

POLITECNICO DI TORINO
ESAMI DI STATO PER L'ABILITAZIONE
ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE

II SESSIONE - ANNO 2003

Ramo: Ingegneria Nucleare

Tema N.1

Amplificazione di neutroni emessi da un generatore compatto a fusione D-D.

1 Posizione del problema

Il tema fa riferimento alla possibilità di amplificare utilmente i neutroni primari ottenibili mediante uno dei moderni **generatori compatti a fusione D-D**. Questi generatori a basso costo hanno solitamente una modesta capacità emissiva di neutroni. Proprio per superare tale limitazione potrà rendersi opportuno amplificare il numero di neutroni primari da essi emessi, facendoli interagire con un'opportuna struttura moltiplicante sottocritica. Si potranno così realizzare delle **sorgenti secondarie** di ben più elevata intensità. Queste ultime avranno svariate applicazioni tecnologiche, ad esempio:

- (i) nell'energetica: per attivare reattori sottocritici di grande potenza ; oppure
- (ii) nella bioingegneria: come apparati idonei alla pratica ospedaliera della cosiddetta "Boron Neutron Capture Therapy".

Si dovrà qui effettuare uno studio preliminare delle caratteristiche neutroniche e delle prestazioni di un particolare **dispositivo di amplificazione neutronica**, realizzato inserendo un generatore a fusione D-D all'interno di uno spesso strato sferico di materiale moltiplicante omogeneo.

Premettiamo che un tipico generatore compatto a fusione D-D potrà essere schematizzato, ai nostri fini, come una sfera radialsimmetrica, avente un raggio ρ , dell'ordine di 10-20 cm. Dalla sua superficie, in condizioni operative, emergono dei neutroni di energia assai maggiore di quella media di fissione. Si osserva poi che l'hardware costituente il generatore D-D contiene metalli pesanti, che sono buoni assorbitori di neutroni termici; ma esso contiene anche una quantità non irrilevante di idrogeno nell'acqua di raffreddamento. Di conseguenza un generatore D-D sarà capace di rallentare, almeno in parte, quei neutroni veloci che eventualmente vi penetrassero attraverso la sua superficie di contorno $r = \rho$.

Per costruire un **tipico amplificatore neutronico** si potrà collocare, ad es., un generatore a fusione del tipo di cui sopra nella regione centrale di una **struttura moltiplicante** sferica, omogenea, non riflessa, di raggio estrapolato R . Nel volume $V = 4\pi(R^3 - \rho^3)/3$ di tale mezzo moltiplicante avrà luogo l'amplificazione dei neutroni emessi dalla sorgente primaria: dando così luogo ad una **sorgente secondaria o utile**, che potremo identificare convenzionalmente, ad es., con la corrente neutronica totale che emerge dal contorno esterno $r = R$ del mezzo moltiplicante.

Oggetto del presente tema sarà proprio lo studio del processo di amplificazione dei neutroni che ha luogo in questi dispositivi.

2 Modello fisico-matematico

E' ammesso che la neutronica dello strato sferico moltiplicante, di cui espressamente ci occuperemo, possa essere trattata con la teoria diffusiva a **due gruppi energetici**. In tale ambito si potrà inoltre assumere che, data la particolare configurazione geometrica, i neutroni di alta energia emessi dalle fusioni D-D diano luogo, previo rallentamento all'interno dello strato sferico $\rho \leq r \leq R$ (che è moderante oltre che moltiplicante!) ad una sorgente volumica distribuita di neutroni, che noi assumeremo come **sorgente primaria**. Essa alimenta il primo gruppo, quello veloce (pedice F) del nostro modello a due gruppi, e ha un andamento radiale del tipo:

$$S_F(r) = S_0 \frac{1}{\int_{\rho}^R \frac{Sh((R-w)/L_s)}{w} 4\pi w^2 dw} \cdot \frac{Sh((R-r)/L_s)}{r} \quad (1)$$

L_s , rappresentando un'opportuna "lunghezza di rallentamento" dall'energia di emissione nelle reazioni di fusione D-D a quella di ingresso nel gruppo veloce qui considerato. E' chiaro dalla formula precedente che il generatore D-D immette globalmente nello strato moltiplicante S_0 neutroni al secondo.

