

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

II SESSIONE - ANNO 2005

Ramo: Ingegneria Nucleare

Tema N.1

Analisi di un dispositivo moltiplicante sottocritico, iniettato mediante una sorgente di neutroni veloci.

## 1 Premessa e ipotesi di base.

Al fine di sviluppare nuove tecnologie energetico-nucleari e biomediche, in un laboratorio nazionale è prevista l'installazione di un dispositivo moltiplicante omogeneo, non riflesso. La sua geometria, almeno nella fase preliminare dello studio, potrà essere assimilata a quella di una lastra indefinita o "slab", di spessore estrapolato  $a$ , collocata tra i due piani  $x = 0$  e  $x = a$ .

Per tale dispositivo pare inoltre accettabile, in prima approssimazione, che le trattazioni della statica neutronica e della dinamica asintotica vengano svolte nell'ambito del modello matematico diffusivo a due gruppi energetici, formulato nella sua accezione più semplice (totale assenza di moltiplicazioni causate da neutroni veloci e considerazione di una sola famiglia di nuclidi precursori di neutroni ritardati).

Le costanti nucleari macroscopiche del materiale moltiplicante sono da ritenersi note, insieme ai valori medi di  $\beta$  (frazione dei secondari di fissione emessa con ritardo) e di  $\lambda$  (costante di decadimento radioattivo, opportunamente mediata sulle famiglie dei nuclidi precursori di ritardati). I simboli da adottarsi per le costanti sono quelli convenzionali ( $F$ =fast;  $T$ =thermal). In particolare: per i coefficienti di diffusione,  $D_p$  e  $D_T$ ; per le sezioni d'urto macroscopiche,  $\Sigma_{r,F}$  (rimozione dal gruppo veloce),  $\Sigma_{F-T}$  (trasferimento dal gruppo veloce a quello termico),  $\Sigma_{T}$  (rimozione dal gruppo termico, per cattura e fissione),  $\Sigma_{f,T}$  (fissione nel gruppo termico). Sono definite inoltre le grandezze derivate  $p \doteq (\Sigma_{r,F}/\Sigma_{T})$  (probabilità di sfuggire alle catture in risonanza),  $L_F^2 \doteq D_p/H_p$  e  $L_T^2 \doteq D_T/\lambda$  (aree di rallentamento e di diffusione), nonché  $k^0 = (\lambda \Sigma_{f,T}) / (\Sigma_{T} - p)$ , essendo  $\lambda$  il numero medio di secondari emessi per ognuna delle fissioni causate da neutroni termici.

L'impiego della teoria dei cosiddetti "pseudopotenziali cinetici" per il modello a due gruppi potrà facilitare lo svolgimento del presente tema. Si assume che il Candidato sia a conoscenza del significato e delle definizioni dei simboli usualmente introdotti in tale contesto.

## 2 Posizione del problema e quesiti ai Candidati

Saranno principali oggetti del presente tema sia lo studio stazionario dell'interazione tra una particolare sorgente neutronica impressa e lo slab moltiplicante di cui sopra, sia l'analisi della dinamica asintotica dello slab stesso, in assenza di sorgente eccitante.

Di Viene richiesto al Candidato di verificare preliminarmente se il dispositivo in esame si trovi effettivamente in uno stato di sottocriticità. Si descriva quindi una procedura che permetta di effettuare tale verifica e di indicare, se del caso, come modificare qualcuna delle concentrazioni dei materiali, al fine di assicurare la realizzazione di uno degli infiniti stati sottocritici possibili. Si dimostri inoltre che, nel caso in esame, le due seguenti equazioni:

$$I) \quad k_{eff} \doteq \lambda / [(1 + L_F^2 B_G^2)(1 + L_T^2 B_G^2)] = \lambda / \text{con} B_G^2 = (\lambda / \lambda_0)^2 \text{ e}$$

$$II) \quad \sin(\lambda x) = 0, \text{ essendo } \lambda x \text{ il cosiddetto "buckling principale" della teoria a due gruppi,}$$

non sono altro che due formulazioni equivalenti della condizione di criticità per il dispositivo in esame.

Entro lo slab moltiplicante considerato, la cui sottocriticità si assume d'ora in poi accertata, opera una sorgente volumica stazionaria, di soli neutroni veloci, avente intensità

$$S_F(x) = S_0 \frac{1}{\int_0^a \sinh\left(\frac{a-x'}{L_S}\right) dx'} \sinh\left(\frac{a-x}{L_S}\right) \doteq S_0 K \sinh\left(\frac{a-x}{L_S}\right). \quad (1)$$

La grandezza  $L_S$  [cm] è un ulteriore dato del problema.

