

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

II SESSIONE - ANNO 2006

Ramo: Ingegneria Nucleare

Tema N.1

Studio preliminare di un dispositivo sperimentale sottocritico, parzialmente riflesso ed attivato mediante una sorgente localizzata di neutroni veloci.

## 1 Premessa e ipotesi di base.

In un laboratorio di ricerca è installato un dispositivo sperimentale, così costituito. Una regione moltiplicante omogenea, ben moderata, di forma cilindrica ( $0 \leq r \leq R$ ;  $0 \leq z \leq H$ ), che chiameremo brevemente core, è posta a contatto, attraverso la sua base inferiore ( $0 \leq r \leq R$ ;  $z = 0$ ) con un cilindro coassiale di riflettore omogeneo, che di essa costituisce, per così dire, il naturale prolungamento geometrico. Il riflettore occupa il volume  $0 \leq r \leq R$ ;  $-K \leq z \leq 0$ , essendo  $0 < K < H$ . A parte il cerchio di interfaccia ( $0 \leq r \leq R$ ;  $z = 0$ ) tra core e riflettore, tutta la restante superficie della regione moltiplicante è esposta al vuoto, al pari di tutta quella del riflettore, che non si trova a contatto con il core.

Per semplicità si potrà ammettere che, in prima approssimazione, il contorno geometrico della struttura si identifichi con quello estrapolato.

Ai nostri fini pare inoltre accettabile che le trattazioni della statica neutronica e della dinamica asintotica del dispositivo in esame possano venire svolte nell'ambito del modello matematico diffusivo a due soli gruppi energetici, formulato nella sua accezione più semplice: totale assenza di moltiplicazioni causate da neutroni veloci, (ciò discende dall'elevata capacità moderante assunta per il core) e considerazione di una sola famiglia di nuclidi precursori di neutroni ritardati.

Le costanti nucleari macroscopiche del core sono da ritenersi note, insieme ai valori di  $\beta$  (frazione dei secondari di fissione emessa con ritardo) e di  $\lambda$  (costante di decadimento radioattivo dei precursori). Questi ultimi parametri sono stati opportunamente mediati su tutte le sei famiglie di nuclidi precursori di neutroni ritardati. I simboli da adottarsi per le costanti nucleari della zona moltiplicante sono quelli convenzionali in teoria a due gruppi ( $F \doteq fast$ ;  $T \doteq thermal$ ). In particolare: per i coefficienti di diffusione,  $D_p$  e  $D_T$ ; per le sezioni d'urto macroscopiche,  $\Sigma_p$  (rimozione dal gruppo veloce),  $\Sigma_{T \leftarrow F}$  (trasferimento dal gruppo veloce a quello termico),  $\Sigma_T$  (rimozione dal gruppo termico, per cattura e/o fissione),  $\Sigma_{F \leftarrow T}$  (fissione nel gruppo termico). Sono definite inoltre le grandezze derivate  $p = (\Sigma_{F \leftarrow T} / \Sigma_T)$  (in questo semplice modello  $p$  rappresenta la probabilità di sfuggire alle catture in risonanza),  $L_p \doteq D_p / \Sigma_p$  e  $L_T \doteq D_T / \Sigma_T$  (aree di rallentamento e di diffusione, rispettivamente), nonché  $k_{\infty} = (\lambda / \beta \Sigma_{F \leftarrow T}) / \Sigma_T$ , costante di moltiplicazione nel mezzo infinitamente esteso, essendo  $\nu$  il numero di secondari mediamente emessi in ogni fissione causata da neutroni termici.

Quanto al riflettore, le pertinenti grandezze macroscopiche, (ed anche i flussi neutronici incogniti) saranno espresse con la stessa nomenclatura adottata per il core, previa apposizione di una tilde ad ognuna di esse. Ad es.:  $\tilde{D}_p$ ,  $\tilde{\Sigma}_p$ ,  $\tilde{\Sigma}_{T \leftarrow F}(r, z)$ , etc.

L'impiego della versione stazionaria della teoria dei cosiddetti "pseudo-potenziali 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

Obiettivi principali della presente analisi saranno: a) l'accertamento preliminare dello stato di effettiva sottocriticità della struttura; b) lo studio della sua risposta stazionaria ad una particolare sorgente neutronica impressa; c) l'individuazione, all'interno della zona moltiplicante, di punti in cui lo spettro neutronico, nel

regime intrattenuto dalla sorgente, sia dotato di particolari caratteristiche; d) la comparazione delle implicazioni fisiche e di sicurezza, derivanti da simulazioni della configurazione geometrico-materiale del dispositivo mediante due diversi tipi di condizioni al contorno; e) l'analisi della dinamica asintotica del core sottocritico, susseguente ad un'eventuale asportazione istantanea del riflettore e allo spegnimento della sorgente eccitante; f) e, infine, lo svolgimento di alcune considerazioni di politica energetica.

