutron library energy  
structure HELIOS-2 code
- Tabella n. 3.2** Gruppi di energia
- Tabella n. 3.3** Energia fissione depositata in rod B-2
- Tabella n. 3.4** Energia perduta dai neutroni per rallentamento
- Tabella n. 3.5** Energia perduta dai neutroni per rallentamento
- Tabella n. 3.6** Energia perduta dai neutroni per rallentamento
- Tabella n. 3.7** Energia perduta dai neutroni per rallentamento
- Tabella n. 4.1** Velocità relativistiche delle particelle in funzione dell'energia
- Tabella n. 5.1** Modelli MCNP utilizzati

**LISTA DISTRIBUZIONE**

Nome	Unità/Ente	Sede / Distr. elettronica
Ing. M. Sepielli	UTFISST ENEA	massimo.sepielli@enea.it
Ing. O. Aronica	UTFISST ENEA	osvaldo.aronica@enea.it
Ing. F. Pisacane	UTFISST ENEA	fabrizio.pisacane@enea.it
Dott. G. Abbate	UTFISST ENEA	giulia.abbate@enea.it
Dott. M. Ciotti	UTFISST ENEA Frascati	marco.ciotti@enea.it
Dott. M. Carta	UTFISST REANUC ENEA	mario.cart@enea.it
Dott. E. Santoro	“ “	emilio.santoro@enea.it
Dott. G. Bianchini	“ “	Alfredo Giancarlo Bianchini
Dott. L. Falconi	“ “	luca.falconi@enea.it
Ing. D. Manco	“ “	donato.manco@enea.it
Ing. M. Palomba	“ “	mario.palomba@enea.it
Ing. F. Silvestri	“ “	fernando.silvestri@enea.it
Ing. A. Grossi	“ “	angelo.grossi@enea.it
Dott. A. Santagata	“ “	alfonso.santagata@enea.it
Dott. O. Fiorani	“ “	orlando.fiorani@enea.it
Ing. A. Ratto	“ “	Antonino Ratto
Ing. E. Negrenti	UTFISST SIMING ENEA	emanuele.negrenti@enea.it
Ing. B. Fresilli	“ “	benedetto.fresilli@enea.it
Ing. G. Di Costanzo	“ “	giovanni.dicostanzo@enea.it
Ing. M. D'Apice	“ “	massimo.dapice@enea.it
Ing. C. Innarella	“ “	carlo.innarella@enea.it
Ing. C. Parisi	“ “	carlo.parisi@enea.it
Ing. A. Tripi	“ “	arcangelo.tripi@enea.it
Ing. M. Serra	“ “	mario.serra@enea.it
P.I. C. Galli	“ “	costantino.galli@enea.it
Ing. M. Cappelli	UTFISST MEPING ENEA	mauro.cappelli@enea.it
Ing. A. Dodaro	UTFISST CATNUC ENEA	alessandro.dodaro@enea.it
Ing. G. Giorgiantoni	UTFISST RADSITO ENEA	giorgio.giorgiantoni@enea.it
Ing. P. Di Giamberardino	UTFISST STG ENEA	pasquale.digiamberardino@enea.it
Dott. M. Capogni	UT-METROLOGIA ENEA	marco.capogni@enea.it
Ing. L. Quintieri	“ “	lina.quintieri@enea.it

Prof. Agostino Mathis Univ. La Sapienza Roma 'amathisit@yahoo.com'  
Prof. Antonio Cammi Polimi Milano 'Antonio Cammi'

Ing. Giovanni Magrotti LENA Univ. Pavia 'Giovanni Magrotti'  
Dott. Andrea Salvini LENA Univ. Pavia 'Andrea Salvini'

## Introduzione

E' stato sviluppato il modello **MCNP** del nocciolo-riflettore del reattore nucleare TRIGA-RC1 dell'ENEA nelle versioni **Eterogeneo**, **Eterogeneo Semplificato**, **Omogeneo**. I risultati che si sono ottenuti dalle simulazioni e dal confronto dei modelli si possono riassumere in due parti .

La prima evidenza l'influenza che alcuni componenti del nocciolo hanno sulla economia neutronica del reattore :

1. forte assorbimento guaine inox delle barrette
2. proprietà di Eterogeneità nella direzione della Criticità
3. saturazione azione del riflettore
4. avvicinamento alla Criticità nell'assemblaggio del nocciolo : sistemi sub-critici

La seconda parte tratta le proprietà del nocciolo desunte dall'impiego del modello MCNP Eterogeneo :

5. fenomeno di Accumulo Neutroni Termici nel Riflettore : due gruppi di energia
6. profili multigruppo ( uscita MCNP ) e spettri continui con energia : attenuazione e deformazione per neutroni, gamma ed elettroni
7. rapporto di conversione
8. constatata congruenza tra uscite MCNP e teoria approccio deterministico ( fisica reattore ) , ma MCNP è la fisica
9. Il modello MCNP possiede enormi potenzialità ...

Il rapporto si articola in sei capitoli, una demo con modello dinamico, la bibliografia e un allegato.

### Capitolo 1

Vengono forniti le caratteristiche principali del reattore TRIGA RC1 DELL'ENEA ,

una breve introduzione del ambiente e dell'interiorizzazione del sistema Montecarlo e infine cenni sui modelli MCNP del nocciolo, corredati delle grandezze fisiche ( dette tallies in MCNP ) e delle sezioni d'urto utilizzate .

### Capitolo 2

Vengono riportati le schematizzazioni geometriche dei modelli MCNP del nocciolo-riflettore del TRIGA-RC1 e i risultati del loro impiego e confronto. In particolare si evidenzia l'influenza di alcuni componenti del nocciolo sulla economia neutronica del reattore.

### Capitolo 3

Nel capitolo vengono analizzati i profili neutronici MCNP multigruppo, gli spettri continui con l'energia, l'energia perduta dai neutroni per rallentamento e l'energia prodotta dalla fissione nelle barrette di combustibile ( modello Eterogeneo MCNP). Le grandezze fisiche dette dipendono dalla posizione. Si inizia l'analisi dalla barretta più interna e ci si sposta lungo il raggio del nocciolo verso l'esterno incontrando le celle del riflettore-schermo gamma, figura 3.1 . In questo modo si valuta l'attenuazione e la deformazione dello spettro nell'ipotesi di simmetria cilindrica. Le barrette che si trovano vicino alle barre di controllo ( assorbitori ) costituiscono delle singolarità.

### Capitolo 4

Nel capitolo vengono analizzati gli spettri continui con l'energia dei raggi gamma e degli elettroni con energia superiore a un KeV . Si inizia con la barretta più interna e ci si sposta verso la periferia seguendo il raggio del nocciolo. In questo modo si può apprezzare l'attenuazione a la deformazione dello spettro in funzione della posizione.

Gli spettri gamma ed elettronici sono fisicamente correlati.

### Capitolo 5

Il modello MCNP ha calcolato il rapporto di conversione del combustibile fresco e le sezioni d'urto microscopiche mediate sull'energia dei materiali del nocciolo.

### Capitolo 6

Viene riportato l'elenco delle versioni dei modelli MCNP Eterogeneo , Eterogeneo Semplificato, Omogeneo .

### Demo

Infine segue una dimostrazione con il modello dinamico del reattore TRIGA-RC1 relativa al eccesso di reattività .

## CAPITOLO PRIMO

# IL REATTORE TRIGA RC-1 DELL'ENEA E I MODELLI MCNP DEL NOCCILO-RIFLETTORE

## Introduzione

Vengono forniti le caratteristiche principali del reattore TRIGA-RC1 DELL'ENEA , una breve introduzione dello ambiente e dell'interiorizzazione del sistema Montecarlo e infine dei cenni sui modelli MCNP del nocciolo, corredati delle grandezze fisiche ( dette tallies in MCNP ) e delle sezioni d'urto utilizzate .

## 1. Reattore Nucleare TRIGA dell'ENEA

Il reattore TRIGA RC-1 ( Training Radio Isotope General Atomic Reattore Casaccia 1 ), realizzato nel 1960 con potenza di 100 kW nell'ambito dell'iniziativa USA Atom for Peace, è stato portato alla potenza di 1 MW su progetto ENEA.

Le caratteristiche principali sono :

- Reattore termico a piscina
- Potenza max : 1 MW
- Flusso neutronico max :  $2.7 \times 10^{13}$  neutroni / cm<sup>2</sup>.sec alla potenza di 1 MW
- Facilities di irraggiamento

Viene impiegato :

- come sorgente di neutroni per irraggiamenti a supporto della scienza dei materiali, della biologia e dello sviluppo di radio farmaci
- a supporto della didattica dei corsi di Ingegneria Nucleare

## Reattore Nucleare TRIGA-RC1 dell'ENEA



**Fig. 1.1** Vista del nocciolo del reattore TRIGA RC-1 dell'ENEA

## 2. Introduzione al codice MCNP

I codici di neutronica più evoluti si occupano della soluzione dell'equazione del trasporto dei neutroni. Questa può essere ottenuta numericamente mediante tecniche deterministiche o stocastiche.

Le prime implementano metodi numerici idonei alla soluzione di un sistema di equazioni puntuali, ottenute per discretizzazione analitica in spazio, energia e direzione dell'equazione del trasporto.

La soluzione del citato sistema di equazioni, a meno delle approssimazioni del modello analitico e del processo di discretizzazione, rende disponibili un set completo di informazioni che descrivono le proprietà neutroniche del sistema.

Le tecniche stocastiche ( es. Monte Carlo ) si basano sulla ricostruzione del flusso neutronico a partire dalla simulazione del comportamento di un insieme di particelle di prova durante la loro propagazione ( approccio Lagrangiano ) all'interno del modello studiato e dal campionamento ( censimento ) degli eventi che caratterizzano la storia di ciascuna particella.

La procedura di ricostruzione del flusso non è inficiata da alcuna approssimazione intrinseca Monte Carlo ( fisica pura ) se non quelle geometriche e di descrizione dei materiali al fine di ridurre i tempi di calcolo. Il risultato è fortemente legato all'analisi statistica del comportamento del campione, che deve essere significativo.

In ENEA vengono impiegati entrambi gli approcci, quello deterministico legato prevalentemente al codice ERANOS e quello stocastico legato ai codici MCNP/MCNPX, sviluppati da Los Alamos National Laboratory.

Nella pagina successiva vengono riportate alcune informazioni relative ai codici MCNP, MCNPX e ai soggetti intervenuti nello sviluppo .

Il modello MCNP del nocciolo del reattore TRIGA RC1 dell'ENEA ha richiesto l'impiego del codice MCNP, la cui versione è installata in Cresco-Casaccia e Cresco4-Portici dell'ENEA.

 <b>UT-FISST</b>	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.
	<b>SIMING-2015-01</b>	0	L	15 di 83

## MCNP ( A General Monte Carlo N-Particle Transport Code )

```

*****
*
*           Copyright Notice for MCNPX
*
* This program was prepared by the Regents of the
* University of California at Los Alamos National
* Laboratory (the University) under contract number
* W-7405-ENG-36 with the U.S. Department of Energy
* (DOE). The University has certain rights in the
* program pursuant to the contract and the program
* should not be copied or distributed outside your
* organization. All rights in the program are
* reserved by the DOE and the University. Neither
* the U.S. Government nor the University makes any
* warranty, express or implied, or assumes any
* liability or responsibility for the use of this
* software.
*
*****

```

### Utilizzata Versione MCNP installata in Cresco-Casaccia / Cresco4-Portici

### 3. Interiorizzazione del codice MCNP

La personale e forte curiosità per l'approccio Lagrangiano presente in un codice Monte Carlo, sviluppato per la prima volta da Enrico Fermi, è stata la molla che ha innescato il processo di sviluppo del modello MCNP del nocciolo del TRIGA RC1.

Iniziando con i primi elementi della sintassi MCNP e procedendo nell'approfondimento mi sono reso conto di avere bisogno di sistemi moltiplicanti critici da modellizzare per ottenere risultati fisicamente coerenti. Pertanto ho

sviluppato fuori linea, in ambiente MATLAB, dei programmi di calcolo per la determinazione delle dimensioni critiche di differenti geometrie, **figura 1.2** .

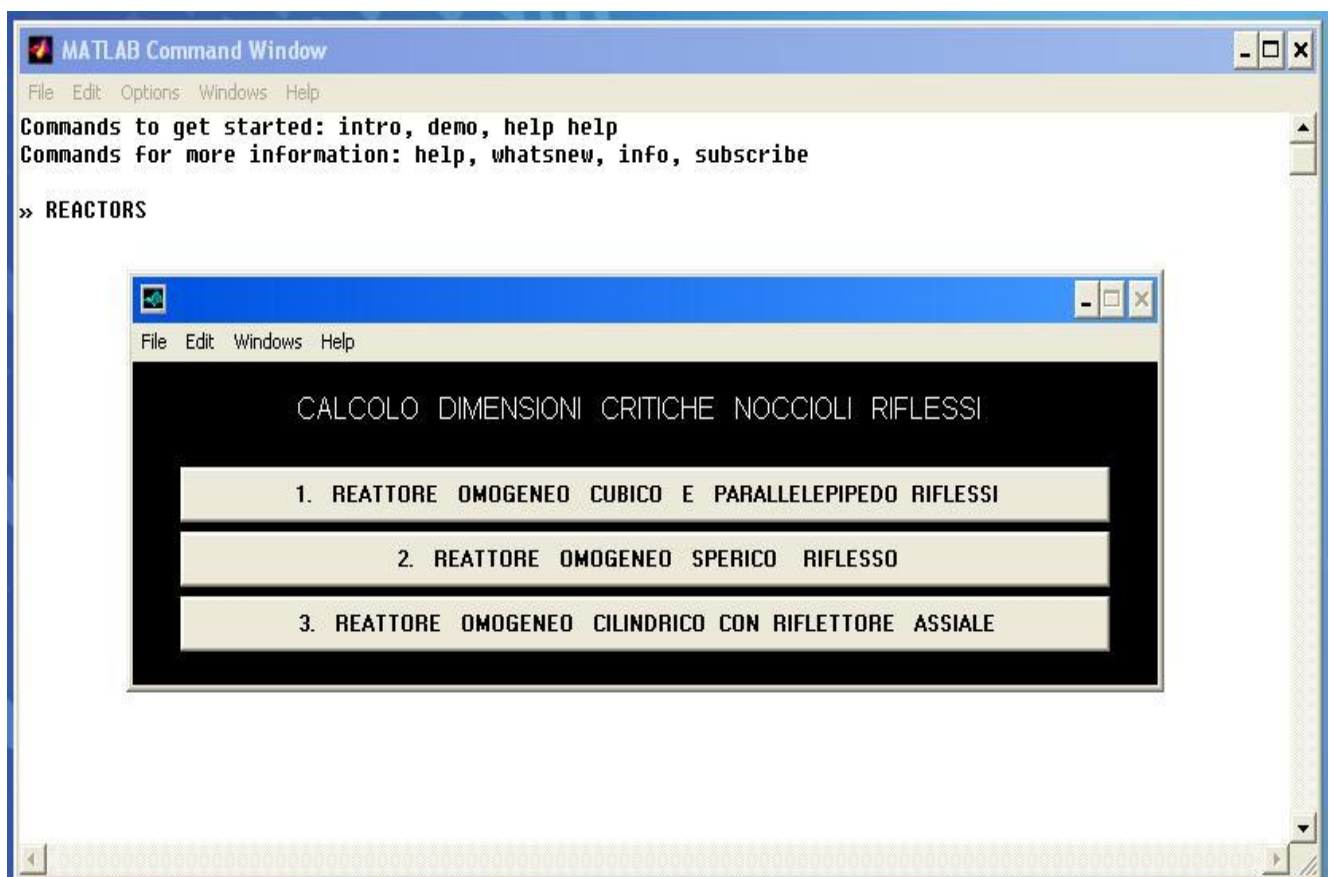
Ciò ha permesso di ottenere programmi MCNP sempre più complessi e completi da un punto di vista fisico fino al momento in cui la metodologia MCNP è risultata matura.

Il passo successivo è risultato obbligato, affrontare la modellizzazione di un vero reattore nucleare, il TRIGA RC1 dell'ENEA .

**1. CURIOSITA' LAGRANGIANA**

**2. NECESSARI SISTEMI MOLTIPLICANTI CRITICI ( IPOTETICI REATTORI )**

**3. PASSO OBBLIGATO : REATTORE REALE => TRIGA-RC1**



**Fig. 1.2** Il programma di calcolo della massa critica di sistemi moltiplicanti in ambiente MATLAB

#### 4. Modelli MCNP del nocciolo-riflettore del reattore TRIGARC1

In MCNP sono stati sviluppati i modelli del nocciolo del reattore TRIGA-RC1 :

- **ETEROGENEO**
- **ETEROGENEO SEMPLIFICATO ( RODS SENZA CAMICIA INOX )**
- **OMOGENEO**

Ogni tipo di modello presenta più versioni in funzione dell'obiettivo preposto per limiti di sistema .

#### 5. Alcuni Tallies utilizzati in MCNP

Vengono riportate alcune grandezze utilizzate dal modello MCNP , dette tallies :

##### Surface current :

$$F1 = \int_A dA \int_E dE \int_{4\pi} d\Omega \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}_s, E, \Omega)$$

( particelle )

##### Average surface flux :

$$F2 = \frac{1}{A} \int_A dA \int_E dE \int_{4\pi} d\Omega \Phi(\mathbf{r}_s, E, \Omega)$$

( particelle / cm<sup>2</sup> )

##### Average flux in a cell :

$$F4 = \frac{1}{V} \int_V dV \int_E dE \int_{4\pi} d\Omega \Phi(\mathbf{r}, E, \Omega)$$

( particelle / cm<sup>2</sup> )

##### Energy deposition by N or P

F6 ( MeV / g )

##### Fission energy deposition in a cell

F7 ( MeV / g )

**F1** calcola le particelle che attraversano la superficie A, **F2** e **F4** i flussi medi su A e nel volume V, **F6** e **F7** le energie depositate dai neutroni e dai fotoni .

## 6. Le Cross-Section Tables ENDF/B of Los Alamos National Laboratory

Il sistema MCNP legge automaticamente le sezioni d'urto dei materiali presenti nei modelli MCNP .

### Interazione neutroni-materiali

tables from file **endf60**

table	length			
1001.60c	2079	1-h-1 from endf-vi.1	mat 125	11/25/93
6000.60c	18237	6-c-nat from endf-vi.1	mat 600	11/25/93
7014.60c	54936	7-n-14 from special lanl endf-6 evaluation	mat 725	11/25/93
8016.60c	54249	8-o-16 from endf/b-vi	mat 825	11/25/93
14000.60c	98643	14-si-nat from endf/b-vi	mat1400	11/25/93
24050.60c	106534	24-cr-50 from endf/b-vi.1	mat2425	11/25/93
24052.60c	106383	24-cr-52 from endf/b-vi.1	mat2431	11/25/93
24053.60c	104288	24-cr-53 from endf/b-vi.1	mat2434	11/25/93
24054.60c	88201	24-cr-54 from endf/b-vi.1	mat2437	11/25/93
26054.60c	110252	endf/b-vi.1 fe54a	mat2625	11/25/93
26056.60c	161938	endf/b-vi.1 fe56a	mat2631	11/25/93
26057.60c	125776	endf/b-vi.1 fe57a	mat2634	11/25/93
28058.60c	154892	28-ni-58 from endf/b-vi.1	mat2825	11/25/93
28060.60c	100137	28-ni-60 from endf/b-vi.1	mat2831	11/25/93
28061.60c	87272	28-ni-61 from endf/b-vi.1	mat2834	11/25/93
28062.60c	74201	28-ni-62 from endf/b-vi.1	mat2837	11/25/93
28064.60c	59867	28-ni-64 from endf/b-vi.1	mat2843	11/25/93
29063.60c	106983	29-cu-63 from endf/b-vi.2	mat2925	11/27/93
29065.60c	105725	29-cu-65 from endf/b-vi.2	mat2931	11/27/93
40000.60c	45269	40-zr-nat from endf-vi.1	mat4000	11/27/93
92235.60c	261105	92-u-235 from lanl proposed endf-vi.2	mat9228	11/27/93
warning.	92235.60c	lacks delayed neutron cross sections.		
92238.60c	205705	92-u-238 from endf-vi.2	mat9237	11/27/93
warning.	92238.60c	lacks delayed neutron cross sections.		

### Interazione fotoni-materiali

tables from file **mcplib04**

1000.04p	1898	ENDF/B-VI Release 8 Photoatomic Data for 1-H	mat 100	02/07/03
6000.04p	3152	ENDF/B-VI Release 8 Photoatomic Data for 6-C	mat 600	02/07/03
7000.04p	3194	ENDF/B-VI Release 8 Photoatomic Data for 7-N	mat 700	02/07/03
8000.04p	3272	ENDF/B-VI Release 8 Photoatomic Data for 8-O	mat 800	02/07/03
14000.04p	4792	ENDF/B-VI Release 8 Photoatomic Data for 14-SI	mat1400	02/07/03
24000.04p	5682	ENDF/B-VI Release 8 Photoatomic Data for 24-CR	mat2400	02/07/03
26000.04p	5718	ENDF/B-VI Release 8 Photoatomic Data for 26-FE	mat2600	02/07/03
28000.04p	5826	ENDF/B-VI Release 8 Photoatomic Data for 28-NI	mat2800	02/07/03
29000.04p	5754	ENDF/B-VI Release 8 Photoatomic Data for 29-CU	mat2900	02/07/03
40000.04p	7703	ENDF/B-VI Release 8 Photoatomic Data for 40-ZR	mat4000	02/07/03

92000.04p 10808 ENDF/B-VI Release 8 Photoatomic Data for 92-U mat9200 02/07/03

maximum photon energy set to 20.0 mev (maximum electron energy)  
warning. cannot generate delayed gamma-rays from fissions.