Essendo necessario conoscere gli andamenti dei flussi neutronici  $\Phi_F(x)$  e  $\Phi_T(x)$  intrattenuti stazionario-mente dalla citata sorgente, nella loro espressione analitica e non soltanto in forma numerica, la Direzione del Laboratorio ha assegnato ad un qualificato Ricercatore esterno l'incarico di determinare tali flussi. Il Ricercatore ha comunicato al Committente il risultato riportato qui sotto, dicendo di averlo espresso in una forma che ritiene particolarmente opportuna, ottenuta nell'ambito della teoria degli pseudo-potenziali. La nomenclatura impiegata è proprio quella tipica di tale algoritmo.

$$\Phi_F(x) = \frac{S_0}{\sin(\mu a)} \left\{ \Omega_1 \sin(\mu(a-x)) + \sin(\mu a) \left[ \frac{\Omega_2}{\sinh(\nu a)} \sinh(\nu(a-x)) + \Xi_F \sinh\left(\frac{a-x}{L_S}\right) \right] \right\}; \quad (2)$$

$$\Phi_T(x) = \frac{S_0}{\sin(\mu a)} \left\{ \Omega_1 \psi_1^{(2)} \sin(\mu(a-x)) + \sin(\mu a) \left[ \frac{\Omega_2 \psi_2^{(2)}}{\sinh(\nu a)} \sinh(\nu(a-x)) + \Xi_T \sinh\left(\frac{a-x}{L_S}\right) \right] \right\}. \quad (3)$$

Al Ricercatore non è riuscito però di allegare i files che definiscono esplicitamente le costanti  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$ ,  $\Xi_F$  e  $\Xi_T$ , che compaiono nelle sue espressioni dei flussi, prima di doversi rendere irreperibile per cause di forza maggiore.

Sarà compito del Candidato

D2 a) determinare analiticamente i valori delle quattro costanti mancanti citate sopra;

b) verificare a posteriori che, coi valori così determinati delle costanti, i flussi risultanti si annullino effettivamente, oltre che sul piano  $x = a$  (cosa già del tutto evidente dalle formule) anche sul piano  $x = 0$ , come richiesto dal modello teorico adottato. Dopo questa verifica le formule dei flussi così completate potranno essere assunte come la corretta soluzione del problema.

(In realtà sarebbe opportuno non fidarsi ciecamente neppure dei ricercatori qualificati e controllare anche che il sistema di eqq. differenziali a due gruppi risulti soddisfatto identicamente da tali flussi. Ma questa verifica sarebbe ora troppo onerosa in termini di tempo. La si consideri opzionale, e da effettuarsi, semmai, alla fine dello svolgimento).

Si ossevi ora che, data l'**asimmetria spaziale** della sorgente rispetto al piano mediano del sottocritico, i flussi neutronici da essa intrattenuti non potranno che risultare anch'essi asimmetrici: e con i rispettivi massimi spostati dal piano mediano (sul quale entrambi cadrebbero in condizioni di criticità) verso due piani ad esso paralleli, ma interni all'intervallo  $0 < x < a/2$ .

D3 Nel caso che si operasse in condizioni di marcata sottocriticità, con conseguente notevole asimmetria spaziale dei flussi, e si dovesse "spillare" il maggior numero possibile di neutroni termici attraverso una e una sola delle facce dello slab, sarebbe più conveniente utilizzare la faccia  $x = 0$  oppure quella  $x = a$ ? Per quale ragione fisica si deve ritenere a priori che, nel sottocritico iniettato dalla sorgente veloce sopra assegnata, i piani su cui i due flussi attingono il loro valore massimo debbano proprio essere due, paralleli e distinti tra loro? Si motivino le risposte soltanto con argomentazioni intuitive.

D4 Si supponga ora che, tenendo fissa geometria e sorgente impressa, si proceda a modificare la composizione materiale del dispositivo, fino a far avvicinare **per difetto** il valore di  $k_x$  (è una costante sempre positiva, per  $k_x > 1$ ) a  $(n/a)$ .



