

IX incontro nazionale dei  
**Gruppi Italiani di Astrofisica**  
**Nucleare Teorica e Sperimentale**  
5-6 ottobre 2017  
Palazzo Poggi, Bologna

Astrofisica  
Nucleare

# Neutron source and neutron sink with THM

**Giovanni Luca Guardo**  
on behalf of the AsFiN group



# Reazioni indotte da neutroni

## Problemi Sperimentali

- Impossibili da accelerare (carica neutra)
- Impossibile realizzare un bersaglio (tempo di decadimento  $885.7 \pm 0.8$  sec)

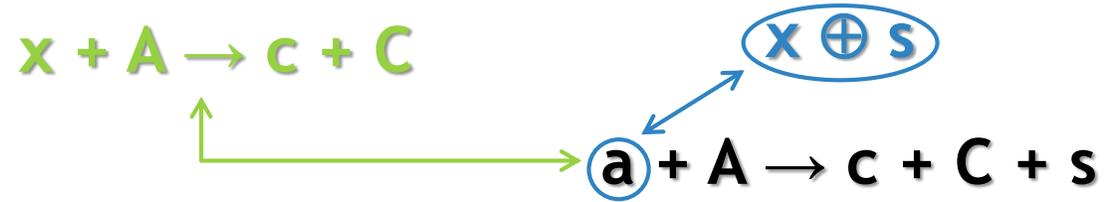
### *PRODUZIONE DI FASCI DI NEUTRONI*

- Fotodissociazione o assorbimento  $\alpha$  del  $^9\text{Be}$ 
  - *Spettri monoenergetici*
- Reattori nucleari
- Reazioni del tipo  $(\gamma, n)$  con fotoni di bremsstrahlung
- Reazioni con particelle cariche del tipo  $(p, n)$  attraverso acceleratori di bassa energia
  - *Distribuzioni delle energie  $\rightarrow$  TAGGING (ToF, angolo,...)*

### *REAZIONI INVERSE*

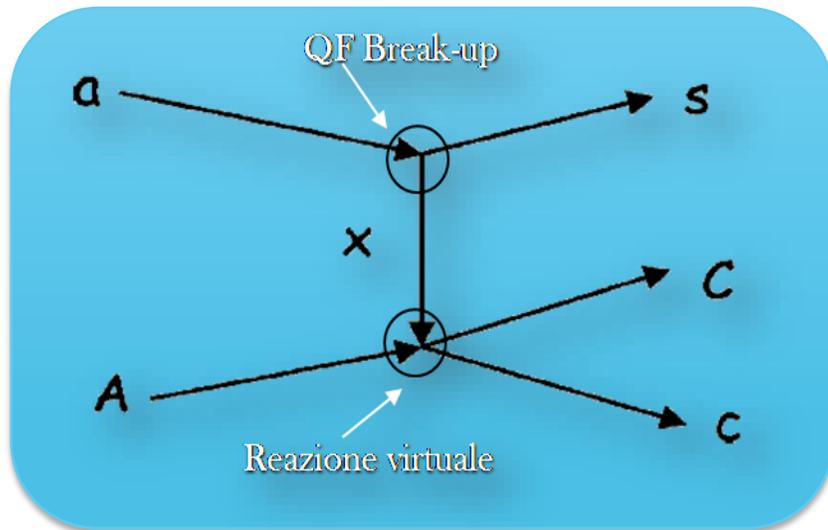
- Rivelazione dei neutroni difficile (efficienza  $< 30\%$ )

# Il metodo del Cavallo di Troia



## VANTAGGI:

- ✓ Deuterio sorgente di neutroni virtuali;
- ✓ Funzione di eccitazione fino a 500 keV con una singola energia di fascio;
- ✓ Superamento degli effetti dovuti alla barriera centrifuga;
- ✓ Semplice configurazione del setup sperimentale.



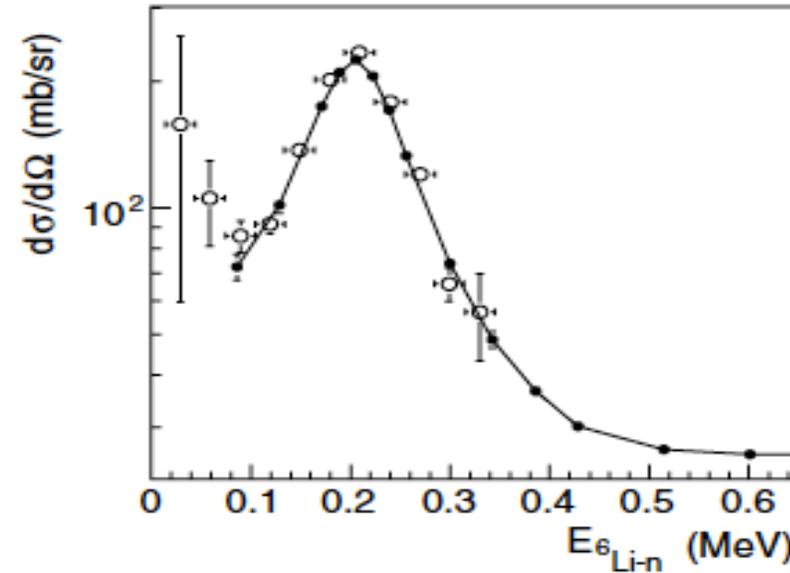
$$\frac{d^3 \sigma}{d\Omega_c d\Omega_C dE_c} \propto KF \cdot |\Phi(p_s)|^2 \cdot \frac{d\sigma_{Ax}}{d\Omega}$$

# Il primo approccio/test

## ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{He}$ tramite ${}^2\text{H}({}^6\text{Li},\alpha){}^3\text{He}p$

**Table 1.** Details of the set-up used for the two different measurement runs.

	First run	Second run
Beam energy	14 MeV	17 MeV
Target thickness	$150 \mu\text{g cm}^{-2}$	$100 \mu\text{g cm}^{-2}$
$\Delta E$ Si detector thickness	$20 \mu\text{m}$	–
$E$ Si PSD detector thickness	$1000 \mu\text{m}$	$1000 \mu\text{m}$
Detection angular ranges	$18\text{--}28^\circ$ $43\text{--}53^\circ$	$22\text{--}25^\circ$ $36\text{--}39^\circ$
Angular resolution	$\pm 0.1^\circ$	$\pm 0.05^\circ$
Relative energy ( $E_{6\text{Li}-n}$ ) range	0–1.5 MeV	0–0.3 MeV
Experimental $E_{6\text{Li}-n}$ uncertainty (resolution of the method)	$\pm 60 \text{ keV}$	$\pm 15 \text{ keV}$



*Tumino A. et al., EpJ A, 2005*  
*Gulino M. et al., JPG, 37, 2010*

# La reazione $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

## Scenario Astrofisico

### • nucleosintesi attraverso i processi-s

R. Gallino et al, Astrophysical Journal [497], 388 (1998).

M. Pignatari et al, Astrophysical Journal [710], 1557 (2010).

#### ❖ componente FORTE e PRINCIPALE:

stelle in fase TP-AGB

all'interno dell'He-intershell ( $^{13}\text{C}$ -pocket)

$^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  @  $T \sim 1 \cdot 10^8$  K ,  $\rho_n = 10^7$  cm $^{-3}$

$^{22}\text{Ne}(\alpha,n)^{25}\text{Mg}$  @  $T \geq 2.5 \cdot 10^8$  K ,  $\rho_n = 10^{10}$  cm $^{-3}$

#### ❖ componente DEBOLE:

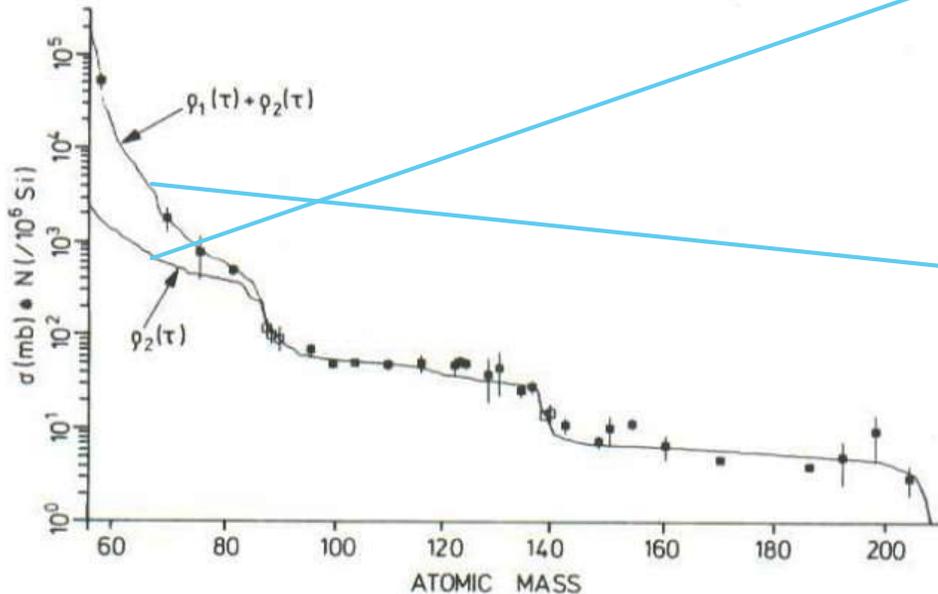
stelle di grande massa ( $M_* > 8M_\odot$ )

**nel nucleo convettivo di He**

$^{22}\text{Ne}(\alpha,n)^{25}\text{Mg}$  @  $T \sim 2.2-3.5 \cdot 10^8$  K ,  $\rho_n \leq 10^6$  cm $^{-3}$

**nella shell di C**

$^{22}\text{Ne}(\alpha,n)^{25}\text{Mg}$  @  $T \sim 1 \cdot 10^9$  K ,  $\rho_n = 10^{11}-10^{12}$  cm $^{-3}$



Ricchi in  $^{16}\text{O}$   $\rightarrow$  **VELENO NEUTRONICO!!!**  $\rightarrow$   $^{16}\text{O}(n,\gamma)^{17}\text{O}$



# La reazione $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

## Scenario Astrofisico

• nucleosintesi

• processi

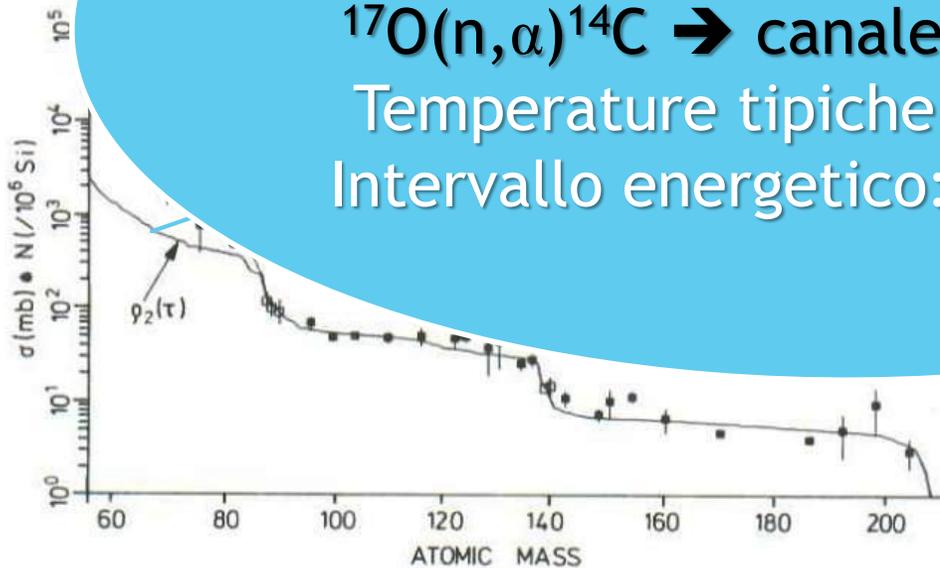
Due possibilità:

