

Analisi dei Feedback di Reattività nei Sistemi Sottocritici

Riccardo Bossi

Politecnico di Milano e Università Bicocca

November 25, 2025

Fisica della Moltiplicazione Sottocritica

Parametri Cinetici Fondamentali

Fattori di Moltiplicazione

- k_{eff} (**Autovalore**): Rapporto tra rate di produzione e rate di *perdite totali*. È l'autovalore del modo fondamentale. Determina la criticità del sistema in assenza di sorgente.
- k_s (**Source Factor**): Moltiplicazione reale "vista" dalla sorgente (N_{fiss}/N_{tot}). Dipende spazialmente dalla posizione della sorgente e dalla sua energia.

Importanza e Guadagno

- **Importanza** (ϕ^\dagger): Efficacia del neutrone sorgente nel contribuire alla popolazione totale:

$$\phi^\dagger(r, E) = \frac{k_s(r, E)}{1 - k_s(r, E)}$$

- **Guadagno** (G): Amplificazione dell'energia di fascio:

$$G = \frac{G_0 k}{1 - k}$$

Relazione tra k_{eff} e k_s

Il ruolo dell'Efficienza di Sorgente φ^*

In un sistema sottocritico, k_{eff} e k_s non coincidono. La loro relazione è mediata dall'efficienza di sorgente φ^* , che quantifica l'importanza dei neutroni esterni rispetto a quelli di fissione.

Equazione di Equivalenza

$$\left(1 - \frac{1}{k_{eff}}\right) = \varphi^* \left(1 - \frac{1}{k_s}\right)$$

Significato Fisico di φ^* :

- $\varphi^* > 1$: La sorgente è posizionata in una zona ad alta importanza (centro del core), minimizzando le fughe.
- $\varphi^* < 1$: La sorgente è esterna o in zona periferica (bassa efficienza).

Implicazioni Operative:

- Ottimizzare la posizione del target per avere $\varphi^* > 1$ riduce la corrente del fascio necessaria per mantenere la stessa potenza termica (P_{th}).

Evoluzione del Combustibile

Feedback a Lungo Termine

Dinamica Isotopica (Eq. Bateman)

L'evoluzione di n_i è governata dal bilancio tra produzione e distruzione:

$$\frac{dn_i(t)}{dt} = \sum_{j \neq i} (\sigma_{j \rightarrow i} \phi + \lambda_{j \rightarrow i}) n_j - (\sigma_{i, tot} \phi + \lambda_{i, tot}) n_i$$

Confronto Spettrale sulla stabilità di $k(t)$:

Spettro Veloce (Fast)

Il breeding ($^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$) compensa quasi esattamente i veleni. **Risultato:** k estremamente stabile per lunghi cicli.

Spettro Termico

L'accumulo di veleni domina sul breeding.
Risultato: Instabilità intrinseca; k cala drasticamente in < 1 anno.

Cinetica: Critico vs Sottocritico

Regimi Dominati dalla Sorgente vs Feedback

La risposta temporale di un ADS differisce radicalmente da un reattore critico.

Dinamica del Sistema

- **Reattore Critico:** Governato dai neutroni ritardati ($\tau \approx$ secondi).
- **ADS Sottocritico:** Governato dai neutroni prompt ($\tau \approx \mu s$). La potenza segue istantaneamente le variazioni della sorgente (S).

Risposta a Inserzioni di Reattività

Se $\Delta\rho$ viene inserita (es. incidente):

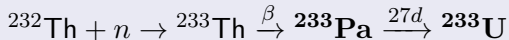
- **Critico:** Escursione esponenziale di potenza (se $\rho > \beta$).
- **Sottocritico:** Aumento *finito* di potenza, proporzionale al nuovo guadagno M . Non diverge.

Regimi Operativi: Si deve cercare un compromesso tra un regime *Source Dominated* (profondamente sottocritico, molto sicuro) e *Feedback Dominated* ($k_{eff} \approx 0.99$, comportamento simile al critico).

Reattività e Sicurezza Passiva

Effetti a Breve Termine

L'Effetto Protattinio (^{233}Pa) nel ciclo Th-U



- **Durante l'operazione:** Il ^{233}Pa agisce da forte veleno neutronico ($\sim 50b$).
- **Allo spegnimento:** Il ^{233}Pa decade in fissile ^{233}U , causando un inserimento positivo di reattività $\Delta k > 0$.
- **Vincolo:** Limita il flusso operativo massimo e il $k_{nominale}$ per evitare criticità accidentale post-spegnimento.

Effetto Xeno (^{135}Xe)

Domina nei reattori termici (picco post-shutdown), ma è **trascurabile** nello spettro veloce.

Temp. ($\alpha_T = \Delta k / \Delta T$)

Feedback istantaneo. Deve essere negativo ($\Delta T \uparrow \Rightarrow k \downarrow$) per garantire la sicurezza intrinseca.

Le informazioni presentate sono state elaborate **principalmente** a partire dai seguenti :

① **C. Rubbia et al.**

Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier, CERN/AT/95-44 (ET), 1995.

② **H. Shahbunder, C.H. Pyeon, T. Misawa et al.**

Subcritical multiplication factor and source efficiency in accelerator-driven system, Annals of Nuclear Energy 37 (2010) 1214-1222.

③ **A. Gandini & M. Salvatores**

The Physics of Subcritical Multiplying Systems, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 39, No. 6, p. 673-686 (2002).

④ **Nifenecker, H., David, S., Loiseaux, J.M., Meplan, O.** (2001). *Basics of accelerator driven subcritical reactors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 463(3), 428-467.