**Interazione elettroni-materiali**tables from file **e103**

1000.03e	2329	6/6/98
6000.03e	2333	6/6/98
7000.03e	2333	6/6/98
8000.03e	2333	6/6/98
14000.03e	2339	6/6/98
24000.03e	2345	6/6/98
26000.03e	2345	6/6/98
28000.03e	2347	6/6/98
29000.03e	2347	6/6/98
40000.03e	2353	6/6/98
92000.03e	2379	6/6/98

## CAPITOLO SECONDO

# SCHEMATIZZAZIONE GEOMETRICA DEI MODELLI MCNP NOCCILOLO-RIFLETTORE : ETEROGENEO, ETEROGENEO SEMPLIFICATO E OMOGENEO

## Introduzione

Vengono riportati le schematizzazioni geometriche dei modelli MCNP del nocciolo-riflettore del TRIGA RC1 e i risultati del loro impiego e confronto. In particolare l'influenza di alcuni componenti del nocciolo nella economia neutronica del reattore.

### 1. Il modello Eterogeneo MCNP

I modelli MCNP Eterogeneo, Eterogeneo Semplificato e Omogeneo fanno riferimento alla configurazione iniziale del nocciolo del reattore TRIGA RC1 riportato nella **figura 2.1** . Il nocciolo è stato caricato con un Eccesso di Reattività del 4.9 %  $\Delta k / K$  , presenta 74 Elementi di combustibile ( fuel rods ) e presenta la configurazione base C-1, C-7, C-10 per le barre di controllo fueled follower e F-1 per la barra di Regolazione fine.

Il nocciolo-riflettore è stato suddiviso rispetto all'asse in tre sezioni da piani normali passanti per le superfici di separazione grafite-combustibile-grafite interne alle barrette. Le masse di grafite costituiscono il riflettore assiale del nocciolo. La suddivisione assiale consente di separare le zone attive e passive delle barrette.

Il nocciolo-riflettore è formato da circa 500 celle occupate da materiali differenti.

La **figura 2.2** si riferisce alla sezione assiale a metà altezza del nocciolo-riflettore-schermo gamma, mentre le **figure 2.3 e 2.4** presentano dei particolari delle barrette di combustibile.

### 2. Il modello Eterogeneo Semplificato MCNP

Il modello Eterogeneo Semplificato MCNP differisce dal modello Eterogeneo MCNP

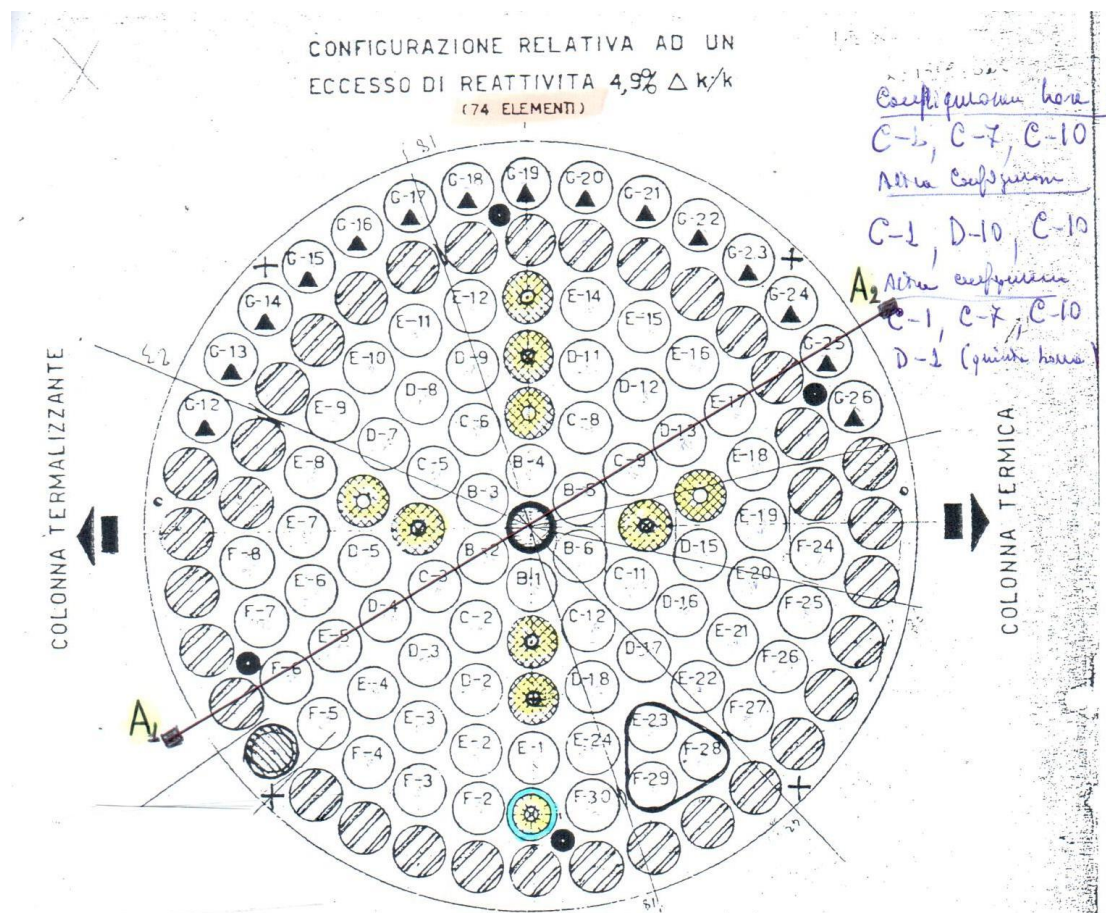
fondamentalmente per l'assenza delle guaine inox delle barrette di combustibile e di grafite. L'obiettivo è di valutare il peso dell'assorbimento delle guaine nella economia neutronica del reattore. Pertanto verrà effettuato un confronto tra modelli.

Le figure 2.5 e 2.6 mostrano la schematizzazione geometrica del modello semplificato e un particolare delle barrette senza guaina.

### 3. Il modello Omogeneo MCNP

Il modello Omogeneo MCNP ha le stesse dimensioni del nocciolo-riflettore del reattore TRIGA-RC1 ed è costituito da una massa omogenea dei materiali del nocciolo caratterizzata dalle frazioni di massa o molari. Nella massa è presente anche l'acciaio inox delle guaine per un significativo confronto con gli altri modelli.

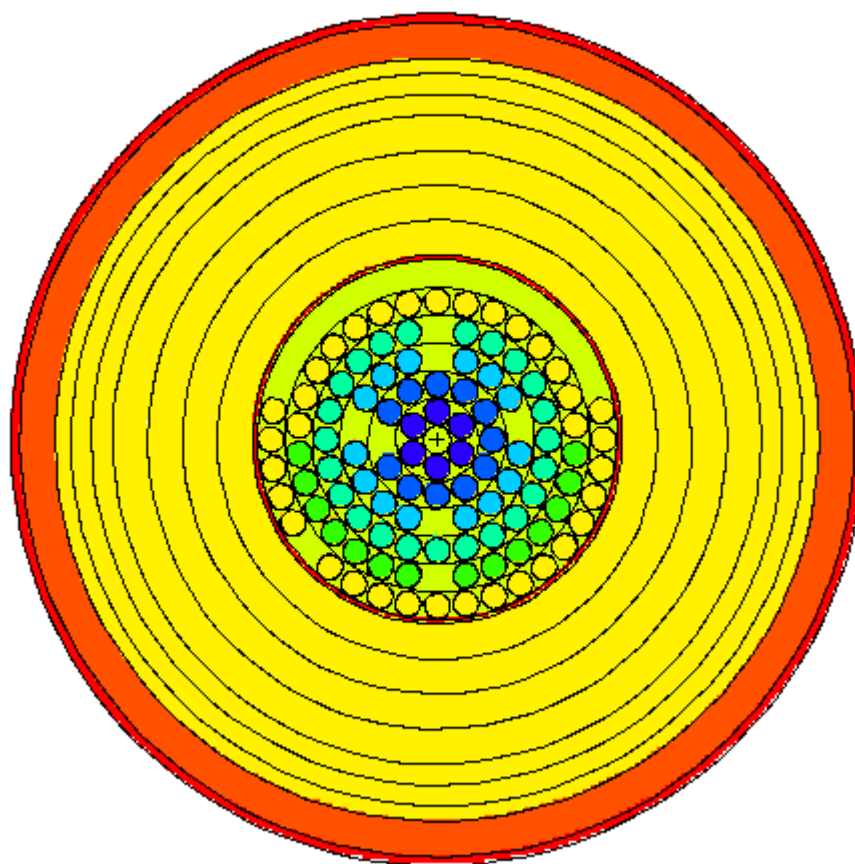
Le figure 2.7 e 2.8 mettono in evidenza la geometria del modello.



**Fig. 2.1** Configurazione Nocciolo Reattore TRIGA-RC1 ENEA CASACCIA  
Non è stato riportato nella pianta il riflettore di grafite e lo schermo gamma di piombo

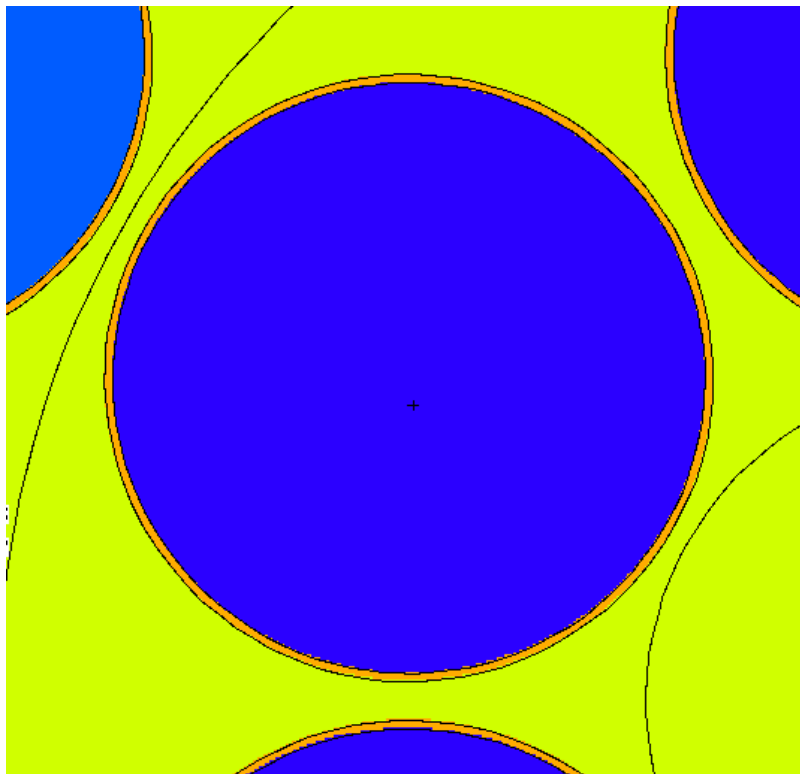
## SCHEMATIZZAZIONE GEOMETRIA DEI MODELLI MCNP

### MODELLO ETEROGENEO MCNP NOCCIOLO TRIGA-RC1

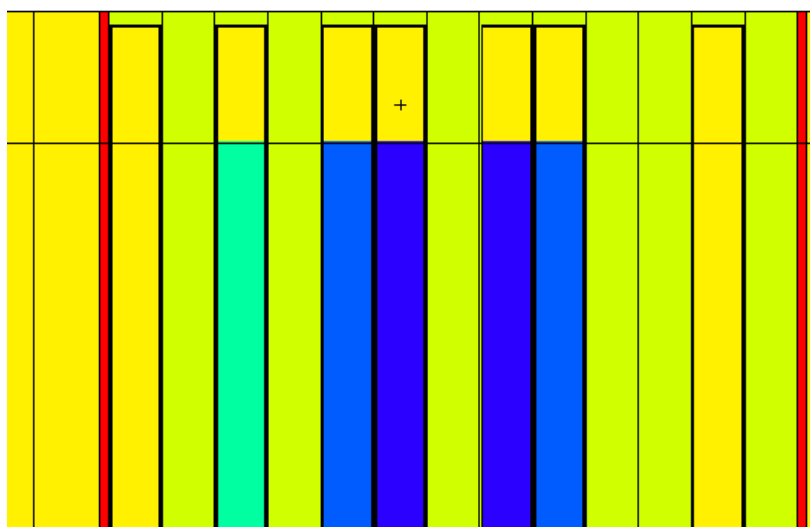


**Fig. 2.2** Vista sezione piana xy a metà altezza

**MODELLO ETEROGENEO MCNP NOCCIOLO TRIGA-RC1**

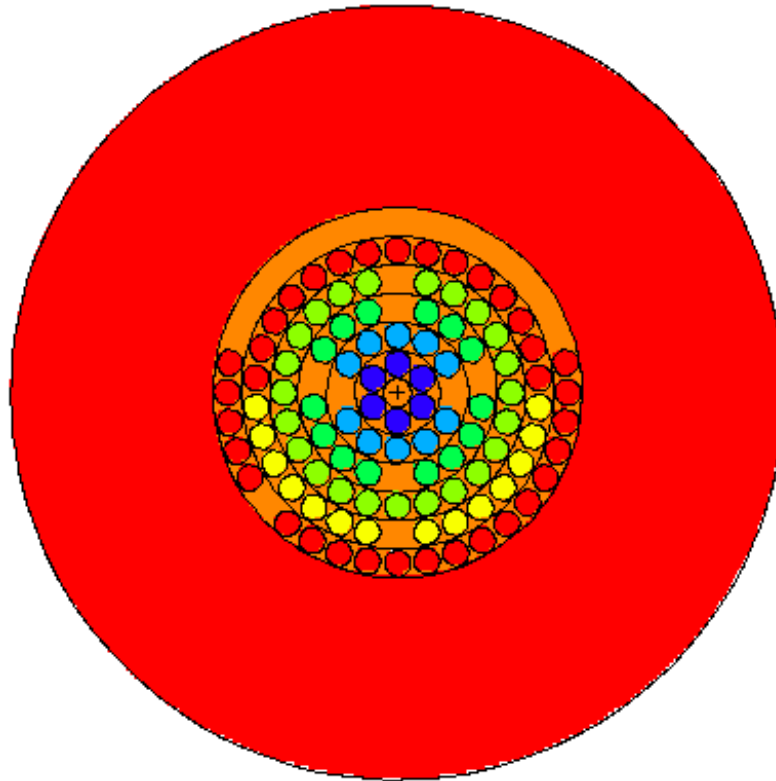


**Fig. 2.3** Particolare barretta combustibile

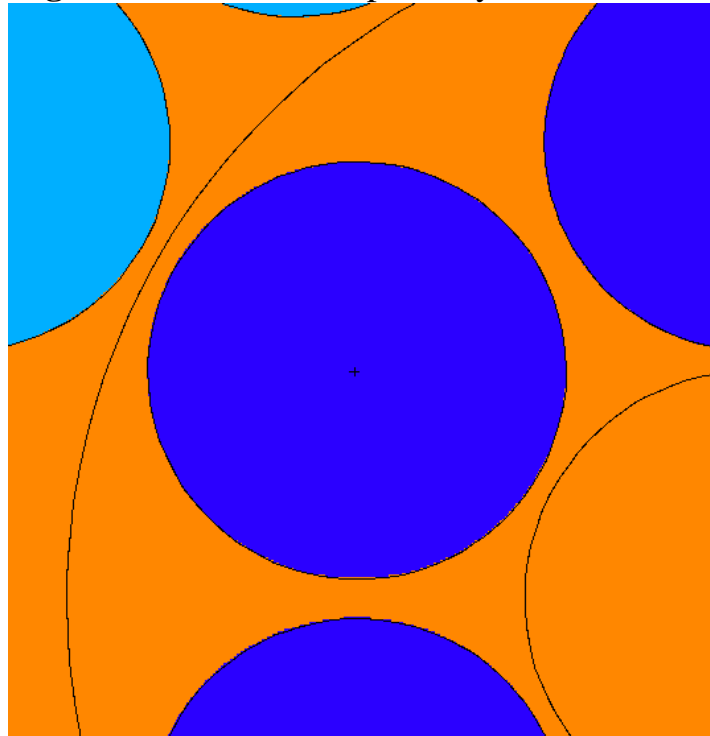


**Fig 2.4** Particolare barrette combustibile e grafite sezione assiale yz

**MODELLO ETEROGENEO SEMPLIFICATO MCNP NOCCIOLO TRIGA-RC1**

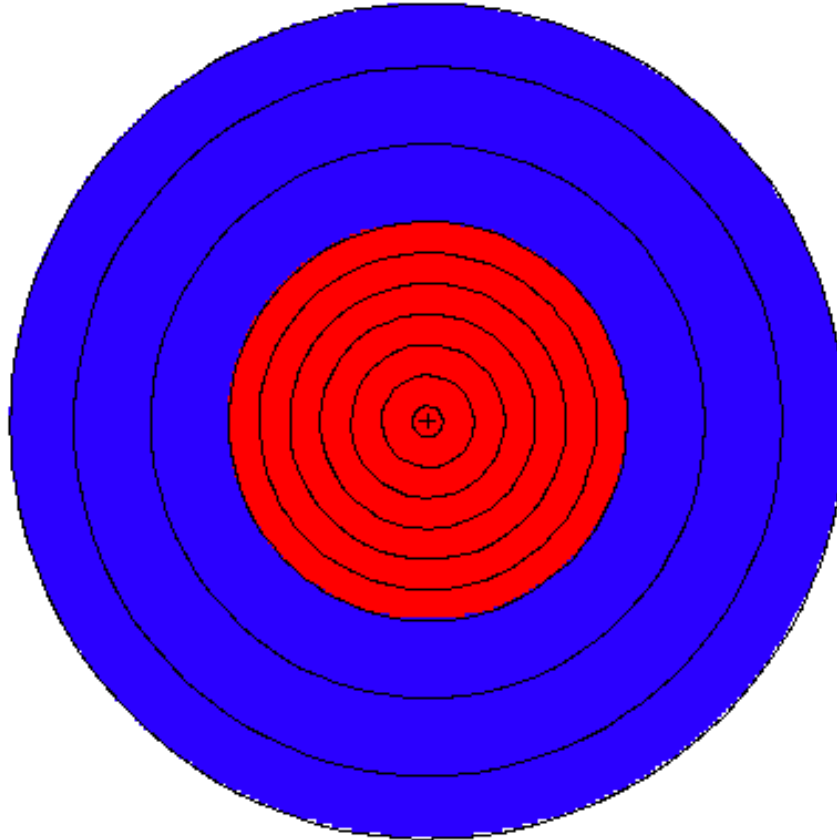


**Fig. 2.5** Vista sezione piana xy a metà altezza

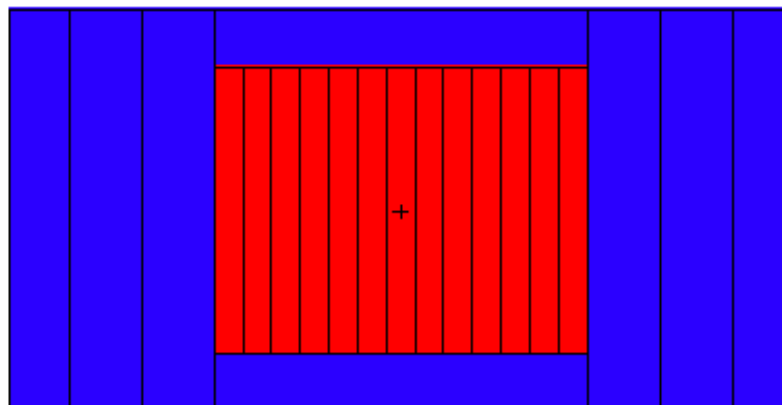


**Fig. 2.6** Particolare barretta combustibile : assenza guaina inox

**MODELLO OMOGENEO MCNP NOCCIOLO TRIGA-RC1**



**Fig. 2.7** Vista sezione piana xy a metà altezza



**Fig. 2.8** Vista sezione assiale yz

## 4. Applicazioni e Confronto tra Modelli

Le applicazioni e il confronto tra Modelli mettono in evidenza l'influenza che alcuni componenti del nocciolo esercitano sulla economia neutronica del reattore.

### 4.1 Il modello Eterogeneo MCNP

Il modello Eterogeneo MCNP del nocciolo del TRIGA-RC1 è stato fatto girare con differenti distribuzioni di arricchimento in fissile nelle fuel rods per individuare quella particolare distribuzione che meglio approssima il valore del  $K_{eff}$  sperimentale ( o eccesso di reattività ) inserito nel nocciolo.

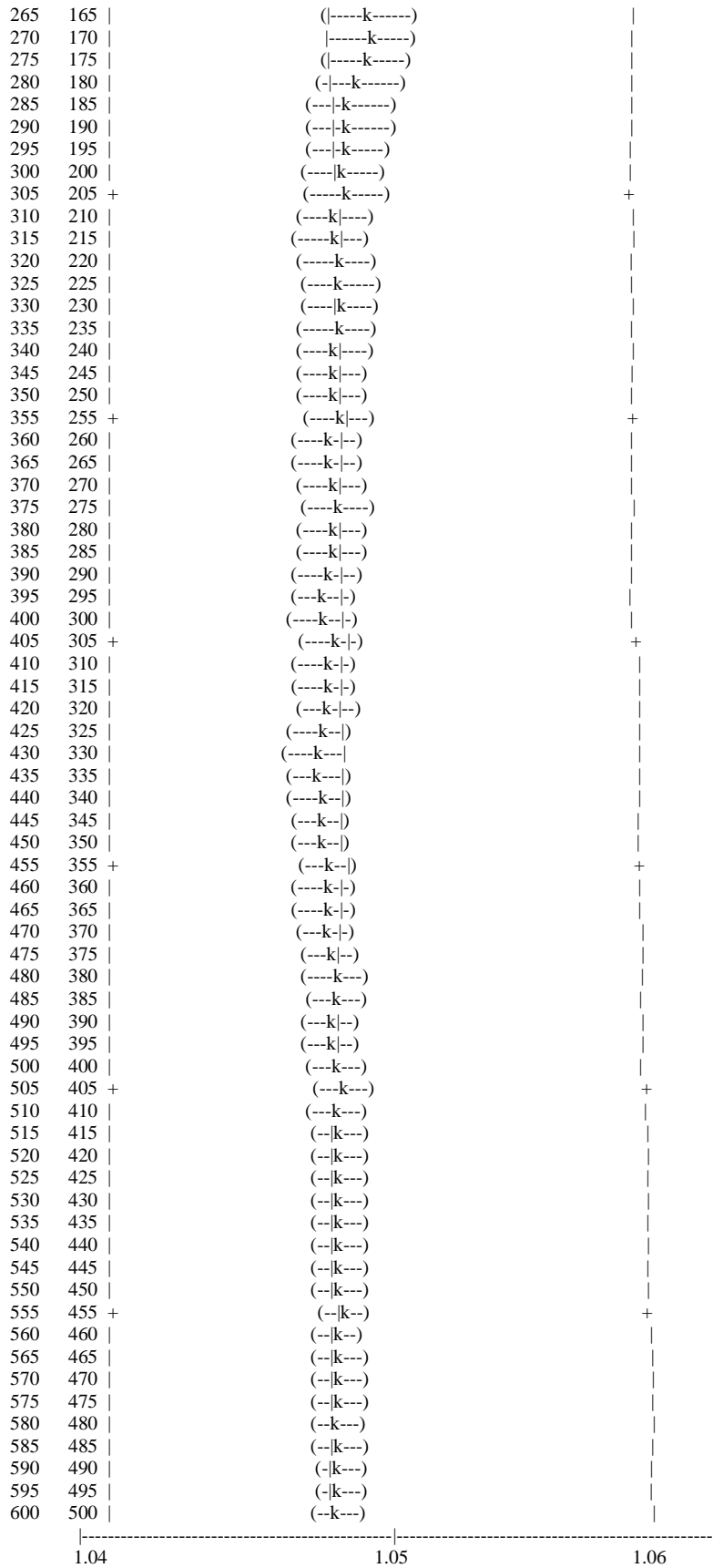
La distribuzione n.7 si avvicina più di tutte al valore sperimentale  **$K_{eff}=1.05$  (\*)** , **figura 2.9**, avente un arricchimento medio in U-235 di circa il 20 % in peso. Detta distribuzione risulterà di base nelle applicazioni successive con i modelli MCNP.

