

# La reazione $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ come sorgente di neutroni nelle stelle AGB

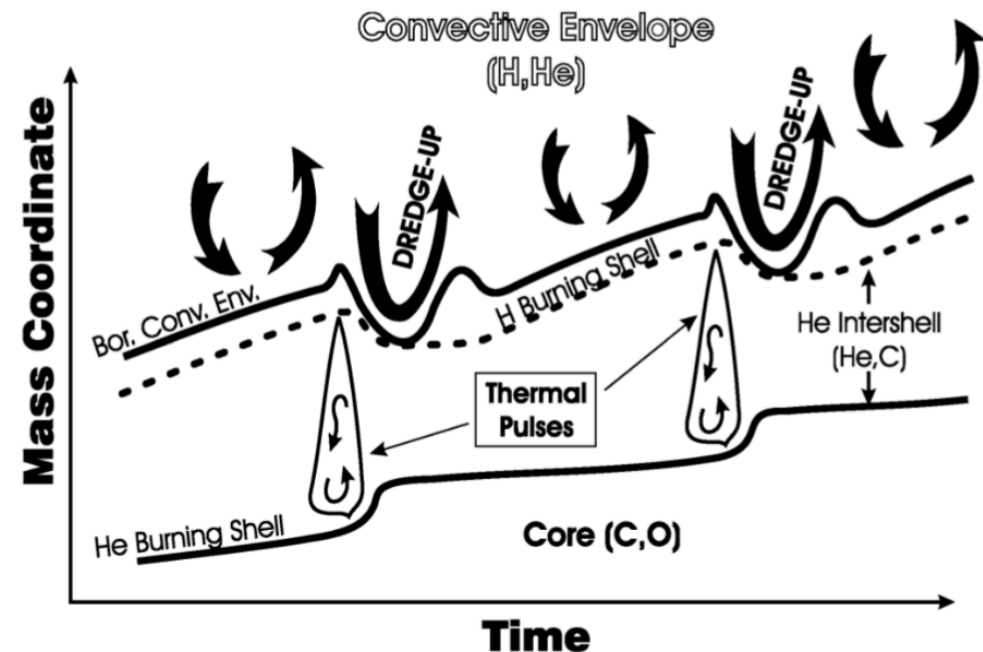
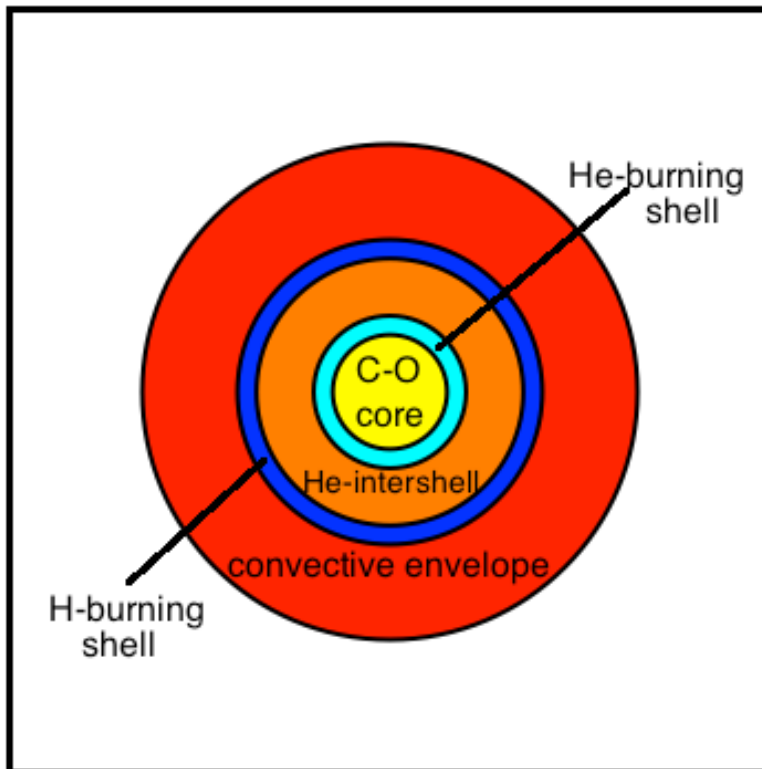
G.F. Ciani  
per la collaborazione LUNA

Università degli Studi della Campania L. Vanvitelli  
INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso

# MOTIVAZIONI ASTROFISICHE

$^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  principale sorgente di neutroni per processi s

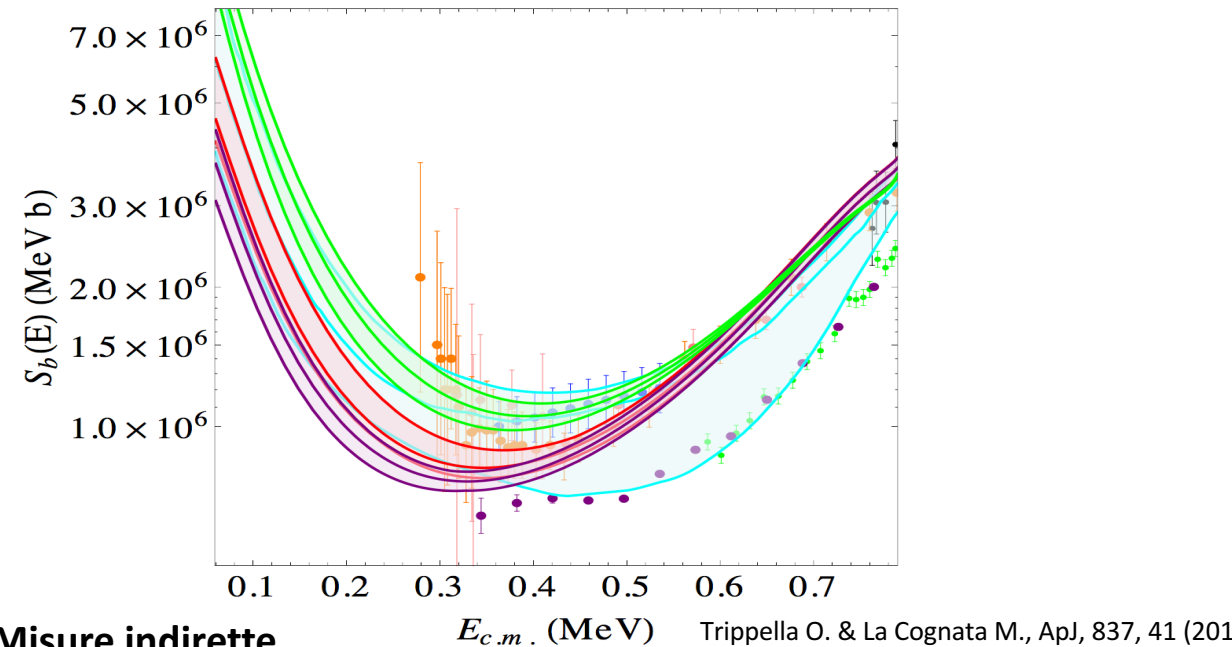
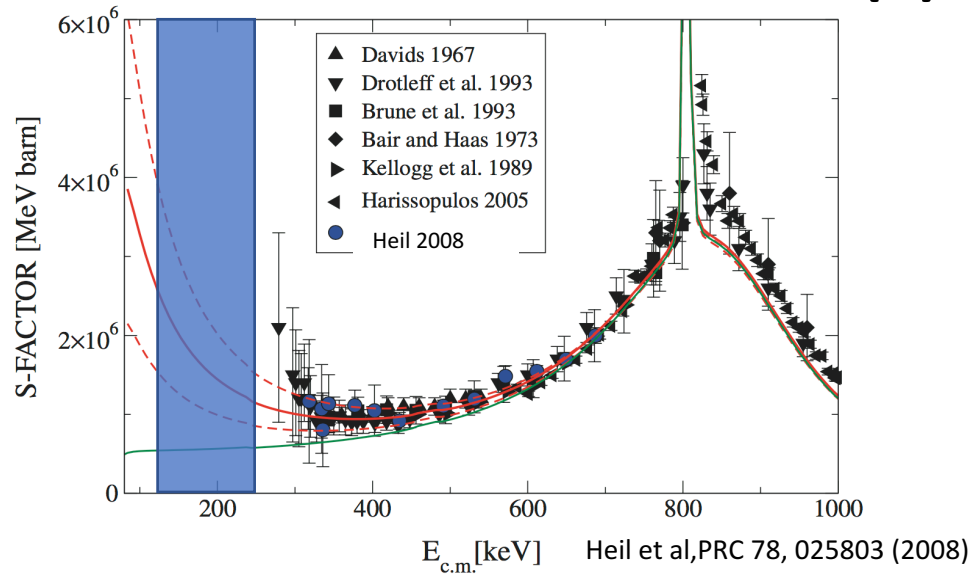
- Nuclei con  $A > 56$ : sintetizzati prevalentemente per cattura neutronica (processi *s* o *r*)
- Reazione  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  ( $Q=2.215$  MeV) è la principale sorgente di neutroni catturati dai processi s nelle stelle a bassa massa ( $1-3 M_{\odot}$ ) nelle stelle TP-AGB
- Temperatura media  $10^8$  K  $\rightarrow$  Gamow window **140-250 keV**  $\rightarrow$   $\langle E_n \rangle = 2.5$  MeV