Data la consistenza e le caratteristiche dell'hardware costituente il generatore a fusione, la presenza di tale dispositivo potrà essere modellizzata con le seguenti condizioni al suo contorno esterno $r = \rho$, coincidente con quello interno dello strato moltiplicante:

$$D_F \frac{d\Phi_F(r)}{dr} \Big|_{r=\rho} = \gamma_F \cdot \Phi_F(\rho);$$

$$D_T \frac{d\Phi_T(r)}{dr} \Big|_{r=\rho} = \gamma_T \cdot \Phi_T(\rho) - \gamma_{F \rightarrow T} \cdot \Phi_F(\rho).$$
(2)

La prima di esse rende conto del fatto che, rispetto ai neutroni veloci diffondenti nel mezzo moltiplicante in cui è immerso, il generatore esercita un "effetto trappola": attribuibile essenzialmente al suo contenuto di idrogeno. La seconda invece simula il generatore a fusione come un assorbitore di neutroni termici, tipo barra di controllo: per il quale però l'entità della corrente entrante risulta attenuata, in conseguenza del fatto che una piccola frazione dei veloci intrappolati nel generatore potrà fuoriuscire, dopo di aver superato all'interno del generatore stesso la soglia termica.

I parametri positivi γ_F , γ_T e $\gamma_{F \rightarrow T}$ sono caratteristici di ciascun generatore D-D e dovrebbero essere forniti dal suo costruttore.

E' del tutto evidente che un amplificatore neutronico (che è il dispositivo globale, comprendente non solo il mezzo moltiplicante, ma anche l'hardware passivo del generatore a fusione) deve trovarsi in condizione di sottocriticità: a prescindere dal fatto che la sorgente primaria $S_F(r)$ sia attiva o spenta. Per accertare se la condizione di sottocriticità sia o meno soddisfatta, sarà indispensabile conoscere, innanzitutto, per quali combinazioni dei parametri geometrico-materiali il dispositivo in esame possa raggiungere la criticità.

3 Soluzione del modello

I quesiti al Candidato sono i seguenti:

D1: *Determinare l'equazione critica dello strato moltiplicante $\rho \leq r \leq R$, tenendo conto della simmetria radiale, delle sopra citate condizioni al suo contorno interno $r = \rho$, nonché dell'azzeramento di entrambi i flussi $\Phi_F(r)$ e $\Phi_T(r)$, per $r = R$. (Può essere utile impiegare qui il metodo degli pseudo-potenziali cinetici, nella sua versione semplificata per la statica).*

D2: *Verificare che, pur trattandosi di una struttura di **materiale omogeneo**, nel suo volume, per i flussi neutronici **critici**, non vale il teorema di separabilità spazio-energetica. Spiegare per quali ragioni fisiche ci si poteva attendere a priori l'apparente anomalia di avere uno spettro neutronico critico che è funzione del posto.*

4 Operazione in regime sottocritico

Si supponga di qui in poi che il dispositivo critico sia stato opportunamente modificato, fino a renderlo **sottocritico** e che la sorgente $S_F(r)$ sia mantenuta accesa.