La **figura 2.10** riporta l'andamento simulato del  $K_{eff}$  e della propria deviazione standard relativi alla distribuzione n.7 in funzione del numero di run effettuati dal modello. Cinquecento run con 2000 particelle/run costituiscono un campione di popolazione statisticamente consistente e significativo.

**Relativamente a Eccesso Reattività e Margine di Reattività Disponibile per le Manovre → Demo con Modello dinamico Triga alla fine del rapporto**

(\*) Valore sperimentale inserito inizialmente nel nocciolo secondo il Rapporto di Sicurezza del Triga della General Atomic





**Fig. 2.10** Andamento Keff e Std dev in funzione dei run per la distribuzione n. 7

## 4.2 Confronto modelli MCNP : la cattura neutronica e la proprietà di eterogeneità

Il confronto tra i modelli MCNP si traduce nel calcolo e confronto del Keff riportato nella **tabella n. 2.1** sottostante.

**TABELLA n. 2.1**  
 Confronto modelli reattore TRIGA-RC1

Modelli	Eterogeneo	Eterogeneo Semplificato ( rods senza Inox )	Omogeneo con Inox
Valori Keff			
Nocciolo + Riflettore	<b>1.04954</b>	<b>1.09664</b>	<b>0.9706</b>
Nocciolo circondato h2o	1.03551		

Osservazioni :

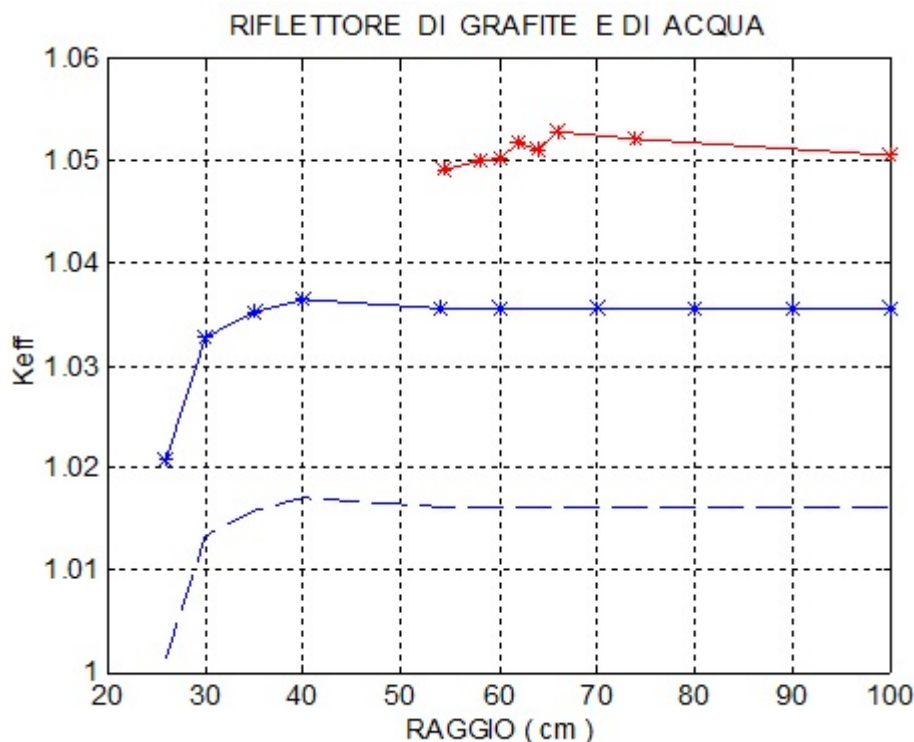
1. Guaine Inox costituiscono **rilevante assorbitore** nella economia neutronica reattore.  
 Ciò verrà messo in ulteriore evidenza nel calcolo del rapporto di conversione
2. Eterogeneità : va nella direzione della criticità . Confronto con modello omogeneo.  
 Reattori di potenza ad Uranio naturale diventano critici se eterogenei ( CANDU )
3. Riflettore grafite fondamentale.

Nel paragrafo successivo si vedrà l'influenza delle dimensioni del riflettore sul valore del Keff

### 4.3 Azione riflettente della grafite all'aumentare dello spessore del riflettore

Partendo dalle dimensioni reali del riflettore, raggio = 54 cm , si aumenta nel modello Eterogeneo MCNP lo spessore del riflettore e si calcola il  $K_{eff}$  per vederne la variazione. L'andamento del  $K_{eff}$ , curva rossa nella **figura 2.11**, non presenta aumenti significativi rivelando che il parametro ha raggiunto il valore di saturazione . Le oscillazioni presenti sono legate a un fattore statistico in quanto ogni asterisco corrisponde ad una simulazione MCNP di un milione di storie. La stessa cosa si osserva per il nocciolo immerso in acqua, curva blu, salvo constatare una minore azione riflettente rispetto al caso con il riflettore.

#### AZIONE RIFLETTENTE GRAFITE ALL'AUMENTARE SPESSORE : MODELLO ETEROGENEO



**Fig. 2.11** Riflettore di grafite (red) e di acqua

**Per  $R > R_0=54$  cm  $\rightarrow$  saturazione azione riflettente**

\* rosso rifl. grafite

\* blu rifl. H2O

- - blu rifl. H2O  $\rightarrow$  distribuzione arricchimento inferiore al 20% in peso di U-235

#### 4.4 Assemblaggio nocciolo reattore : avvicinamento alla criticità

Le fasi di caricamento delle fuel rods nel nocciolo vengono effettuate sotto battente di acqua e in presenza del riflettore di grafite . L'assemblaggio del nocciolo viene suddiviso in sette fasi. Ognuna di queste con la propria geometria definisce un sistema moltiplicante sottocritico a cui corrisponde un modello MCNP che calcola il  $K_{eff}$  , si veda la **tabella n. 2.2** .

Il valore del  $K_{eff}$  aumenta quando nel mosaico del nocciolo si completano le corone circolari contenenti le barrette di combustibile fino all'esaurimento di queste ( nocciolo completo ).

Le **figure 2.12, 2.13, 2.14, 2.15** rappresentano la schematizzazione geometrica dei modelli sottocritici.

### TABELLA n. 2.2

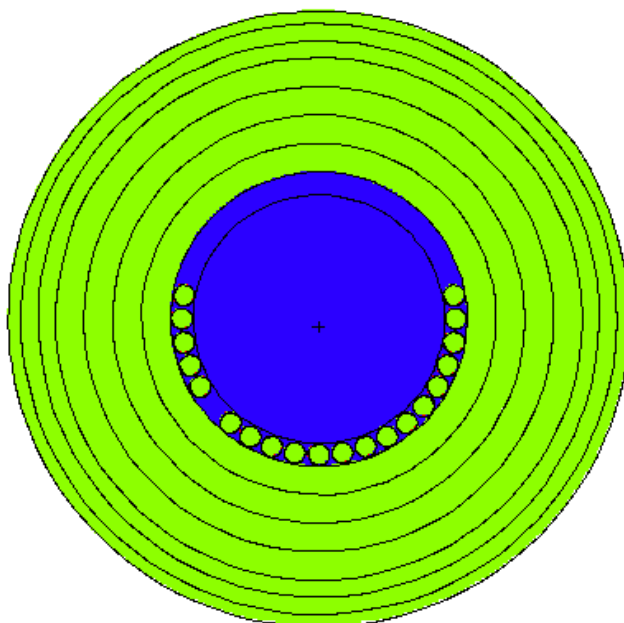
I modelli dei sistemi moltiplicanti sottocritici del nocciolo del TRIGA-RC1

---

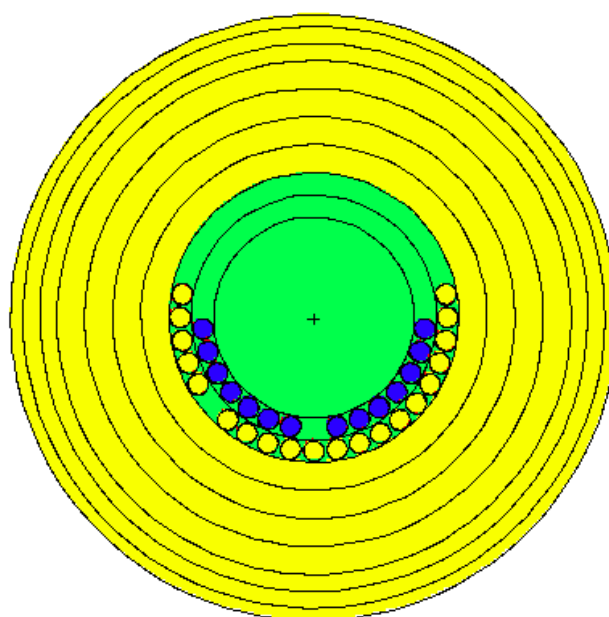
<b>CORE1</b>	Vengono assemblate <b>20</b> Grafite Rods nella corona n. <b>6</b> esterna $K_{eff} = -$ Std dev = - 2000 storie/run 600 run
<b>CORE2_1</b>	Vengono assemblate <b>14</b> Fuel Rods nella corona n. <b>5</b> $K_{eff} = 0.50554$ Std dev = 0.00061 2000 storie/run 600 run
<b>CORE2_2</b>	Vengono assemblate <b>15</b> Grafite Rods che completano la corona n. <b>5</b> $K_{eff} = 0.50655$ Std dev = 0.00062 2000 storie/run 600 run
<b>CORE3</b>	Vengono assemblate <b>23</b> Fuel Rods nella corona n. <b>4</b> $K_{eff} = 0.74254$ Std dev = 0.00072 2000 storie/run 600 run
<b>CORE4</b>	Vengono assemblate <b>14</b> Fuel Rods nella corona n. <b>3</b> $K_{eff} = 0.86794$ Std dev = 0.00073 2000 storie/run 600 run
<b>CORE5</b>	Vengono assemblate <b>11</b> Fuel Rods nella corona n. <b>2</b> $K_{eff} = 0.97685$ Std dev = 0.00074 2000 storie/run 600 run
<b>TRIGARC1</b>	Vengono assemblate le ultime <b>6</b> Fuel Rods nella corona n. <b>1</b> Nocciolo Completato $K_{eff} = 1.04879$ Std dev = 0.00073 2000 storie/run 600 run

---

**ASSEMBLAGGIO NOCCIOLO : AVVICINAMENTO ALLA CRITICITA'**



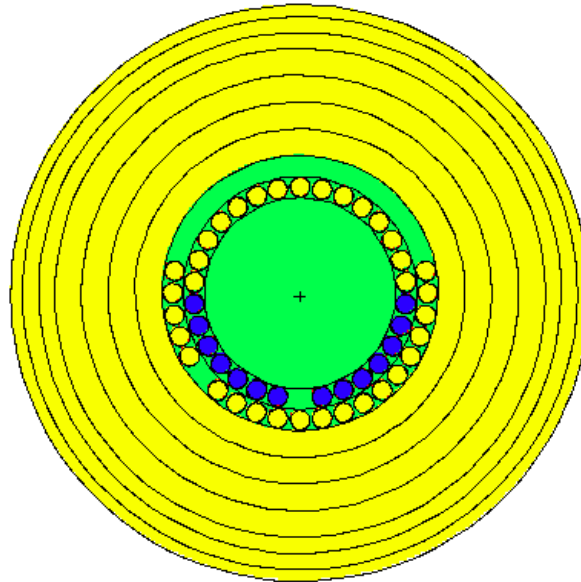
Modello MCNP : CORE1



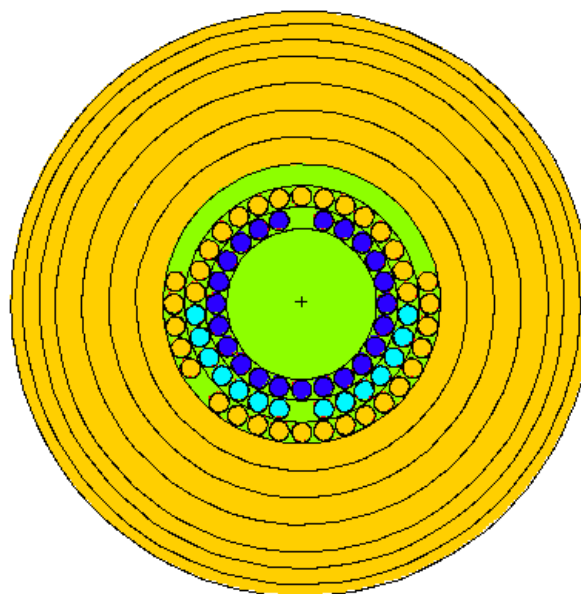
$K_{eff} = 0.50554$  Modello MCNP : CORE2\_1

**Fig. 2.12** Caricamento del combustibile e sistemi sottocritici : fasi 1 e 2.1

**ASSEMBLAGGIO NOCCIOLO : AVVICINAMENTO ALLA CRITICITA'**



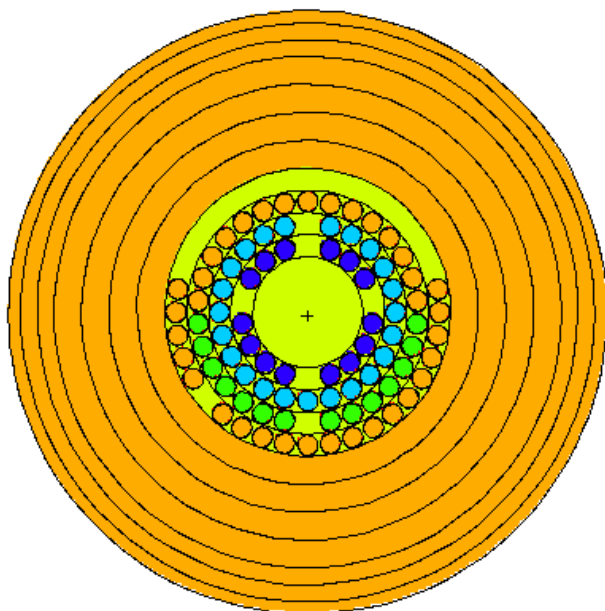
$K_{eff} = 0.50655$  Modello MCNP : CORE2\_2



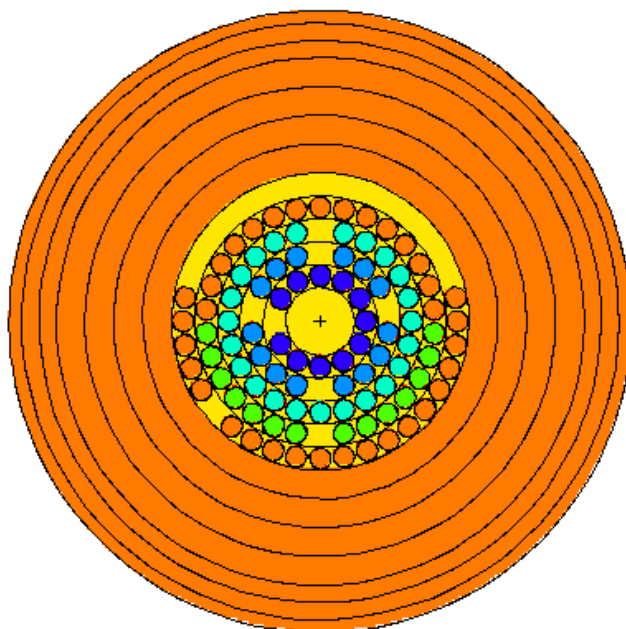
$K_{eff} = 0.74254$  Modello MCNP : CORE3

**Fig. 2.13** Caricamento del combustibile e sistemi sottocritici : fasi 2.2 e

**ASSEMBLAGGIO NOCCIOLA : AVVICINAMENTO ALLA CRITICITA'**



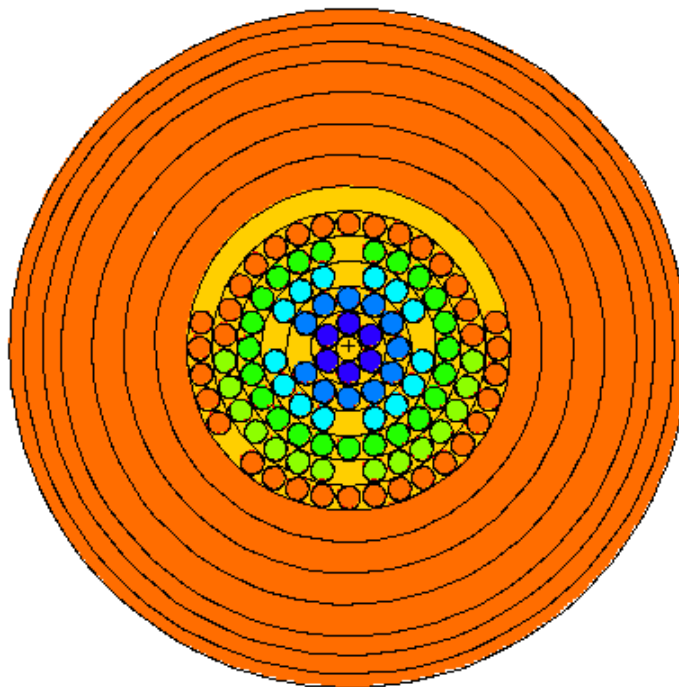
$K_{eff} = 0.86794$  Modello MCNP : CORE4



$K_{eff} = 0.97685$  Modello MCNP : CORE5

**Fig. 2.14** Caricamento del combustibile e sistemi sottocritici : fasi 4 e 5

**ASSEMBLAGGIO NOCCIOLO : AVVICINAMENTO ALLA CRITICITA'**



COMPLETO  $K_{eff} = 1.04879$  Modello MCNP : TRIGARCI

**Fig. 2.15** Caricamento del combustibile : nocciolo completo ( fase 6 )

## CAPITOLO TERZO INTERAZIONE DEI NEUTRONI CON I MATERIALI DEL NOCCIOLO-RIFLETTORE

### Introduzione

Nel capitolo vengono analizzati i profili neutronici MCNP multigruppo, gli spettri continui con l'energia, l'energia perduta dai neutroni per rallentamento e prodotta dalla fissione nelle barrette di combustibile calcolati dal modello Eterogeneo MCNP. Le grandezze fisiche dette dipendono dalla posizione. Si inizia pertanto l'analisi dalla barretta più interna e ci si sposta lungo il raggio del nocciolo verso l'esterno incontrando anche le celle del riflettore-schermo gamma, **figura 3.1** . In questo modo si può apprezzare l'attenuazione e la deformazione dello spettro nell'ipotesi di simmetria cilindrica. Le barrette che si trovano vicino alle barre di controllo ( assorbitori ) costituiscono delle singolarità.

### 1. Fenomeno di accumulo neutroni termici nel riflettore : uscita MCNP a due gruppi di energia

La simulazione MCNP ( modello Eterogeneo ) con uscita a due gruppi di energia, flusso veloce e termico, ha consentito di costruire i grafici riportati nella **figura 3.2** .

