

# Método do Cavalo de Tróia

## Possibilidades e Aplicações

---

Marcelo Gimenez Del Santo  
orientador: Marcelo Gameiro Munhoz

Universidade de São Paulo - USP  
Instituto de Física - IF  
Departamento de Física Nuclear - DFN



**1) Tópicos em Astrofísica**

**2) Método do Cavalo de Tróia (THM)**

Aplicação

**3) Grupo de Colaboração - Resultados Recentes**

**4) Reações de Interesse Astrofísico**

Núcleos Leves

**5) Reações Propostas**

Energia do Feixe

Arranjo Experimental

Radiação de Fundo

Técnicas Modernas de Detecção

Processos de Mistura

Nucleossíntese  
Big Bang, Estelar,  
RCG,...

Blindagem Eletrônica

Super-Novas

Evolução Estelar

Métodos Indiretos  
ANC, THM,...

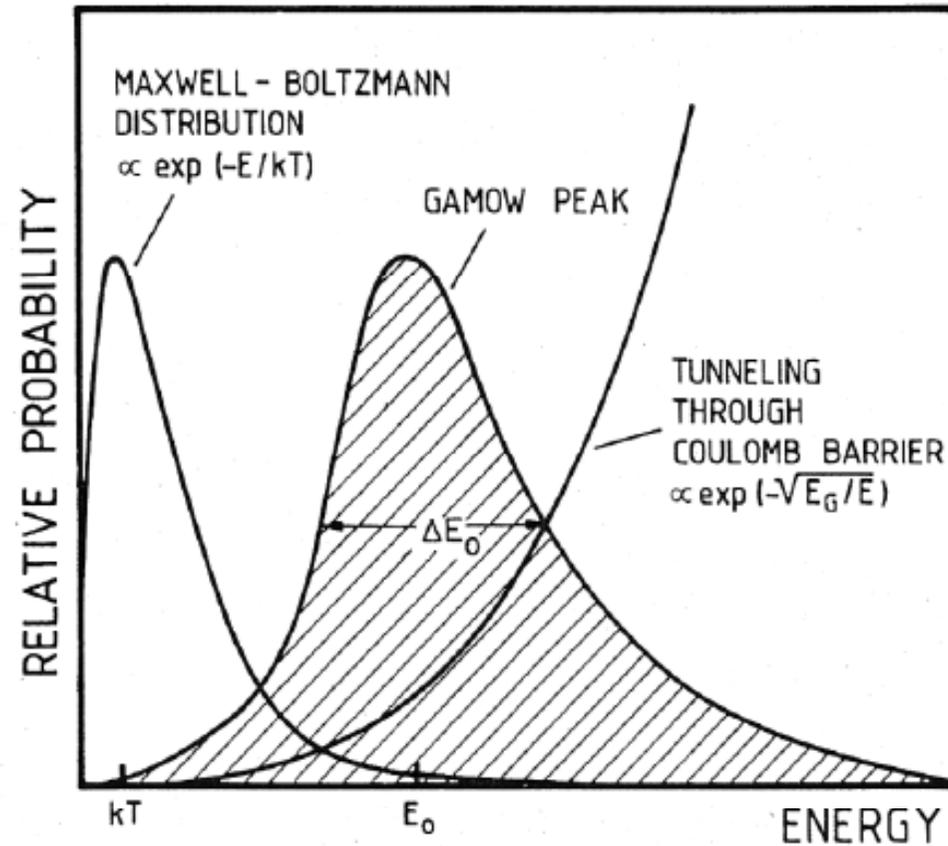
Feixes Exóticos

Explosões de Raios  $\gamma$



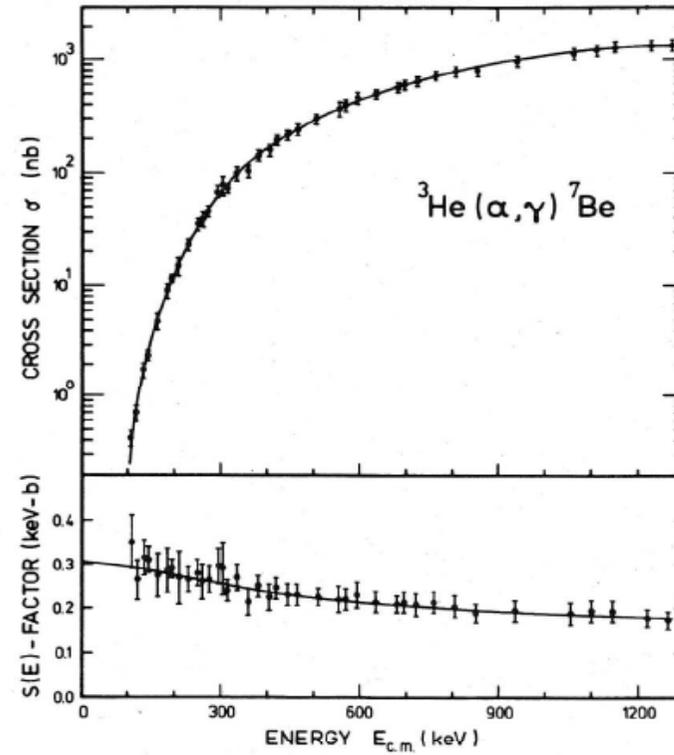
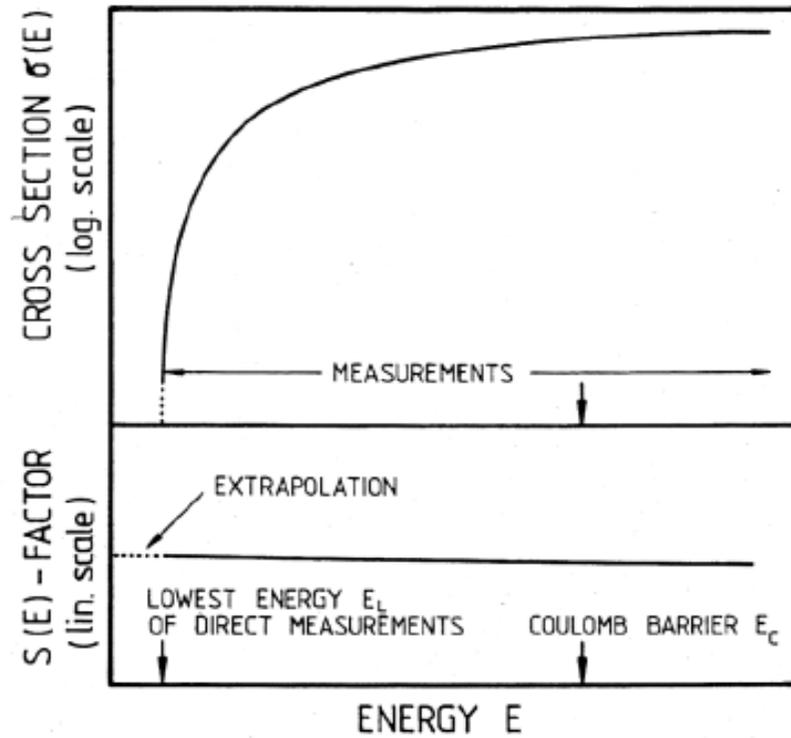
Astrofísica Nuclear

# Pico de Gamow



$$E_0 = 1,22(Z_1^2 \cdot Z_2^2 \cdot T_6^2)^{1/3} \text{ keV} \left\{ \begin{array}{ll} p + p: & E_0 = 5.9 \text{ keV} , \\ p + {}^{14}\text{N}: & E_0 = 26.5 \text{ keV} , \\ \alpha + {}^{12}\text{C}: & E_0 = 56 \text{ keV} , \\ {}^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O}: & E_0 = 237 \text{ keV} . \end{array} \right.$$

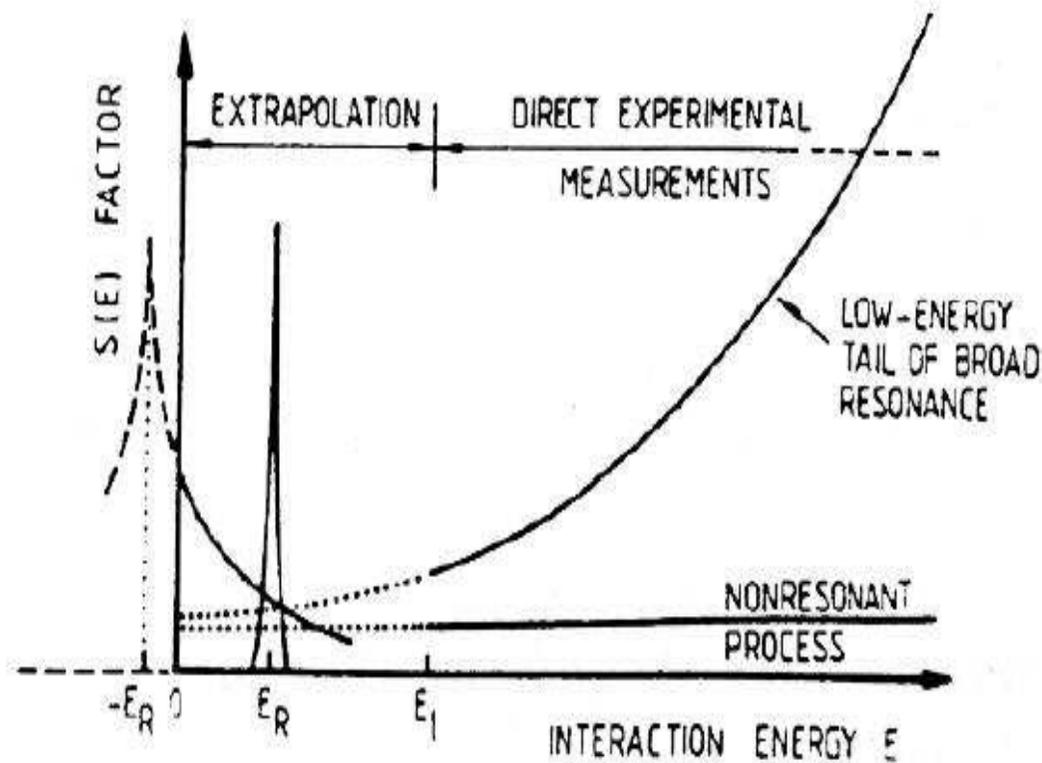
# Fator Astrofísico $S(E)$



$$S(E) = E \sigma(E) \exp(2\pi\eta)$$

$$\eta = 4.98 Z_1 Z_2 (\mu/E)^{1/2}$$

# Extrapolação



**Extrapolação**

Grandes incertezas  
Ressonâncias

Melhoria nos experimentos  
diretos (LUNA, ERNA,...)

Energias mais baixas

mas ...

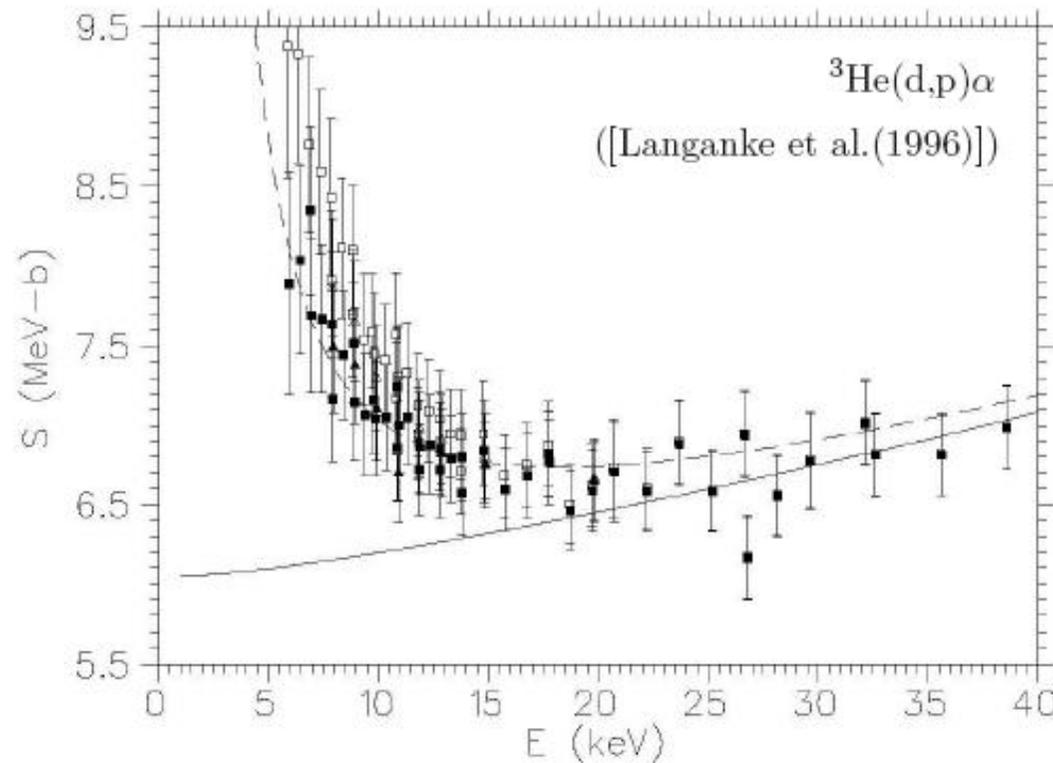
Laboratório - átomos

Nuvem eletrônica



Efeito de Blindagem Eletrônica  
"electron screening"

# Blindagem Eletrônica "electron screening"



Diminuição da  
barreira Coulombiana

Aumento da  
seção de choque

$$S(E) = S_B(E) \cdot f(E)$$

$$f(E) \propto \exp(\pi \eta U_e / E) > 1$$

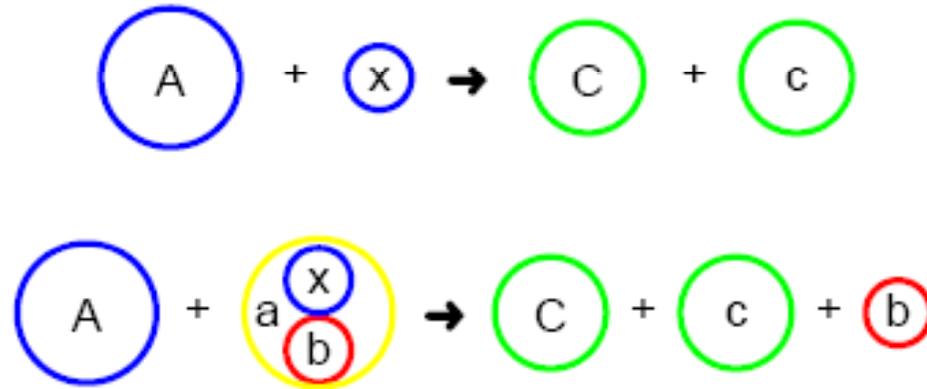
$$E/U_e < 100 \text{ Não desprezível}$$

$$U_e \sim 400 \text{ eV}$$
$$E \sim 40 \text{ KeV}$$



# Método do Cavalo de Tróia

[Baur (1986)],[Spitaleri(1999)]



Obter o fator Astrofísico  $S(E)$  (partículas carregadas)

de uma reação de 2 corpos

selecionando a contribuição **quase - livre**

de uma **reação de 3 corpos** apropriada

utilizando núcleo **cavalo de tróia** cluster  $a = b + x$

com **distribuição de momentos** conhecida

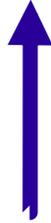
# Formalismo do THM (PWIA)

[Typel, Baur (1986)]