$^{17}\text{O}(\alpha,n)^{20}\text{Ne}$  → canale di sintesi

$^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$  → canale di distruzione

Temperature tipiche:  $0.22 < T < 1$  GK

Intervallo energetico:  $20 < E < 100$  keV



PRINCIPALE:

AGB

in shell ( $^{13}\text{C}$ -pocket)

$T \sim 0.2$  GK,  $\rho_n = 10^7 \text{ cm}^{-3}$

$T \sim 0.8$  GK,  $\rho_n = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

alternativa DEBOLE:

in stelle di grande massa ( $M_* > 8M_\odot$ )

in fase convettiva di He

$T \sim 5 \cdot 10^8$  K,  $\rho_n \leq 10^6 \text{ cm}^{-3}$

in nuclei di C

$T \sim 1 \cdot 10^8$  K,  $\rho_n = 10^{11} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

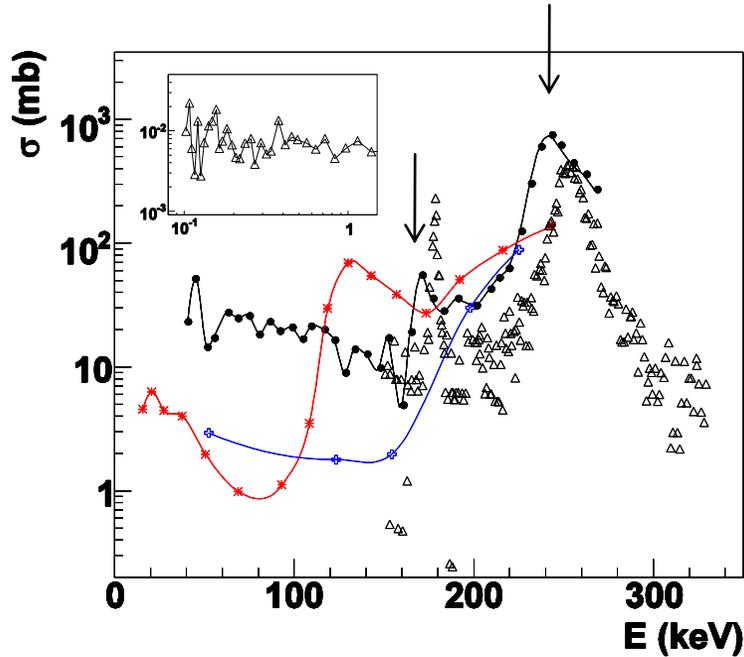
$^{22}\text{Ne}(\alpha,n)^{25}\text{Mg}$  @  $T \sim 1 \cdot 10^8$  K,  $\rho_n = 10^{11} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

Ricchi in  $^{16}\text{O}$  → **VELENO NEUTRONICO!!!** →  $^{16}\text{O}(n,\gamma)^{17}\text{O}$



# La reazione $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

## Stato dell'Arte



• R. M. Sanders, Phys. Rev., 104, 1434 (1956)  
REAZIONE INVERSA  $^{14}\text{C}(\alpha,n)^{17}\text{O}$

\* P.E.Koehler & S.M.Graff, Phys. Rev.,  
C44(6), 2788 (1991)

○ H. Schatz et al., Astroph. J., 413, 750  
(1993)

△ J. Wagemans et al., Phys. Rev., C65(3),  
34614 (2002)

Contributo di livello sottosoglia ←

Soppresso dalla barriera centrifuga ←

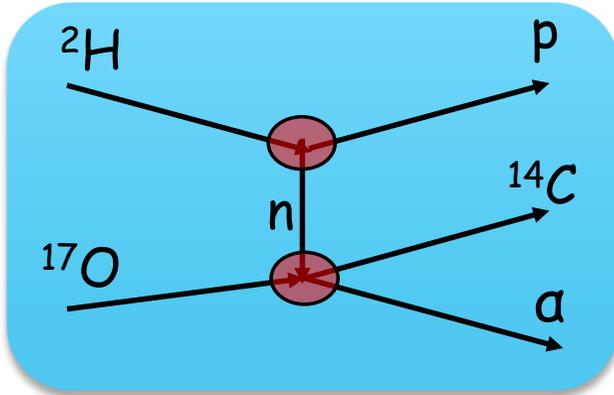
Livelli noti in letteratura ←

$E_{c.m.}$ (keV)	$^{18}\text{O}^*$ (MeV)	$J^\pi$
-7	8.039	$1^-$
75	8.125	$5^-$
166	8.213	$2^+$
236	8.282	$3^-$

F. Ajzenberg-Selove, Nucl. Phys., A475, 1 (1987)

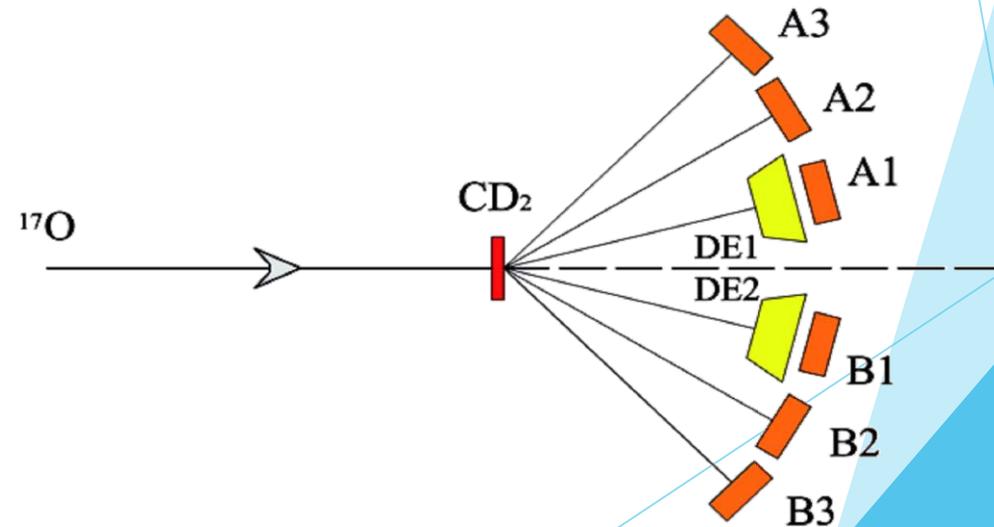
# La reazione $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

## Setup Sperimentale



- La reazione  $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$  è stata studiata attraverso la  $^2\text{H}(^{17}\text{O},\alpha)^{14}\text{C}p$ ,  $V_{\text{coul}}=2.3 \text{ MeV}$ ;
- Il deuterio è il nucleo TH. Struttura  $n\oplus p$ ;  $B=2.2 \text{ MeV}$ ,  $|p_s|=0 \text{ MeV}/c$ .

- ✓ Esperimento effettuato all'ISNAP della University of Notre Dame (USA) e ai LNS;
- ✓  $E_{\text{fascio}}(^{17}\text{O})= 43.5 \text{ MeV}$ ;
- ✓ Spessore bersaglio  $\text{CD}_2 \sim 150 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ;
- ✓ IC contenenti  $\sim 50 \text{ mbar}$  isobutano;
- ✓ Disposizione simmetrica dei rivelatori per raddoppiare la statistica.



# La reazione $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

## Setup

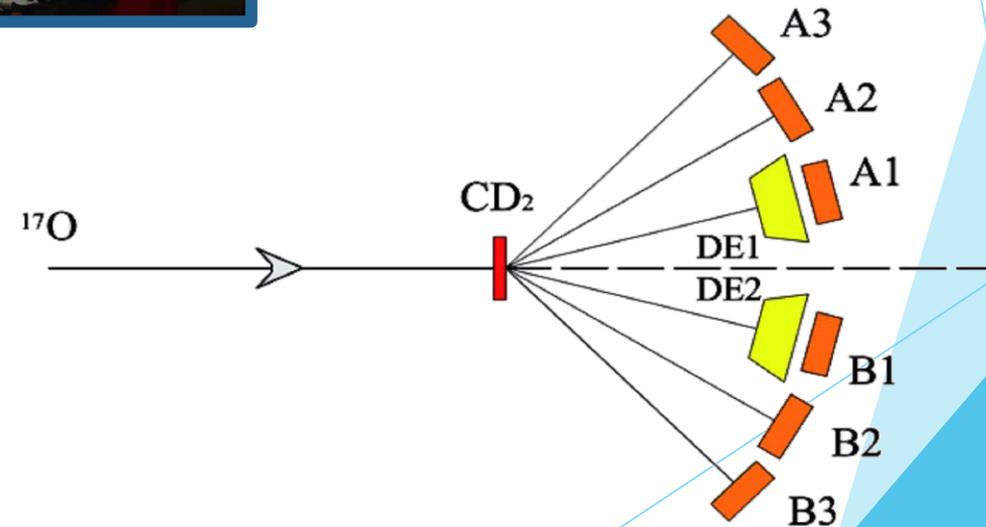


$^2\text{H}$

$^{17}\text{O}$

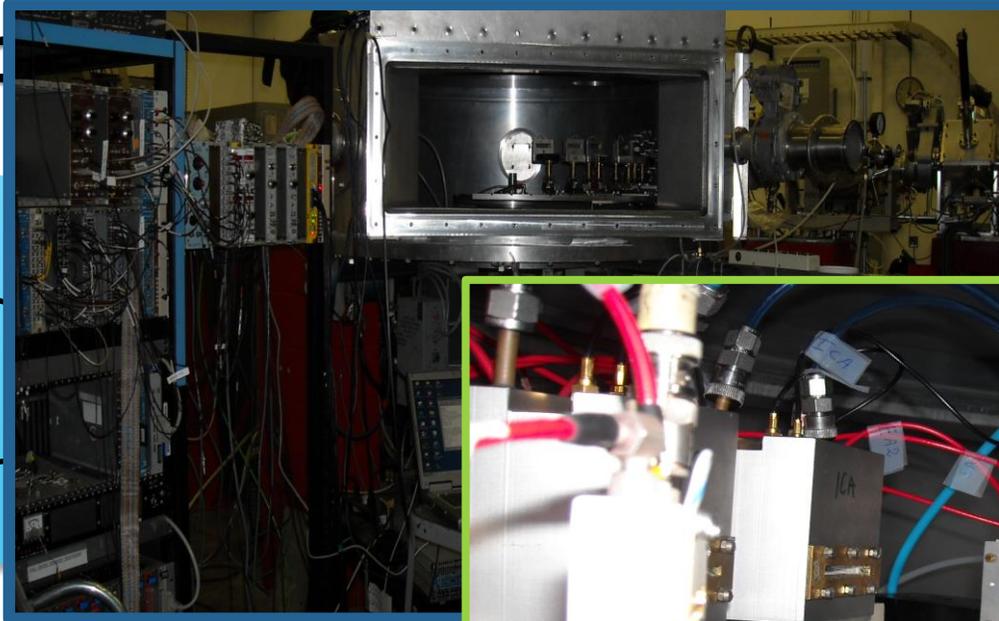
$^{14}\text{C}$  è stata studiata  
( $^{14}\text{C}$ )p ,  $V_{\text{coul}}=2.3$  MeV;  
leo TH. Struttura n $\oplus$ p;  
eV/c .