### Quesiti.

**DI** Viene richiesto preliminarmente al Candidato/a di verificare se la zona moltiplicante del dispositivo in esame, **isolata e non riflessa**, si trovi effettivamente in uno stato di sottocriticità. Occorrerà innanzitutto descrivere una procedura che permetta di effettuare tale verifica e poi indicare, se del caso, come modificare alcune delle concentrazioni dei materiali, al fine di assicurare la realizzazione di uno degli infiniti stati sottocritici possibili. Si dimostri inoltre che, relativamente al core isolato, le due seguenti equazioni:

I)  $k_{eff} \doteq k_{\infty} / [(1 + L_F^2 B_G^2)(1 + L_T^2 B_G^2)] = 1$ , con  $B_G^2 \doteq (\pi/H)^2 + (\frac{j_{01}}{R})^2$ , essendo  $j_{01} = 2.4048\dots$  la prima radice dell'eq.  $J_0(x) = 0$  e

II)  $\mu^2 = B_G^2$ , essendo  $\mu$  il cosiddetto "buckling materiale principale" della teoria a due gruppi, non sono altro che due formulazioni equivalenti della condizione di criticità per il core isolato.

**D2** Preso poi atto dell'opportunità di cercare la soluzione del problema critico per il dispositivo parzialmente riflesso, adottando preliminarmente una separazione delle variabili spaziali del tipo:

$$\begin{aligned}\Phi_F(r, z) &= J_0\left(\frac{j_{01}}{R}r\right) \cdot \varphi_F(z); \\ \Phi_T(r, z) &= J_0\left(\frac{j_{01}}{R}r\right) \cdot \varphi_T(z); \\ \tilde{\Phi}_F(r, z) &= J_0\left(\frac{j_{01}}{R}r\right) \cdot \tilde{\varphi}_F(z); \\ \tilde{\Phi}_T(r, z) &= J_0\left(\frac{j_{01}}{R}r\right) \cdot \tilde{\varphi}_T(z),\end{aligned}$$

separazione che è certamente legittima, utile ed adeguata nel presente contesto, si determini **l'equazione critica dell'apparecchiatura reale**, nonché, a meno di un fattore di potenza, gli andamenti assiali dei flussi all'interno di tutta la struttura, quando essa si trova in regime di criticità. Si descriva poi una procedura idonea a rendere tale struttura sottocritica, modificando qualcuno dei suoi parametri materiali.

Sul cerchio di interfaccia core-riflettore della struttura, così **resa sottocritica**, si inserisce poi una sorgente piana di neutroni, tutti appartenenti al solo gruppo veloce, avente spessore trascurabile e andamento radiale simile a quello dell'autofunzione principale del problema di Helmholtz. Essa sarà dunque rappresentabile analiticamente con la formula

$$S_F(r, z) = A \cdot \frac{1}{\int_0^R J_0\left(\frac{j_{01}}{R}r'\right) 2\pi r' dr'} J_0\left(\frac{j_{01}}{R}r\right) \cdot \delta(z),$$

ove con  $\delta(z)$  si è indicata la distribuzione di Dirac rispetto alla coordinata assiale e  $A$  rappresenta il numero totale di neutroni veloci immessi nel sistema sottocritico al secondo.

È ammissibile che il materiale di supporto di questa sorgente non abbia alcun effetto apprezzabile, né neutronicamente (non assorbe), né geometricamente (ha spessore praticamente nullo). Va osservato inoltre che, dato il particolare profilo radiale della densità d'immissione dei neutroni veloci, anche nella determinazione dei flussi, veloce e termico, intrattenuti stazionariamente dalla sorgente impressa, si potrà ancora adottare una tecnica risolutiva basata sullo stesso tipo di separazione delle variabili spaziali sopra illustrato.

**D3** Si determinino i **flussi neutronici intrattenuti stazionariamente dalla sorgente** in tutto il volume dell'apparato sottocritico, evidenziando che:

i) lo spettro energetico (cioè, nel nostro modello, il rapporto  $\Phi_F(r, z)/\Phi_T(r, z)$ ) dipende ora dal posto e che

ii) in tutti i punti interni all'apparato, mantenendosi fisso il valore di  $A$ , entrambi i flussi trovati tenderebbero a divergere a  $+\infty$ , nel caso che i parametri nucleari del dispositivo si avvicinasero progressivamente a quell'insieme di valori che lo renderebbero critico.

