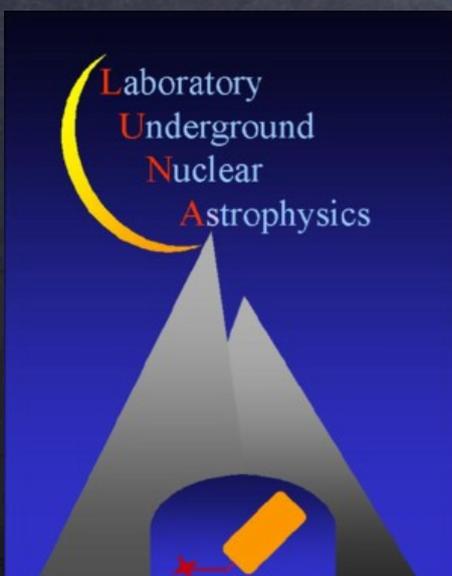




LUNA e i neutrini solari

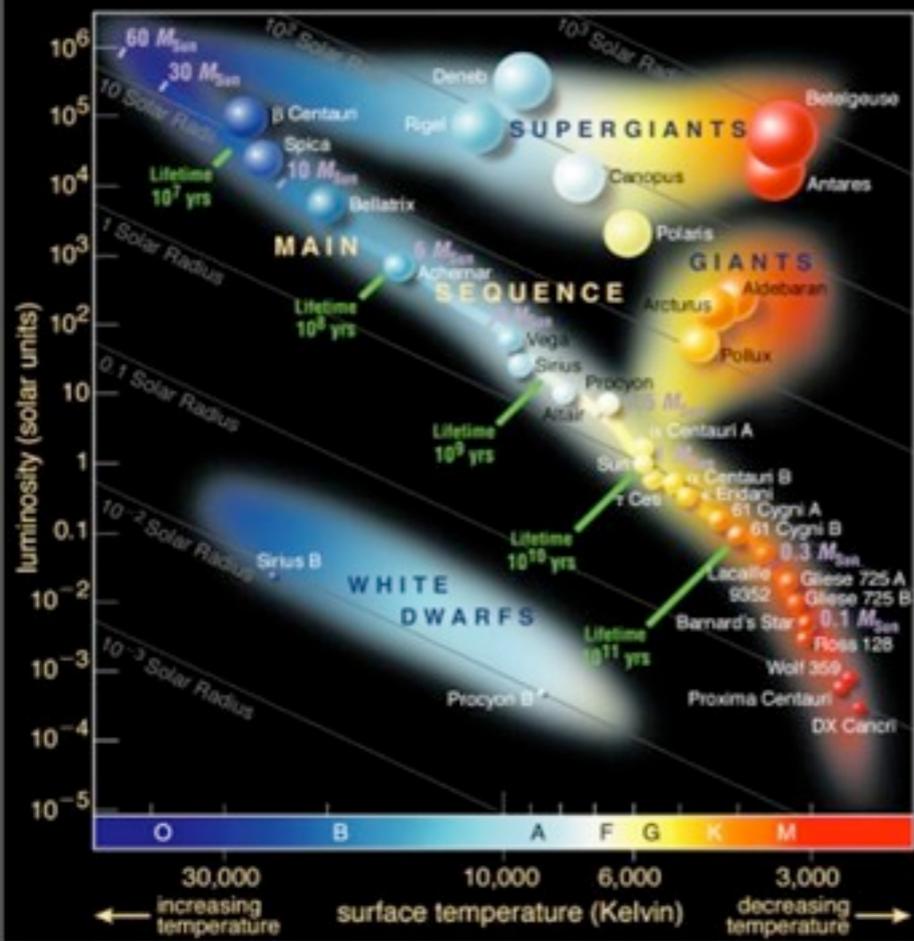
Antonio Cacioli
INFN, sezione di Padova

La massa dei neutrini
scuola di formazione professionale INFN
4-6 Maggio 2010



Sommario

- ◆ Fusioni nucleari nelle stelle
- ◆ Perché andare in laboratori underground?
- ◆ LUNA e i neutrini del Sole
 - ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow 4\text{He} + 2\text{p}$
 - ${}^3\text{He}({}^4\text{He}, \gamma){}^7\text{Be}$
 - ${}^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma){}^{15}\text{O}$
- ◆ risultati sperimentali



$T_{\text{SUN}} = 0.015 \text{ GK}$

$T_{\text{RGB}} = 0.1 \text{ GK}$

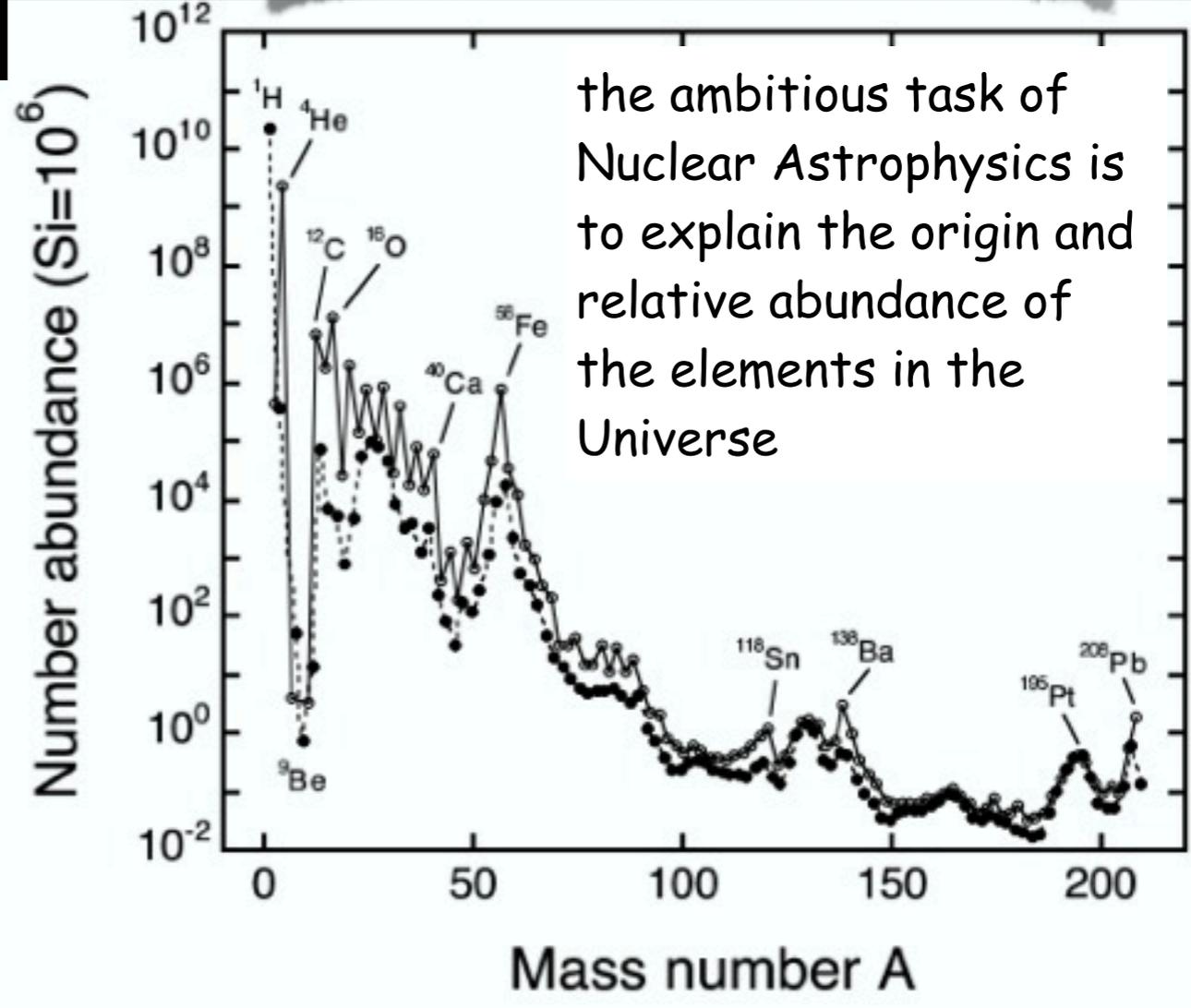
$T_{\text{novae}} = 0.3 \text{ GK}$

H burning \rightarrow He

He burning \rightarrow C, O, Ne

C/O ... Si burning \rightarrow Fe

explosive burning



the ambitious task of Nuclear Astrophysics is to explain the origin and relative abundance of the elements in the Universe

Sole: astrofisica per sperimentali...

osservabili:

- ✓ Luminosità
- ✓ Abbondanze chimiche
- ✓ Flussi di neutrini
- ✓ Eliosismologia
 - profili di densità e di velocità del suono, profondità delle zone convettive....



Standard Solar Model (SSM)

- Fisica conosciuta: gravità, termo-fluidodinamica, opacità, **sezioni d'urto nucleari** ...
- Assunzioni: metallicità omogenea ai primi stadi della sua formazione

Rate di reazione tra particelle cariche

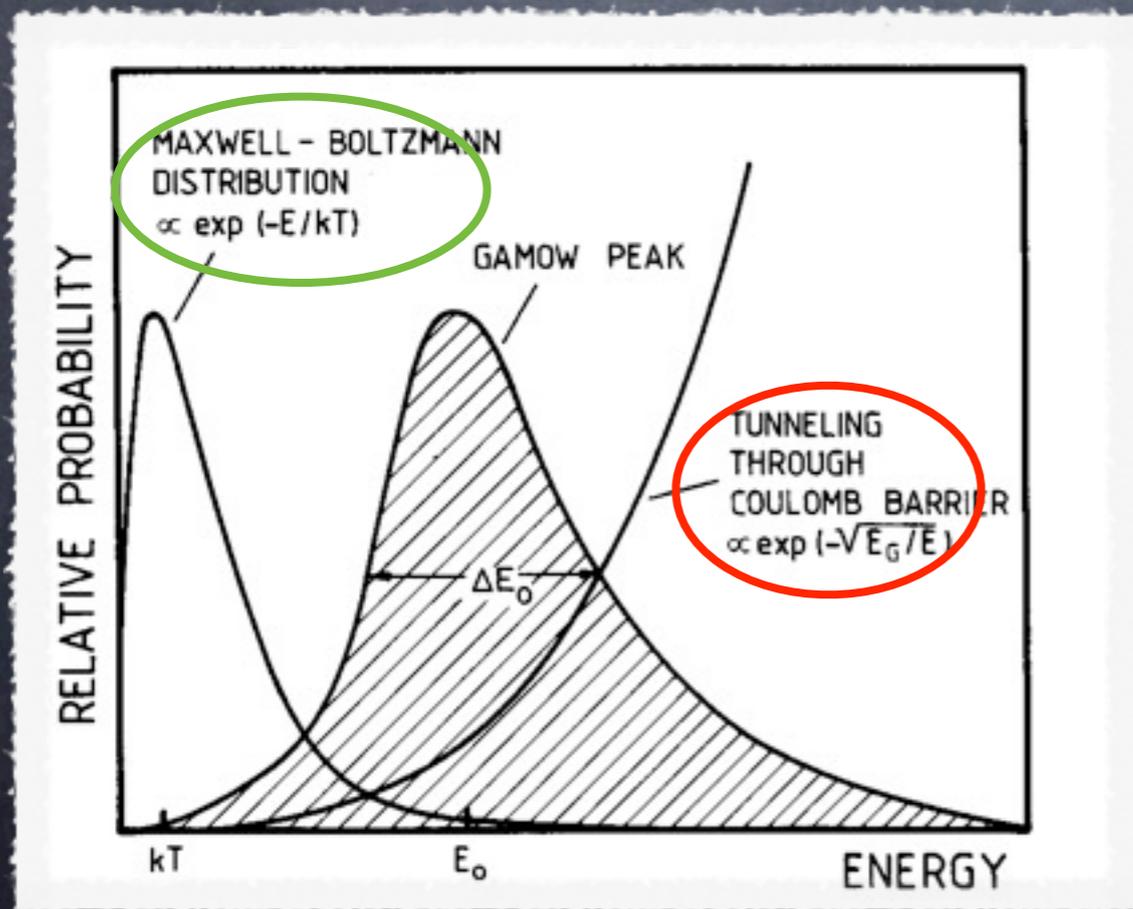
nel Sole: $T = 1.5 \cdot 10^7 \text{K}$

$kT = 1 \text{ keV} \ll E_{\text{Coul}}(0.5-2 \text{ MeV})$

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} \exp \left(-31.29 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot \sqrt{\frac{\mu}{E}} \right)$$

Fattore Astrofisico

Fattore di Gamow



Le reazioni nucleari che generano l'energia capace di alimentare le stelle avvengono in una ristretta finestra energetica detta **Picco di Gamow**

da pochi fino a qualche centinaio di keV

Dalle stelle ... ai laboratori

-> La sezione d'urto alle energie di interesse per i processi astrofisici è molto bassa per effetto della barriera Coulombiana

$$R_{\text{lab}} = \sigma \varepsilon I_p \rho N_{\text{av}}/A$$

$$\text{pbarn} < \sigma < \text{nbarn}$$

$$\varepsilon \sim 10 - 70\%$$

$$I_p \sim \text{mA}$$

$$\rho \sim \mu\text{g}/\text{cm}^2$$

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

=> event/month < R_{lab} < event/day

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} e^{-\sqrt{E_G/E}}$$

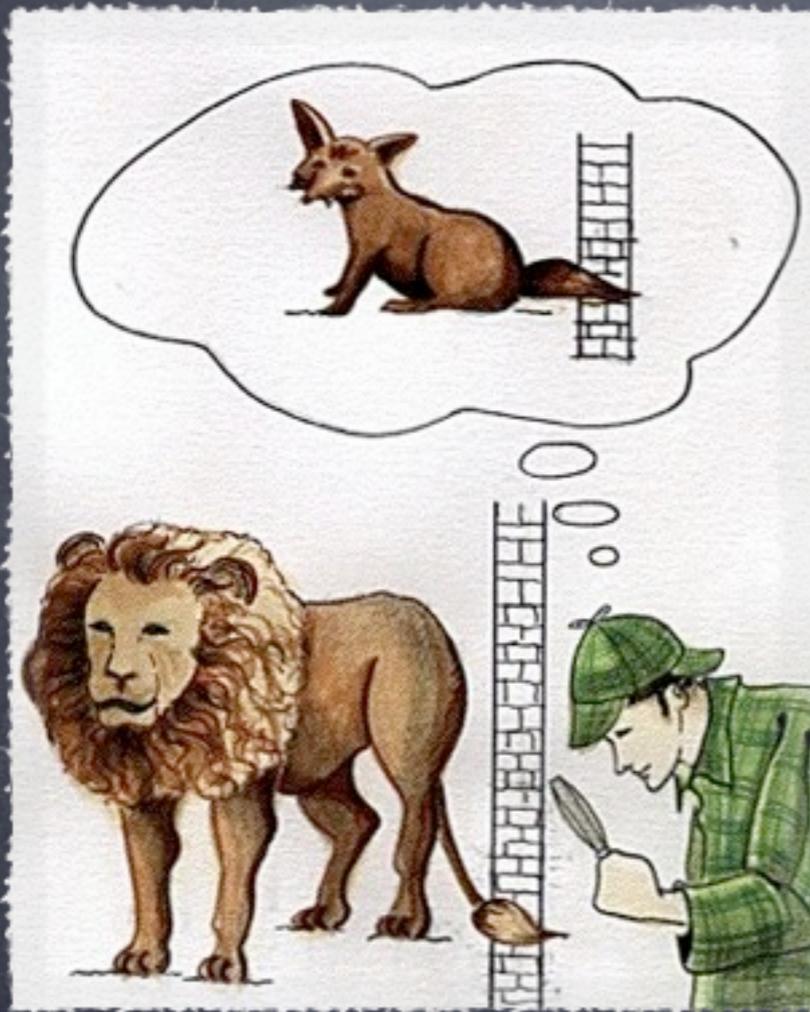
-> la sezione d'urto decresce esponenzialmente con E

=> si deve usare estrapolazioni!