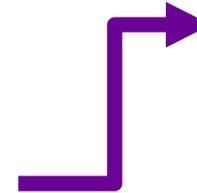
Seção de choque da reação virtual de 2 corpos



Seção de choque da reação de 3 corpos (coincidências)



Fator cinemático



$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{A-x}^N \propto \frac{d^3\sigma}{dE_C d\Omega_C d\Omega_c} [(KF) \cdot |\phi(p_s)|^2]^{-1}$$

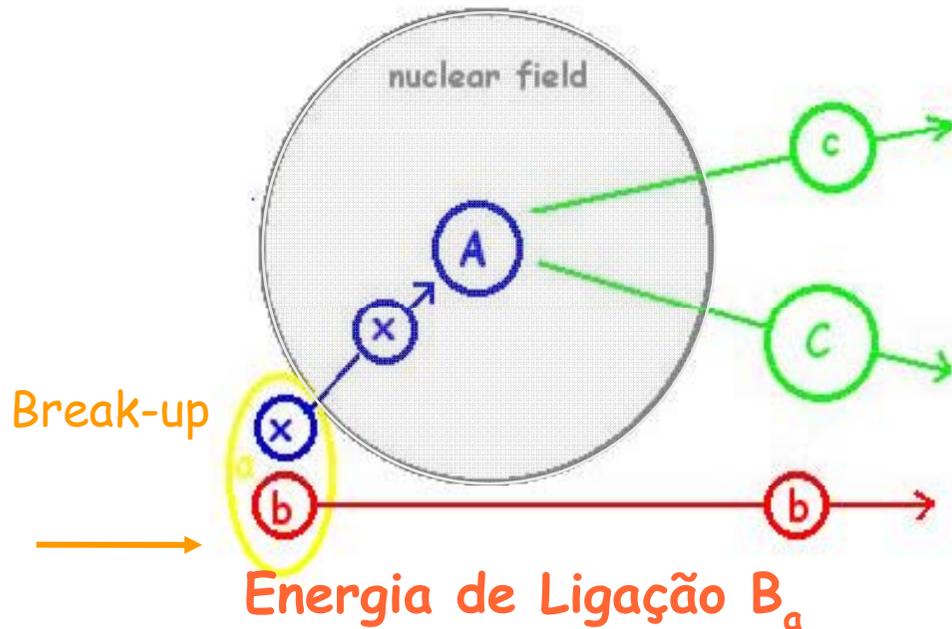


Ferramenta complementar  
Normalização  
com os dados diretos



Distribuição de momentos dentro do cluster (x-b):  
função de Hülthen

# Método do Cavalo de Tróia - Condição Quase - Livre



O espectador b deve manter a mesma distribuição de momentos que ele tinha dentro do núcleo cavalo de tróia.

energia relativa A-a

acima da barreira Coulombiana

baixas energias alcançadas A-x

sem blindagem eletrônica

sem supressão Coulombiana

$S_B(E)$

# Núcleos Cavalo de Tróia

## Núcleos com estrutura de "cluster"

Núcleo	"clusters"	Energia ligação (MeV)
${}^3\text{H}$	p - n	2,225
${}^3\text{H}$	d - n	6,257
${}^3\text{He}$	d - p	5,494
${}^6\text{Li}$	$\alpha$ - d	1,475
${}^7\text{Li}$	$\alpha$ - t	2,468
${}^7\text{Be}$	$\alpha$ - ${}^3\text{He}$	1,587
${}^9\text{Be}$	$\alpha$ - ${}^5\text{He}$	2,467
${}^{16}\text{O}$	$\alpha$ - ${}^{12}\text{C}$	7,162

???

Feixes indiretos:  
n,p,d,t, $\alpha$ , ${}^3\text{He}$ , ${}^5\text{He}$

# Cálculo da Energia do feixe

$$E_{qf} = E_{A-x} - B_a \pm E_{x-b}$$



Energia do pico  
de Gamow



Energia da  
reação de 2  
corpos no C.M.



Energia de  
ligação do  
núcleo cavalo  
de tróia



Energia dos  
clusters dentro  
do cavalo de  
tróia

Exemplo:  $^{10}\text{B}(p,\alpha)^7\text{Be}$        $^2\text{H}(^{10}\text{B},\alpha^7\text{Be})n$

$$0,01 = E_{A-x} - 2,225 \pm 0$$

$$E_{A-x}^{CM} = 2,215 \text{ MeV}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{A-x}^{LAB} = 2,215 \cdot (10+1/1) = 24,4 \text{ MeV (feixe } ^{10}\text{B)} \\ E_{A-x}^{LAB} = 2,215 \cdot (10+1/10) \cdot 2 = 4,88 \text{ MeV (feixe } ^2\text{H)} \end{array} \right.$$

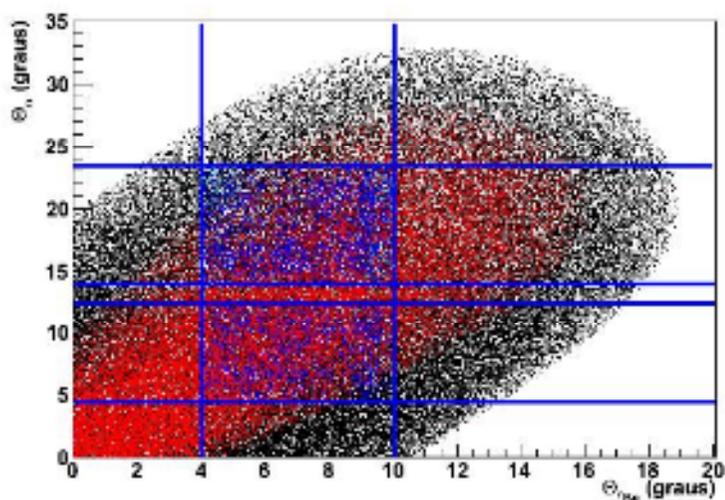


Figura 4.5: Simulação da região angular da reação  ${}^3\text{H}({}^{10}\text{B}, \alpha {}^7\text{Be})n$  onde os pontos em vermelho correspondem a região com  $|p_n| < 30\text{MeV}/c$ .

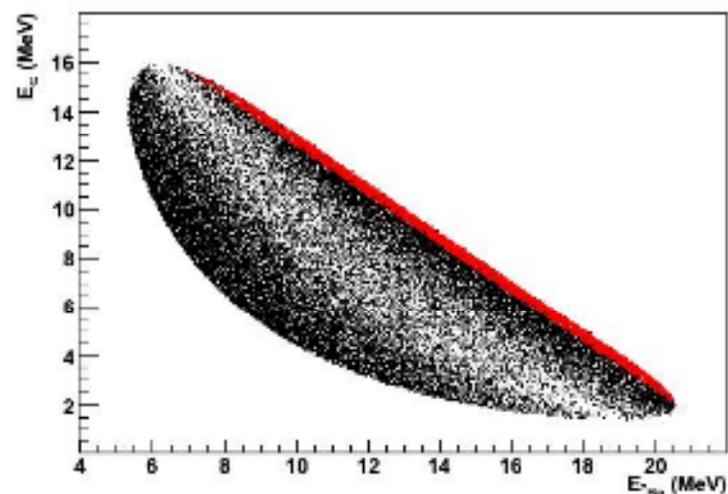


Figura 4.6: Simulação do locus cinemático da reação  ${}^3\text{H}({}^{10}\text{B}, \alpha {}^7\text{Be})n$  onde os pontos em vermelho correspondem a região com  $|p_n| < 30\text{MeV}/c$ .

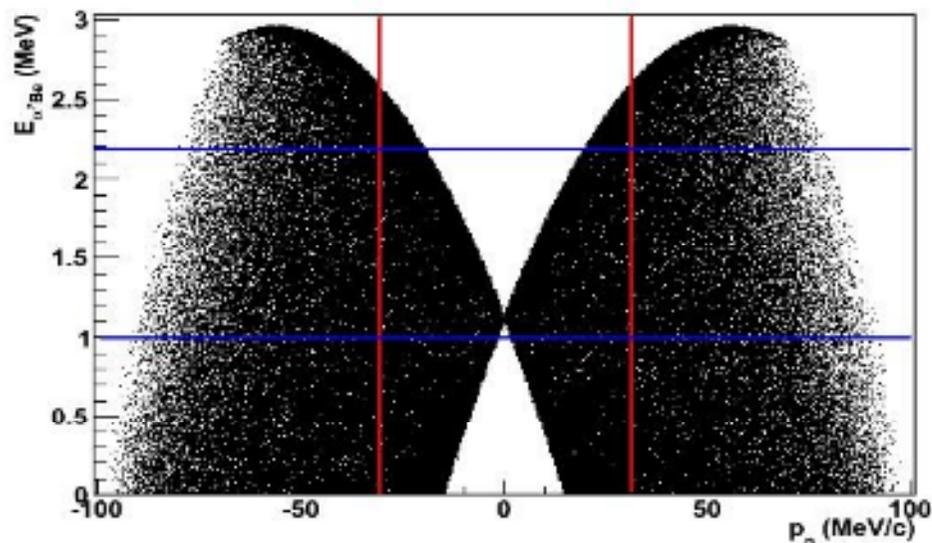
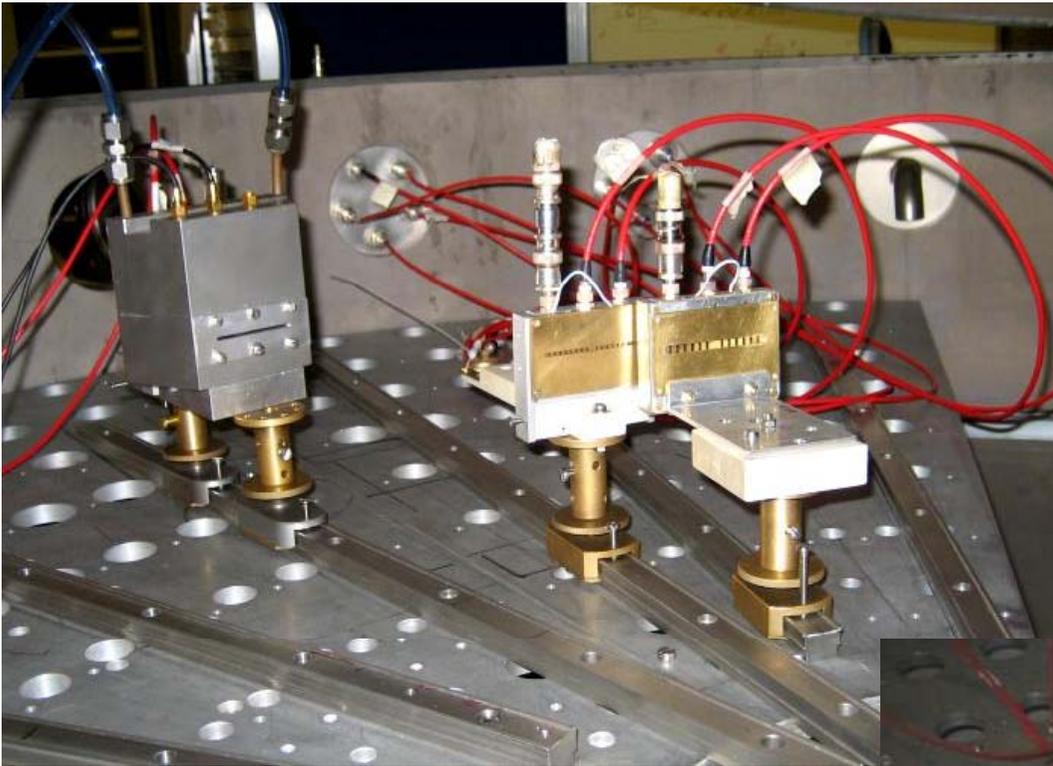


Figura 4.7: Simulação do “butterfly diagram”: a região de interesse astrofísico (entre as linhas horizontais) onde  $E_{\text{CM}} > 0$  MeV possui uma forte contribuição do mecanismo QF com  $|p_n| < 30$  MeV/c (linhas tracejadas vermelhas).