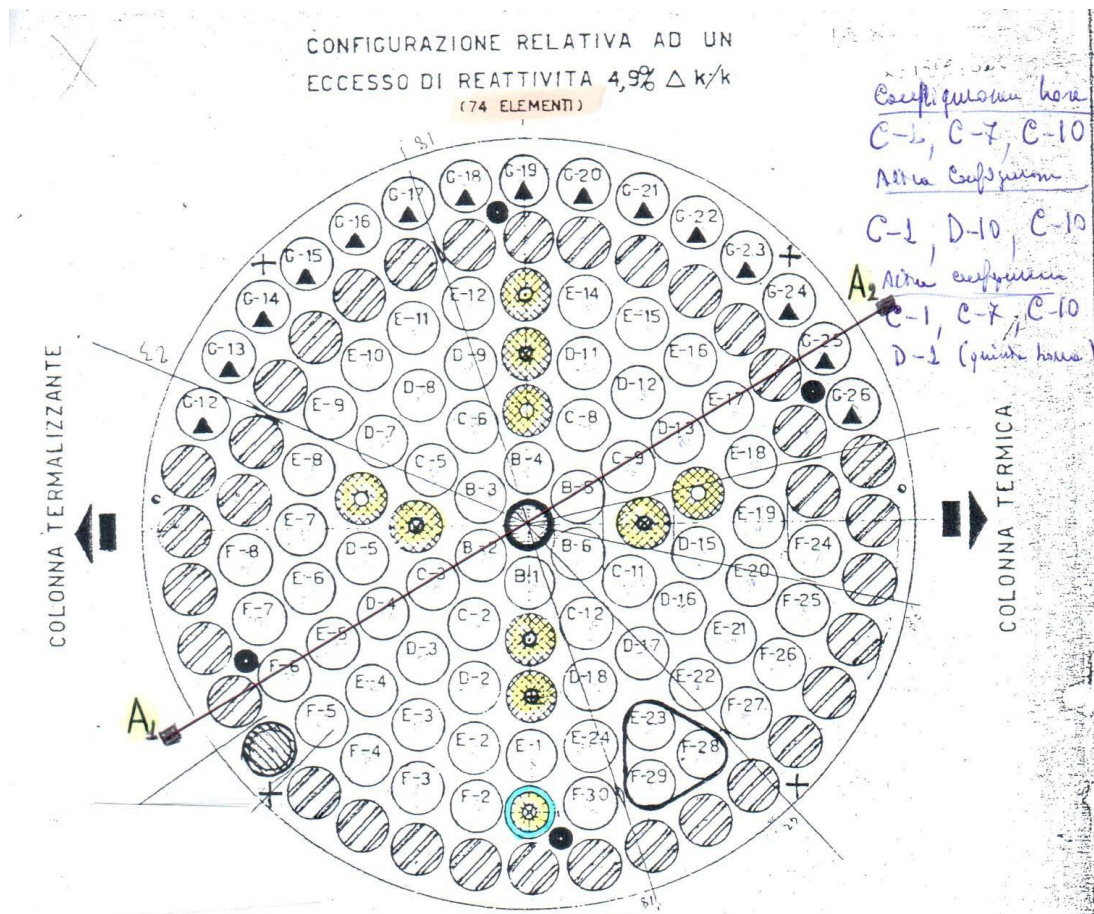
I flussi neutronici si attenuano con il raggio andando verso l'esterno. Se si fissa poi l'attenzione su una barretta di combustibile e sulla propria cella di acqua che circonda la prima, il flusso veloce assume il valore max e il flusso termico il valore min all'interno della barretta, come illustrato anche nella **figura 3.3** .

Infine, nella zona del riflettore, **figura 3.4** , si osserva l'inversione dei flussi.

Ciò costituisce un fenomeno di accumulo per i neutroni termici, che si manifesta a regime quando il termine di sorgente termico uguaglia i termini riflessivo ed emergente dal riflettore.

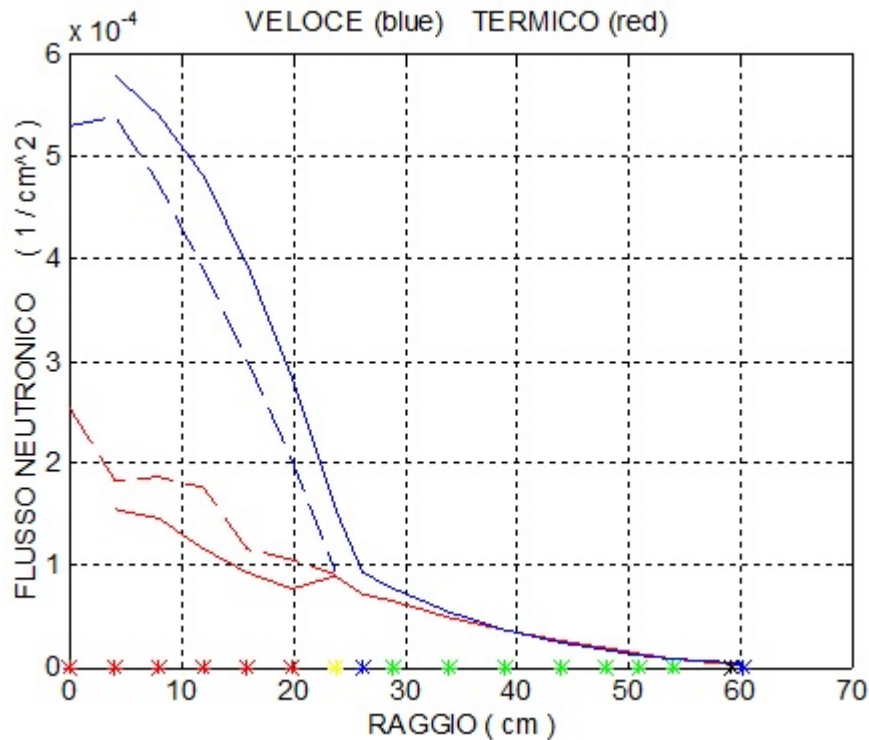
Il risultato MCNP è stato confermato analiticamente dal calcolo dei flussi veloce e termico per il reattore cilindrico riflesso. Gli eventi costituiscono una prova di convergenza tra approccio Lagrangiano MCNP e approccio deterministico.

**Profili neutronici a 2 gruppi e multi-gruppo di energia,  
spettri continui con l'energia  
sul diametro A1-A2 del nocciolo e del riflettore**



**Fig. 3.1** Configurazione Nocciolo Reattore TRIGA-RC1 ENEA CASACCIA  
Non è stato riportato il riflettore grafite e lo schermo gamma piombo

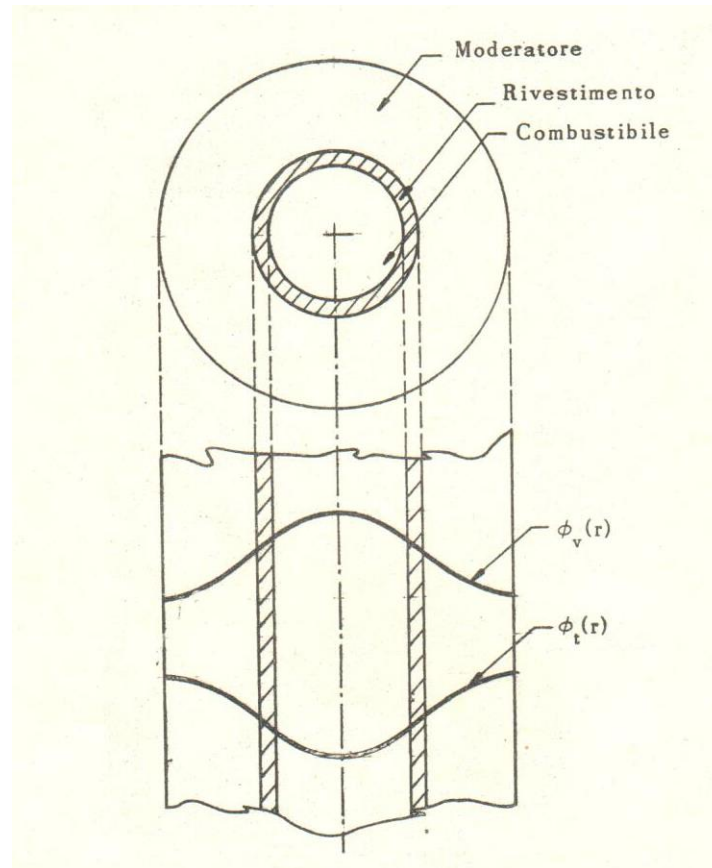
**DUE GRUPPI DI ENERGIA :  
FLUSSO NEUTRONICO VELOCE E TERMICO (0.1 eV)**



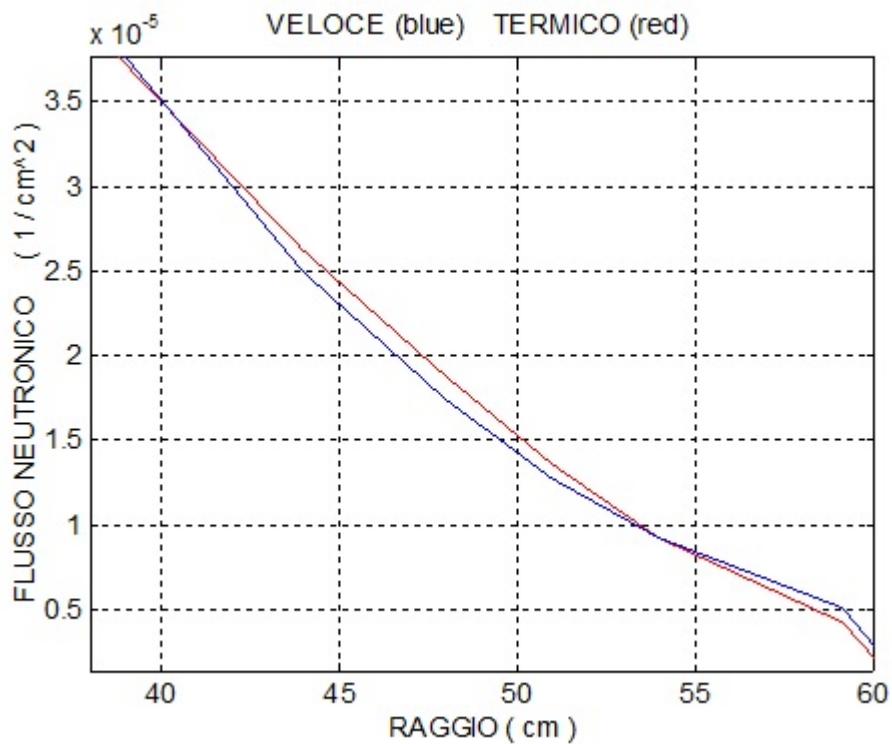
**Fig. 3.2** Flusso neutronico veloce (blue) e termico sul diametro A1-A2 :  
noccio, riflettore , schermo gamma

Legenda :

- \* **rosso** = baricentro barrette combustibile ; baricentro celle H2O centrale e intorno barrette
- \* **giallo** = baricentro barretta grafite; baricentro cella H2O intorno barretta
- \* **blu** = raggi medi celle radiali rivestimento di alluminio
- \* **verde** = raggi medi celle radiali riflettore grafite
- \* **nero** = raggio medio schermo piombo per gamma



**Fig. 3.3** Flussi neutronici veloce e termico nella barretta e in acqua



**Fig. 3.4** Flusso neutronico veloce (blue) e termico nel riflettore : fenomeno di accumulo

Fenomeno di accumulo : questo risultato è stato trovato anche analiticamente per il reattore cilindrico radialmente riflesso

## 2. Profili multigruppo MCNP e spettri continui con l'energia

### 2.1 Scelta del numero di gruppi nei modelli MCNP

La scelta del numero di gruppi di energia in un modello Monte Carlo può essere arbitraria. Nei modelli MCNP sviluppati si è preferito fare riferimento all'esperienza che traspare dai codici neutronici deterministici HELIOS-2 e ERANOS , /7/ , /8/ , inserendo nei modelli scelte con **49, 177 e 334** gruppi di energia.

Nella **tabella n. 3.1** di HELIOS-2 sono riportati i valori di energia degli intervalli che definiscono i gruppi di neutroni, mentre nella **figura 3.5** è riportato lo schema di generazione delle librerie applicative del codice ECCO operante in ERANOS (\*).

La scelta del numero dei gruppi per i modelli MCNP fa riferimento all'esperienza dei codici HELIOS-2 e ERANOS

### 2.2 Relazione tra profili multigruppo e spettri continui con l'energia

Ogni gruppo di energia o riga di particelle è definito come l'integrale dello spettro continuo con l'energia nell'intervallo di energia che definisce il gruppo .

Deriva dalla definizione che il profilo multigruppo dipende dalla scelta del numero di gruppi, lo spettro continuo con l'energia è invece unico.

Un esempio di uscita multigruppo MCNP a 177 gruppi (riferimento HELIOS-2 ) è riportato nella **figura 3.6** , relativo alla cella fuel rod B-2 e alla propria cella di acqua ( rosso ) .

Si può notare che nel campo veloce il profilo neutronico nella barretta supera quello in acqua mentre nel campo termico avviene il contrario, coerentemente con quanto visto per l'uscita MVCNP a due gruppi del paragrafo 1.

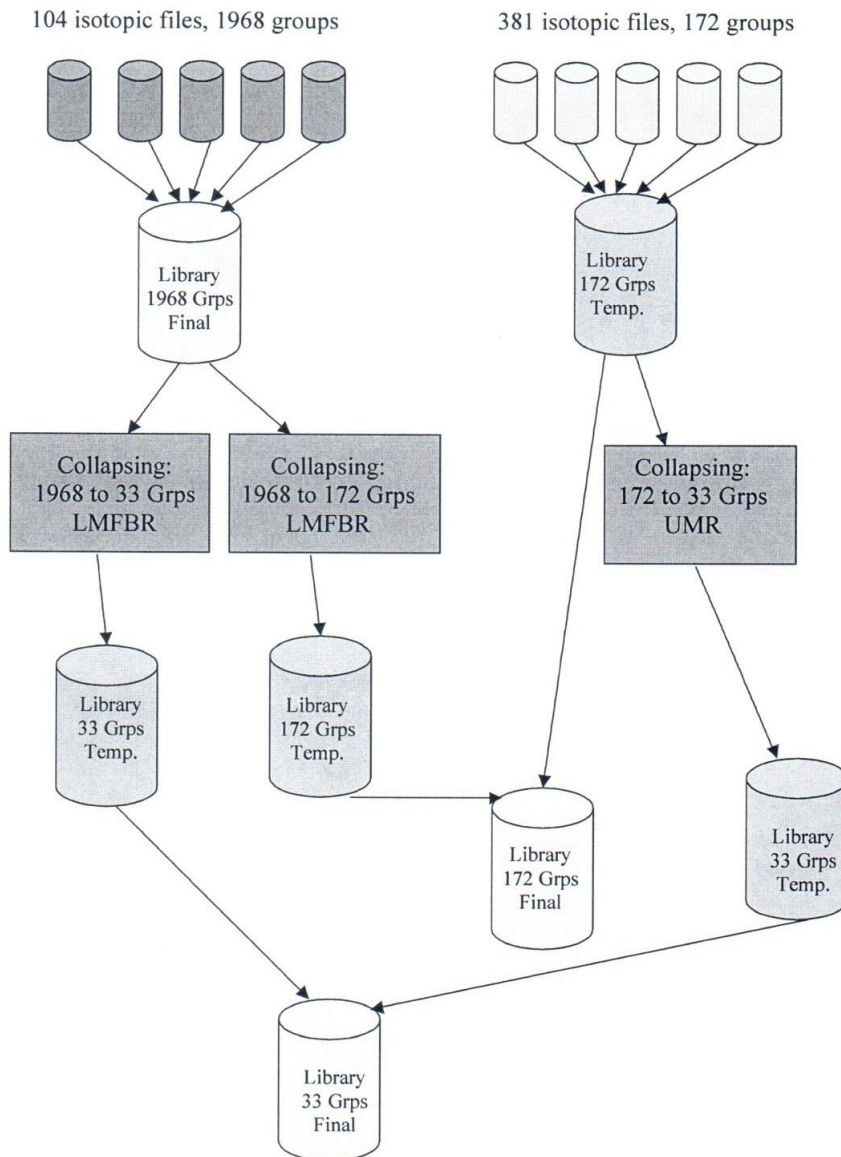
Nella **figura 3.7** sono riportati gli spettri neutronici nell'intervallo da 0 eV a 20 MeV ottenuti a partire dai profili multigruppo MCNP a 50, 177, 334 gruppi di energia : si nota la corretta sovrapposizione dei grafici derivante dalla proprietà di unicità dello spettro.

A riguardo è stato sviluppato in ambiente MATLAB il programma di calcolo SPECTRUM.m che, a partire dai profili MCNP, calcola lo spettro continuo .

(\* ) ECCO codice di cella, ERANOS codice di nocciolo



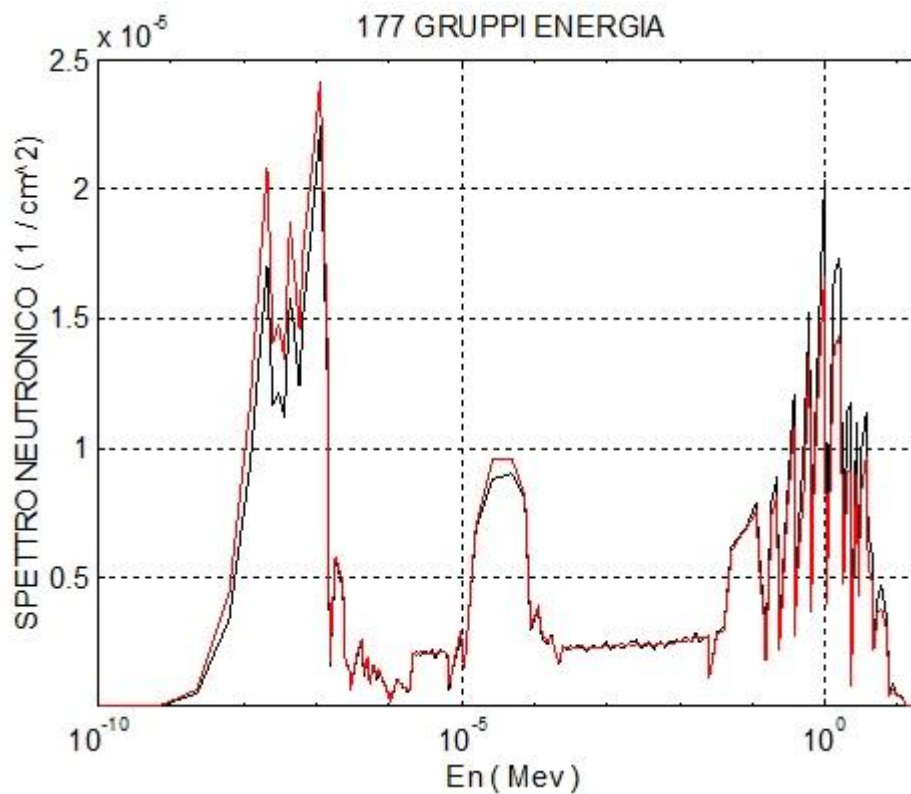
PROFILI MULTI-GRUPPO DI ENERGIA  
**ERANOS code**



**Fig. 3.5** Schema di generazione delle librerie applicative del codice ECCO operante in ERANOS

**PROFILI NEUTRONICI A 177 GRUPPI O RIGHE**

**USCITA MCNP**

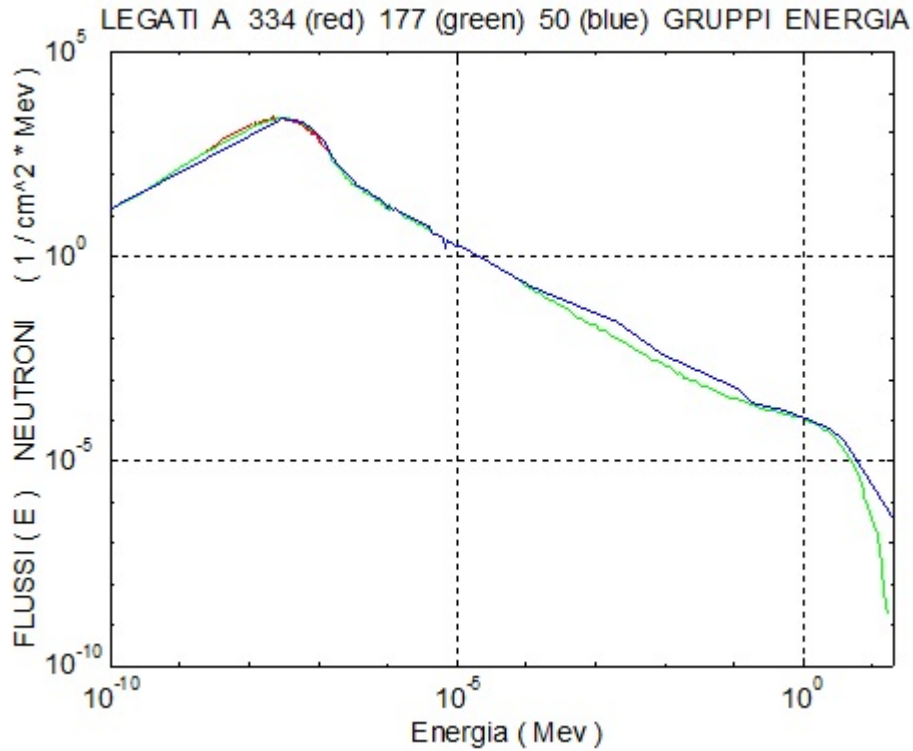


**Fig. 3.6** Profilo neutronico normalizzato fuel rod B-2 (nero) e cella h20 (rosso) intorno rod

**Program SPECTRUM.M in MATLAB**

**PROFILI MULTI-GRUPPO → SPETTRI CONTINUI ENERGIA**

**FLUSSO NEUTRONICO CONTINUO CON L'ENERGIA  
DERIVANTE DA  
PROFILI MULTIGRUPPO A 334, 177, 50 GRUPPI O RIGHE**



**Fig. 3.7** Flusso neutronico normalizzato continuo con l'energia : **fuel rod B-2**

**TABELLA n. 3.2**  
Gruppi di energia

<b>4 gruppi</b>	<b>En</b>	<b>F(1/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>N(1/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Termico</b>	<b>0.1 eV</b>	<b>1.54089 E-04</b>	<b>7.00 E-010</b>
Epitermico	100 eV	1.31474 E-04	
Intermedio	100 keV	1.39616 E-04	
Veloce	20 MeV	<b>3.08397 E-04</b>	<b>1.12 E-013</b>
<b>Totale</b>		<b>7.33575E-04</b>	

### 3. Spettri neutronici nel nocciolo-riflettore : attenuazione e deformazione

Gli spettri continui con l'energia delle barrette di combustibile B-2, C-3, D-4, E-5, F-6 , di una cella del riflettore e dello schermo gamma nei campi di energia termico ed epidermico da 0 eV a  $10^{-5}$  eV sono riportati nella **figura 3.8** .

La rappresentazione lineare-logaritmica mostra forme a campana degli spettri, centrati sull'energia di 0.03 eV, che somigliano alla distribuzione del gas perfetto con l'energia e che decrescono con la posizione verso l'esterno del nocciolo.

Il valore della temperatura neutronica di 424°C in corrispondenza del max delle curve ( calcolo semplificato ) risulta congruente con la temperatura della barretta di combustibile più calda, 400°C circa, essendo i neutroni non in equilibrio termico con il mezzo.

Nella **figura 3.9** sono riportati gli spettri completi nell'intervallo di energia da 0 eV a 20 MeV. Si nota attenuazione e deformazione osservando le curve con molta attenzione. Infatti le curve rosse ( fuel rods ) presentano nel campo veloce una sella finale che scompare nelle curve blu ( grafite ) e verde ( piombo ) .

