POLITECNICO DI TORINO

ESAME DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE

ANNO 2011. SECONDA SESSIONE

Ramo: Ingegneria Nucleare. Tema N.1

Oggetti del tema.

A) **Parte tecnica**. Indagine preliminare in una nuova area di ricerca: "reattori a fissione sottocritici di potenza, iniettati da generatori neutronici a fusione D+D".

B) **Consulenza alla Pubblica Amministrazione.** Sviluppo in Italia di appropriate strategie di ricerca energetica per gestire il dopo Fukushima.

A) Parte tecnica

Premessa.

Alcune ricerche su sistemi energetici a fissione, innovativi e sempre più sicuri, sono state recentemente (2011) orientate verso lo studio di reattori di potenza sottocritici, iniettati mediante **generatori neutronici a fusione D+D**, oppure D+T.

Generatori a fusione di questo tipo sono attualmente in fase di sviluppo presso centri di ricerca americani. Si tratta di macchine affidabili e relativamente poco costose, in grado di produrre neutroni dotati di energia assai superiore a quella media dello spettro di fissione. I neutroni di "sorgente primaria", che un simile generatore produce, vengono emessi attraverso la sua superfice esterna, a condizione che un opportuno campo elettrico sia applicato al suo interno, tra due elettrodi , con lo scopo di provocare delle reazioni nucleari di fusione, ad es., tra atomi ionizzati e neutri di deuterio.

Al fine di poter valutare gli eventuali vantaggi dell'impiego di questi innovativi generatori neutronici nell'attivazione di sottocritici di potenza, (in alternativa, ad es.,ai grandi acceleratori, che producono neutroni con reazioni di spallzione), ci basterà evidenziare innanzitutto che detti generatori a fusione dovranno necessariamente essere collocati nella regione più interna dei sottocritici da iniettare. E che, inoltre, data la struttura materiale di tali macchine, dovrà essere tenuto ben presente quanto segue:

a) il volume, solitamente cilindrico o sferico, di un generatore a fusione deve necessariamente contenere dei nuclei di metalli pesanti, che sono forti assorbitori nei confronti di neutroni termici, comunque diffondenti nei pressi della sua superfice esterna. Per questa ragione un generatore D+D, posto all'interno di un reattore sottocritico, eserciterà, per così dire, un effetto "barra di controllo", a prescindere dal fatto che esso sia attivo come sorgente, oppure spento.

b) inoltre, nel volume stesso del generatore D+D, sono presenti atomi di idrogeno, in quanto il raffreddamento di tali dispositivi è assicurato dalla circolazione di acqua. Di conseguenza un dispositivo siffatto, qualora si trovi immerso in una regione in cui diffondano dei neutroni veloci, non mancherà di esercitare

su questi ultimi un parziale "effetto trappola". Ciò perché una parte dei veloci, (si fa riferimento qui a quelli originati dalle fissioni che hanno luogo nel sottocritico esterno), potranno entrare poi nel generatore a fusione e venire termalizzati al suo interno. E i termici così creati verranno in gran parte assorbiti dai metalli pesanti ivi presenti. Proprio in ciò consiste l'effetto trappola. Nella fattispecie dei dispositivi qui considerati, sarà però necessario tenere in conto anche il fatto che una più o meno piccola frazione dei neutroni termalizzatisi all'interno di un generatore D+D potrà sfuggire dalla superficie del generatore stesso, dando così luogo ad una corrente termica di retroazione, diretta verso il sottoscritico esterno. E' per questo che più sopra abbiamo definito "parziale" l'effetto trappola;

d) è ragionevole assumere, infine, che i neutroni di alta energia, prodotti, in regime stazionario, dalle reazioni di fusione D+D, dopo di essere stati immessi nel core del sottocritico, ed aver ivi effettuato, diffondendo al suo interno, un sufficiente numero di collisioni, acquisiscano un'energia tale da renderli assimilabili ad una sorgente esterna o impressa, non più superficiale, ma spazialmente distribuita, destinata ad alimentare il gruppo neutronico cosiddetto "veloce", nell'ambito di un modello teorico di reattore sottocritico a due gruppi energetici. Tale modello è ritenuto qui idoneo per un primo approccio al problema in esame.

Posizione del problema

Al fine di mettere in rilievo gli aspetti fondamentali della fisica di questi sottocritici iniettati, faremo qui riferimento alla geometria unidimensionale, che consente la massima semplicità, quanto a trattazione analitica spaziale.