Straniero et al, Nuclear Physics A 777 (2006) 311–339

# STATO DELL' ARTE

$$S(E) = \sigma(E) E e^{2\pi\eta}$$



## Misure dirette

- Punto più basso a  $E_{cm} = 280$  keV (Drotleff et al., ApJ, 414, 753:759, 1993)
- Misura più recente: Heil et al, PRC 78, 025803 (2008)

## OBIETTIVO DI LUNA

Misura diretta della  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  avvicinandosi al picco di Gamow con un'incertezza totale del 10%

## Misure indirette

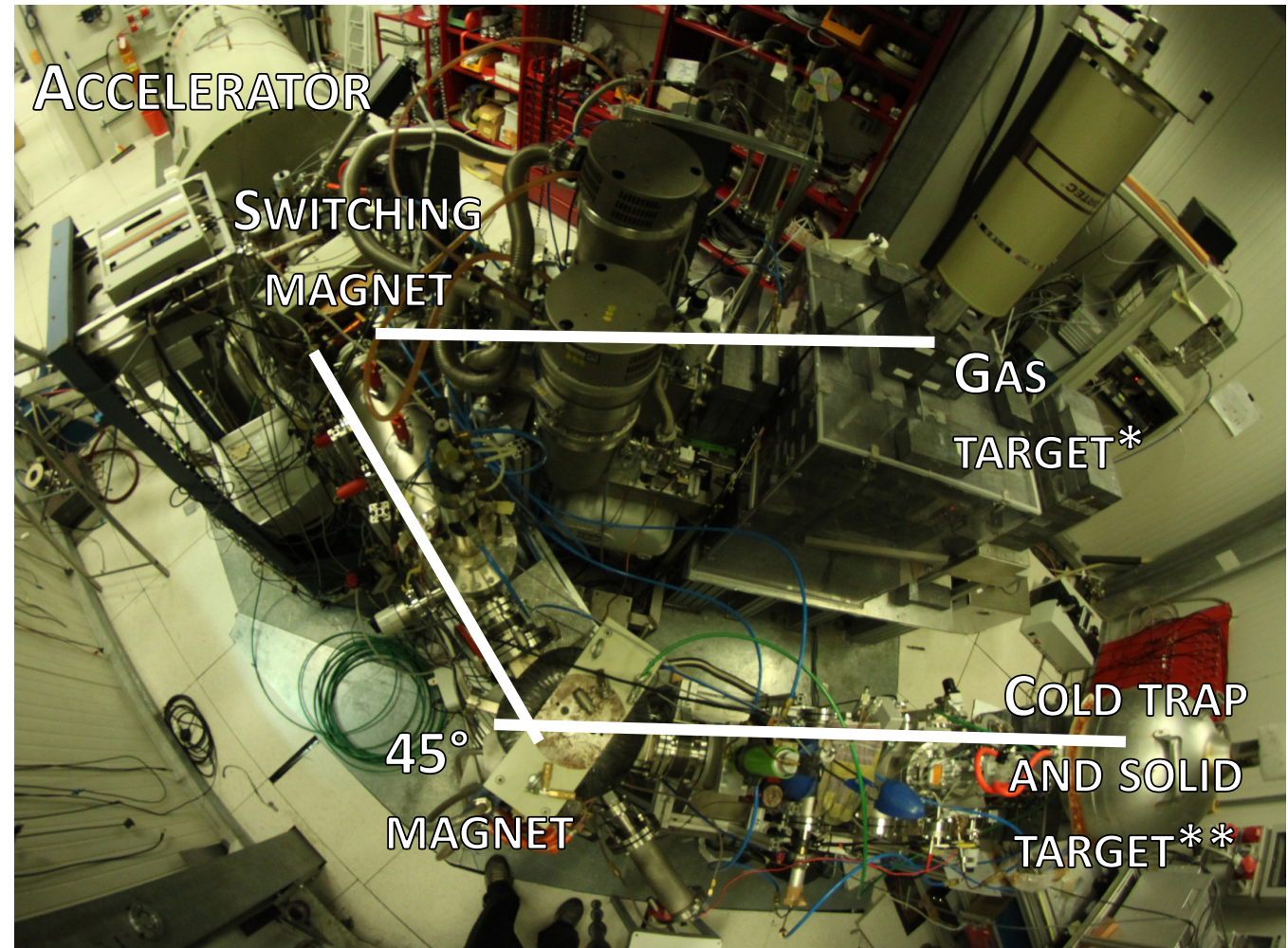
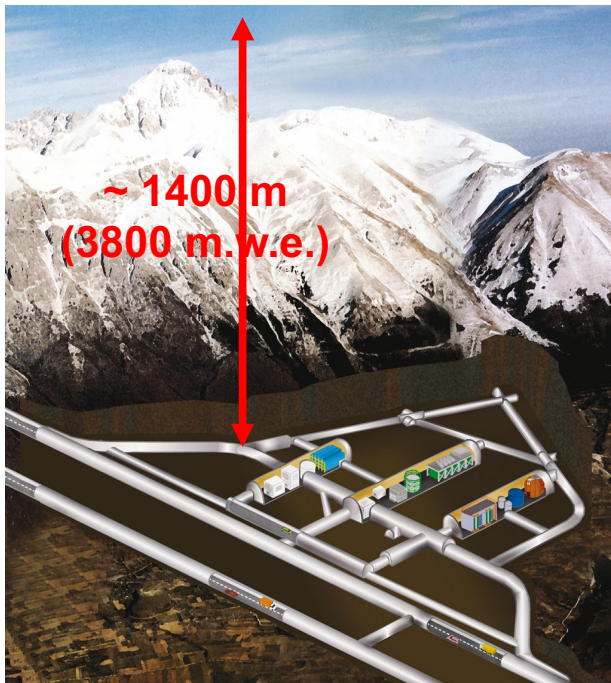
- **Trojan Horse method:** La Cognata (banda verde) et al. (2013) Trippella (banda rossa) et al. (2017).
- **ANC:** Avila (banda violetta) et al (2015)
- banda celeste è la compilazione di NACRE II



# LUNA: a Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics

\*contributo 718 di E. Masha  
\*\*contributo 735 di J. Skowronski

- LUNA 400 kV:
- fasci di  $^1\text{H}^+$  o  $^4\text{He}^+$
- $\langle I \rangle = 250 \text{ }\mu\text{A}$
- $dE = 100 \text{ eV}$





# RIDUZIONE DEL FONDO

**AMBIENTALE:** 1400 m di roccia riducono il flusso di neutroni dei raggi cosmici di 3 ordini di grandezza rispetto al fondo delle misure in superficie.

**INTRINSECO:** impurezze di U e Th all'interno dei counter a  $^3\text{He}$  sono sorgenti di particelle  $\alpha$  che generano un fondo nei rivelatori

Utilizzati contatori a  $^3\text{He}$  con 10 atm con un case di acciaio inossidabile con basso fondo intrinseco (d= 1 inch)

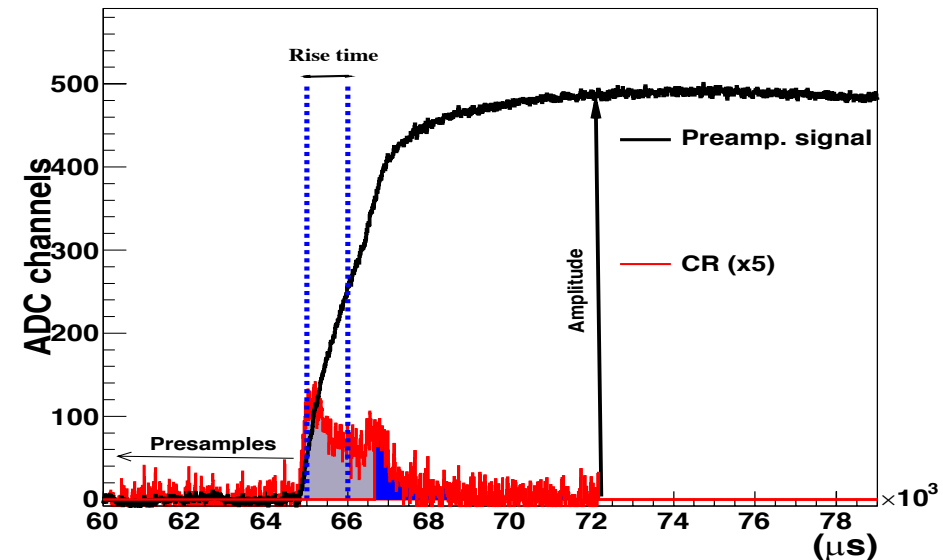
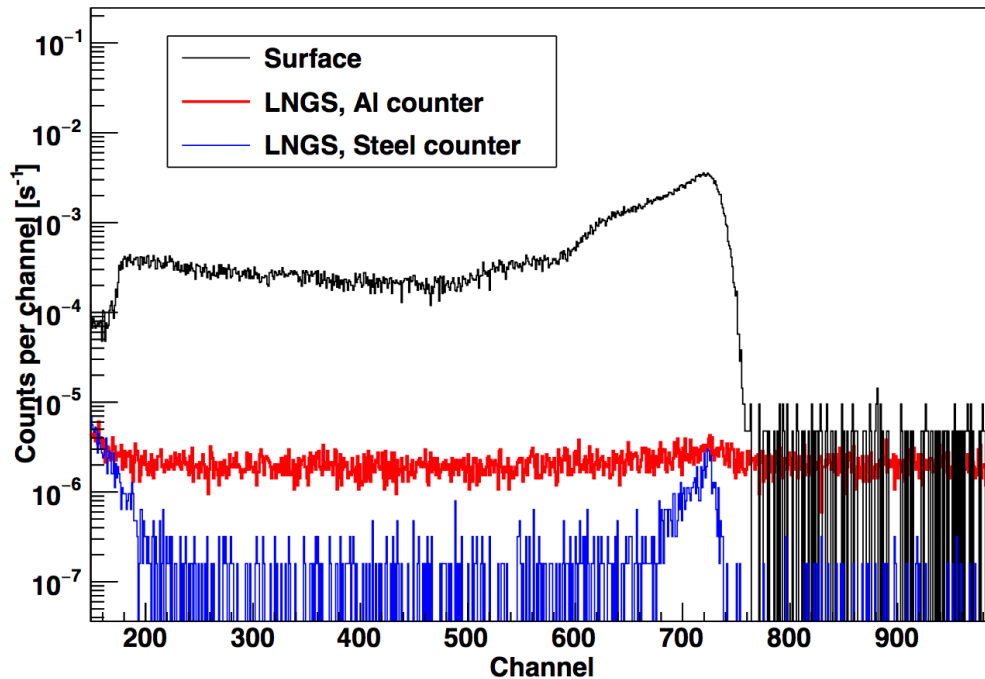
## POST Processing PULSE SHAPE DISCRIMINATION:\*