Arranjo

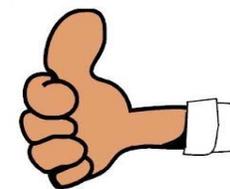
PSD e CI





★ **ETNA Collaboration**  
**Experimental Techniques on Nuclear Astrophysics**

# Reações já estudadas



J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **35** (2008) 014008

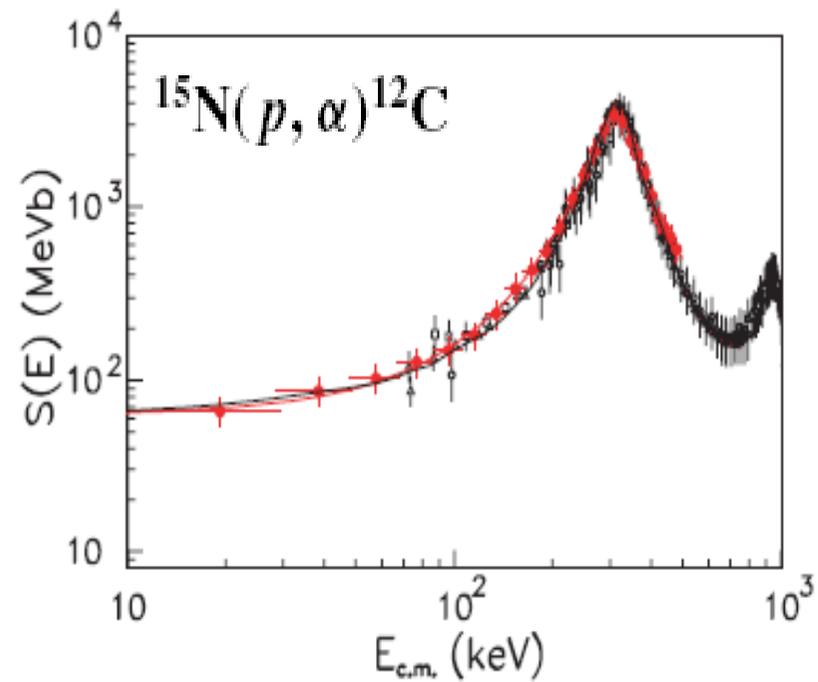
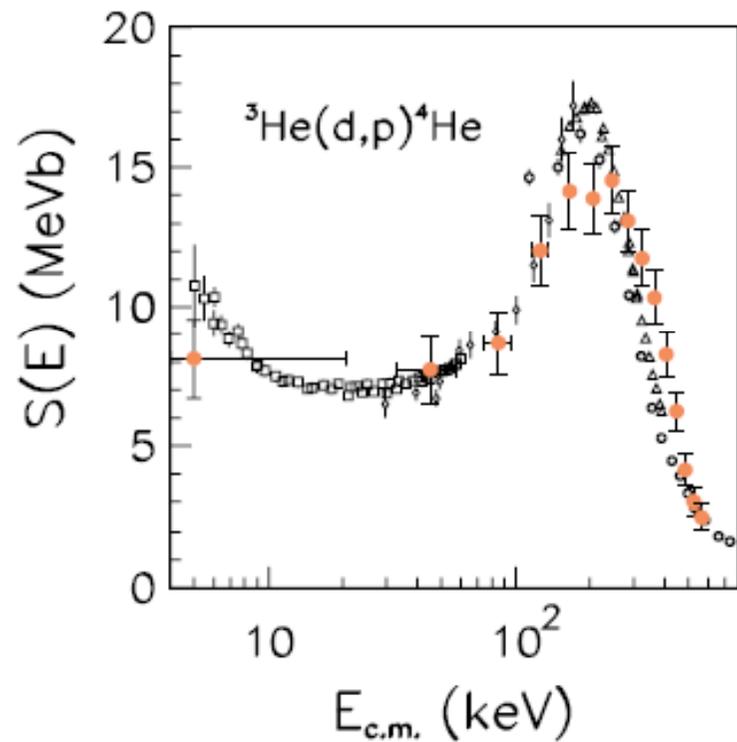
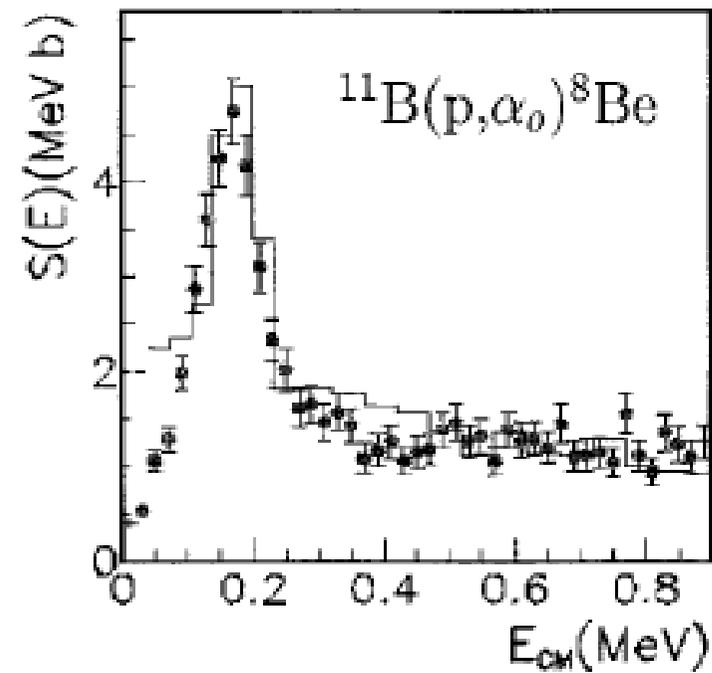
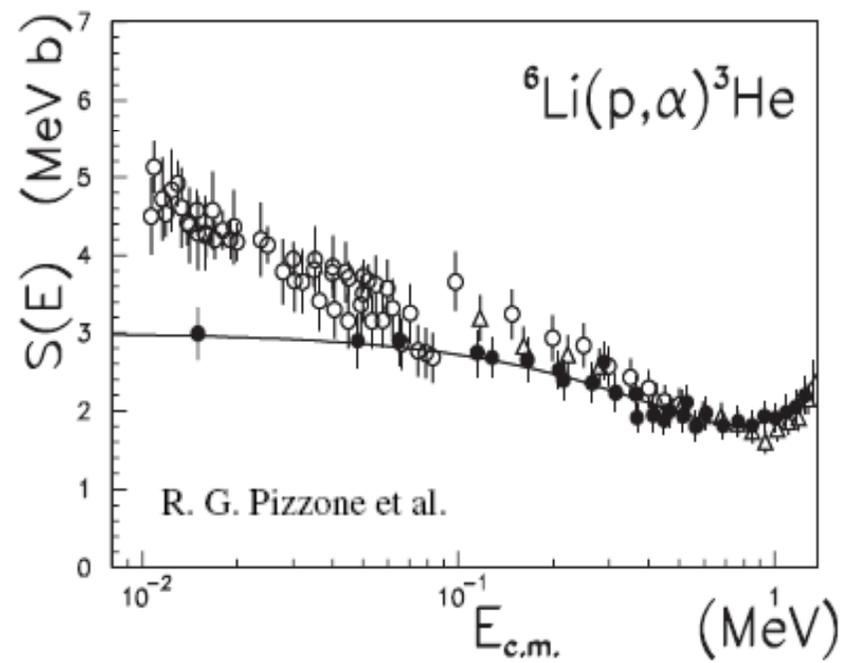
S Romano *et al*

**Table 3.** Reactions investigated by means of the THM.

Two-body reaction	Three-body reaction	$S(0)(\text{dir})$ MeVb	$S(0)(\text{THM})$ MeVb	Reference
${}^6\text{Li}(d, \alpha)\alpha$	${}^6\text{Li}({}^6\text{Li}, \alpha\alpha)\alpha$	17.4	$19.9 \pm 0.5$	[8]
${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$	$d({}^6\text{Li}, \alpha{}^3\text{He})n$	2.86	$3.00 \pm 0.19$	[7, 18]
${}^7\text{Li}(p, \alpha)\alpha$	$d({}^7\text{Li}, \alpha\alpha)n$	0.059	$0.055 \pm 0.003$	[8]
${}^7\text{Li}(p, \alpha)\alpha$	${}^7\text{Li}({}^3\text{He}, \alpha\alpha)d$	0.059	–	[9]
${}^9\text{Be}(p, \alpha){}^6\text{Li}$	$d({}^9\text{Be}, \alpha{}^6\text{Li})n$	–	–	[19]
${}^{10}\text{B}(p, \alpha){}^7\text{Be}$	$d({}^{10}\text{B}, \alpha{}^7\text{Be})n$	–	–	[20]
${}^{11}\text{B}(p, \alpha){}^8\text{Be}$	$d({}^{11}\text{B}, \alpha{}^8\text{Be})n$	2.1	$0.4 \pm 0.1$	[5, 17]
${}^3\text{He}(d, p)\alpha$	${}^6\text{Li}({}^3\text{He}, p\alpha)\alpha$	6.11	$5.1 \pm 1.1$	[21]
$d(d, p){}^3\text{H}$	$d({}^6\text{Li}, p{}^3\text{H})\alpha$	–	–	[22]
${}^{15}\text{N}(p, \alpha){}^{12}\text{C}$	$d({}^{15}\text{N}, \alpha{}^{12}\text{C})n$	$65 \pm 4$	$62 \pm 10$	[23]
${}^{19}\text{F}(\alpha, p){}^{22}\text{Ne}$	${}^6\text{Li}({}^{19}\text{F}, p{}^{22}\text{Ne})d$	–	–	Data analysis in progress
${}^{18}\text{O}(p, \alpha){}^{15}\text{N}$	$d({}^{18}\text{O}, \alpha{}^{15}\text{N})n$	–	–	[24]
${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$	$d({}^6\text{Li}, \alpha{}^3\text{H})p$	–	–	[25]
$p(p, p)p$	$d(p, pp)n$	–	–	[26]



*M. La Cognata et al. / Physics Letters B 664 (2008) 157–161*



# Reações propostas no artigo

J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 35 (2008) 014008 (7pp)

Feixes Pelletron:  $^1,^2\text{H}, ^{6,7}\text{Li}, ^{10,11}\text{B}, ^{12,13}\text{C},$   
 $^{16,17,18}\text{O}, ^{19}\text{F}, ^{28,29,30}\text{Si}, ^{35,37}\text{Cl},$   
 $^9\text{Be}, \text{I}, \text{Au} ???$

Alvos:  $^{10,11}\text{B}, \text{C}, \text{O}, ^{24}\text{Mg}, \text{Si}, \text{K}, \text{Au}, \text{CD}_2$

**Table 4.** Reactions that can be studied by means of the THM.

Two-body reaction	Indirect reaction	
$d(d, p)t$	$d(^3\text{He}, pt)p$	
$d(d, n)^3\text{He}$	$d(^3\text{He}, n^3\text{He})p$	
$^9\text{Be}(p, d)^8\text{Be}$	$d(^9\text{Be}, d^8\text{Be})n$	$E_0 = 18 \text{ keV} \quad E_{^9\text{Be}} = 22,4 \text{ MeV}$
$^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \alpha)^{20}\text{Ne}$	$^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, \alpha)^{20}\text{Ne}\alpha$	$E_0 = 147 \text{ keV} \quad E_{^{12}\text{C}} = 14,6 \text{ ou } E_{^{16}\text{O}} = 19,5 \text{ MeV}$
$^{12}\text{C}(\alpha, \alpha)^{12}\text{C}$	$^6\text{Li}(^{12}\text{C}, \alpha^{12}\text{C})d$	
$^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, ^{23}\text{Na})p$	$^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, p^{23}\text{Na})\alpha$	$E_0 = 147 \text{ keV} \quad E_{^{12}\text{C}} = 14,6 \text{ ou } E_{^{16}\text{O}} = 19,5 \text{ MeV}$
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$	$^6\text{Li}(^{13}\text{C}, n^{16}\text{O})d$	$E_0 = 81 \text{ keV} \quad E_{^{13}\text{C}} = 6,6 \text{ ou } E_{^6\text{Li}} = 3,0 \text{ MeV}$
$^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$	$^6\text{Li}(^{22}\text{Ne}, n^{25}\text{Mg})d$	
$^{17}\text{O}(p, \alpha)^{14}\text{N}$	$d(^{17}\text{O}, \alpha^{14}\text{N})n$	$E_0 = 24 \text{ keV} \quad E_{^{17}\text{O}} = 40 \text{ ou } E_d = 4,8 \text{ MeV}$
$^{22}\text{Ne}(n, \alpha)^{19}\text{O}$	$d(^{22}\text{Ne}, \alpha^{19}\text{O})p$	
$^{18}\text{F}(p, \alpha)^{15}\text{O}$	$d(^{18}\text{F}, \alpha^{15}\text{O})n$	

# Resolução - Parede de Nêutrons ???

$$E_{CM} = E_{rel} - Q_{2Body}$$

$$E_{rel} = \mu ( E_1/m_1 + E_2/m_2 - \text{sqrt}(E_1 E_2 / m_1 m_2) \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) )$$

Resolução em posição do PSD 0,3 mm

PSD1 d = 56 cm      0,030°

PSD2 d = 28 cm      0,015°

Resolução em energia do PSD

5% da energia da alfa de ~ 5 MeV

**Melhor Resolução possível  $E_{CM} \sim 5$  KeV**

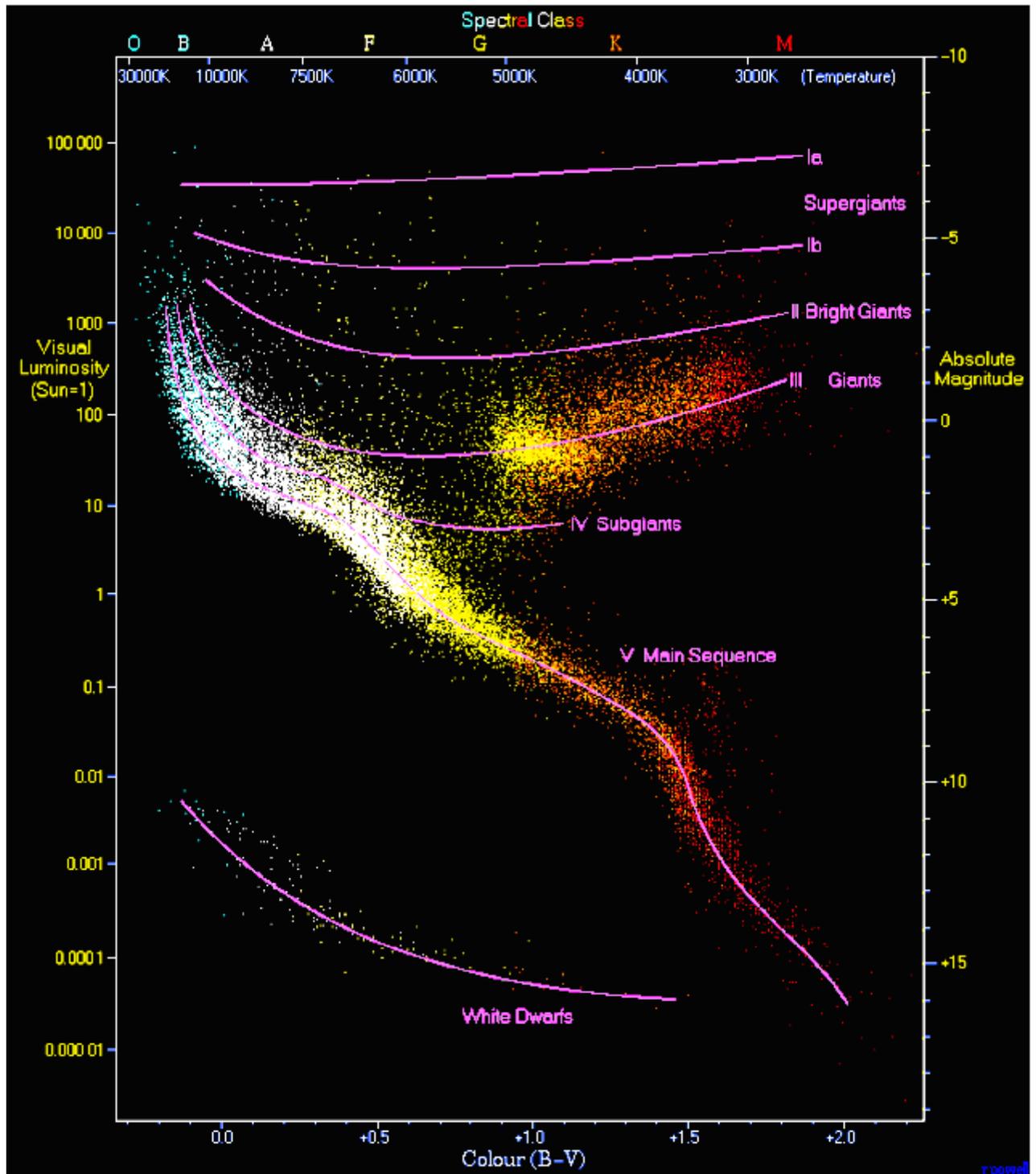
**Resolução do experimento  
par PSD1-PSD3 ~ 30 keV**

**Parede de Nêutrons**  
= PSD(0,03) d=15 m  
= 0,1                      d= 5 m



# Diagrama de Hertzsprung-Russel HR

Diagrama de Hertzsprung-Russell adaptado de Powell. São mostradas 22.000 estrelas do Catálogo de Hiparcos e 1.000 do catálogo Gliese de estrelas próximas.



Elementos Leves

Li Be B

Primordial

BBN ( ${}^2\text{H}$ ,  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^7\text{Li}$ , ...)

IBBN (... ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{10}\text{B}$ ,  ${}^{11}\text{B}$ , ...)

Inter-Estelar

Raios C3smicos Gal3ticos (GCR)

( ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{10}\text{B}$ ,  ${}^{11}\text{B}$ )

Estelar

(p-p, CNO, p, r, s, ...)