Reaction	E_0
${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$	21 keV
$d(p, \gamma){}^3\text{He}$	6 keV
${}^{14}\text{N}(p, \gamma){}^{15}\text{O}$	27 keV
${}^3\text{He}({}^4\text{He}, \gamma){}^7\text{Be}$	22 keV

rischi delle estrapolazioni

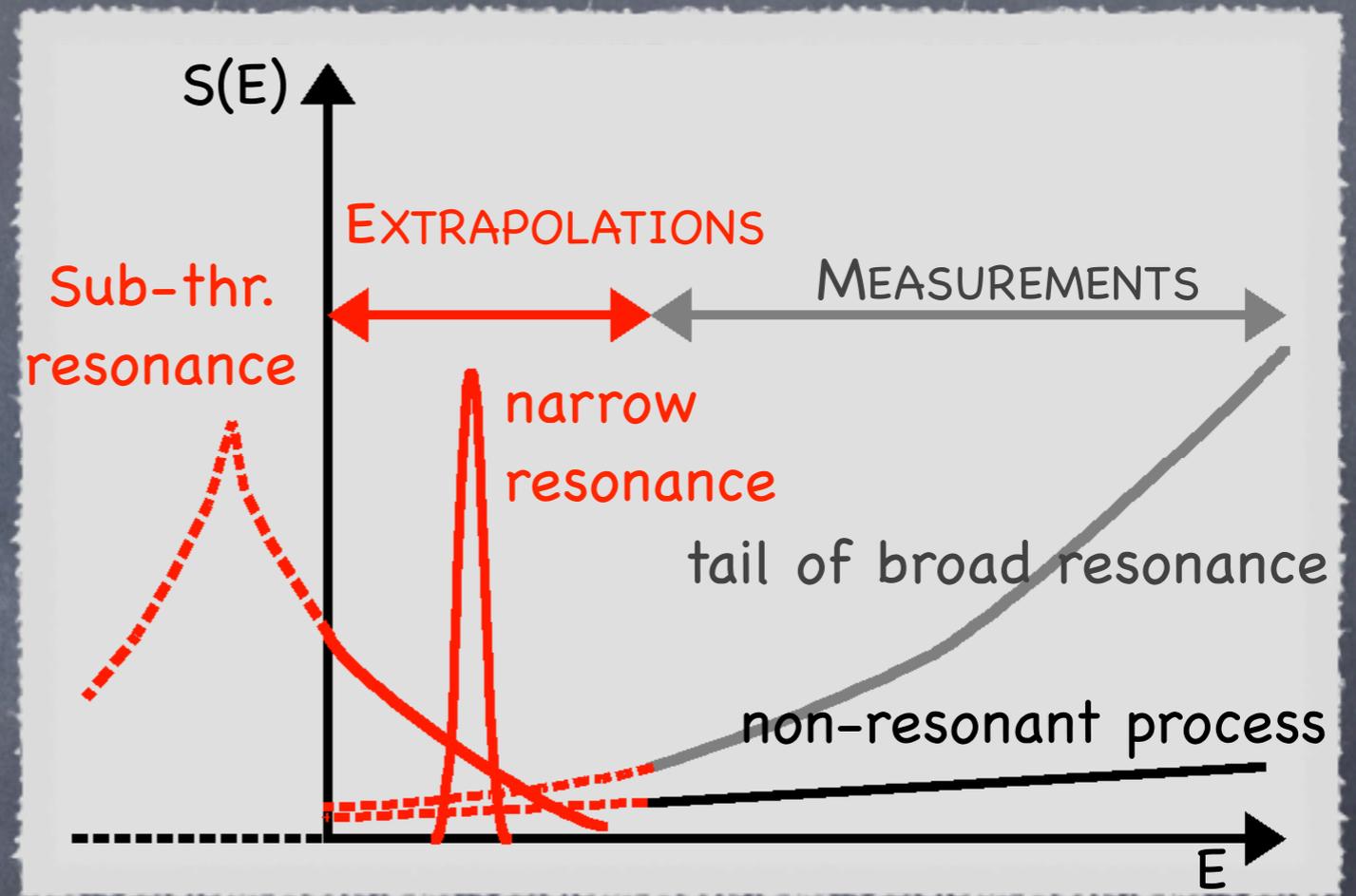
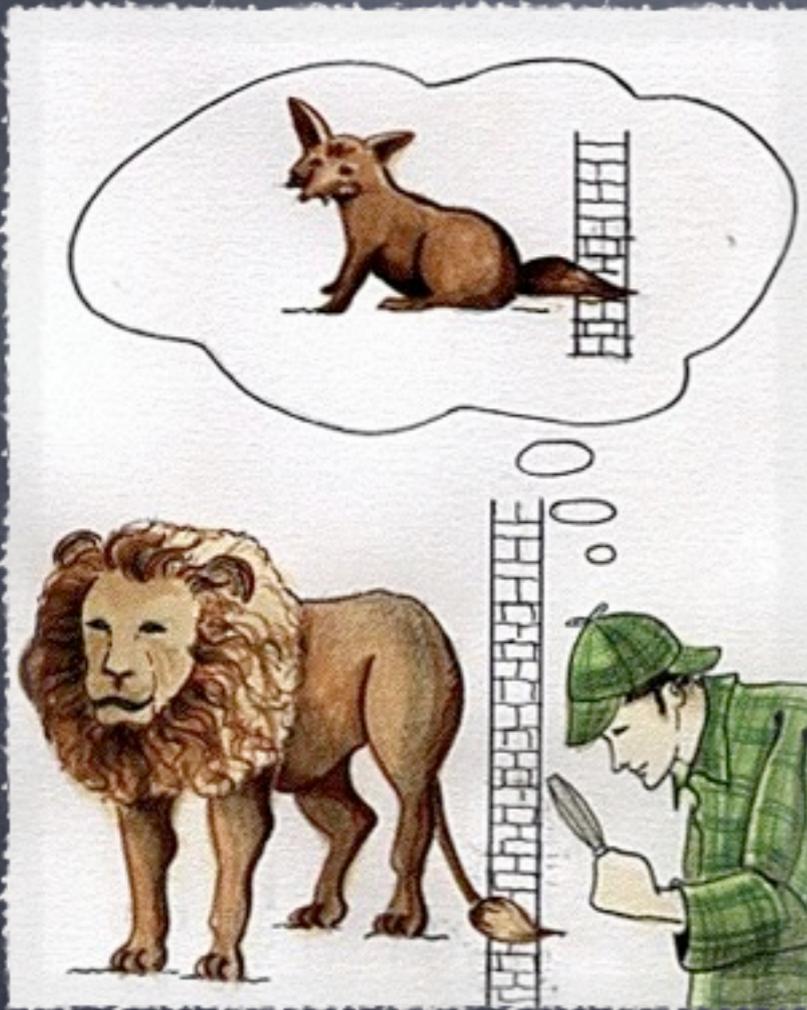
ma ...



non sempre le estrapolazioni funzionano!

rischi delle estrapolazioni

but ...



non sempre le estrapolazioni funzionano!

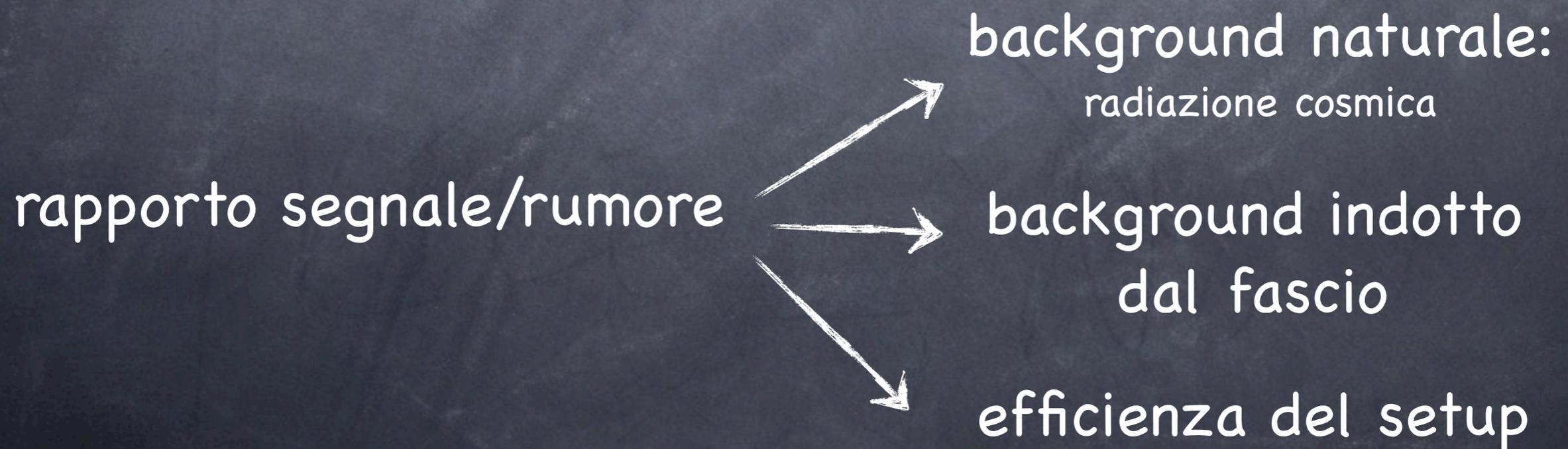
-> è necessario utilizzare setup sperimentali in underground per limitare il problema del background dovuto ai raggi cosmici

Requisiti sperimentali ottimali

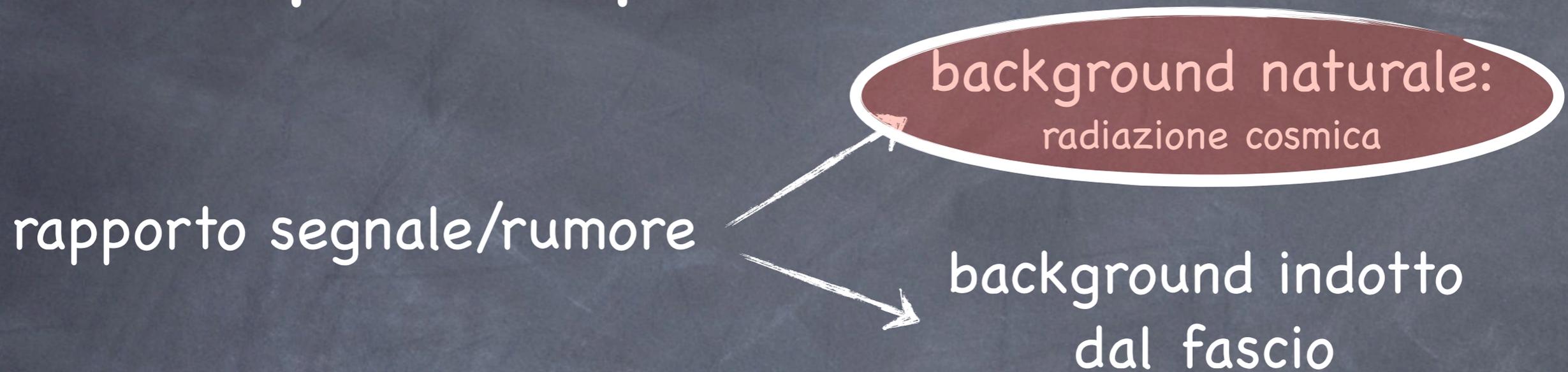
La sezione d'urto dipende fortemente dall'energia

- ➔ ottima risoluzione energetica del fascio
- ➔ elevata purezza e stabilità dei bersagli

Alle basse energie la sezione d'urto raggiunge valori molto bassi (pbarn)



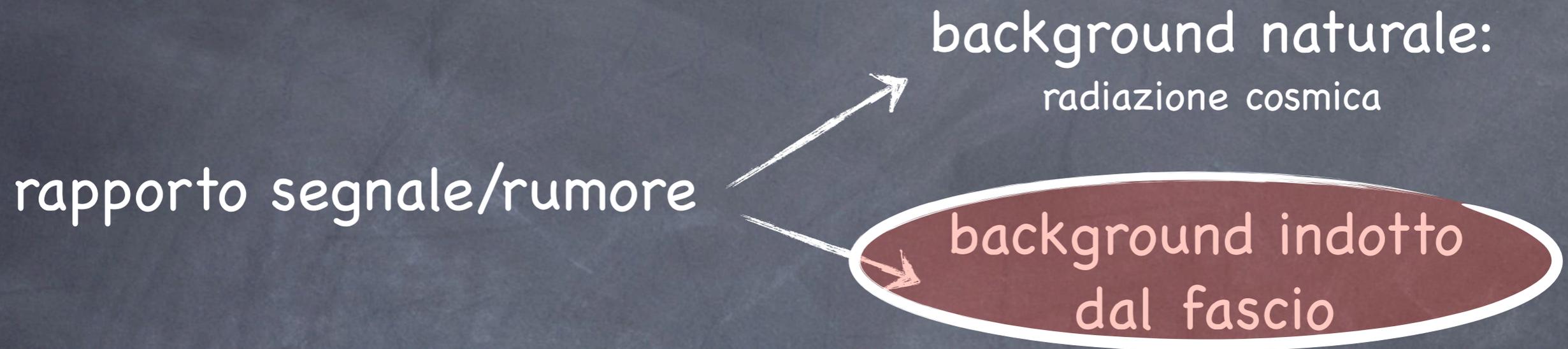
Requisiti sperimentali ottimali



a energie maggiori di 4 MeV nello spettro gamma è dominato dalla radiazione cosmica che può essere ridotta solo ponendo il setup in un laboratorio underground

