

Sezioni d'urto nucleari per la fisica del Sole con LUNA

Federico Ferraro

per la collaborazione LUNA

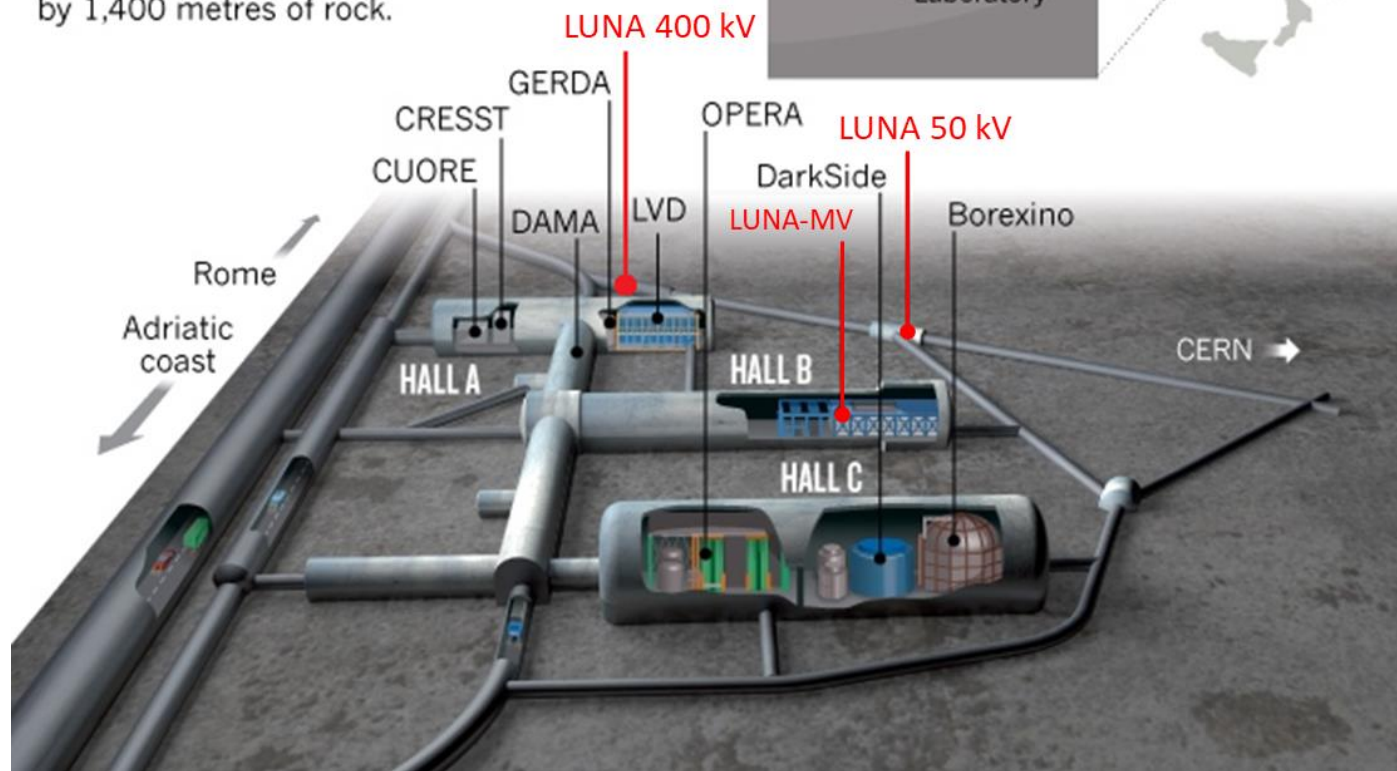
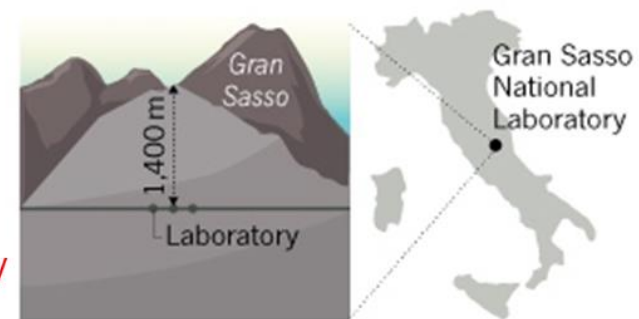
INFN- Laboratori Nazionali del Gran Sasso



LUNN
Laboratory for Underground
Nuclear Astrophysics

THE A, B AND C OF GRAN SASSO

Experiments at the Gran Sasso National Laboratory are housed in and around three huge halls carved deep inside the mountain, where they are shielded from cosmic rays by 1,400 metres of rock.

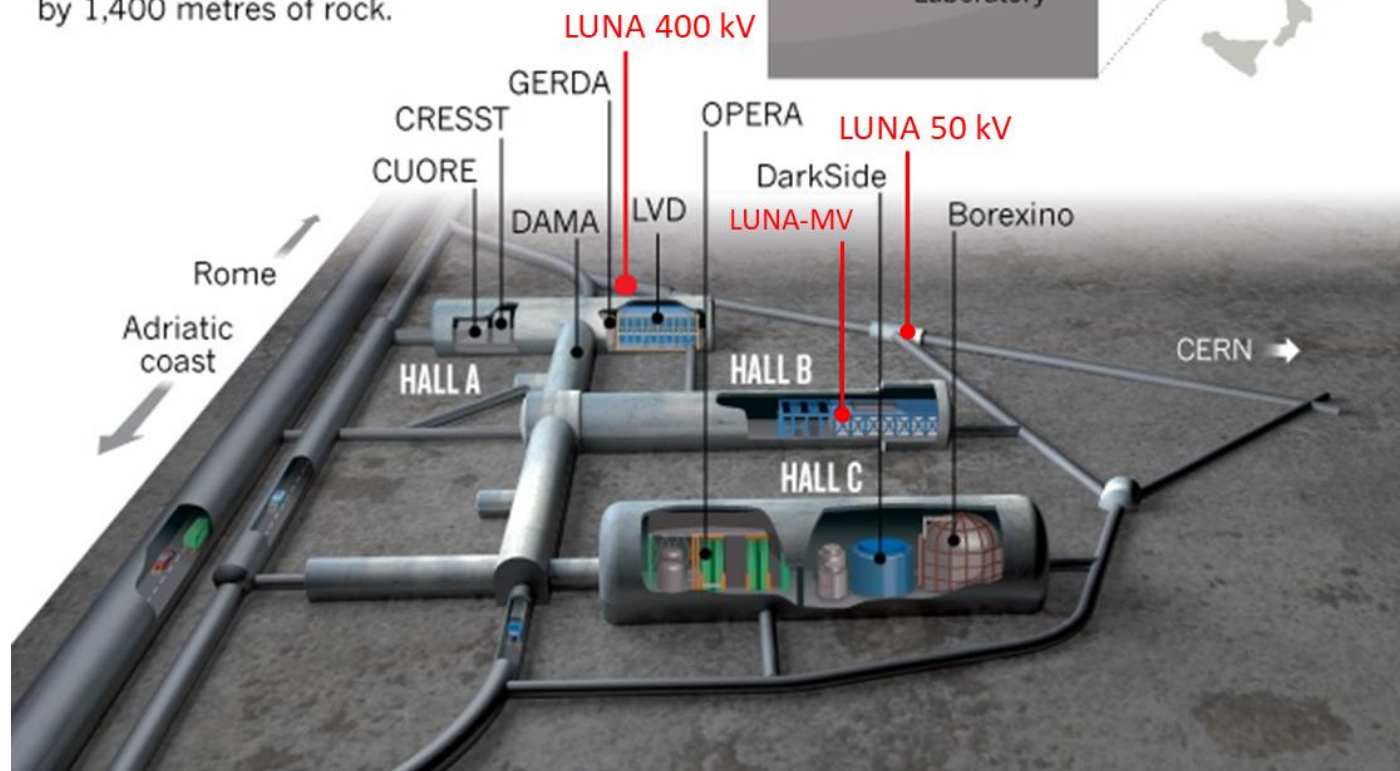
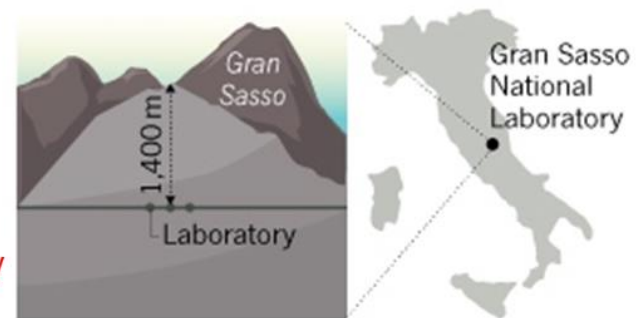




1991-2001: LUNA 50 kV
 2000-oggi: LUNA 400 kV
 oggi-???? LUNA-MV

THE A, B AND C OF GRAN SASSO

Experiments at the Gran Sasso National Laboratory are housed in and around three huge halls carved deep inside the mountain, where they are shielded from cosmic rays by 1,400 metres of rock.

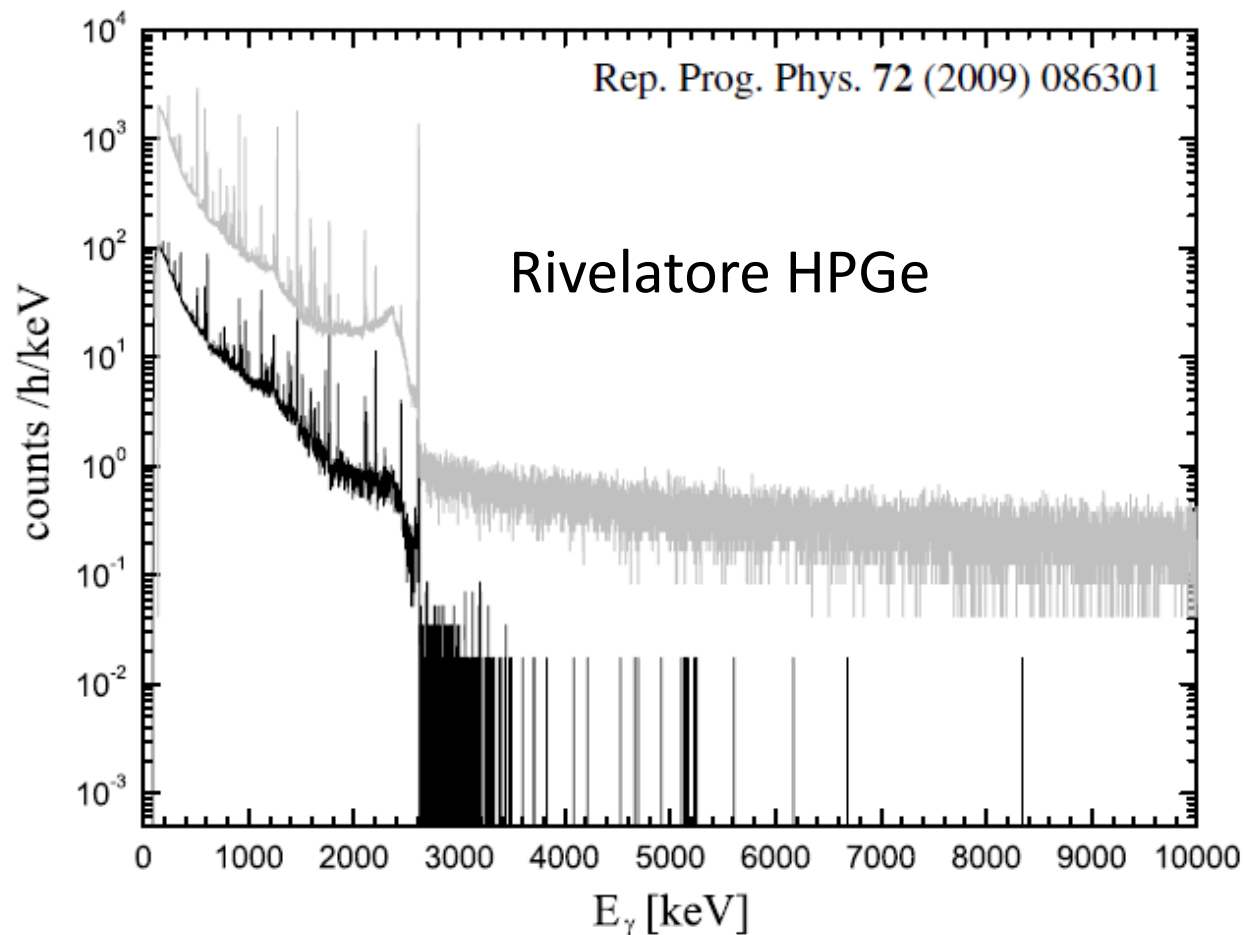
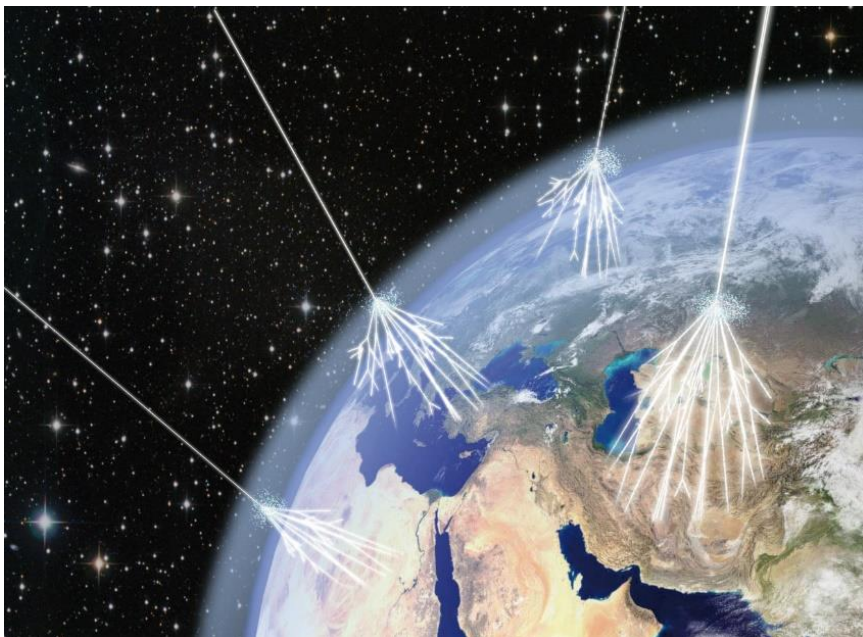


A chi dobbiamo l'idea?



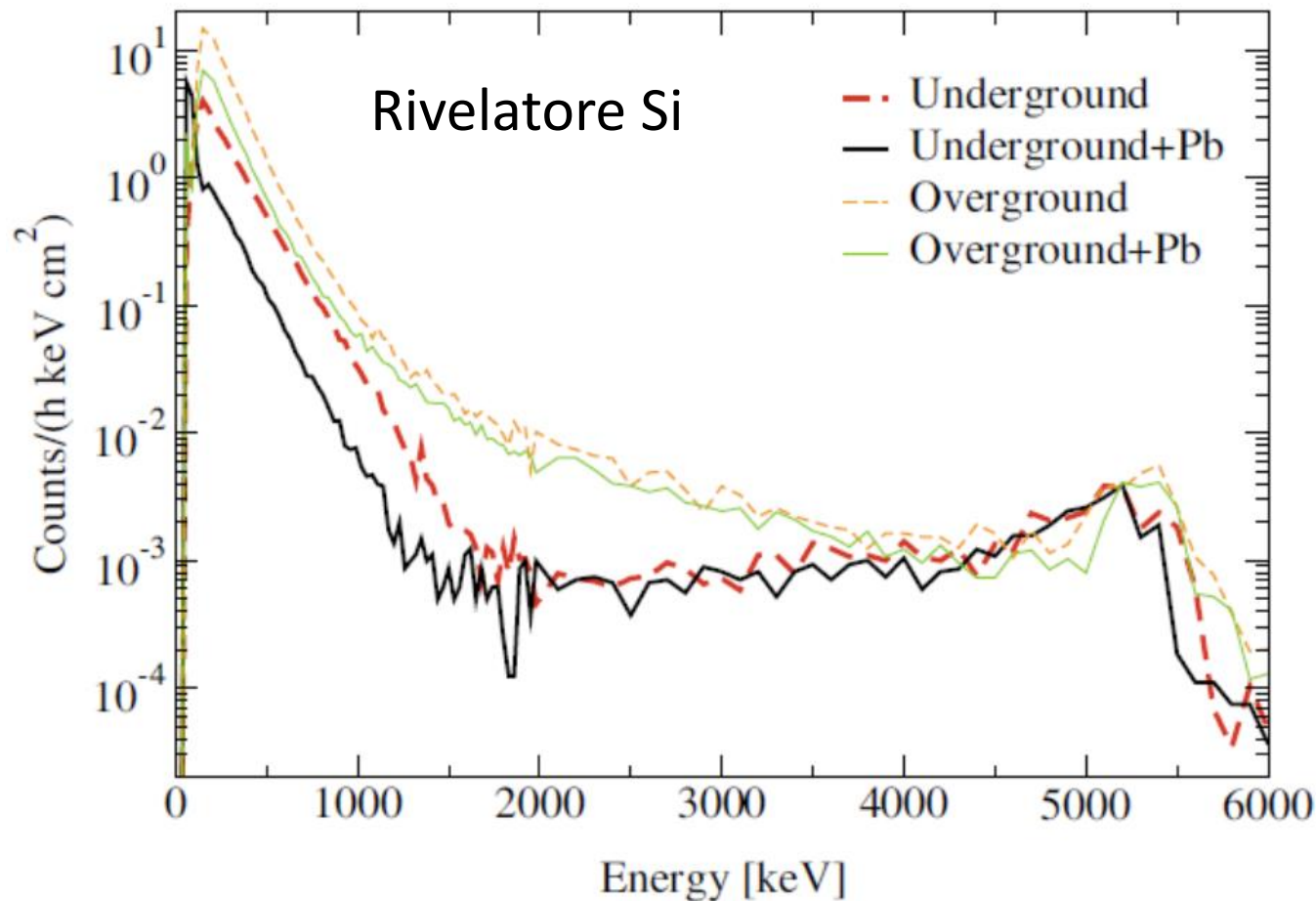
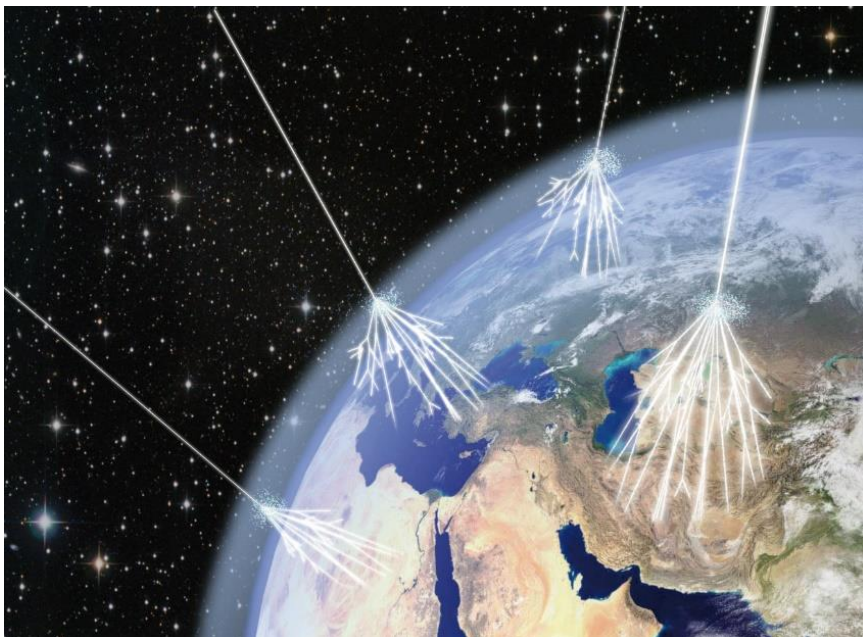
Perché mettere un acceleratore nei LNGS?

