

Métodos Indiretos para Reações Nucleares de Interesse Astrofísico:

Reações de “Substituição” (Surrogate Reactions)

Francisco de Assis Souza
Depto de Física Nuclear do Instituto de Física da USP

Mini Workshop sobre Astrofísica Nuclear
Junho de 2008

Sumário

- Motivação
- Métodos indiretos
 - Dissociação Coulombiana (CD)
 - Coeficiente de Normalização Assintótico(ANC)
 - Cavalo de Tróia (TH)
 - *Reações de Substituição (Surrogate)*
 - *Idéia Básica*
 - *Formalismo*
 - *Limite de Weisskopf-Ewing*
 - *Método da Razão*
 - *Considerações Finais*

Motivação

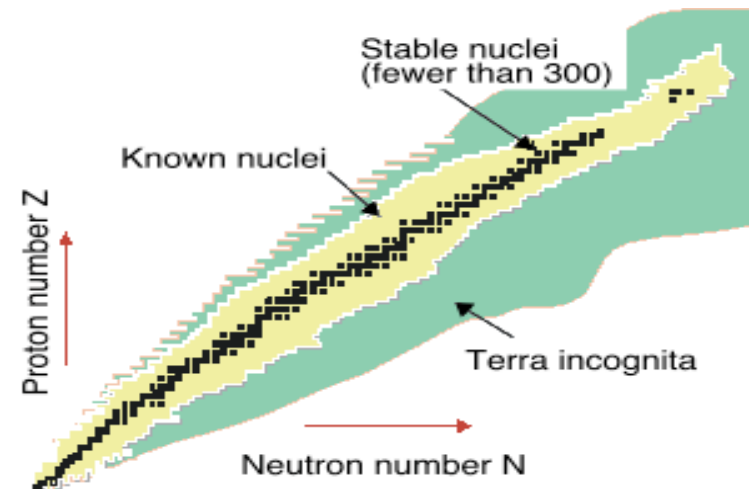
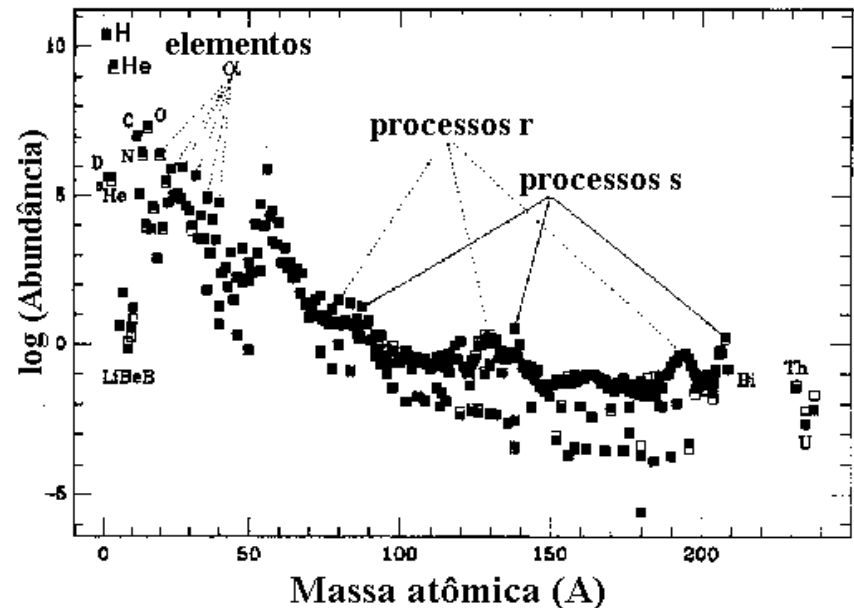
- **Estudo de Reações de Interesse Astrofísico:**

- Formação dos elementos

- Nucl. Primordial ($A=1$ até 7)
- Nucl. Interestelar ($A=6$ até 11)
- Nucl. Estelar ($A=12$ até 238)
- Como são formados os elementos do Fe até o U? ('Eleven Science Questions for the New Century') [Connecting Quarks with the Cosmos, Board on Physics and Astronomy, National Academies Press, 2003]

- Regime de Energia Ultra Baixa

- “Ultra Baixa” seção de choque
- Barreira Coulombina
- Blindagem eletrônica
- Núcleos instáveis
- **Dificuldade de Medidas Diretas!**