Esiste anche nel campo termico una deformazione dello spettro passando dalla barretta di combustibile F-6 alla barretta di grafite G-7; la prima curva blu ( G-7 ) supera alcune curve rosse.

Quando si passa da un mezzo ad un altro lo spettro del primo mezzo tende allo spettro caratteristico dell'altro creando inevitabilmente una deformazione. In termini deterministici ( risoluzione dell'equazione del trasporto ) ciò equivale a dire presenza della soluzione transitoria nel volume di interfaccia, mentre nei mezzi è presente fondamentalmente la soluzione asintotica.

La domanda che ci si può porre è la seguente : “ La rappresentazione log-log dello spettro nella figura 3.9 è adatta a mettere in evidenza le deformazioni con sufficiente chiarezza ? “ .

Risposta personale : “ Occorre fare molta attenzione per vedere le deformazioni dello spettro, al contrario della semplice attenuazione “.

A riguardo il paragrafo successivo introduce il fattore di deformazione dello spettro.

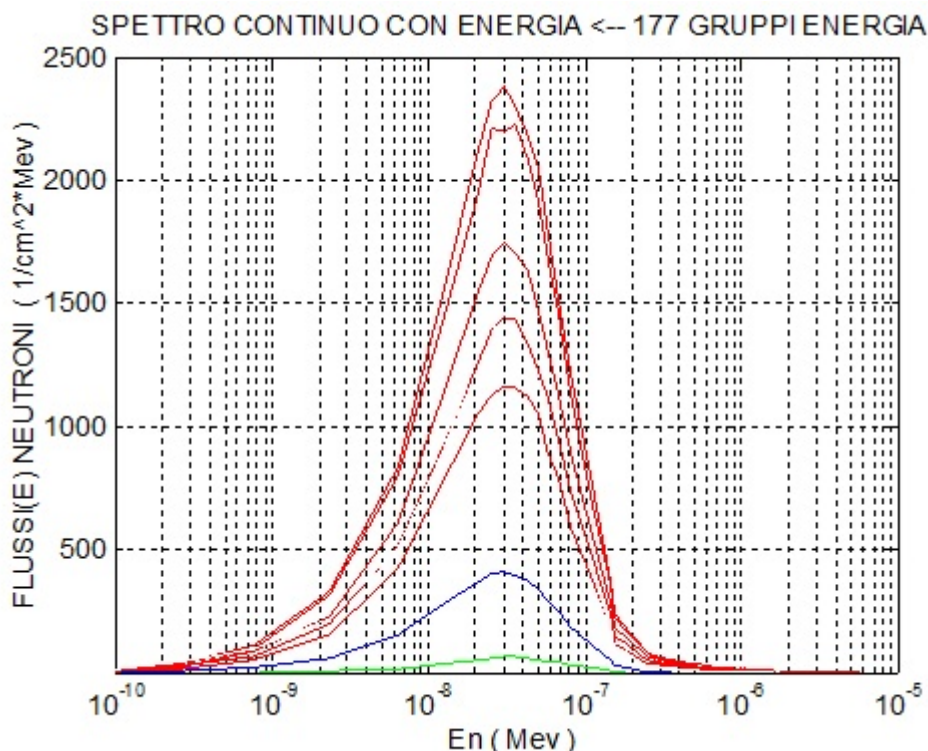
### 3.1 Il fattore di deformazione dello spettro

I profili neutronici multigruppo MCNP a 177 gruppi ( scelta canonica in HELIOS-2 ) nelle barrette, **figura 3.10** , mettono in evidenza nei campi termico e veloce delle forme d'onda che sovrastano la restante nel campo epitermico-intermedio. Ciò suggerisce la definizione del fattore di deformazione :

$$F.D. = RIGAm_{max}( TERMICO ) / RIGAm_{max}( VELOCE ) \quad ( 1 )$$

Questo parametro resta costante nei volumi dove lo spettro si attenua semplicemente e assume valori molto diversi quando lo spettro si deforma. Nella **figura 3.11** è riportato la variazione del parametro con il raggio del nocciolo-riflettore.

Si osserva nel nocciolo un valore costante , mentre nel riflettore-schermo gamma il valore è fortemente variabile. Ciò evidenzia che nel nocciolo lo spettro si attenua e non si deforma. Dal punto di vista sperimentale questo risultato suggerisce che lo spettro misurato in un punto è valido in ogni parte del nocciolo.

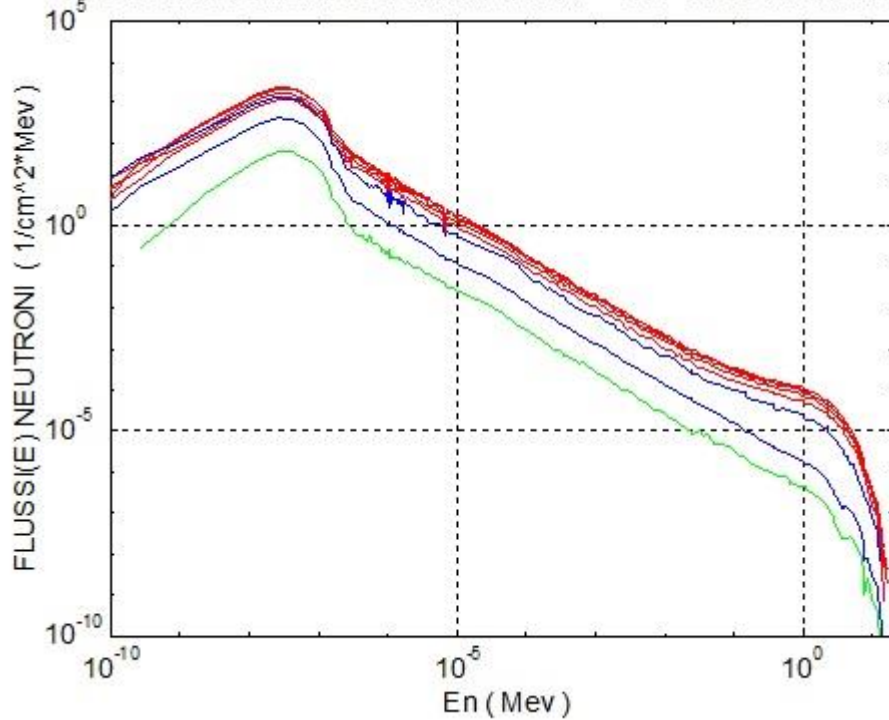


**Fig. 3.8** Spettro neutronico normalizzato fuel rod **B2, C3, D4, E5, F6**, cella centrale riflettore ( **blu** ) nel campo termico-epitermico

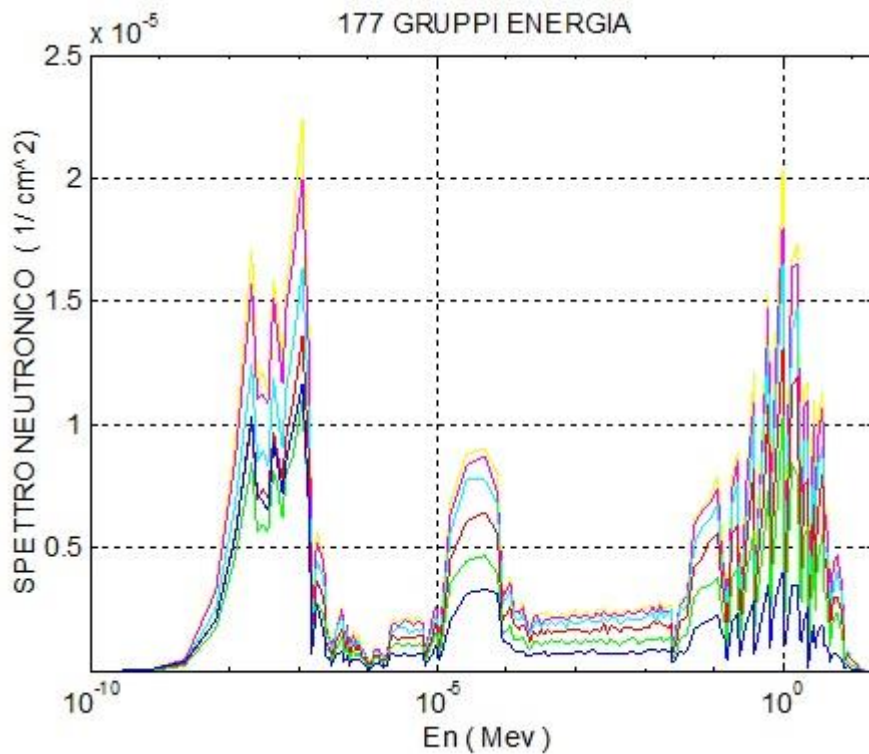
$$E_0 = 1/2KT = 4.3 \cdot 10^{(-5)} T \quad ( eV ) \Rightarrow 0.03eV \Leftrightarrow 697^{\circ}K = 424^{\circ}$$

PROFILI NEUTRONI : FUEL RODS E GRAFITE ROD

SPEKTRO CONTINUO CON ENERGIA <-- 177 GRUPPI ENERGIA



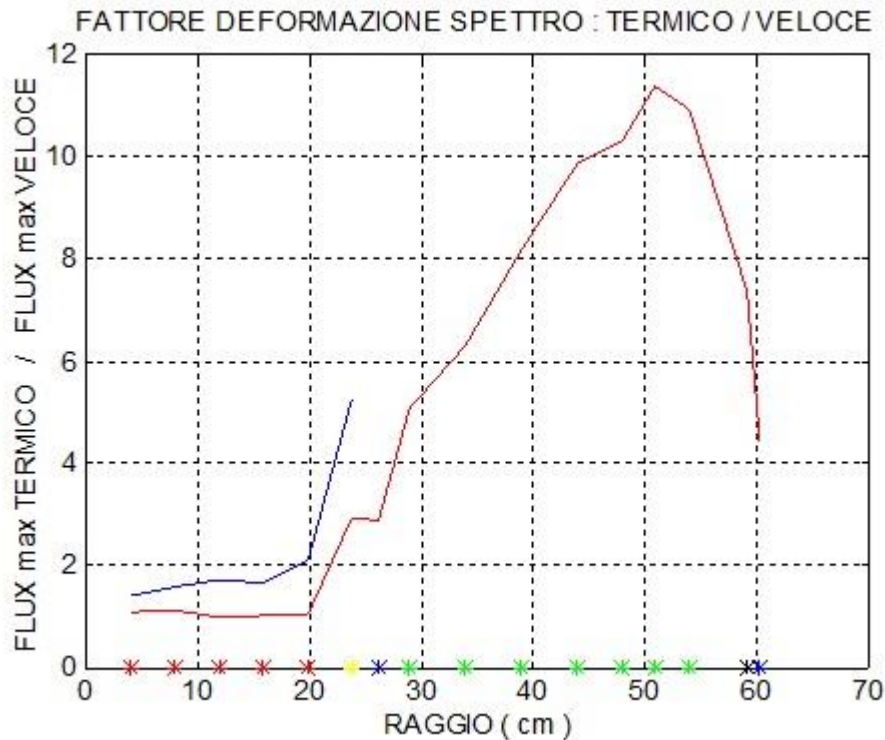
**Fig. 3.9** Spettro neutronico normalizzato fuel rod B2, C3, D4, E5, F6, grafite rod G7 ( blu ), cella centrale riflettore ( blu ) e schermo gamma ( verde )



**Fig. 3.10** Profilo neutronico normalizzato fuel rods B-2, C-3, D-4, E-5, F-6 e grafite rod G-7 (blue)

### FATTORE DEFORMAZIONE PROFILO MULTIGRUPPO

Definizione :  $F.D. = RIGAmax ( TERMICO ) / RIGAmax ( VELOCE )$



**Fig . 3.11** Fattore di deformazione dello spettro neutronico sul diametro A1-A2 : nocciolo-riflettore-schermo gamma (**rosso**), h2o (**blu**)

Legenda :

- \* **rosso** = baricentro barrette combustibile ; baricentro celle h2o centrale e intorno barrette
- \* **giallo** = baricentro barretta grafite; baricentro cella h2o intorno barretta
- \* **blu** = raggi medi celle radiali rivestimento di alluminio
- \* **verde** = raggi medi celle radiali riflettore grafite
- \* **nero** = raggio medio schermo piombo per gamma

Soluzione asintotica nel nocciolo  
e soluzione transitoria in senso spaziale interfaccia  
nocciolo-riflettore e nel riflettore

#### 4. Energia di fissione depositata nelle barrette

L'energia di fissione depositata nelle barrette è pari al valore prodotto meno il valore dell'energia associata ai neutrini, ai neutroni veloci, ai raggi gamma che sfuggono dalle barrette.

Relativamente all'energia di fissione dell' U-235 pari a circa 200 MeV/fissione :

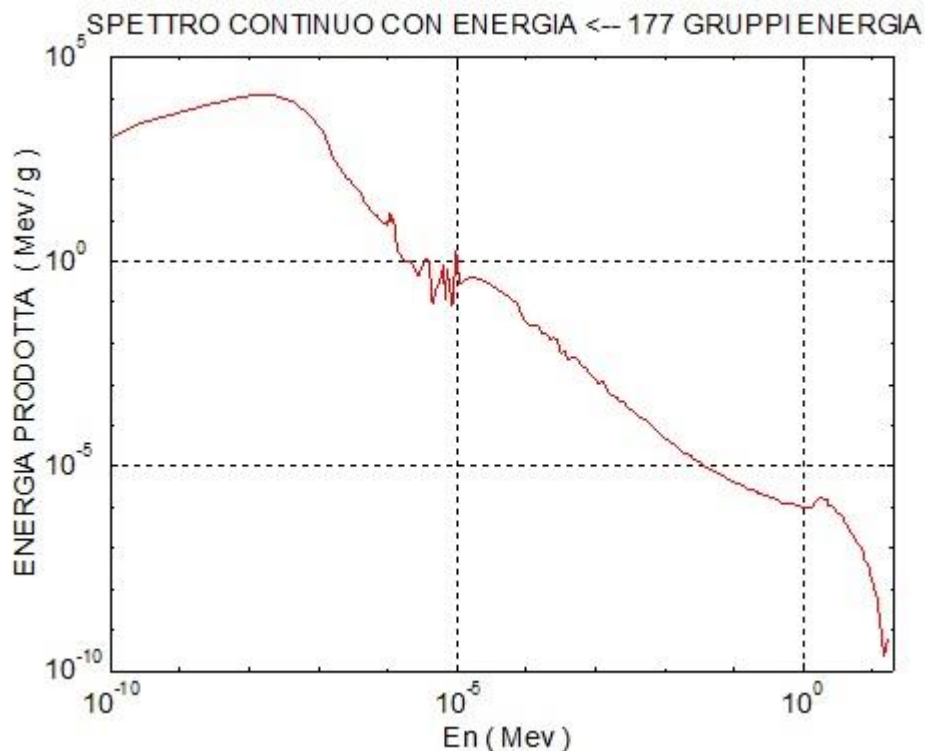
- 20 MeV    neutrini
- 5 MeV    neutroni veloci
- 7 MeV    gamma pronti

Nella **figura 3.12** è riportata lo spettro dell'energia depositata nella barretta B-2 nell'intervallo di energia da 0 eV a 20 MeV.

Se si divide l'intervallo di energia nei quattro gruppi canonici termico, epitermico, intermedio e veloce e si integra lo spettro in questi intervalli, si ottiene il valore di energia depositata per gruppo, **tabella n. 3.3**. Il gruppo termico presenta il maggiore valore, come ci si deve attendere per un reattore termico.

Nella **figura 3.13** è riportata l'energia depositata nelle barrette B-2, C-3, D-4, E-5, F-6 . Si nota un certo grado di attenuazione come avviene per il flusso neutronico .

#### ENERGIA PRODOTTA DALLA FISSIONE

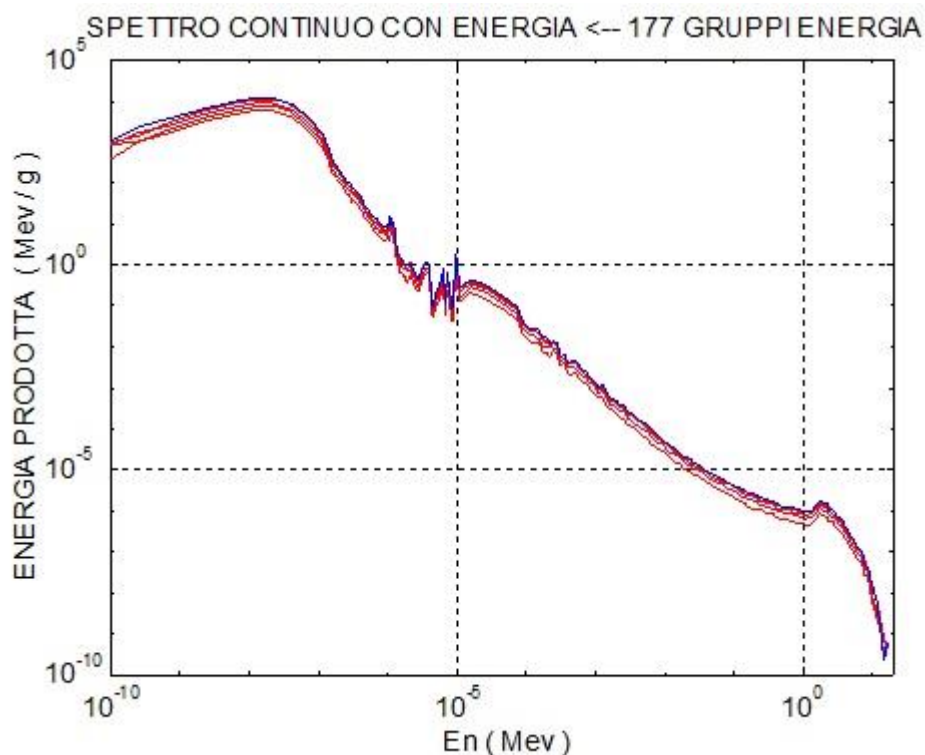


**Fig. 3.12** Energia prodotta (depositata ) fissione fuel rod **B-2**

**TABELLA 3.3**

Energia fissione depositata in rod B-2

4 gruppi	E. Fissione ( MeV / gram )	
<b>Termico</b>	0.1 eV	<b>6.34728E-04</b>
Epitermico	100 eV	9.46384E-05
Intermedio	100 KeV	7.95597E-06
Veloce	20 Mev	5.10585E-06
<b>Totale</b>		<b>7.42428E-04</b>



**Fig. 3.13** Energia prodotta fissione nelle fuel rods **B-2 (blu)** , C-3 , D-4 ,E-5 , F-6

## 5. Energia depositata dai neutroni per rallentamento

L'energia perduta dai neutroni per rallentamento mediante urti elastici con i nuclei del mezzo viene calcolata dal modello Eterogeneo MCNP nelle celle che costituiscono il nocciolo.

Si inizia dalla barretta di combustibile B-2, costituita nella zona attiva da una lega ternaria di idruro di zirconio e uranio arricchito ZrH-U .

I neutroni veloci generati dalla fissione sfuggono quasi totalmente dalla barretta di combustibile e si termalizzano in acqua. Soltanto una piccola minoranza rallentano all'interno della barretta per la presenza dell'idrogeno e raggiungono il campo termico. Nel campo termico, invece, la quasi totalità dei neutroni che hanno rallentato nell'acqua insieme a quelli termici della barretta perdono energia prima di essere assorbiti per la fissione, essendo non in equilibrio con il mezzo. L'energia rilasciata dai neutroni termici supera di molto l'energia rilasciata nella barretta dai neutroni veloci, **figura 3.14** . Quanto detto si può riassumere dicendo che la barretta si comporta come un corpo grigio per i neutroni veloci e come un corpo nero per i neutroni termici.

La suddivisione dello spettro di energia nei quattro gruppi canonici, mette in evidenza che l'energia perduta dai neutroni è quasi totalmente a carico del gruppo termico, **tabella n. 3.4** .

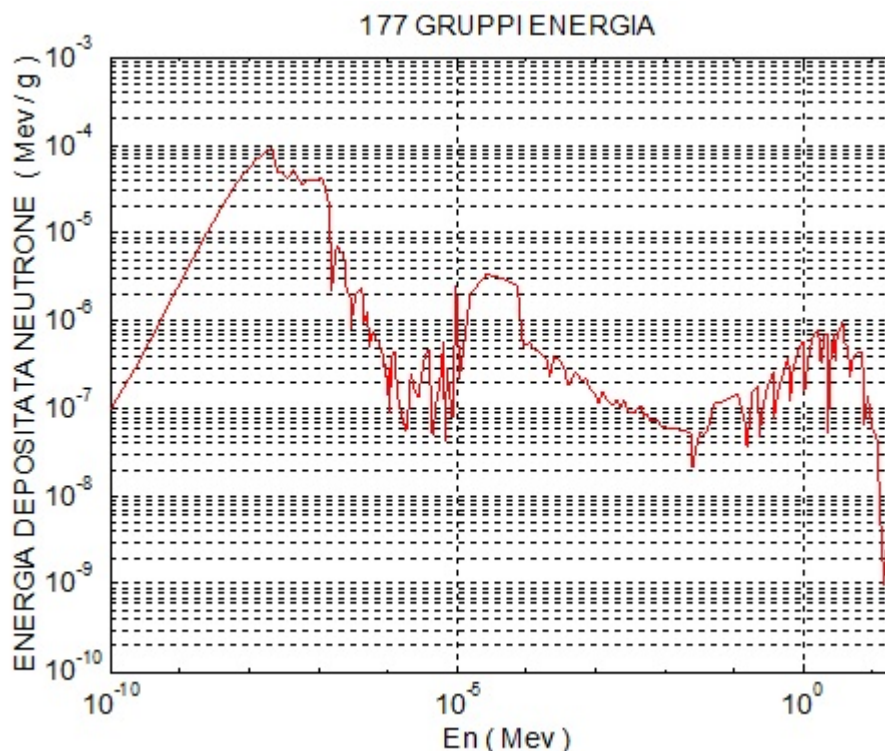
Accade invece il contrario nei mezzi privi di uranio, come negli esempi della cella di acqua che circonda la B-2, della barretta di grafite G-7 e di una cella centrale del riflettore, **figure 3.15, 3.16, 3.17** .