I raggi cosmici producono molti muoni, che in superficie interagiscono con i rivelatori, nascondendo i **segnali interessanti**

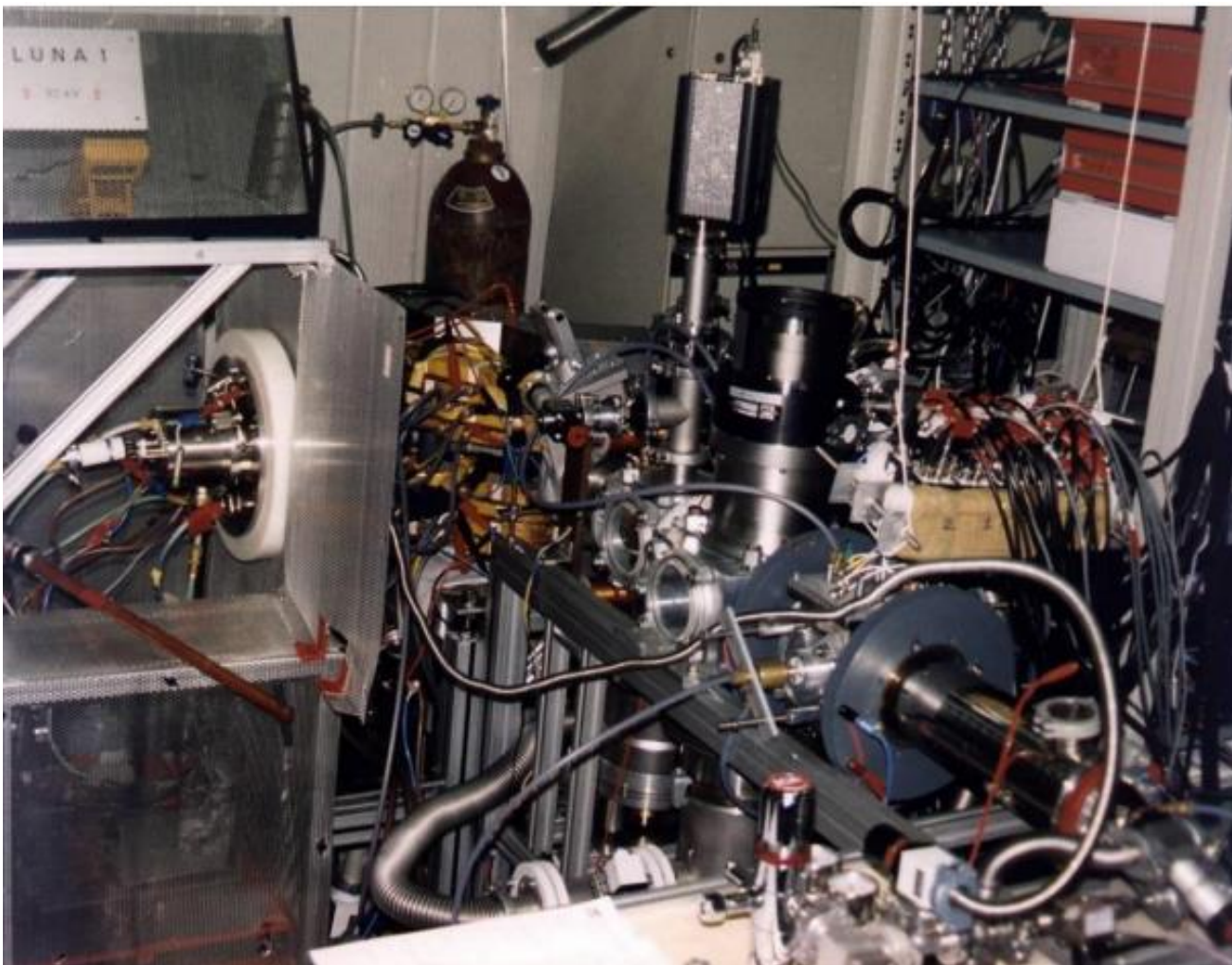


Perché mettere un acceleratore nei LNGS?

I raggi cosmici producono molti muoni, che in superficie interagiscono con i rivelatori, nascondendo i **segnali interessanti**



LUNA 50 kV



Acceleratore elettrostatico

Fasci: p, ^3He , ^4He

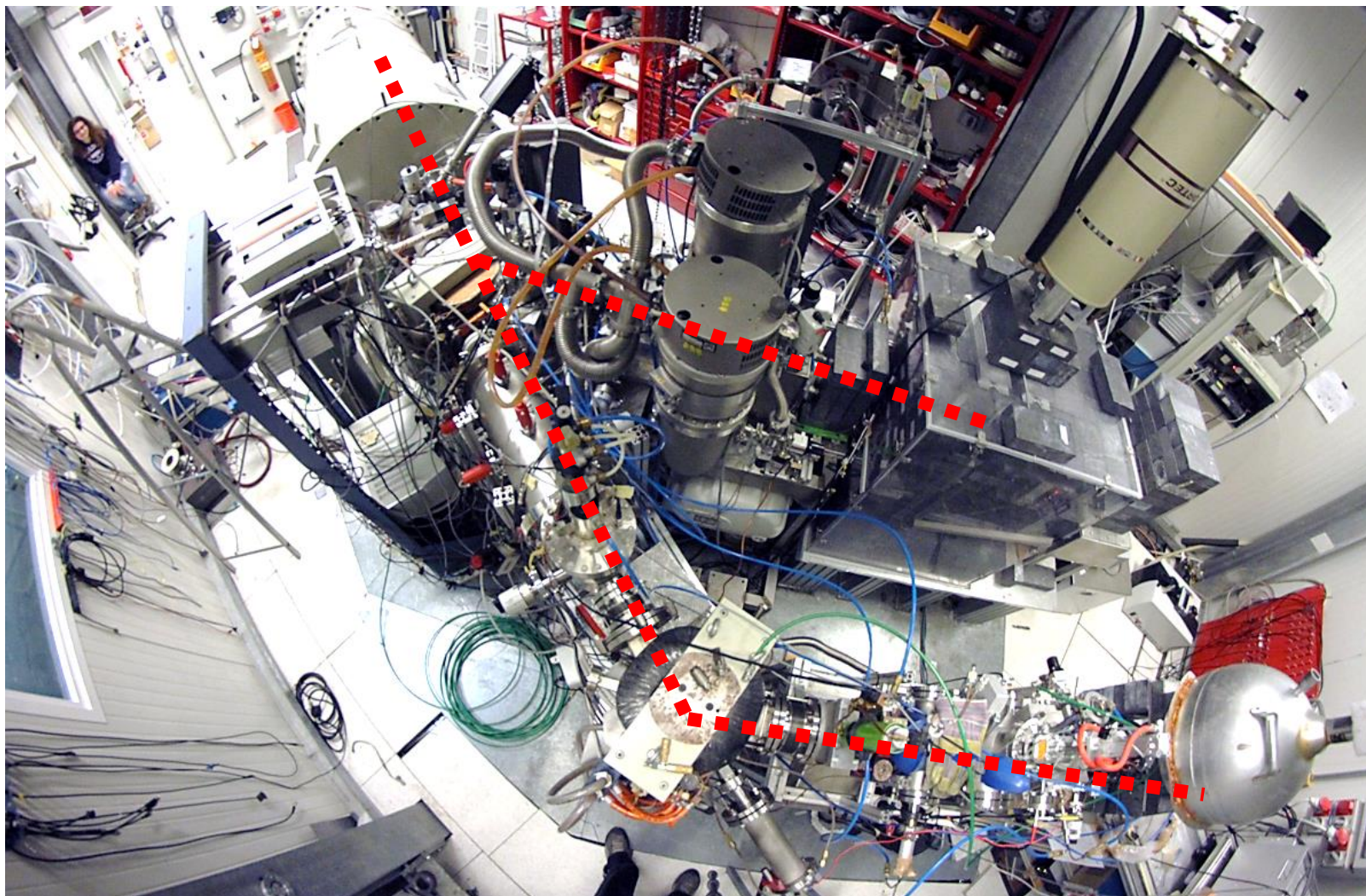
Tensione: 3-50 kV

Corrente: fino a 500 μA

Energy spread: 20 eV

Stabilità: 0.4 eV/h

LUNA 400 kV



Acceleratore elettrostatico

Fasci: p, ^3He , ^4He

2 linee di fascio: gassoso/solido

Tensione: 50-400 kV

**Corrente: fino a: 1 mA per H^+
500 μA per He^+**

Energy spread: 0.1 keV

Stabilità: 5 eV/h

LUNA MV (parte della IBF dei LNGS)



Acceleratore elettrostatico

Fasci: p, ^3He , ^4He , ^{12}C

2 linee di fascio: gassoso/solido

Tensione: 400 kV – 3.5 MV

Corrente: fino a 1 e mA per H^+
500 e μA per He^+
150 e μA per C^+
100 e μA per C^{++}

Terminal Voltage spread: 0.01% TV o 50V

Stabilità del Terminal Voltage: 0.001% TV / h

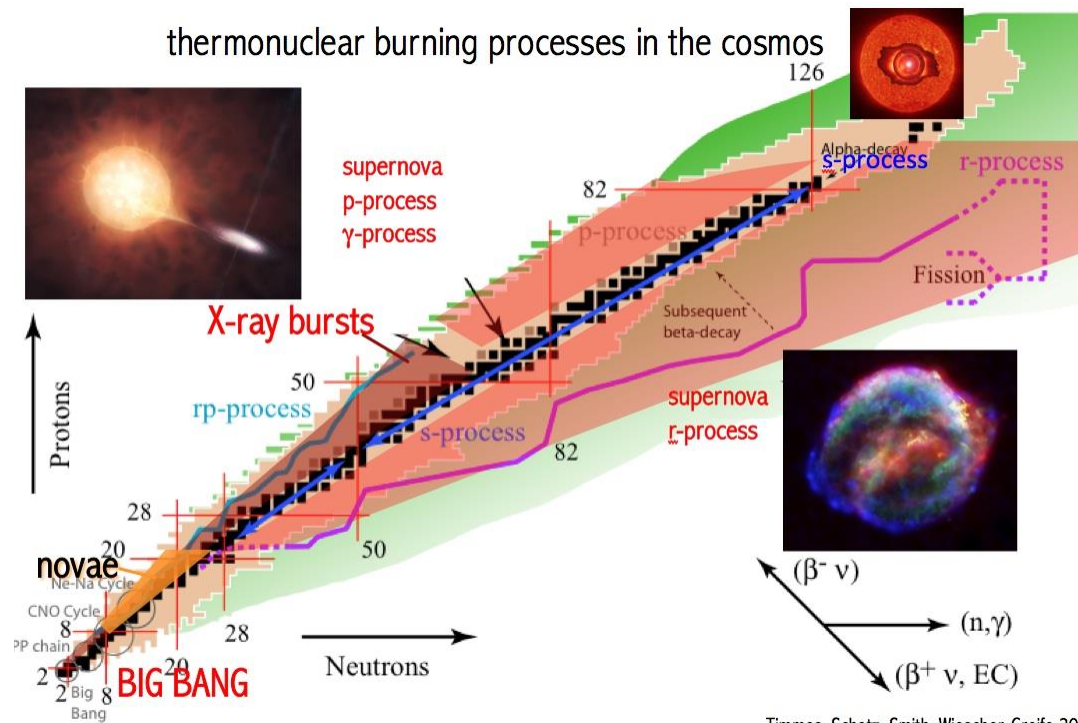
Stabilità della corrente: < 5% / h

Cosa studia LUNA?