Métodos Indiretos

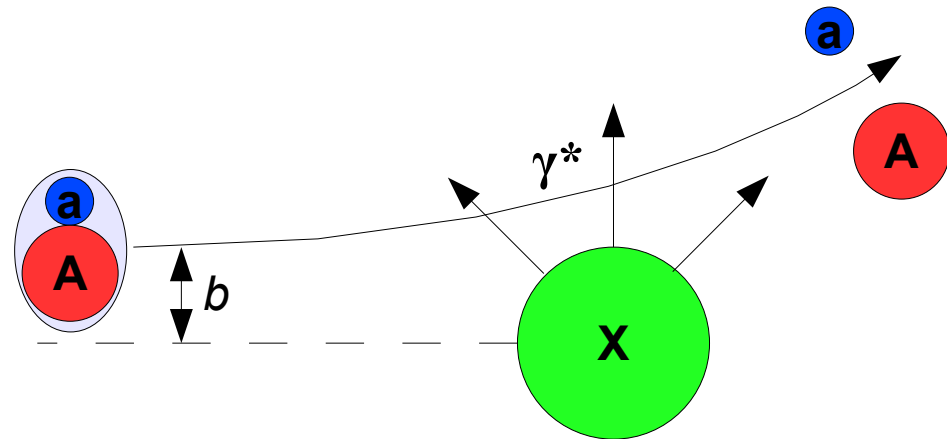
Dissociação Coulombiana:

Captura Radiativa: $A(a,\gamma)B$

Breakup: $X(B,aA)X$

Teoria:

Teoria do Balanço detalhado



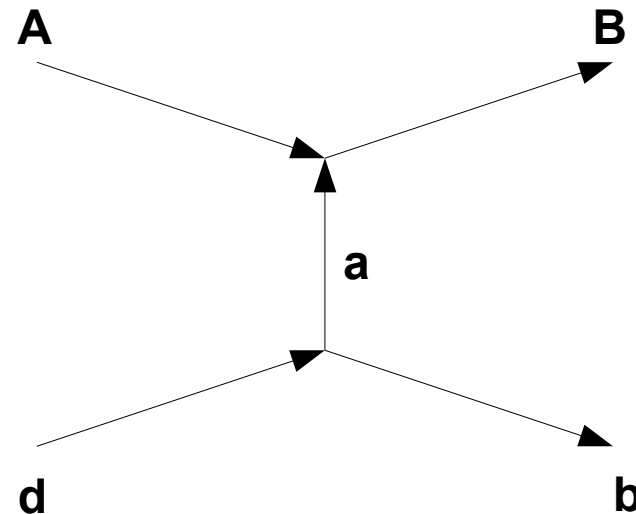
ANC:

Captura Radiativa: $A(a,\gamma)B$
(Baixa energia)

Transferência periférica
 $d + A \rightarrow b + B$ $d = a + b$

Teoria:

Mesmo ANC p/ parte radial da
função de sobreposição $I(B \rightarrow A + a)$



Método Indiretos

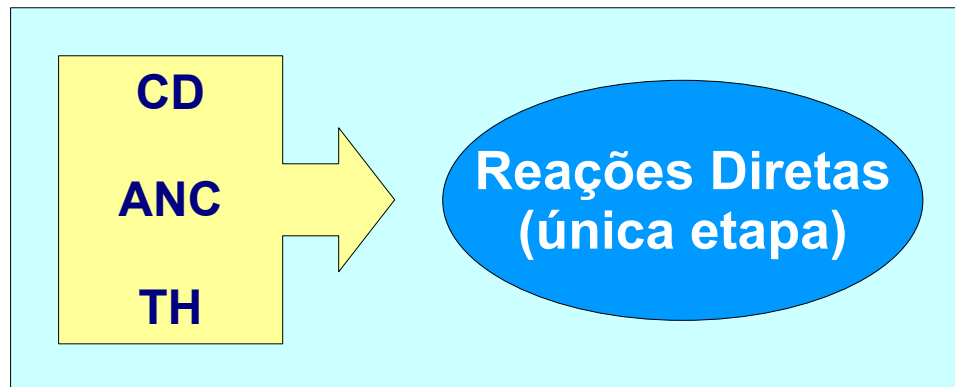
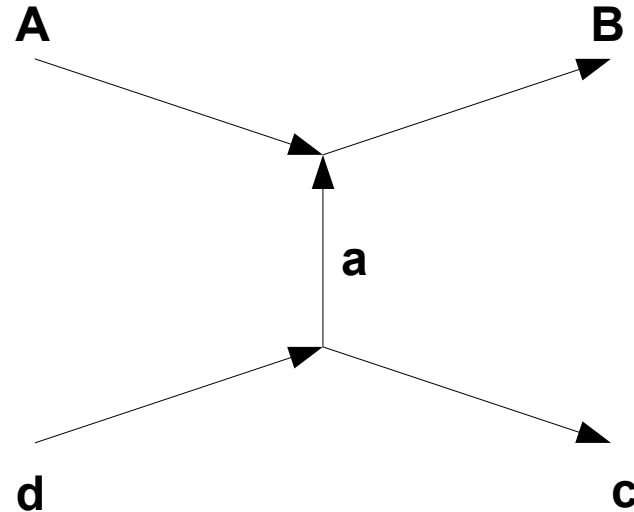
Cavalo de Tróia (TH):