- ✓ Esperimento effettuato all'ISNAP della University of Notre Dame (USA) e ai LNS;
- ✓  $E_{\text{fascio}}(^{17}\text{O})= 43.5$  MeV;
- ✓ Spessore bersaglio  $\text{CD}_2 \sim 150$   $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ;
- ✓ IC contenenti  $\sim 50$  mbar isobutano;
- ✓ Disposizione simmetrica dei rivelatori per raddoppiare la statistica.



# La reazione $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

## Setup



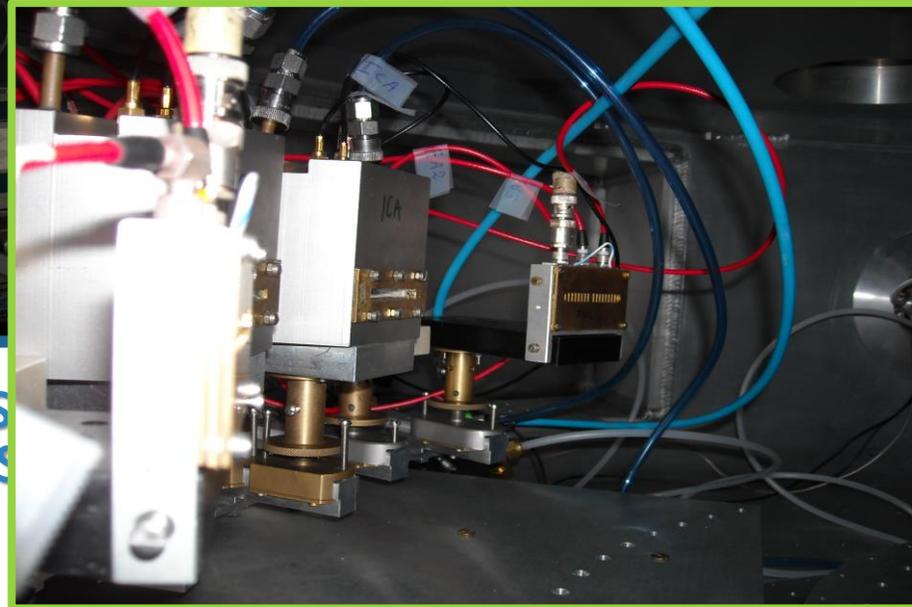
$^2\text{H}$

$^{17}\text{O}$

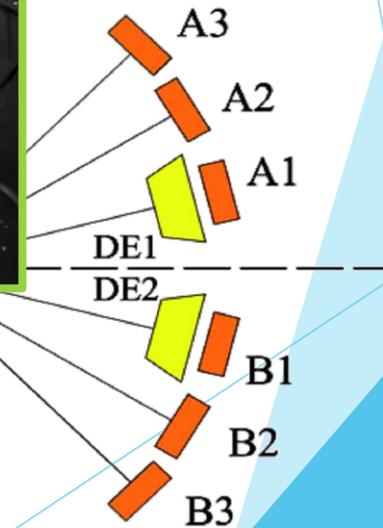
$^{14}\text{C}$  è stata studiata

3 MeV;

ra  $n\oplus$ ;

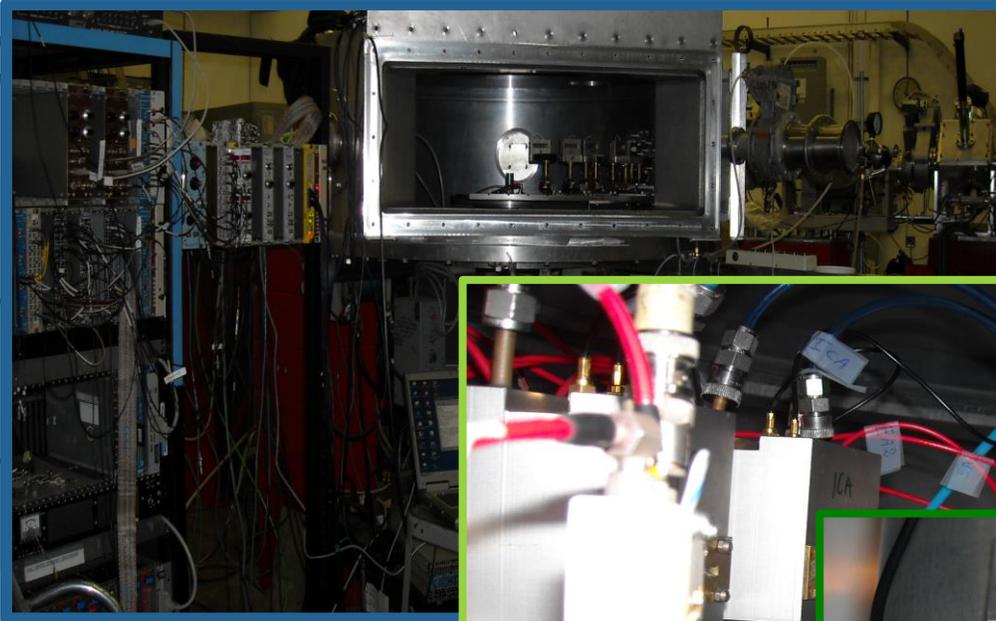


- ✓ Esperimento effettuato all'ISOLDE, University of Notre Dame (USA) e LNS;
- ✓  $E_{\text{fascio}}(^{17}\text{O}) = 43.5 \text{ MeV}$ ;
- ✓ Spessore bersaglio  $\text{CD}_2 \sim 150 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ;
- ✓ IC contenenti  $\sim 50 \text{ mbar}$  isobutano;
- ✓ Disposizione simmetrica dei rivelatori per raddoppiare la statistica.

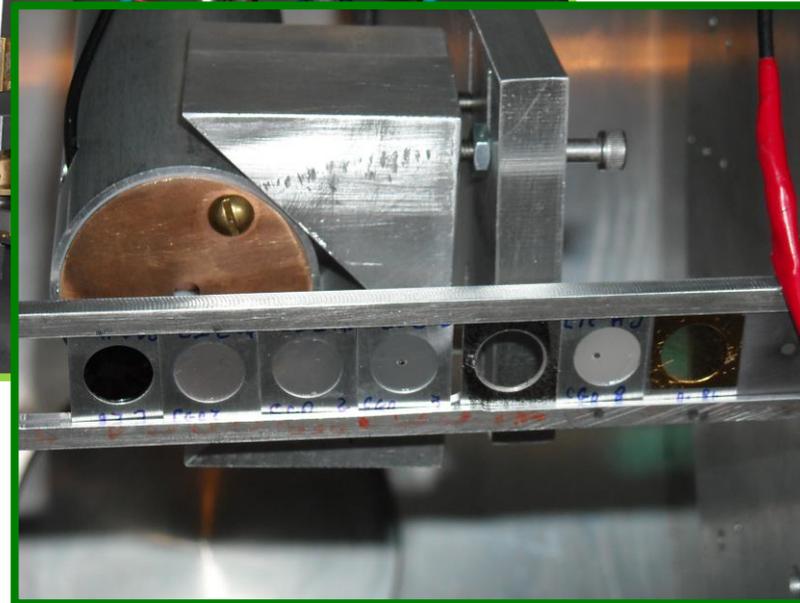
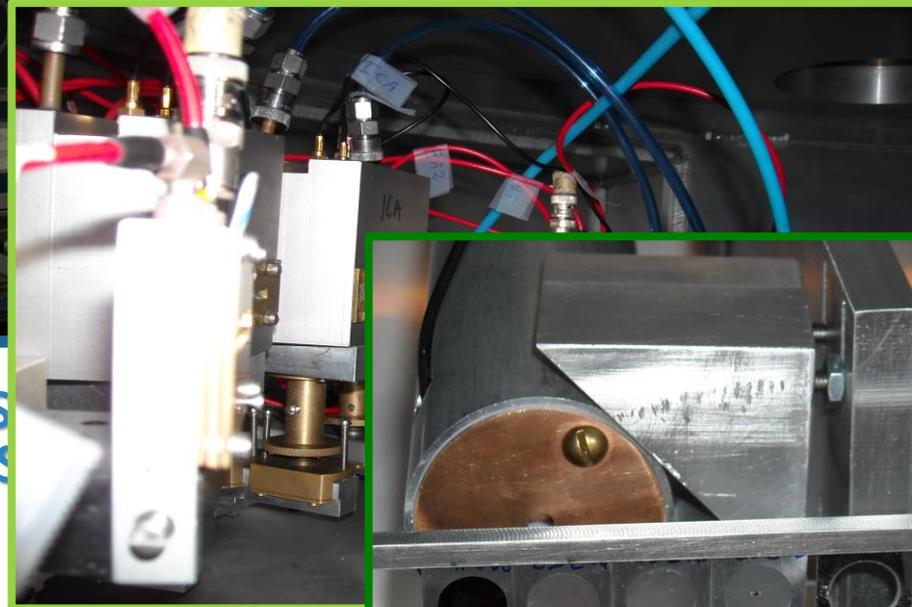


# La reazione $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

## Setup



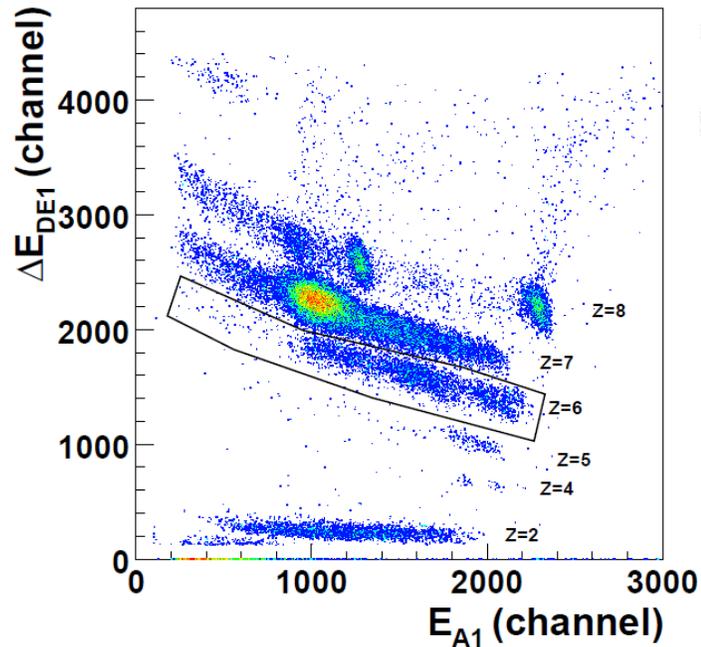
$^{14}\text{C}$  è stata studiata  
a  $43.5\text{ MeV}$ ;  
per la reazione  $n\oplus$ ;



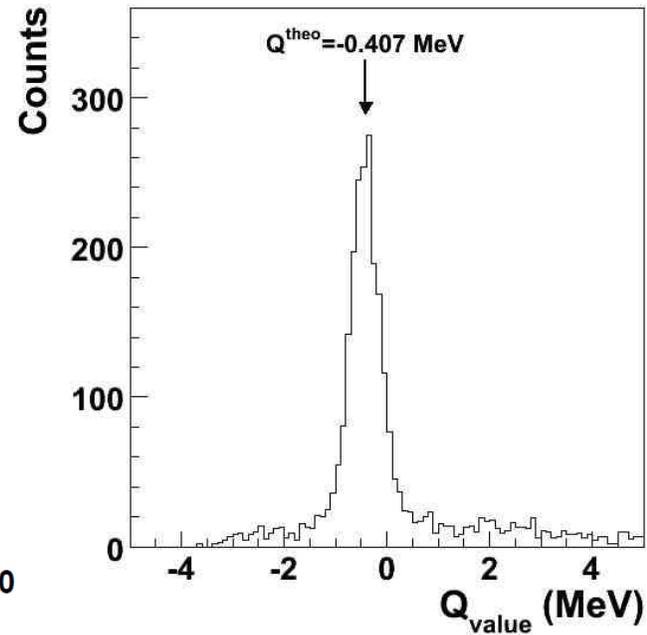
- ✓ Esperimento effettuato all'ISOLDE, University of Notre Dame (USA) e LNS;
- ✓  $E_{\text{fascio}}(^{17}\text{O}) = 43.5\text{ MeV}$ ;
- ✓ Spessore bersaglio  $\text{CD}_2 \sim 150\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ;
- ✓ IC contenenti  $\sim 50\text{ mbar}$  isobutano;
- ✓ Disposizione simmetrica dei rivelatori per raddoppiare la statistica.