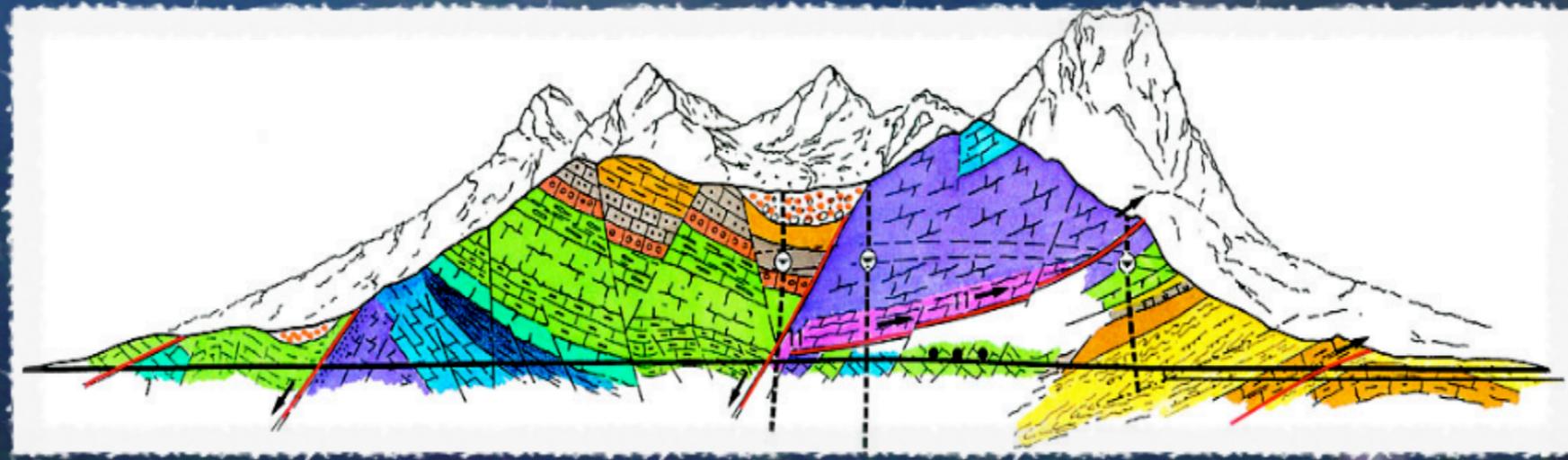
sotto i 4 MeV è necessario schermare il setup con schermi passivi (tipicamente rame e piombo) per ridurre la componente dovuta agli isotopi radioattivi presenti nei materiali che compongono i laboratori stessi (catene uranio-torio, ^{40}K , radon ...)

Requisiti sperimentali ottimali

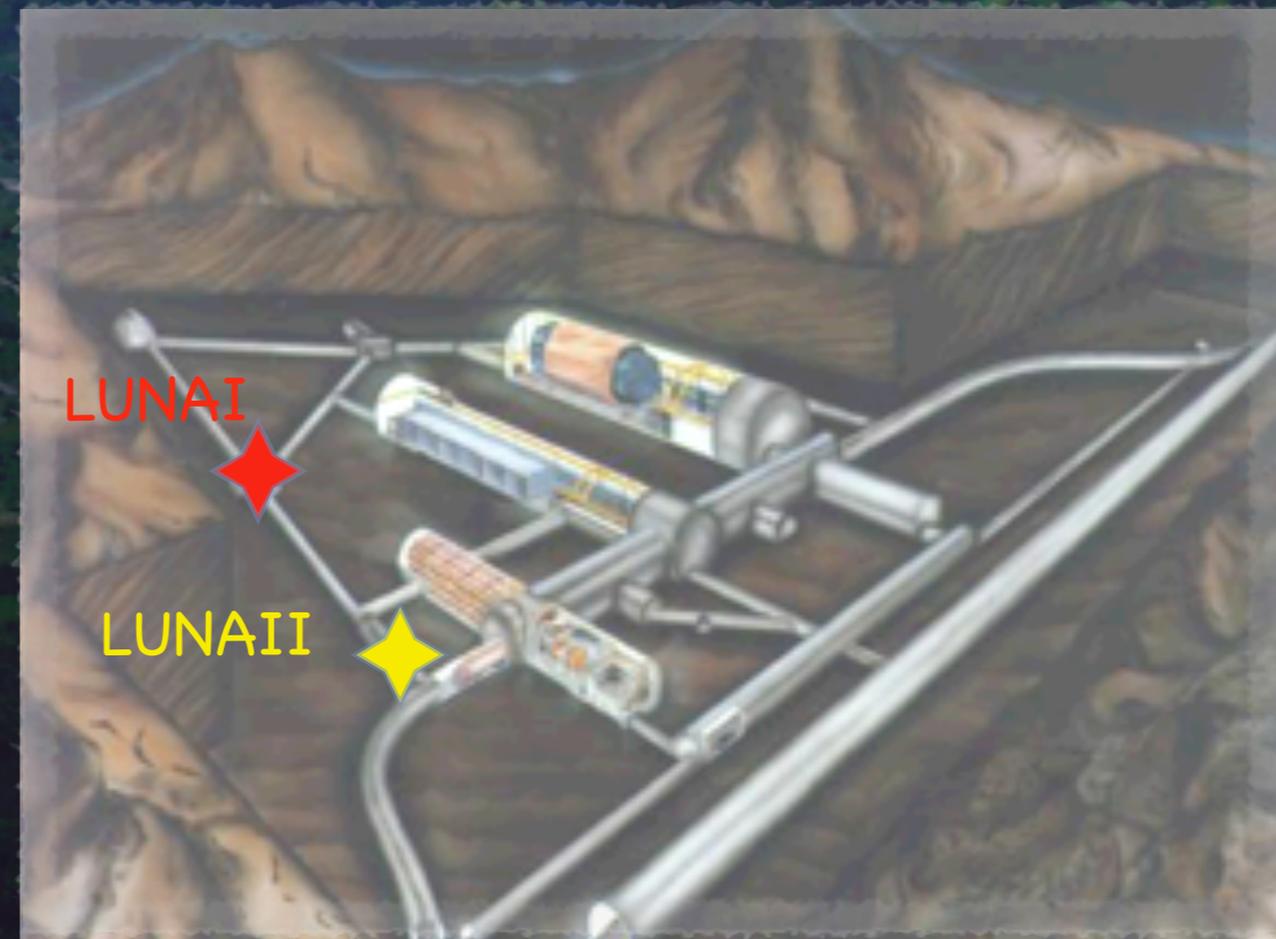


il background indotto dal fascio sui materiali che compongono i bersagli e il setup utilizzato varia da reazione in dipendenza degli elementi che compongono le superfici con cui il fascio interagisce e deve essere studiato caso per caso.

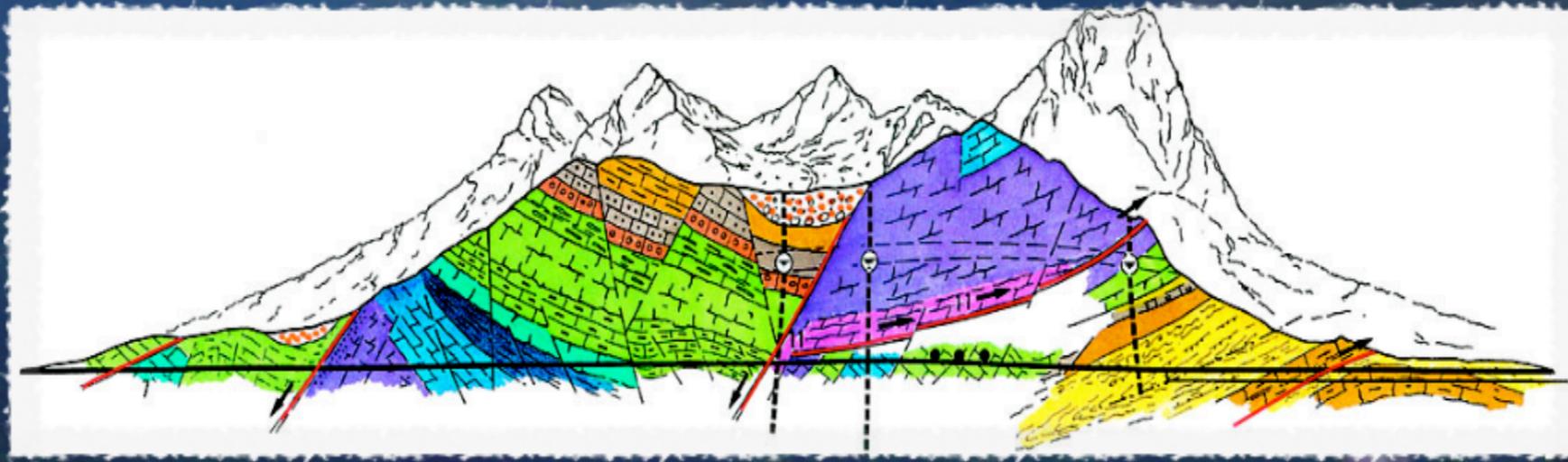
Laboratori Nazionali del Gran Sasso



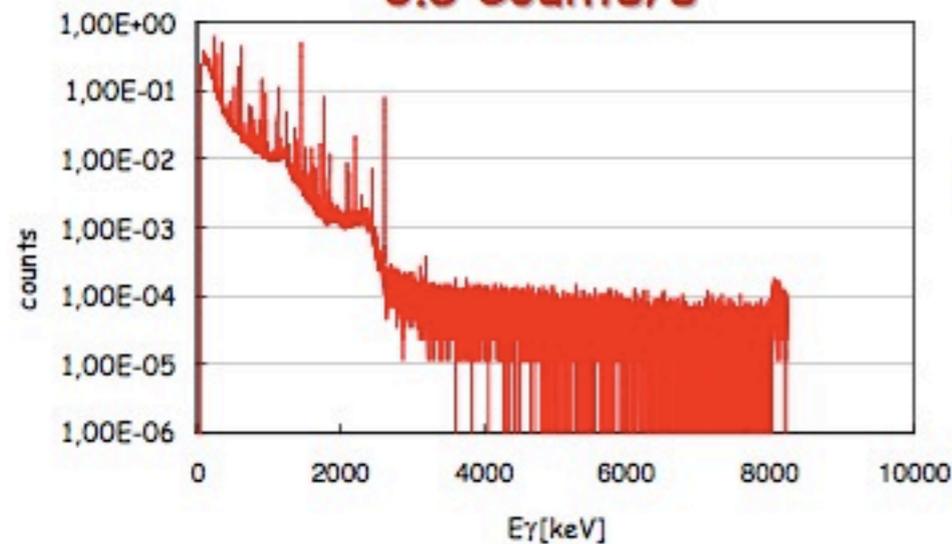
- 1400 m rock overburden (=3800 m w.e.)
- Flux attenuation: $n 10^{-3}$ (CaCO_3)
 $\mu 10^{-6}$ ($1/\text{m}^2 \text{ h}$)
- underground area 18000 m^2
- support facilities on the surface



Laboratori Nazionali del Gran Sasso



$3\text{MeV} < E_\gamma < 8\text{MeV}$:
0.5 Counts/s

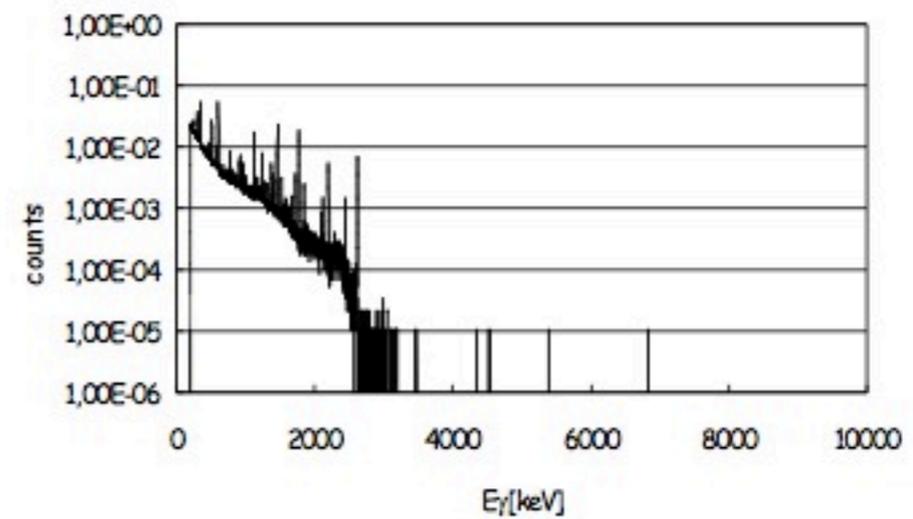


HpGe

GOING
UNDERGROUND



$3\text{MeV} < E_\gamma < 8\text{MeV}$
0.0002 Counts/s



Laboratory for **U**nderground **N**uclear **A**strophysics

LUNA-I:

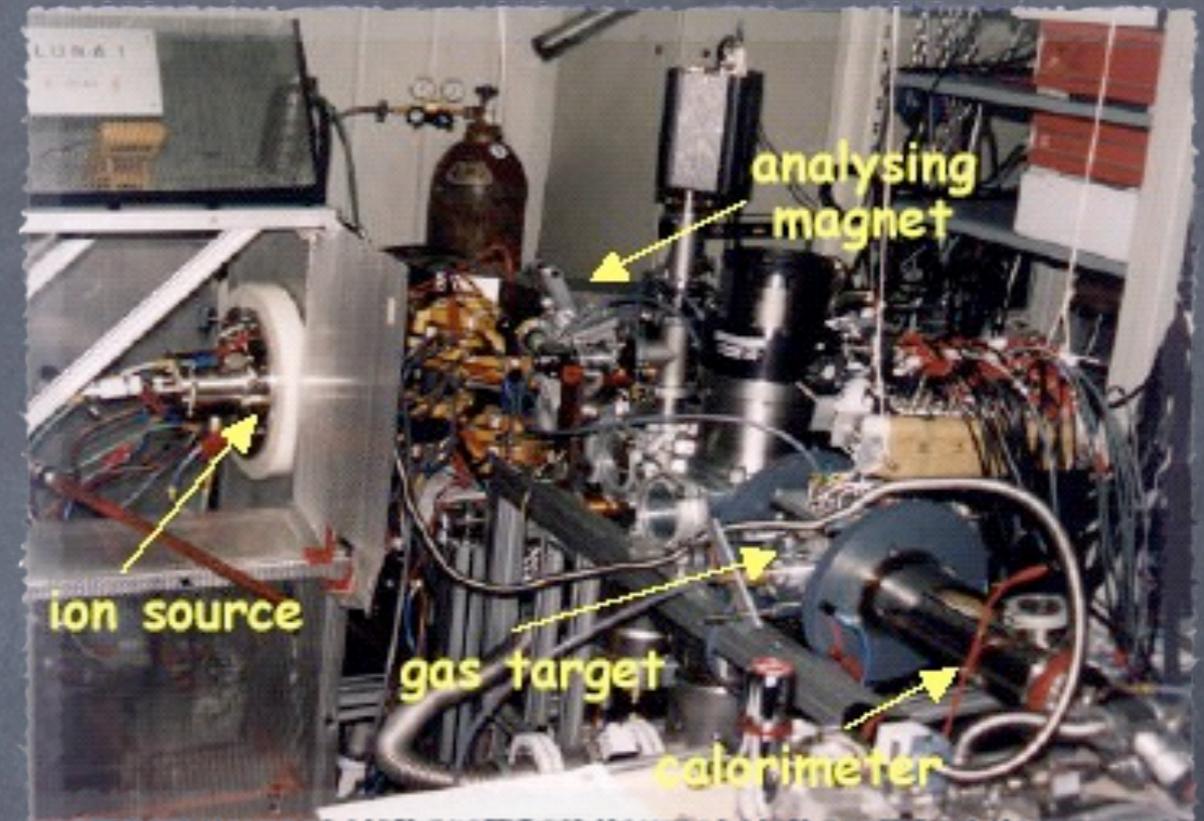
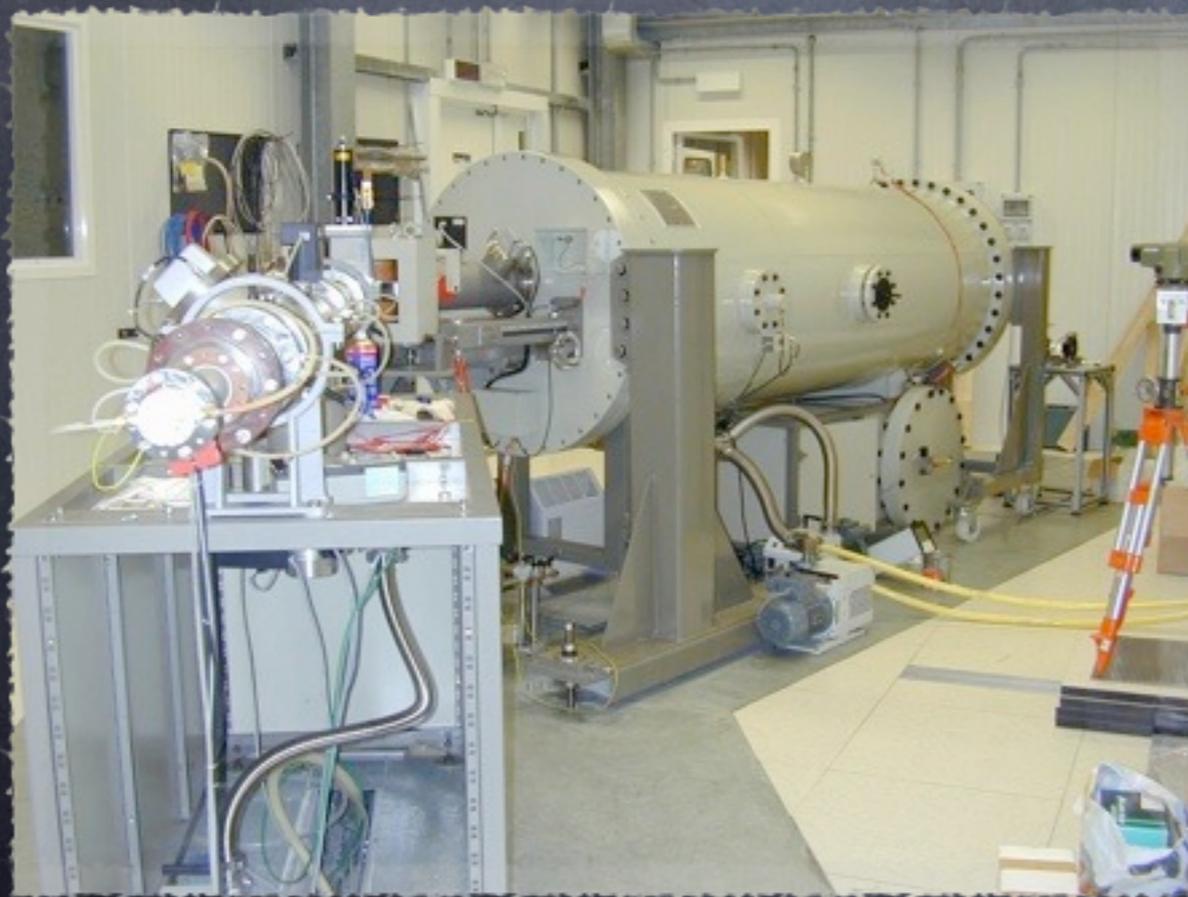
beams = p, α

Current max = 1 mA

Voltage range = 1-50 kV

Beam energy spread: 20 eV

Long term stability (8 h): 10^{-4} eV



LUNA-II: Cockcroft-Walton accelerator

beams = p, α

Current max = 500 μ A (protons),
250 μ A (alphas)