discrimina il 90% di alpha e il 10% di n

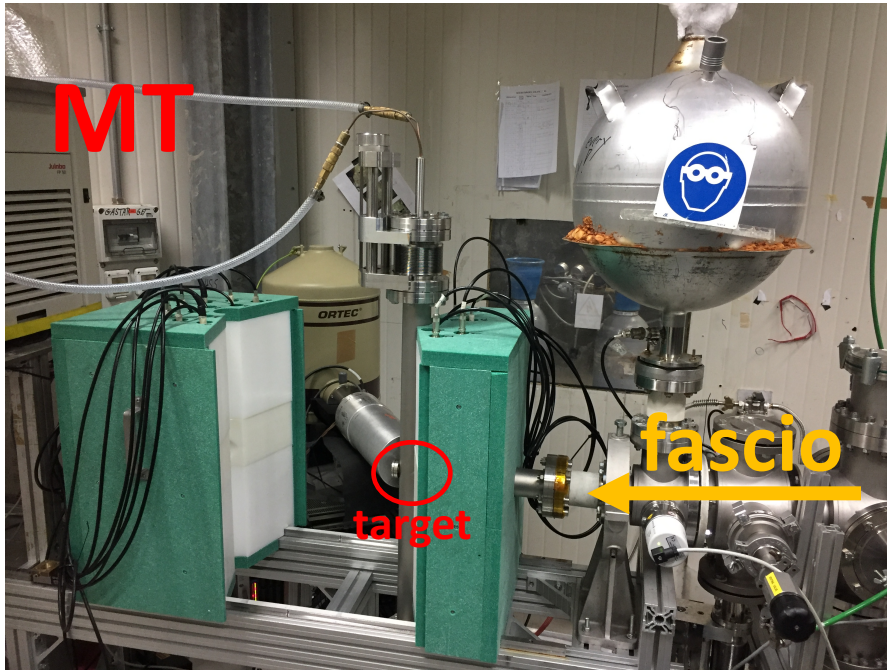
Background rate (ROI) per l'intero rivelatore:

$\sim (1.2 \pm 0.06)$  counts/hour

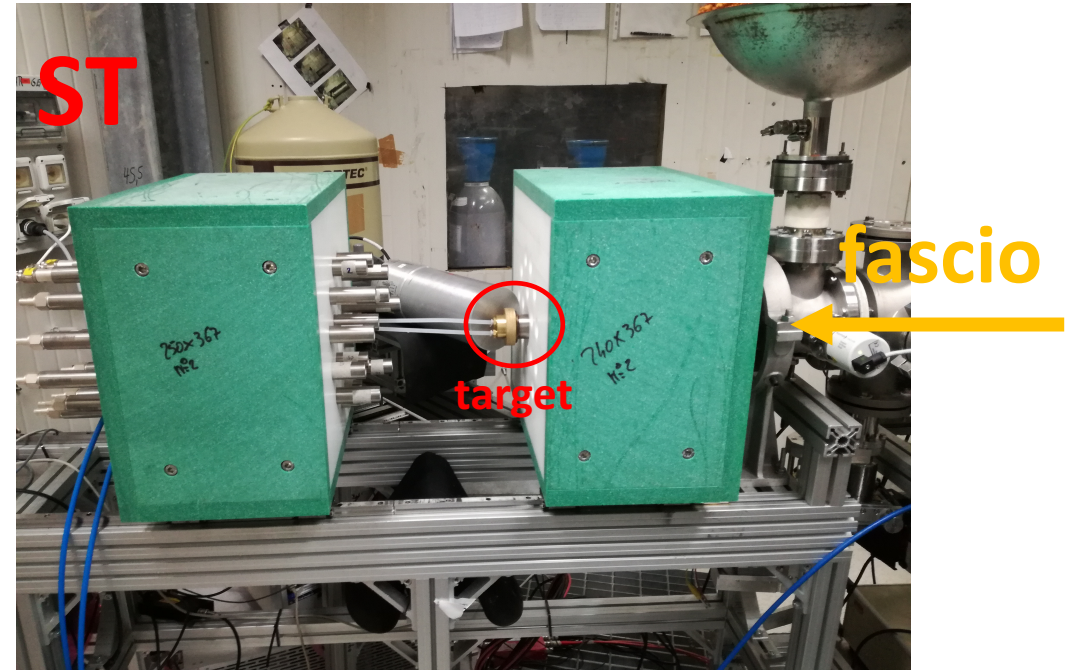
\*J. Balibrea-Correa et al., NIM A 906,103-109, (2018)



# APPARATO SPERIMENTALE



disposizione verticale, 3 target montati



disposizione orizzontale, 1 target montato

- Rivelatore in due differenti configurazioni geometriche (**Multi Target** e **Single Target**):
  - 12 contatori  $^3\text{He}$  di acciaio inossidabile lunghi 40 cm ( $R=11$  cm)
  - 6 contatori  $^3\text{He}$  di acciaio inossidabile lunghi 25 cm ( $R=6$  cm)
  - moderatore di polietilene e schermatura di 5 cm di polietilene borato
  - possibilità di apertura del moderatore per inserire un 120% HPGe in close geometry.

# STUDIO DI EFFICIENZA

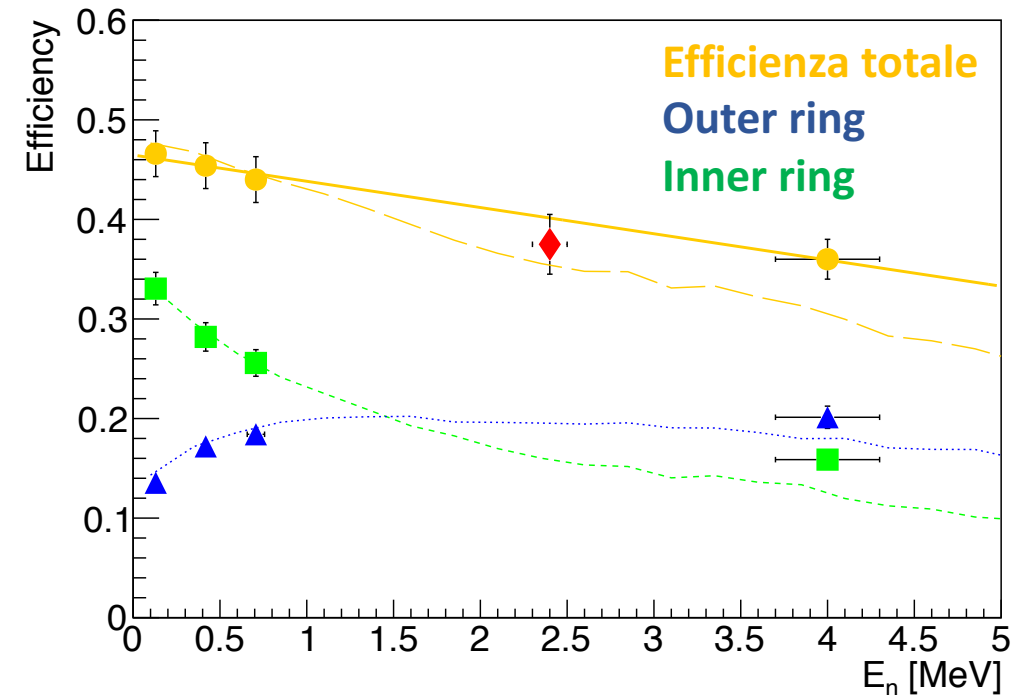
(contributo 842 di L. Csedreki)