# La reazione $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

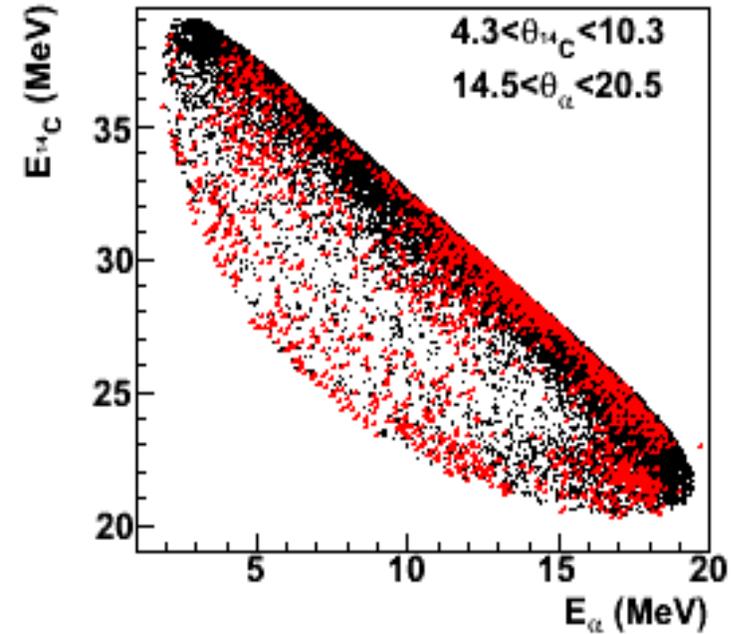
## Selezione del Canale di Reazione



» *Selezione del carbonio nello stato finale attraverso la tecnica  $\Delta E-E$*



» *Picco stretto e isolato nello spettro di  $Q_{value}$  ( $-0.4 \pm 0.8$  MeV) in accordo con quello teorico*



» *Dati sperimentali (in rosso) in accordo con il risultato di una simulazione (punti neri)*

# La reazione $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

## Selezione del Meccanismo Quasi-Libero

Per avere informazioni sulla natura dei livelli è stata studiata la correlazione tra la yield di coincidenza e l'impulso del protone non rivelato in accordo con la PWIA:

$$\frac{d^3\sigma}{dE_c d\Omega_c d\Omega_C} \propto |\Phi(p_s)|^2 \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega}$$

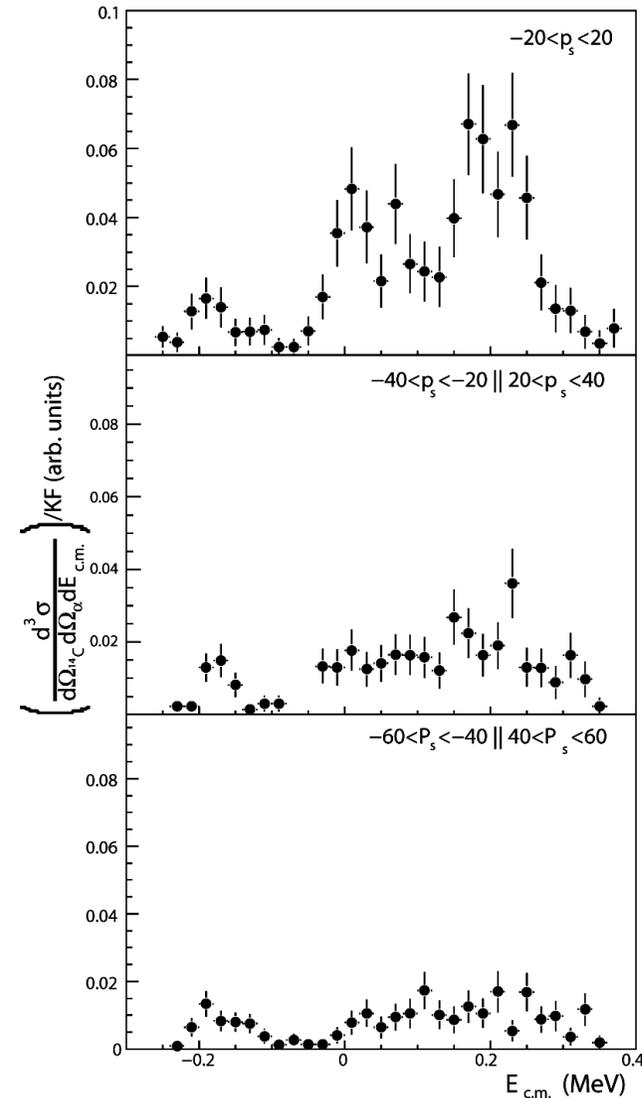
Riportando la sezione d'urto a tre corpi in funzione della  $E_{c.m.}$  con  $Q_{2corpi} = 1.817 \text{ MeV}$

$$E_{c.m.} = E_{^{14}\text{C}-\alpha} - Q_{2corpi}$$

$$|p_s| < 20 \text{ MeV}/c$$

$$20 \text{ MeV}/c < |p_s| < 40 \text{ MeV}/c$$

$$40 \text{ MeV}/c < |p_s| < 60 \text{ MeV}/c$$



# La reazione $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

## Selezione del Meccanismo Quasi-Libero

Per avere informazioni sulla natura dei livelli è stata studiata la correlazione tra la yield di coincidenza e l'impulso del protone non rivelato in accordo con la PWIA:

$$\frac{d^3\sigma}{dE_c d\Omega_c d\Omega_C} \propto |\Phi(p_s)|^2$$

$$|p_s| < 20 \text{ MeV}/c$$

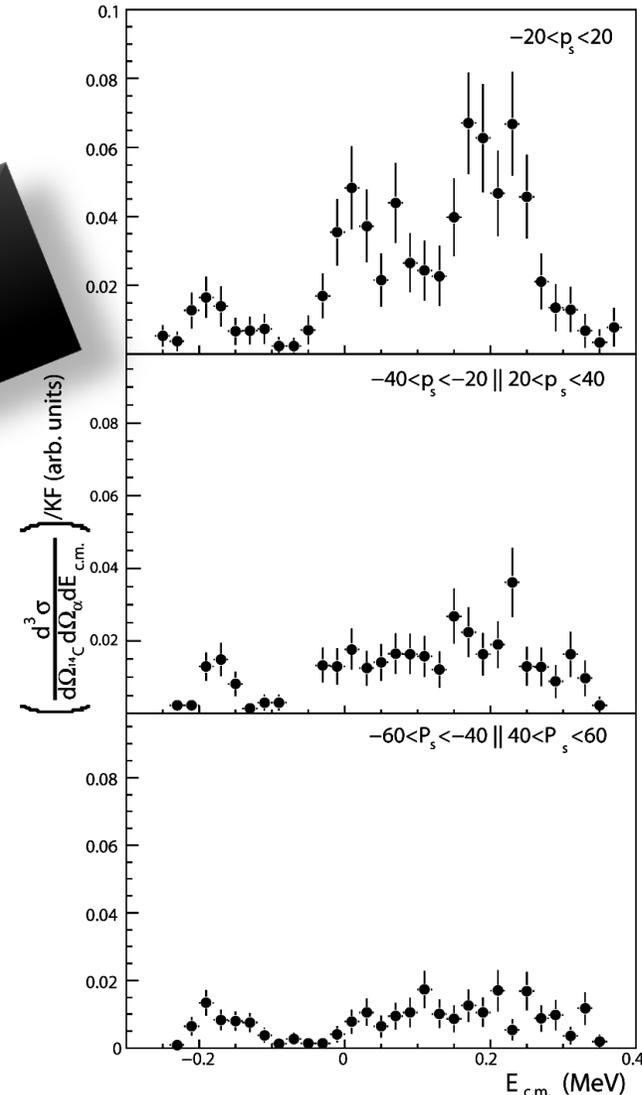
Condizione necessaria per la presenza del meccanismo QF

$$20 \text{ MeV}/c < |p_s| < 40 \text{ MeV}/c$$

Riportando la sezione d'urto a tre corpi in funzione della  $E_{c.m.}$  con  $Q_{2corpi} = 1.817 \text{ MeV}$

$$E_{c.m.} = E_{^{14}\text{C}-\alpha} - Q_{2corpi}$$

$$40 \text{ MeV}/c < |p_s| < 60 \text{ MeV}/c$$

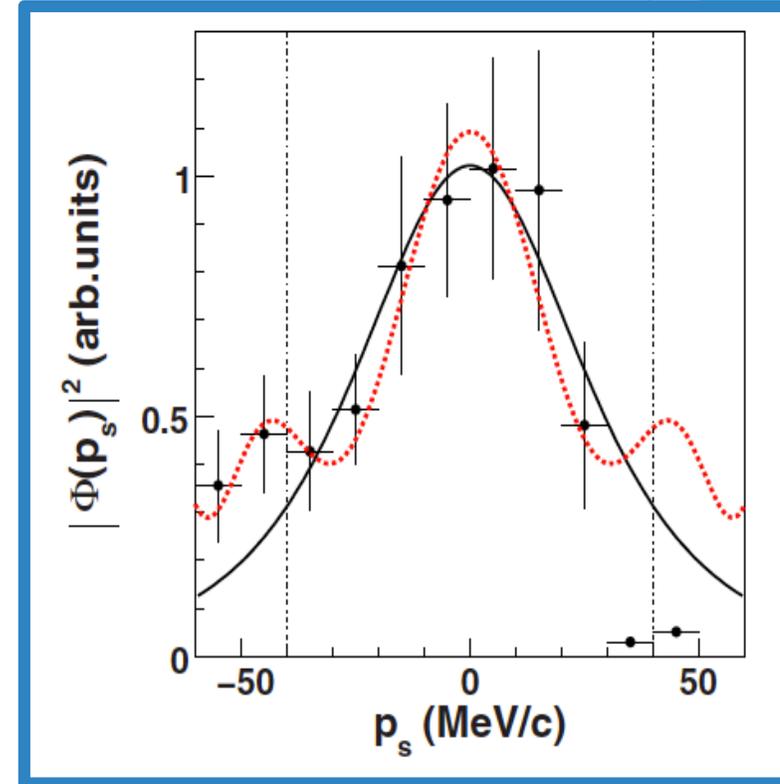
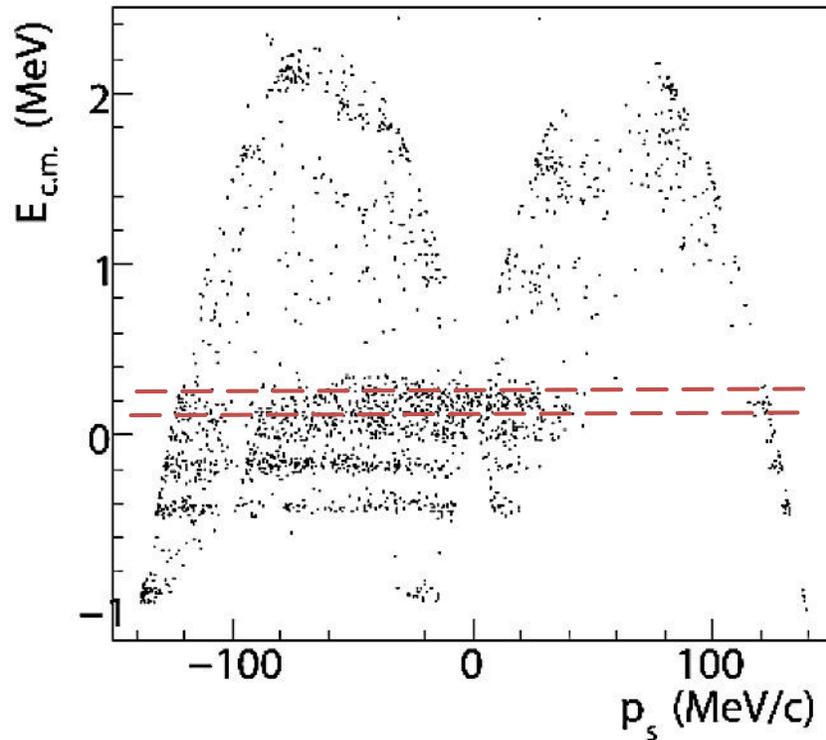