Voltage range = 50-400 kV

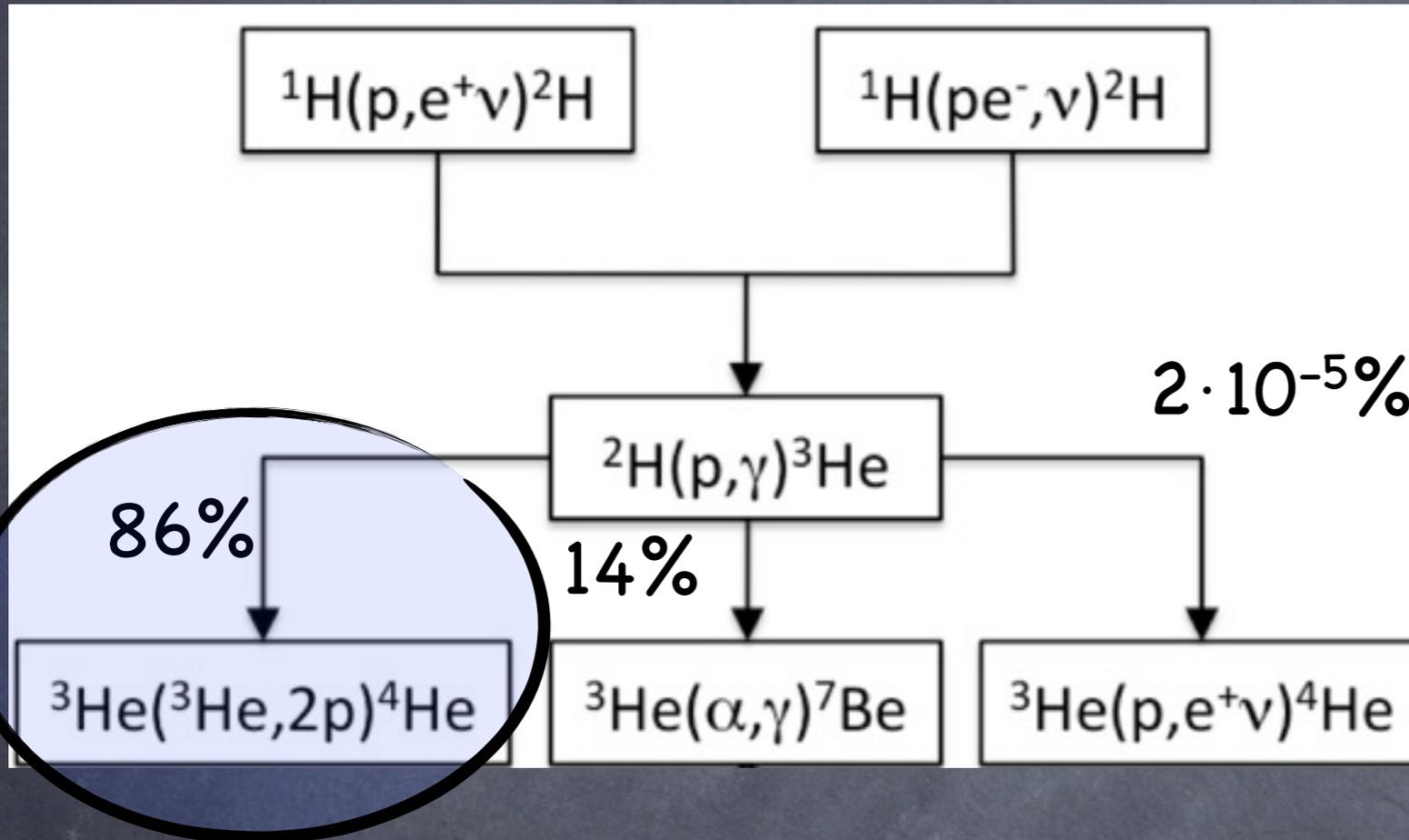
Absolute energy error: ± 300 eV

Beam energy spread < 100 eV

Long term stability (1h): 5 eV



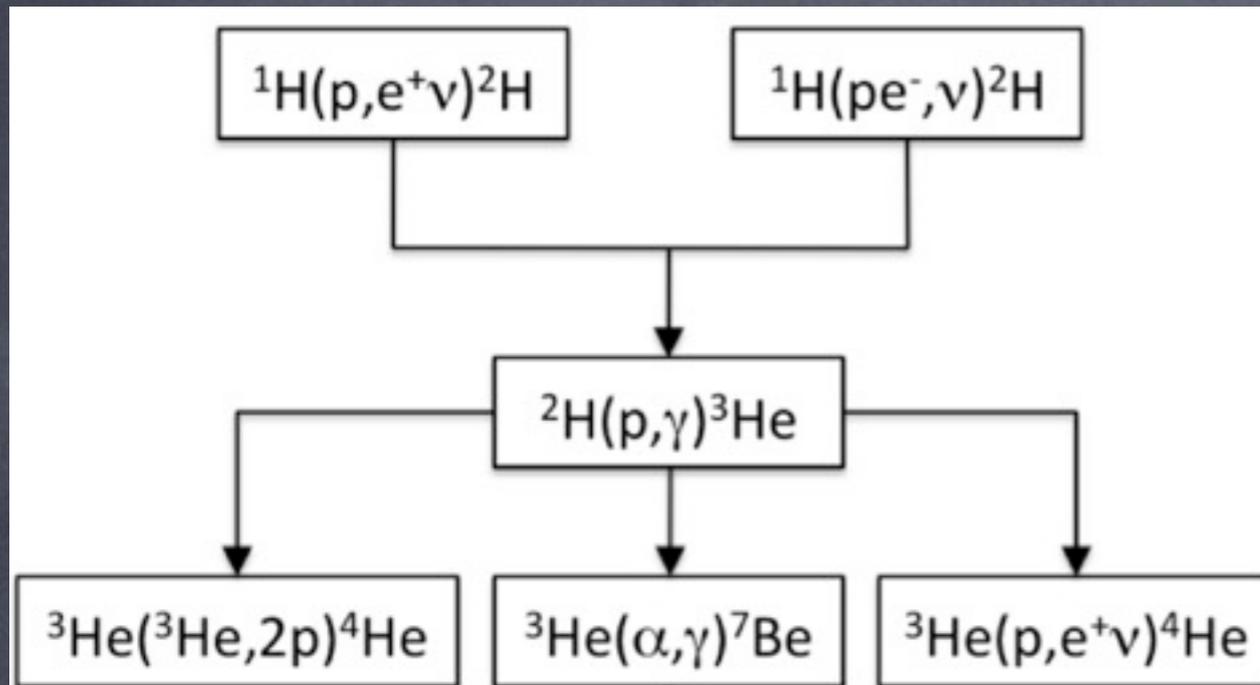
pp-chain



picco di Gamow:
16 - 28 keV

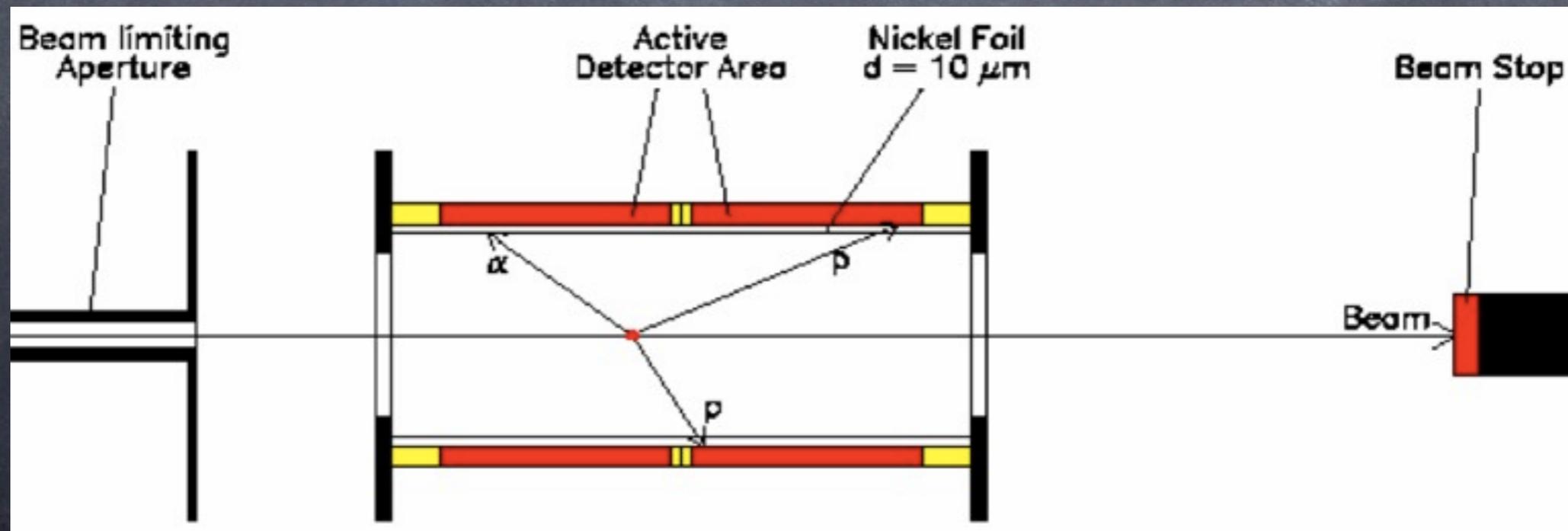
Solar neutrino problem

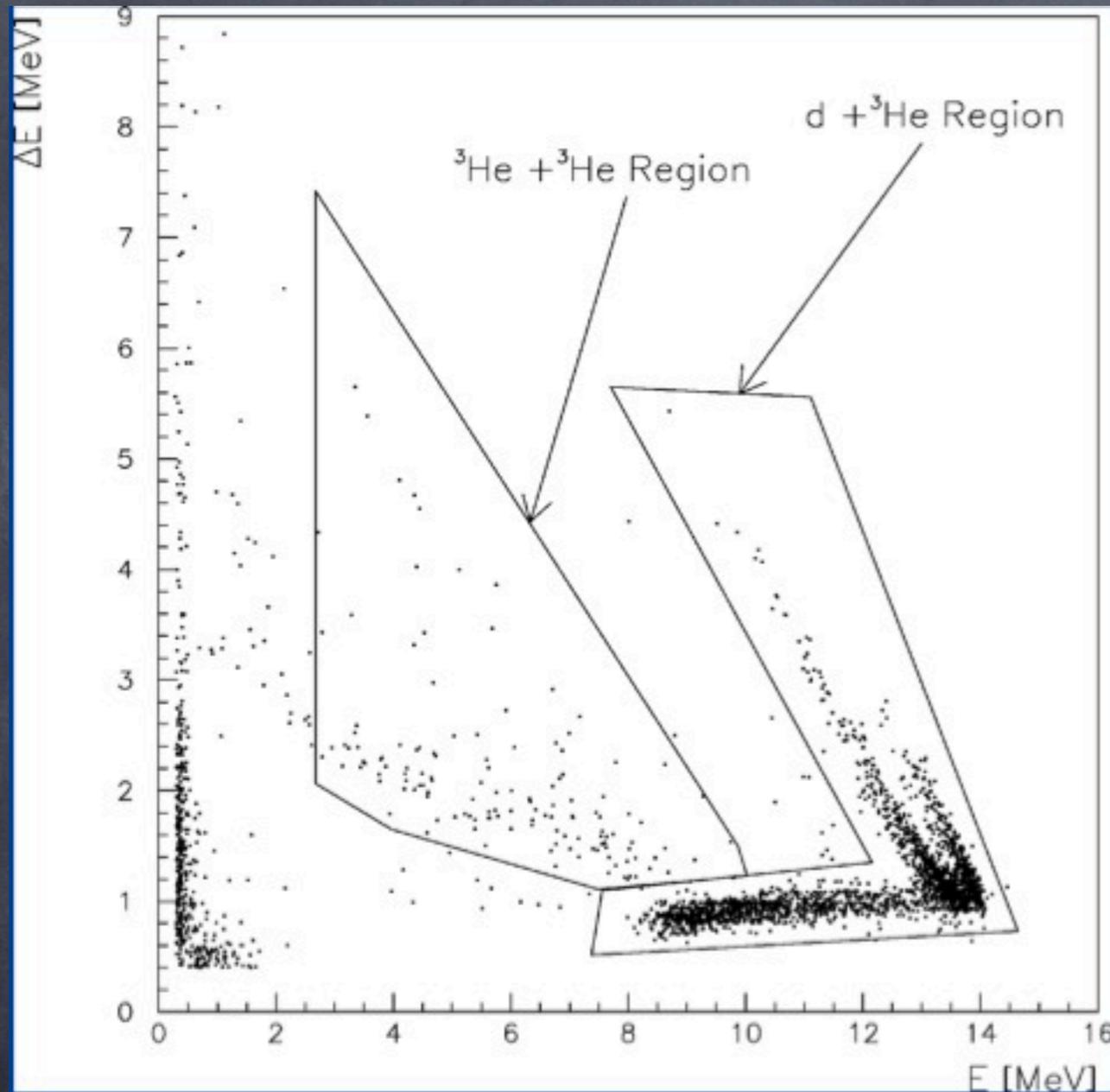
misurare la sezione d'urto di processi nucleari alle energie di interesse astrofisico possono essere un elemento importante per risolvere il puzzle dei neutrini solari



Coincidenze tra due rivelatori al silicio:

- ◆ rate: 2cts/mese
- ◆ sezione d'urto: 20 fb
- ◆ bck < $4 \cdot 10^{-2}$ cts/d in ROI





Coincidenze tra due rivelatori al silicio:

- ◆ rate: 2cts/mese
- ◆ sezione d'urto: 20 fb
- ◆ bck $< 4 \cdot 10^{-2}$ cts/d in ROI

fondo indotto dal fascio $\rightarrow {}^3\text{He}(d,p){}^4\text{He}$



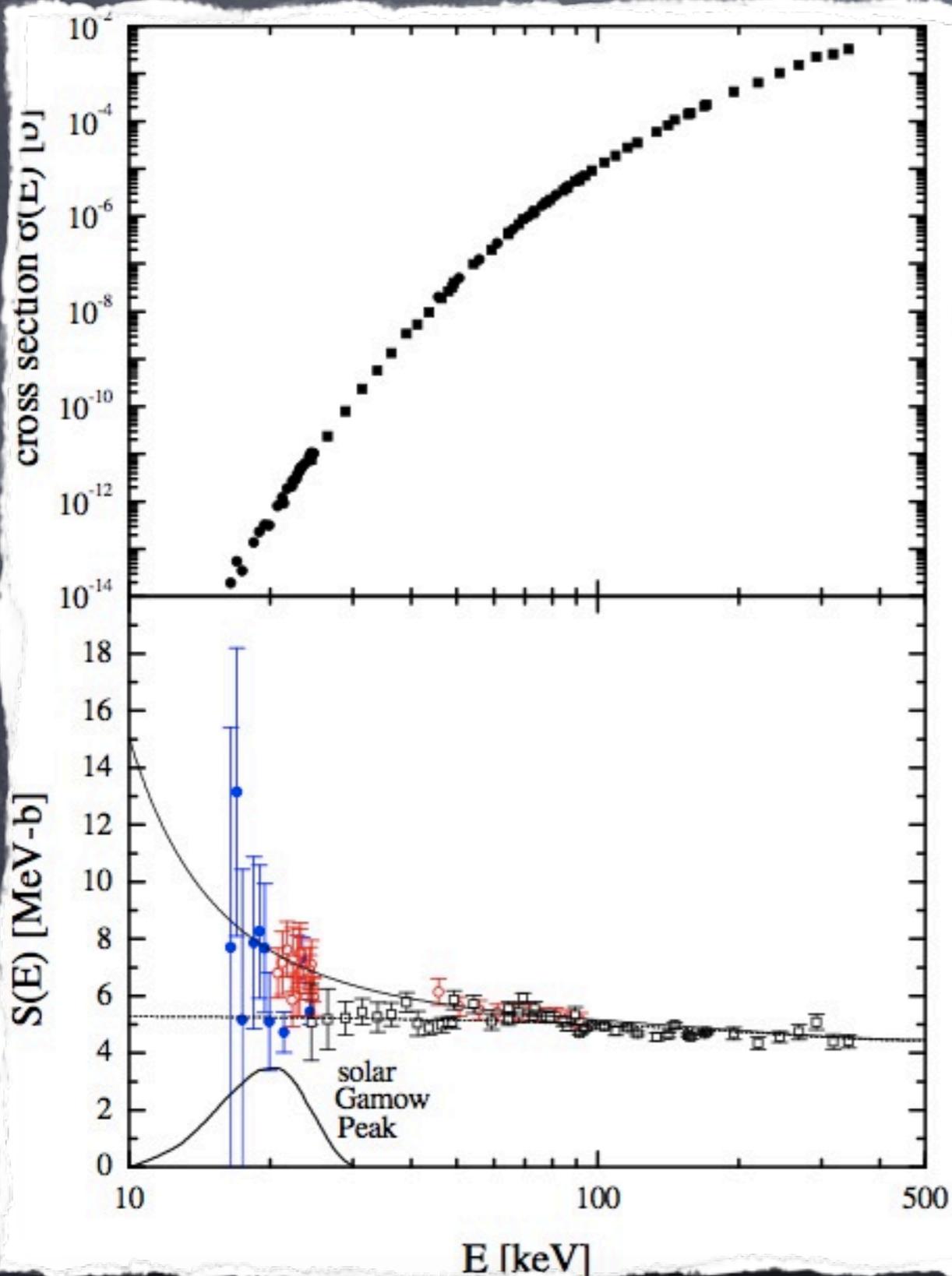
$$E_{\text{MIN}} = 16.5 \text{ keV}$$

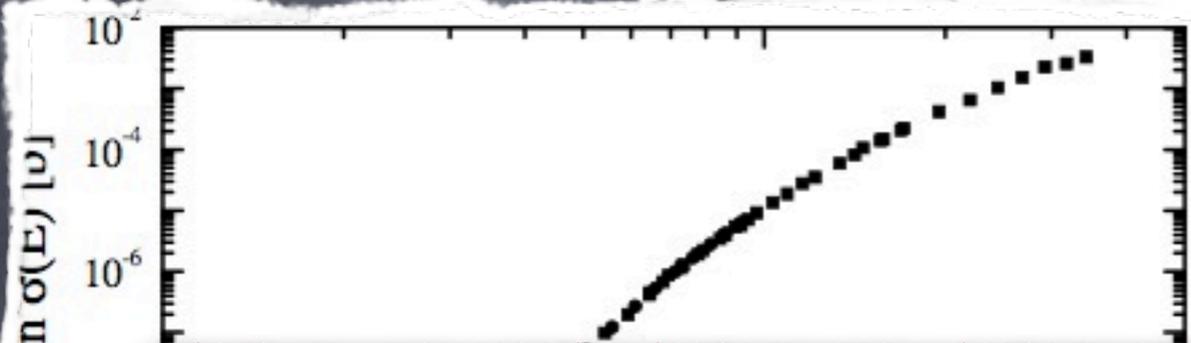
$$\sigma = 20 \pm 20 \text{ fbarn}$$

$$S(0) = 5.32 \pm 0.08 \text{ MeVb}$$

R. Bonetti et al. PRL 82 (1999)26
LUNA collaboration

Non è necessario
 procedere a nessuna
 estrapolazione!





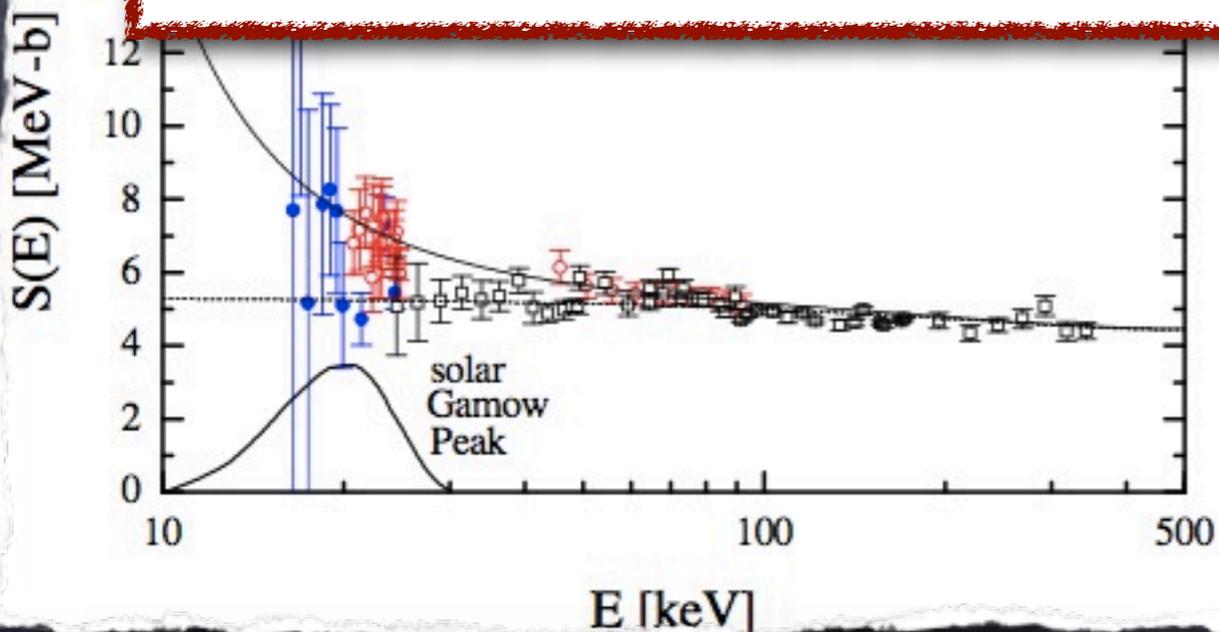
$$E_{\text{MIN}} = 16.5 \text{ keV}$$

$$\sigma = 20 + 20 \text{ fbarn}$$

Dear Professors Corvisiero and Rolfs:

I am writing to you about a historic opportunity of which I first became aware at the recent meeting on Solar Fusion Reactions at the Institute of Nuclear Theory, Washington University. At this meeting, I had the opportunity to see for the first time the results of the LUNA measurements of the important ${}^3\text{He} - {}^3\text{He}$ reaction in a region that covers a significant part of the Gamow energy peak for solar fusion. This was a thrill that I had never believed possible. These measurements signal the most important advance in nuclear astrophysics in three decades.