Li(p,a) Be(p,a) B(p,a)

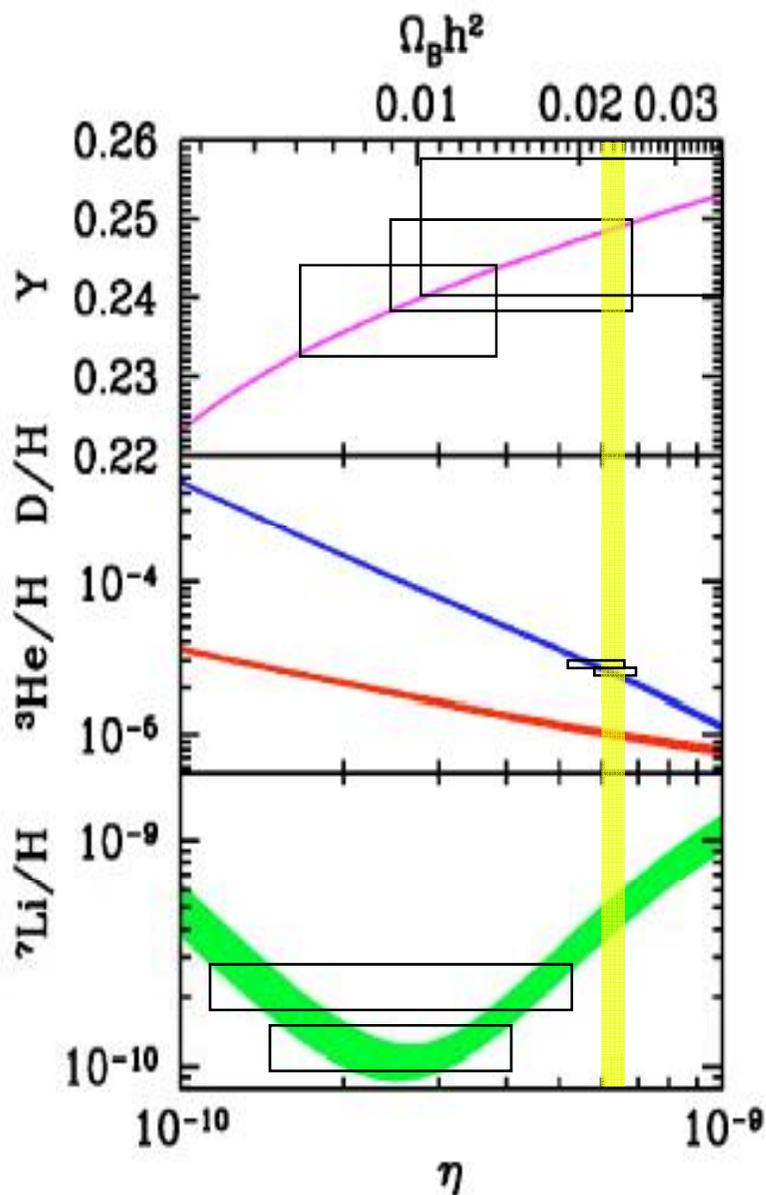
Estrutura interna da estrela

Mecanismos de mistura

Nucleoss3ntese

# Nucleossíntese Primordial

Reações
decaimento n
$p(n,\gamma)d$
$d(p,\gamma)^3\text{He}$
$d(d,n)^3\text{He}$
$d(d,p)t$
$^3\text{He}(n,p)t$
$t(d,n)^4\text{He}$
$^3\text{He}(d,p)^4\text{He}$
$^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$
$t(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$
$^7\text{Be}(n,p)^7\text{Li}$
$^7\text{Li}(p,\alpha)^4\text{He}$



D ok

$^4\text{He}$

- re-análise dos dados [Olive (2003)]
- incerteza grande

$^3\text{He}$

- limitações na observação
- evolução galáctica pouco compreendida (aumenta ou diminui ????)
- não é usado como ponta de prova

$^7\text{Li}$

- interpretação

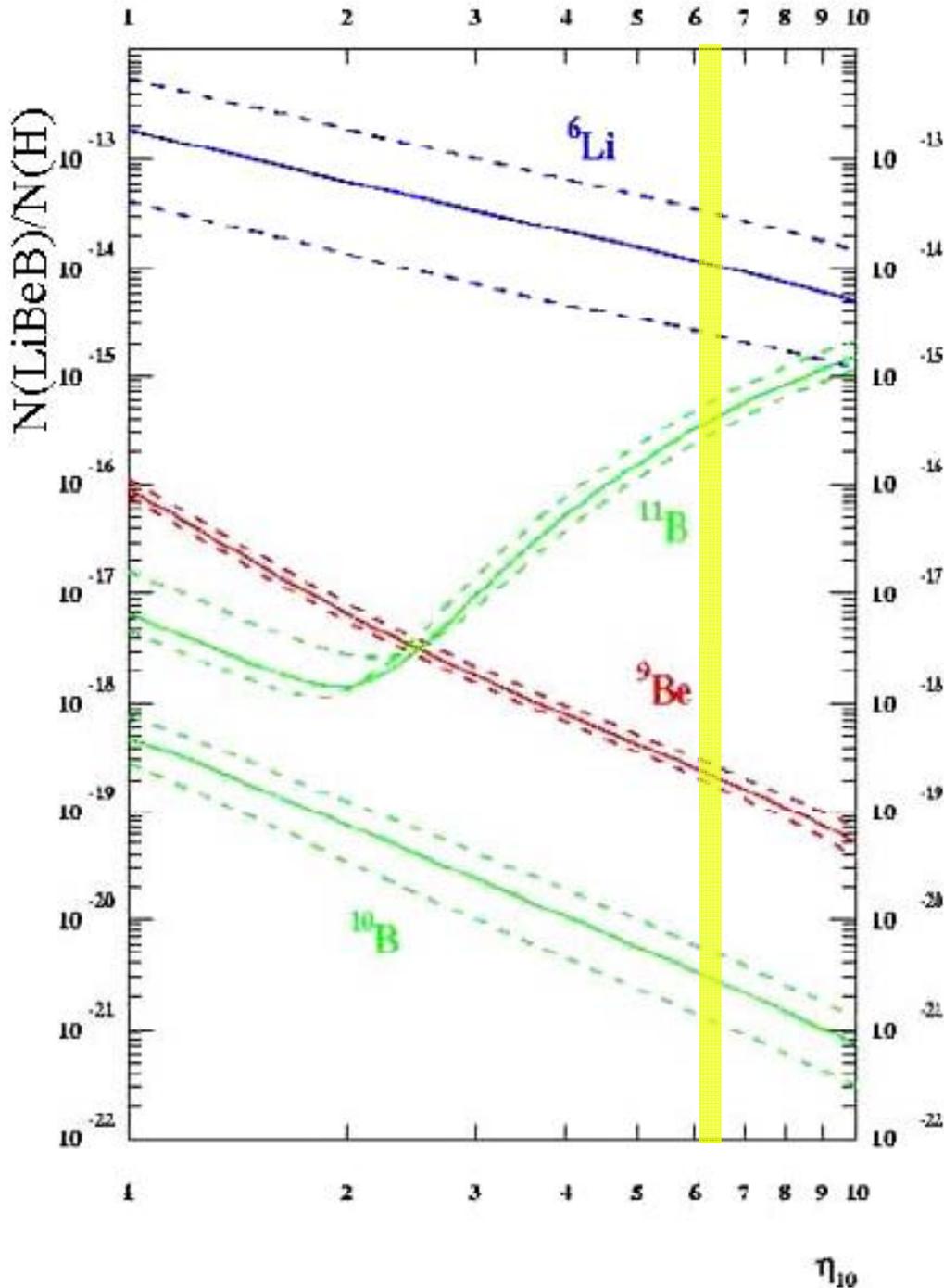
[Cyburt (2004)]

[Cyburt (2005)]

$\eta_{10} = 6,14 \pm 0,25$   
WMAP [Bennett et al. (2003)]

# IBBN

# Nucleossíntese Primordial



[Garcia Lòpez et al. (1998)]

[Primas et al. (2000)]

	modelo		observações
	BBN	IBBN	
${}^9\text{Be}/\text{H}$	$10^{-19}$	$10^{-18}$	$10^{-14}$
${}^{11}\text{B}/\text{H}$	$10^{-17}$	$10^{-16}$	$10^{-12}$

fator 10-100

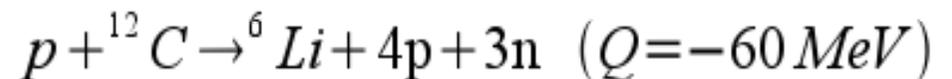
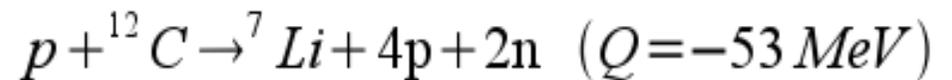
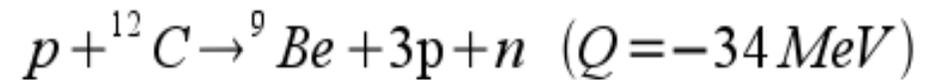
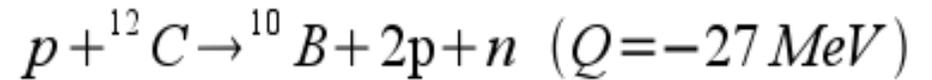
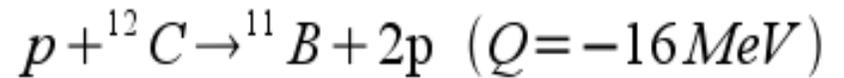
fator  $10^4$

[Jedamzik (2001)]

# Nucleossíntese Inter-Estelar

## Reações de Espalação (fragmentação)

raios cósmicos galácticos GCR (p,...)  
+  
núcleos do meio inter-estelar (CNO,...)

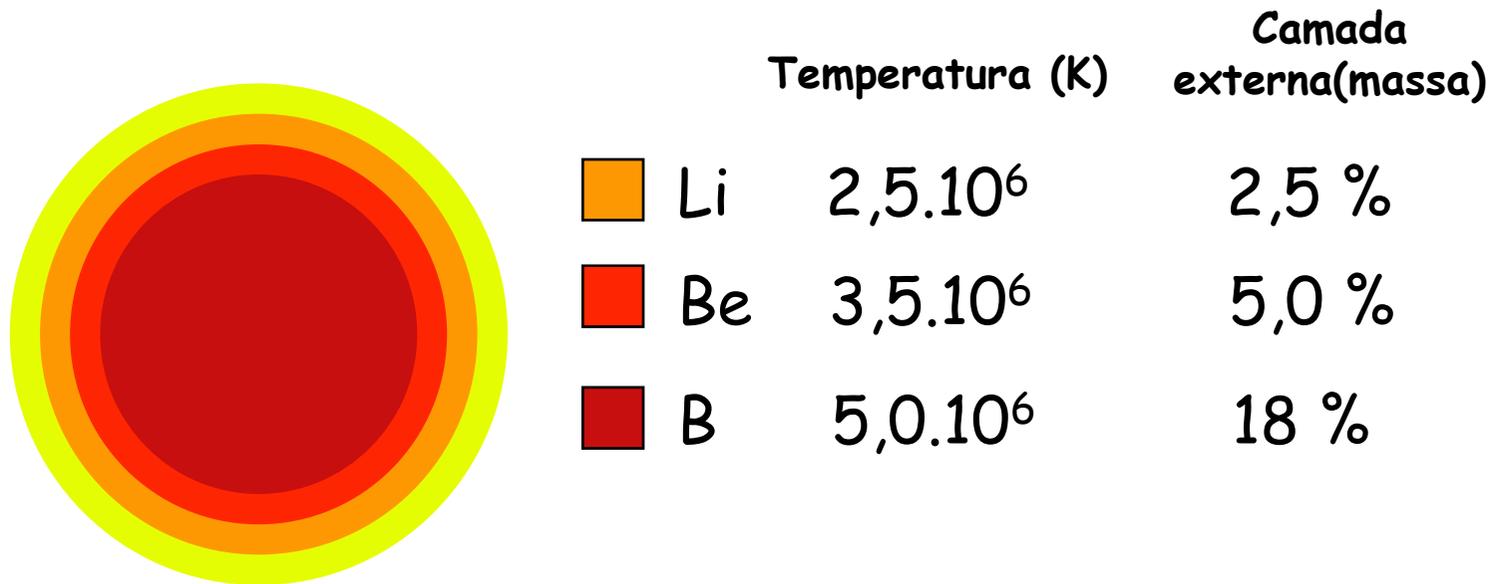


Núcleo	Abundância prevista pela nucleossíntese GCR ( $\times 10^{-12}$ )	Abundância cósmica observada ( $\times 10^{-12}$ )	Razão entre previsão e observação
Li/H	116	970	0,12
${}^6\text{Li}/\text{H}$	45	70	0,64
${}^7\text{Li}/\text{H}$	66	900	0,07
${}^9\text{Be}/\text{H}$	16	14	1,14
B/H	169	150	1,13
${}^{10}\text{B}/\text{H}$	51	30	1,70
${}^{11}\text{B}/\text{H}$	118	120	0,98

# Nucleossíntese Estelar

Queima do Li, Be e B  $\longrightarrow$  Reações  $(p,\alpha)$ ,  $(p,\gamma)$ ,  $(\alpha,n)$ ,  $(\alpha,\gamma)$

Depleção de LiBeB (em estrelas F - G da sequência principal)



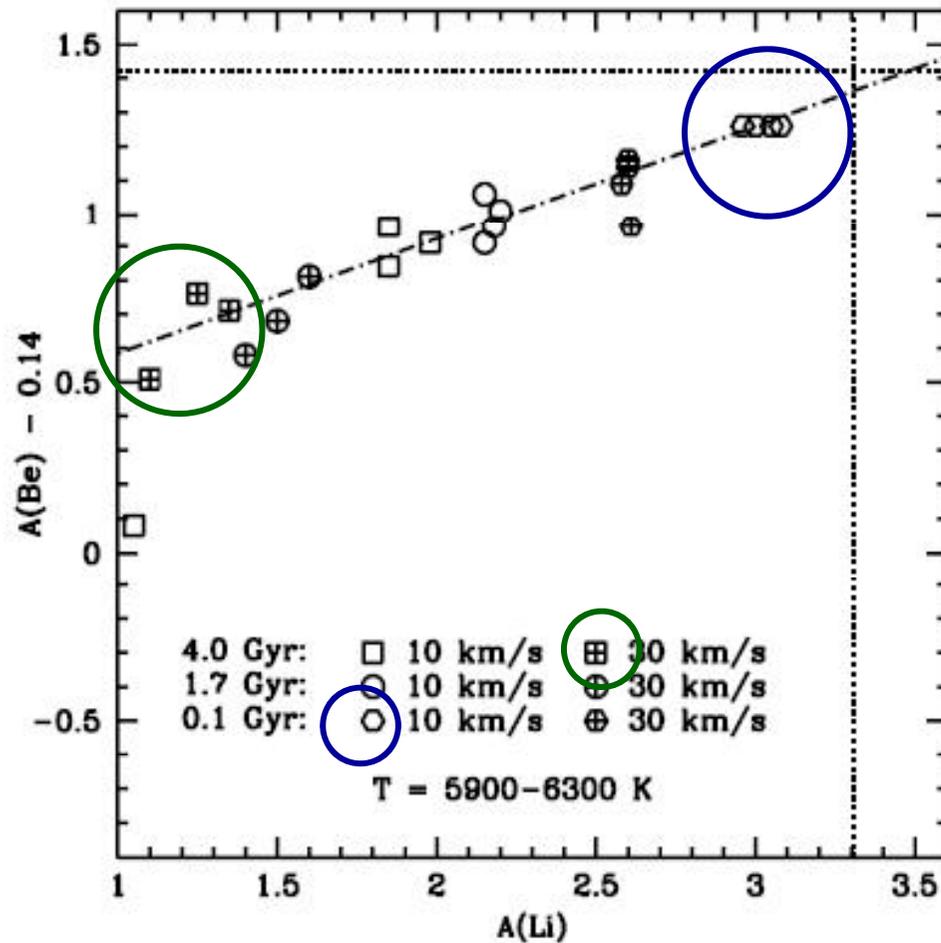
Mecanismos de Mistura:

CONVECÇÃO

DIFUSÃO MICROSCÓPICA

MISTURA INDUZIDA POR ROTAÇÃO

# Correlação entre abundâncias, idade e velocidade de rotação



## MISTURA INDUZIDA POR ROTAÇÃO

Estrelas com maiores velocidades iniciais e mais antigas sofrem maiores depleções em Li e Be.