L'energia perduta dai neutroni è esclusivamente del campo veloce dove l'urto è molto efficace. Nel campo termico i neutroni possono essere considerati in equilibrio con il mezzo, anche se è presente assorbimento quantitativamente inferiore a quello dello U-235.

Le **tabelle n.3.5, 3.6, 3.7**, associate alle celle prese in considerazione rivelano che la totalità dell'energia viene perduta nel campo veloce .

ENERGIA DEPOSITATA DAI NEUTRONI PER RALLENTAMENTO

**FUEL**



**Fig. 3.14** Energia depositata neutrone nella cella rod B-2

**TABELLA n.3.4**

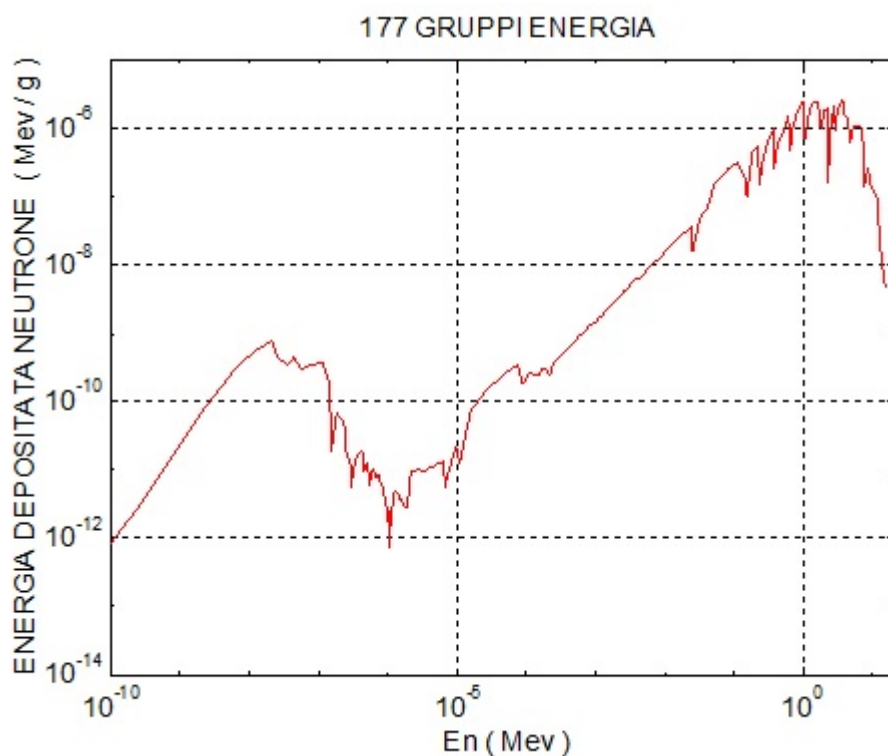
Energia perduta dai neutroni per rallentamento

<b>4 gruppi</b>	<b>E.D. ( MeV / gram )</b>	<b>F(1/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Termico</b>	<b>5.95082E-04</b>	1.54089E-04
Epitermico	8.87359E-05	1.31474 E-04
Intermedio	8.10792E-05	1.39616 E-04
Veloce	1.41660E-06	3.08397 E-04
<b>Totale</b>	<b>7.06991E-04</b>	7.33575E-04

**FUEL ROD -> GRIGIA per neutroni veloci**  
**-> NERA per neutroni termici**

ENERGIA DEPOSITATA DAI NEUTRONI PER  
RALLENTAMENTO

**ACQUA**



**Fig. 3.15** Profilo neutronico e energia depositata neutrone in **acqua** :  
cella 5001 intorno rod B-2

**TABELLA n.3.5**

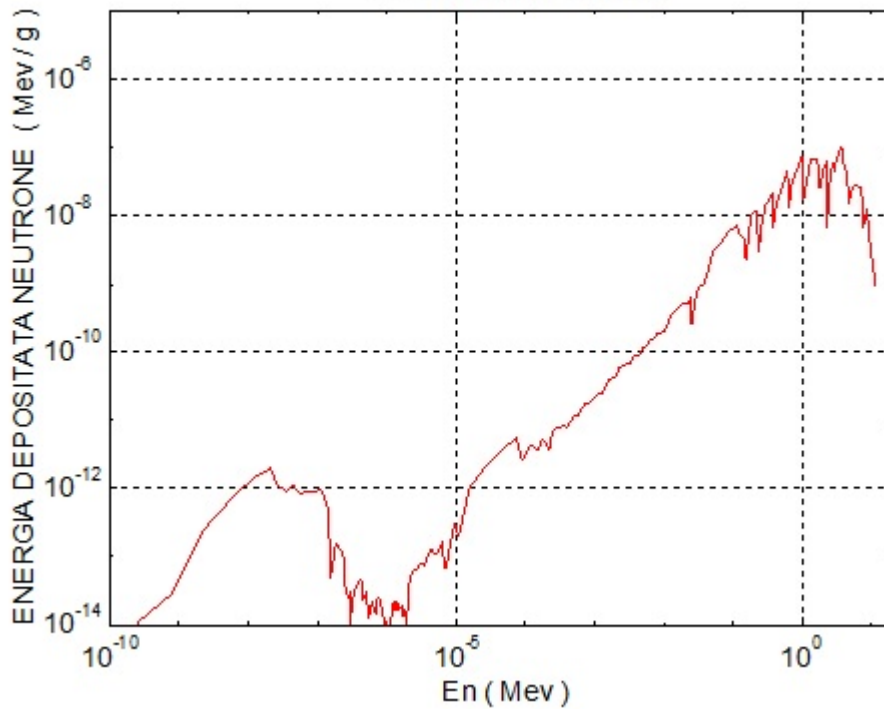
Energia perduta dai neutroni per rallentamento

<b>4 gruppi</b>	E.D. ( MeV / gram )
Termico	4.92101E-09
Epitermico	1.95803E-09
Intermedio	1.31567E-06
<b>Veloce</b>	<b>4.28037E-05</b>
<b>Totale</b>	<b>4.41262E-05</b>

ENERGIA DEPOSITATA DAI NEUTRONI PER  
RALLENTAMENTO

**ROD GRAFITE**

177 GRUPPI ENERGIA



**Fig. 3.16** Profilo neutronico e energia depositata neutrone nella cella grafite rod G-7

114 urti 2Mev-> 0.025 eV  
60 urti -> En=152 eV calcolo indicativo

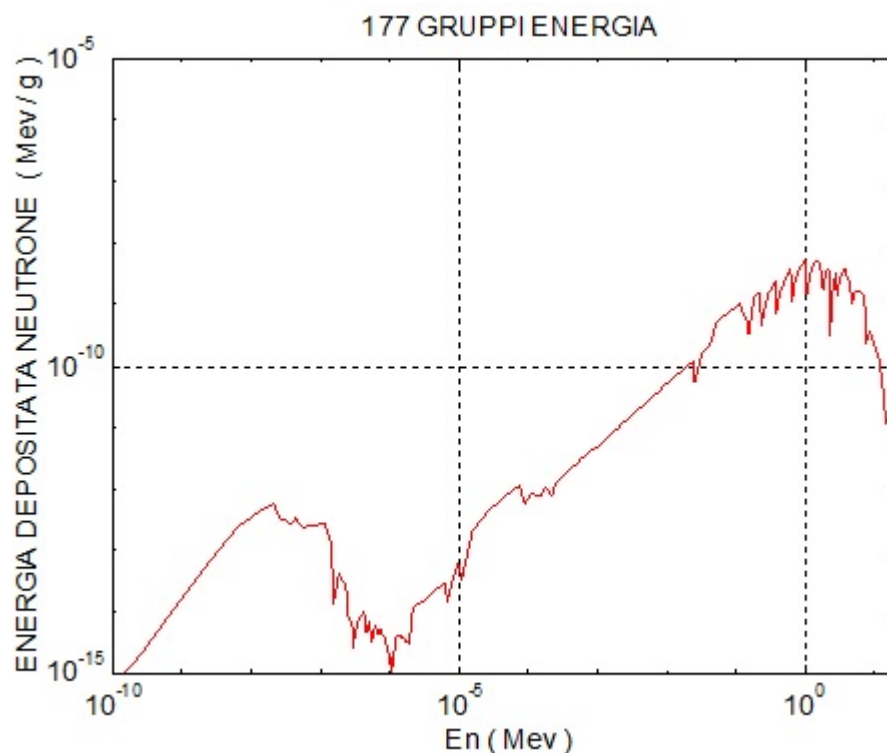
**TABELLA n. 3.6**

Energia perduta dai neutroni per rallentamento

<b>4 gruppi</b>	<b>E.D. ( MeV / gram )</b>
Termico	1.29759E-11
Epitermico	2.06090E-11
Intermedio	2.58489E-08
<b>Veloce</b>	<b>1.26251 E-06</b>
<b>Totale</b>	<b>1.28839E-06</b>

ENERGIA DEPOSITATA DAI NEUTRONI PER  
RALLENTAMENTO

**RIFLETTORE GRAFITE**



**Fig. 3.17** Profilo neutronico e energia depositata neutrone nella cella 5013 di grafite del riflettore

**TABELLA n. 3.7**

Energia perduta dai neutroni per rallentamento

<b>4 gruppi</b>	<b>E.D. ( MeV / gram )</b>
Termico	3.68901E-12
Epitermico	4.30223E-12
Intermedio	4.21444E-09
<b>Veloce</b>	<b>8.41925E-08</b>
<b>Totale</b>	<b>8.84149E-08</b>

## CAPITOLO QUARTO

# INTERAZIONE DEI RAGGI GAMMA E DEGLI ELETTRONI CON I MATERIALI DEL NOCCIOLO-RIFLETTORE

### Introduzione

Nel capitolo vengono analizzati gli spettri continui con l'energia dei raggi gamma e degli elettroni con energia superiore a un KeV . Si inizia con la barretta più interna e ci si sposta verso l'esterno seguendo il raggio del nocciolo. In questo modo si può apprezzare l'attenuazione a la deformazione dello spettro in funzione della posizione. Gli spettri gamma ed elettronici sono fisicamente correlati.

#### 1. Spettri gamma continui con l'energia

I raggi gamma di origine nucleare hanno normalmente energia compresa tra 100 KeV e 20 MeV .

Il modello Eterogeneo MCNP calcola soltanto gamma con energia  $> 1$  KeV, in quanto ad energie inferiori si verificano interazioni di bassa energia, che risultano di scarso interesse per il reattore.

Nel paragrafo vengono esaminati soltanto gli spettri della barretta di combustibile B-2, della cella di acqua che circonda B-2, di una cella centrale di grafite del riflettore e della cella di alluminio dell'involucro esterno del nocciolo, **figure 4.1, 4.2, 4.3, 4.4** , ( \* ) . In particolare lo spettro della cella di acqua non contiene i fotoni Cerenkov (  $E < 1$  KeV ) e lo spettro dell'involucro di alluminio è circa 3-4 ordini di grandezza inferiore agli spettri delle barrette ( efficacia dello schermo gamma ) .

Lo spettro è il risultato di un equilibrio tra processi di sorgente e di rimozione. Questo ultimo è un fenomeno distruttivo per il gamma.

Il termine di sorgente è caratterizzato dalla fissione per le sole barrette di combustibile, dai decadimenti gamma, qualche annichilazione (e-,e+), qualche fotone di alta energia da bremstrahlung e dai gamma provenienti da altre celle.

Il termine di rimozione è caratterizzato dalla dominanza dell'effetto fotoelettrico , (  $Z^4$  ) , specialmente nelle fuel rods rispetto agli effetti Compton (  $Z$  ) e di creazione di coppie (  $Z^2$ ,  $E_s = 1.02$  MeV ), e infine fuga dalla cella .

I termini di sorgente e di rimozione sono responsabili dell'attenuazione e della deformazione degli spettri quando si passa da un mezzo ad un altro, perchè sono caratteristici del mezzo.

(\*) Allegato “ Profili multigruppo MCNP e spettri continui con l'energia del nocciolo del reattore TRIGA-RC1 dell'ENEA “

## 2. Spettri di elettroni continui con l'energia

Il modello Eterogeneo MCNP calcola soltanto spettri di elettroni con energia  $> 1$  KeV, che risultano essere particelle relativistiche. Si veda la **tabella n. 4.1** dove sono riportate le velocità degli elettroni e di altre particelle in funzione dell'energia.

Gli spettri di elettroni sono il risultato dell'equilibrio di processi di sorgente e di rimozione e risultano interconnessi con gli spettri gamma.

Il termine di sorgente è caratterizzato dai decadimenti beta (  $Q =$  qualche MeV ), dall'effetto fotoelettrico (  $Z^4$  ) specialmente nelle fuel rods, qualche creazione di coppia (e-,e+) e da elettroni provenienti da altre celle.

Il termine di rimozione è caratterizzato dalla perdita di energia per ionizzazione (  $Z^2 \cdot E$  ) e per bremsstrahlung (  $Z / E \cdot \ln E$  ).

I termini di sorgente e di rimozione sono responsabili dell'attenuazione e della deformazione degli spettri quando si passa da un mezzo ad un altro, perchè sono caratteristici del mezzo, **figure 4.5, 4.6, 4.7, 4.8** .

In particolare lo spettro dell'involucro di alluminio esterno al nocciolo è circa 3-4 ordini di grandezza inferiore agli spettri delle barrette.

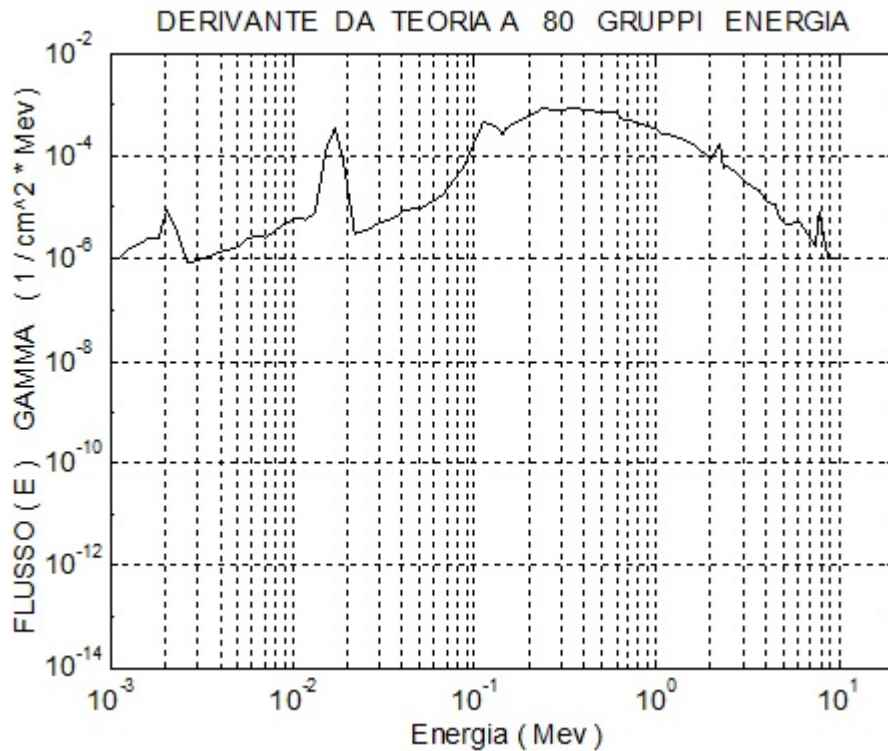
**TABELLA n. 4.1**  
Velocità delle particelle in funzione dell'energia

Energia	0.025eV	1 KeV	1 MeV	2 MeV	28 MeV	28 GeV
neutrone : $v_n$ (Km/s)	2,2	—	13'830	19'543	71'650	—
protoni : $v_p$ (Km/s)	—	—	13'840	19'557	71'697	299'840
elettrone : $v_e$ (Km/s)	—	18'744	282'320	293'720	299'950	—
fotone : $c$ (Km/s)	300'000 nel vuoto					

(\*) Energia :  $T = (m - m_0) c^2 = \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) m_0 c^2$

SPETTRI GAMMA CONTINUI CON ENERGIA

FUEL ROD B-2



**Fig. 4.1** Flusso gamma normalizzato fuel rod B-2

**Processi di :**

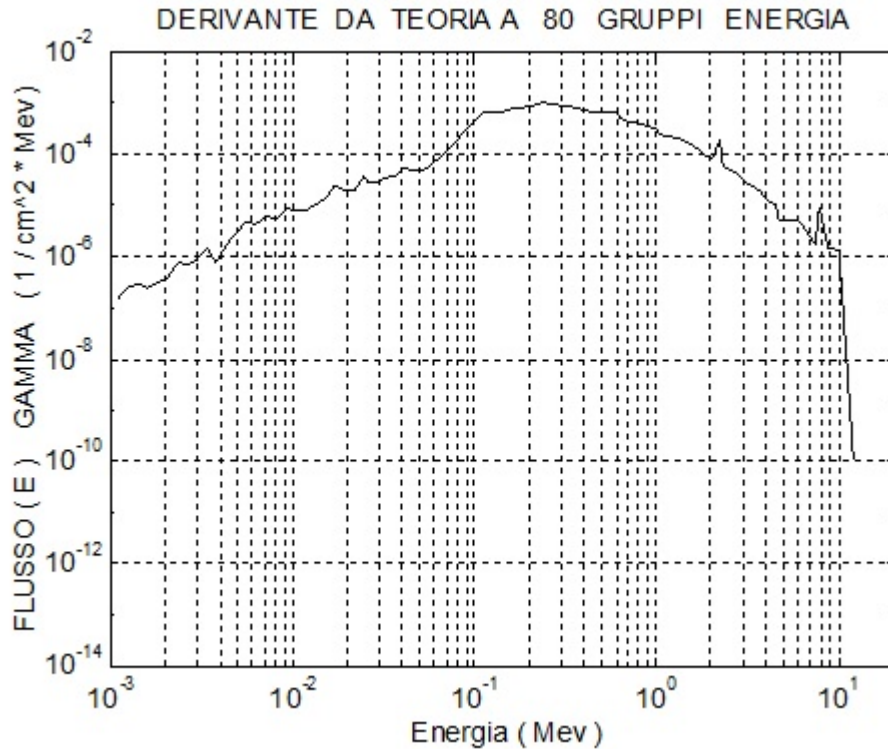
**Sorgente** Fissione : gamma-pronti , gamma decadimento prod. fissione  
gamma da ( n , g ) , ( n , n' ) , annichilimento (e+,e- ) , bremsstrahlung  
+ gamma da altre rods

**Rimozione** E. Fotoelettrico  $Z^4$  : Bk,U38 = 120 Kev circa ,  $hf \gg Bk$   
Creaz. Coppie (e+,e-)  $Z^2$  :  $E_g \geq E_s = 1.02$  Mev  
Compton scattering  $Z$   
+ flusso abbandona fuel rod

I gamma di origine nucleare hanno normalmente una energia compresa  
tra 100 KeV e 20 MeV

SPETTRI GAMMA CONTINUI CON ENERGIA

CELLA ACQUA INTORNO FUEL ROD B-2



**Fig. 4.2** Spettro gamma normalizzato **cella h20** intorno fuel rod B-2

**Processi di :**

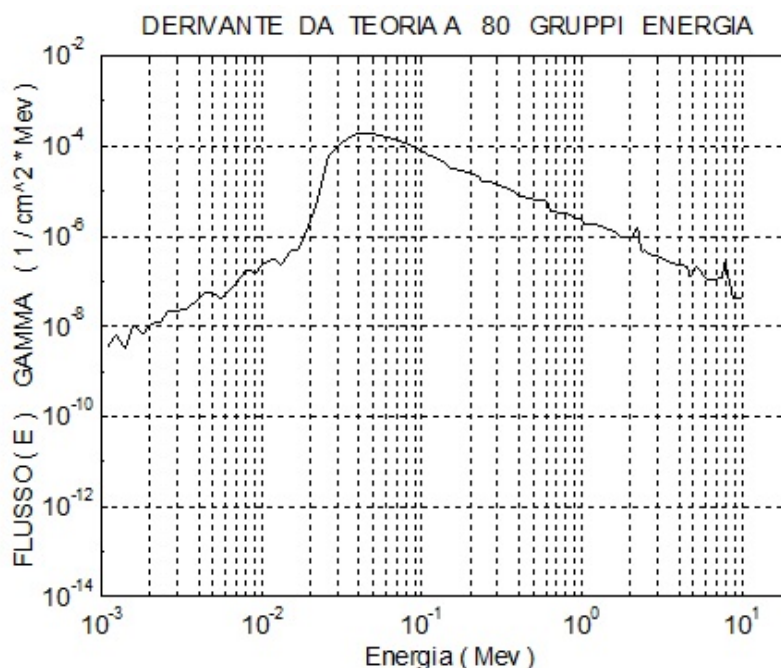
**Sorgente :** fuel rod B2 e altre rods , ( n,g ) , bremsstrahlung

**Rimozione** i tre effetti + Flusso gamma abbandona cella

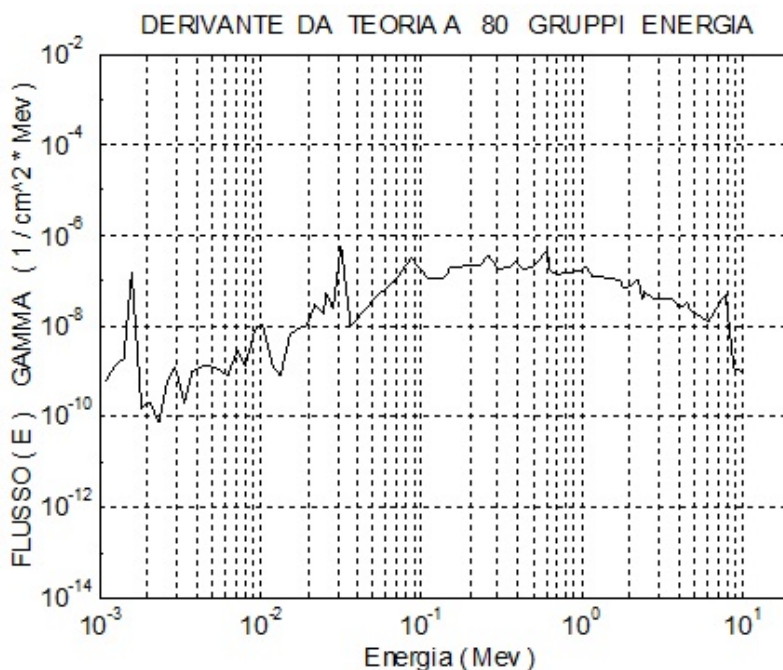
NO presenti fotoni Cerenkov e bremsstrahlung nel visibile-ultravioletto :  $hf < 5 \text{ KeV}$  circa