Validazione della simulazione Geant4 :

- Misure di attivazione tramite la reazione  $^{51}\text{V}(p,n)^{51}\text{Cr}$  ( $Q=-1534$  keV) presso l'istituto ATOMKI (Debrecen, Hungary) alle energie  $E_n=148, 454$  and  $757$  keV
- Sorgente di **AmBe** per neutroni di alta energia

Efficienza a  $E_n = 2.5$  MeV

- $34 \pm 3\%$  per il MT setup
- $37 \pm 3\%$  per il ST setup



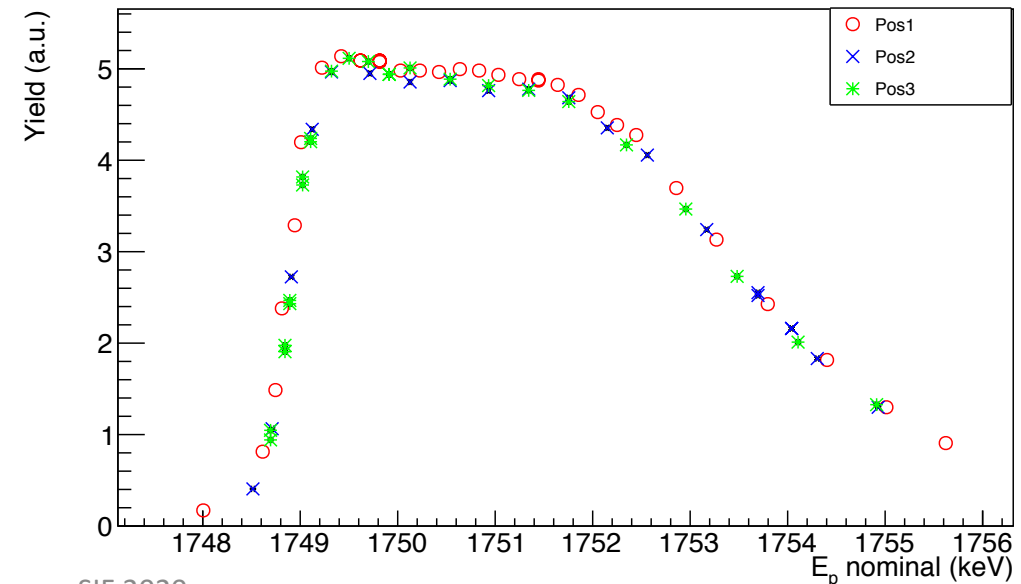
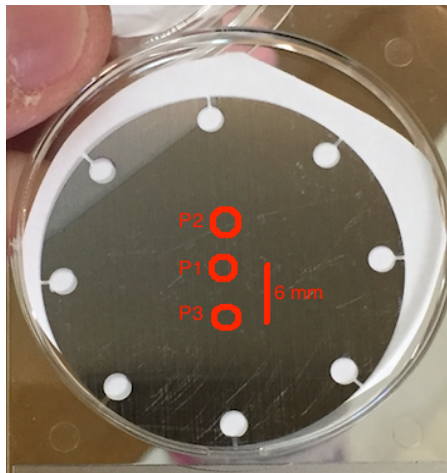
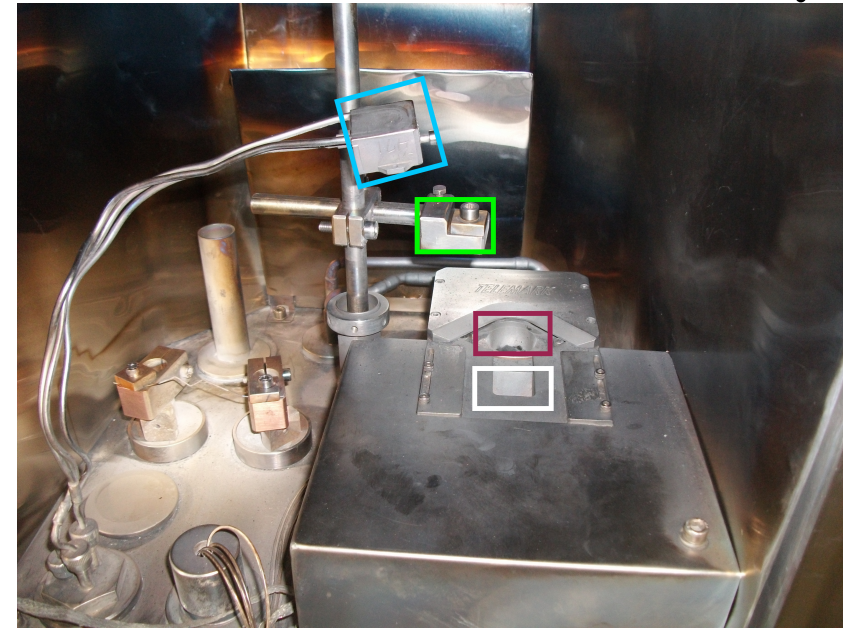
Csedreki et al. sottomesso NIM A



# CARATTERIZZAZIONE DEI BERSAGLI CON LA $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$

## 1<sup>a</sup> fase al MTA Atomki

- 99%  $^{13}\text{C}$  evaporato su Tantalio
- Spessore misurato al 2 MV Tandetron ( $\langle I \rangle$  500 nA) mediante scansione della risonanza (NRRA) a  $E_p = 1747.6$  keV ( $\Gamma_R = 122$  eV)
- Testata l'uniformità di evaporazione
- Densità superficiale circa  $10^{18}$  at/cm<sup>2</sup>

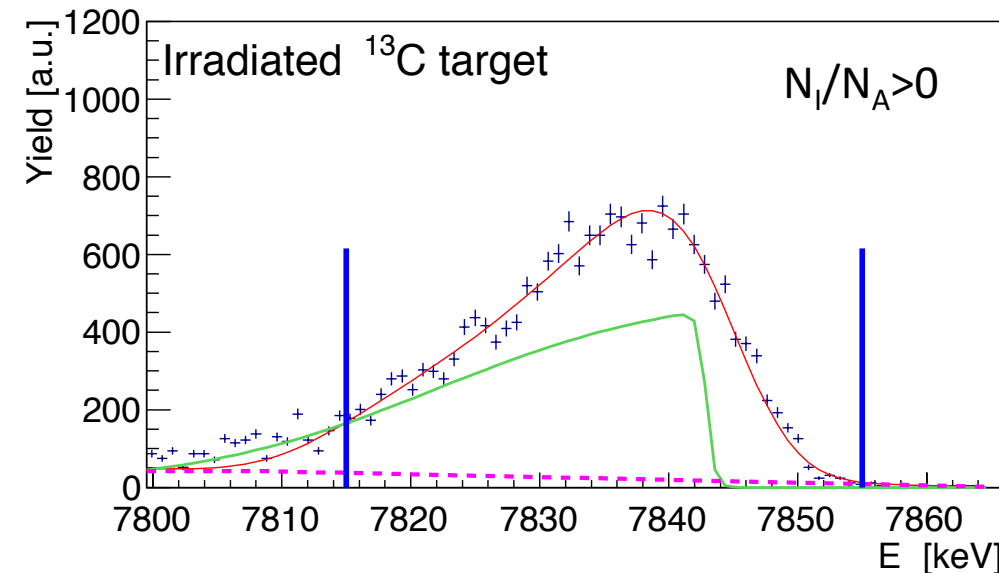
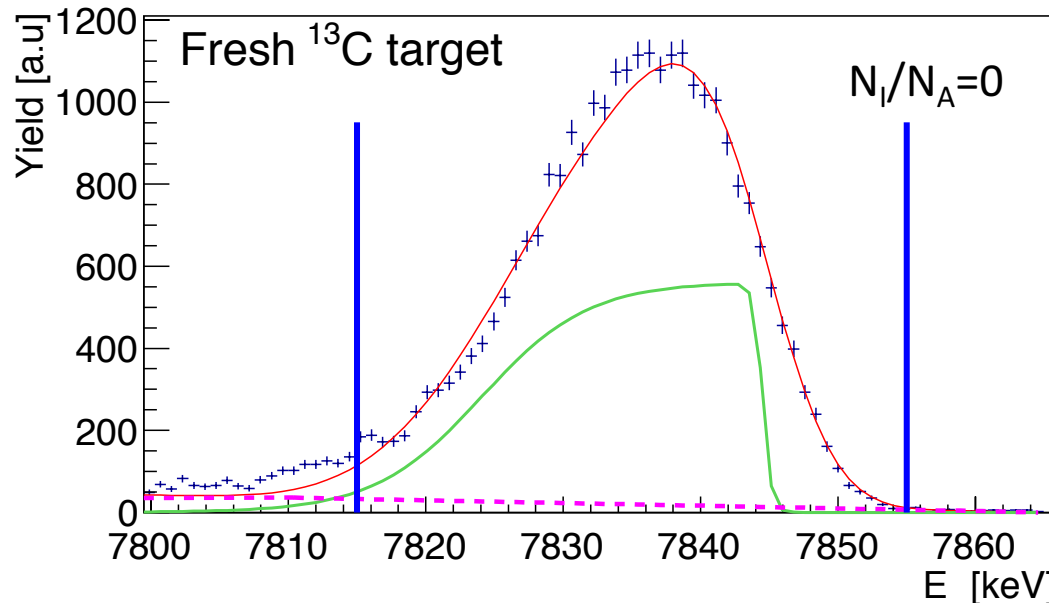