Reação de dois corpos: $A(a,b)B$
(Partículas carregas)

Reação de três corpos:
 $d + A \rightarrow b + B + c$
 $d = a + c$ (c espectador)

Teoria:

Relação entre seção de choque
3 corpos medida e a de 2 corpos
de interesse.



Reação de Substituição (Surrogate)

Reação de Núcleo Composto
(duas etapas)

Reação de Interesse
 $a + A \rightarrow B^* \rightarrow c + C$

Reação de Substituição
 $d + D \rightarrow b + B^* \rightarrow c + C$

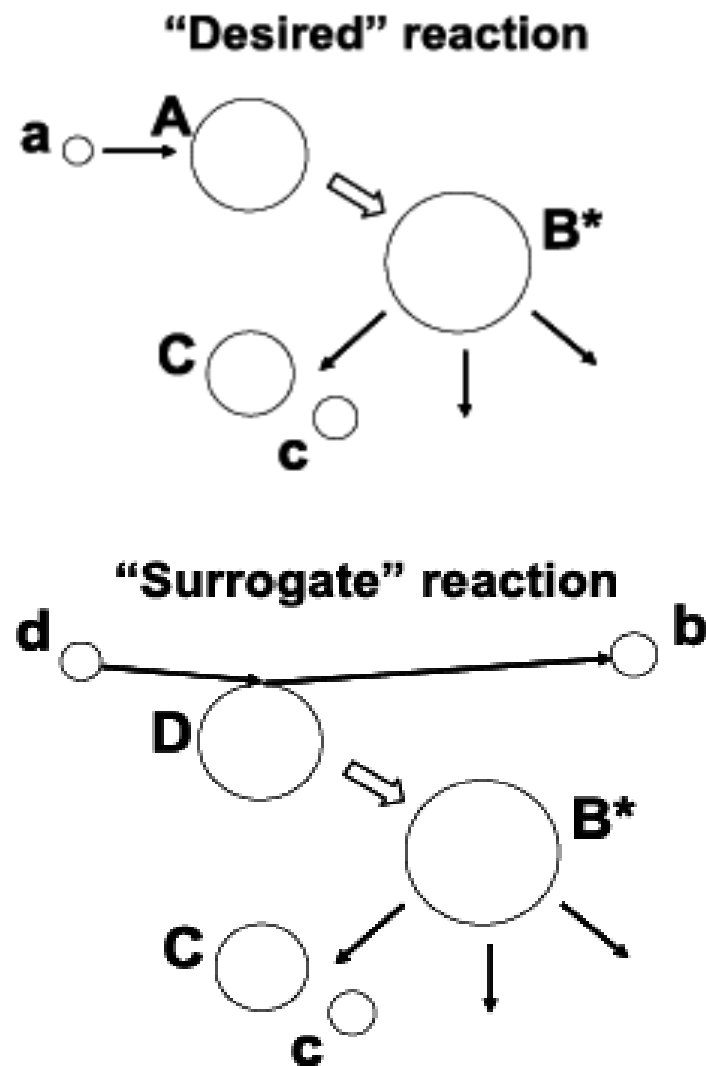
Teoria:

Teoria Estatística de Hauser-Feshbach
para reações de núcleo composto

Usado na década de 70 para extrair
seções de choque (n,f) para vários
actinídeos de reações de transferência
com t e ^3He em núcleo próximos,
seguidas por fissão.

Acordo de 10 a 20% para $E_n > 1 \text{ MeV}$

Discrepâncias para $E_n < 1 \text{ MeV}$



Idéia Principal:

Formação e decaimento do Núcleo Composto são independentes!

O núcleo composto intermediário é um núcleo em um estado altamente excitado equilibrado e sem memória do processo de formação .

Obstáculos:

Qual a distribuição de momentos angulares no núcleo composto?

O núcleo formando no estado intermediário é verdadeiramente um núcleo composto?