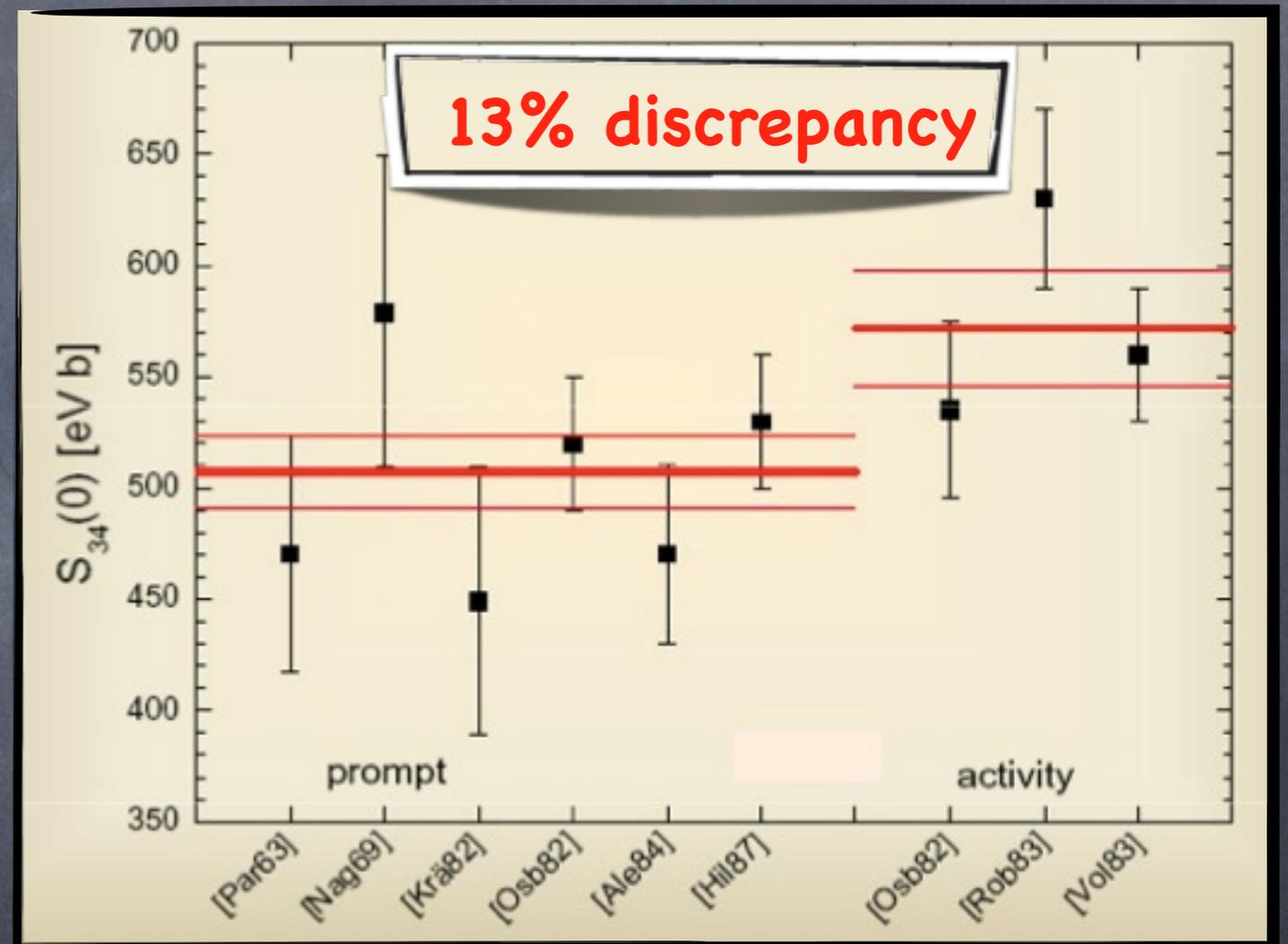
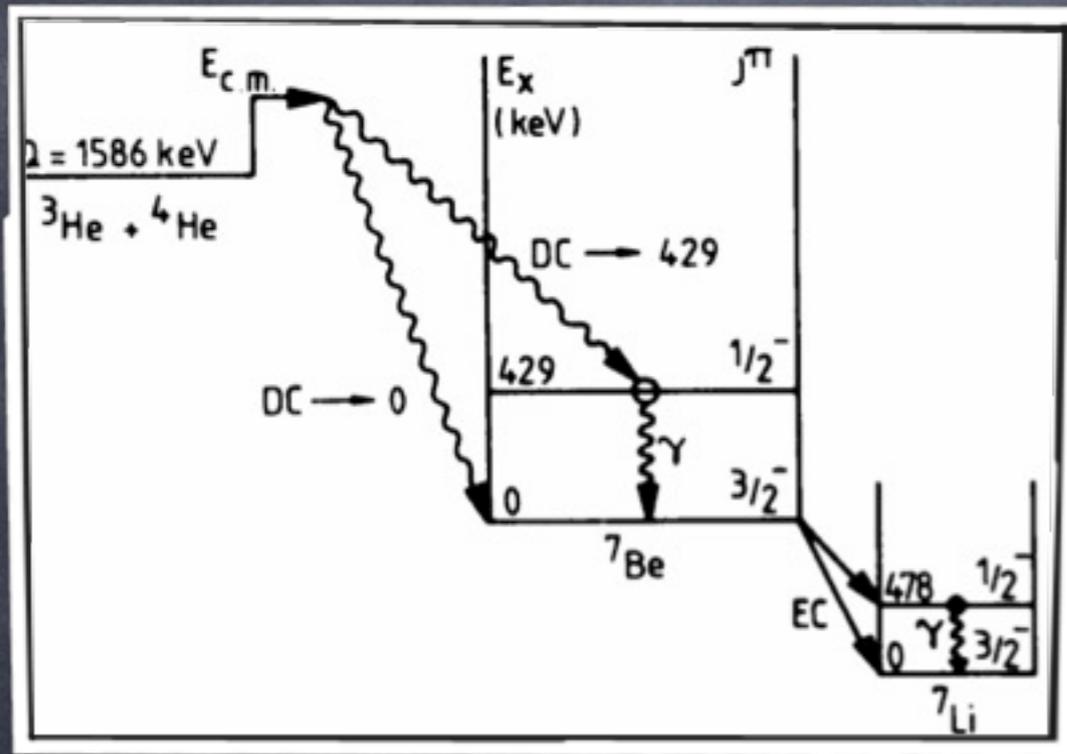
J. Bahcall



Non è necessario
procedere a nessuna
estrapolazione!

${}^3\text{He}({}^4\text{He}, \gamma){}^7\text{Be}$ ($Q=1.6$ MeV)

reazione chiave per la produzione dei neutrini del ${}^7\text{Be}$ e ${}^8\text{B}$ nel Sole e importante per la produzione di ${}^7\text{Li}$ nella BBN

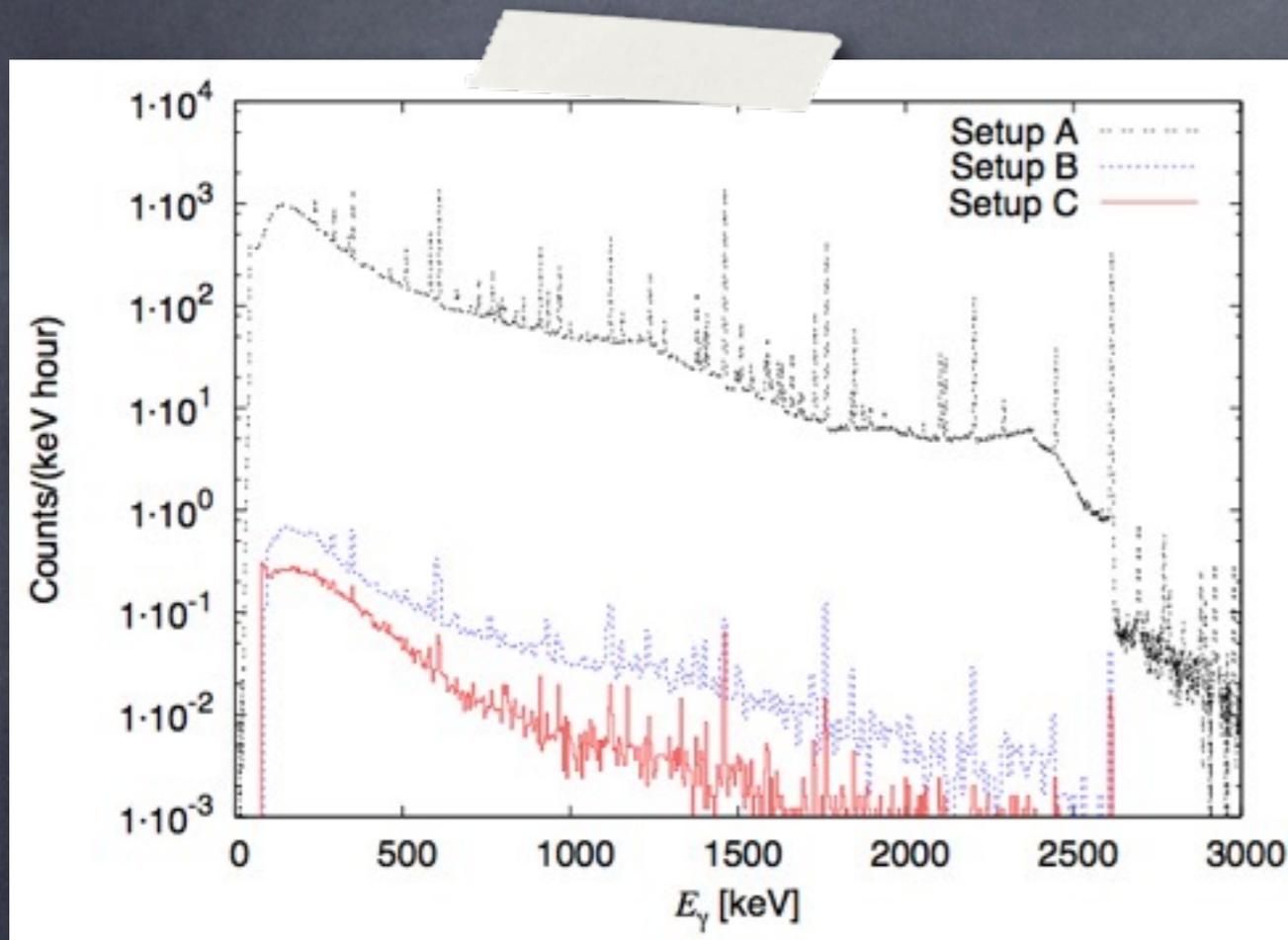


Il flusso Φ_B dipende dagli input di **fisica nucleare** e **dell'astrofisica**

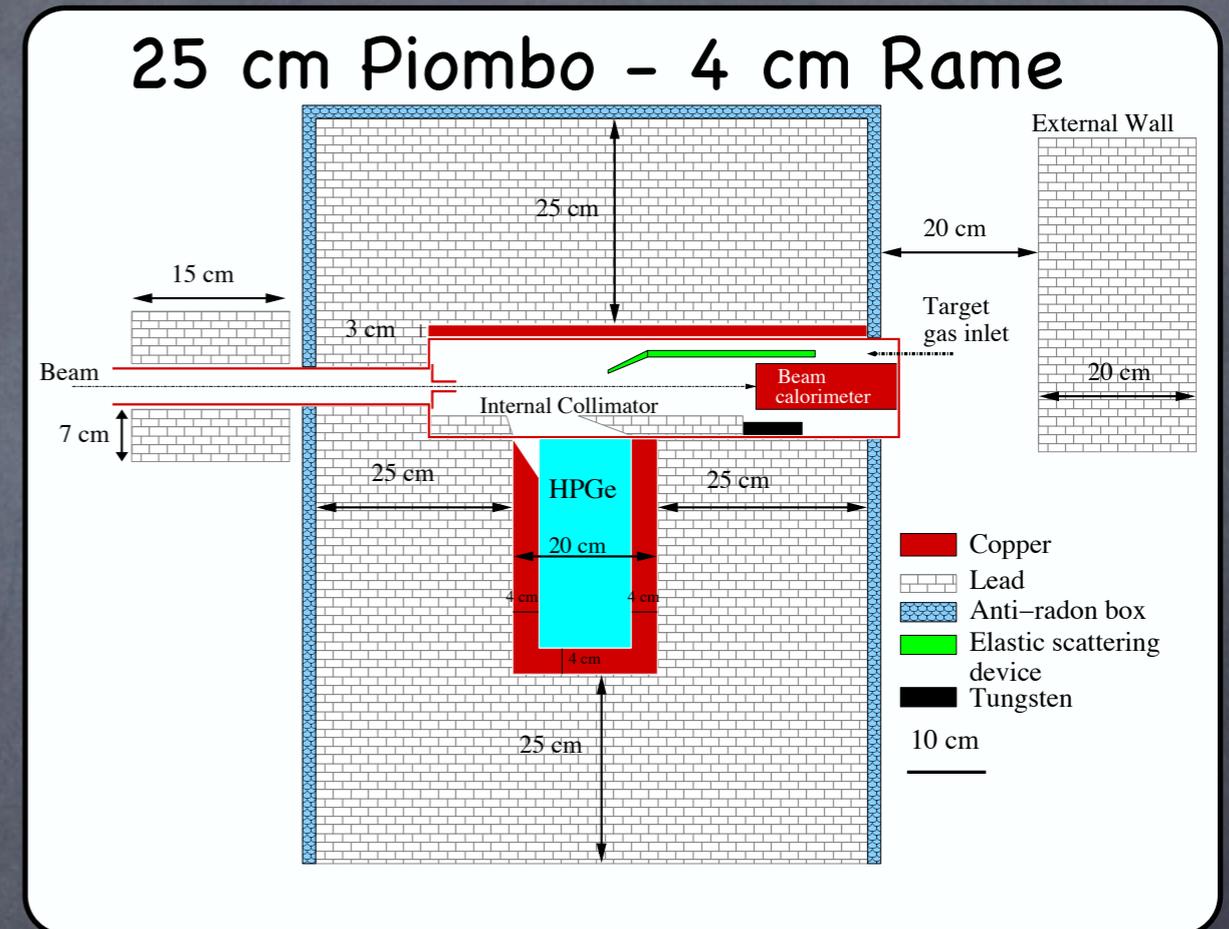
$$\Phi_B = \Phi_B(\text{SSM}) \cdot s_{33}^{-0.43} s_{34}^{0.84} s_{17}^1 s_{e7}^{-1} s_{pp}^{-2.7} \cdot \text{com}^{1.4} \text{opa}^{2.6} \text{dif}^{0.34} \text{lum}^{7.2}$$

