

I Corso di Formazione INFN sul tema dell'energia nucleare  
TORINO, 14 - 15 Dicembre 2009

# **Un laboratorio INFN per lo studio della fisica dei reattori veloci**

Paolo Saracco  
INFN - sez. Genova

- Convenzione INFN - Ansaldo Nucleare (inizi 2007) che ha per scopo "...l'utilizzo congiunto di competenze e risorse da parte di un Ente pubblico di ricerca, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare(INFN), e un'industria, l'Ansaldo Nucleare(ANN). Due realtà che hanno saputo mantenere e sviluppare, nel nostro Paese e su scala internazionale, competenze specifiche nei settori della ricerca di base, dell'energia e delle tecnologie nucleari."
- Progetto RIACE (Rivelatori ed Acceleratori per l'Energia)
- La prospettiva, per quanto riguarda INFN, è **contribuire** alla ricerca nell'ambito degli obiettivi per la GEN IV: non abbiamo né possiamo sviluppare competenze di carattere "ingegneristico", ma abbiamo o possiamo sviluppare competenze utili nel campo della fisica dei reattori veloci: "INFN intende, tramite la Convenzione, lanciare una linea di ricerca, **nuova nell'ambito dell'Istituto**, il cui fine è lo sviluppo di competenze e strumentazioni nel settore delle applicazioni della fisica nucleare nel campo dell'energia, applicazioni che trovano ovviamente immediate realizzazioni soprattutto in termini di sicurezza".
- In questo contesto - e prima della riapertura di una concreta prospettiva nucleare per il paese - nasce l'idea di realizzare una facility sperimentale per scopi di ricerca e formazione.

## REQUISITI

- Sicurezza adeguata ad un ambiente INFN → macchina fortemente sottocritica
- Costo
- Realizzabilità
- Utilità, sia come struttura di formazione, sia come struttura di ricerca: quindi non una macchina "potenza zero". Valutazione ANN: almeno qualche centinaio di kW
- Scalabilità (?)
- Quindi: Realizzare un Accelerator Driven System (ADS), sostenuto da un fascio di protoni su target opportuno.
- Realizzabilità e costo → fascio di 50 - 70 MeV, intensità 1 mA
- Bersaglio → Berillio
- Tecnologia core: U arricchito, Piombo

Nell'ambito della ricerca sui reattori di quarta generazione e' molto importante disporre di infrastrutture per lo studio dei parametri fondamentali di dinamica e cinetica dei futuri reattori, basati su neutroni veloci. Tra le opzioni studiate in ambito internazionale, l'Italia ha approfondito lo studio del diffusore-raffreddatore a Piombo, le cui proprieta' sono rallentamento e cattura minimi

dei neutroni e buon raffreddamento.

Si propone pertanto il progetto dettagliato di un prototipo di generatore a potenza bassa, utilizzabile presso laboratori di ricerca quali quelli di Legnaro dell'INFN.

Il generatore dovra' avere un alto grado di sicurezza, per poter essere utilizzato come laboratorio di addestramento, ma anche una buona flessibilita' per permettere un ampio spettro di misure.

Tale sicurezza e' garantita limitando la potenza a valori inferiori a 500 kW il fattore di moltiplicazione dei neutroni  $k_{eff}$  a meno di 0.95, valore limite per i depositi di combustibile, utilizzando combustibile privo di plutonio e un diffusore a Piombo solido. Il generatore e' quindi intrinsecamente sottocritico per le sue caratteristiche di progettazione e dovra' essere sostenuto da

un fascio di protoni a corrente continua elevata.