# 2<sup>a</sup> fase : GAMMA SHAPE ANALYSIS (GSA) a LUNA

- Nessuna risonanza nell'intervallo dell'acceleratore LUNA400 → NRRA non è possibile per il monitoraggio in situ
  - Metodo alternativo basato sulla perdita di energia dei proiettili in funzione della profondità del bersaglio
- Grazie all'eccellente risoluzione energetica dei HPGe, i conteggi/canale nello spettro  $\gamma$  rappresentano la variazione della sezione d'urto e dello stopping power in funzione dell'energia del proiettile
  - Analisi della forma del picco DC- $\rightarrow$ GS della  $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$

$$dY(E_\gamma, E_\gamma + dE) \propto \frac{\sigma(E_p)W(E_p)}{\epsilon_{eff}(E_p)}, \quad \text{with } E_\gamma = Q + \frac{M_T}{M_T + M_p} E_p$$

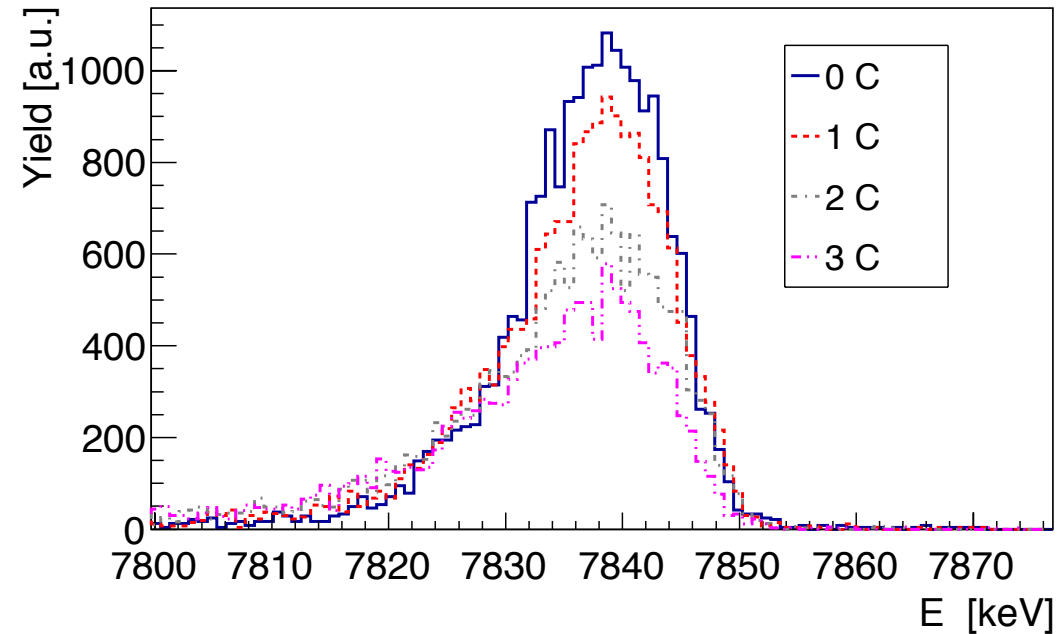
$$\epsilon_{eff}(E_p) = \epsilon_A(E_p) + \sum_I \frac{N_I}{N_A} \epsilon_I(E_p)$$



# STRATEGIA DI MISURA

- Alternanza di irraggiamento con protoni (monitoraggio del target,  $E_p=310$  keV) e irraggiamento con alpha (misura di sezione d'urto) per un monitoraggio in situ

| beam   | detector               |                           |
|--------|------------------------|---------------------------|
| proton | HPGe                   | Ref1 (fresh target) 0.2 C |
| alpha  | $^3\text{He}$ counters | 1C                        |
| proton | HPGe                   | Ref2 (0.2 C)              |
| alpha  | $^3\text{He}$ counter  | 1C                        |
| proton | HPGe                   | Ref3 (0.2 C)              |
| alpha  | $^3\text{He}$ counter  | 1C                        |
| proton | HPGe                   | Ref4 (0.2 C)              |

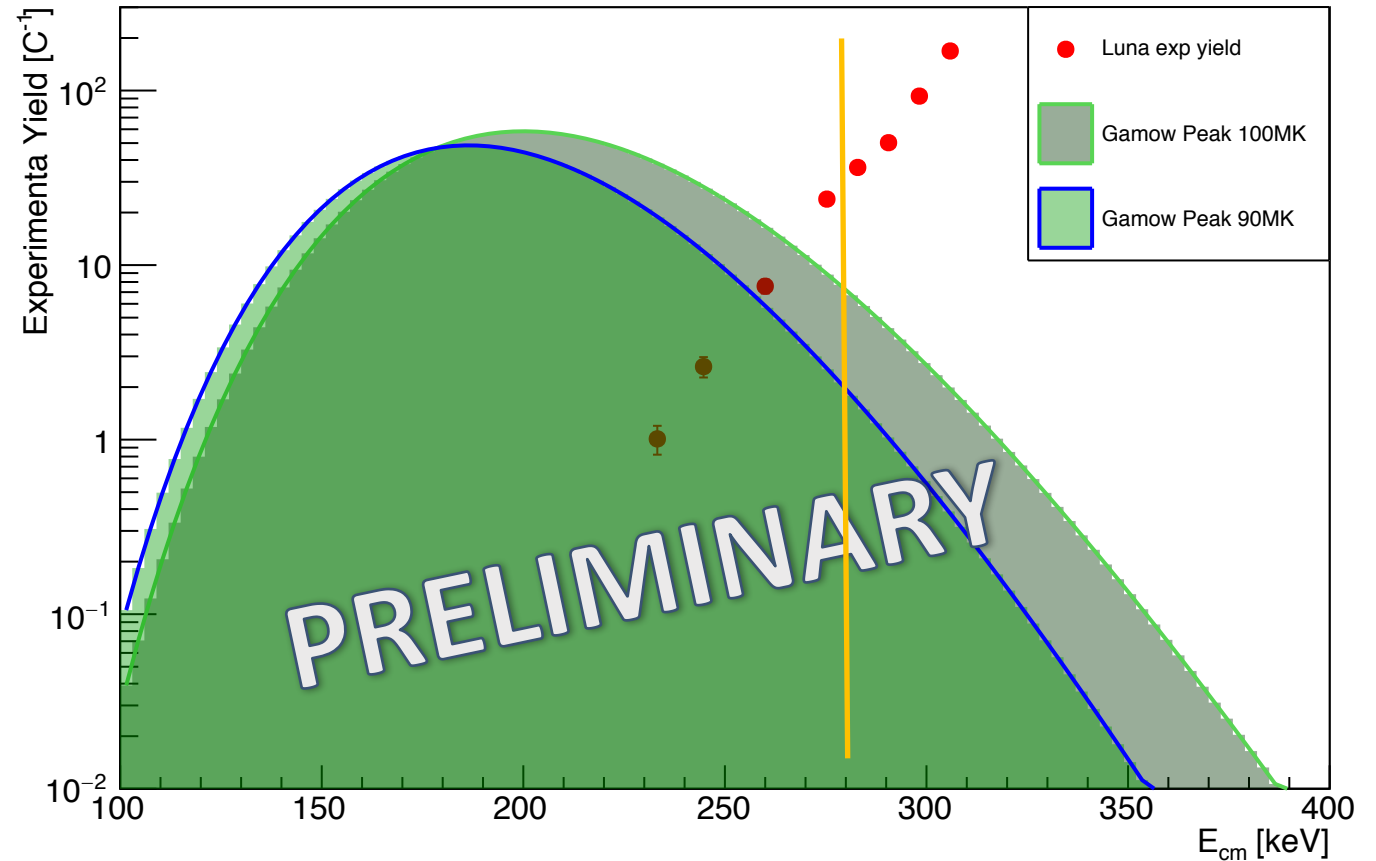


La riduzione dello yield nel picco della  $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$  DC  $\rightarrow$  GS assunto come conseguenza del cambio di stechiometria del bersaglio.  
 Ulteriori dettagli in **Ciani G.F. et al, EPJ A 56, 75 (2020)**



# RISULTATI SPERIMENTALI

| $E_\alpha$ [keV] | $E_{cm}$ [keV] | Charge [C] |
|------------------|----------------|------------|
| 400              | 305.9          | 16         |
| 390              | 298.2          | 17         |
| 380              | 290.6          | 18         |
| 370              | 282.9          | 13         |
| 360              | 275.3          | 34         |
| 340              | 260.0          | 30         |
| 320              | 244.7          | 48         |
| 305              | 233.2          | 87         |



- 4 campagne presa dati di 3 mesi ciascuna in circa 2 anni
- Per ogni punto incertezza statistica inferiore al 10%
- Per la prima volta **misura diretta nel picco di Gamow**