$^3\text{He} + ^4\text{He}$: setup sperimentale

il background è dominato da le catene Uranio-Torio chains e dal ^{40}K



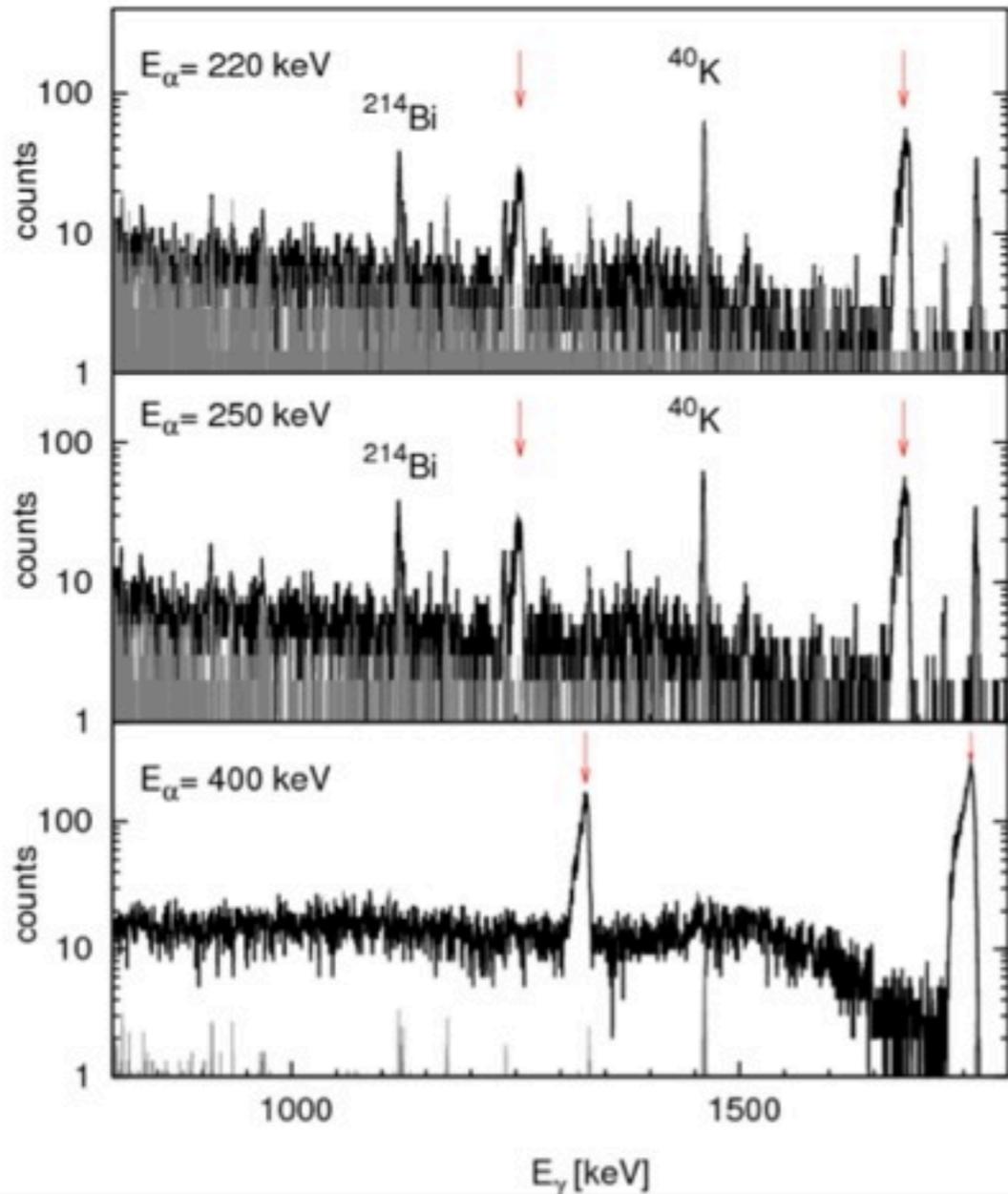
Cacioli et al., EPJA 39 (2009) 179



four orders of magnitude
reduction!!

schermatura maggiormente efficace poiché il
flusso di μ è ridotto

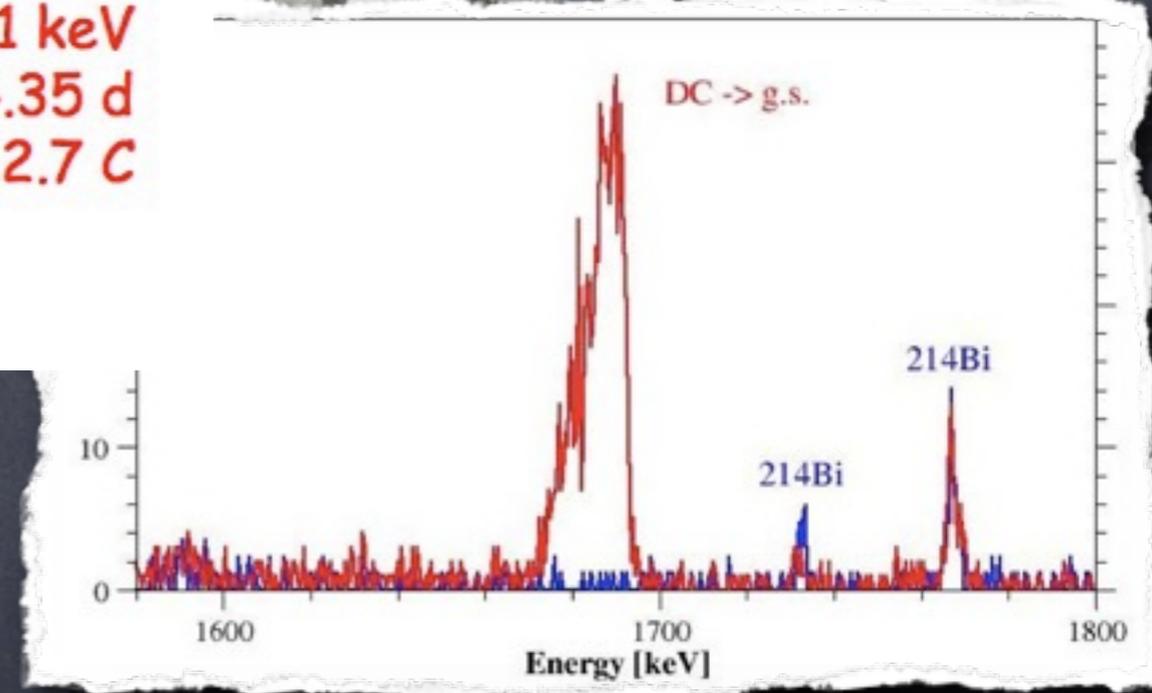
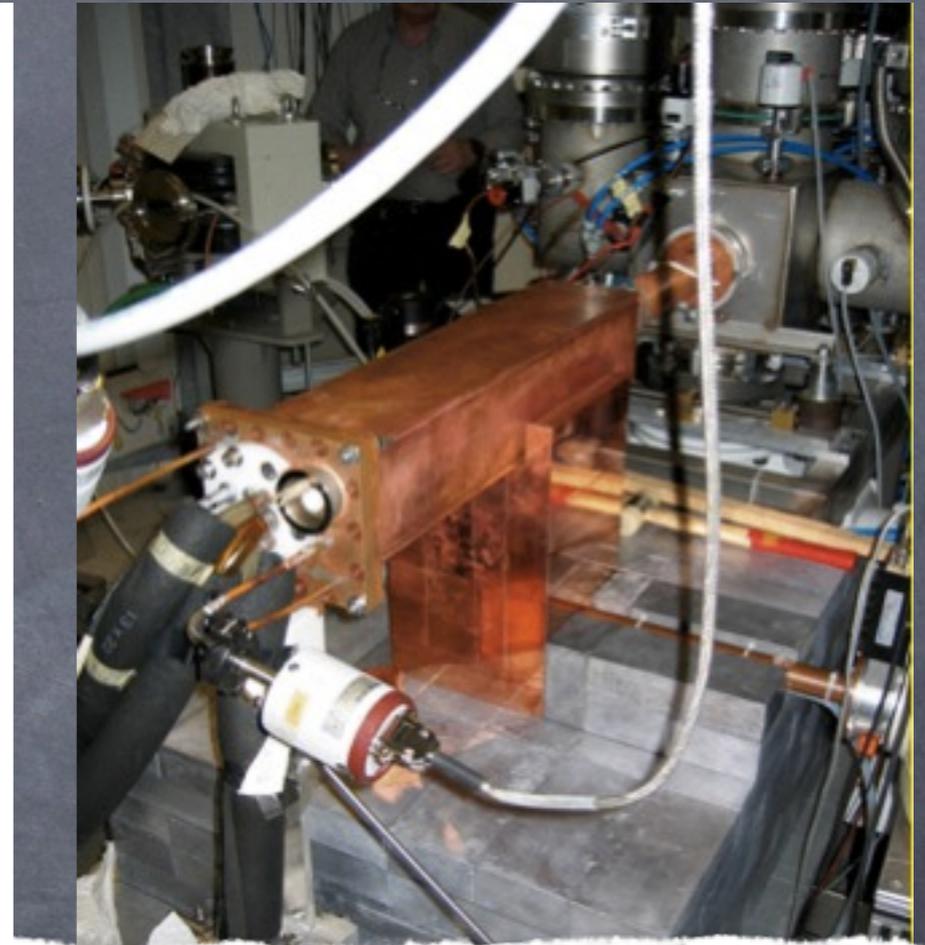
misure sperimentali: γ -prompt



$E_{cm} = 93.3$ keV
 $T = 30.1$ d
 $C = 637$ C

$E_{cm} = 106.1$ keV
 $T = 20.8$ d
 $C = 407$ C

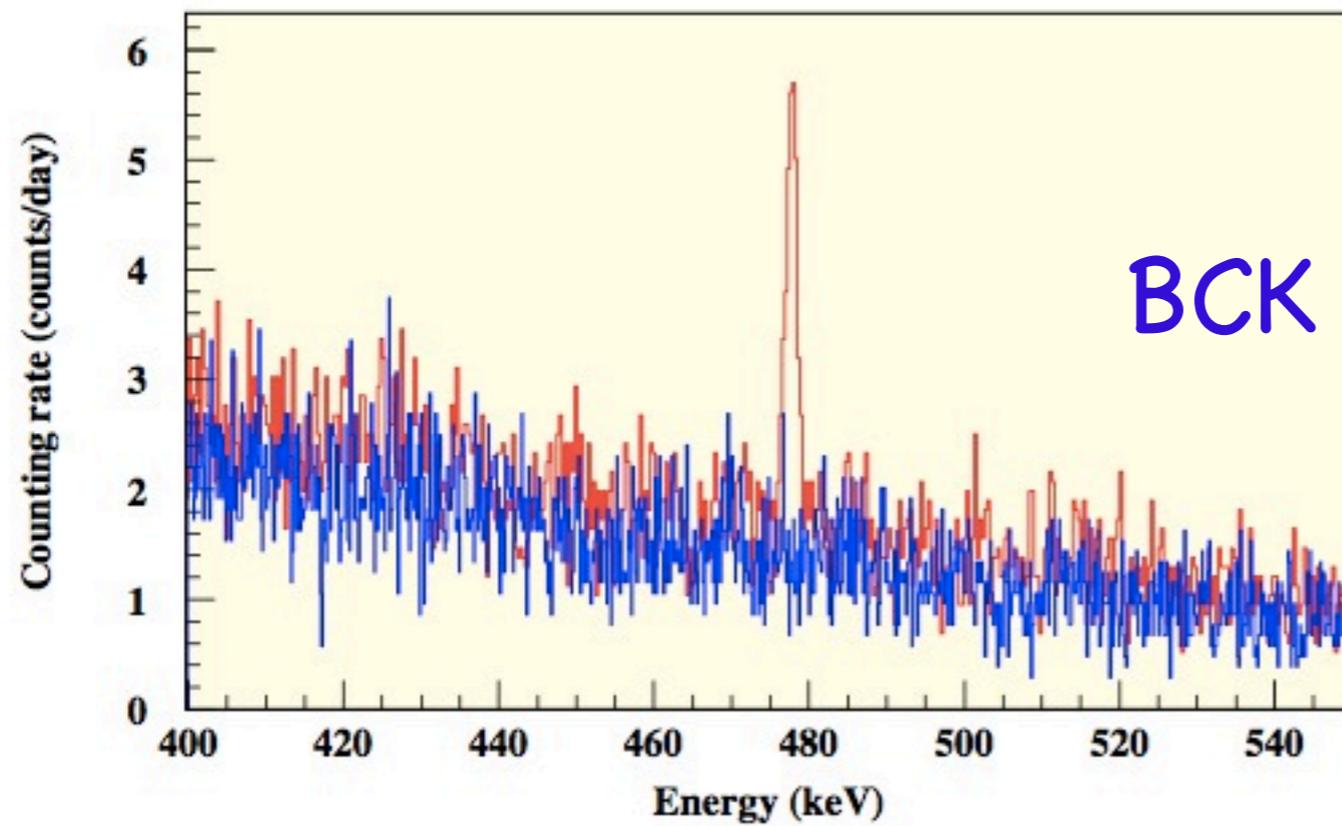
$E_{cm} = 170.1$ keV
 $T = 4.35$ d
 $C = 112.7$ C