**D4** Si descriva una procedura idonea a localizzare quel punto dell'asse del cilindro moltiplicante in cui dovrebbero essere inseriti dei campioni da irraggiare, nel caso che per essi fosse richiesta l'esposizione ad uno spettro il più duro possibile.

D5 Si introduca ora all'interfaccia core-riflettore, in **sostituzione** dello strato di sorgente, un lamierino di lega di cadmio, di spessore tale che lo si possa considerare come uno "shutter" perfettamente nero per i neutroni termici, pur rimanendo esso del tutto trasparente rispetto a quelli veloci.

È richiesto di stabilire, con soli ragionamenti intuitivi, se, con la configurazione del dispositivo parzialmente riflesso a shutter inserito, sia possibile o meno realizzare uno stato critico, adottando per la regione moltiplicante proprio quegli stessi valori dei parametri materiali che la rendevano critica, quando essa era sola ed isolata.

Se proprio si volesse raggiungere la criticità in presenza dello shutter all'interfaccia e con il riflettore immutato, la scelta del set di parametri materiali di cui sopra dovrà dunque essere considerata prudentiale, indifferente, oppure potenzialmente pericolosa, ai fini di una corretta **gestione della sicurezza** del dispositivo in esame?

D6 Si immagini ora che, durante il funzionamento stazionario, intrattenuto da sorgente in condizioni di sottocriticità, il dispositivo possa essere scomposto in modo praticamente istantaneo, al fine di isolare la regione moltiplicante dal resto del sistema. Relativamente a tale regione, è richiesto di stabilire una procedura idonea a valutare, in teoria a due gruppi ed in presenza di almeno una famiglia di precursori di ritardati da fissione, la costante di tempo asintotica ( $t \rightarrow \infty$ ) di spegnimento della popolazione neutronica che è in essa presente. Della costante  $\beta$ , inverso del "periodo stabile" del dispositivo, dovrà essere evidenziata l'implicita dipendenza da tutti i parametri geometrico-materiali del sistema.

### 3 La missione civile dei tecnici nell'epoca dell'economia globalizzata

**Scenario:** ultimi anni del corrente decennio.

A seguito dell'ulteriore aggravamento della crisi energetica nazionale e della crescente compromissione ambientale, dovuta principalmente alle emissioni da combustione di fossili, anche il Governo italiano decide (buon ultimo!) di patrocinare l'elaborazione di una sorta di **piano energetico-ecologico nazionale**, da formularsi con criteri rigorosamente scientifici, nell'illusione che esso possa finalmente ottenere il consenso di una larga maggioranza di parlamentari. La fase uno di questa svolta epocale della politica italiana prevede che sia lanciato un appello a tutti gli esperti nazionali di problematiche energetiche (persone fisiche, non istituzioni o industrie!), affinché essi 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, ed illustrante succintamente le strategie che ciascun esperto riterrebbe prioritarie, essenziali ed irrinunciabili, per la soluzione dei problemi energetico-ecologici italiani. Una Commissione Internazionale di Selezione, (sperabilmente imparziale e qualificata!), effettuerà successivamente la valutazione di questi documenti e indicherà quali degli esperti abbiano titolo per essere ammessi agli ulteriori livelli di selezione.

D7 Il Candidato/a al presente esame di Stato è invitato a condensare in una sola pagina le proprie **considerazioni strategiche sul problema energetico nazionale**, nello spirito della richiesta governativa di cui sopra. Egli, in qualità di esperto di energetica nucleare, dovrà evidenziare, in particolare, l'apporto che i reattori a fissione, sia quelli a sicurezza intrinseca di nuova concezione, sia quelli sottocritici di potenza, iniettati da sorgenti esterne, potrebbero dare alla soluzione del problema energetico italiano. Tutto ciò facendo riferimento anche ai vantaggi economici, tecnologici ed occupazionali che un ritorno al nucleare potrebbe comportare, senza sottovalutare il fatto che a quell'epoca già saranno state concordate a livello internazionale diverse 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 DI, D2, ..., D7, esprimendole nella forma tipica di una relazione professionale a carattere tecnico-scientifico. Eventuali minute non potranno essere prese in considerazione dalla Commissione.