# La reazione $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

## Selezione del Meccanismo Quasi-Libero

Dalle ipotesi della PWIA:

$$|\Phi(p_s)|^2 \propto \frac{d^3\sigma}{dE_c d\Omega_c d\Omega_c} / KF$$



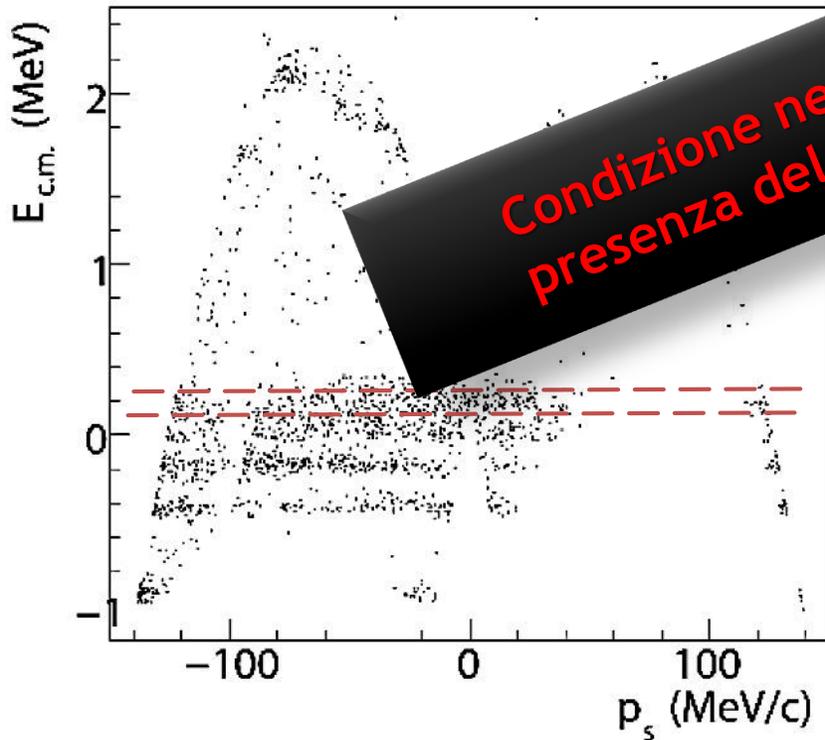
- Theoretical Hulthén Function
- - - DWBA calculation (FRESCO code)

# La reazione $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

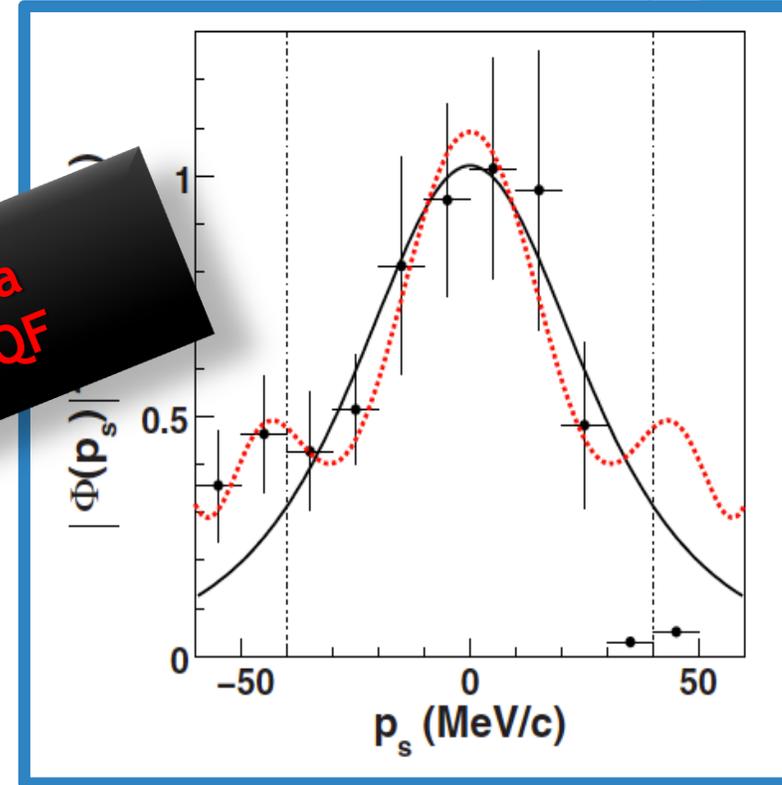
## Selezione del Meccanismo Quasi-Libero

Dalle ipotesi della PWIA:

$$|\Phi(p_s)|^2 \propto \frac{d^3\sigma}{dE_c d\Omega_c d\Omega_c} / KF$$



Condizione necessaria per la presenza del meccanismo QF



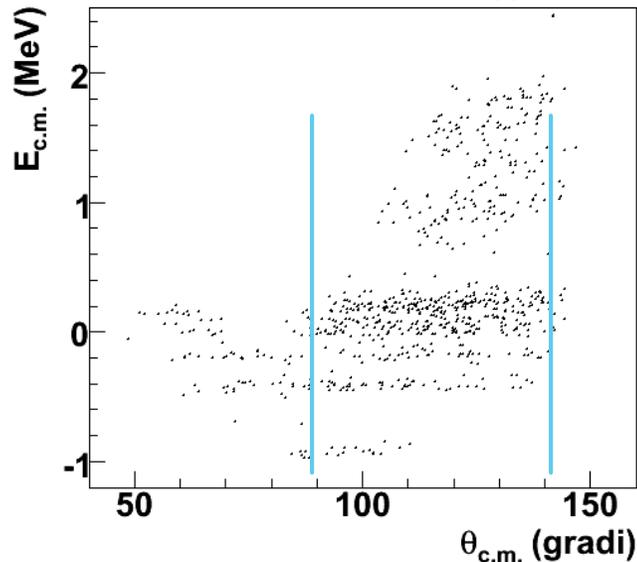
- Theoretical Hulthen Function
- - - DWBA calculation (FRESCO code)

# La reazione $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

## Distribuzioni Angolari

$$\theta_{c.m.} = \arccos \frac{(\vec{v}_A - \vec{v}_x) \cdot (\vec{v}_C - \vec{v}_c)}{|\vec{v}_A - \vec{v}_x| |\vec{v}_C - \vec{v}_c|}$$

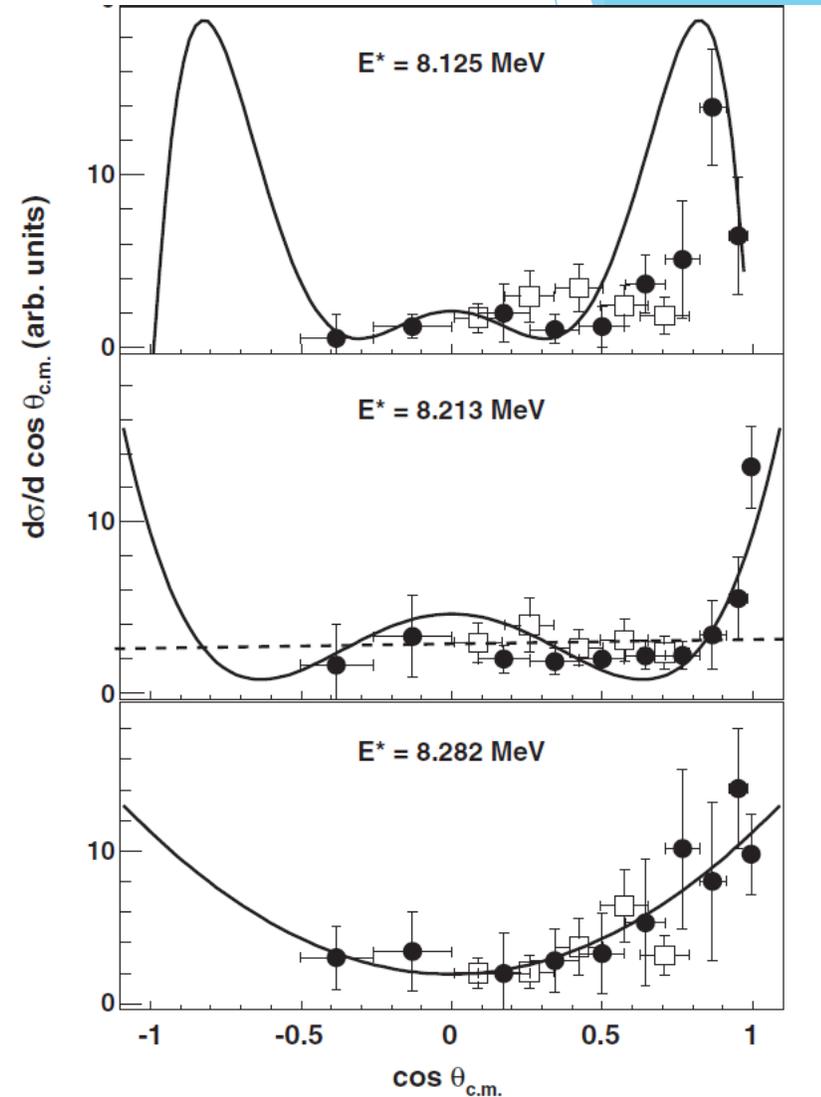
M. Jain et al., Nucl. Phys.,  
[A153], 49 (1970).