[Boesgaard (2004)]



O Estudo de  
Reações Nucleares  
é a principal ligação entre  
Astrofísica  
e  
Física Nuclear

Supernova Cassiopeia A  
(foto: NASA)

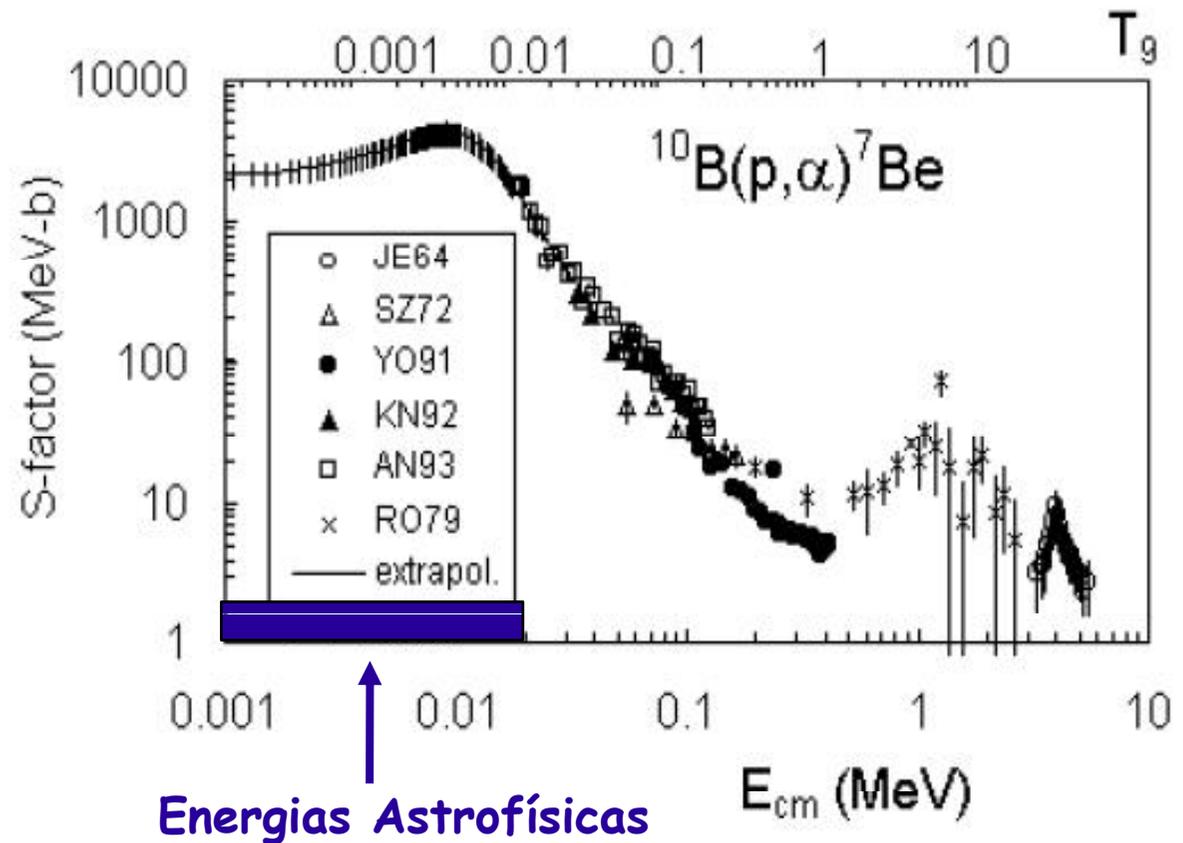
# A reação $^{10}\text{B}(p,\alpha)^7\text{Be}$ no ambiente Astrofísico

Principal responsável pela **destruição** do  $^{10}\text{B}$  no meio estelar

Energia de Gamow  $\sim 10$  keV

Ocorre principalmente através do estado de onda s ressonante (**8.70 MeV**) do núcleo composto  $^{11}\text{C}$   
 $\Gamma = 16$  KeV  $E_0 = 10$  KeV  
[Wiecher (1983)]

os dados diretos não alcançam a região da energia de Gamow  
[ANGULO (1993)]  
[YOUN (1991)]



$S(E)$  e  $U_e$

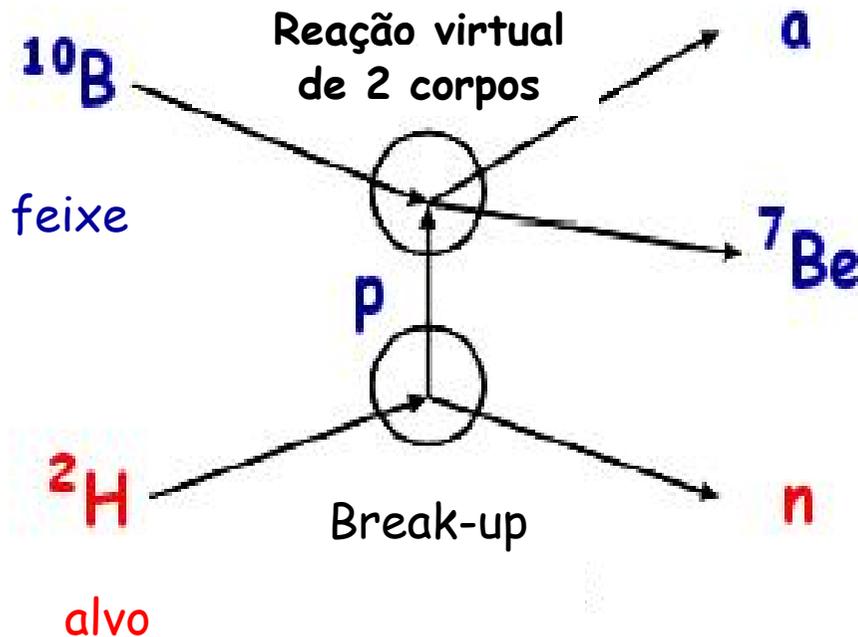


Método Indireto  
do  
Cavalo de Tróia

# Estudo da reação $^{10}\text{B}(p,\alpha)^7\text{Be}$

Através do **Método do Cavalo de Tróia**

Usando a reação de 3 corpos  $^2\text{H}(^{10}\text{B},\alpha)^7\text{Be}n$



## Cavalo de Tróia



- estrutura do *cluster*  $d = p + n$
- energia de ligação 2,224 MeV compensa a energia do feixe

$$E_{qf} = E_{p-^{10}\text{B}} - B_d$$

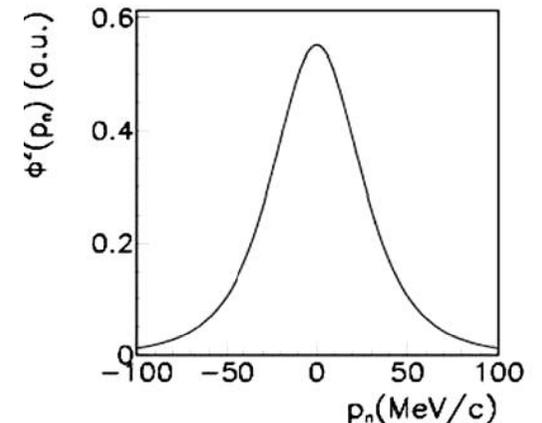
$$0,01 = E_{p-^{10}\text{B}} - 2,224$$

$$E_{\text{feixe}} = 24,4 \text{ MeV}$$

$$\Phi(\vec{p}_s) = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{ab(a+b)}{(a-b)^2}} \left[ \frac{1}{a^2 + p_s^2} - \frac{1}{b^2 + p_s^2} \right]$$