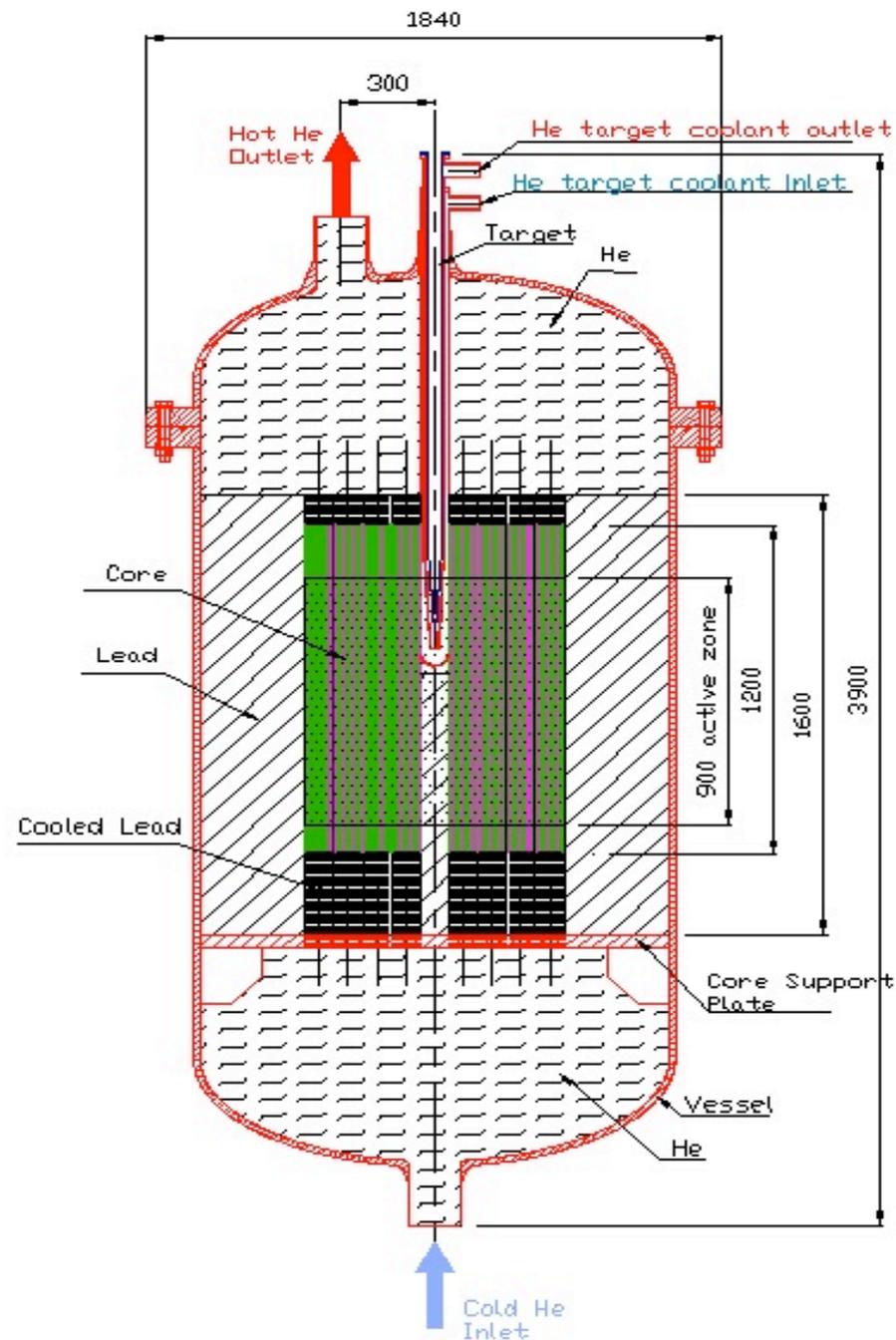
Simulazioni preliminari, effettuati con i codici MCNPX e MCNP , hanno fornito, per una corrente continua di fascio di 1 mA di protoni di energia 70 MeV, una potenza di circa 300 kW con un convertitore di Berillio. Tali simulazioni sono state validate entro il 10 % utilizzando dati sperimentali sulla produzione di neutroni dal Berillio.

Il progetto concettuale del generatore e' stato fatto considerando 88 elementi attivi, ciascuno costituito da una matrice di Piombo solido di dimensioni 92X92X1200 mm<sup>3</sup>. In ogni elemento sono inserite 81 barrette di Ossido di Uranio arricchito con Uranio 235 al 20%, del diametro esterno di 8.5 mm e di lunghezza attiva 870 mm. Gli elementi di Uranio formano approssimativamente un cilindro di raggio 0.5 metri e altezza 1.2 metri. Tale cilindro e' a sua volta contenuto in un "vessel" di acciaio di spessore di circa 20 mm. Al fine di migliorare l'economia neutronica e ridurre il flusso neutronico sulle pareti del vessel, il progetto comprende tre riflettori in Piombo solido, concepiti come segue: il primo e' costituito da una camicia in Piombo solido dello spessore di circa 250 mm, che circonda il cilindro contenente gli elementi di combustibile. Gli altri due riflettori, assiale superiore e inferiore, sono costituiti da due strati cilindrici in Piombo solido, di diametro corrispondente al vessel (circa 1.5 m) e altezza (o spessore) 30 cm per quello inferiore e 10 cm per quello superiore.

Il sistema viene raffreddato con Elio gassoso, elemento trasparente ai neutroni e che non e' soggetto ad attivazione. Il gas viene pompato all'ingresso della regione attiva, con temperatura variabile a seconda delle condizioni operative e pressione dell'ordine di 10-20 bar, per mezzo di un compressore, attraverso degli appositi fori (diametro circa 2.5 mm) presenti negli elementi attivi. Il gas caldo uscente dal vessel viene raffreddato in uno scambiatore Elio-acqua esterno. Il convertitore di Berillio (o altro materiale) avra' un circuito di raffreddamento ad Elio dedicato.