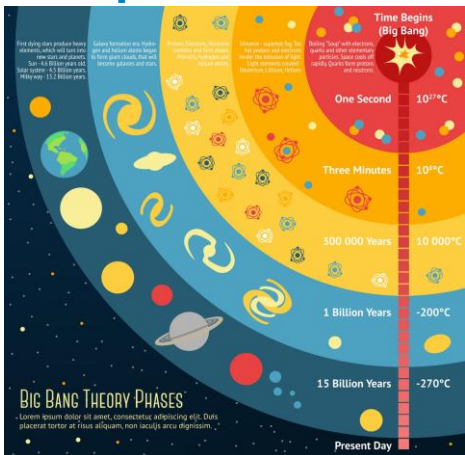
Laboratory for
Underground

**Nuclear
Astrophysics**

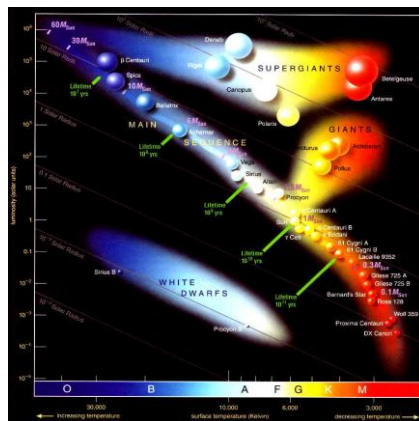


Sezioni d'urto nucleari

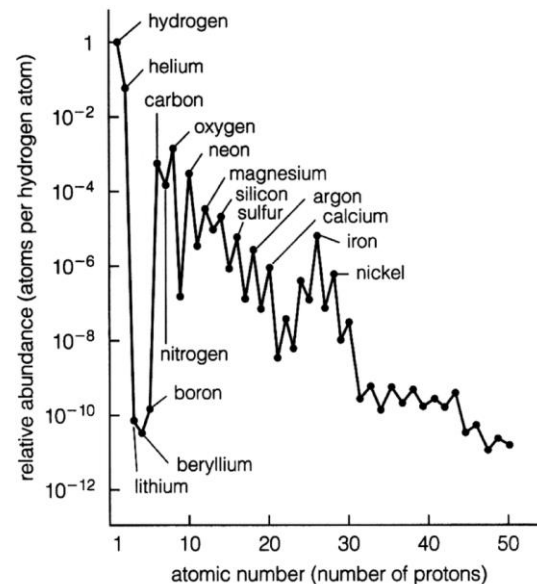
Evoluzione dell'universo primordiale



Evoluzione stellare

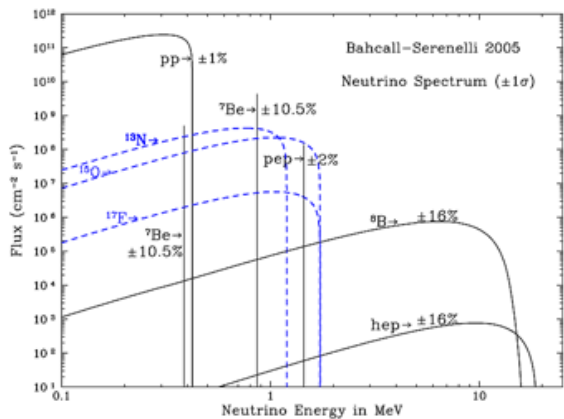


Nucleosintesi

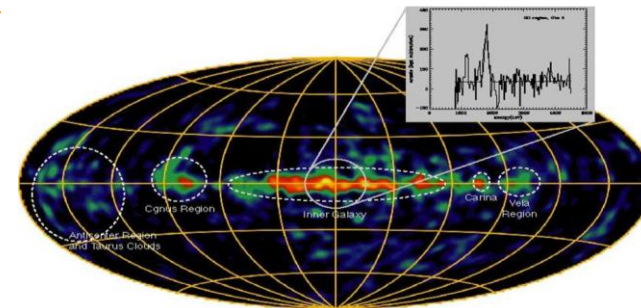


Sezioni d'urto nucleari

Neutrini solari



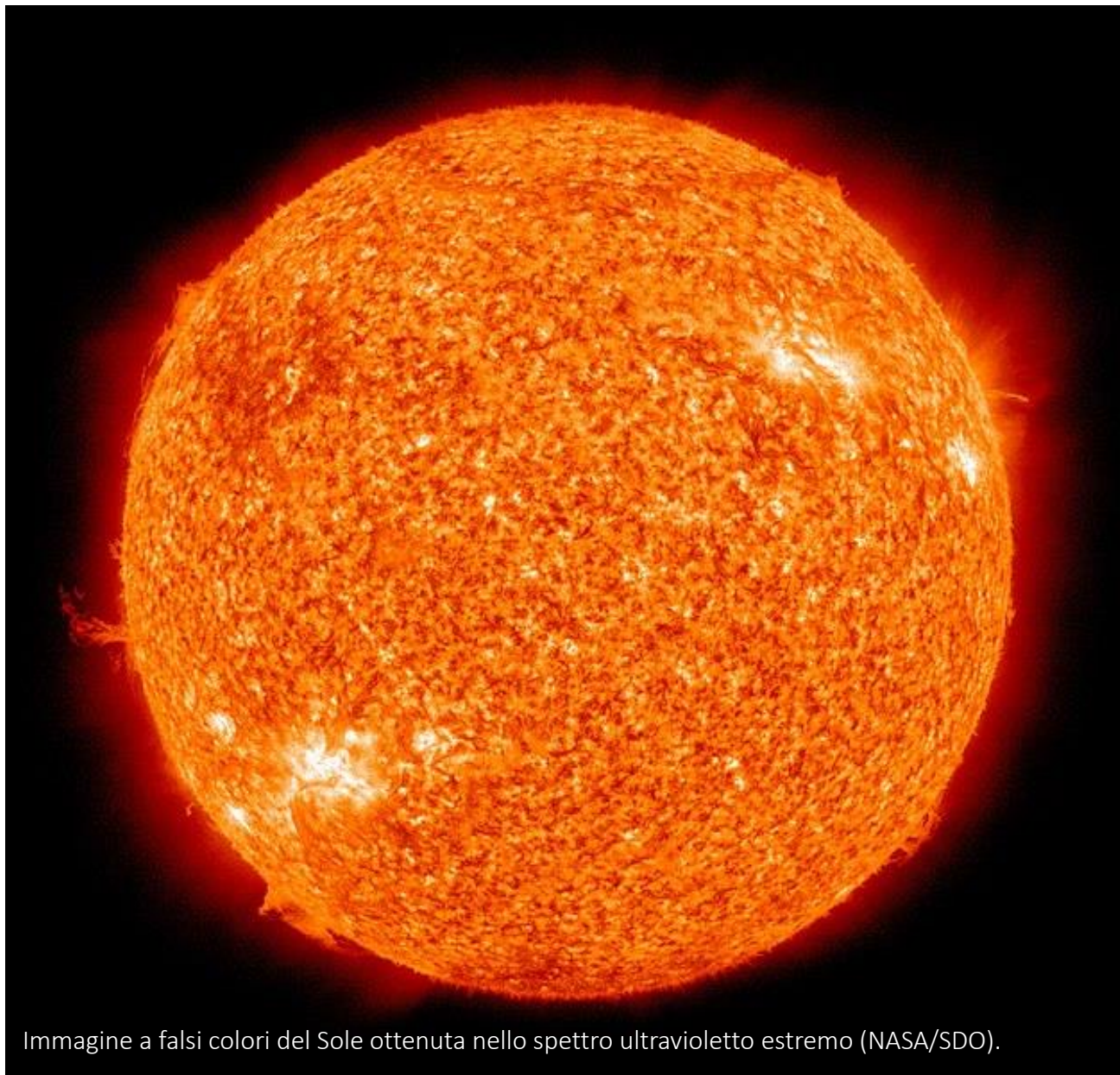
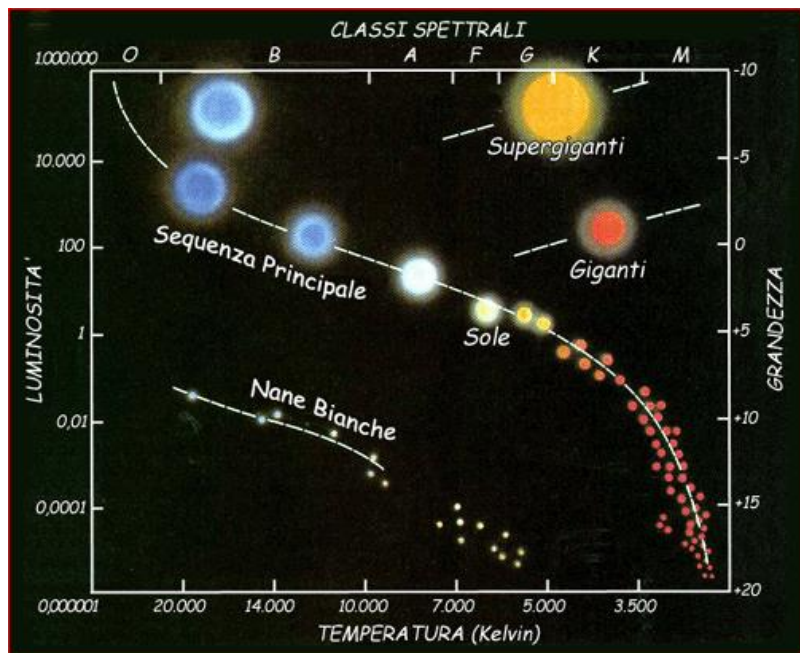
Astronomia



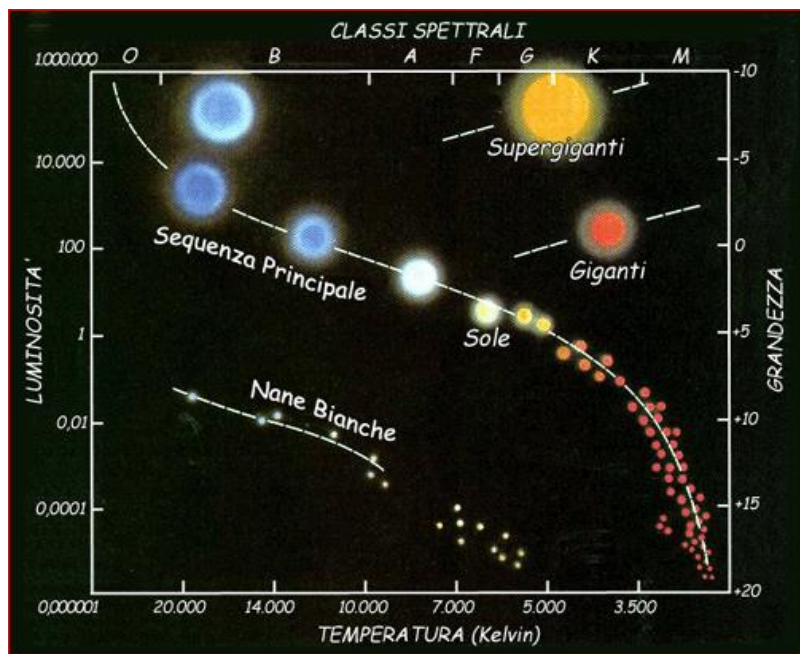
(Oberlack et al., 1996; Pluschke et al., 2001)

Formazione ed evoluzione del Sistema Solare

Il Sole è una stella in Sequenza Principale



Il Sole è una stella in Sequenza Principale



Nella parte centrale (nucleo) avviene la **combustione dell'idrogeno**

Un insieme di processi che portano alla formazione di un nucleo di elio a partire da 4 nuclei di idrogeno

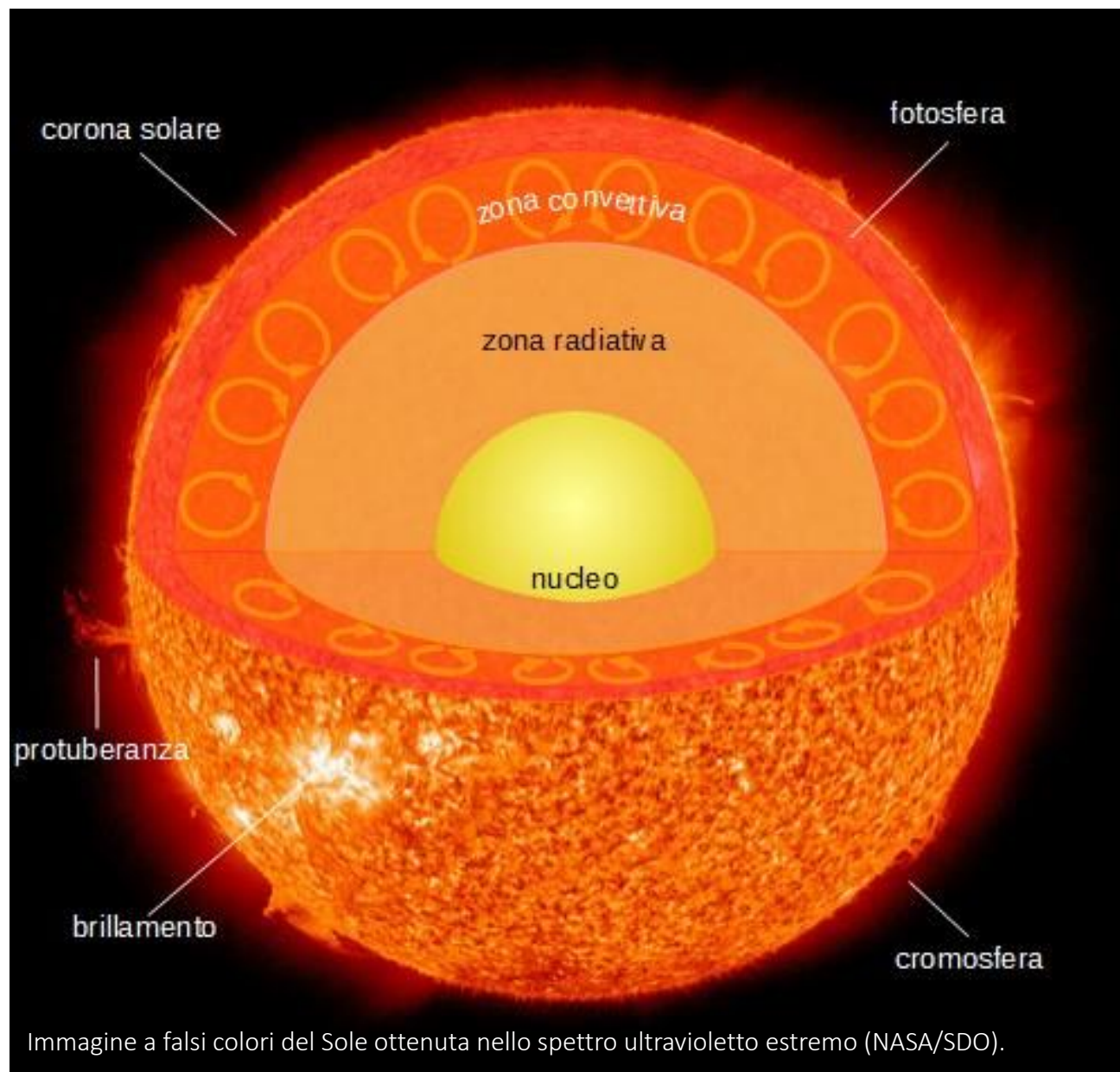
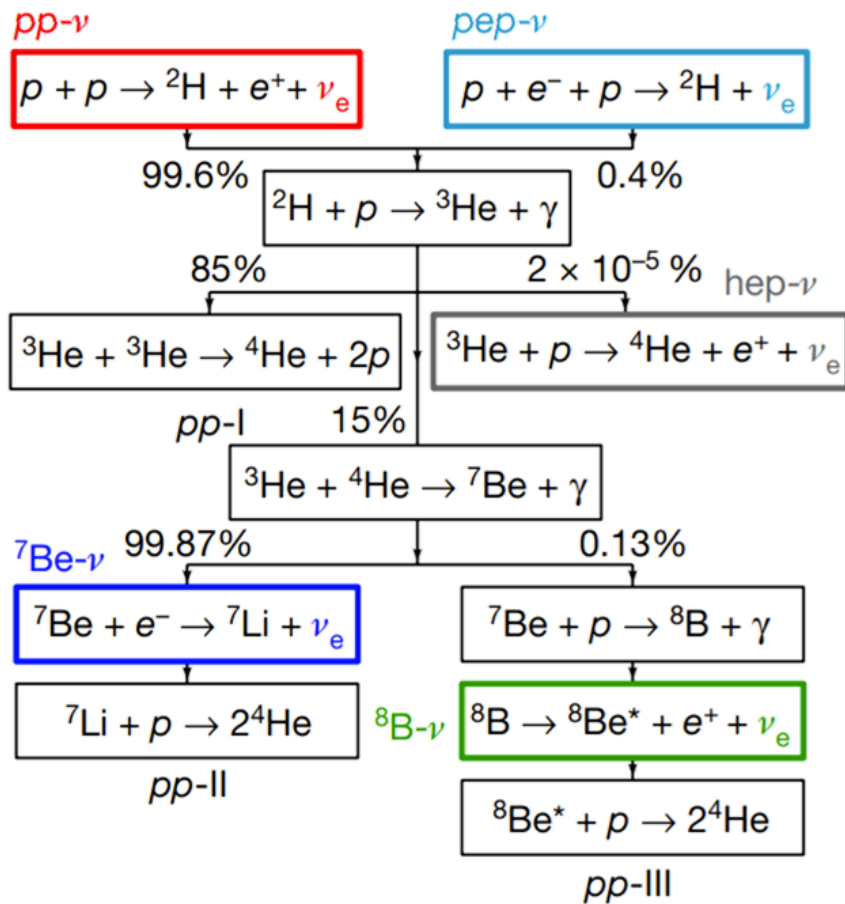
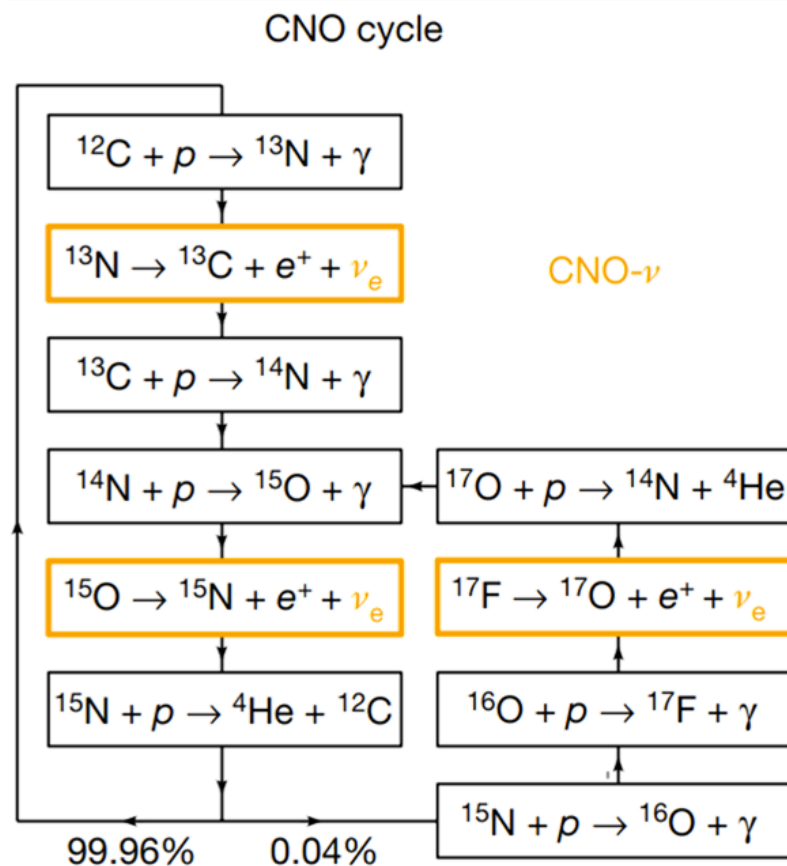


Immagine a falsi colori del Sole ottenuta nello spettro ultravioletto estremo (NASA/SDO).

pp chain

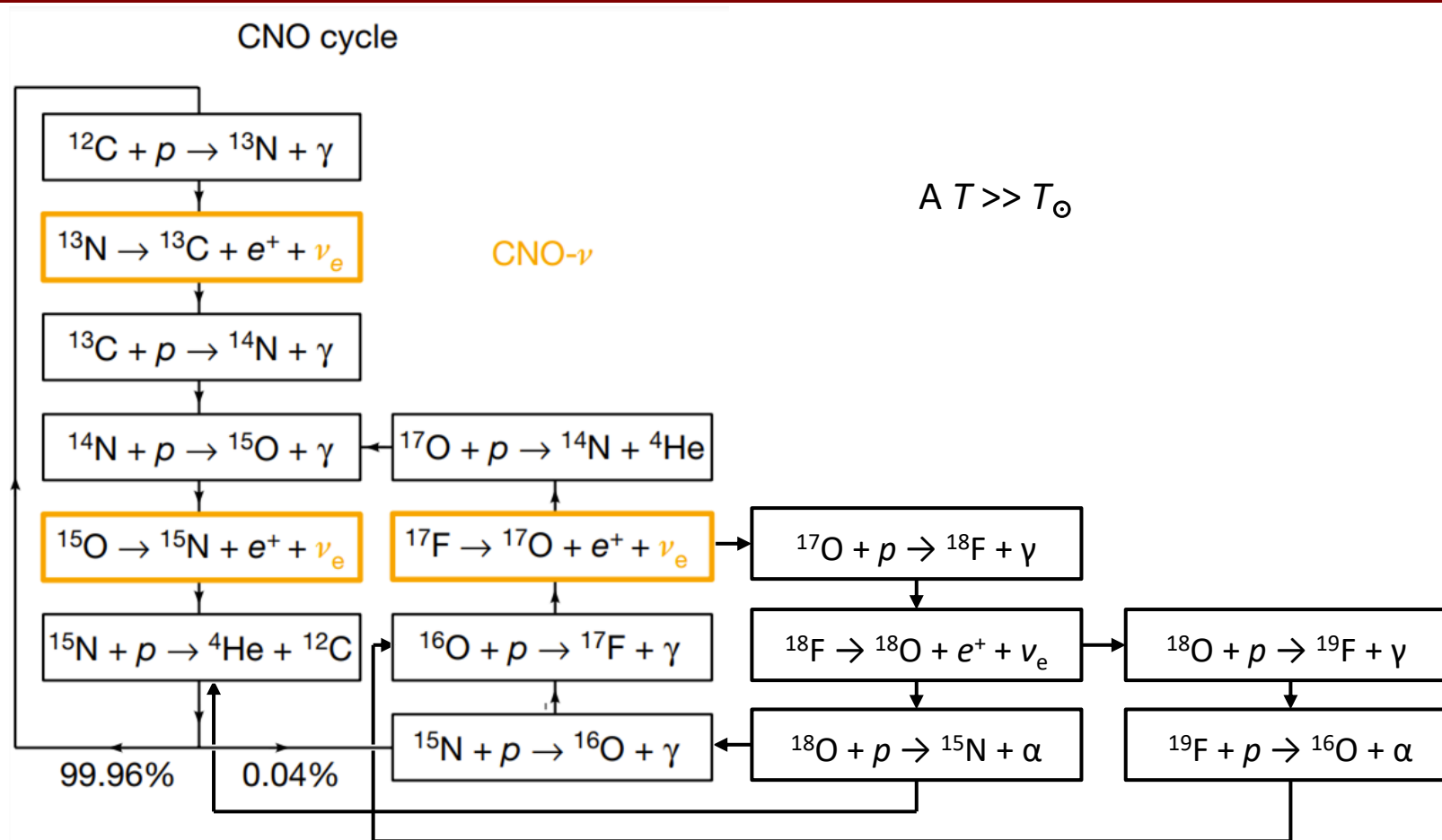
Un'insieme di processi che portano alla formazione di un nucleo di elio a partire da 4 nuclei di idrogeno

Image adapted from "The Borexino Collaboration. Comprehensive measurement of *pp*-chain solar neutrinos. *Nature* 562, 505–510 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0624-y>"