Momento angolare  
 $\ell=3$ : soppresso nelle  
misure dirette a causa  
della barriera  
centrifuga

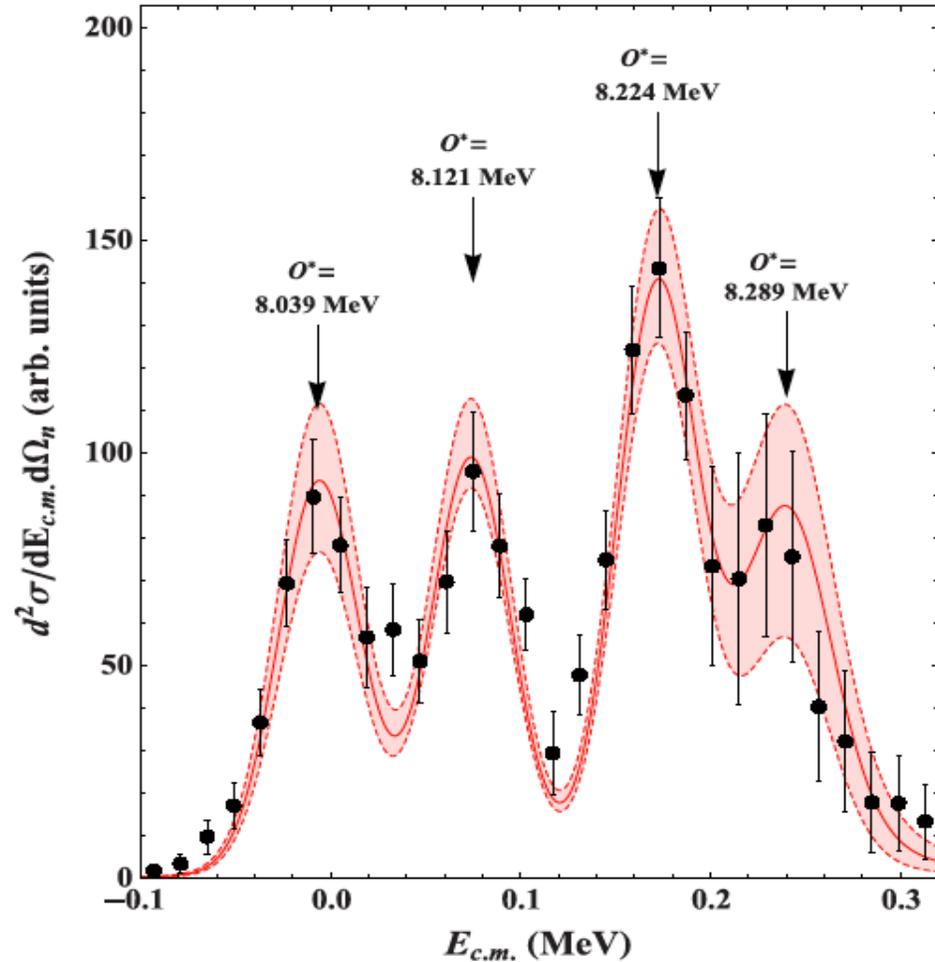
Momento angolare  
 $\ell=2$ : nessuna  
distribuzione presente  
in letteratura

Momento angolare  
 $\ell=1$ : consistente con  
le misure presenti in  
letteratura



# La reazione $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

## R-matrix Fit



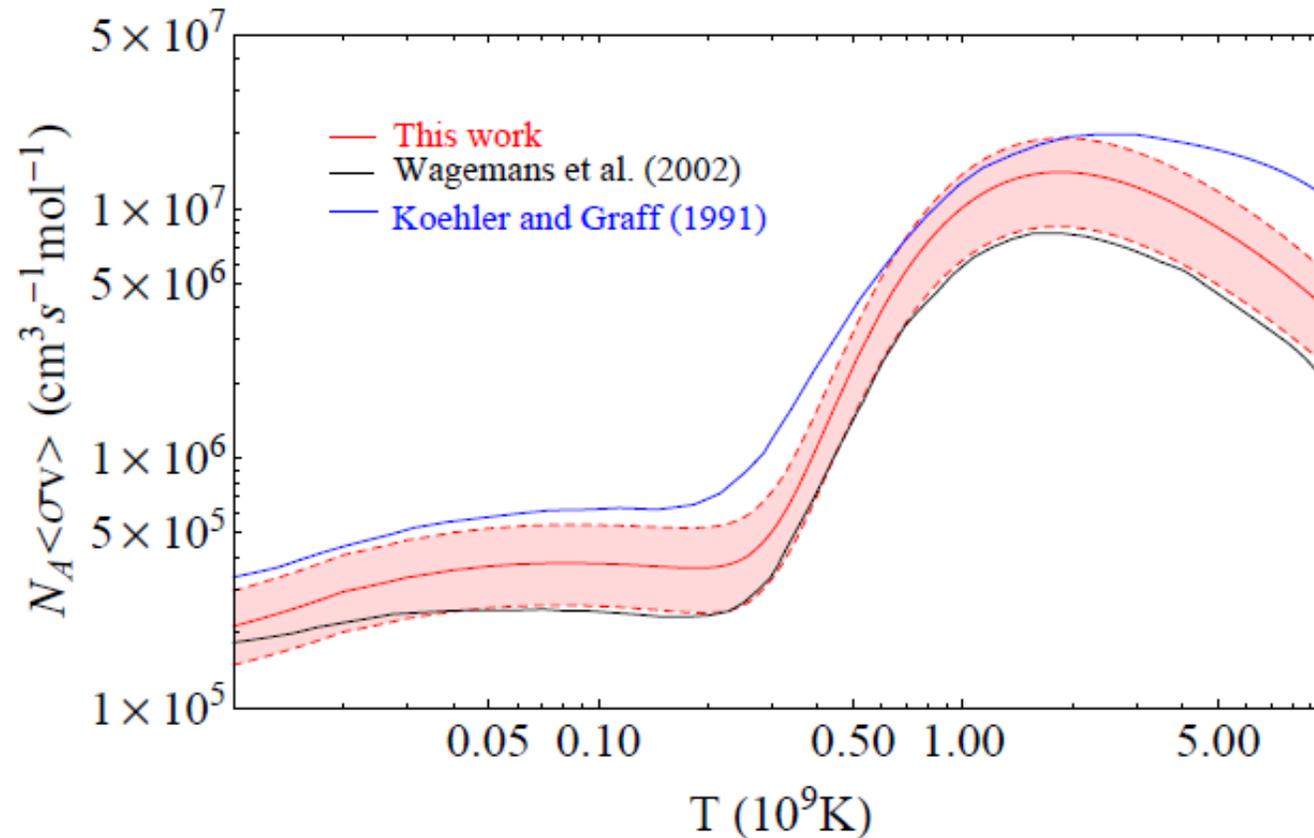
$$\frac{d^2\sigma}{dE_{xA}d\Omega_s} = NF \sum_i (2J_i + 1) \times \left| \frac{\sqrt{k_f(E_{xA})} \sqrt{2P_{l_i}(k_{cC}R_{cC})} M_i(p_{xA}R_{xA}) \gamma_{cC}^i \gamma_{xA}^i}{\mu_{cC} D_i(E_{xA})} \right|^2$$

$E_{cm}$ (keV)	$\Gamma_n$ (eV)	$\Gamma_\alpha$ (eV)	$\Gamma_{TOT}$ (eV)	$\Gamma_{wag.}$ (eV)
-7	$0,01 \pm 0,001$	$2362 \pm 307$	$2362 \pm 307$	2400
75	$0,05 \pm 0,006$	$36 \pm 5$	$36 \pm 5$	-
166	$86 \pm 11$	$2171 \pm 282$	$2257 \pm 293$	$2258 \pm 135$
236	$1714 \pm 446$	$13021 \pm 3386$	$14735 \pm 3832$	$14739 \pm 590$

Guardo et al., Phys. Rev. C, 95, 025807, 2017  
La Cognata et al., ApJ, 777, 143, 2013

# La reazione $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

## Rate astrofisico



Guardo et al., *Phys. Rev. C*, 95, 025807, 2017

Conseguenze  
astrofisiche da  
valutare

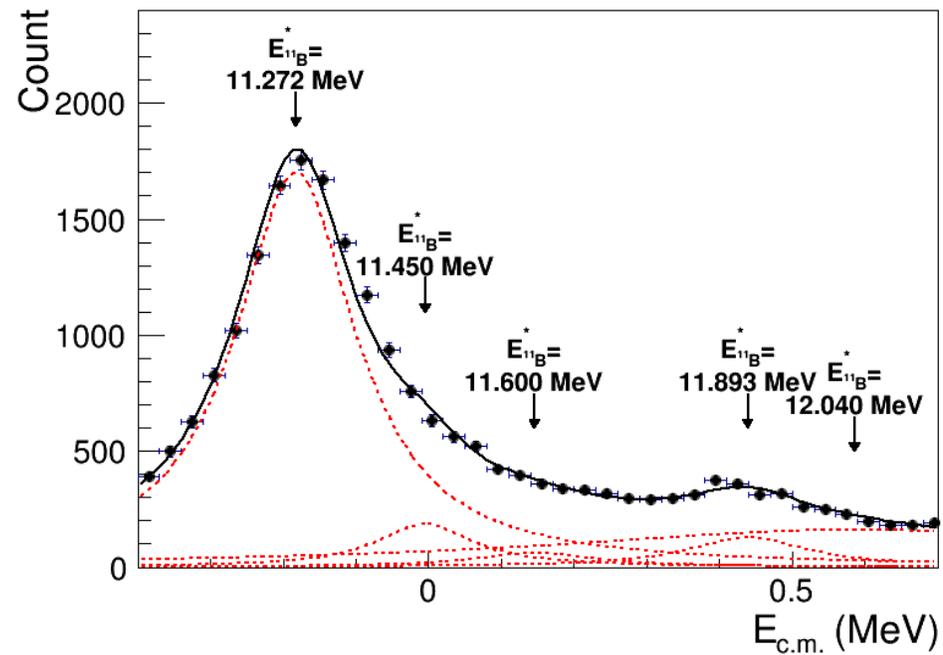
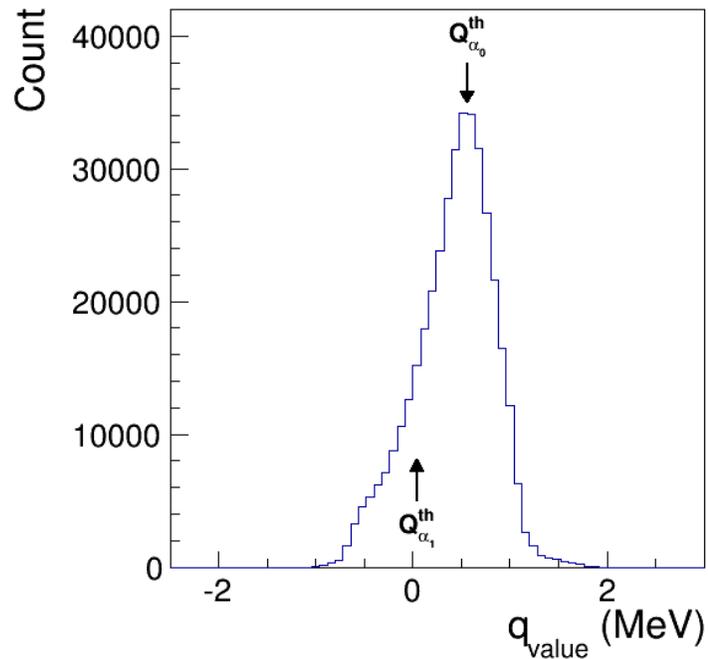


# Altre reazioni studiate...



Primo run effettuato al Departamento de Fisica Nuclear (DFN) in Sao Paulo, Brazil dedicato alla misura della  $^{10}\text{B}(p,\alpha)^7\text{Be}$  →  
**CANALE PARASSITA**

*Lamia et al., Nuovo Cimento C31, 423 (2008)*



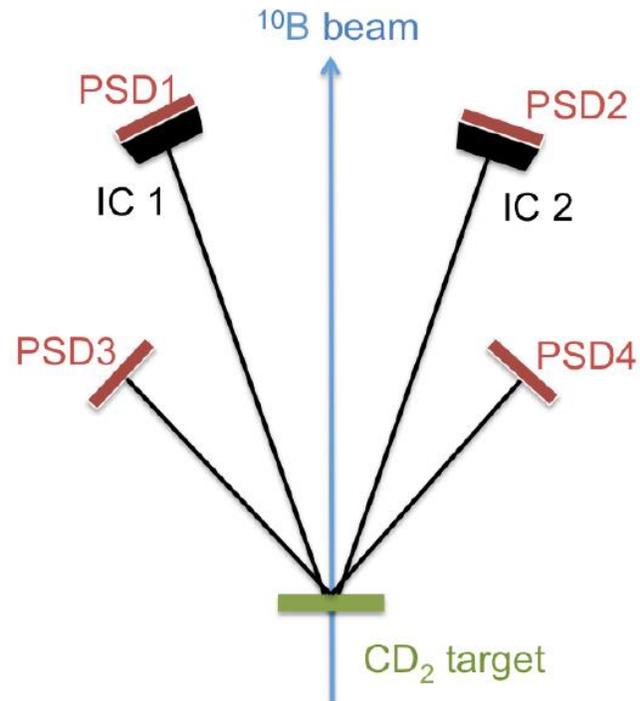
# Altre reazioni studiate...