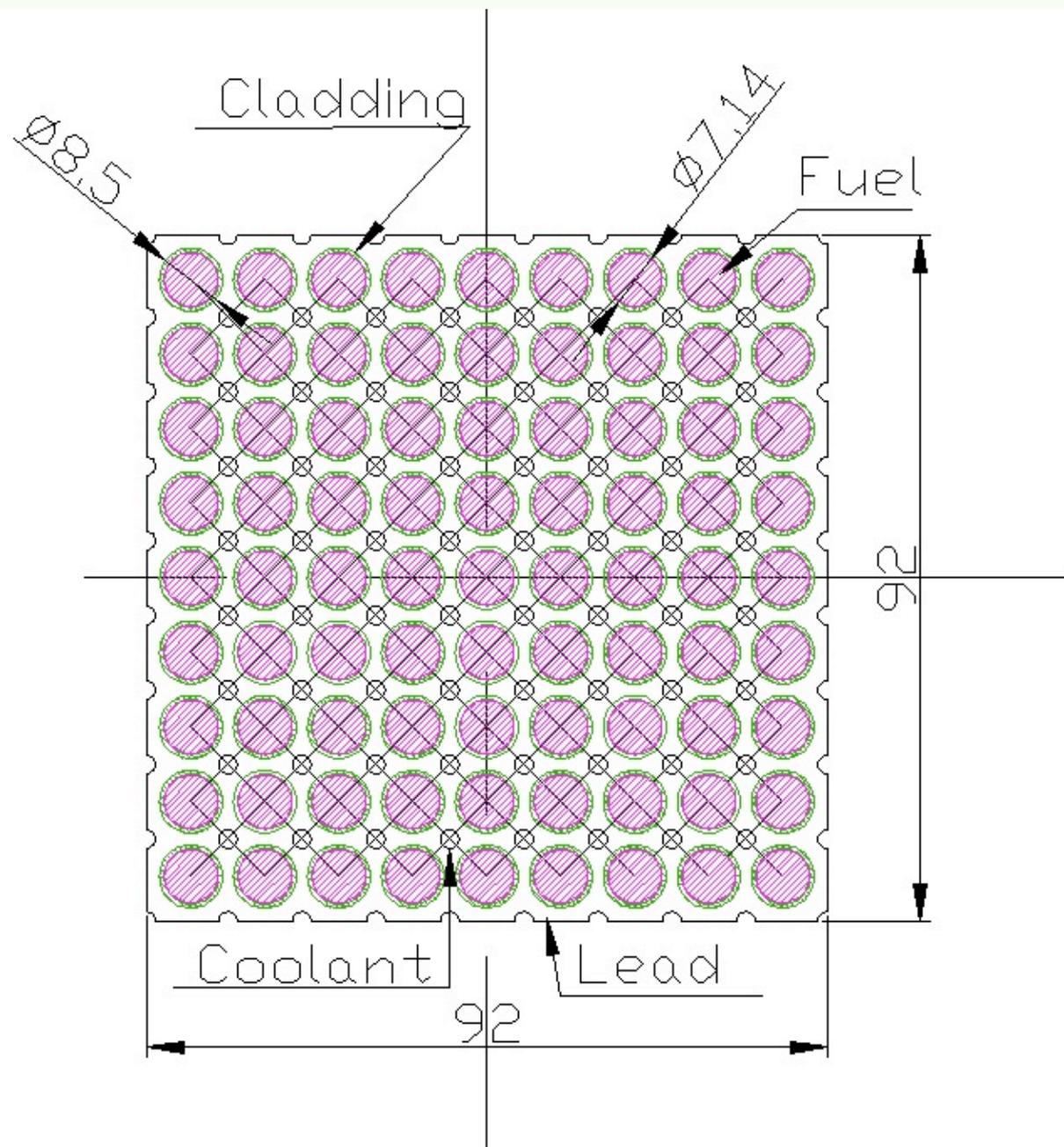
(tratto da STU-ANNINFN-001, "Progetto concettuale di un generatore di neutroni veloci con diffusore in piombo solido e raffreddato a gas", M. Frogheri (ANN), P. Neuhold (ANN), M. Reale (ANN), M. Ripani (INFN), P. Saracco (INFN) - Sottoposto per il finanziamento del progetto al bando FIRB Italia-Cina alla fine del 2007 )

# Una infrastruttura di formazione e ricerca





## Una infrastruttura di formazione e ricerca



Come si è visto il progetto concettuale è basato su un'analisi statica usando la simulazione MonteCarlo. Un progetto dettagliato richiede la caratterizzazione delle proprietà cinetiche (e dinamiche) della macchina.