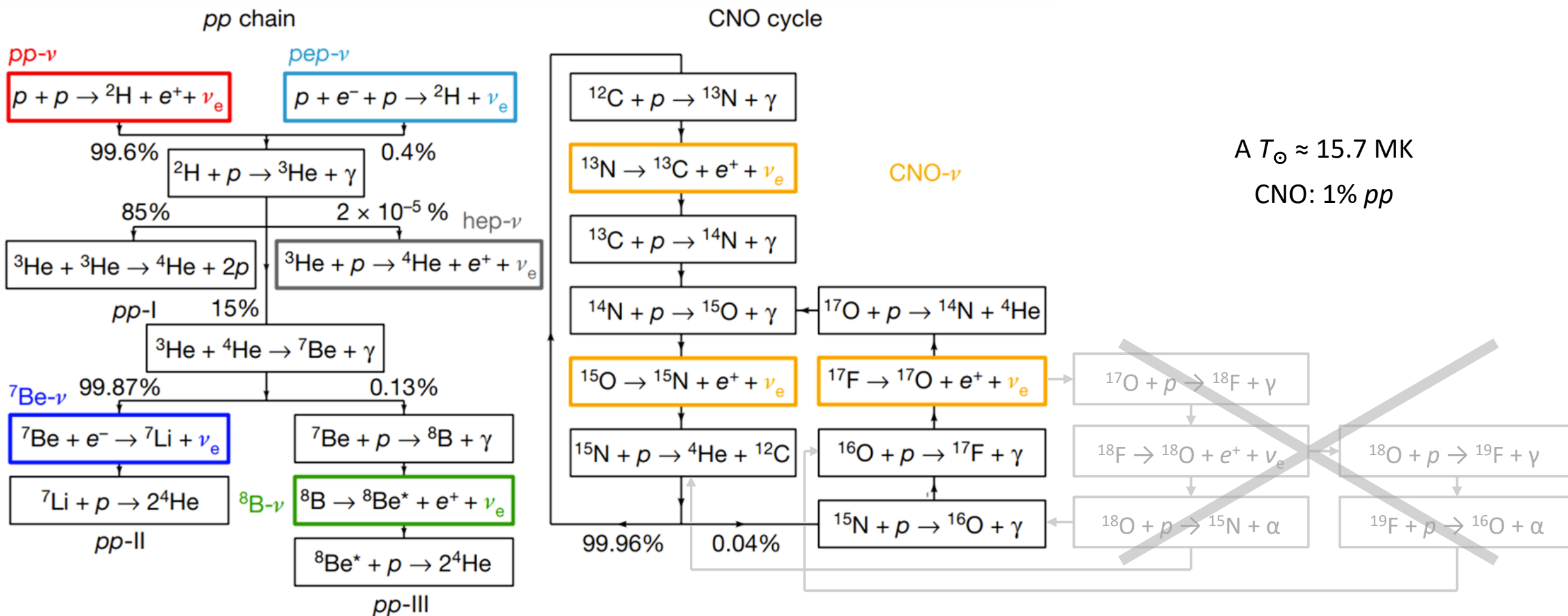
Un'insieme di processi che portano alla formazione di un nucleo di elio a partire da 4 nuclei di idrogeno

Image adapted from "The Borexino Collaboration. Comprehensive measurement of pp -chain solar neutrinos. *Nature* 562, 505–510 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0624-y>"



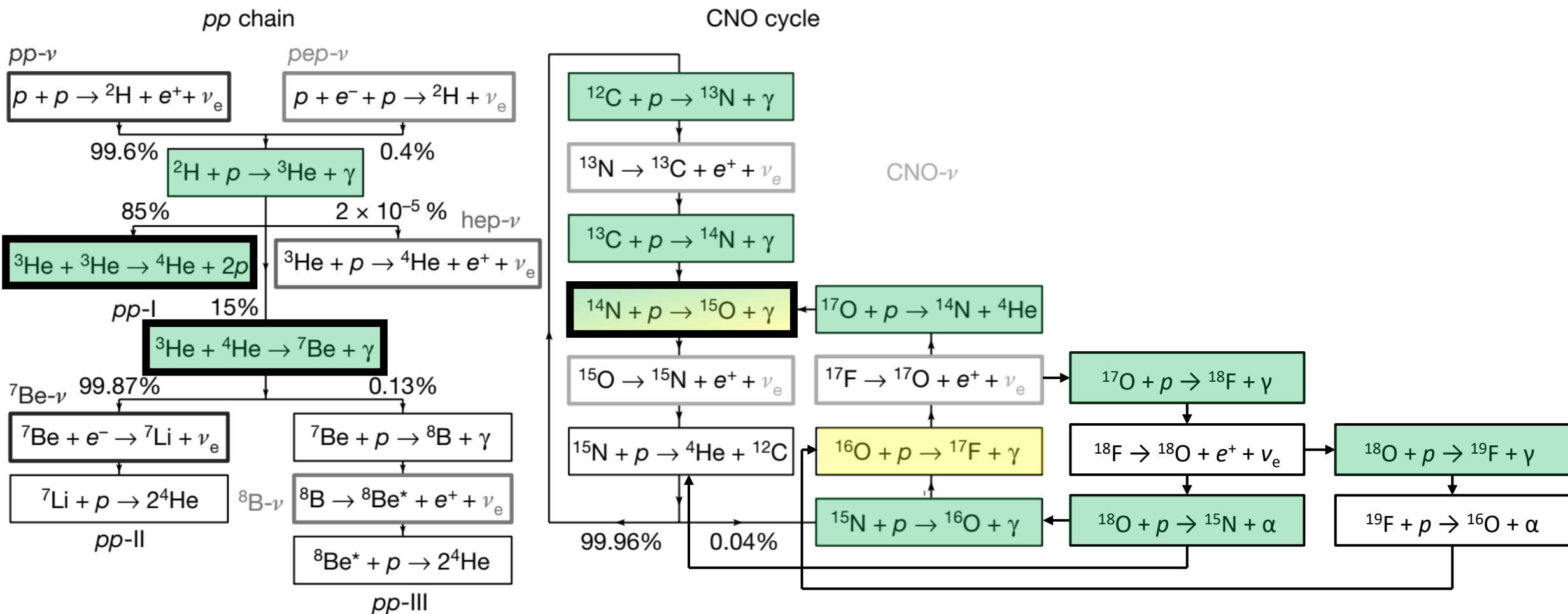
Un'insieme di processi che portano alla formazione di un nucleo di elio a partire da 4 nuclei di idrogeno

Image adapted from "The Borexino Collaboration. Comprehensive measurement of pp -chain solar neutrinos. *Nature* 562, 505–510 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0624-y>"



Un'insieme di processi che portano alla formazione di un nucleo di elio a partire da 4 nuclei di idrogeno

Image adapted from "The Borexino Collaboration. Comprehensive measurement of *pp*-chain solar neutrinos. *Nature* 562, 505–510 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0624-y>"



Un'insieme di processi che portano alla formazione di un nucleo di elio a partire da 4 nuclei di idrogeno

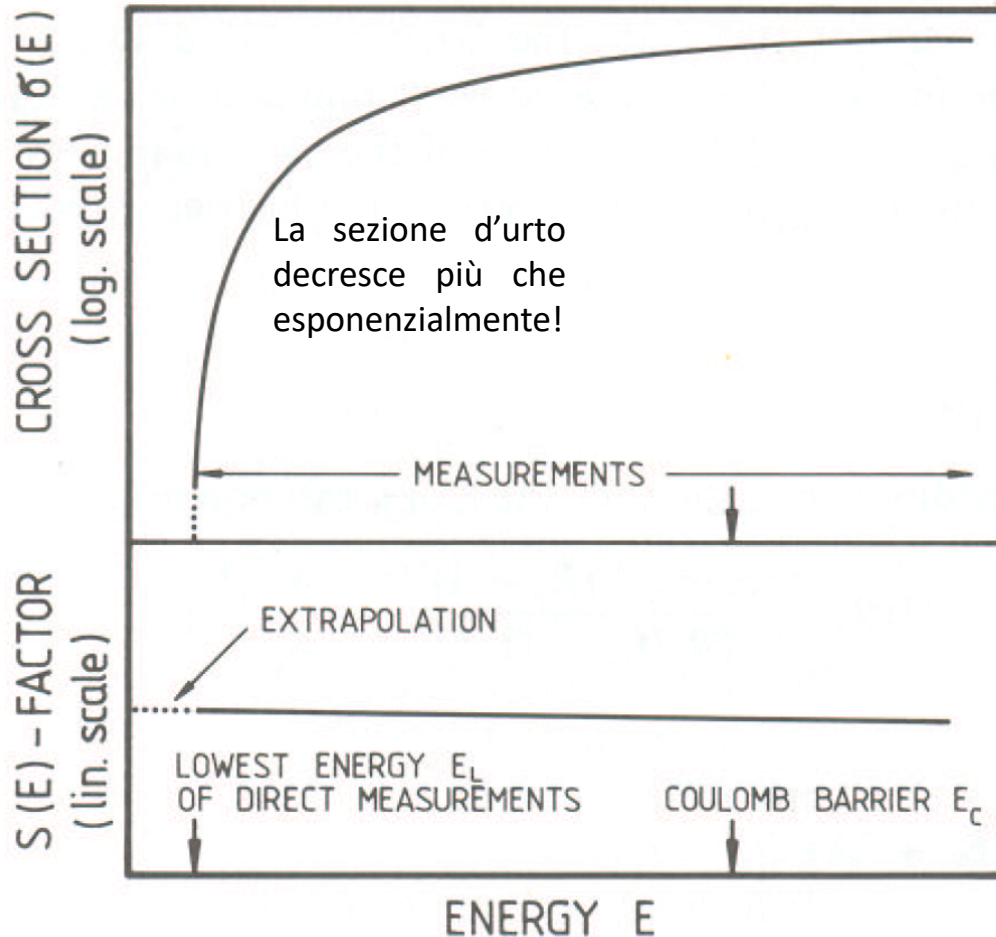
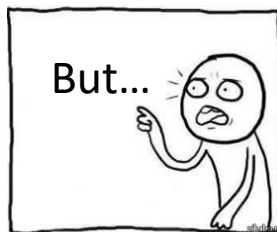
Image adapted from "The Borexino Collaboration. Comprehensive measurement of pp -chain solar neutrinos. *Nature* 562, 505–510 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0624-y>"

Importanza delle misure dirette

La sezione d'urto può essere fattorizzata:

$$\sigma(E) = \frac{1}{E} e^{-2\pi\eta} S(E)$$

così da fare misure ad “alta” energia e poi estrapolare il **fattore astrofisico $S(E)$** , che varia più lentamente, ad energie più basse

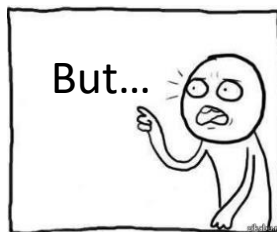


Importanza delle misure dirette

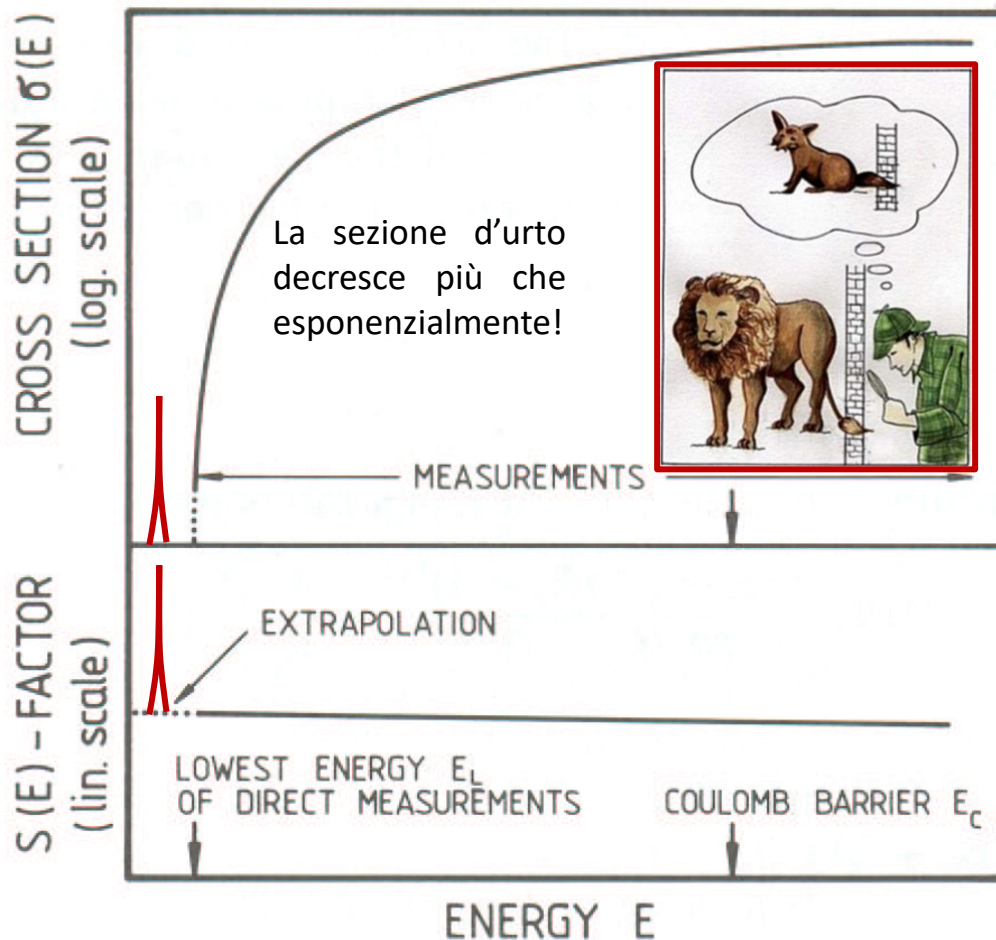
La sezione d'urto può essere fattorizzata:

$$\sigma(E) = \frac{1}{E} e^{-2\pi\eta} S(E)$$

così da fare misure ad “alta” energia e poi estrapolare il **fattore astrofisico $S(E)$** , che varia più lentamente, ad energie più basse



le incertezze dovute all'estrapolazione possono andare fuori controllo (ad esempio a causa di possibili risonanze a bassa energia...)



Il tasso di reazione e il picco di Gamow

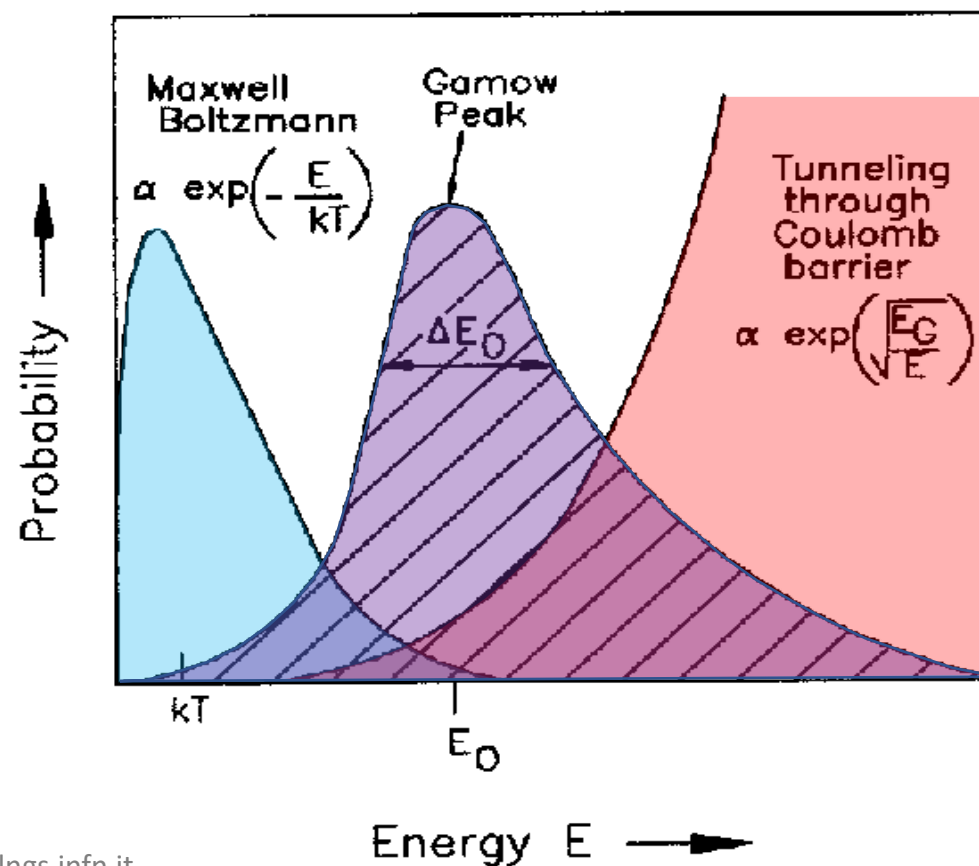
A temperature fissata, il **tasso di reazione medio per coppia di particelle** dipende sia dalla **distribuzione della velocità relativa**, (i.e. temperatura) sia dalla **sezione d'urto**:

$$\langle \sigma v \rangle = \left(\frac{8}{\pi \mu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{kT} \right)^{\frac{3}{2}} \int_0^{\infty} \underbrace{\frac{S(E)}{E} e^{-\sqrt{\frac{E_G}{E}}}}_{\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} e^{-2\pi\eta}} E e^{-\frac{E}{kT}} dE$$

Le reazioni avvengono all'interno di un intervallo di energia detto **finestra di Gamow**

$$E_G = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sqrt{2\mu} e^2 Z_x Z_A \pi}{\hbar} \right)^2$$

$$E_0 = \left(\frac{\sqrt{E_G}}{2} kT \right)^{\frac{2}{3}}$$



Il tasso di reazione e il picco di Gamow

A temperature fissata, il **tasso di reazione medio per coppia di particelle** dipende sia dalla **distribuzione della velocità relativa**, (i.e. temperatura) sia dalla **sezione d'urto**:

$$\langle \sigma v \rangle = \left(\frac{8}{\pi \mu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{kT} \right)^{\frac{3}{2}} \int_0^{\infty} \underbrace{\frac{S(E)}{E} e^{-\sqrt{\frac{E_G}{E}}}}_{\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} e^{-2\pi\eta}} E e^{-\frac{E}{kT}} dE$$

Le reazioni avvengono all'interno di un intervallo di energia detto **finestra di Gamow**

$$E_G = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sqrt{2\mu} e^2 Z_x Z_A}{\hbar} \pi \right)^2$$