Esamineremo cioè un dispositivo moltiplicante spazialmente omogeneo, foggiato a "strato indefinito" (o *"reattore a slab"*), compreso tra i piani paralleli $x = -b$ e $x = +b$. La sua porzione centrale di mezzo moltiplicante, compresa tra i piani $x = -a$ e $x = +a$, con $a \ll b$ viene rimossa e sostituita da un generatore a fusione D+D, la cui struttura materiale interna è assunta simmetrica rispetto al piano mediano $x = 0$ della struttura complessiva. Ciò permetterà, senza alcuna perdita di informazione, di poter far riferimento alla sola porzione $0 \leq x \leq b$ del dispositivo. O, meglio ancora, essendo le caratteristiche del generatore descrivibili, nel nostro caso, con sole condizioni al suo contorno esterno $x = a$, al più ristretto intervallo $a \leq x \leq b$.

Le costanti nucleari a due gruppi del mezzo moltiplicante sono tutte note. Alcune di esse sono ritenute facilmente modificabili nel corso della progettazione neutronica definitiva del reattore sottocritico.

Quanto a condizioni al contorno, osserviamo innanzitutto che, date le dimensioni del sistema, si potrà assumere che l'annullamento di entrambi i flussi avvenga sullo stesso piano (estrapolato) esterno $x = b$. Di conseguenza potremo imporre, ($F \doteq$ *gruppo veloce*; $T \doteq$ *gruppo termico*), che sia: $\Phi_F(b) = \Phi_T(b) = 0$.

Inoltre, tenendo conto di quanto asserito in premessa, le condizioni al con-

torno da imporsi sul piano $x = a$ saranno, rispettivamente, :

$$D_F \cdot \left.\frac{d\Phi_F}{dx}\right|_{x=a} = \gamma_F \cdot \Phi_F(a)$$

$$D_T \cdot \left.\frac{d\Phi_T}{dx}\right|_{x=a} = \gamma_T \cdot \Phi_T(a) - \gamma_{F\to T} \cdot \Phi_F(a)$$

Esse descrivono sia l'effetto trappola per i veloci, che l'effetto "strato di controllo" per i termici, attenuato dal termine di restituzione al sottocritico di una piccola parte (di solito è $\gamma_{F\to T} \ll \gamma_F$) dei veloci in esso intrappolati.

Le costanti γ_F, γ_T, e $\gamma_{F\to T}$, caratterizzanti il generatore a fusione, devono essere fornite dal costruttore di tale macchina, insieme alle specifiche relative alla sua capacità emissiva di neutroni di alta energia in funzione del potenziale elettrico in essa mantenuto a regime.

Primi quesiti ai Candidati

Dovendosi assicurare, per ovvie ragioni di sicurezza, che il reattore, quando sia dotato al suo interno del generatore a fusione *non attivo come sorgente* , si trovi effettivamente in stato di sottocriticità, viene richiesto di

D1) determinare l'equazione critica del reattore. Verificare inoltre che lo spettro energetico $\Phi_F(x)/\Phi_T(x)$, in condizioni *critiche e stazionarie*, risulta *dipendente dal posto.* Ciò consegue, ovviamente, dal tipo di condizioni al contorno imposte sul piano $x = a$.

(Nota: per semplificare la risposta a questo quesito è cosigliabile utilizzare la forma stazionaria della teoria degli pseudopotenziali cinetici $f_1(x)$ e $f_2(x)$ e ricordare che una combinazione lineare di funzioni circolari di argomento μx, annullantesi per $x = b$, potrà utilmente essere scritta nella forma $A\sin(\mu(b-x))$. Analogamente per le funzioni iperboliche)

Si individuino poi delle modifiche, che si possano ragionevolmente apportare, in modo spazialmente uniforme, ad una o più costanti fisiche del materiale, al fine di rendere sottocritico il sistema.

Sorgerà a questo punto il problema di stabilire quanto il suo stato disti da quello critico. Come buon indicatore di questa *"distanza"* si potrà cosiderare, ad es., il valore (negativo) della costante di tempo asintotica di spegnimento della potenza nel sottocritico, che é stato realizzato con le modifiche di cui sopra. A tal fine viene richiesto di

D2) descrivere una procedura idonea a determinare, con la teoria della diffusione temporale a due gruppi, (anche in presenza di un numero trascurabile di fissioni indotte da neutroni veloci) **la costante di tempo principale o asintotica** $-\alpha$, (cioè l'inverso del periodo stabile del reattore sopra perturbato). Sarà qui sufficiente operare sotto l'ipotesi semplificativa che esista *una sola famiglia di precursori di ritardati, (di yield* β e *costante di decadimento* λ), *la cui concentrazione viene indicata con* $C(x,t)$.