Un illustre Ricercatore dell'Istituto Superiore di Tecnologia, interpellato sul problema, si è pregiato di comunicare che, secondo lui, i flussi stazionari di risposta alla sorgente primaria $S_F(r)$ dovrebbero avere, nella ben nota nomenclatura della teoria a due gruppi, e per $\rho \leq r \leq R$, la forma seguente:

$$\begin{aligned}\Phi_F(r) &= A_1 \left[\frac{\sin(\mu r)}{r} - \tan(\mu R) \frac{\cos(\mu r)}{r} \right] \\ &+ A_2 \left\{ \frac{\sinh(\nu r)}{r} - \tanh(\nu R) \frac{\cosh(\nu r)}{r} \right\} + H_F \frac{\sinh((R-r)/L_s)}{r}; \\ \Phi_T(r) &= \gamma_1^{(2)} A_1 \left[\frac{\sin(\mu r)}{r} - \tan(\mu R) \frac{\cos(\mu r)}{r} \right] \\ &+ \gamma_2^{(2)} A_2 \left\{ \frac{\sinh(\nu r)}{r} - \tanh(\nu R) \frac{\cosh(\nu r)}{r} \right\} + H_T \frac{\sinh((R-r)/L_s)}{r}.\end{aligned}\tag{3}$$

Ma ha dimenticato di precisare i valori delle costanti A_1 , A_2 , H_F e H_T che in tali soluzioni compaiono. Valli a capire questi illustri Ricercatori!

Occorrerà quindi che si risponda agli ulteriori quesiti:

D3: *può la forma della soluzione proposta dall'illustre Ricercatore essere ritenuta corretta? In caso affermativo, quale deve essere il valore delle costanti di cui sopra?*

Perchè esse risultano tutte proporzionali a S_0 ?

D4: *Supposto che l'equazione critica di cui in D1 sia posta nella forma*

$$E_{cr} \doteq E_{cr}(\rho, R, \gamma_F, \gamma_T, \gamma_{F \rightarrow T}, \text{costanti nucleari del mezzo}) = 0.\tag{4}$$

verificare che nelle (3) A_1 e A_2 sono esprimibili come rapporti, ciascuno dei quali ha a denominatore l'espressione E_{cr} , che qui è diversa da 0, dato che siamo in sottocriticità.

Quali implicazioni potrebbe avere questo fatto nel caso che E_{cr} si avvicinasse indefinitamente al valore 0?

D5: *Definito come **fattore di amplificazione del dispositivo** il rapporto*

$$F_A \doteq \frac{4\pi R^2 [J_F(R) + J_T(R)]}{S_0},\tag{5}$$

verificare che esso è indipendente da S_0 e che tende ad ∞ quando $E_{cr} \rightarrow 0$, quale che sia l'intensità della sorgente primaria. Commentare questo risultato.

D6:(opzionale) *Per valutare la "distanza dalla criticità" dell'amplificatore sopra studiato si potrebbe, ad es., determinare il suo **periodo stabile** di spegnimento, a seguito dell'azzeramento istantaneo della sorgente primaria.*

Si delinei una procedura con cui tale periodo stabile possa essere determinato, anche unificando i precursori di ritardati in una sola famiglia, ma stando possibilmente nell'ambito del modello diffusivo a due gruppi.

5 Collaborazione con la Pubblica Amministrazione

Si suppone ora che il Candidato sia stato chiamato a far parte di una Commissione Consultiva per i Problemi Energetici, istituita presso il Ministero delle Attività Produttive. Gli viene richiesto, in tutta fretta e, come al solito, senza dargli tempo per documentarsi, di

D7 *redigere per l'On Ministro un sintetico promemoria (non più di una cartella!), che illustri le ragioni tecniche, economiche e di sicurezza, che potrebbero giustificare (o sconsigliare!) la scelta di un sito unico nazionale per il collocamento definitivo delle scorie radioattive. Si faccia, in particolare, riferimento alla recente proposta del Governo di ubicare tale sito nel sottosuolo della Basilicata.*

Nota I Sigg. Candidati sono invitati a fornire **ordinatamente** le risposte **R1, R2, ..., R7**, ai quesiti **D1, D2, ..., D7**, esprimendole nella forma tipica di una relazione professionale a carattere tecnico-scientifico.

Eventuali minute non potranno essere prese in considerazione dalla Commissione.