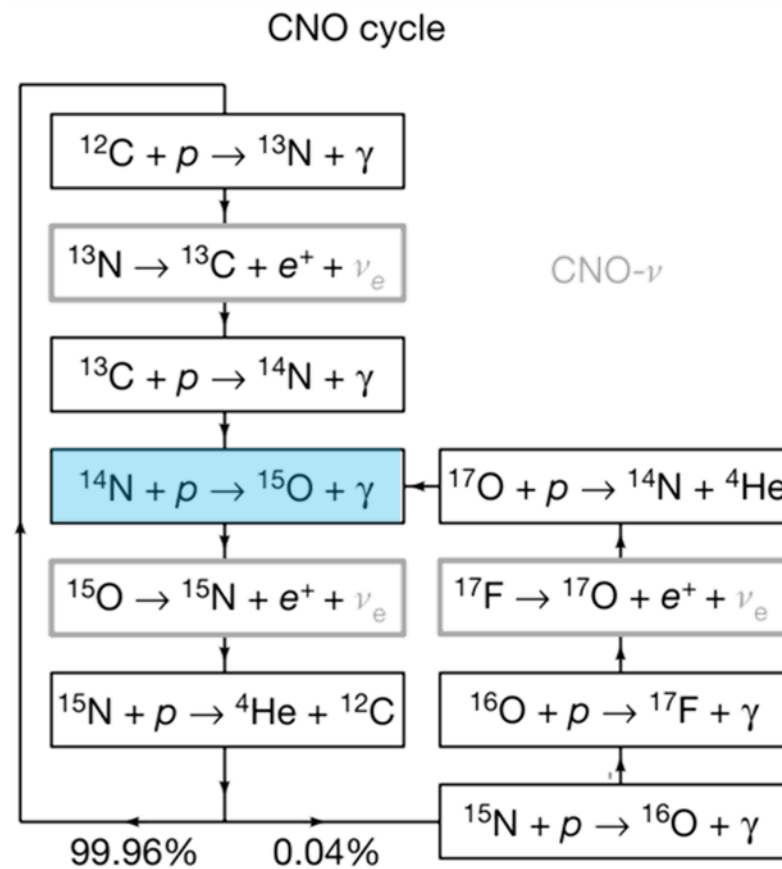
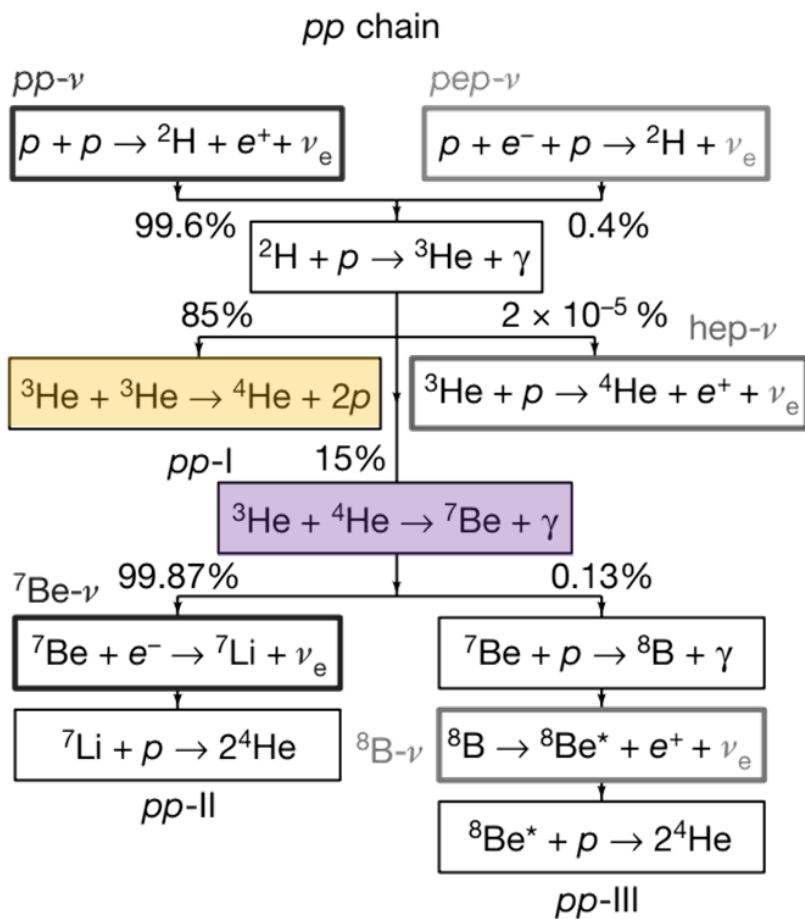
$$E_0 = \left(\frac{\sqrt{E_G}}{2} kT \right)^{\frac{2}{3}}$$

L'energia in gioco è molto più bassa di quella solitamente esplorata nei comuni esperimenti di fisica nucleare
($E_0 = 10 \text{ keV} - 1000 \text{ keV}$)



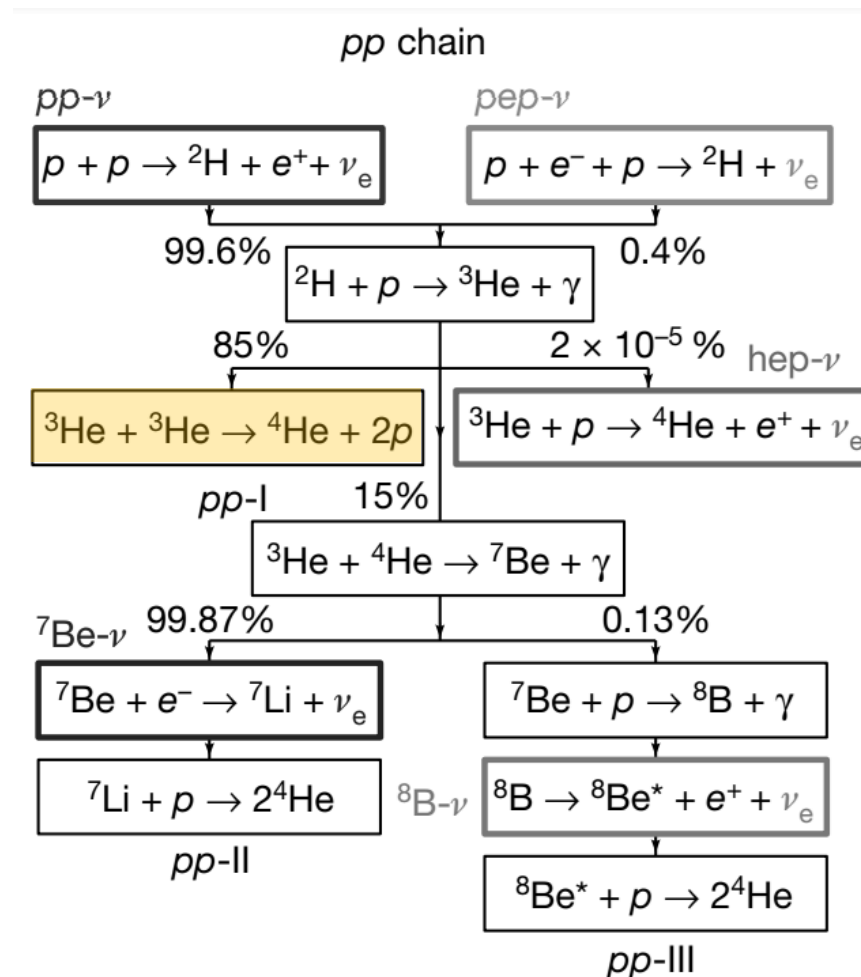
Il numero di reazioni misurate in laboratorio è così piccolo da rendere impossibile misure in presenza del fondo dovuto ai raggi cosmici
(anche solo 2 reazioni al mese)

3 reazioni importanti per il Sole

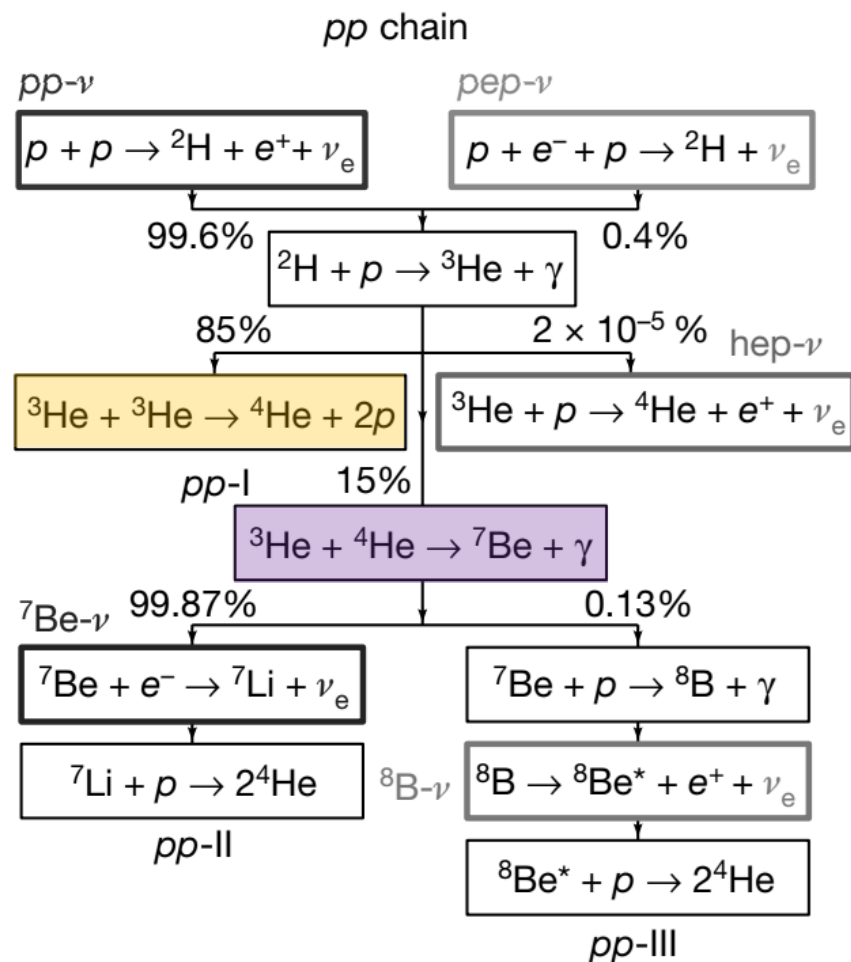




La ricerca della risonanza fantasma



${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ e la risonanza fantasma



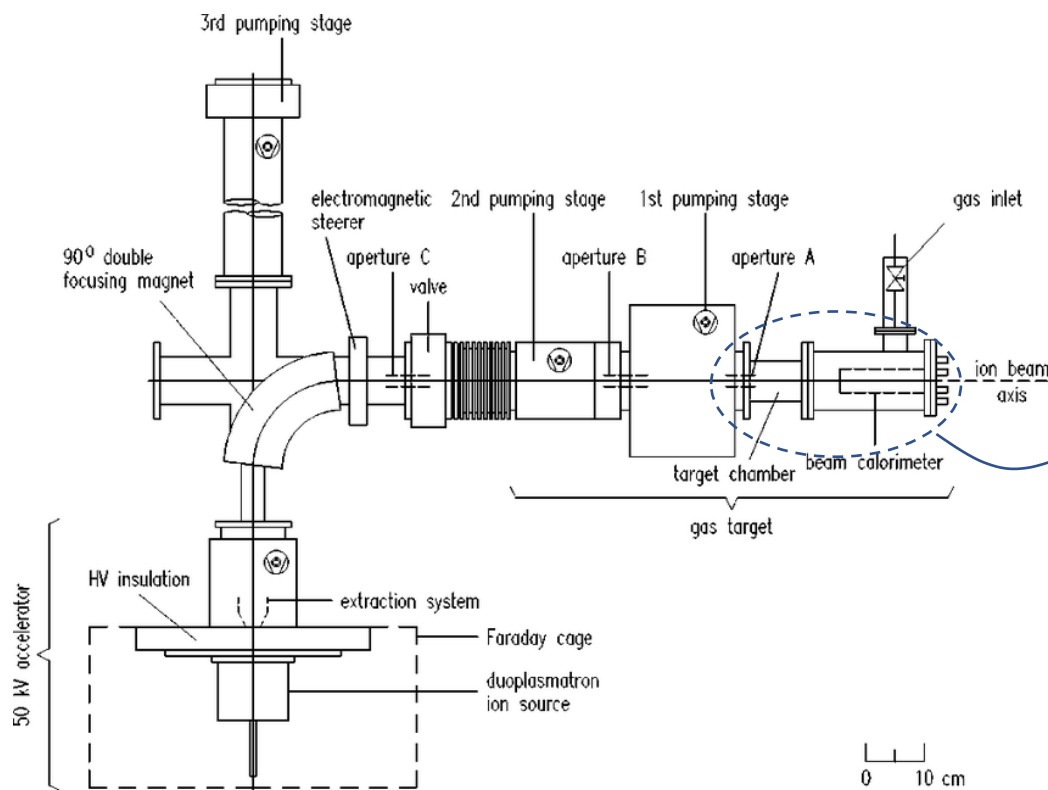
LUNA è nato nel 1991 per misurare la sezione d'urto della reazione ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ nella finestra di Gamow (16-27 keV)

Una eventuale risonanza in questa regione avrebbe potuto spiegare il basso flusso di neutrini solari, osservato dall'esperimento di Homestake, rispetto alle previsioni del Modello Solare Standard.

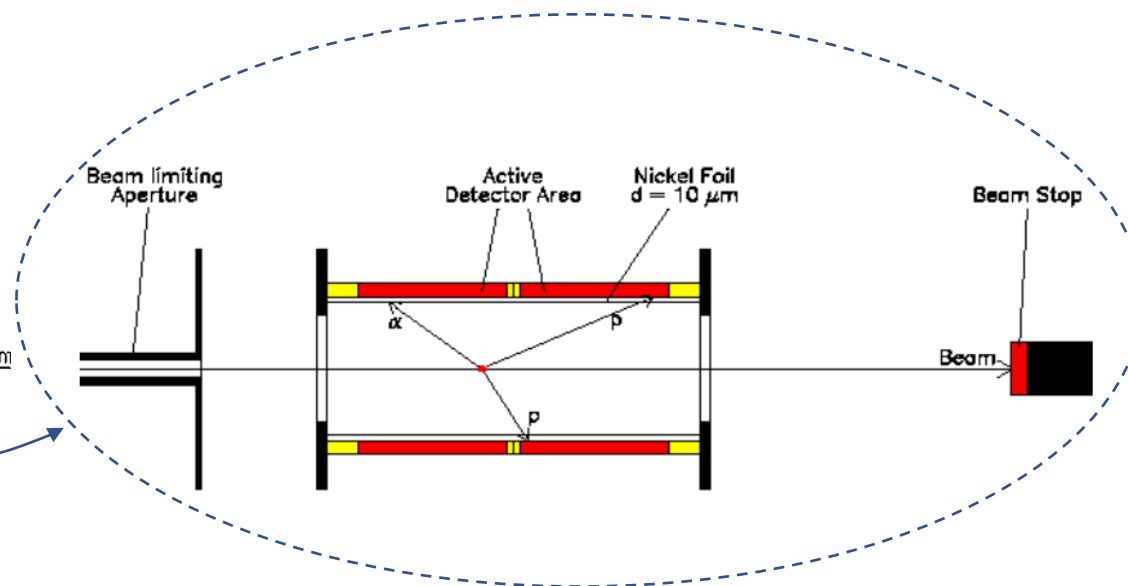
Questa risonanza, infatti, avrebbe diminuito il contributo relativo della reazione ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$, responsabile della produzione dei neutrini da ${}^7\text{Be}$ e ${}^8\text{B}$ osservati a Homestake.

${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ e la risonanza fantasma

LUNA 50 kV



Setup



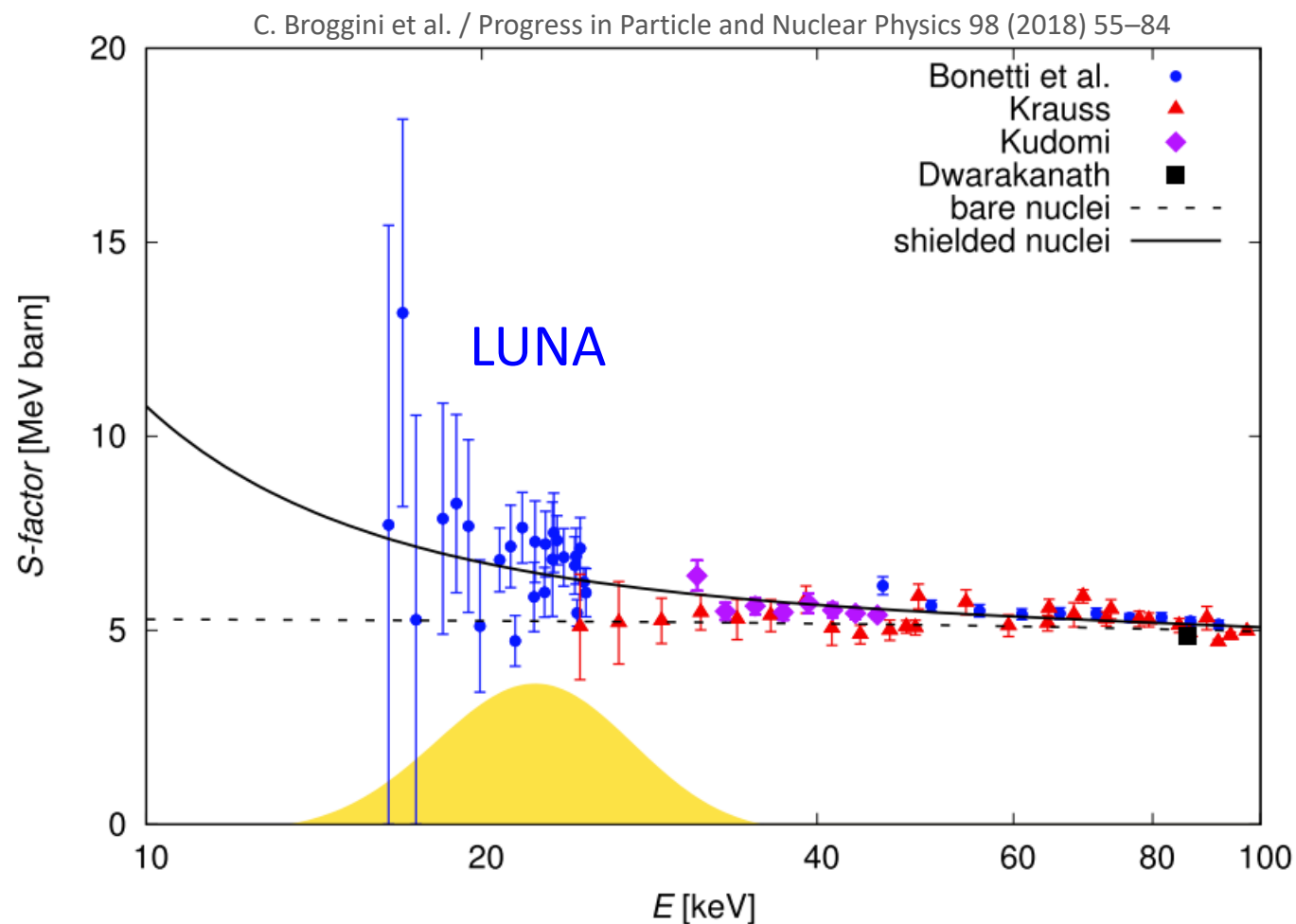
Bersaglio gassoso a pompaggio differenziale
 Telescopi $\Delta E - E$ al silicio
 Per ridurre il fondo: coincidenze

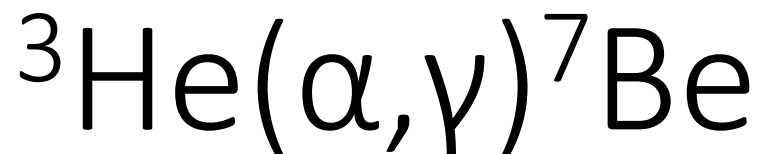
${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ e la risonanza fantasma

Questa è stata la prima misura diretta di astrofisica nucleare in tutta la finestra di Gamow.