# INCERTEZZE SISTEMATICHE

$$\frac{n_{det}}{Q} = Y(E_\alpha) = \int_{E_\alpha - \Delta E}^{E_\alpha} \frac{\eta(E) \sigma(E)}{\varepsilon(E)} dE$$

- 3% dall'integrazione della carica
- 6% dall'efficienza
- 6% dalle tabelle di SRIM sullo stopping power
- <8%> dai fit della GSA e la valutazione della degradazione
  
- circa 10% l'incertezza sistematica totale

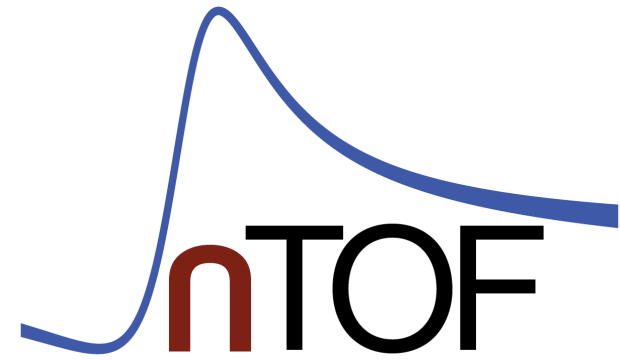
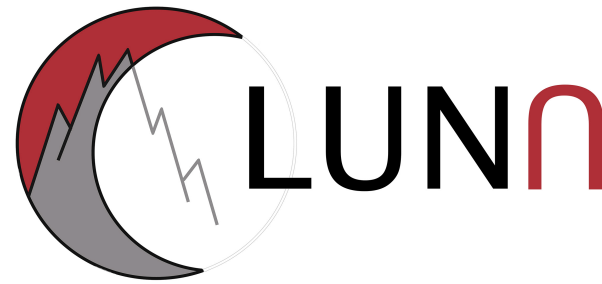
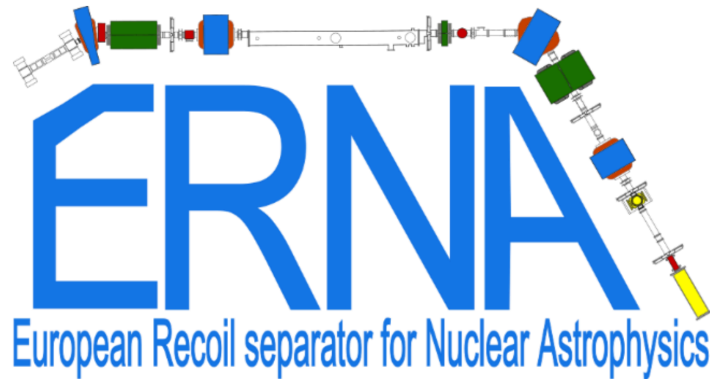
I risultati finali dell' S(E)-factor saranno sottomessi entro fine anno insieme alle implicazioni astrofisiche

# GIANTS



Gruppi Italiani di ASTROFISICA NUCLEARE TEORICA E SPERIMENTALE.







giants.italia@infn.it







# The Importance of the $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ Reaction in Asymptotic Giant Branch Stars

S. Cristallo<sup>1,2</sup> , M. La Cognata<sup>3</sup> , C. Massimi<sup>4,5</sup> , A. Best<sup>6,7</sup>, S. Palmerini<sup>2,8</sup>, O. Straniero<sup>1,9</sup>, O. Trippella<sup>2</sup> , M. Busso<sup>2,8</sup>,  
G. F. Ciani<sup>9,10</sup>, F. Mingrone<sup>11</sup>, L. Piersanti<sup>1,2</sup> , and D. Vescovi<sup>2,10</sup> 

<sup>1</sup> INAF—Osservatorio Astronomico d’Abruzzo, via M. Maggini snc, Teramo, Italy; [sergio.cristallo@inaf.it](mailto:sergio.cristallo@inaf.it)

<sup>2</sup> INFN—Sezione di Perugia, Via A. Pascoli snc, Perugia, Italy

<sup>3</sup> INFN—Laboratori Nazionali del Sud, Via S. Sofia 62, Catania, Italy

<sup>4</sup> Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Bologna, Via Imerio 46, Bologna, Italy

<sup>5</sup> INFN—Sezione di Bologna, Viale Berti Pichat 6/2, Bologna, Italy

<sup>6</sup> Università degli Studi di Napoli “Federico II,” Via Cintia, Napoli, Italy

<sup>7</sup> INFN—Sezione di Napoli, Via Cintia, Napoli, Italy

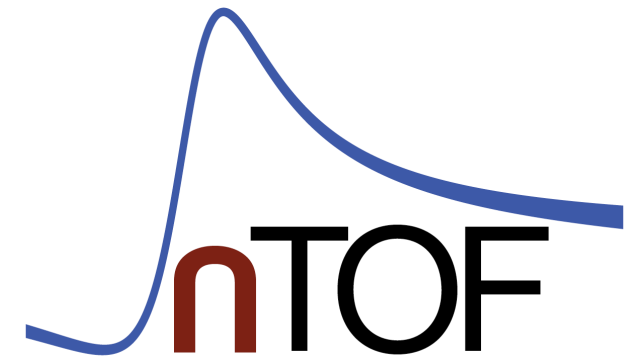
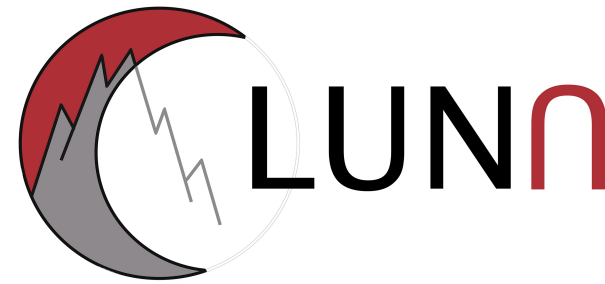
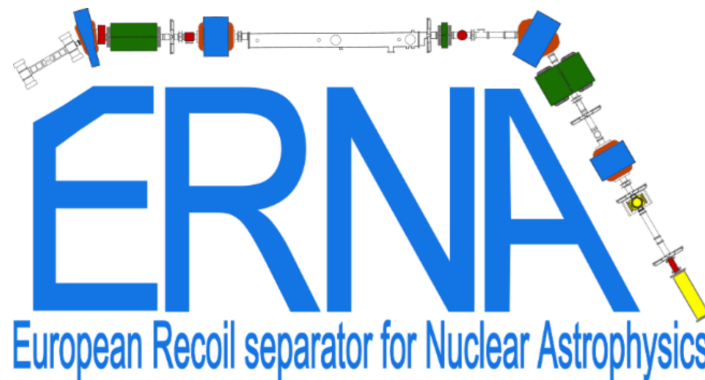
<sup>8</sup> Università degli Studi di Perugia, Via A. Pascoli snc, Perugia, Italy

<sup>9</sup> INFN—Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Via G. Acitelli 22, Assergi, Italy

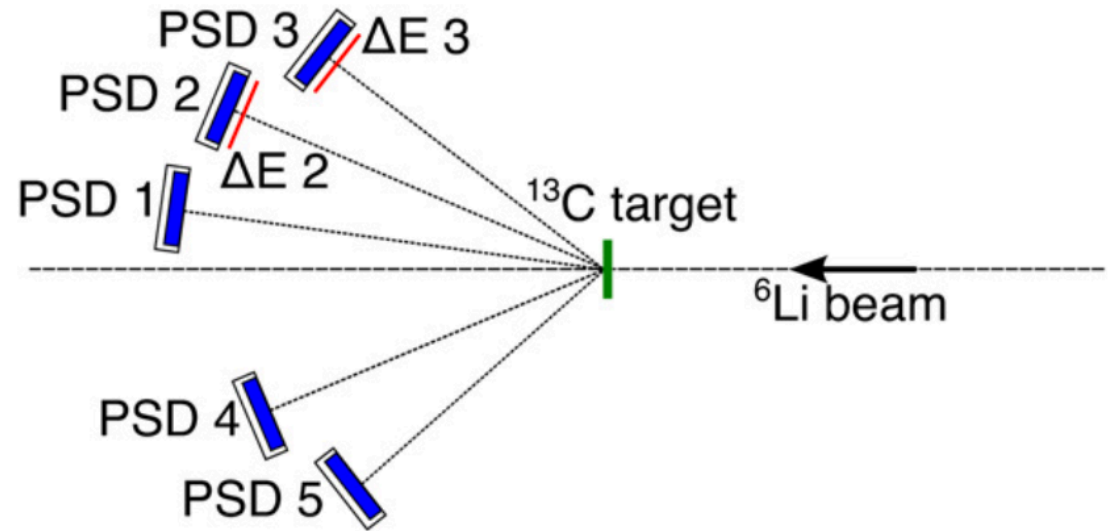
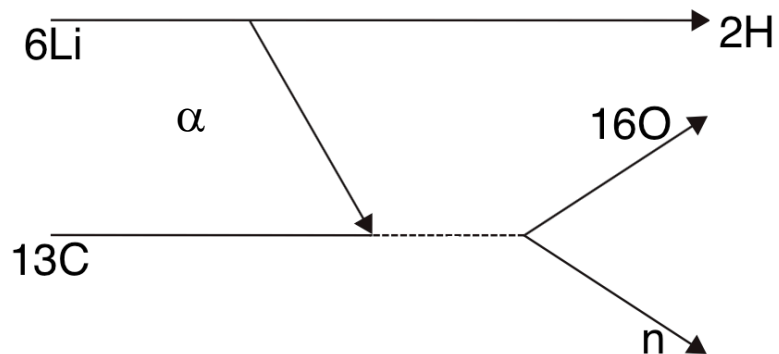
<sup>10</sup> Gran Sasso Science Institute, Viale Francesco Crispi 7, L’Aquila, Italy