EQUAZIONE del TRASPORTO (simulata dai MonteCarlo)

$$\begin{aligned} \frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \Sigma_t(\vec{r}, t) \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) + \vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = \\ = \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \int_0^\infty dE' \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}', t) + s(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \end{aligned}$$

Dove  $\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = v n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$  ed  $n$  è la densità di neutroni nello spazio delle fasi. Le  $\Sigma_{t/s}$  che compaiono nell'eq. del trasporto sono le sezioni d'urto macroscopiche, cioè moltiplicate per la densità dei centri scatteratori, per i neutroni nel mezzo in esame.  $s$  rappresenta la densità di sorgenti di neutroni, sia intrinseche (da fissione) sia esterne.

La soluzione dell'equazione del trasporto è un task formidabile.

Per caratterizzare il sistema è come abbiamo visto importante il coefficiente di moltiplicazione, che rappresenta la capacità del sistema di sostenere (o meno) la catena di fissione. Per un sistema critico (reattore) esso deve essere prossimo a 1.

$$\begin{aligned} \Sigma_t(\vec{r}, t) \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) + \vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = \frac{1}{k} \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \int_0^\infty dE' v \Sigma_{fiss}(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}', t) \\ = \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \int_0^\infty dE' \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}', t) + S_{ext}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \end{aligned}$$

Se  $k=1$  il sistema ammette una configurazione stabile in assenza di sorgenti esterne (reattore).  
Se  $k>1$  la densità di neutroni cresce rapidamente nel tempo, al contrario se  $k<1$ .

Quindi se il sistema è sottocritico ( $k<1$ ) la sorgente esterna di neutroni è necessaria a garantire la stabilità del sistema.

Dal punto di vista della safety è necessario assicurarsi che variazioni accidentali delle condizioni operative (e.g. per variazioni di temperatura, spostamenti di materiale, ...) non rendano il sistema sovrcritico, sia che si tratti di un reattore, sia che si tratti di un ADS.

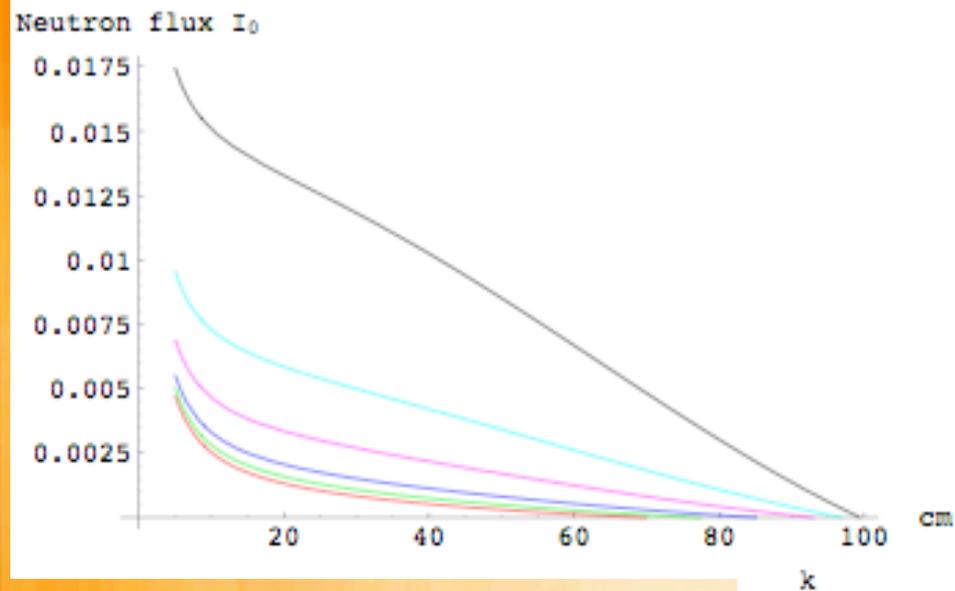
Un reattore viene mantenuto sotto controllo per mezzo dell'inserimento/disinserimento di "barre di controllo", composte di materiali assorbitori di neutroni, all'interno della zona dove è presente il combustibile: ovviamente è necessario che i tempi di risposta del sistema siano compatibili con tali operazioni meccaniche.