Si richiede di verificare, partendo dalle formule dei flussi, che, in questo *caso limite*:

1) gli andamenti spaziali di  $\$F(X)$  e  $\$r(\wedge)$  tendono entrambi a quello dell'armonica fondamentale del problema di Helmholtz per la geometria in esame;

2) lo spettro energetico tende a diventare indipendente dal posto e simile a quello che si riscontrerebbe in un reattore critico, nudo, di qualsivoglia geometria, ma avente proprio la composizione limite di cui sopra;

3) la potenza stazionaria a cui si stabilizza il sistema tende ad assumere valori sempre più elevati, man mano che ci si avvicina alla composizione limite: e ciò nonostante che l'intensità della sorgente rimanga invariata.

**D5** E' ben noto che, in caso di spegnimento istantaneo della sorgente impressa, la potenza del sottocritico in esame, dopo un transitorio inizialmente assai complesso, tenderà necessariamente a spegnersi, con un andamento che sarà asintoticamente ( $t \rightarrow \infty$ ) di tipo esponenziale puro per tutte le grandezze in gioco, cioè flussi e concentrazioni dei nuclidi precursori di ritardati. E' richiesta la determinazione della costante di tempo asintotica di spegnimento (chiamiamola  $a$  : è quella, *certamente negativa*, che caratterizza l'autostato dinamico fondamentale). Tale determinazione dovrà essere effettuata nell'ambito del modello a due gruppi, con una sola famiglia di precursori di ritardati. Si illustri inoltre l'importante ruolo che verrebbe ad assumere un'accurata conoscenza di  $a$  ai fini della **gestione in sicurezza** di qualsiasi tipo di dispositivo sottocritico.

**D6** Per particolari applicazioni sperimentali è previsto che l'esercizio del dispositivo avvenga in condizioni di forte sottocriticità e, quindi, con notevole asimmetria dei flussi neutronici all'interno dello slab. Al raffreddamento della struttura si deve provvedere mediante passaggio di fluido refrigerante lungo canali paralleli all'asse  $x$  ed equidistanziati tra loro: colla possibilità di far scorrere il fluido lungo i canali indifferentemente secondo il verso positivo o negativo dell'asse  $x$ . Spieghi il Candidato quale verso di percorrenza dei canali sia il più opportuno, nel caso che si voglia estrarre stazionariamente l'energia prodotta dalle fissioni con la minima portata massica di refrigerante. Oppure, nel caso che, fissata la portata e la temperatura di ingresso del refrigerante, si voglia abbassare il più possibile la temperatura dei picchi termici. Le risposte vanno date su base intuitiva.

### 3 La missione dei tecnici nell'economia globalizzata

Scenario: ultimi anni del corrente decennio.

A seguito dell'ulteriore aggravamento della crisi energetica mondiale e della crescente compromissione ambientale, dovuta principalmente alle emissioni da combustione di fossili, le Nazioni Unite, all'epoca riorganizzate e rivitalizzate, decidono di patrocinare l'elaborazione di una sorta di **piano energetico-ecologico planetario**, da formularsi con criteri rigorosamente scientifici e, quindi, idoneo ad ottenere il consenso della stragrande maggioranza degli Stati membri. La fase preliminare del progetto prevede che sia lanciato un appello a tutti gli esperti mondiali di problematiche energetiche (persone fisiche, non istituzioni o industrie!), affinché facciano pervenire, insieme ad una lettera di disponibilità a candidarsi come collaboratori per l'elaborazione del piano, una sorta di documento di prequalificazione personale, da redigersi in una sola pagina, illustrante succintamente le strategie che ciascun candidato riterrrebbe prioritarie ed essenziali per la soluzione dei problemi energetico-ecologici globali. Una Commissione Internazionale di Selezione, (sperabilmente imparziale e qualificata!), effettuerà una prima valutazione di questi documenti e indicherà quali dei partecipanti abbiano titolo per essere ammessi agli ulteriori livelli di selezione.

**D7** Il Candidato al presente esame di Stato è invitato a condensare in una sola pagina le proprie considerazioni strategiche sul problema energetico globale, nello spirito della richiesta formulata dalle Nazioni Unite. Egli dovrà, evidenziare, in particolare, l'apporto che i reattori a fissione, sia quelli a sicurezza intrinseca, sia quelli sottocritici, potrebbero dare alla soluzione del problema stesso: a patto che venissero concordate a livello internazionale modalità di gestione delle scorie radioattive tali da assicurare in modo definitivo l'opinione pubblica.

**Nota** I Sigg. Candidati/e 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.

3/3