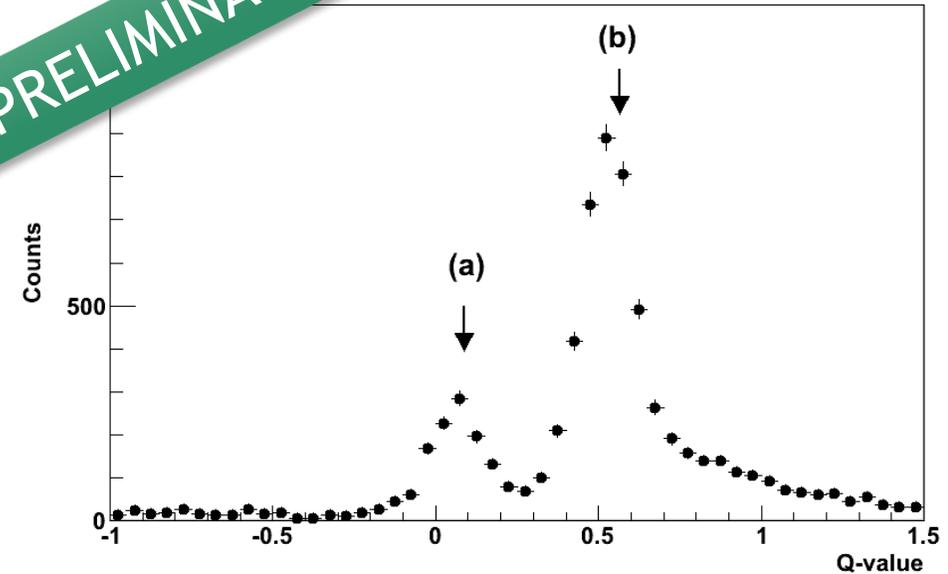
Secondo run dedicato effettuato a Laboratori Nazionali del Sud

Incremento della  
risoluzione grazie a:

1. Target sottile
2. Rivelatori a grande distanza
3. Risoluzione angolare
4. Minimizzazione straggling



PRELIMINARE



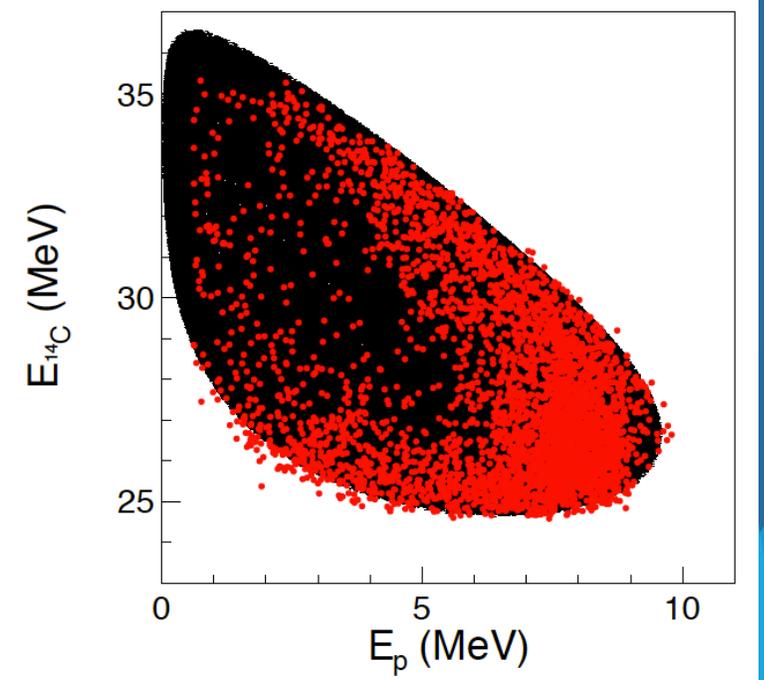
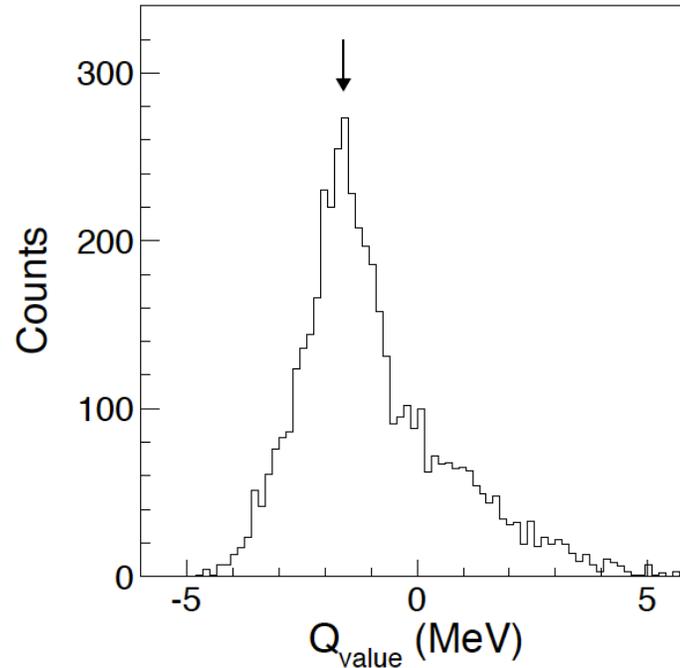
WORK  
IN PROGRESS



# Altre reazioni studiate...

$^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$  tramite  $^2\text{H}(^{14}\text{N},\alpha^{14}\text{C})p$

- ✓ First  $^{14}\text{N}$  beam @LNS
- ✓ Beam energy: 40 MeV
- ✓  $^{14}\text{C}$  detected via DSSSD
- ✓ 2 PSD for alpha detection
- ✓  $\Delta E$ -E range  $3^\circ$ - $7^\circ$
- ✓ PSD range  $20^\circ$ - $30^\circ$  and  $35^\circ$ - $45^\circ$



# Altre reazioni studiate...



Applicazione del THM con fasci esotici  
e/o nuclei instabili →

The BeLiCos experiment @ INFN-LNL

TANDEM ACCELERATOR

**Experimental study of the  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  at astrophysical energies by means of the Trojan Horse Method applied to the  ${}^2\text{H}({}^7\text{Be}, \alpha){}^4\text{He}p$  reaction**

L. Lamia<sup>1,2</sup>, M. Mazzocco<sup>3,4</sup>, C. Spitaleri<sup>1,2</sup>, M. La Cognata<sup>2</sup>, R. G. Pizzone<sup>2</sup>, X. Aslanouglu<sup>5</sup>, Ch. Betsou<sup>5</sup>, A. Boiano<sup>6</sup>, C. Boiano<sup>14</sup>, C. Brogгинi<sup>4</sup>, A. Caciolli<sup>4,3</sup>, S. Cherubini<sup>1,2</sup>, G. D'Agata<sup>1,2</sup>, R. Depalo<sup>4,3</sup>, A. Di Pietro<sup>2</sup>, P. Figuera<sup>2</sup>, M. Fisichella<sup>2</sup>, G.L. Guardo<sup>1,2</sup>, S. Hayakawa<sup>7</sup>, N. Iwasa<sup>16</sup>, S. Kubono<sup>8,15</sup>, M. La Commara<sup>6,9</sup>, M. Lattuada<sup>1,2</sup>, A. Pakou<sup>5</sup>, C. Parascandolo<sup>6</sup>, R. Menegazzo<sup>4</sup>, D. Pierroutsakou<sup>6</sup>, S. Romano<sup>1,2</sup>, G. G. Rapisarda<sup>1</sup>, K. Sakaguchi<sup>7</sup>, M.L. Sergi<sup>2</sup>, O. Sgouras<sup>11</sup>, Soramel<sup>3,4</sup>, V. Soukeras<sup>5</sup>, E. Stiliaris<sup>10</sup>, E. Strano<sup>3,4</sup>, D. Torresi<sup>1,2</sup>, A. Tumino<sup>11</sup>, H. Yano<sup>11</sup>, F.L. Villante<sup>12,13</sup>