Naturalmente è ora essenziale tener conto che la parte asintotica ($t \to \infty$) dell'evoluzione si manifesterà dopo che sia stata formalmente raggiunta, per tutte le incognite in gioco, $\Phi_F(x,t), \Phi_T(x,t)$ e $C(x,t)$, una fattorizzazione

spazio-temporale, nella quale il fattore temporale, di tipo esponenziale puro, $\exp(-\alpha t)$, sia unico per tutte. Si evidenzi che, nel sottocritico in esame, il valore della costante di decadimento asintotica influisce necessariamente anche sull'andamento spaziale, (per $t \to \infty$) dei due fattori spaziali dei flussi $\Phi_F^{As}(x)$, e $\Phi_T^{As}(x)$.

Tornando ora all'**obiettivo principale del tema**, cioè all'analisi dell'esercizio a potenza del sottocritico inettato, si osservi che, in base a quanto asserito in premessa, i neutroni di sorgente, immessi ad alta energia dal generatore a fusione D+D, verranno a costituire, dopo alcune collisioni, una sorgente impressa per il gruppo veloce, distribuita spazialmente, per $x \in [a, b]$, secondo la formula:

$$S_F^{ext}(x) = S \cdot \frac{Sh(\frac{b-x}{L_S})}{\int_a^b Sh(\frac{b-x'}{L_S})dx'}$$

La *"lunghezza di diffusione"* L_S , data, può essere riferita ad un valor medio di tale grandezza, capace di caratterizzare un ipotetico gruppo diffusivo di energia compresa tra quella di emissione da fusioni D+D e quella di ingresso nel gruppo veloce del nostro modello a due gruppi. La precedente formula potrebbe però anche essere intesa come un profilo di sorgente rilevato sperimentalmente. La costante S rappresenta, in ogni caso, il numero totale di neutroni immessi nel sottocritico nell'unità di tempo.

Ulteriori quesiti ai Candidati.

Una volta accertato lo stato di sottocriticità del reattore a sorgente spenta, si accenda e si mantenga a livello stazionario la sorgente di cui sopra.

E' richiesto ai Candidati di

D3) determinare gli andamenti dei flussi neutronici intrattenuti nel reattore dalla sorgente.

E, inoltre, di

D4) dimostrare, partendo dalle espressoni dei flussi intrattenuti ora determinati, e sulla base di quanto evidenziato nel corso della ricerca dello stato critico, di cui in **D1, che**, nel caso in cui, modificando delle costanti, il sottocritico venisse fatto avvicinare progressivamente allo stato di criticità, **entrambi i flussi, intattenuti dalla sorgente stazionaria, tenderebbro a divergere** a $+\infty$, $\forall x \in [a, b[$, acquisendo però, man mano, forme spaziali e rapporto spettrale simili a quelli che si instaurerebbero nel sistema a sorgente spenta, in condizioni di criticità, .

B) Parte di consulenza alla Pubblica Amministrazione.

Il neoistituito **Ministero delle Attività Innovative** (é il famoso **MAI**, conosciuto anche come "*Ministero in pectore*", vanamente preconizzato da almeno dieci legislature!), pur non dotato ancora di proprio personale tecnico, è già pressato da richieste dell'U. E., tese a **chiarire la nuova politica energetica dell'Italia**. Il MAI ha interpellato i pochi veri esperti in energetica generale, in fisica dei reattori, impiantistica e sicurezza nucleare, invitandoli a

formulare proposte circa le migliori strategie di ricerca da adottarsi in Italia per gestire il dopo Fukushima, l'incremento dei prezzi delle fonti fossili e il degrado ambientale.

D5) E' richiesto ai Candidati a questo Esame di Stato di redigere una bozza, di non più di due cartelle, in risposta al MAI. In essa dovranno essere chiarite, in particolare, le ragioni per cui, nonostante Fukushima e il referendum, parrebbe dissennato far interrompere in Italia le ricerche sull'energetica da fissione.

Nota. I/Le Candidati/e sono invitati/e a fornire ordinatamente le risposte R1, R2, ..., R5, ai quesiti D1, D2, ..., D5, esprimendole nella forma di una **relazione professionale a carattere tecnico-scientifico**. Eventuali "minute" non potranno essere prese in considerazione dalla Commissione.