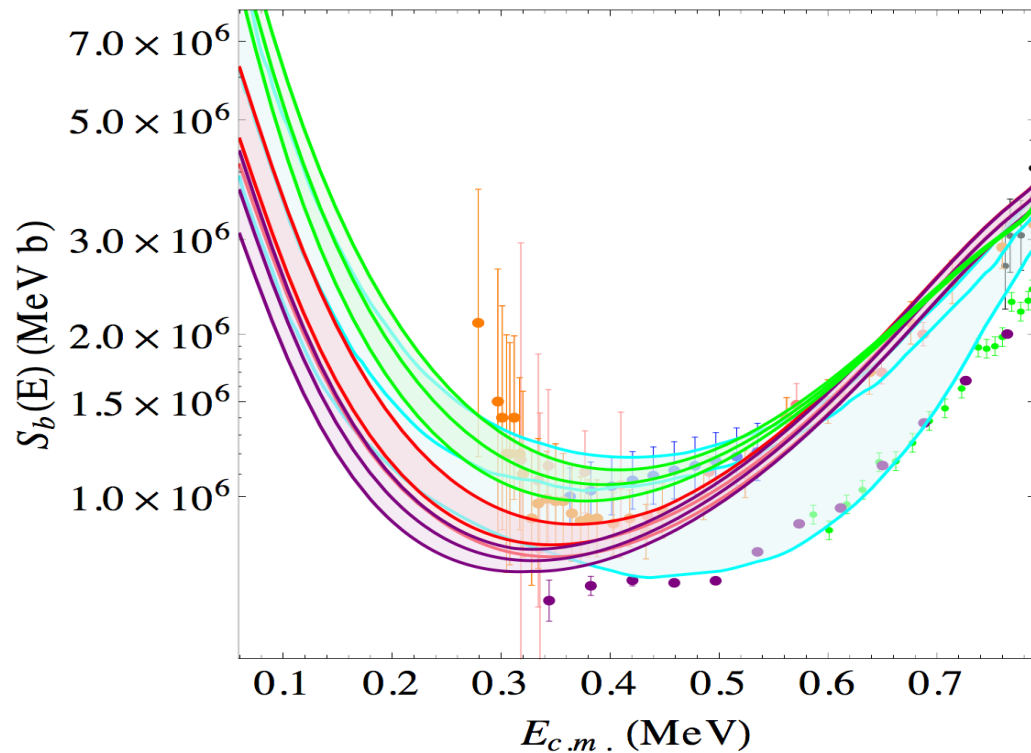
<sup>11</sup> CERN, Route de Meyrin 1211, Genève, France

*Received 2018 March 2; revised 2018 April 27; accepted 2018 April 27; published 2018 May 30*



- **Trojan Horse Method** via  $^{13}\text{C}(^6\text{Li}, n)^{16}\text{O}^2\text{H}$  in regime cinematico “quasi-free” ( $E_b = 7.82$  MeV)
- **Vantaggi:** Evita il problema della repulsione coulombiana e non è sensibile all’ effetto screening
- **Svantaggi:** normalizzazione rispetto a misure dirette





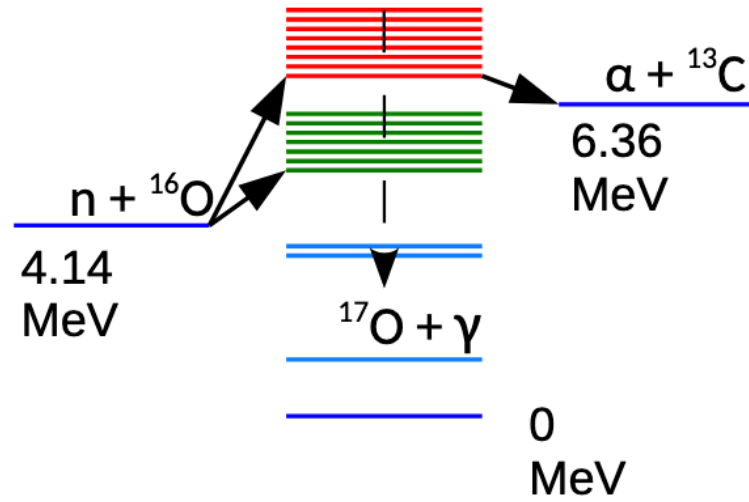
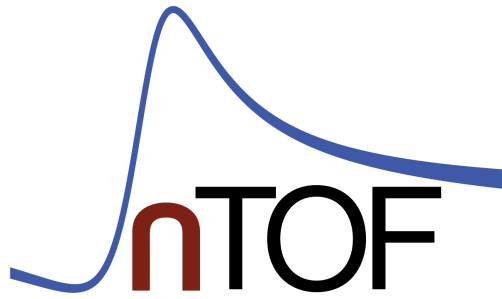
Trippella O. & La Cognata M., *ApJ*, 837, 41 (2017)

**La Cognata et al *The Astrophysical Journal*, 777:143 (2013)** (banda verde) normalizzazione rispetto ad Heil et al ottenendo un valore ANC non compatibile con la letteratura

**Trippella et al *ApJ*, 837, 41 (2017)**, banda rossa, rianalizza i dati dopo che Faesterman rivaluta l'energia della risonanza da -3 a 4.7 keV, dati normalizzati rispetto a Drotleff e Biar & Haas

Le misure del THM hanno indicato la necessità di misure più accurate a bassa energia

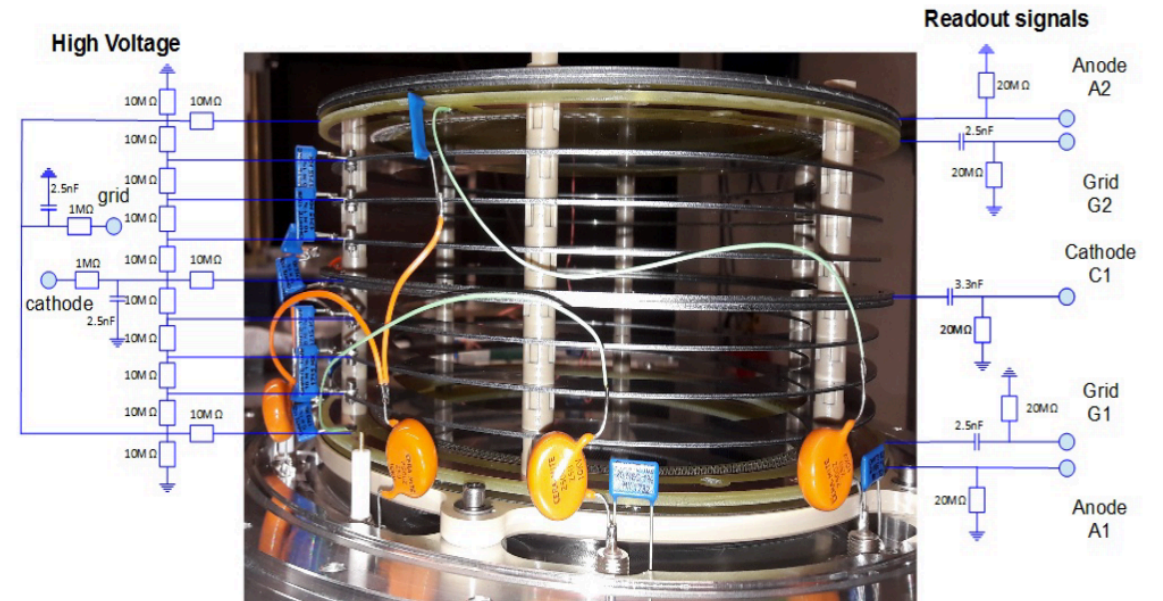




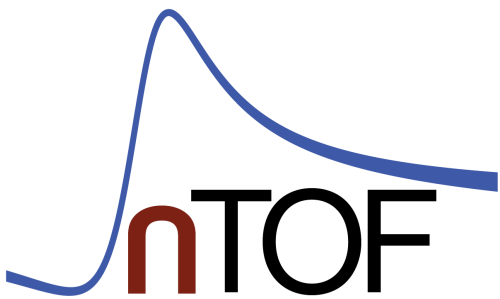
Comunicazione privata C. Massimi (Unibo & INFN Bo)

- **Misura reazione inversa:**  $^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}$  + principio dettagliato
- **Vantaggi:** Fascio di neutroni aggira il problema della barriera Coulombiana
- **Svantaggi:** bisogna misurare  $\alpha$  di centinaia di keV