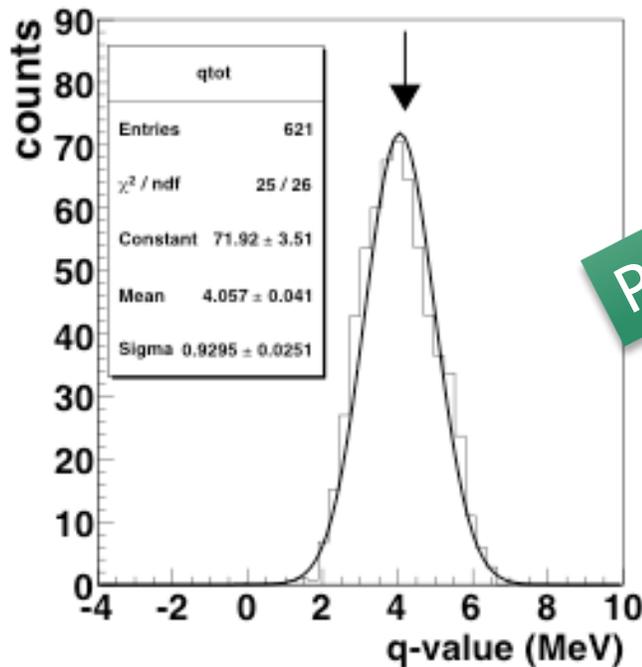
R. Spartà TALK

# Altre reazioni studiate...

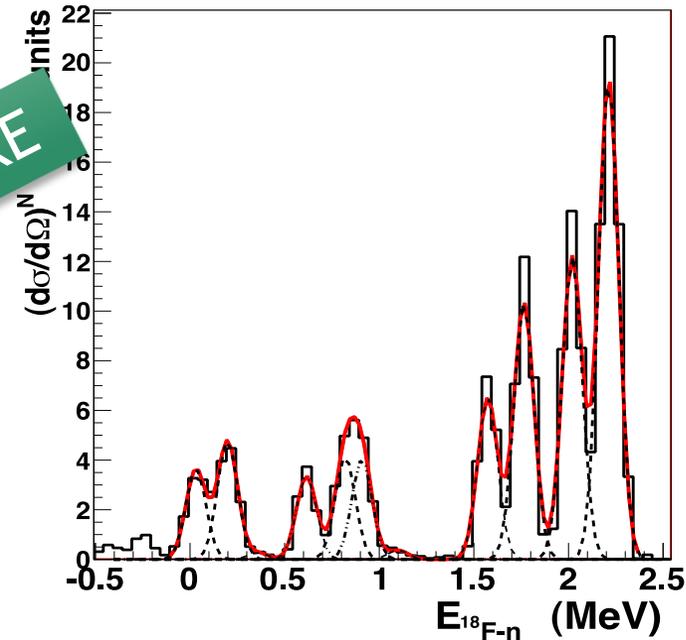


Applicazione del THM con fasci esotici e/o nuclei instabili →

The  $^2\text{H}(^{18}\text{F},\alpha)^{15}\text{O}$ p experiment @ CRIB-RIKEN



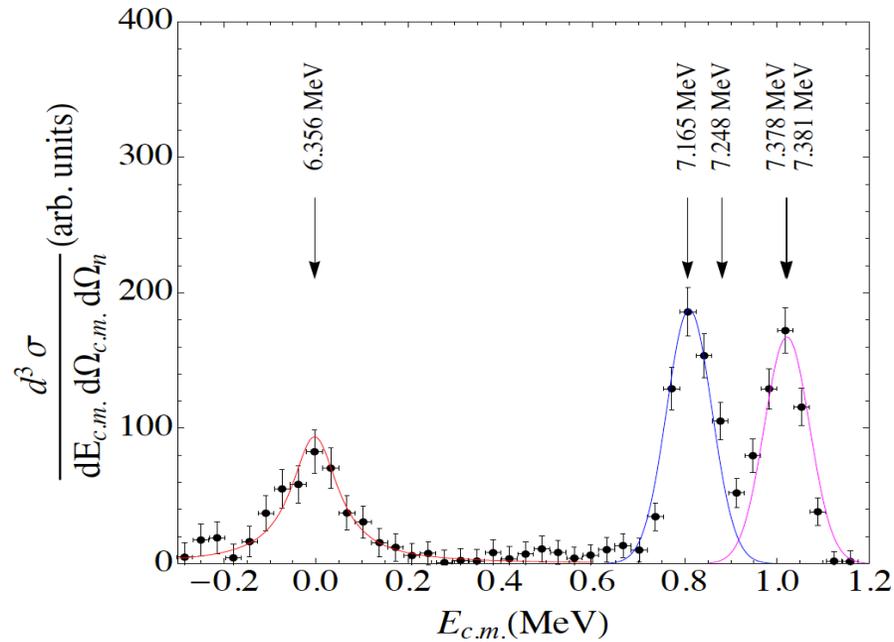
PRELIMINARE



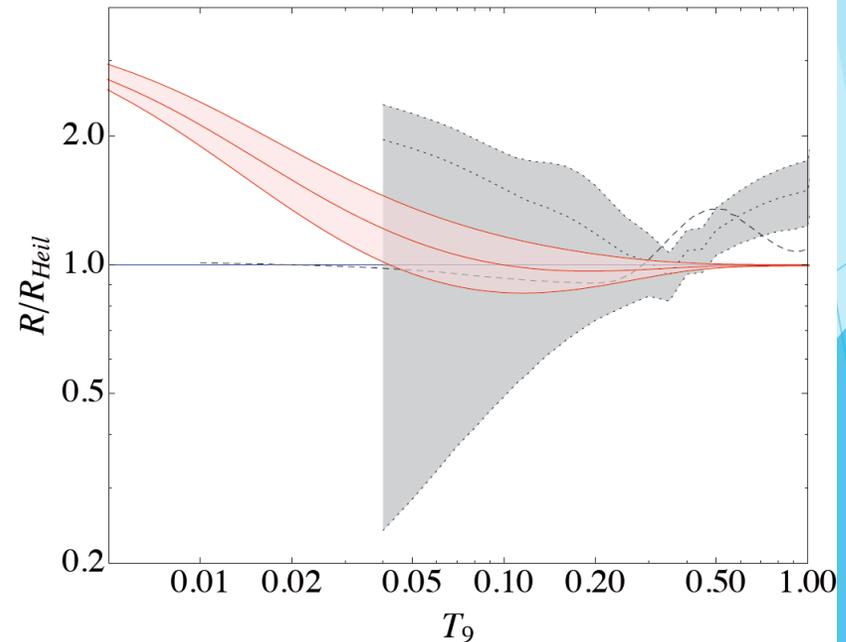
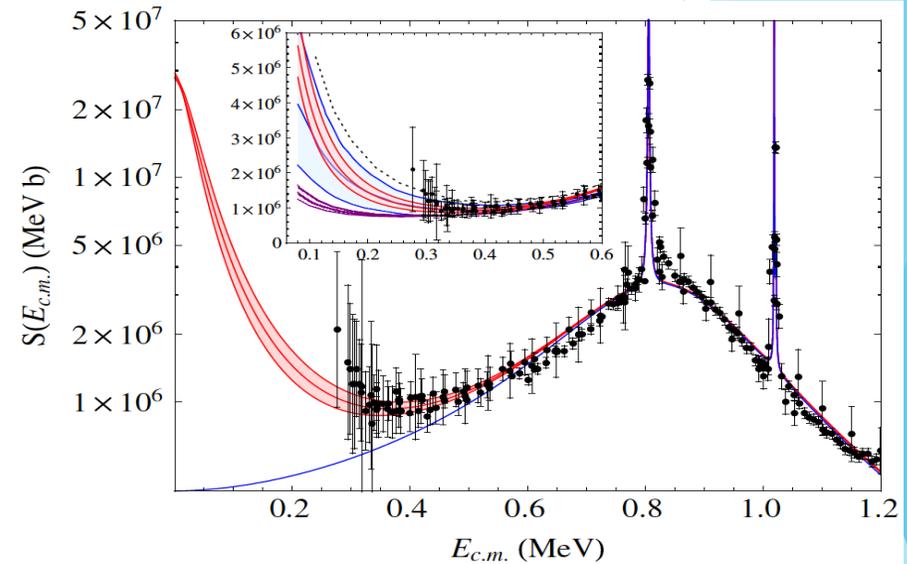
# Sorgenti di neutroni...



Esperimento effettuato alla FSU attraverso la reazione  $^{13}\text{C}(^6\text{Li}, n)^{16}\text{O}d$



*La Cognata et al., Phys. Rev. Lett., 109, 232701, 2012*  
*La Cognata et al., ApJ, 777, 143, 2013*  
*Trippella and La Cognata, ApJ 837, 1, 2017*



# Sorgenti di neutroni...

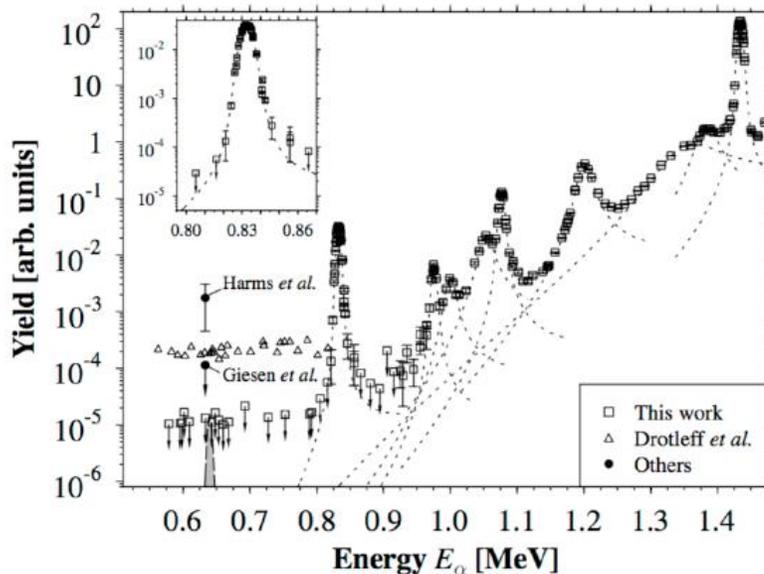


The  $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$  reaction at astrophysical energies studied via the Trojan Horse Method applied to the  $^2\text{H}(^{25}\text{Mg}, \alpha ^{22}\text{Ne})^1\text{H}$  reaction

R. Spartà<sup>1</sup>, M. La Cognata<sup>1</sup>, C. Spitaleri<sup>1,2</sup>, S. Cherubini<sup>1,2</sup>, A. Cvetinovic<sup>1</sup>, G. D'Agata<sup>1,2</sup>, G.L. Guardo<sup>1</sup>, M. Gulino<sup>1,3</sup>, I. Indelicato<sup>1</sup>, L. Lamia<sup>1</sup>, S. Palmerini<sup>4</sup>, R. G. Pizzone<sup>1</sup>, O. Trippella<sup>4</sup>, S.M.R. Puglia<sup>1</sup>, G. G. Rapisarda<sup>1</sup>, S. Romano<sup>1,2</sup>, M.L. Sergi<sup>1</sup>, A. Tumino<sup>1,3</sup>



**APPROVED**  
INFN-LNS PAC,  
Experiment is  
coming  
December 2017



# Conclusioni

- L'estensione del THM alle reazioni indotte dai neutroni permette di superare gli effetti della barriera centrifuga
  1. Evidenza di livelli soppressi nelle misure dirette
  2. Possibilità di misurarne distribuzioni angolari e proprietà nucleari
  3. Applicazione dell'approccio R-matrix per ricavare le strenght dei livelli
- L'utilizzo del deuterio come sorgente di neutroni virtuali permette di superare i problemi sperimentali nella produzione di fasci di neutroni
  1. Riduzione costi della ricerca
  2. Semplice setup sperimentale
  3. Unica energia di fascio per un ampio spettro energetico
- Applicazione ai nuclei esotici

# The AsFiN group

C. Spitaleri, A. Anzalone, S. Cherubini, A. Cvetinovic, G. D'Agata, G.L. Guardo, M. Gulino, I. Indelicato, M. La Cognata, L. Lamia, R.G. Pizzone, S.M.R. Puglia, G.G. Rapisarda, S. Romano, M.L. Sergi, R. Spartà, A. Tumino  
*INFN-LNS, Università di Catania & UniKore Enna*

S. Palmerini, O. Trippella  
*Università di Perugia & INFN-Sezione di Perugia*

## Collaborations

D. Balabanski, S. Chesnevskaya, C. Matei, Y. Xu *Extreme Light Infrastructure – Nuclear Physics*

M. Mazzocco *Università di Padova & INFN-Sezione di Padova*

M. La Commara, D. Pierroutsakou *Università di Napoli «Federico II» & INFN-Sezione di Napoli*

S. Hayakawa, H. Yamaguchi *University of Tokyo*

V. Burjan, J. Mrazek *Nuclear Physics Institute of ASCR*

N. Soic *Rudjer Boskovic Institute, Zagreb*

C. Bertulani, A. Mukhamedzhanov, G. Rogachev *Cyclotron Institute & Texas A&M*

A. Coc, F. Hammache, N. deSereville *CSNSM Orsay, France*

M. Wiescher *Notre Dame University*

N. Burtibaiev *RSE INP Almaty Kazakhstan*



Grazie per  
l'attenzione