$$a = 0,2317 \text{ fm}^{-1} \quad b = 1,202 \text{ fm}^{-1}$$

Máximo para  $p_s = 0 \text{ MeV}/c$



# Arranjo Experimental

Laboratori Nazionale del Sud  
Catania - Italia

Acelerador Tandem

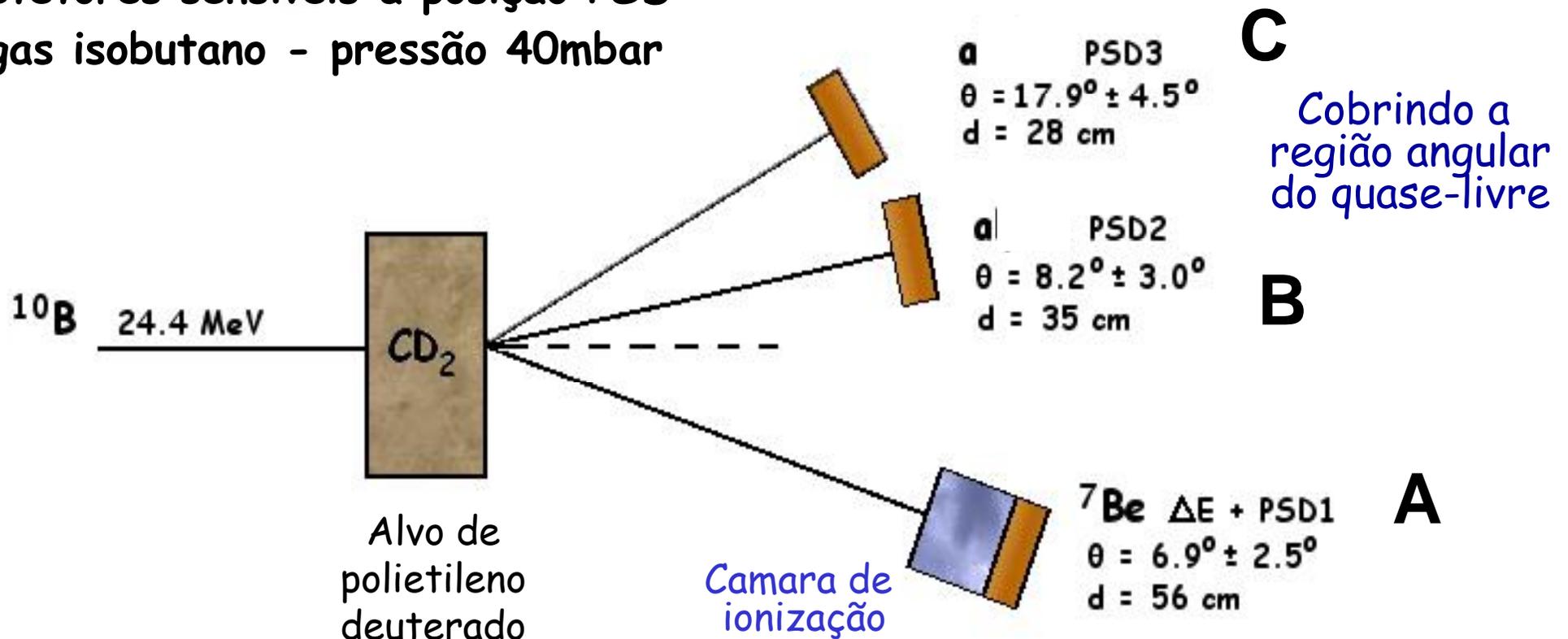
$^{10}\text{B}$  @ 24.4 MeV

Intensidade 1.5 nA

Alvo  $\text{CD}_2$  - espessura  $200 \mu\text{g}/\text{cm}^2$

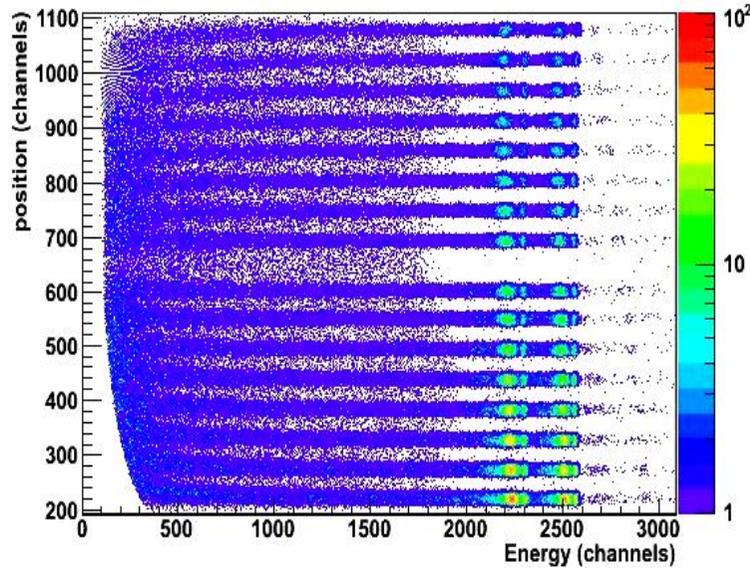
3 detetores sensíveis a posição PSD

$\Delta E$  gas isobutano - pressão 40mbar

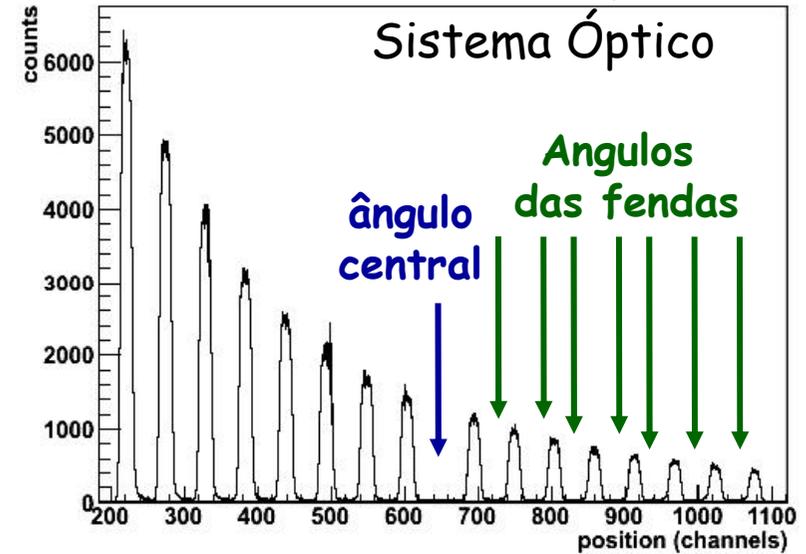


# Calibração em Posição e Energia

PSD  
Position  
Sensitive  
Detector



Grades com fendas  
Sistema Óptico

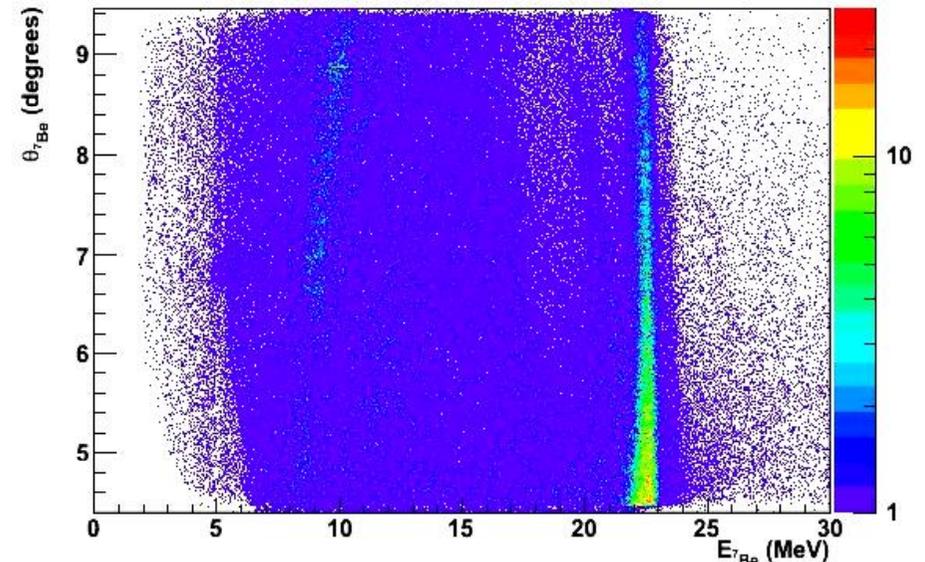


Calibração  
em  
Energia

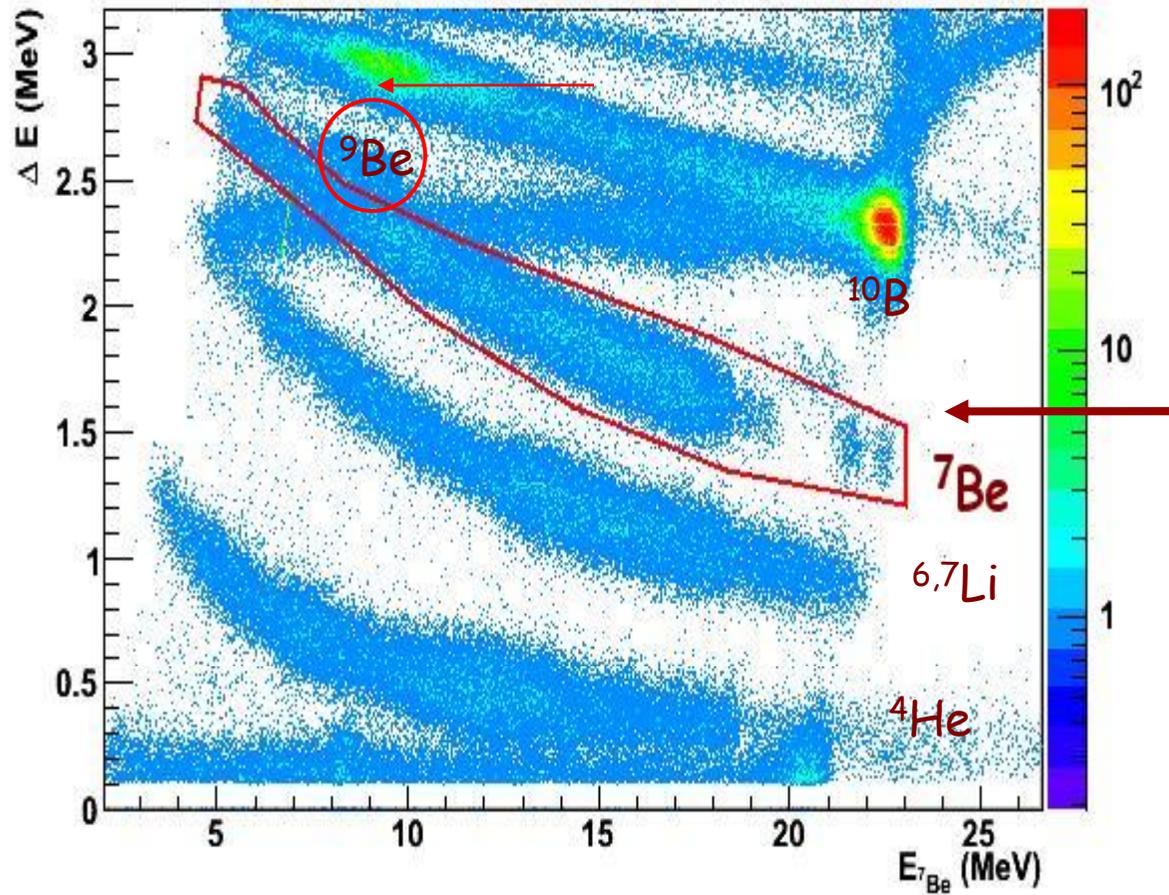


- Fonte alfa com 3 energias  
5.1566, 5.4855, 5.8048 MeV
- $^{10}\text{B}(\text{Au}, \text{Au})^{10}\text{B}$  24.4 MeV
- $^{10}\text{B}(\text{C}, \text{C})^{10}\text{B}$  24.4 MeV
- $^{10}\text{B}(\text{H}, \text{H})^{10}\text{B}$  24.4 MeV
- $^6\text{Li}(\text{Au}, \text{Au})^6\text{Li}$  9.2 MeV

PSD 1



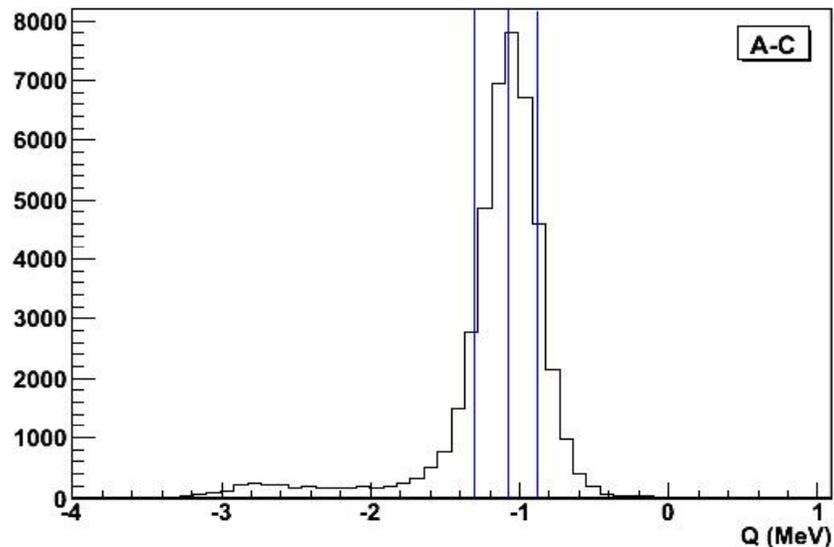
# Identificação do ${}^7\text{Be}$



Identificação do  ${}^7\text{Be}$   
usando a técnica E- $\Delta$ E

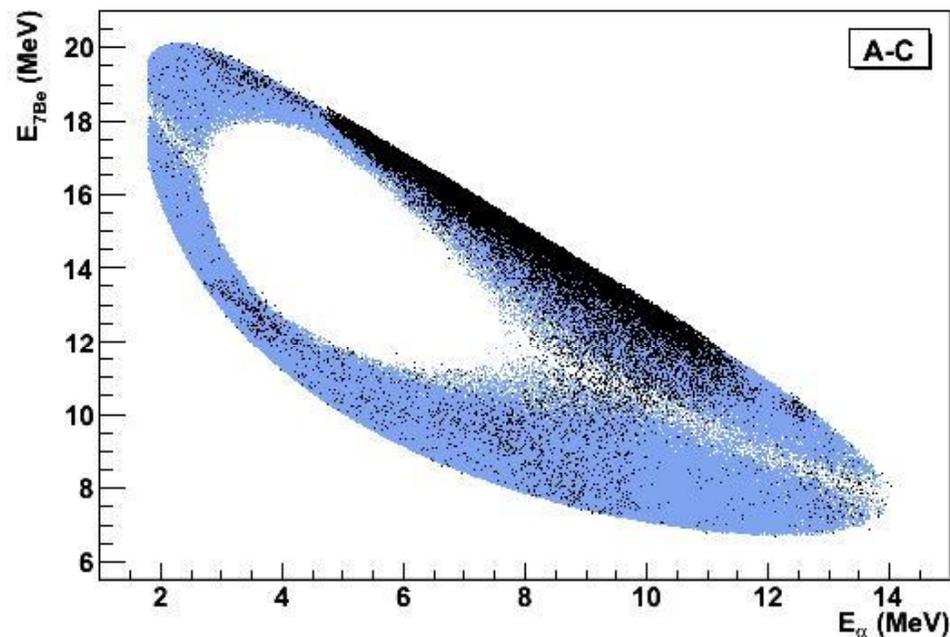
# Reconstrução dos eventos

assumindo massa = 1 para a  
terceira partícula (não identificada)



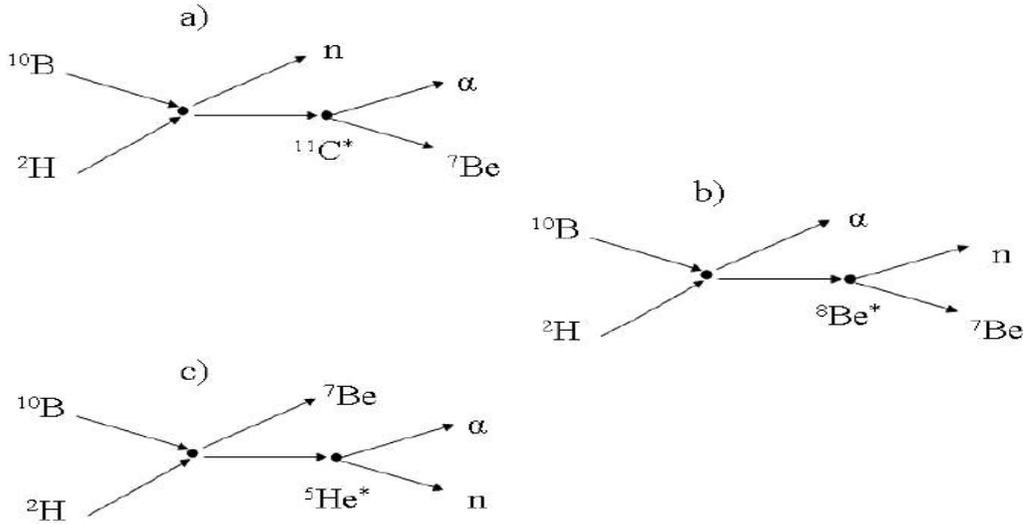
Seleção dos eventos da reação  
 ${}^2\text{H}({}^{10}\text{B}, \alpha {}^7\text{Be})\text{n}$   $Q = -1.078 \text{ MeV}$

Locus Cinemático  $E_\alpha$  vs.  $E_{7\text{Be}}$ :

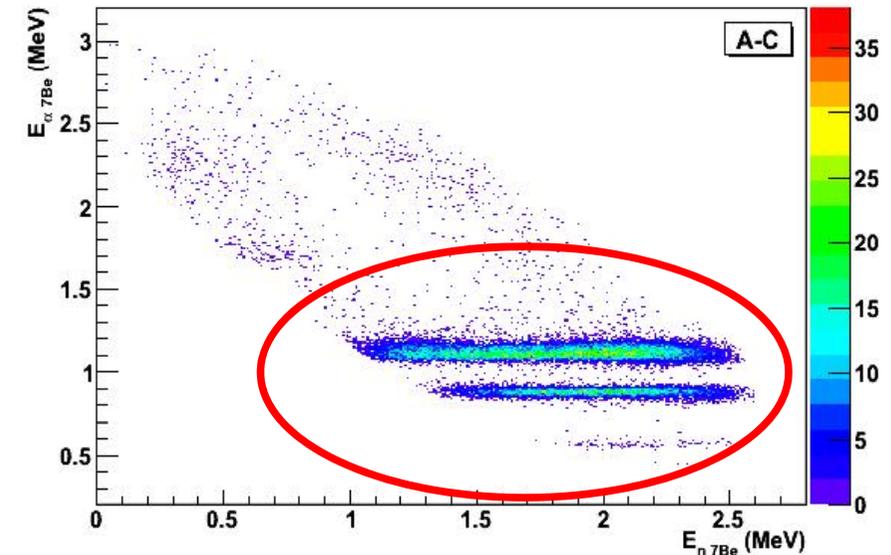
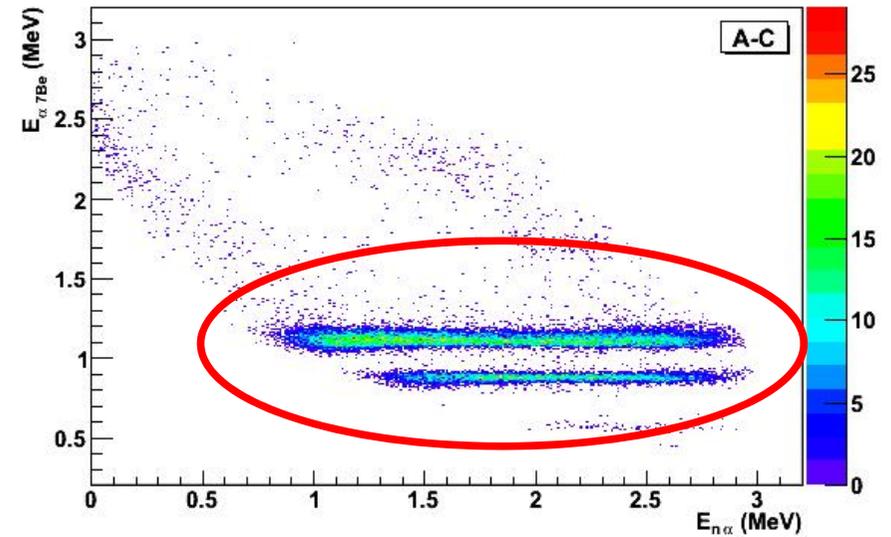