100 KeV |--| 10 MeV : Spettro Fuel = Spettro H2O circa => Bassa Energia Depositata

**SPETTRI GAMMA CONTINUI CON ENERGIA  
RIFLETTORE GRAITE**



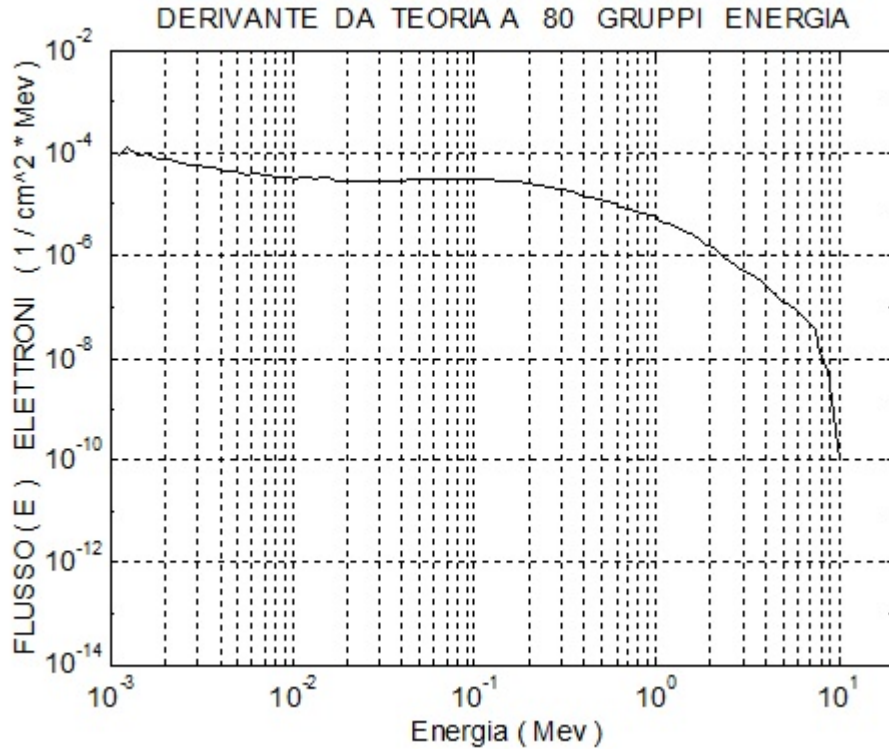
**Fig. 4.3** Spettro gamma normalizzato cella centrale grafite riflettore  
**INVOLUCRO ALLUMINIO ESTERNO**



**Fig. 4.4** Spettro gamma normalizzato cella alluminio involucro esterno

Spettro gamma emergente inferiore di 3-4 ordini di grandezza rispetto a spettri fuel rods. Efficace l'assorbimento nello schermo gamma piombo

**SPETTRI DI ELETTRONI CONTINUI CON L'ENERGIA**  
**FUEL ROD B-2**



**Fig. 4.5** Flusso elettroni normalizzato fuel rod B-2

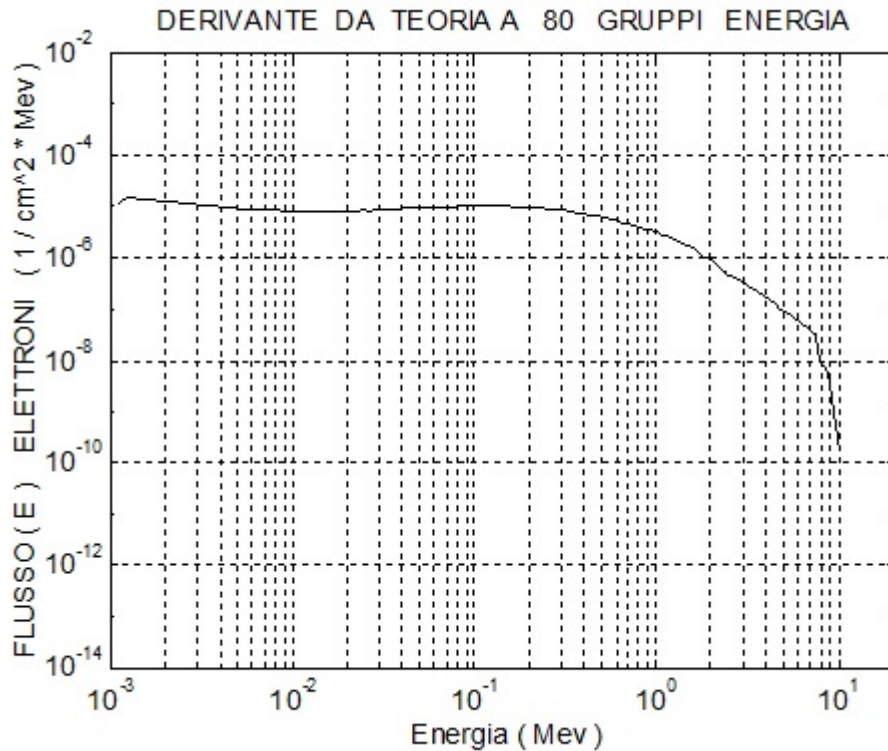
**Elettroni relativistici** : per  $E_e = 1 \text{ MeV} \rightarrow v_{e^-} = c$  circa

**Processi di** :

**Sorgente** dec. Beta (+,-)  $Q = \text{qualche MeV}$  , creazione coppie , fotoelettrico  
Compton con gamma di elevata energia ( MeV )

**Rimozione** ionizzazione ( $Z^2 * E$ ) per  $E < 100 \text{ KeV}$  ,  
ionizzazione = bremsstrahlung per  $E > 100 \text{ KeV}$  ,  
(  $Z^2/E * \ln E_a$  )  
( polarizzazione mezzo )  
+ Flusso abbandona fuel rod

SPETTRI DI ELETTRONI CONTINUI CON L'ENERGIA  
ACQUA



**Fig. 4.6** Flusso elettroni normalizzato **cella H2O** intorno **fuel rod B-2**

**Processi di :**

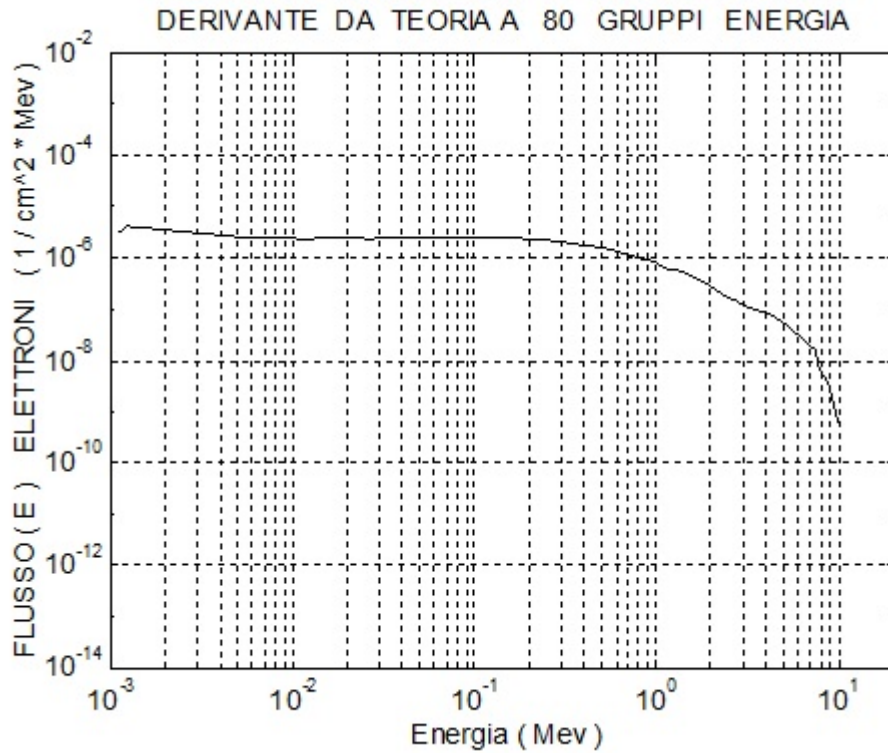
**Sorgente :** da Fuel Rods + limitatamente i tre effetti (  $Z^2$ ,  $Z$ ,  $Z^2$  ) dei gamma

**Rimozione :** ionizzazione , bremsstrahlung , ( polarizzazione mezzo )  
+ Flusso abbandona celle H2O

Spettri poco inferiori ai corrispondenti spettri fuel rods

SPETTRI DI ELETTRONI CONTINUI CON L'ENERGIA

**GRAFITE ROD G-7**



**Fig. 4.7** Flusso elettroni normalizzato **grafite rod G-7**

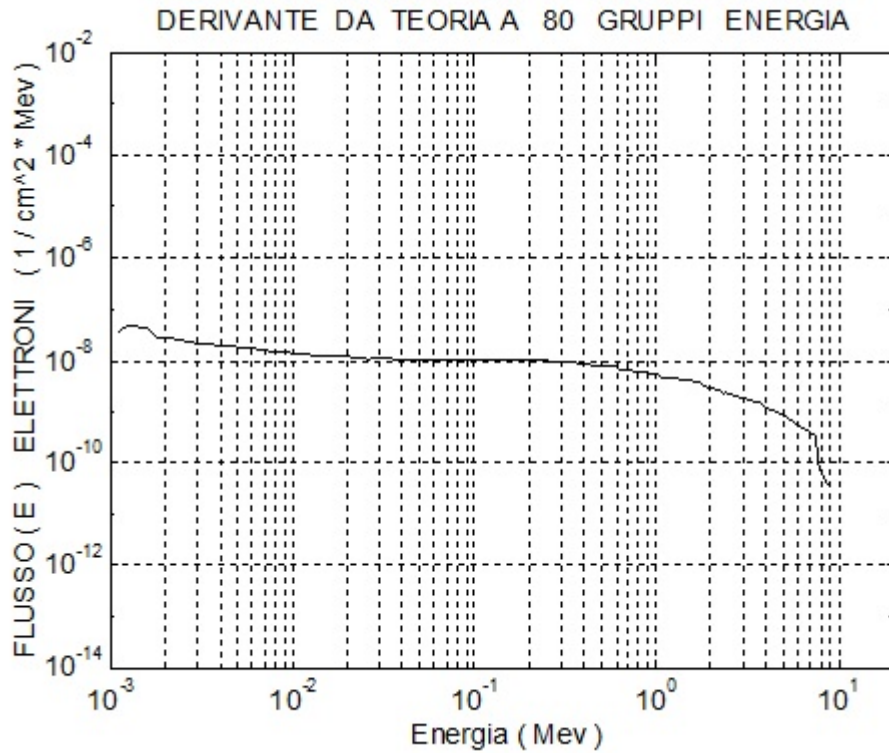
**Processi di :**

**Sorgente :** da Esterno + limitatamente i tre effetti (  $Z^2^4$ ,  $Z^2$ ,  $Z^2^2$  ) dei gamma

**Rimozione :** ionizzazione e bremsstrahlung ( polarizzazione mezzo )  
+ Flusso abbandona grafite rod

Spettri circa 70 volte inferiori a spettri fuel rods

SPETTRI DI ELETTRONI CONTINUI CON L'ENERGIA  
INVOLUCRO ESTERNO ALLUMINIO



**Fig. 4.8** Flusso elettroni normalizzato cella **alluminio**

Spettro elettronico emergente inferiore di 3-4 ordini rispetto a spettri fuel rods

## CAPITOLO QUINTO

# RAPPORTO DI CONVERSIONE E SEZIONI D'URTO MEDIE

### Introduzione

Il modello MCNP ha calcolato il rapporto di conversione del combustibile fresco e le sezioni d'urto microscopiche mediate sull'energia dei materiali del nocciolo.

### 1. Il rapporto di conversione del combustibile fresco del reattore TRIGA-RC1

Il rapporto di conversione è un parametro fondamentale per distinguere se un reattore è autofertilizzante ( $C > 1$ ) o convertitore ( $C < 1$ ).

Il valore teorico di questo parametro viene calcolato dalla ( 1 ) dove compare la resa di fissione del combustibile . Il valore reale si ottiene dalla ( 2 ) quando si conosce il fattore  $F < 1$  che tiene conto delle catture parassite. Normalmente  $F$  viene determinato sperimentalmente.

Avendo però a disposizione il modello Eterogeneo MCNP, è stato possibile determinare direttamente il rapporto di conversione a partire dal calcolo delle catture neutroniche parassite.

Il lavoro è stato enorme perchè il modello MCNP ha calcolato gli assorbimenti in ogni cella del nocciolo-riflettore-schermo gamma ( circa 500 celle ) e per ogni materiale ivi presente in base alla ( 3 ) . Le perdite e le fughe sono ovviamente normalizzate. Nella **figura 5.1** è riportato il vettore della densità di corrente angolare che attraversa la superficie  $S$  esterna del nocciolo.

E' stato necessario produrre due versioni del modello Eterogeneo MCNP, TRUP3CO1 per i materiali del nocciolo e TRUP3CO2 per i materiali del riflettore e dello schermo gamma.

I risultati che si sono ottenuti risultano in linea con i tipici valori di alcuni reattori della seconda generazione come reattori ad acqua leggera, CANDU e a grafite, essendo il TRIGA-RC1 un reattore termico degli anni 60.

Nel calcolo risulta determinante le catture parassite in acqua, nelle guaine inox e risultano determinanti le fughe. Le catture nella grafite, nel piombo ( schermo gamma ) e in alluminio risultano meno sentite.

RAPPORTO CONVERSIONE COMBUSTIBILE FRESCO

$$(1) \quad C_{teorico} = \eta - 1 = \frac{\int_V d\vec{r} \int_0^{20\text{MeV}} \phi(E, \vec{r}) [U_{35} N_{35}(\vec{r}) \sigma_{p35}(E) + U_{38} N_{38}(\vec{r}) \sigma_{p38}(E)] dE}{\int_V d\vec{r} \int_0^{20\text{MeV}} \phi(E, \vec{r}) [N_{35}(\vec{r}) \sigma_{a35}(E) + N_{38}(\vec{r}) \sigma_{a38}(E)] dE} - 1$$

= I<sub>0</sub> (top numerator)      = I<sub>1</sub> (bottom denominator)

(2)  $C = F \cdot C_{teorico} = F (\eta - 1)$  dove F è il rendimento sperimentale

Rendimento di Conversione Reale

(3)  $C = \frac{I_0}{I_1} - 1 - [\text{Perdite} + \text{Fughe}]_{norm.}$

$$\text{Perdite} = \int_V d\vec{r} \int_0^{20\text{MeV}} \phi(E, \vec{r}) \sum_{l=1}^7 N_l(\vec{r}) \sigma_{c,l}(E) dE$$

con  $l = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$   
↑            ↑            ↑            ↑            ↑            ↑  
 I<sub>uor</sub>    H            α<sub>0</sub>            P<sub>b</sub>            AL

$$\text{Fughe} = \int_S \int_0^{20\text{MeV}} \int_{4\pi} \vec{J}(E, \vec{r}, \vec{\Omega}) \cdot \vec{n} dS d\Omega dE$$

= I<sub>3</sub>

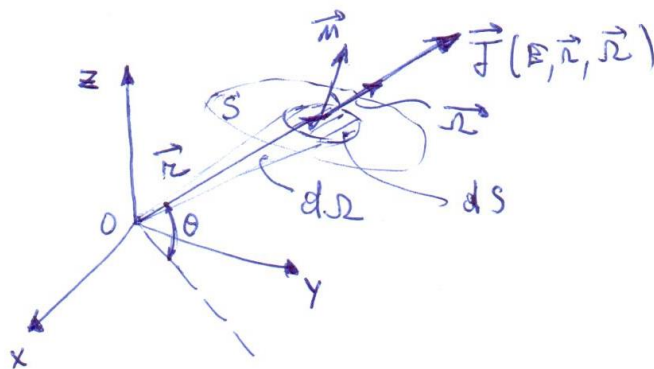


Fig. 5.1 Il vettore densità della corrente angolare

Modelli TRUP3CO1 (core) e TRUP3CO2 (rifl) : con due gruppi di energia

$$C_{\text{teorico}} = 0.9118$$

$$C_{\text{reale}} = 0.5532$$

$$\Rightarrow F = 0.6067$$

Nella valutazione del rapporto di conversione reale sono risultate **dominanti** le catture neutroniche :

- **acqua**, in particolare idrogeno
- **guaine Inox**
- **fughe** dal nocciolo-riflettore .
- grafite, piombo, alluminio : cattura meno intensa

Valori Tipici di  $C_{\text{reale}}$  Inizio Vita

Reattori Acqua      0.5 | -- | 0.6

Reattori CANDU      0.8

Reattori Grafite      0.8

## 2. Sezioni d'urto microscopiche mediate sull'energia calcolate dal modello MCNP

Sono stati sviluppati due modelli, **tabella n. 5.1**, per il calcolo delle sezioni d'urto microscopiche mediate sull'energia per il gruppo termico e veloce. Le definizioni delle sezioni d'urto medie sono riportate di seguito insieme alla **figura 5.2** che riproduce l'andamento  $1/v$  delle sezioni d'urto e dello spettro termico.

L'obiettivo è di verificare la capacità del modello di calcolare le sezioni d'urto medie.

Si è ottenuto un buon accordo tra i valori medi calcolati dai modelli MCNP, e i valori dei data base ( \* ) in corrispondenza dell'energia di 0.025 eV.

**TABELLA n. 5.1**  
 Modelli MCNP utilizzati

<b>TRUP3SEZ</b> Materiali	Calcola i Tallies per le Sezioni d'Urto Microscopiche dei del Reattore
<b>TRUP3SE2</b> Materiali	Calcola i Tallies per le Sezioni d'Urto Microscopiche dei di misura (provini) nelle <b>celle di misura n° 1, 2, 3</b> : sono stati esaminati 92U233, 94Pu239, 95Am241.

(\*) @° valore per  $E_n=0.025$  eV (  $v_n=2200$  m/s ) from BNL-325, 3 rd, ed. 1973

SEZIONI D'URTO MICROSCOPICHE A DUE GRUPPI ENERGIA

$$\frac{1}{\sigma_{th}} = \frac{\int_0^{0.1 \text{ eV}} \phi(E) \sigma(E) dE}{\int_0^{0.1 \text{ eV}} \phi(E) dE (= \phi_{th})} \quad \text{termica}$$

$$\frac{1}{\sigma_0} = \frac{\int_{0.1 \text{ eV}}^{20 \text{ MeV}} \phi(E) \sigma(E) dE}{\int_{0.1 \text{ eV}}^{20 \text{ MeV}} \phi(E) dE (= \phi_0)} \quad \text{veloce}$$

Le sezioni d'urto vengono confrontate con i valori tabellari:

$$\sigma_0 = \sigma(E^*) \quad \text{per } E^* = 0.025 \text{ eV} \leftrightarrow v_0 = 2200 \frac{m}{s}$$

velocità più probabile a  $T = 300^\circ K$

$$\Rightarrow \sigma(E) = \frac{\sigma_0 v_0}{v} = \frac{\sigma_0 v_0}{\left(\frac{2E}{m}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{per basse energie}$$

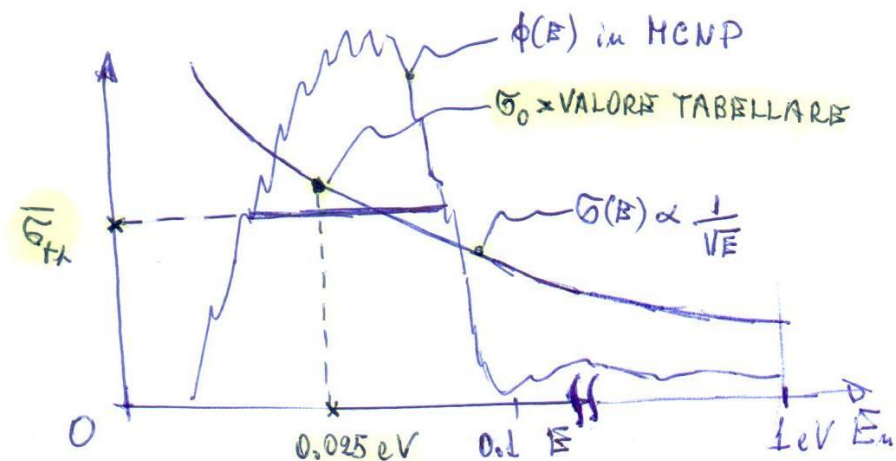


Fig. 5.2 Le sezioni d'urto microscopiche mediate sullo spettro termico

## CAPITOLO SESTO

### LE VERSIONI DEL MODELLO MCNP DEL NOCCIOLO REATTORE TRIGA-RC1

Nel capitolo viene riportato l'elenco delle versioni dei modelli MCNP Eterogeneo , Eterogeneo Semplificato, Omogeneo .