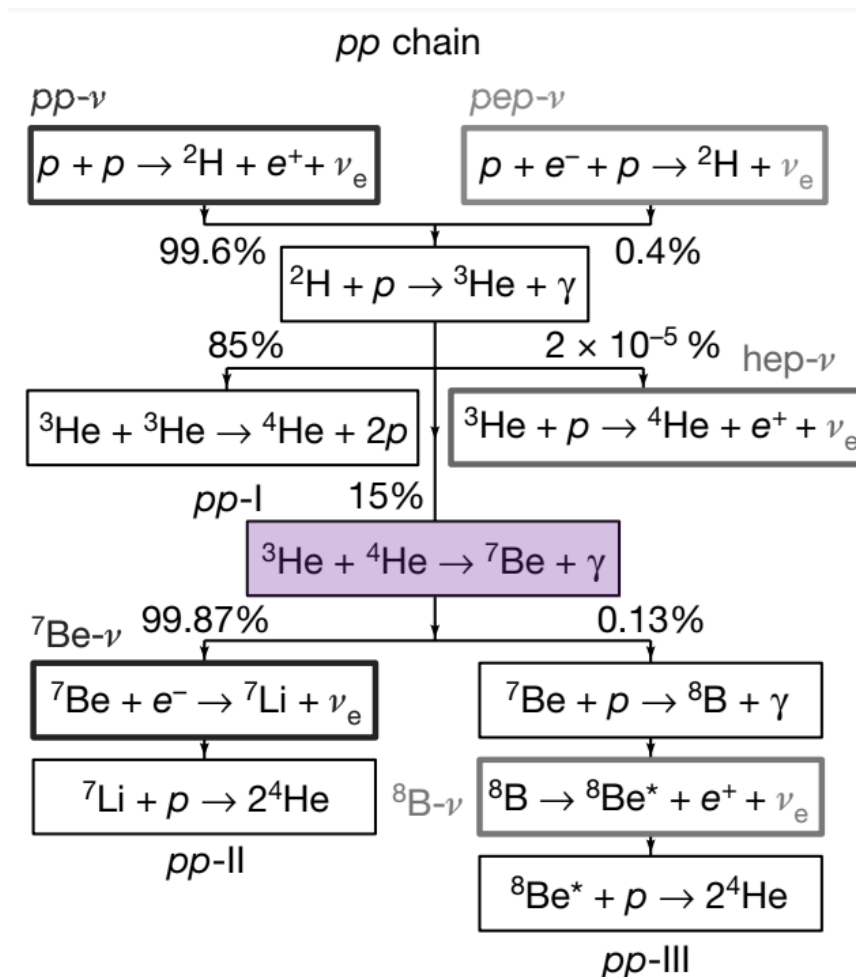
A 16.5 keV la sezione d'urto di soli 0.02 pb corrisponde ad un tasso di reazioni di 2 events/month.

L'assenza della risonanza ha permesso di scartare la soluzione nucleare al problema dei neutrini solari.

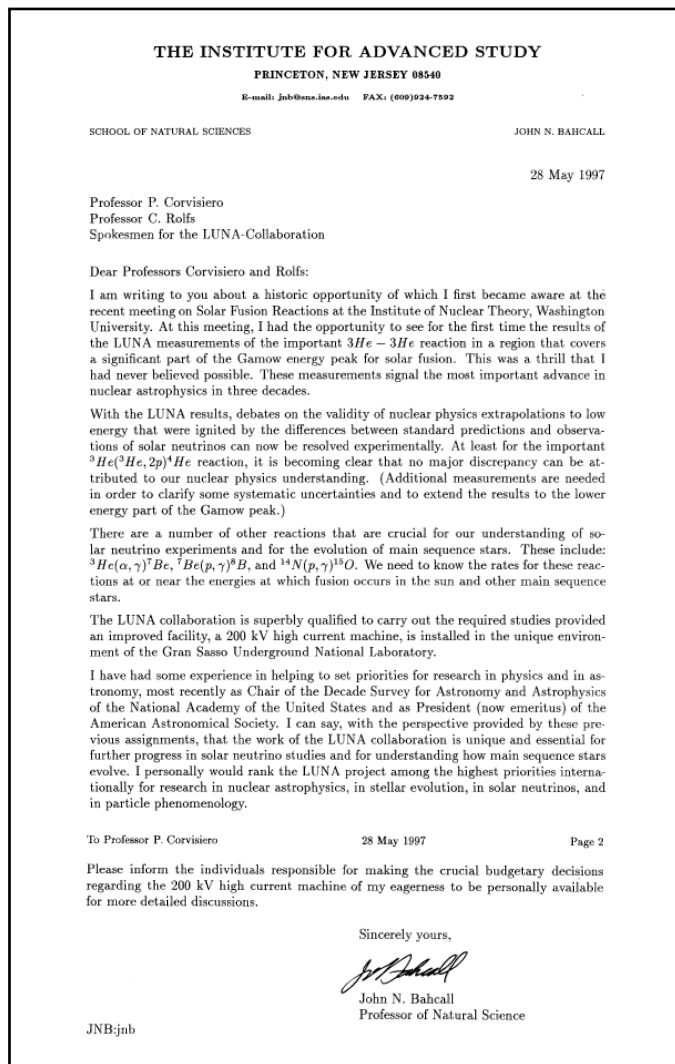




La maggiore fonte di incertezza
per i flussi dei neutrini solari della catena pp



${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ - la maggiore fonte di incertezza per $\Phi_{\nu_{pp}}$



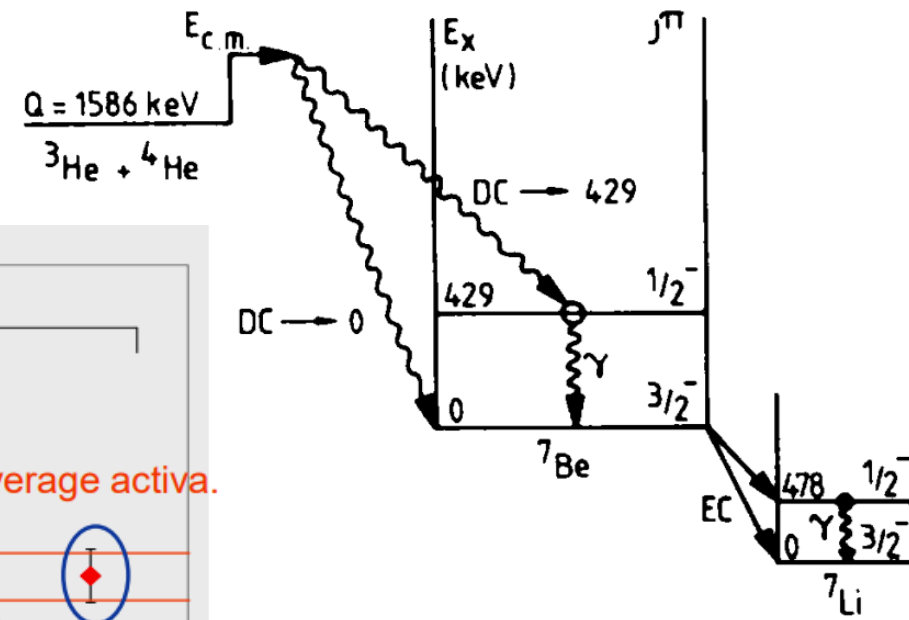
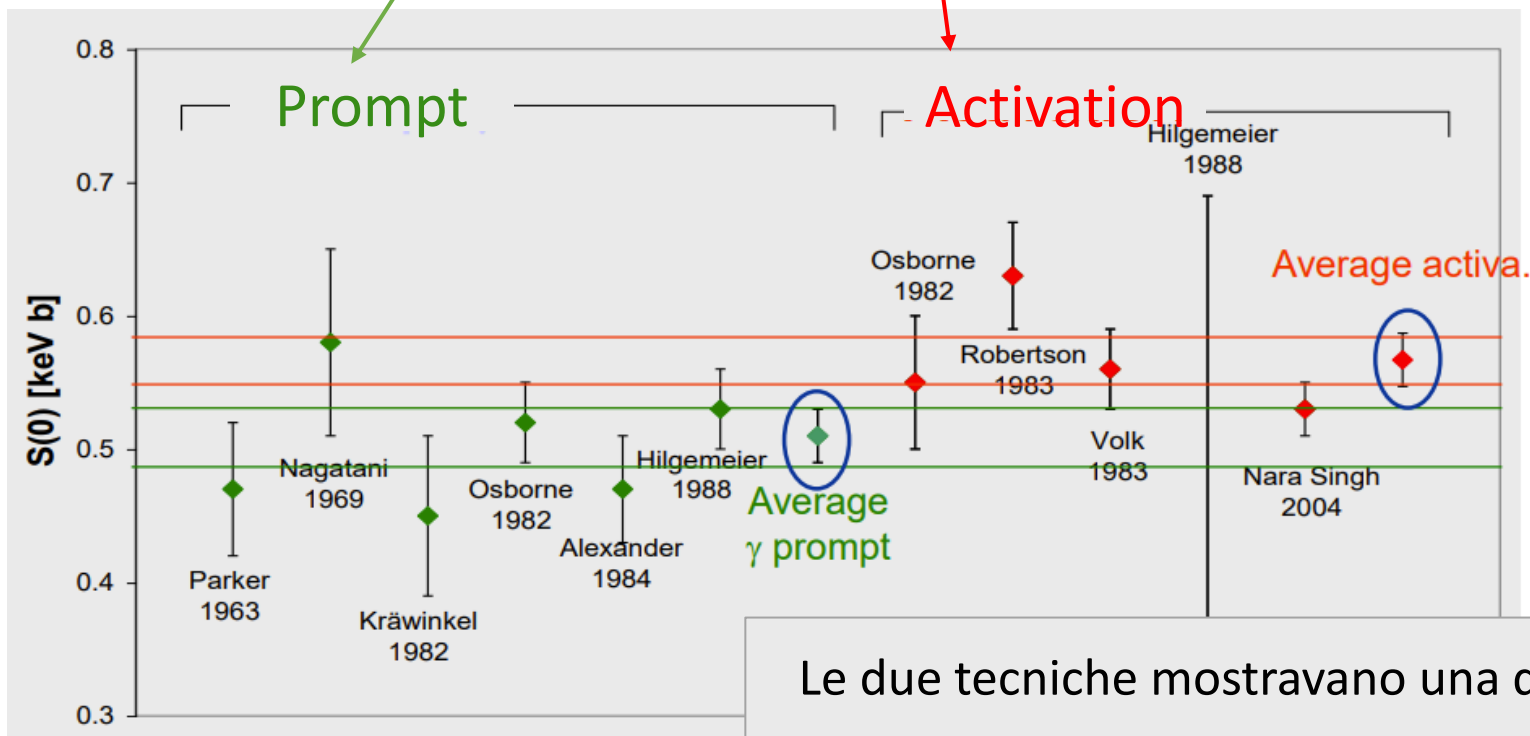
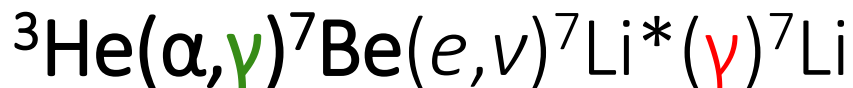
“The rate of the reaction ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ is the largest nuclear physics contributor to the uncertainties in the solar model predictions of the neutrino fluxes in the p-p chain. In the past 15 years, no one has remeasured this rate; it should be the highest priority for nuclear astrophysicists.”

John Bahcall, 28 Maggio 1997

$$\delta\Phi({}^8\text{B}) \sim (1 + \delta S_{11})^{-2.73} (1 + \delta S_{33})^{-0.43} (1 + \delta S_{34})^{0.85} \\ (1 + \delta S_{17})^{1.0} (1 + \delta S_{e7})^{-1.0} (1 + \delta S_{1,14})^{-0.02}$$

Fractional uncertainties

${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ - la maggiore fonte di incertezza per $\Phi_{\nu_{pp}}$

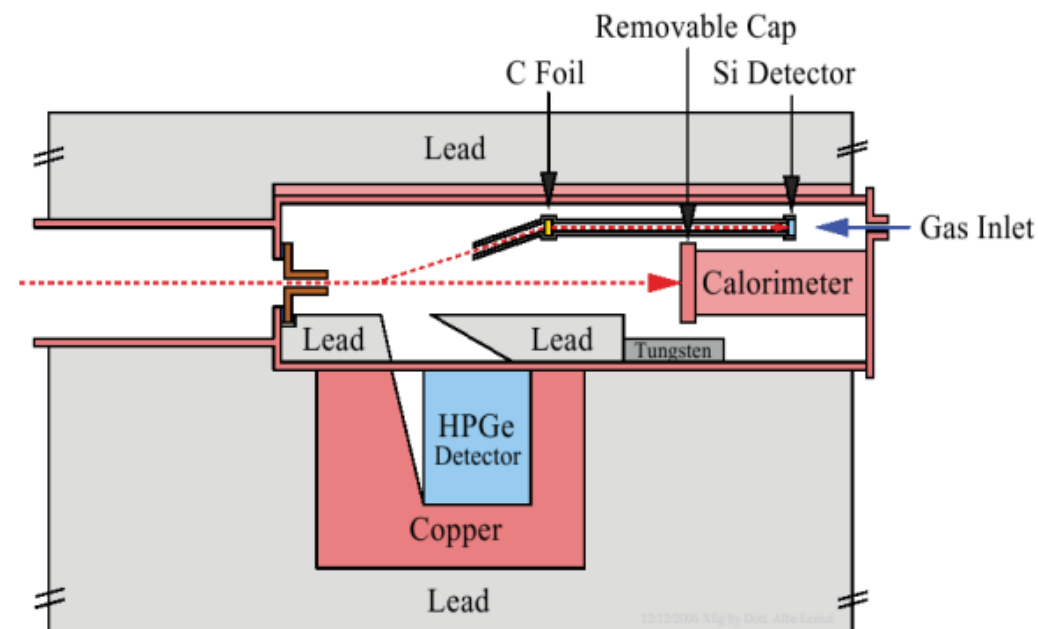


Visto che il ${}^7\text{Be}$ è instabile, è possibile misurare la sezione d'urto anche contando i nuclei di ${}^7\text{Be}$ che decadono

Le due tecniche mostravano una discrepanza del 9%

${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ - la maggiore fonte di incertezza per $\Phi_{\nu_{pp}}$

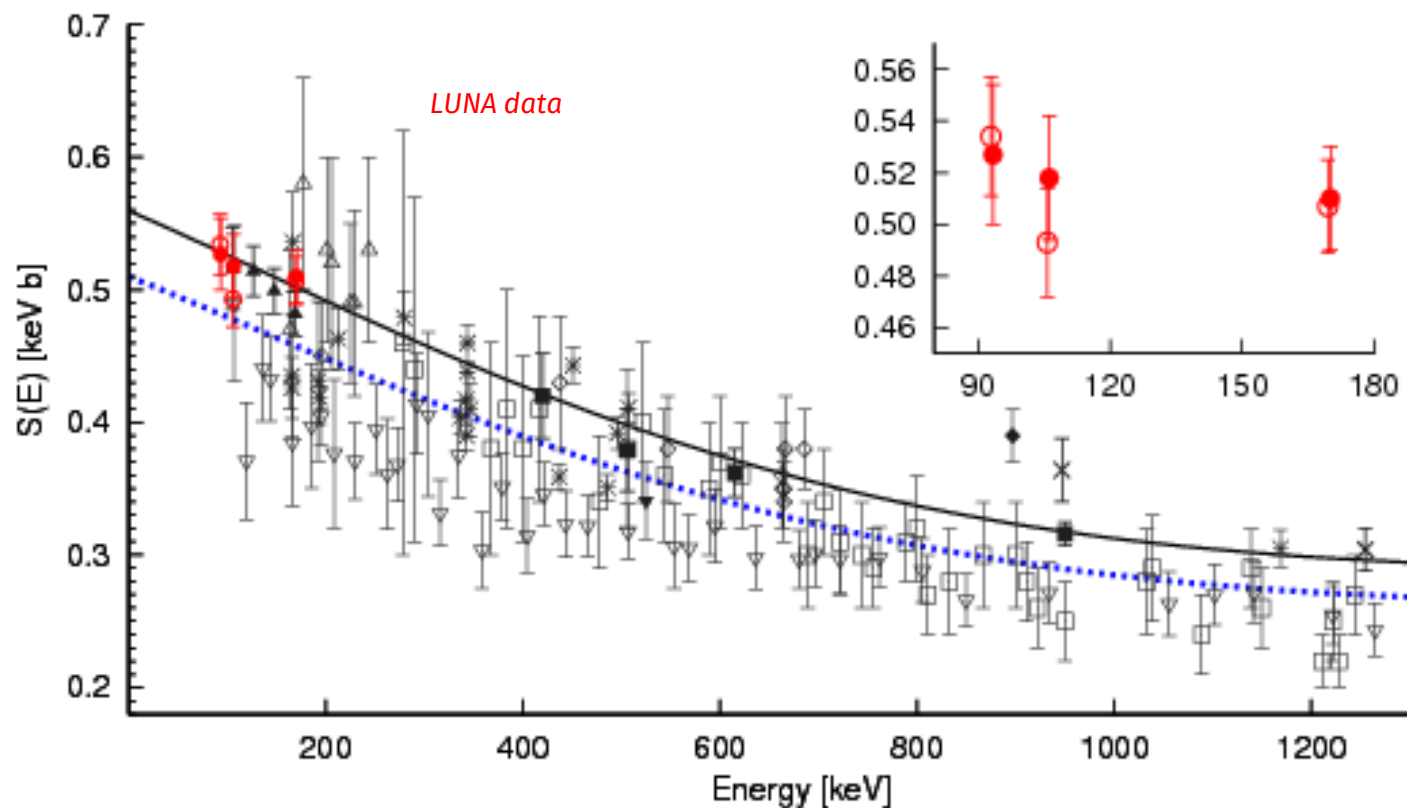
Misura svolta a LUNA 400 kV



Bersaglio gassoso a pompaggio differenziale
Rivelatore al silicio per monitorare il bersaglio

