

Analisi dei Feedback di Reattività nei Sistemi Sottocritici

Riccardo Bossi

Politecnico e Bicocca

November 18, 2025

Fisica di K e Moltiplicazione Sottocritica

Definizioni Fondamentali

- k_{eff} (**Autovalore**): È il fattore di moltiplicazione asintotico. Definisce il margine di sicurezza del sistema.
- k_s (**Source Factor**): È la moltiplicazione reale "vista" dalla sorgente, che dipende da posizione/energia. Definisce il guadagno energetico.
- **Importanza** ϕ^\dagger : L'efficacia di un neutrone sorgente nel contribuire alla popolazione totale. È definita come (Eq. 6):

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

- **Guadagno Energetico (G)**: La metrica di performance del sistema, direttamente legata a k_s (Eq. 12):

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

- **Dinamica del Combustibile:** L'evoluzione della concentrazione di ogni isotopo è governata dalle equazioni di Bateman:

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

- **Stabilità di $k(t)$:** Il "miglior k " è un k che rimane stabile nel tempo.
 - ① **Aumento di k :** Breeding di fissile (es. $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$).
 - ② **Calo di k :** Consumo di fissile e accumulo di veleni.
- **Impatto dello Spettro:**
 - **Spettro Veloce:** Il breeding e l'avvelenamento si compensano. k è molto stabile per anni (Fig. 3b).
 - **Spettro Termico:** Il bilancio è instabile. k varia rapidamente in < 1 anno (Fig. 4b).

- **Effetto Protattinio:**

- Catena: $^{232}\text{Th} + n \rightarrow ^{233}\text{Th} \xrightarrow{\beta^-} ^{233}\text{Pa} \xrightarrow{\beta^- (27d)} ^{233}\text{U}$.
- **Feedback:** ^{233}Pa è un veleno. Dopo lo spegnimento, il suo decadimento in ^{233}U causa un **aumento netto di reattività** ($\Delta k > 0$).
- L'ampiezza Δk (Eq. 42) è proporzionale al flusso ϕ .
- **Implicazione:** Questo effetto limita il k operativo massimo.

- **Effetto Xenon:** L'avvelenamento da ^{135}Xe è un problema dominante nei reattori termici (Fig. 8), ma è trascurabile nei reattori veloci.
- **Effetto Temperatura ($\Delta k/\Delta T$):** Un feedback immediato. Deve essere negativo per la stabilità. È generalmente più piccolo (meno negativo) nei sistemi veloci.

Implicazioni per la Sicurezza e Stabilità

Perché la Subcriticalità Permette Combustibili Instabili

- **Risposta all'Incidente:**

- *Reattore Critico:* La potenza diverge esponenzialmente.

$$W(t) \propto \exp\left(\frac{\rho_{\text{prompt}}}{\tau_n} t\right)$$

- *Reattore Sottocritico* ($k < 1$): Qualsiasi inserzione di reattività Δk (anche grande) causa solo un **aumento finito** della potenza a un nuovo livello stabile. È fisicamente impossibile che diverga.

- **La Tesi del Paper:**

- 1 I reattori critici devono avere feedback stabili.
- 2 I reattori sottocritici **non lo richiedono**. La sicurezza è garantita da $k_{\text{eff}} < 1$, non dai feedback.
- 3 **Conclusione:** La subcriticalità permette l'uso sicuro di combustibili e cicli che hanno feedback di reattività troppo instabili per essere usati in un reattore critico.