Le reazioni nucleari (forti) sono caratterizzate da tempi di risposta dell'ordine del microsecondo o poco più. Alcuni dei neutroni (neutroni delayed) prodotti all'interno del reattore derivano però dal decadimento debole di taluni dei prodotti di fissione con tempi tipici dell'ordine del secondo; per quanto la loro frazione  $\beta$  sia estremamente piccola, se  $k$  differisce dall'unità meno di  $\beta$  il sistema risulta controllabile proprio grazie ad essi. In un reattore veloce la frazione di neutroni delayed è ulteriormente ridotta rispetto al caso di un reattore termico.

Pertanto per quanto riguarda un ADS è ragionevole attendersi che, per valori "sufficientemente piccoli" di  $k$ , per il sistema sia impossibile diventare sovrcritico e quindi non si renda necessaria la presenza di sistemi aggiuntivi di controllo del sistema: l'accensione/spegnimento del fascio di protoni è sufficiente a garantire la sicurezza dell'apparato.

Se si vuole costruire un apparato "scalabile" (cioè per il quale sia possibile modificare il valore di  $k$ ) è necessario investigare in dettaglio quali siano i limiti entro i quali è possibile operare.  
Questo è lo scopo di alcune iniziative attualmente in corso.

# Esempio (approssimazione diffusiva, sistema sferico, neutroni monoenergetici)

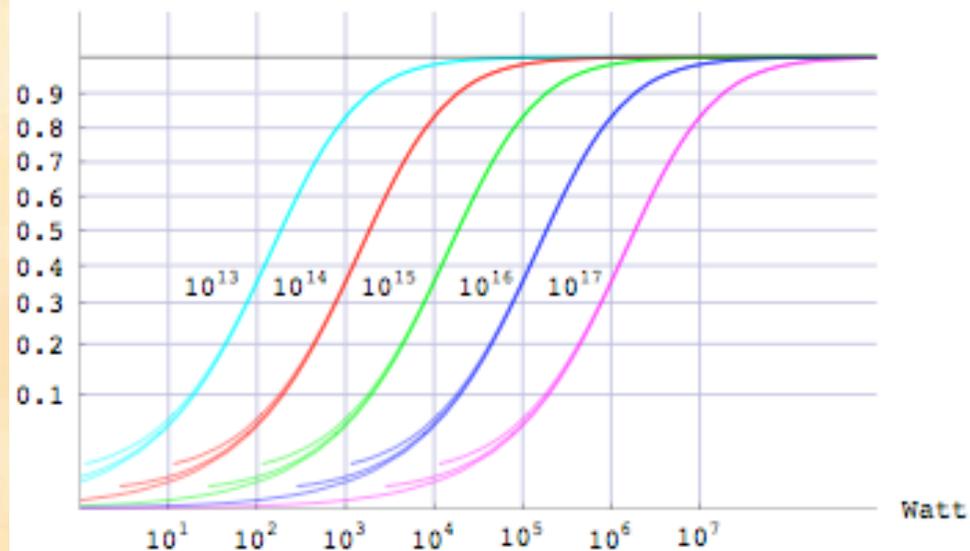


Dipendenza radiale del flusso di neutroni

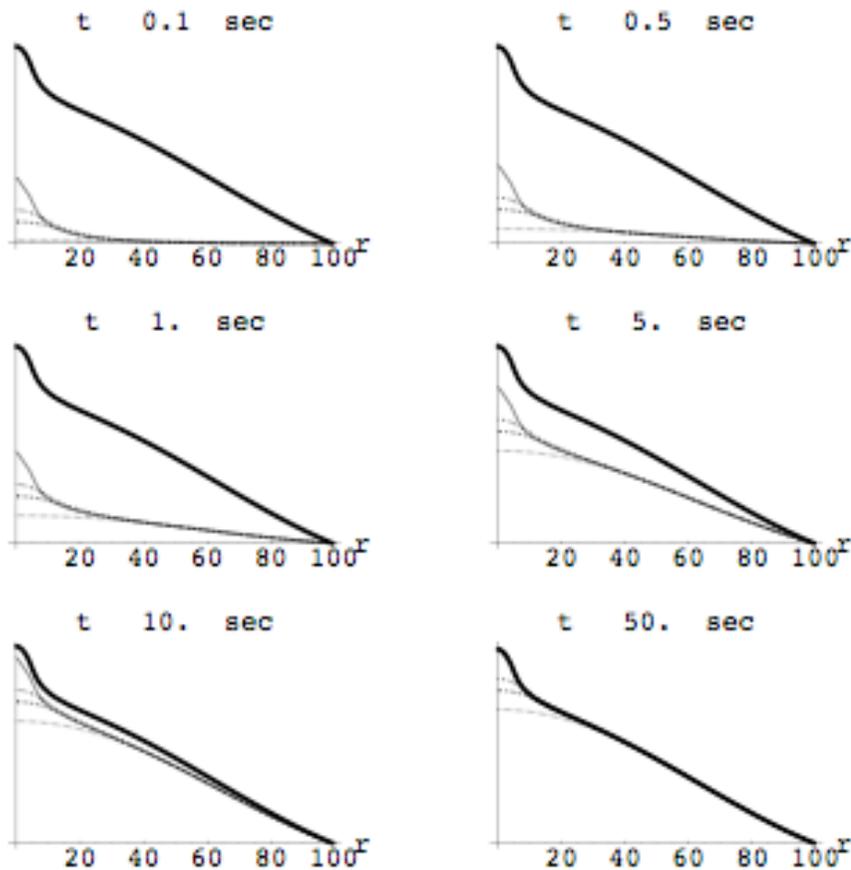
Sistema: Pu-Na al 30%

- $k = 0.6$  curva rossa
- $k = 0.7$  curva verde
- $k = 0.8$  curva blu
- $k = 0.9$  curva viola
- $k = 0.95$  curva azzurra
- $k = 0.98$  curva nera

Potenza prodotta al variare di  $k$   
per diverse intensità n/sec della sorgente



# Esempio (continua...)



Variazione nel tempo del flusso dopo l'accensione della sorgente

Curva

Nera spessa

Nera sottile

Dot-dash

Dashed

Dotted

flusso statico (asintotico)

calcolo con 25 modi normali

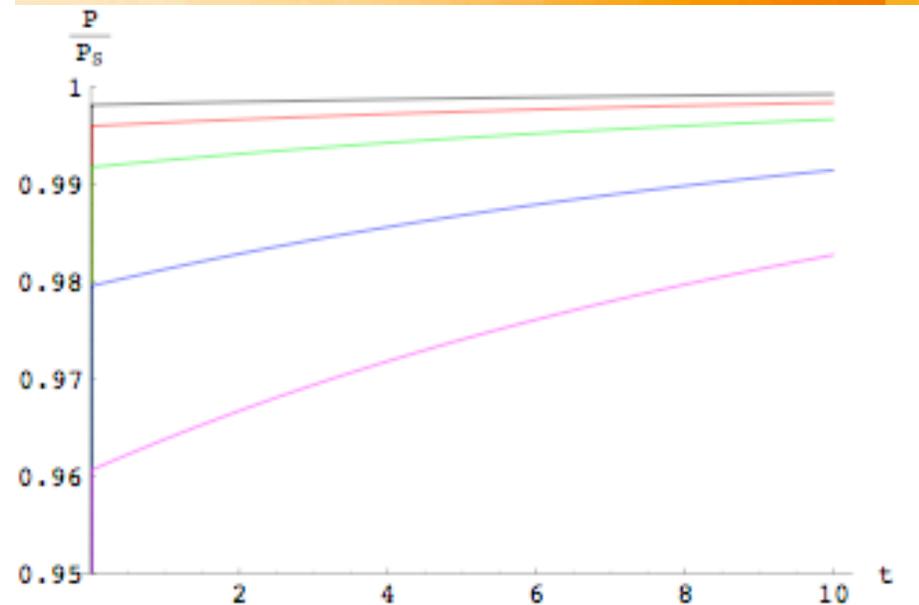
" 8 "

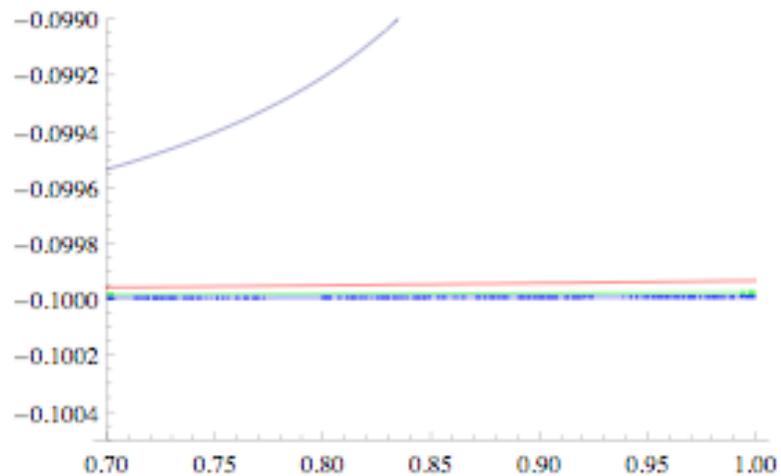
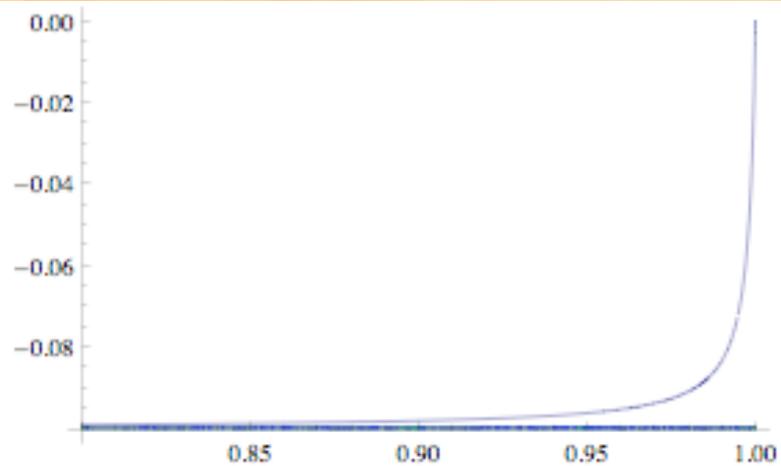
" 5 "