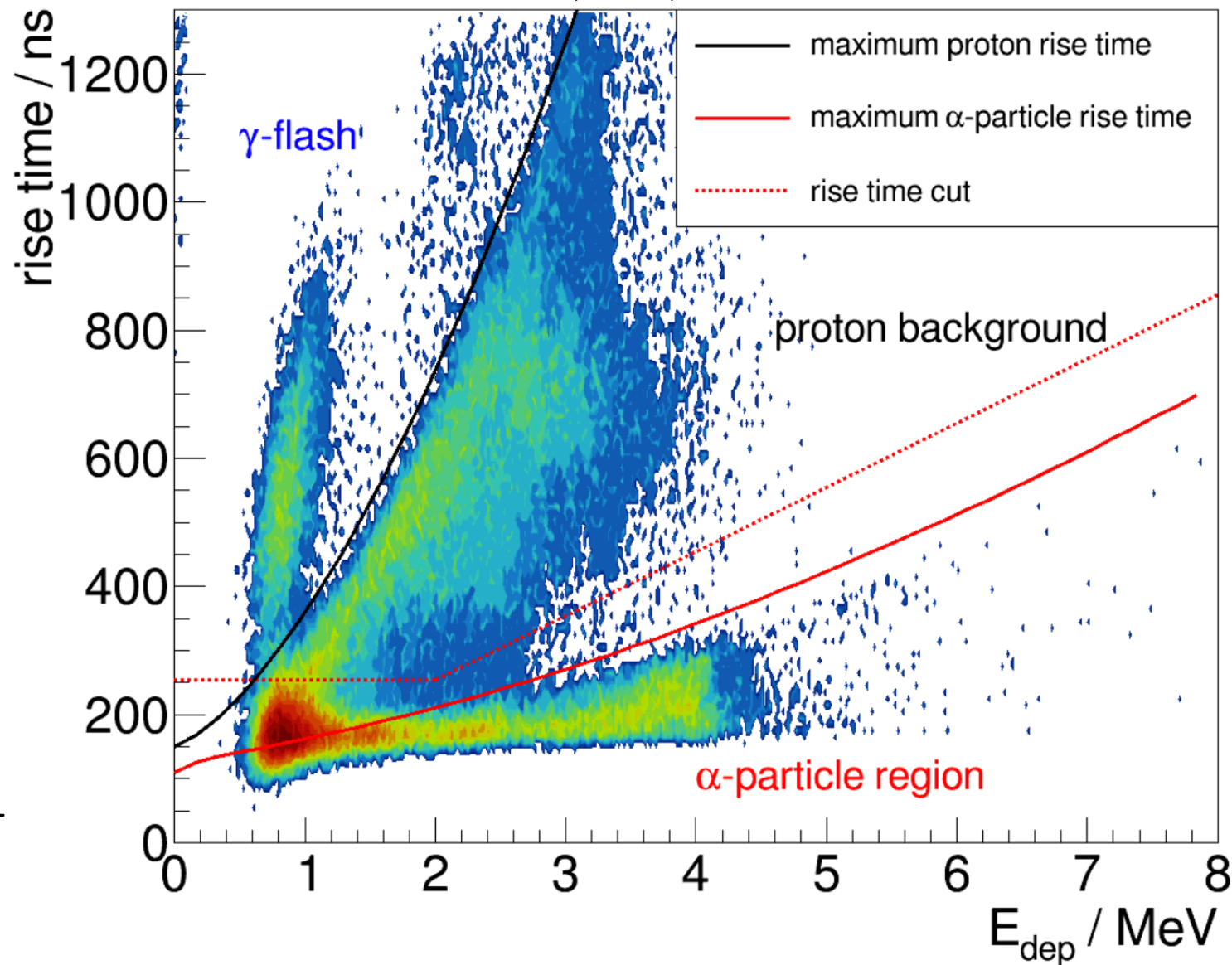
misura effettuata a EAR2,  $E_n = 2.2$  MeV ( $1E5$  n/bunch)



Double Frisch Grid Ionisation Chambers (DFGIC) costruita all' Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)

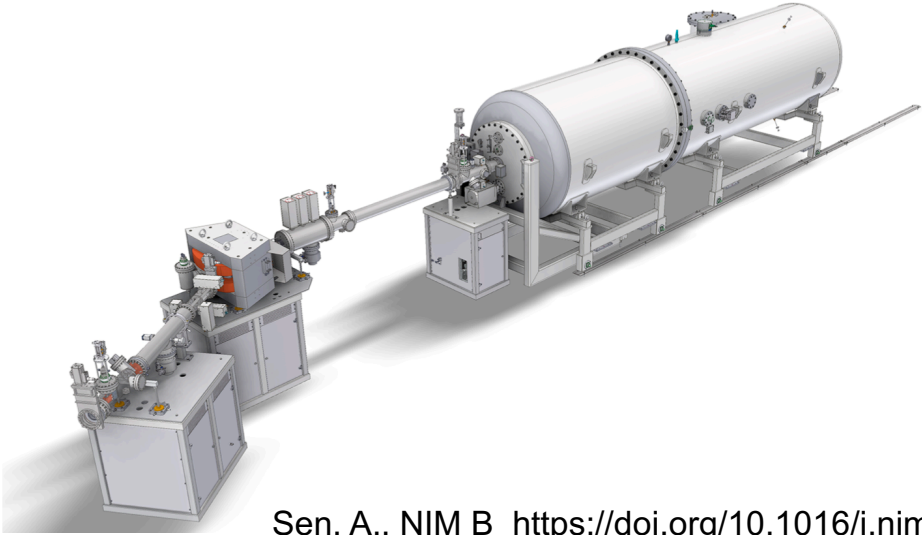


$$\text{rise time} = t_{An,1} - t_{An,0} = t_{\text{track}} + t_{AG}$$



Analisi in corso,  
misure continueranno nel 2021

# Accelerator MV facility: verso una misura completa ad alte energie



Sen, A., NIM B <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.09.016>

LUNA: il programma scientifico (2021 ....)

- $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ : con target solidi e rivelatori gamma e di particelle cariche
- $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ : know how dalla misura a bassa energia
- $^{22}\text{Ne}(\alpha,n)^{25}\text{Mg}$ : gas target di  $^{22}\text{Ne}$  arricchito (progetto ERC SHADES di A.Best, Università & INFN Napoli)

| Beam intensity on target at different terminal voltage |                   |                    |
|--|-------------------|--------------------|
| Ion specie   | Terminal Voltage  |                    |
|  | 0.3 MV – 0.5 MV   | 0.5 MV - 3.5 MV    |
| $^1\text{H}^+$   | 500 $\mu\text{A}$ | 1000 $\mu\text{A}$ |
| $^4\text{He}^+$  | 300 $\mu\text{A}$ | 500 $\mu\text{A}$  |
| $^{12}\text{C}^+$                                      | 100 $\mu\text{A}$ | 150 $\mu\text{A}$  |
| $^{12}\text{C}^{2+}$                                   | 60 $\mu\text{A}$  | 100 $\mu\text{A}$  |

L'installazione della facility MV (2021) ai LNGS permetterà la misura della  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  ad alte energie e permetterà di ottenere un unico dataset con tutte le incertezze sotto controllo

# CONCLUSIONI

- Per la prima volta una misura diretta effettuata all'interno del picco di Gamow
  - energia minima 50 keV inferiore rispetto a Drotleff
  - incertezza totali < 20%
- La sinergia dalla comunità italiana di astrofisica nucleare e la complementarità delle tecniche usate daranno un contributo fondamentale ad approfondire gli studi sulla  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  (e non solo!)





## LA COLLABORAZIONE LUNA



<http://luna.lngs.infn.it>



- A. Boeltzig, G. F. Ciani, M. Junker | LNGS, Assergi, Italy
- F. Barile, G. D'Erasmus, E. Fiore, V. Mossa, F. Pantaleo, V. Patichio, L. Schiavulli, A. Valentini | Università di Bari and INFN Bari, Italy
- M. Lugaro | Konkoly Observatory, Hungarian Academy of Sciences, Debrecen, Hungary
- L. Csedreki, Z. Elekes, Zs. Fülöp, Gy. Gyurky, T. Szücs | INR MTA-ATOMKI Debrecen, Hungary
- D. Bemmerer, K. Stoeckel, | HZDR, Dresden, Germany
- M. Aliotta, C.G. Bruno, T. Chillery, T. Davinson | University of Edinburgh
- P. Corvisiero, F. Ferraro, P. Prati, S. Zavatarelli | Università di Genova and INFN Genova, Italy
- R. Perrino | INFN Lecce, Italy
- A. Guglielmetti, E. Masha | Università di Milano and INFN Milano, Italy
- J. Balibrea, A. Best, A. Di Leva, **G. Imbriani** | Università di Napoli "Federico II" and INFN Napoli, Italy
- C. Brogгинi, A. Caciolli, R. Depalo, P. Marigo, R. Menegazzo, D. Piatti | Università di Padova and INFN Padova, Italy
- C. Gustavino, A. Formicola | INFN Roma1, Italy
- O. Straniero | Osservatorio Astronomico di Collurania, Teramo, Italy
- F. Cavanna, P. Colombetti, G. Gervino | Università di Torino and INFN Torino, Italy