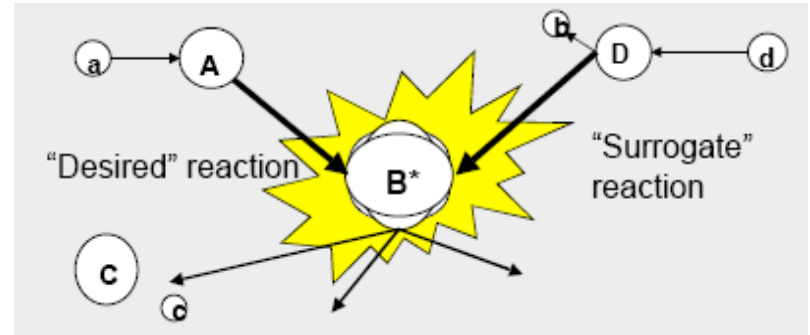
Quais as melhores reações para formação do núcleo composto de interesse?

Formalismo

Formalismo de HF para a reação “desejada”:

$$\sigma_{\alpha\chi}(E_a) = \sum_{J,\pi} \sigma_{\alpha}^{CN}(E_{ex}, J, \pi) G_{\chi}^{CN}(E_{ex}, J, \pi)$$

Calculado com
potencial óptico
 $a+A \rightarrow B^*$



A reação de substituição nos dá:

$$P_{\delta\chi}(E_{ex}) = \sum_{J,\pi} F_{\delta}^{CN}(E_{ex}, J, \pi) G_{\chi}^{CN}(E_{ex}, J, \pi)$$

Experimental:
 $N_{\delta\chi}/N_{\delta}$

$d+D \rightarrow B^*$
(I) (II) (III)

(I) “Ideal”: Calcular F , obter G e substituir em HF da reação desejada.

(II) **Realista**: Ajustar os parâmetros do modelo de núcleo composto para reproduzir P , obtendo G .

(III) **Mais usado**: Aproximação de Weisskopf-Ewing, G independente de J e π .

Limite de Weisskopf-Ewing

$$\sigma_{\alpha\chi}(E_a) = \sum_{J,\pi} \sigma_{\alpha}^{CN}(E_{ex}, J, \pi) G_{\chi}^{CN}(E_{ex}, J, \pi)$$

$$\sigma_{\alpha\chi}^{WE}(E_a) = \sigma_{\alpha}^{CN}(E_{ex}) \mathcal{G}_{\chi}^{CN}(E_{ex})$$

$$\sigma_{\alpha\chi}^{WE}(E_a) = \sigma_{\alpha}^{CN}(E_{ex}) P_{\delta\chi}(E_{ex})$$

$$P_{\delta\chi}(E_{ex}) = \sum_{J,\pi} F_{\delta}^{CN}(E_{ex}, J, \pi) G_{\chi}^{CN}(E_{ex}, J, \pi)$$

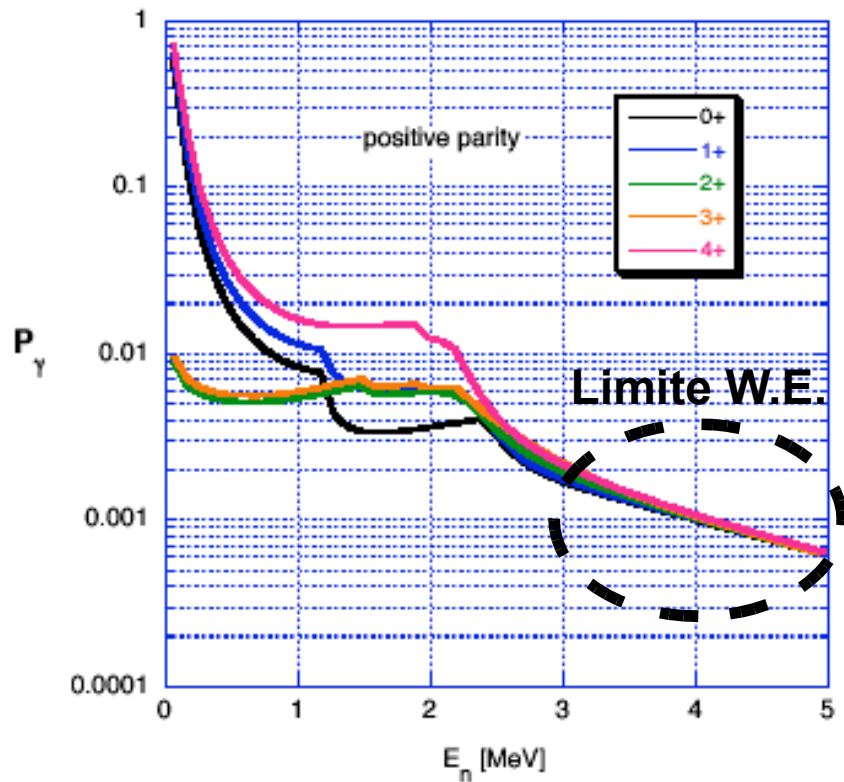
$$P_{\delta\chi}(E_{ex}) [= \mathcal{G}_{\chi}^{CN}(E_{ex}), \text{ since } \sum_{J\pi} F_{\delta}^{CN}(E_{ex}, J, \pi) = 1]$$

A validade das aproximações é testada posteriormente comparando com medidas diretas!