" 1 "

Frazione della potenza asintotica prodotta in funzione del tempo con 1 gruppo di neutroni delayed (valori nominali)

- $k = 0.8$             curva nera
- $k = 0.9$             curva rossa
- $k = 0.95$           curva verde
- $k = 0.98$           curva blu
- $k = 0.99$           curva viola





DIPENDENZA DELLE FREQUENZE PROPRIE DEL SISTEMA  
DAL COEFFICIENTE DI MOLTIPLICAZIONE  $k$ .  
Dall'alto al basso le curve per i modi 1,2,3,5 e 10  
(figura in basso ingrandita)

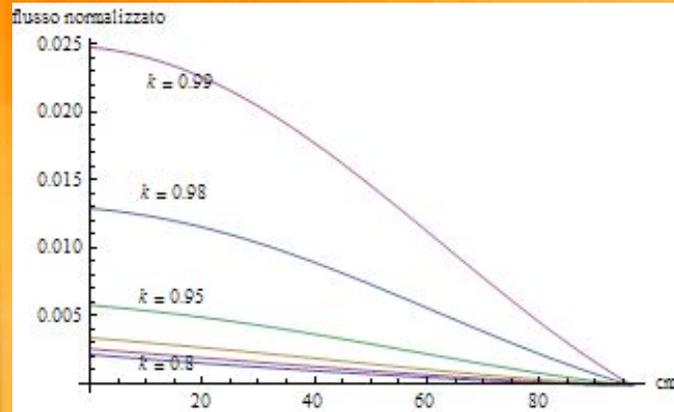
PER  $k < 0.9-0.95$  il sistema ha un comportamento "semplice" perché  
TUTTE le frequenze proprie praticamente coincidono.

Dipendenza spaziale e temporale del flusso fattorizzano

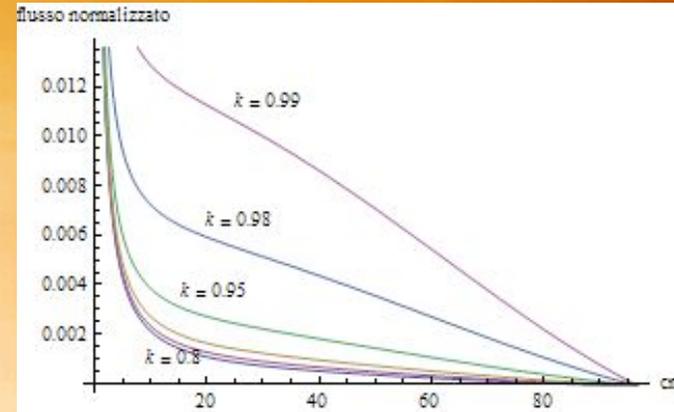
Comportamento SIMILE, ma opposto nelle ragioni fisiche a quello di un  
reattore: nel reattore di fatto conta il solo primo modo normale (vale la  
PKA), in un sistema fortemente sottocritico tutte le frequenze normali  
coincidono.