# Identificação dos mecanismos QF e DS

que populam o mesmo estado final



## Reconstrução das energias relativas



Mecanismos de decaimento sequencial  
estados excitados do  $^{11}\text{C}$ ,  $^8\text{Be}$  e  $^5\text{He}$

$$Q_{^{11}\text{C} \rightarrow ^7\text{Be}\alpha} = 7,544 \text{ MeV}$$

$$0,876 + 7,544 = 8,42 \text{ MeV}$$

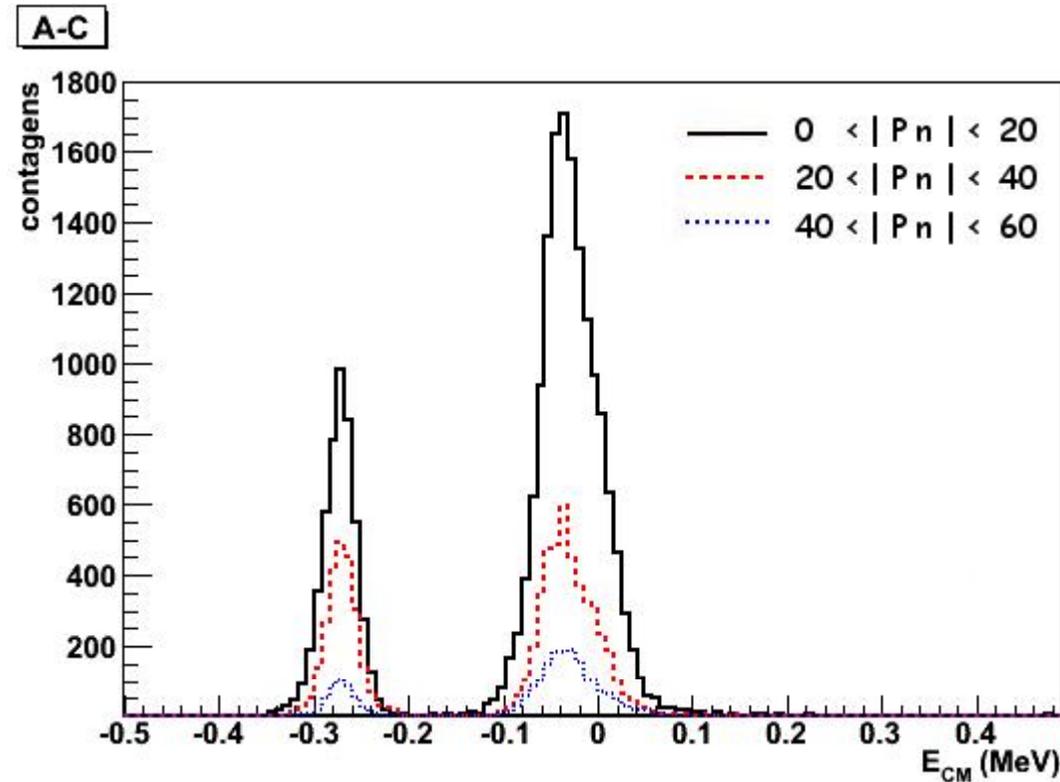
$$1,156 + 7,544 = 8,70 \text{ MeV}$$

Estados  
excitados  
do  $^{11}\text{C}$

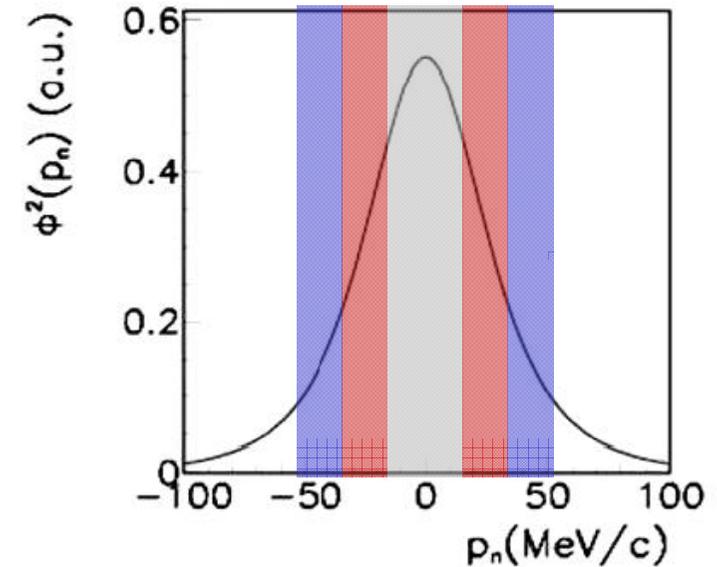
# Evidências do mecanismo QF

~~Decaimento Sequencial~~  
Mecanismo quase-livre

1

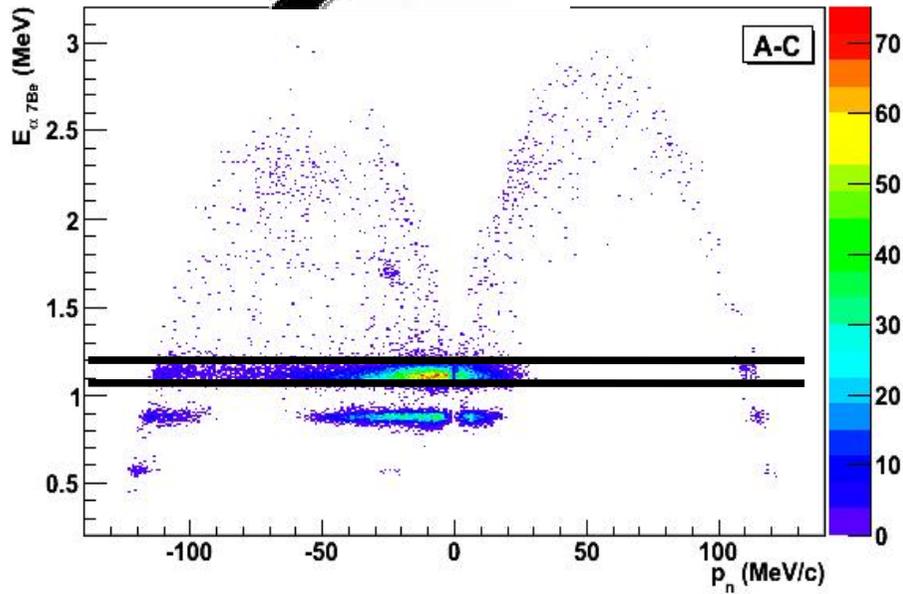


**Hipótese do QF**  
O espectador (nêutron) deve manter a mesma distribuição de momentos que tinha dentro do dêuteron



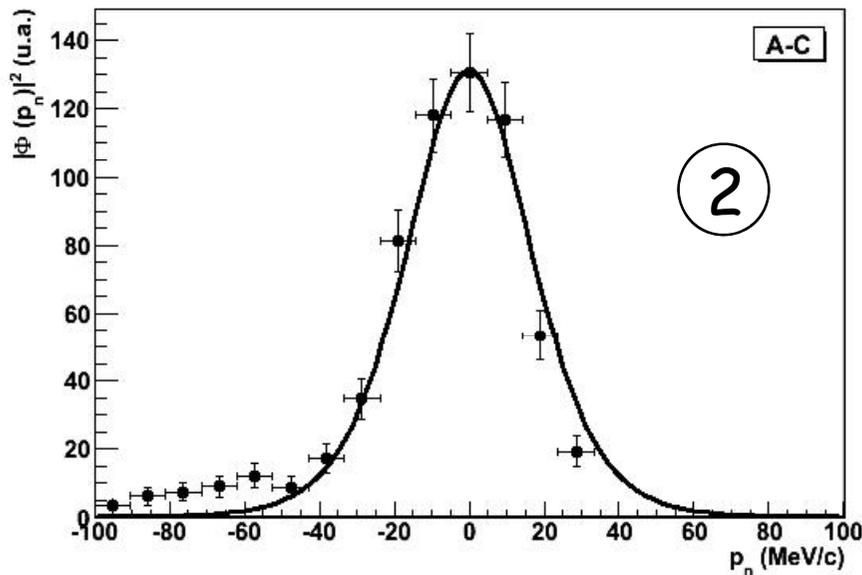
Correlação entre o momento do espectador e o número de contagens

# Evidências do mecanismo QF ~~Decaimento Sequencial~~ Mecanismo quase-livre



$$|\phi(p_s)|^2 \propto \frac{d^3 \sigma}{dE_{CM} d\Omega_{\alpha} d\Omega_{7Be}}$$

~~KF.  $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{10B-p}$~~   
 constant



Distribuição Experimental  
de momentos

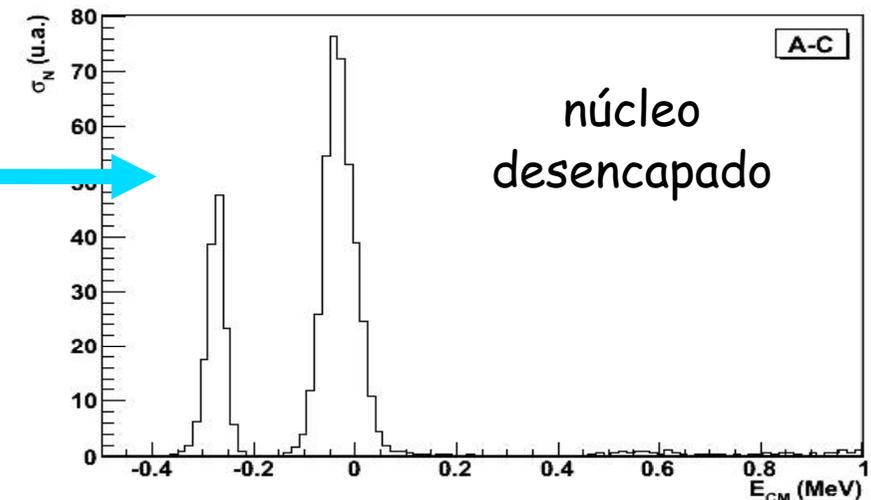
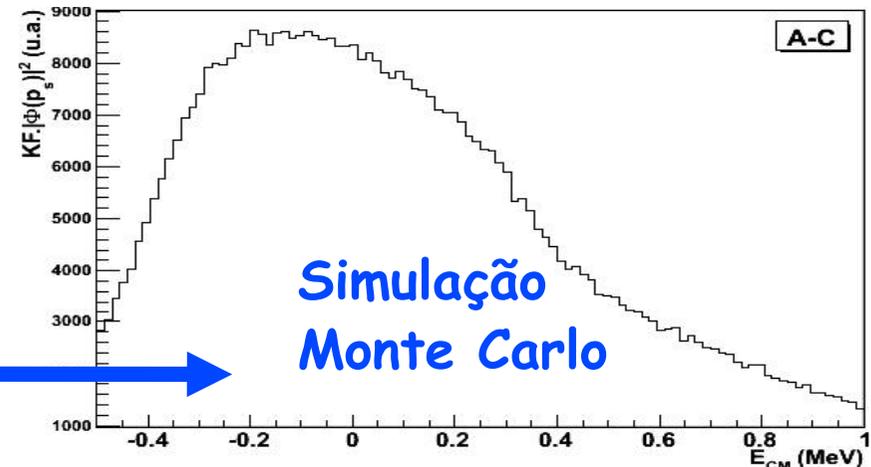
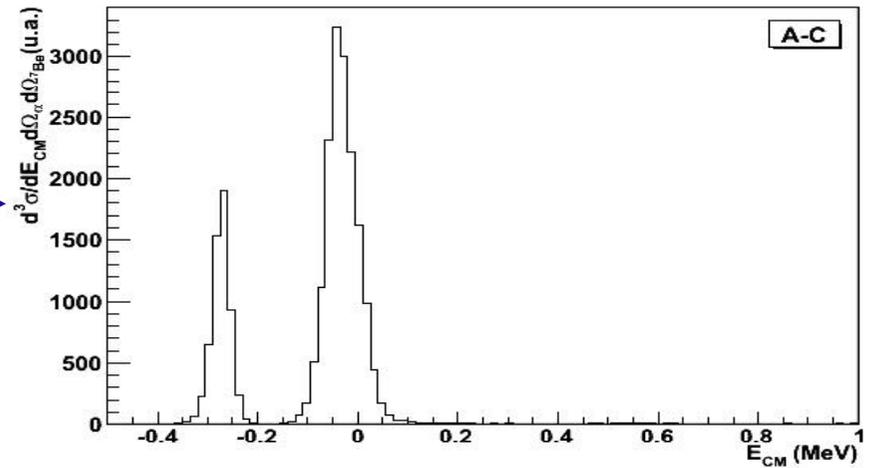
Seleção dos eventos  $|p_s| < 20$  MeV/c

# Aplicando o THM

$$E_{CM} = E_{a7Be} - Q_{2\text{corpos}} \quad 1,145 \text{ MeV}$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{10B-p}^N \propto$$

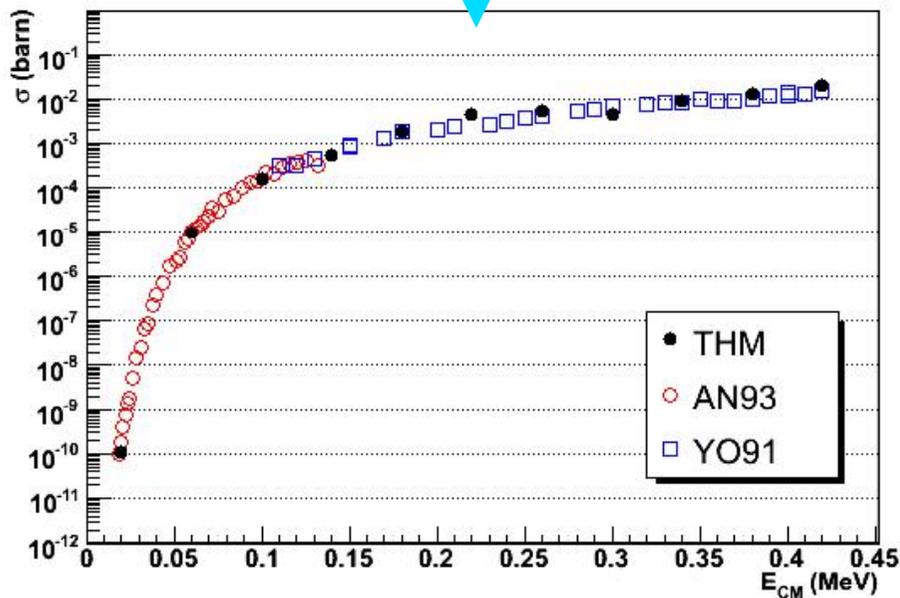
$$\frac{d^3\sigma}{dE_{CM} d\Omega_{\alpha} d\Omega_{7Be}} \propto (KF) \cdot |\phi(p_s)|^2$$



dados diretos  
normalização

Multiplicar pelo  
fator de  
penetrabilidade  
 $P_{l=0}(E)$

A-C

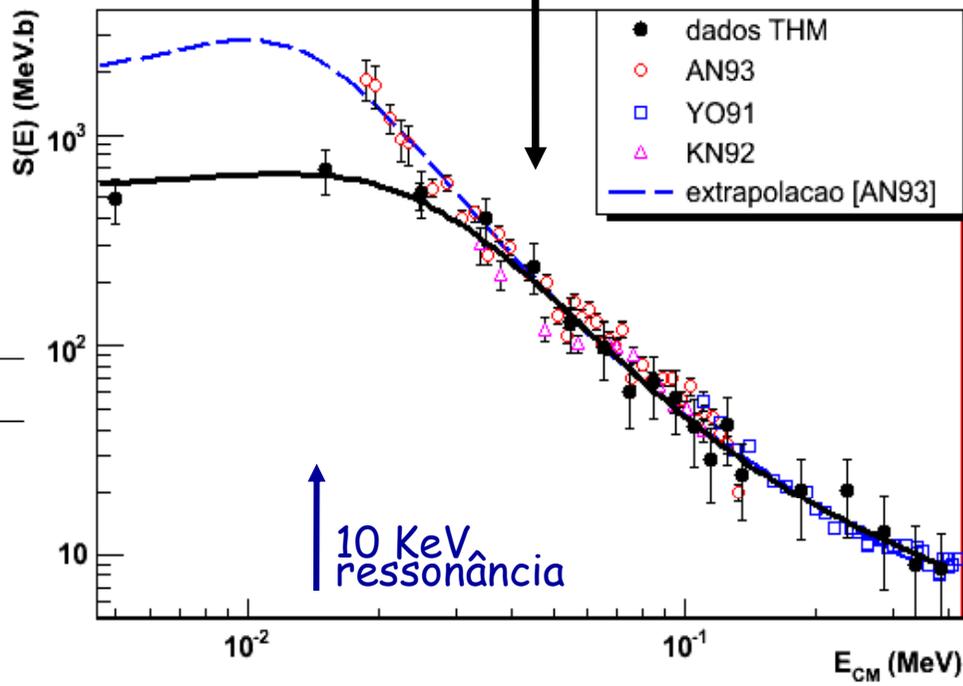


Normalização com os dados diretos no intervalo 20 - 400 KeV

$$S(E) = E \sigma(E) \exp(2\pi\eta)$$

$$S(E) = a_0 + a_1 \cdot E + a_2 \cdot \left( \frac{\Gamma^2/4}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4} \right)$$