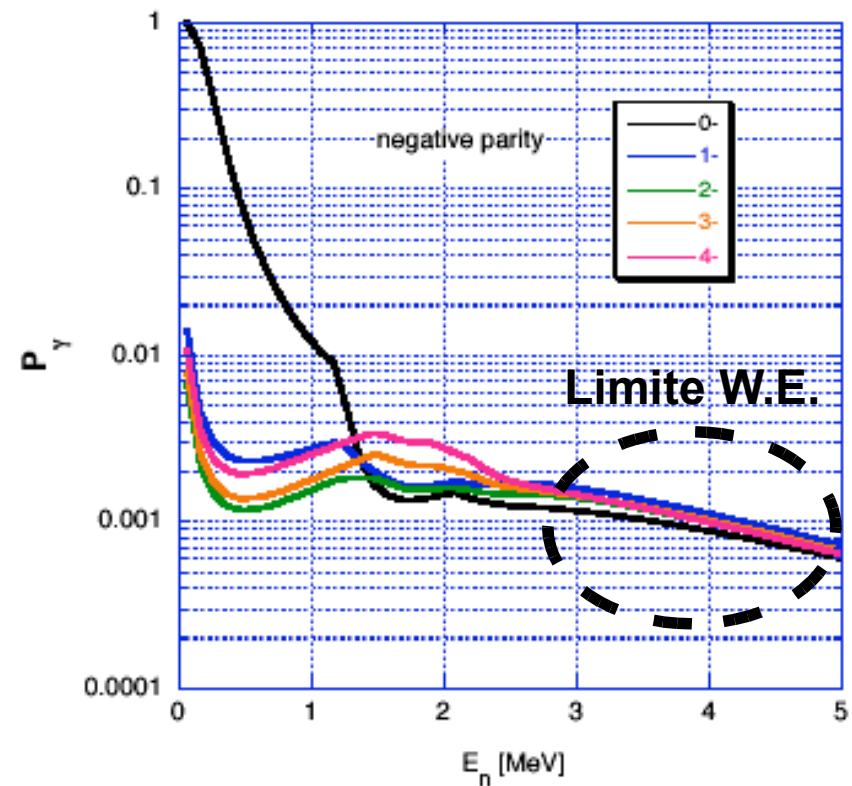
Para núcleos pesados é a dependência em J e π é importante na região de baixas energias E_a

$^{91}\text{Zn}(n,\gamma)^{92}\text{Zn}$ dependência em J^π

γ -decay probability of ^{92}Zr for various J^π values



γ -decay probability of ^{92}Zr for various J^π values



Forssen et al. PRC75(2007) 055807

Razão entre Reações de Substituição

- Medida de 2 Reações de Substituição sendo a seção de choque de uma delas conhecida!
- Necessário o uso da aproximação de WE.
- Pode minimizar os erros sistemáticos devidos às aproximações supostas.

$$R(E) = \frac{\sigma_{\alpha_1 x_1}(E)}{\sigma_{\alpha_2 x_2}(E)}$$

$$\xrightarrow{\text{WE}} \frac{\sigma_{\alpha_1}^{\text{CN}}(E) \cdot \mathcal{G}_{\chi_1}^{\text{CN}}(E)}{\sigma_{\alpha_2}^{\text{CN}}(E) \cdot \mathcal{G}_{\chi_2}^{\text{CN}}(E)}$$

$$P_{\delta\chi}(E_{ex}) [= \mathcal{G}_{\chi}^{\text{CN}}(E_{ex}), \text{ since } \sum_{J\pi} F_{\delta}^{\text{CN}}(E_{ex}, J, \pi) = 1]$$

Considerações Finais

- Todos os métodos indiretos são dependentes de modelo!
- Único método para Núcleo Composto: Surrogate
- Desenvolvimento de modelos e realização de experimentos para testar a suposição do núcleo composto.
- Desenvolvimento de modelos para resolver o problema do momento angular.
- Interagir com teóricos para testar modelos e cálculos.
- Determinar quais reações de substituição são mais adequadas para a formação do núcleo composto de interesse.
- Reações diretas populam estado no continuum.
- Como distinguir fusão incompleta de transferência?
- É possível generalizar para sistemas leves?