## CALCOLO A 2 GRUPPI

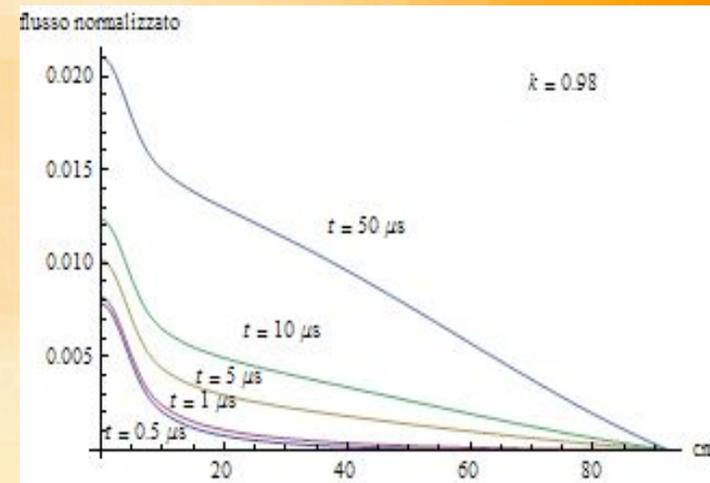
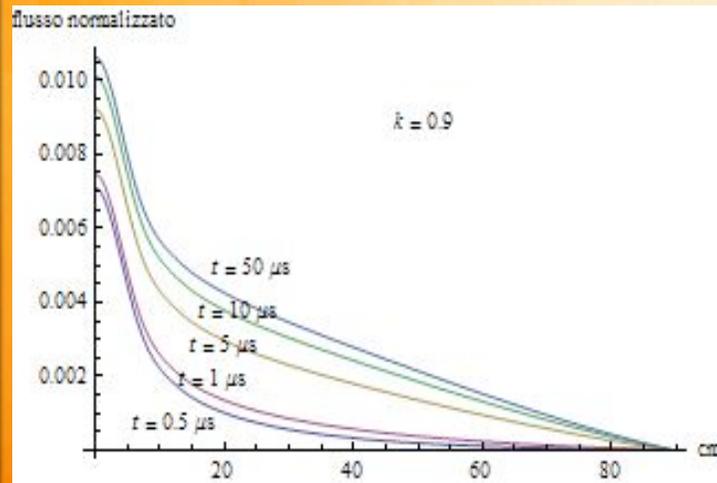
### FLUSSO NEL GRUPPO LENTO ( $E < 440$ keV) (soglia dell'anelastico nel Na)

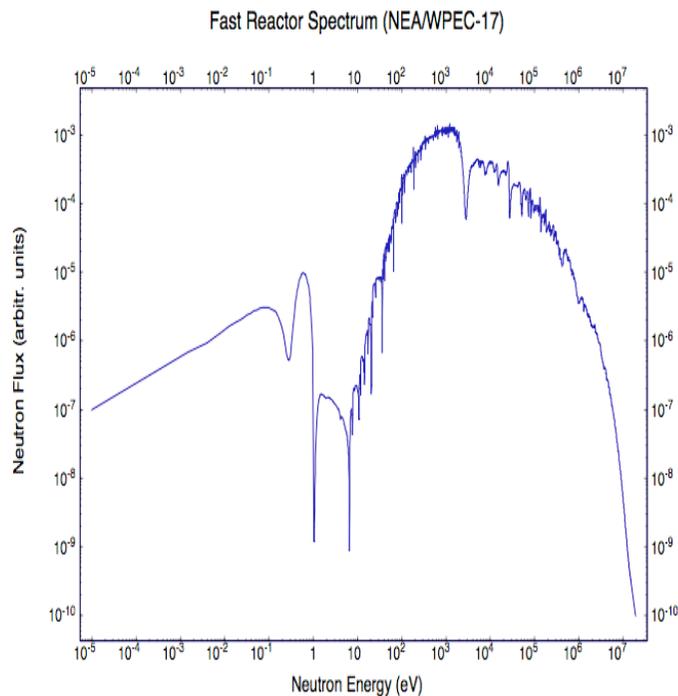


### FLUSSO NEL GRUPPO VELOCE



### Accensione della sorgente esterna (flusso totale)





- La caratterizzazione di un ADS sembra indicare, come era legittimo attendersi, regimi diversi di funzionamento del sistema al variare del coefficiente di moltiplicazione
- I limiti principali di questa caratterizzazione stanno nell'approssimazione diffusiva e nel piccolo numero di gruppi energetici coinvolti nel calcolo.
- Il problema principale nel caratterizzare l'ADS sta nella non fattorizzazione tra dipendenza spaziale e temporale del flusso → sono richiesti calcoli a molti (50?) gruppi
- Sono implicati fenomeni fisici diversi da quelli rilevanti in un reattore termico (e.g. scattering inelastico) che rendono necessaria un'analisi dettagliata, a causa del diverso spettro di neutroni all'interno del sistema.

- Le caratteristiche specifiche di una macchina molto sottocritica la rendono intrinsecamente sicura, ma è necessario capire se e quanto le misure effettuate in questo regime siano poi trasferibili in proprietà di un reattore veloce.
- I Montecarlo attualmente disponibili sono largamente testati per sistemi termici, più lavoro (anche in termini di misure) è necessario per i sistemi veloci.