Rivelatore HPGe schermato e collimato
Calorimetro con inserto per misure di attivazione

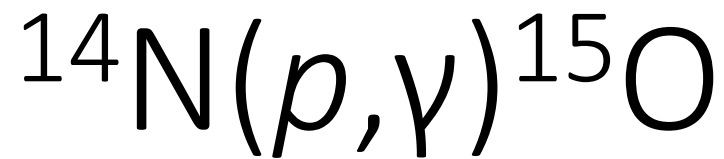
${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ - la maggiore fonte di incertezza per $\Phi_{\nu_{pp}}$



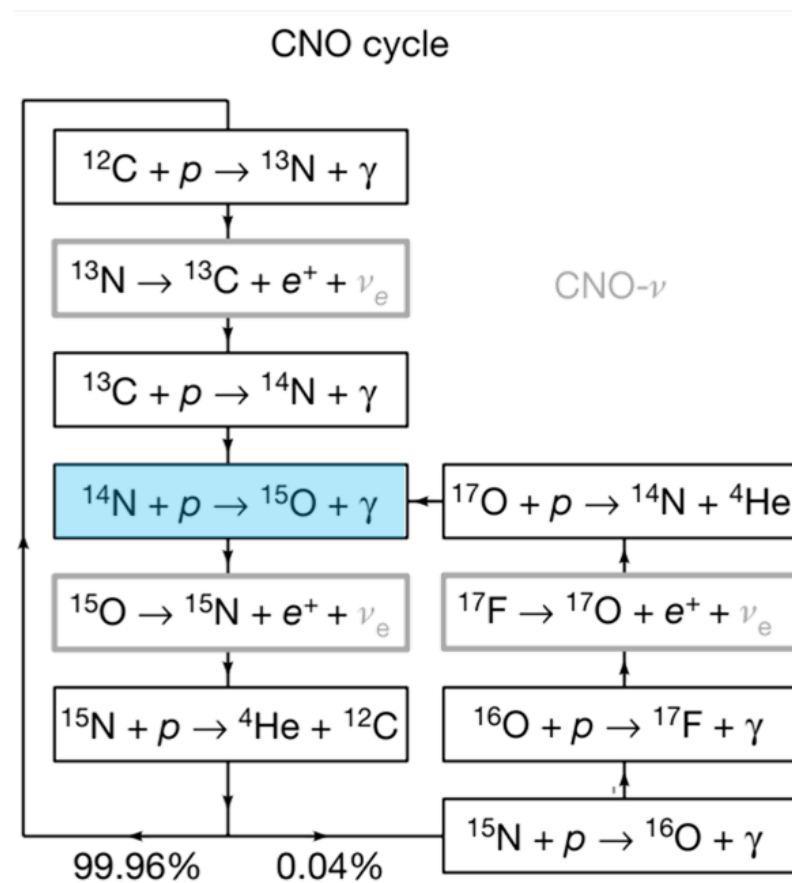
L'incertezza su $\Phi_{\nu_{\text{sol}}}$ dovuta a S_{34} è stata ridotta:

$\Phi({}^8\text{B})$: 7.5% \rightarrow 4.3%

$\Phi({}^7\text{Be})$: 8% \rightarrow 4.5%

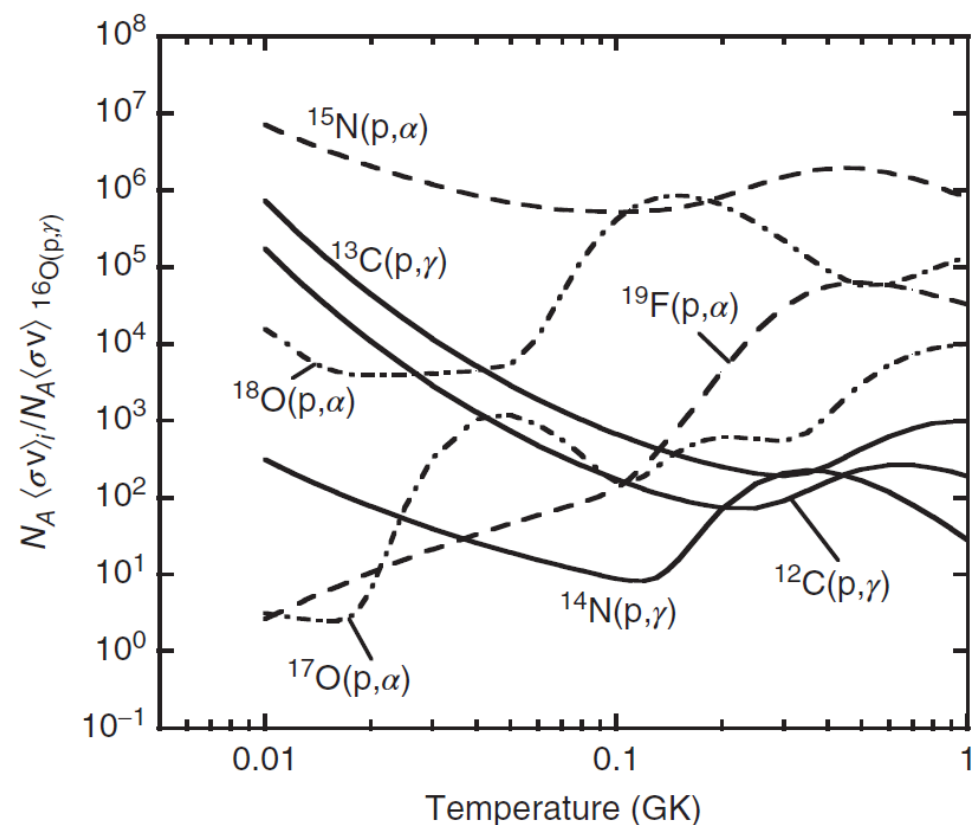


Determinante per il ciclo CNO



$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ – determinante per il ciclo CNO

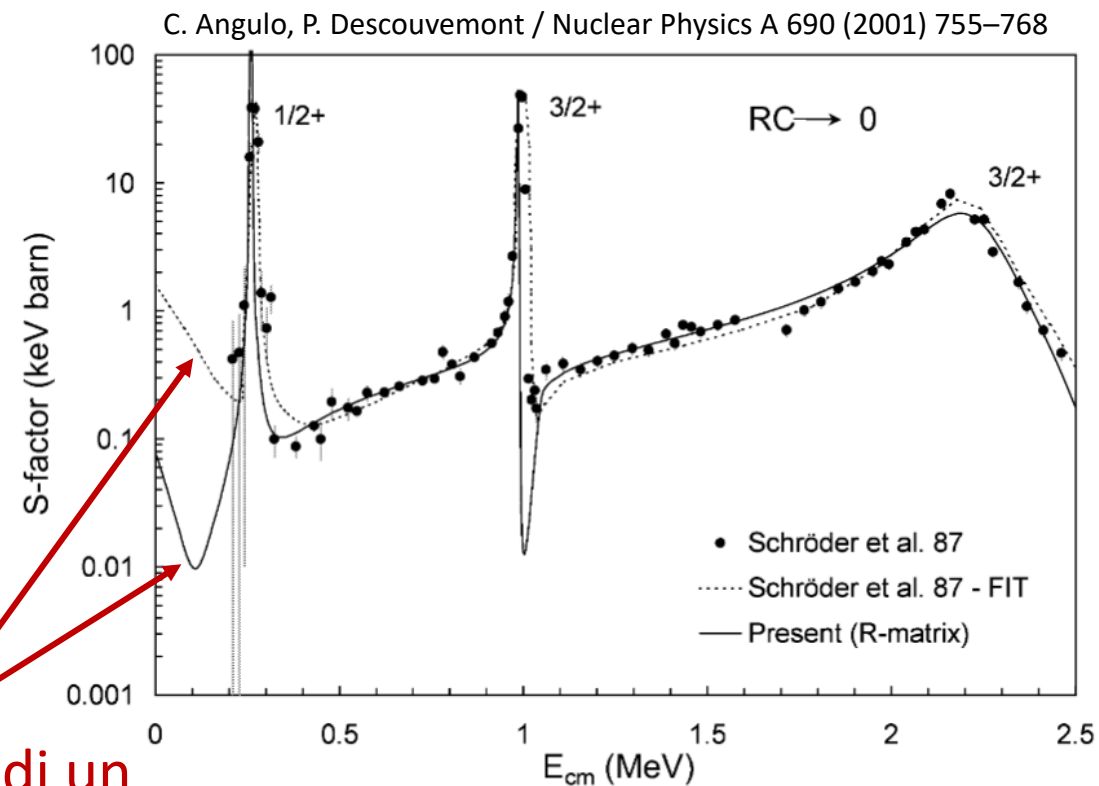
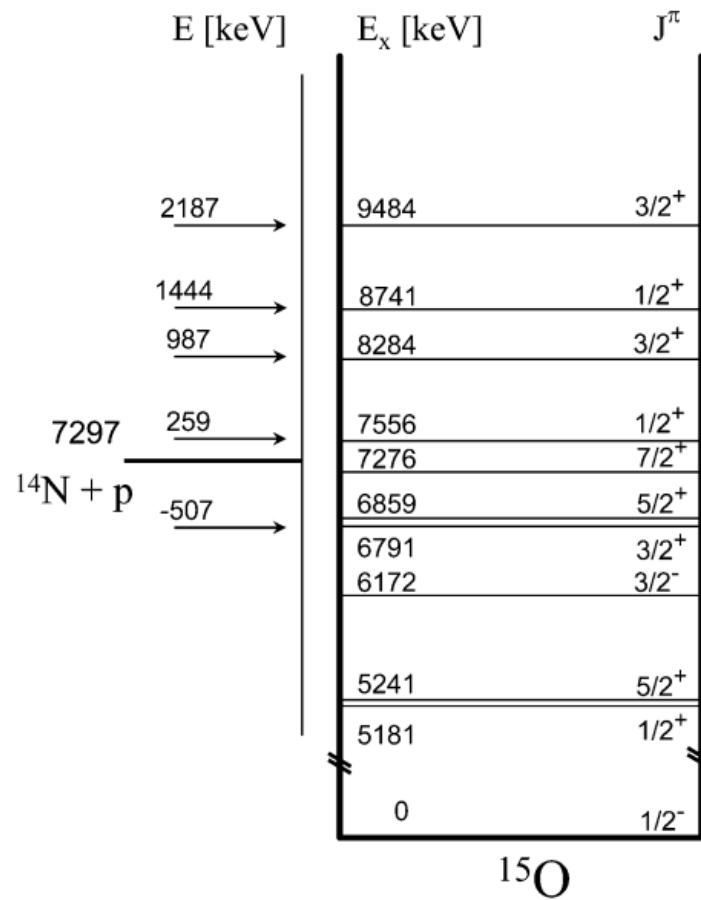
è la reazione più lenta del ciclo CNO I \rightarrow determina la **velocità del ciclo**



da questa dipende:

- il flusso atteso di neutrini solari dal ciclo CNO (decadimenti β^+ di ^{13}N e ^{15}O);
- la metallicità solare;
- la durata della combustione dell'idrogeno (permanenza in Sequenza Principale);
- l'età dei cluster globulari;
- ...

$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ – determinante per il ciclo CNO



differenza di un
fattore fino a 50

$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ – determinante per il ciclo CNO

The bottleneck of the CNO burning and the age of the Globular Clusters

[Astronomy & Astrophysics 420 \(2004\) 625](#)

Astrophysical S factor of $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$

[Physics Letters B 591 \(2004\) 61](#)

S-factor of $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ at astrophysical energies

[European Physical Journal A 25 \(2005\) 455](#)

Low energy measurement of the $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ total cross section at the LUNA underground facility

[Nuclear Physics A 779 \(2006\) 297-317](#)

First measurement of the $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ cross section down to 70 keV

[Physics Letters B 634 \(2006\) 483](#)

Ground state capture in $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ studied above the 259 keV resonance at LUNA

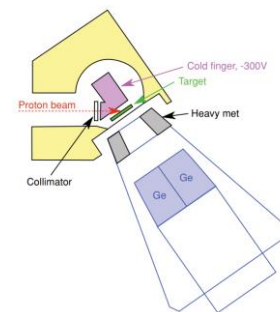
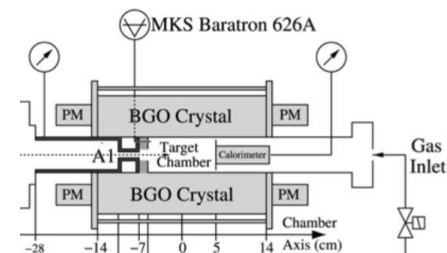
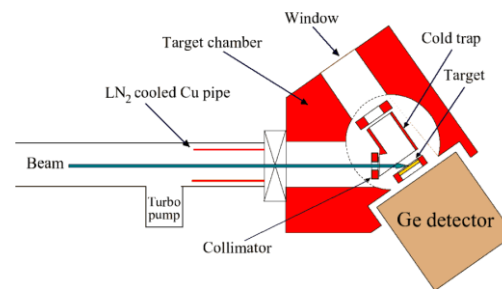
[Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 35 \(2008\) 014019](#)

Precision study of ground state capture in the $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ reaction

[Physical Review C 78 \(2008\) 022802\(R\)](#)

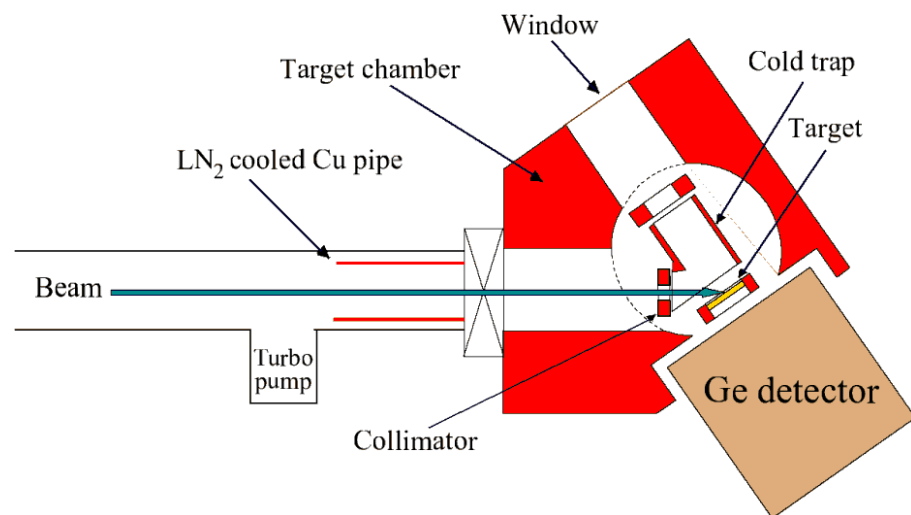
The $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ reaction studied with a composite germanium detector

[Physics Review C 83 \(2011\) 045804](#)



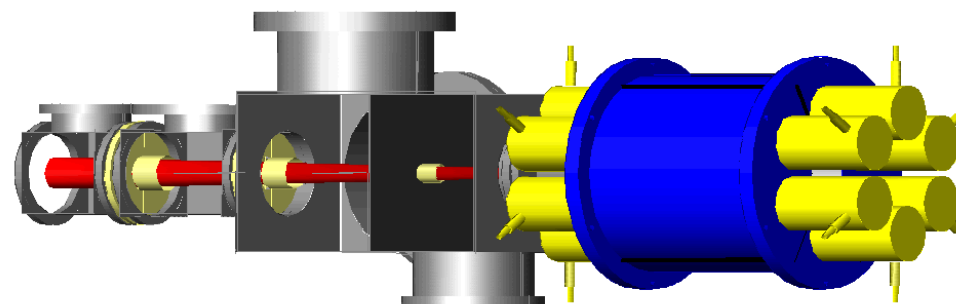
$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ – determinante per il ciclo CNO