#### 1. VERSIONI MODELLO ETEROGENEO

**TRIGADST** Model : Contiene 12 Distr. Arr. % in peso : Ultima  
=>  $K_{eff} = 1.12573$  Std dev= 0.00077 2000 storie/run 600 run

#### VERSIONI EVOLUTE :

**TRIGA3UP** Model default : Tot celle = 448 =>  $K_{eff} = 1.04845$   
Std dev= 0.00072 2000 storie/run 600 run  
Riflettore = 21 celle ( sup , centro , inf )  
Nocciolo = 21 celle H<sub>2</sub>O ( sup , centro , inf )+ Rods ( sup , centro ,  
inf , camicia )  
Schermo Gamma Piombo = 3 celle ( sup , centro , inf )  
Aggiunti due Anelli Radiali Alluminio = 6 celle ( sup , centro , inf )

**TRUP3\_FE** come TRIGA3UP : neutroni , fotoni , elettroni  
File output : trup3\_fe\_4out ( 50 gruppi energia , t\_calcolo = 3 h 27' )  
File output : trup3\_fe\_5out ( 177 gruppi energia )  
File output : trup3\_fe\_6out ( 334 gruppi energia )

**TRUP3ERG** neutroni , fotoni . Calcola : - Energy Deposition - Fission Energy Deposition

Può calcolare lo spettro fine con 50 o 177 gruppi energia

**TRUP3CO1** Calcola i Tallies per il Rapporto di Conversione Reale e Teorico.  
La versione si occupa del Nocciolo

**TRUP3CO2** Calcola i Tallies per il Rapporto di Conversione Reale.

La versione si occupa del Riflettore e Schermo Gamma.

E' stato necessario sviluppare due versioni in quanto non si può superare il numero di 100 Tallies ( limite di sistema )

**TRUP3SE2** Calcola i Tallies per le Sezioni d'Urto Microscopiche dei Materiali Di Misura (provini) : sono stati esaminati 92U233, 94Pu239, 95Am241.

(\*) Possono trattare 50 / 177 / 334 gruppi energia

## 2. MODELLO ETEROGENEO SEMPLIFICATO TRIGA-RC1

( Si trascura la guaina di Inox nelle rods )

**TRSE\_RC1** Model Defoult : =>  $K_{eff} = 1.09688$  Std dev= 0.00078  
Riflettore = 1 cella di grafite

\*\*\*\*\* \*\* \*\*\*\*\*

## 3. MODELLO OMOGENEO TRIGA-RC1

**TRIG\_OMG** Stesse dimensioni nocciolo eterogeneo :  $R_n = 25.8$  cm ,  
 $R_r = 54$ cm ,  $H_o = 55.676$ cm  
Materiale Omogeneo : **fuel + H2O + Inox** =>  
 $K_{eff} = 0.96884$  Std dev= 0.00061  
neutroni , fotoni , elettroni

(\*) Possono trattare 50 / 177 / 334 gruppi energia

\*\*\*\*\* \*\* \*\*\*\*\*

**Cresco-Casaccia / Cresco4-Portici**

## DEMO CON MODELLO DINAMICO DELLO IMPIANTO DEL REATTORE TRIGA-RC1

### 1 D . Eccesso di reattività fondamentale nel funzionamento del Reattore

Si vuole dimostrare che un eccesso di reattività inferiore al valore iniziale ( 4.9 % dk/k ) inserito nel nocciolo del reattore TRIGA-RC1 condiziona la manovrabilità del reattore.

A tale scopo si utilizza il modello dinamico dell'impianto , /2/ , /3/.

Si porta il modello a 1 Mw per 8 ore ( run 1 ) e si esegue lo scram del reattore. Dopo ulteriori 8 ore di simulazione ( run 2 ), quando la concentrazione dello Xenon ha raggiunto il valore max, si sale nuovamente a potenza ( run 3 ), **figure 1D, 2D, 3D, 4D** .

Si vede dai grafici che con la stessa manovra di accensione effettuata nel run 1 ( non riportato nelle figure ) il reattore raggiunge 0.8 Mw e non la potenza nominale 1 Mw ottenendo una riduzione del 20% circa.

Volendo raggiungere la potenza di 1 Mw occorrerebbe inserire ulteriore reattività. Se il reattore non dispone di reattività la potenza non può essere aumentata.

Vale la pena dedicare il paragrafo successivo ai parametri `eccesso_reattività` e `margin_manovra_reattività`.

### 2 D . Il `margin_manovra_reattività` e l'`eccesso_reattività`

Si faccia riferimento alla **figura 5 D** .

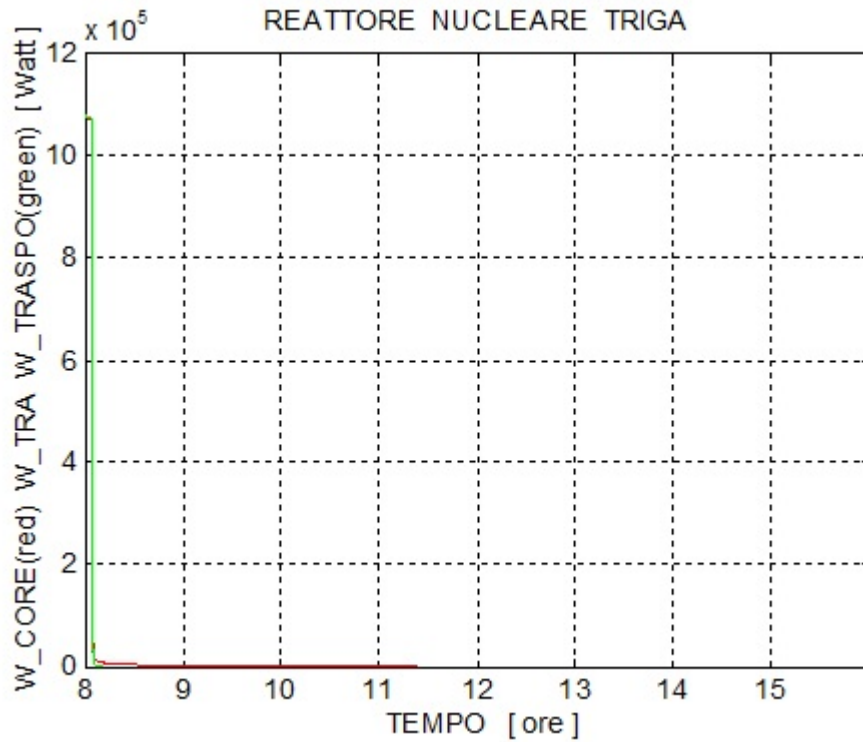
In giallo gli intervalli di Reattività Disponibile per Manovre ( R.D.M. ) durante l'accensione ( `reattività_rod = 0` prima criticità ) e a un livello di potenza stabile (  $0 < \text{reattività\_rods} < \text{reattività\_max\_rods} < \text{reattività\_E.R.}$  ) . R.D.M. è dunque un intervallo dinamico (  $< \text{E.R.}$  ) che dipende dal particolare transitorio del reattore e , insieme a E.R. , dipendono molto lentamente dal bruciamento del combustibile.

La traiettoria del Margine di Spegimento ( M.S. ) è legata al valore dinamico delle barre di controllo ( composizione e contesto ) con il bruciamento.

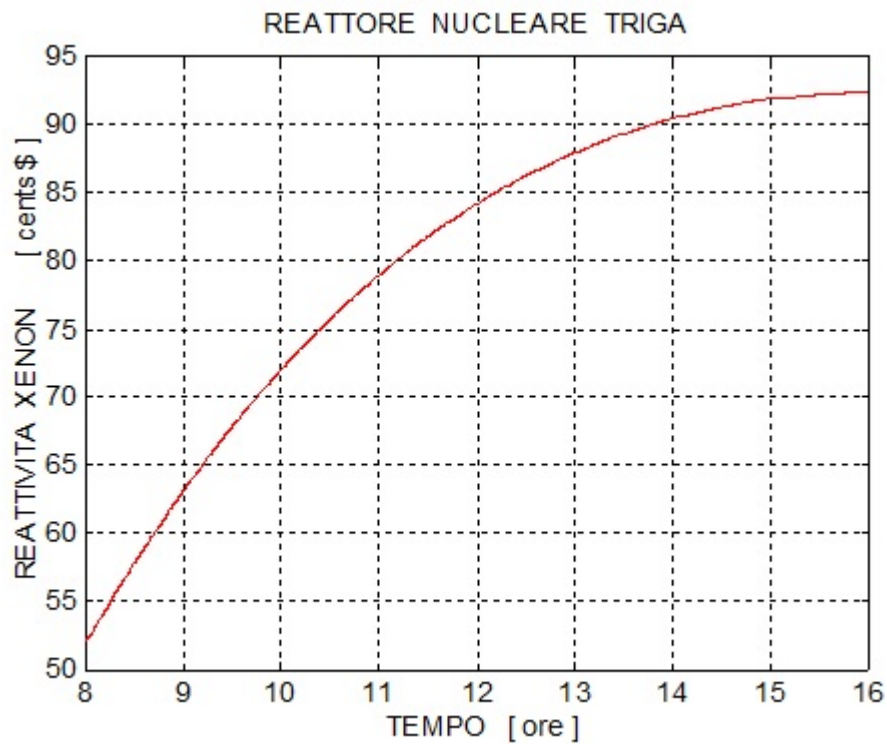
Quando E.R. e R.D.M. tendono a zero, il reattore normalmente viene spento e si sostituisce il combustibile esaurito ( refueling ) . Si può anche mantenere per un certo periodo il reattore a potenza ( stiramento del reattore ) per estrarre ulteriore energia ; se durante questo periodo il reattore diviene sottocritico si spegne automaticamente.

( \* ) `reattività_max_rods < reattività_E.R` : per norme sicurezza nel nocciolo del reattore deve essere sempre presente un numero minimo di barre di controllo.

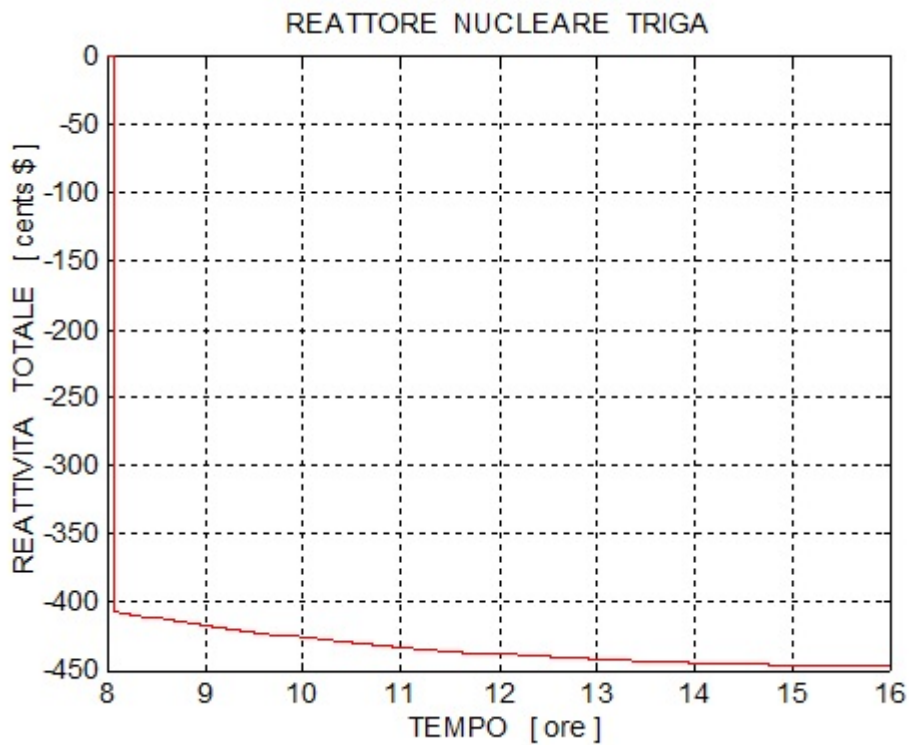
**DIMOSTRAZIONE CON MODELLO DINAMICO TRIGA-RC1**  
Eccesso di Reattività fondamentale nel funzionamento del reattore



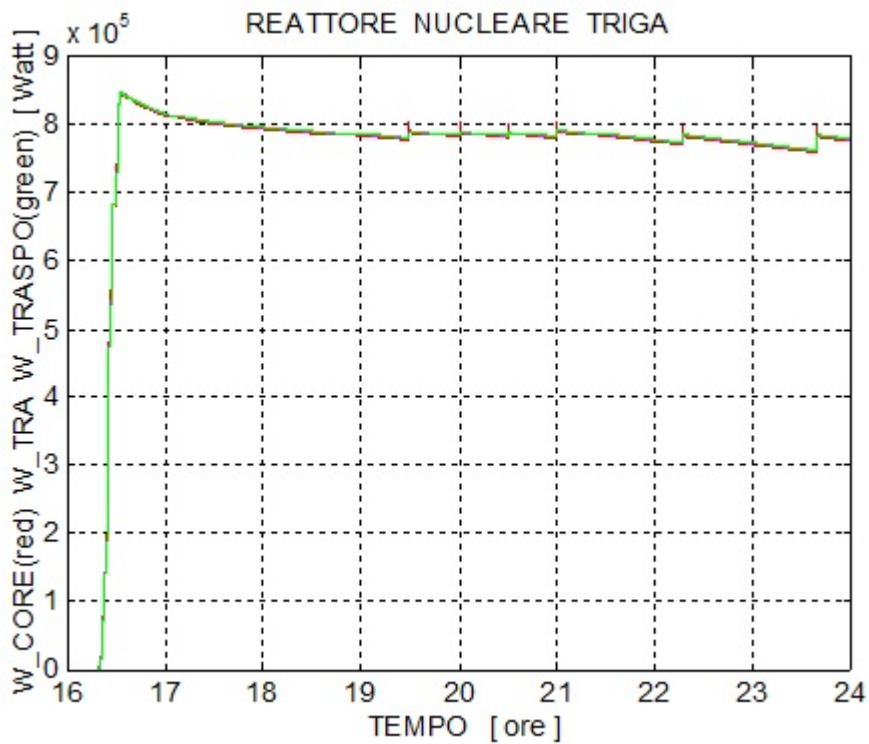
**Fig. 1D** Potenze prodotta fissione, trasmessa, rilascita dopo scram : RUN 2 ( 8 h )



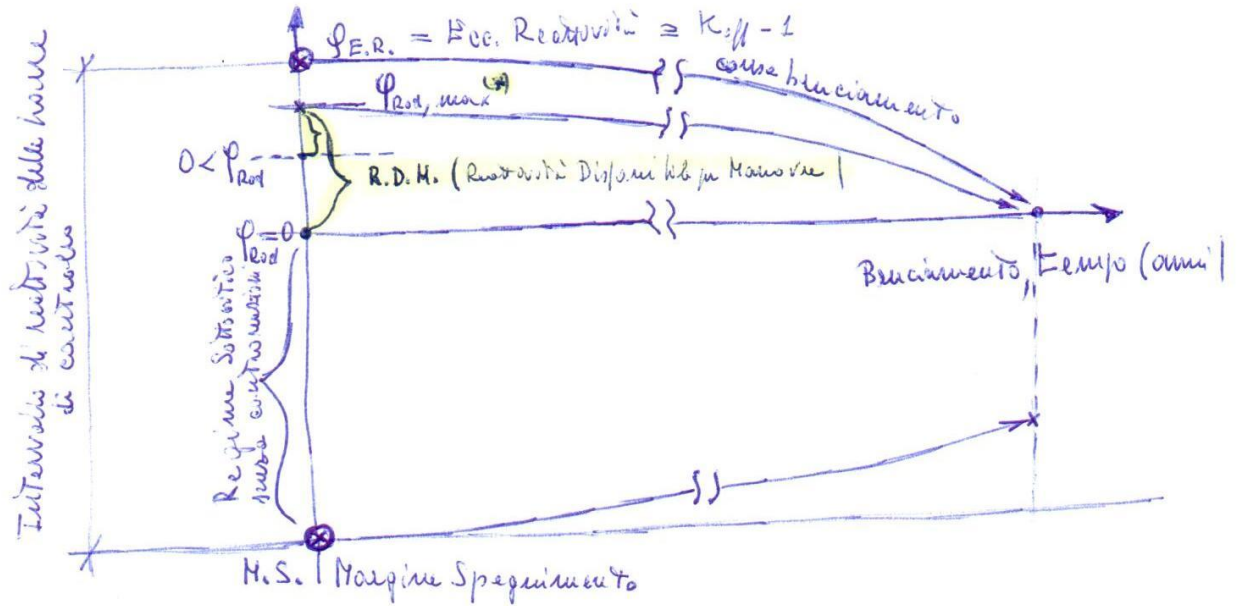
**Fig. 2D** Reattività Xenon dopo scram : RUN 2 ( 8 h )



**Fig. 3D** Reattività totale dopo scram : RUN 2 ( 8 h )  
(  $t_{scram} \rightarrow \text{MARGINE\_SPEGNIMENTO} + \text{REAT\_Xe} = -353.82 - 52.5 = -406.32$  )



**Fig. 4D** Potenze del nocciolo per nuova accensione reattore : RUN3 ( 8 h )  
Per raggiungere  $P_n=1$  Mw è necessario potere inserire reattività nel reattore , cioè disporre di un  $\text{margine\_manovra\_reattività} (< \text{eccesso\_reattività})$



**Fig. 5 D** Dinamica dei parametri R.D.M. e E.R. in funzione del bruciamento del combustibile

## CONCLUSIONI

### Sviluppati modelli MCNP : **Eterogeneo, Eterogeneo Semplificato, Omogeneo**

L'applicazione e il confronto dei modelli MCNP ha evidenziato l'influenza che alcuni componenti del nocciolo hanno nella Economia Neutronica del reattore :

- 1. forte assorbimento guaine inox delle barrette**
- 2. proprietà di Eterogeneità nella direzione della Criticità**
- 3. saturazione azione del riflettore**
- 4. avvicinamento alla Criticità nell'assemblaggio del nocciolo : sistemi sub-critici**

Successivamente sono state ricavate con il modello Eterogeneo MCNP le proprietà del nocciolo :

- 5. fenomeno di Accumulo Neutroni Termici nel Riflettore : due gruppi di energia**
- 6. profili multigruppo ( uscita MCNP ) e spettri continui con energia : attenuazione e deformazione per neutroni, gamma ed elettroni**
- 7. rapporto di conversione**
- 8. constatata congruenza tra uscite MCNP e teoria approccio deterministico ( fisica reattore ) , ma MCNP è la fisica**
- 9. Il modello MCNP possiede enormi potenzialità ...**

## Potenziati Sviluppi Futuri

### **BOOK GRAFICO NOCCIOLO TRIGA-RC1**

Creazione di un Book di consulto contenente grafici di spettri, profili multigruppo, energie rilasciate , ecc. relativi ai neutroni, fotoni, elettroni per ogni barreta del nocciolo del TRIGA-RC1.

Il lavoro richiederà :

1. Modifica dei modelli esistenti e un forte impegno di calcolo
2. Trasferimento ed elaborazione dei dati MCNP in altro ambiente  
( Matlab consolidato, altro ... )
3. Postazione di calcolo dedicata con collegamento sistemi MCNP e Matlab ...  
( Lab. SIMING è impegnato nella creazione della Sala Calcolo SIMING )

## BIBLIOGRAFIA

- /1/* Rapporto di Sicurezza del Reattore TRIGA-RC1 dell'ENEA
- /2/* Carlo Innarella. Seminario “ Il Modello Dinamico del Reattore Nucleare TRIGA-RC1 dell'ENEA “. ENEA C.R.CASACCIA , Dicembre 2011
- /3/* Carlo Innarella. Il Modello Dinamico del Reattore Nucleare TRIGA-RC1 dell'ENEA . Rapporto tecnico PAR2011-ENEA-L1C4-010 , Settembre 2012
- /4/* Carlo Innarella. Seminario “ Il Modello Monte Carlo del Nocciolo del Reattore Nucleare TRIGA-RC1 dell'ENEA “. ENEA C.R.CASACCIA , 2 Dicembre 2014
- /5/* Carlo Innarella. Il Modello del Reattore Nucleare BWR4 di Caorso . Modello implementato su Calcolatore Analogico dell'ENEA. Rapporto tecnico NRAF 1TP4B 84043 Dicembre 1984
- /6/* AN MCNP PRIMER by J.K.Shultis and R.E.Faw. Dept. of Mechanical And Nuclear Engineering. Kansas State University Manhattan, KS 66506 Copyright 2004-2006
- /7/* HELIOS-2 Methods Manual . Charles A. Wemple, Teodosi Simeonow, Joel D. Rhodes III, SSP-11/452 Rev 1, December 16, 2011  
PROPRIETARY
- / 8/* Description of the ERANOS-2.1 RELEASE-CEA SPRC/LEPH 06-205

## Appendice :

La locandina del seminario : “ Il modello MCNP del nocciolo del reattore nucleare TRIGA-RC1 dell’ENEA “

**ENEA**  
**UNITA' TECNOLOGIA DELLA FISSIONE**

**SEMINARIO**

**II MODELLO MONTE CARLO  
DEL NOCCIOLO  
DEL REATTORE TRIGA-RC1 ENEA**

**Relatori : M.Carta , C.Innarella**

**C.R.CASACCIA 2 Dicembre 2014 Ore 10.00**  
**Sala Mimose**



## SEMINARIO

- 10.00 Introducono gli **ingg. M.Sepielli** Direttore UTFISST e **E.Negrenti**  
UTFISST-SIMING
- 10,10 **Stato delle attività presso il TRIGA-RC1**  
Dott. Mario Carta UTFISST-REANUC
- 10,25 **Il modello MCNP del nocciolo del reattore TRIGA-RC1**  
Ing. Carlo Innarella UTFISST-SIMING
- 12,10 Discussione

### **Triga MCNP Model : Argomenti**

Introduzione MCNP Code

1. Modelli MCNP del nocciolo TRIGA-RC1, cross-section-table e alcuni tallies
2. Schematizzazione geometrica dei modelli MCNP : Eterogeneo Nocciolo, Eterogeneo Semplificato , Omogeneo
- Il modello MCNP Eterogeneo e le distribuzioni di arricchimento in fissile :  
Keff → Demo alla fine con modello dinamico TRIGA-RC1
  - Confronto modelli MCNP : cattura neutronica guaine ed eterogeneità
  - Azione riflettente grafite
  - Assemblaggio nocciolo : strutture sub-critiche
3. Due gruppi di energia : fenomeno di accumulo dei neutroni termici nel riflettore
4. N-gruppi di energia : attenuazione e deformazione dello spettro lungo il raggio nocciolo
5. Energia fissione depositata nelle barrette di combustibile
6. Energia perduta dai neutroni durante il rallentamento
7. Spettri gamma
8. Spettri degli elettroni
9. Rapporto di conversione del combustibile fresco
10. Versioni Modello Eterogeneo
11. Demo