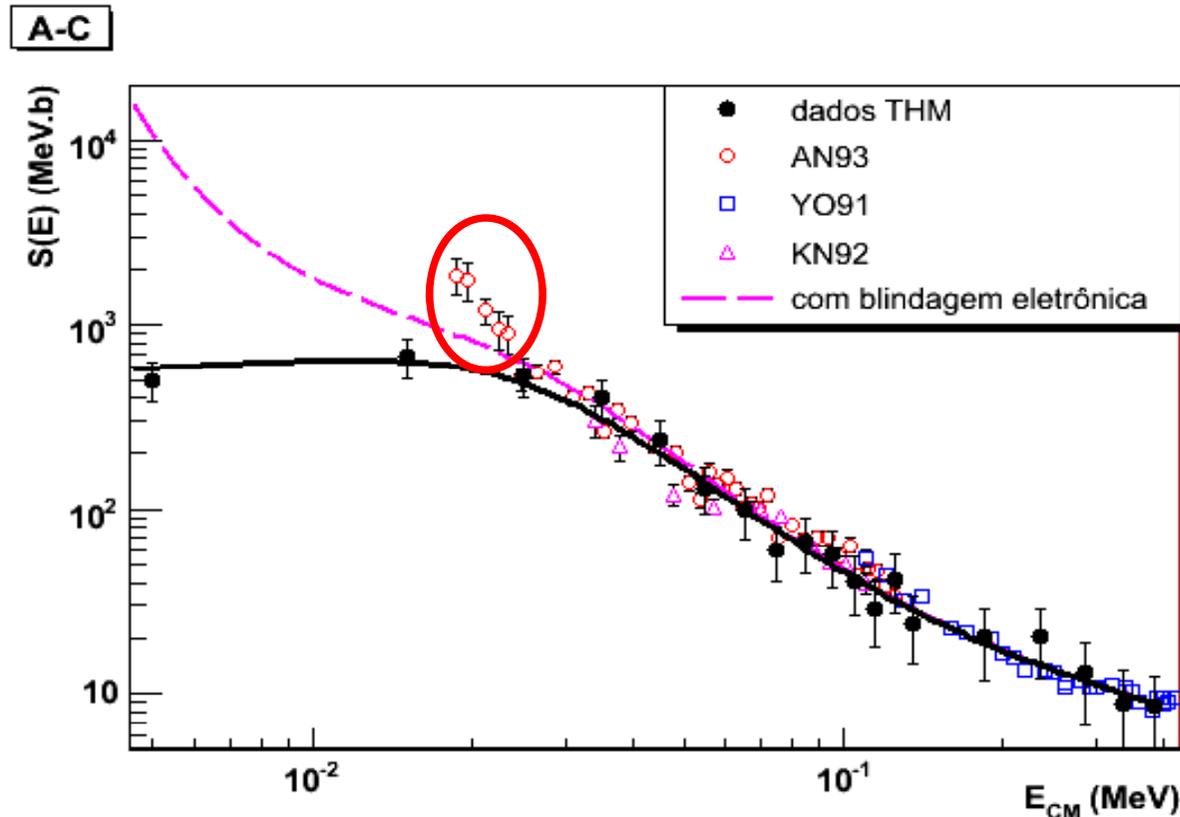
A-C



Parâmetro	Valor	Erro ( ± )
$a_0$	11 (MeV.b)	11 (MeV.b)
$a_1$	- 12 (b)	33 (b)
$a_2$	634 (MeV.b)	98 (MeV.b)
$E_0$	10 (KeV)	5 KeV
$\Gamma$	43 (KeV)	6 (KeV)

Erros: Estatístico e normalização ~ 20%

# Potencial de blindagem eletrônica $U_e$



$$S(E) = S_B(E) \cdot f(E)$$

$$f(E) \propto \exp(\pi \eta U_e / E)$$

Sistema	$U_e$ (eV)		
	Teoria <sup>a</sup>	Teoria <sup>b</sup>	experimental
H + He	108	99	$120 \pm 20$ <sup>c</sup>
H + Li	180	162	$420 \pm 120$ <sup>d</sup>
H + <sup>11</sup> B	340	304	$430 \pm 80$ <sup>e</sup>
H + <sup>10</sup> B	340	304	$436 \pm 60$

Potenciais de blindagem eletrônica teóricos e experimentais. a) [Peterson et al. (1975)] e [Angulo et al. (1993)], b) [Becker et al. (1987)], c) [Engstler et al. (1988)], d) [Engstler et al. (1992)], e) [Angulo et al. (1993)], f) presente trabalho.

# Conclusões



A determinação do fator astrofísico dessa reação é fundamental para o entendimento de processos agindo no interior das estrelas

2 novos pontos para energias abaixo de 20 KeV

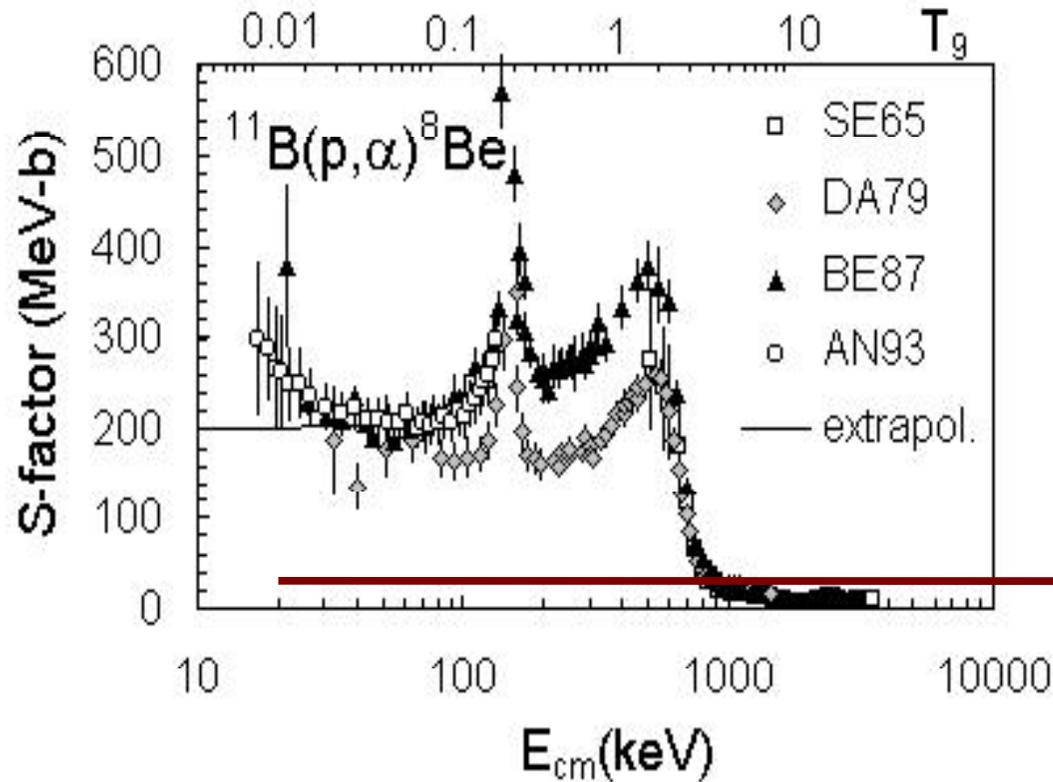
$S(0) \sim 1500 \text{ MeV}\cdot\text{b}$  [Angulo (1993)] ---->  $644 (100) \text{ MeV}\cdot\text{b}$

$U_e = 430 \text{ eV}$  (adaptado do  $^{11}\text{B}$ ) ---->  $436 (60) \text{ eV}$

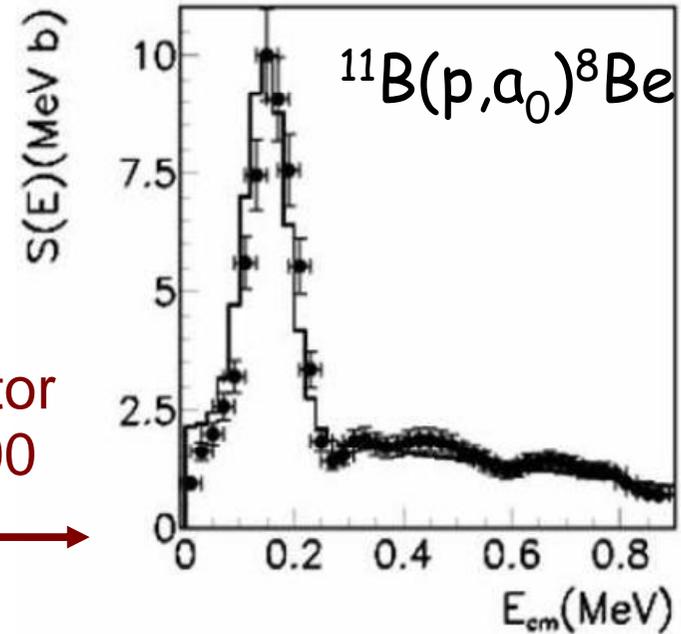
O  $S(E)$  obtido poderá ser usado em códigos de simulação de evolução estelar como o FRANECS

A diminuição da seção de choque desta reação não influencia a produção de energia nas estrelas devido a baixa abundância de  $^{10}\text{B}$ .

# A reação $^{11}\text{B}(p,\alpha)^8\text{Be}$ no ambiente Astrofísico

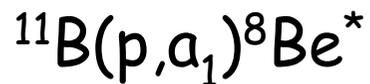


Fator  
100



[Spitaleri et al. (2004)]

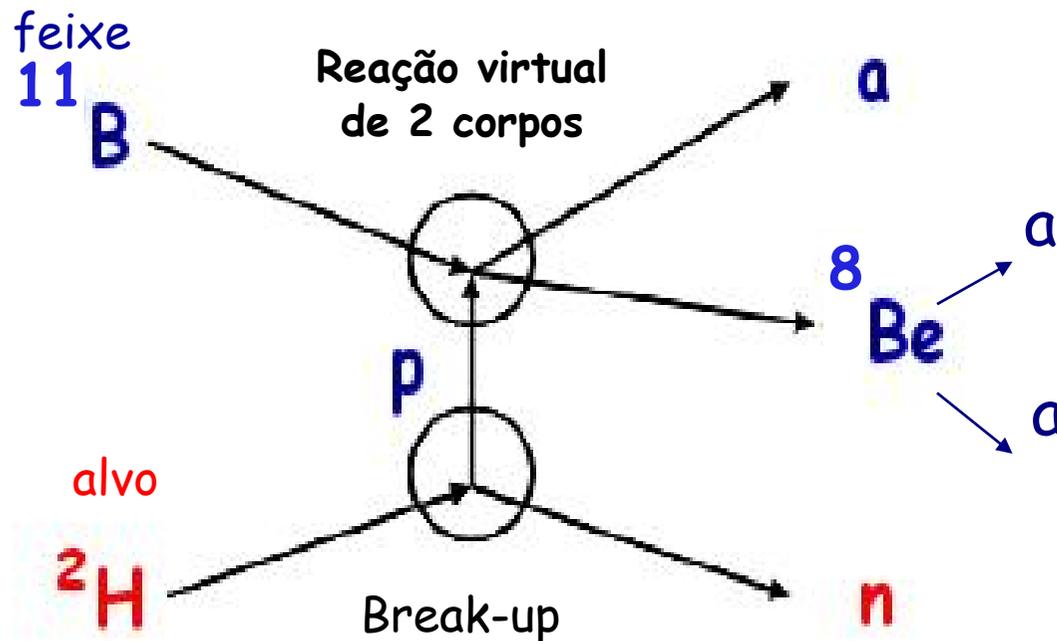
[Angulo et al. (1999)] NACRE



# Estudo da reação $^{11}\text{B}(p,\alpha)^8\text{Be}$

Através do **Método do Cavalo de Tróia**

Usando a reação de 3 corpos  $^2\text{H}(^{11}\text{B},\alpha^8\text{Be})n$



## Cavalo de Tróia

- núcleo  $^2\text{H}$
- estrutura do *cluster*  $d = p + n$
- energia de ligação 2,224 MeV compensa a energia do feixe

$$\text{Eq.f.} = 27,2(1/12) - 2.224 \\ \sim 50 \text{ KeV}$$

Energia disponível para o  $^{11}\text{B}-p$   
no sistema C.M.

# Arranjo Experimental

Laboratori Nazionale del Sud  
Catania - Italia

Acelerador Tandem

$^{11}\text{B}$  @ 27,2 MeV

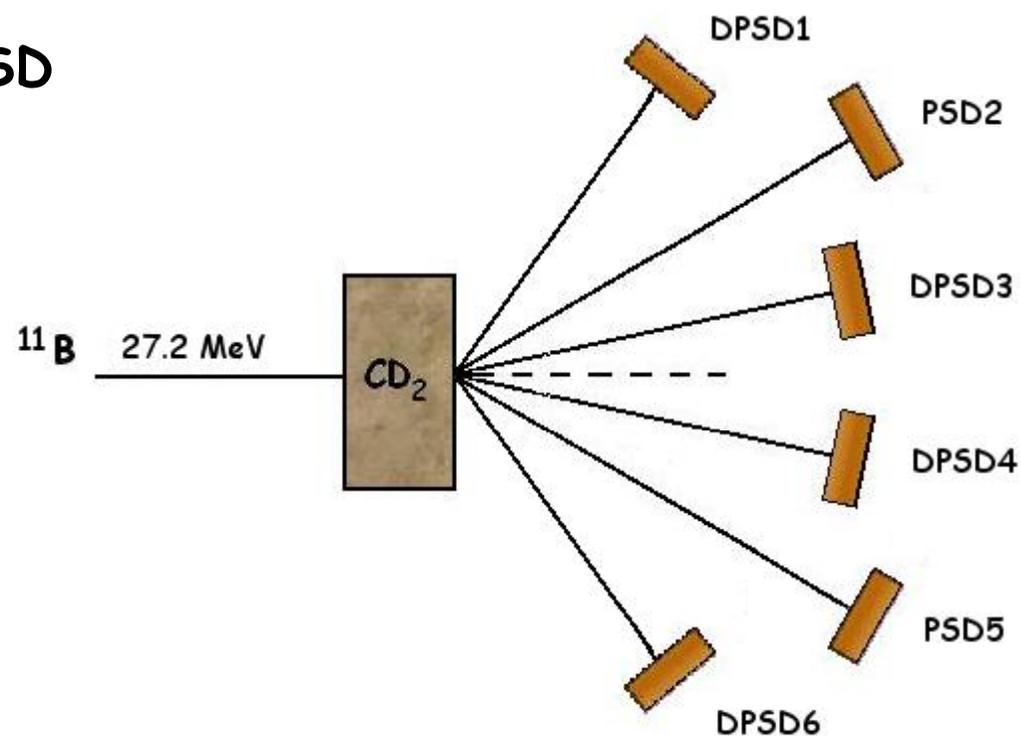
Intensidade 1.5 nA

Alvo  $\text{CD}_2$  - espessura 200  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$

10 detetores sensíveis a posição PSD

sendo: 4 DPSD

2 PSD



# Próximas Etapas

Obter o fator astrofísico da reação  $^{11}\text{B}(p, \alpha_1)^8\text{Be}$  através do THM e comparar com os dados diretos.

Obter o potencial de blindagem eletrônica para o sistema  $^{11}\text{B} - \text{H}$  utilizando o THM.

O estudo dessa reação é complementar aos estudos propostos e iniciados pelo grupo italiano do professor Spitaleri

Análise da reação  $d(d, n)^3\text{He}$  do experimento realizado no Nuclear Physics Institute of ASCR, Rez - República tcheca - Out/2007

O estudo dessa reação é complementar ao da reação  $d(d, p)^3\text{H}$  o qual está em andamento pelo grupo italiano do professor Spitaleri

$d(^3\text{He}, pn)^3\text{He}$