Bersaglio solido + rivelatore HPGe

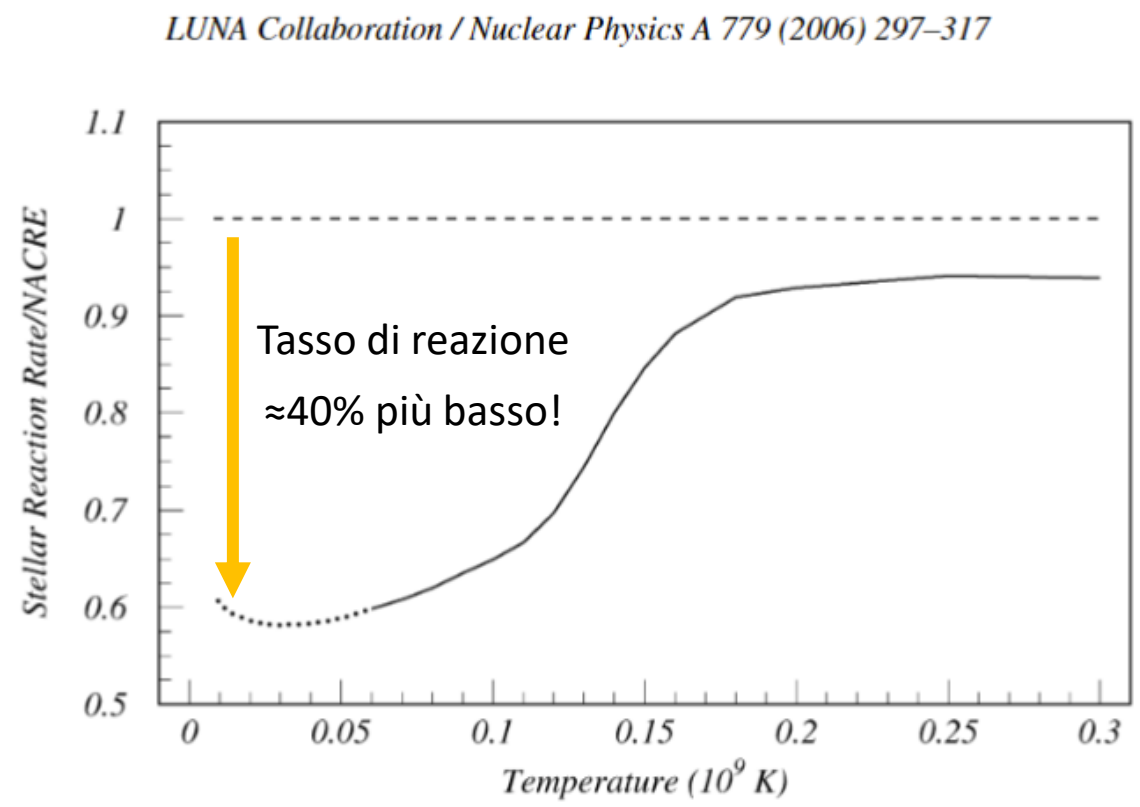
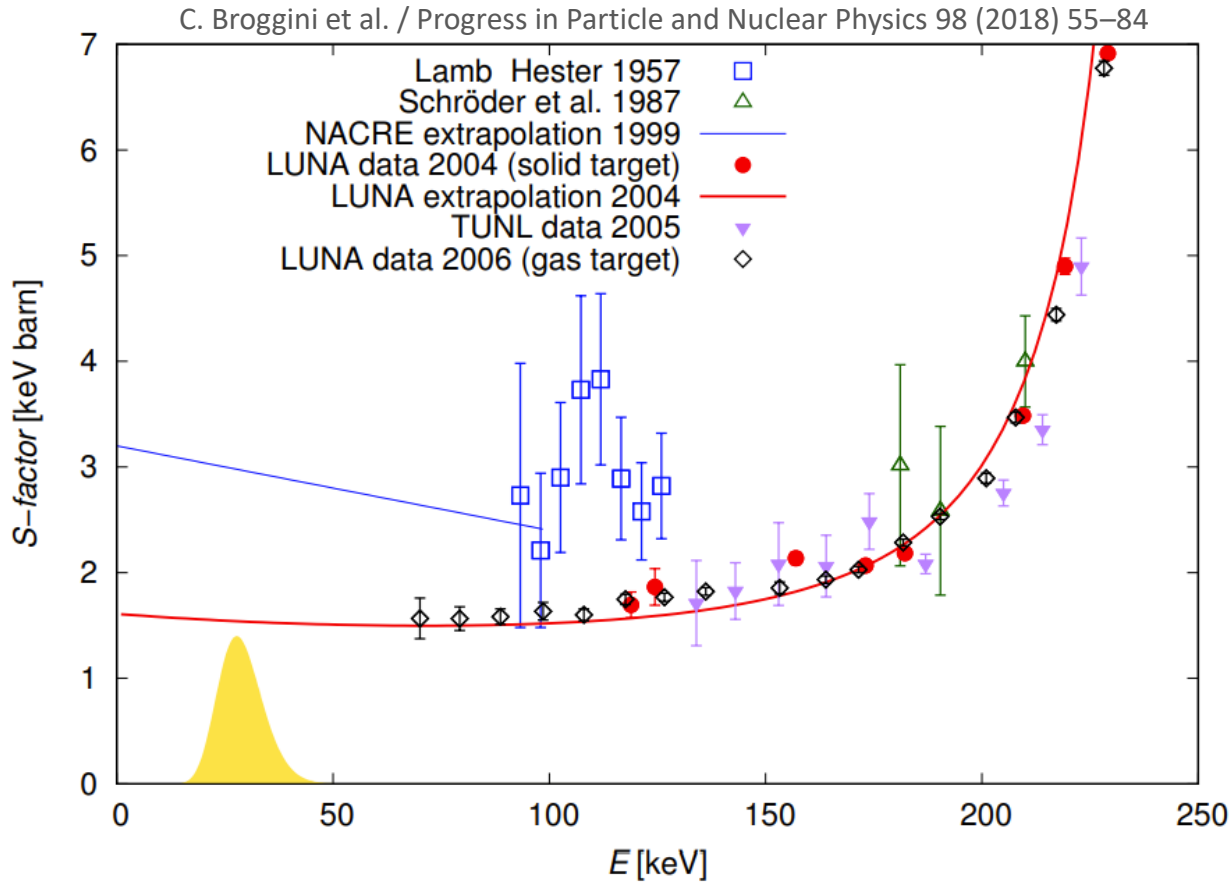


Bersaglio solido (TiN)
 Analisi delle singole transizioni
 Misura delle σ parziali e dei BR
 Intervallo energetico: 119-367 keV

Bersaglio gassoso + rivelatore BGO

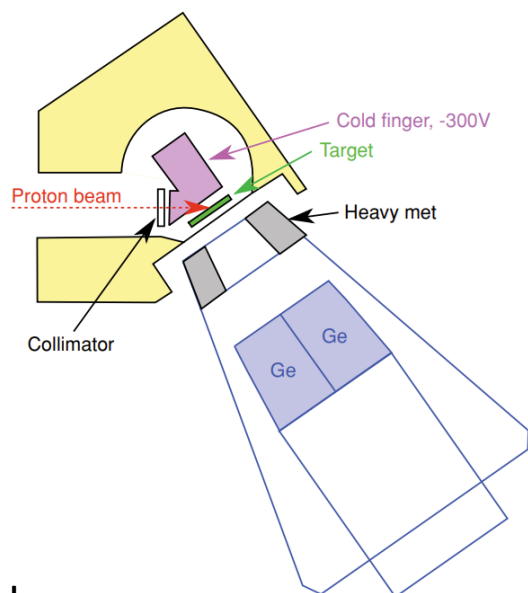


Bersaglio gassoso (1 mbar)
 Angolo solido $\approx 4\pi$ per massimizzare l'efficienza
 Misura della sezione d'urto totale
 Intervallo energetico: 70-230 keV



$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ – determinante per il ciclo CNO

Bersaglio solido + rivelatore HPGe segmentato con schermatura anti-Compton BGO

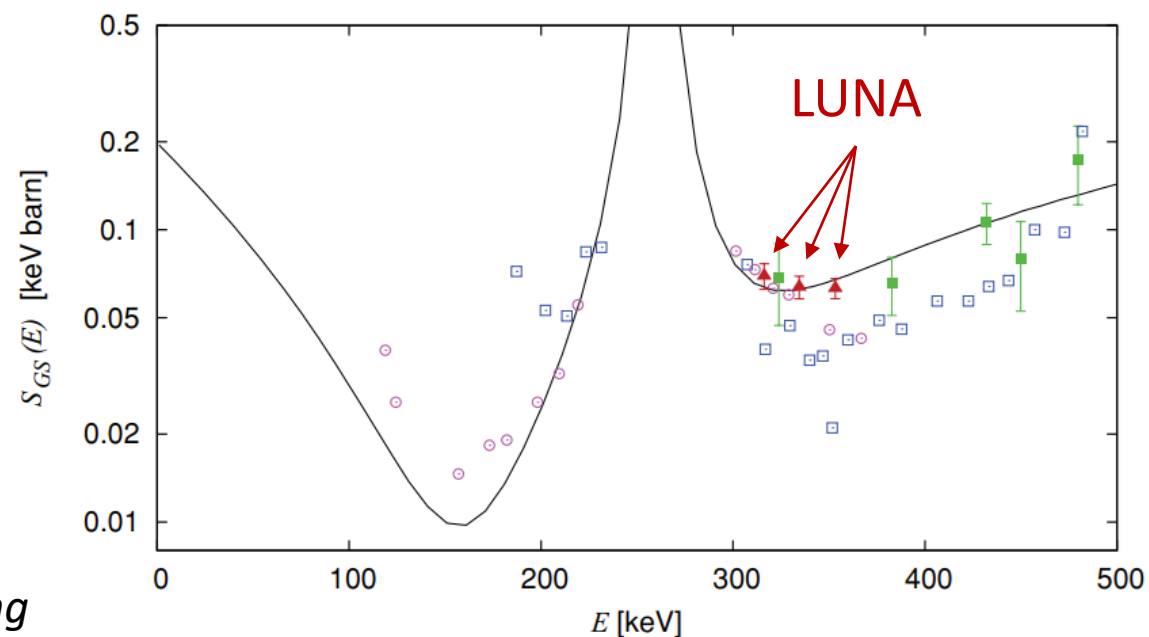


Bersaglio solido

Rivelatore segmentato per ridurre gli effetti di *summing*

Schermatura anti-Compton di BGO

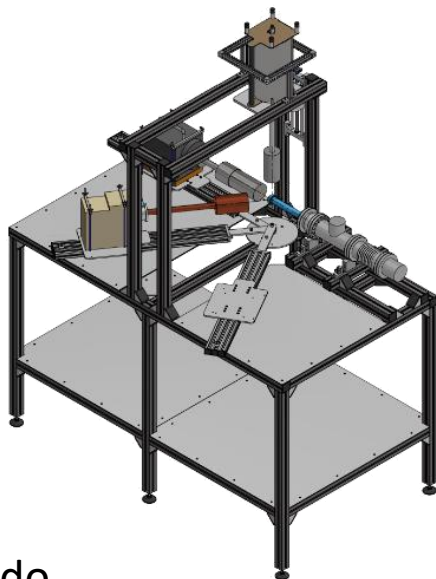
Energie: 317.8, 334.4, 353.3 keV



Incertezza su $S_{tot}(0)$ dovuta alla cattura al GS: 15% \rightarrow 4%

$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ – determinante per il ciclo CNO

Prima misura di LUNA-MV (argomento della tesi di dottorato di A. Compagnucci)



Bersaglio solido
3 rivelatori HPGe disposti a diversi angoli per
misure di distribuzione angolare
Nuova misura della cattura al GS (ancora dibattuta)
Energie: da 275 keV a 1.4 MeV



$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ – determinante per il ciclo CNO

Prima misura di LUNA-MV (argomento della tesi di dottorato di A. Compagnucci)



una misura più accurata della sezione d'urto della reazione $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ permetterebbe una migliore determinazione della metallicità solare!

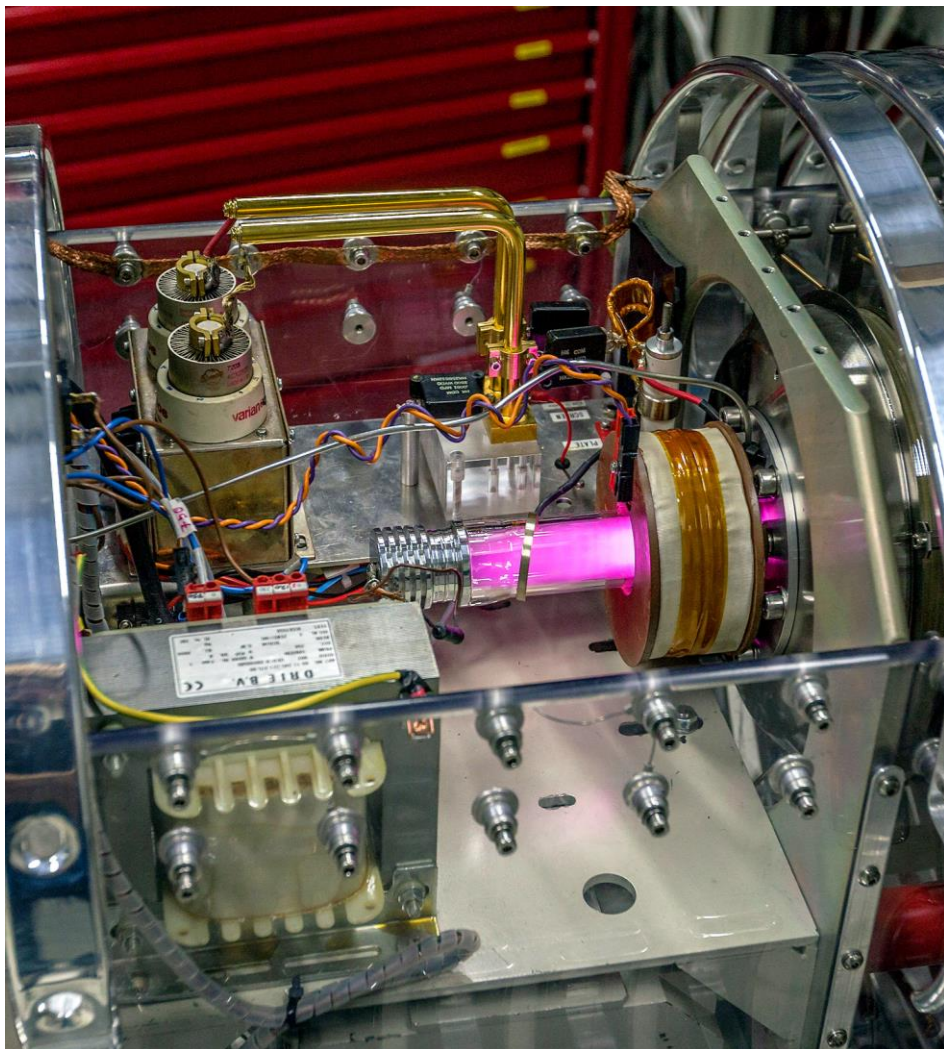
Bersaglio solido
3 rivelatori HPGe disposti a diversi angoli per misure di distribuzione angolare
Nuova misura della cattura al GS (ancora dibattuta)
Energie: da 275 keV a 1.4 MeV



In sintesi...

- Negli ultimi 32 anni LUNA ha contribuito allo studio di molte reazioni nucleari di interesse astrofisico
- alcune di queste reazioni hanno avuto un impatto enorme nello studio del Sole e dei neutrini
- non pensiate che sia finita... LUNA continuerà a migliorare la conoscenza delle sezioni d'urto di queste reazioni anche in futuro

La collaborazione LUNA (oggi)



Laboratori Nazionali del Gran Sasso, INFN, ASSERGI, Italy
F. Ferraro, M. Junker

GSSI, L'AQUILA, Italy
A. Compagnucci, R. Gesùè

**Università degli Studi di Bari and INFN, BARI, Italy/*INFN
Lecce, LECCE, Italy**
F. Barile, G.F. Ciani, V. Mossa, V. Patocchio, R. Perrino, L. Schiavulli

**Konkoly Observatory, Hungarian Academy of Sciences,
BUDAPEST, Hungary**
M. Lugaro

**Institute of Nuclear Research (ATOMKI), DEBRECEN,
Hungary**
L. Csedreki, Z. Elekes, Zs. Fülöp, Gy. Gyürky, T. Szücs

**Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, DRESDEN,
Germany**
D. Bemmerer, A. Boeltzig, E. Masha

University of Edinburgh, EDINBURGH, United Kingdom
M. Aliotta, C.G. Bruno, T. Davinson, R. Sidhu

Università degli Studi di Genova and INFN, GENOVA, Italy
P. Corvisiero, P. Prati, S. Zavatarelli

Università degli Studi di Milano and INFN, MILANO, Italy
R. Depalo, A. Guglielmetti

**Università degli Studi di Napoli "Federico II" and INFN,
NAPOLI, Italy**
A. Best, C. Ananna, A. Di Leva, G. Imbriani, D. Rapagnani

Università degli Studi di Padova and INFN, PADOVA, Italy
C. Brogгинi, A. Caciolli, P. Marigo, R. Menegazzo, N. Mozumdar, D. Piatti, J. Skowronski

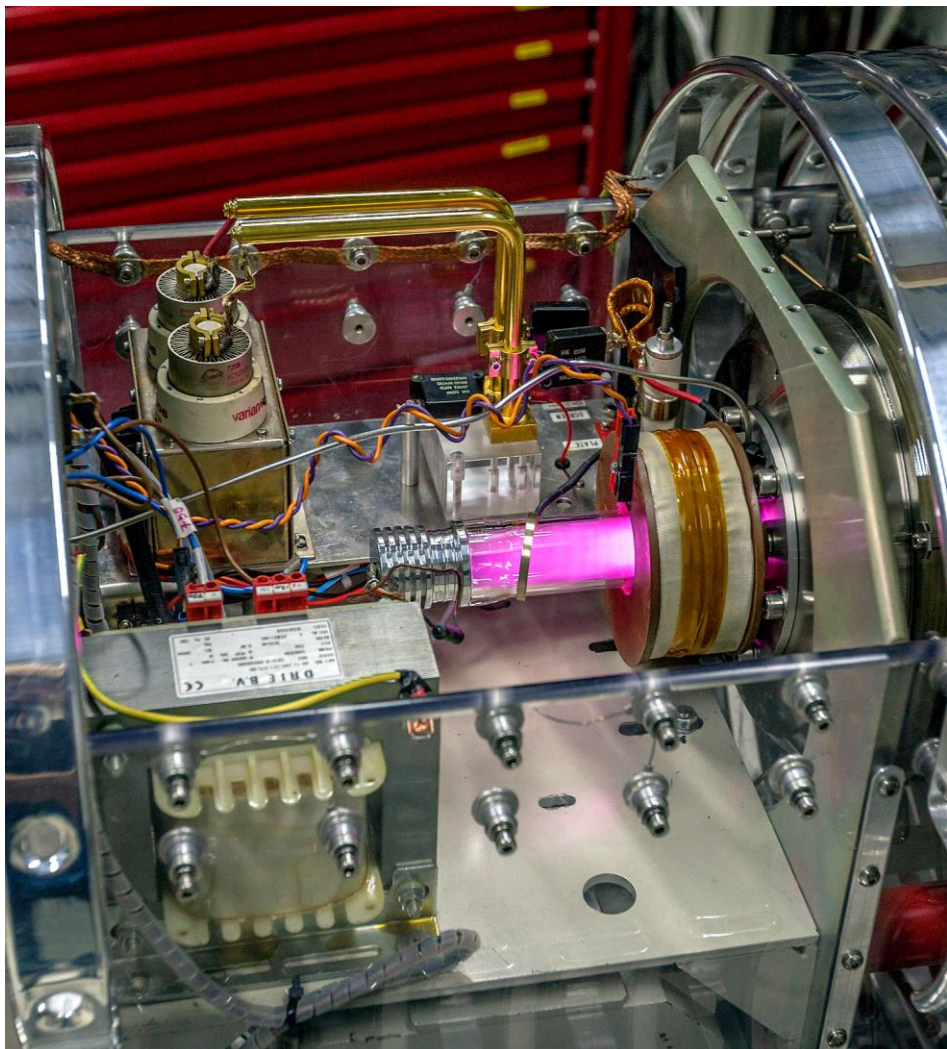
INFN Roma1, ROMA, Italy
A. Formicola, C. Gustavino

Laboratori Nazionali di Legnaro, Italy
M. Camprostrini, V. Rigato

**Osservatorio Astronomico di Collurania, TERAMO and INFN
LNGS, Italy**
O. Straniero

Università di Torino and INFN, TORINO, Italy
F. Cavanna, P. Colombetti, G. Gervino

La collaborazione LUNA



Ma il merito di ciò di cui vi ho parlato è dei collaboratori che hanno lavorato in LUNA a partire dal 1991, tra i quali:

C. Arpesella, E. Bellotti, G. Fiorentini, A. Fubini, U. Greife, J. Lambert, W.S. Rodney, D. Zahnow, A. D'Alessandro, L. Campajola, M. Dessalvi, A. D'Onofrio, L. Gialanella, H. Costantini, R. Bonetti, J. Cruz, A.P. Jesus, A. Lemut, V. Roca, C. Rolfs, M. Romano, C. Rossi-Alvarez, F. Schümann, E. Somorjai, F. Strieder, F. Terrasi, H.-P. Trautvetter, A. Vomiero, C. Angulo, P. Descouvemont, J.N. Klug, D. Schürmann, B. Limata, D. Rogalla, M. Marta, C. Mazzocchi, S. Vezzu, R. Kunz

Grazie per l'attenzione