Luna Collaboration PRC 75 (2007)065803

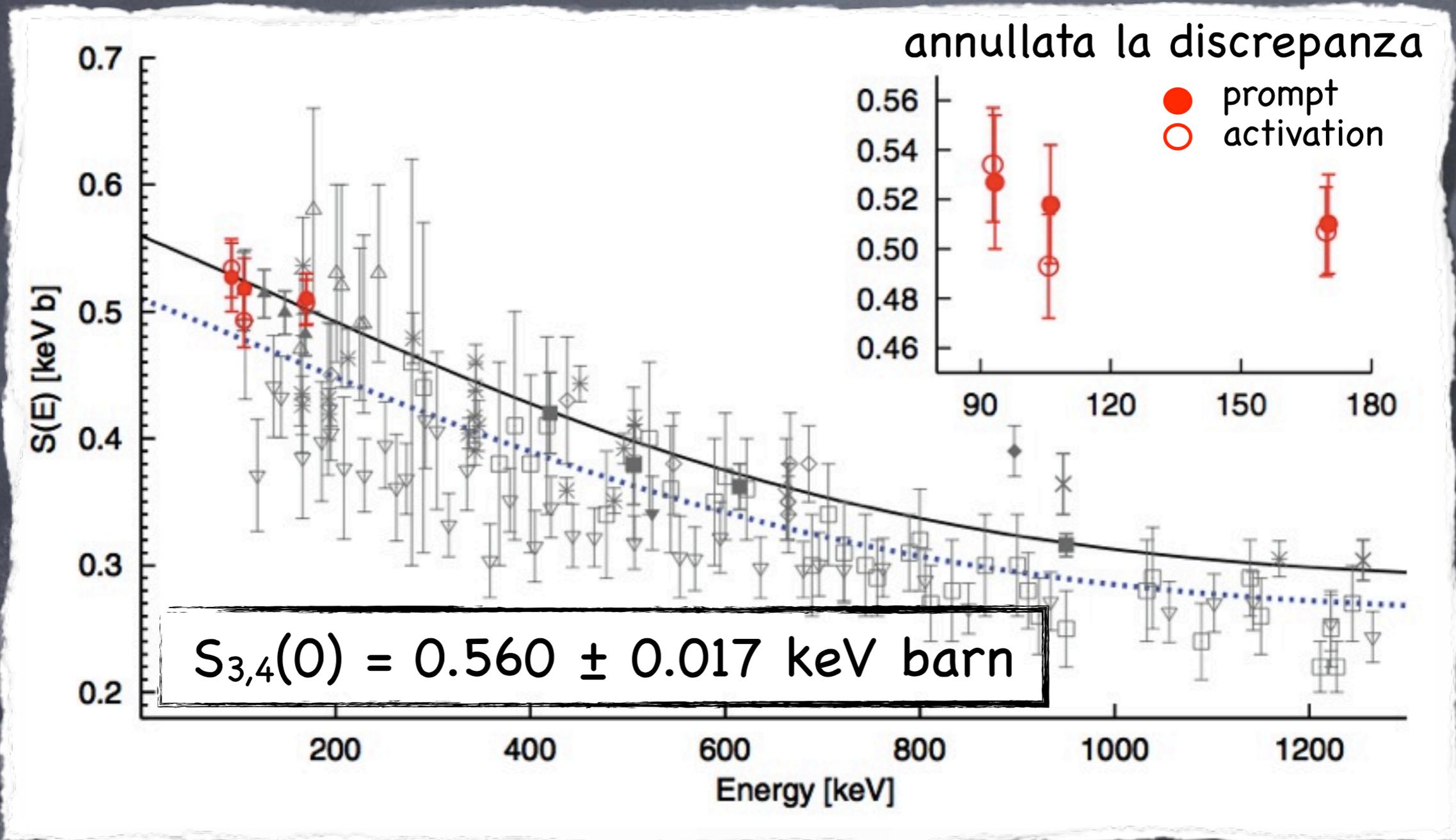
misure sperimentali: attivazione

$E_{lab} = 220 \text{ keV}$ $Q = 637 \text{ C}$ $T = 11.58 \text{ d}$



D. Bemmerer et al., PRL97 (2006) 122502

LUNA results



riduzione delle incertezze per il flusso di neutrini

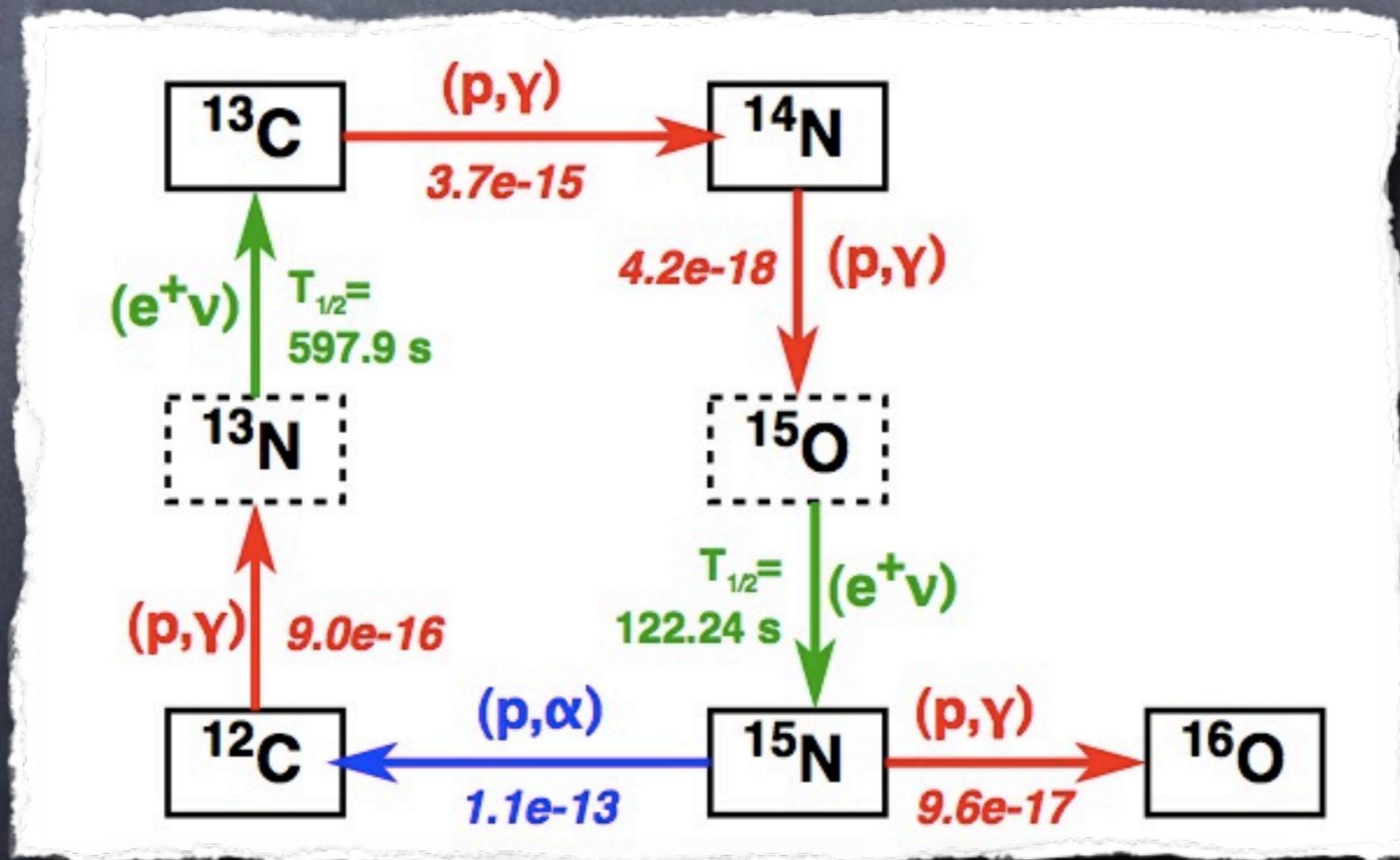
${}^8\text{B}$ → da 12% a 10%

${}^7\text{Be}$ → da 9.4% a 5.5%

$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ ($Q=7.3$ MeV)

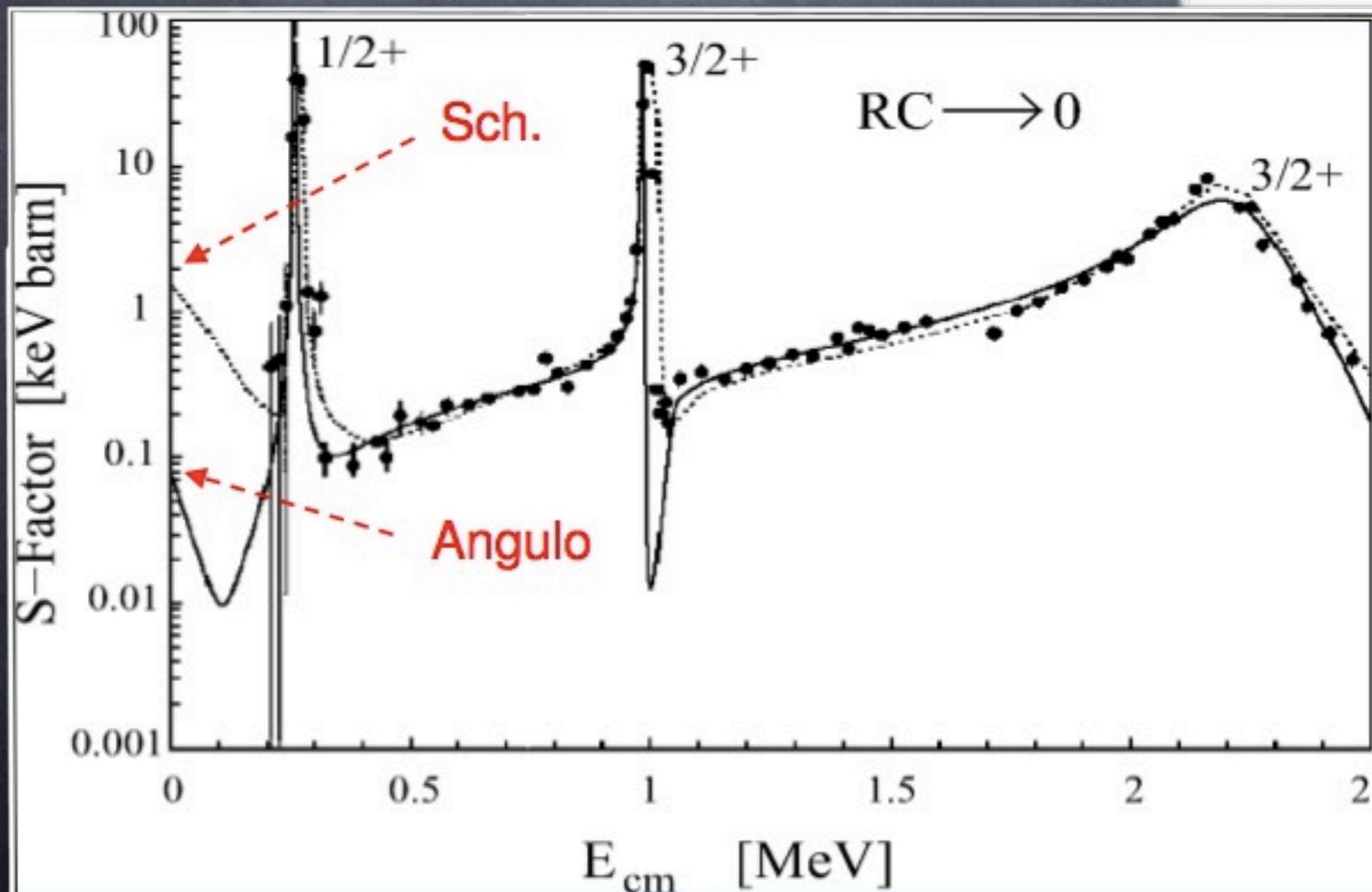
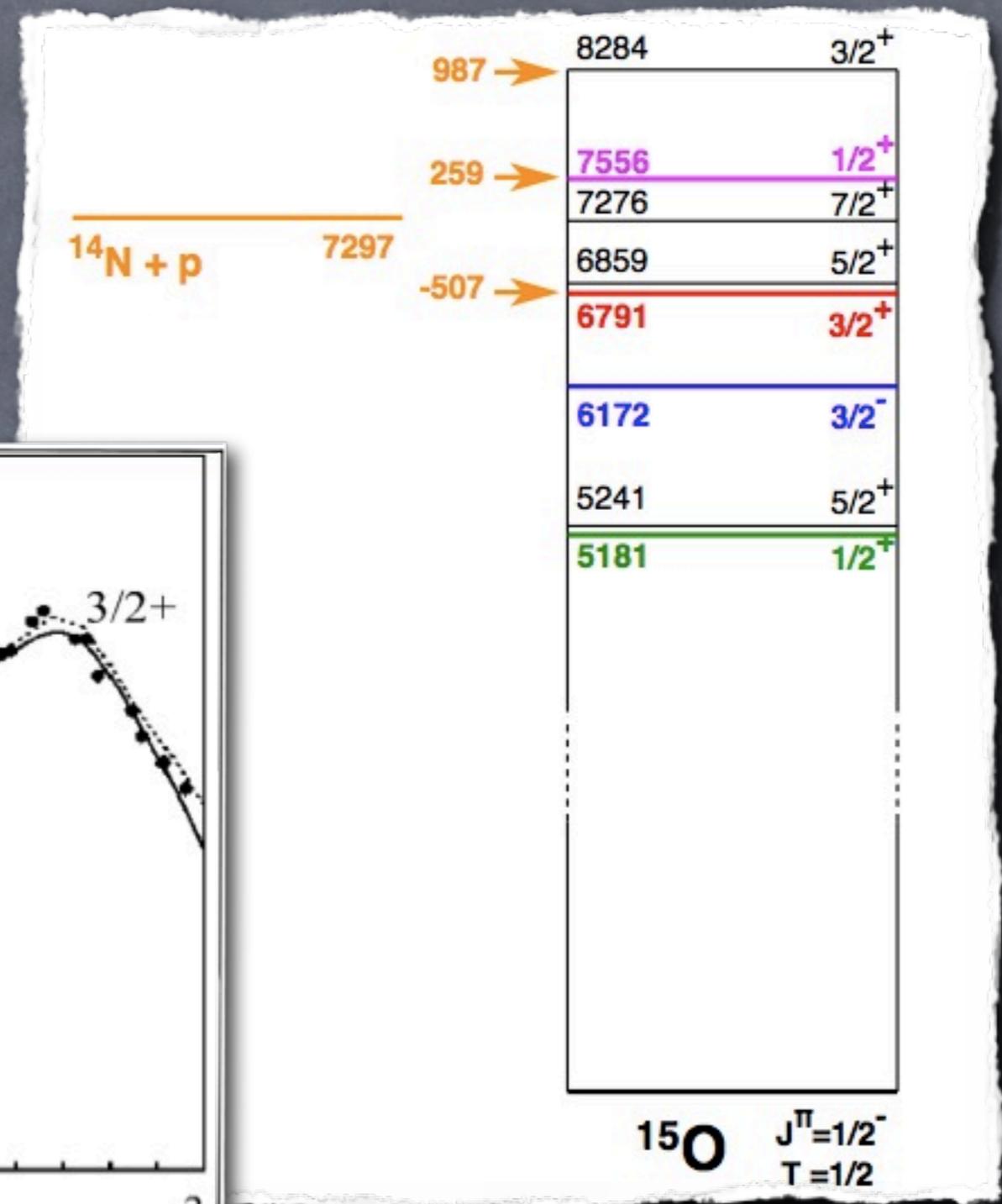
Il rate di produzione di energia nel ciclo CNO ($T > 10^7$ K e $M > 1.1 M_{\text{SUN}}$) è governato da $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$, la reazione più lenta dell'intero ciclo che influenza:

- il flusso di neutrini del ^{13}N e ^{15}O
- l'età degli ammassi globulari



Il problema sperimentale nel 2001

Transition	Schröder('87) [keV-b]	Angulo ('01) [keV-b]
R/gs	1.5 ± 0.3	0.08 ± 0.06
R/6.79	1.41 ± 0.02	1.6 ± 0.2
R/6.17	0.14 ± 0.05	0.06 ± 0.02
S(0)	3.2 ± 0.5	1.8 ± 0.2



Approccio sperimentale a LUNA

Bersaglio solido + HPGe

- ➔ distribuzioni angolari
- ➔ alta densità

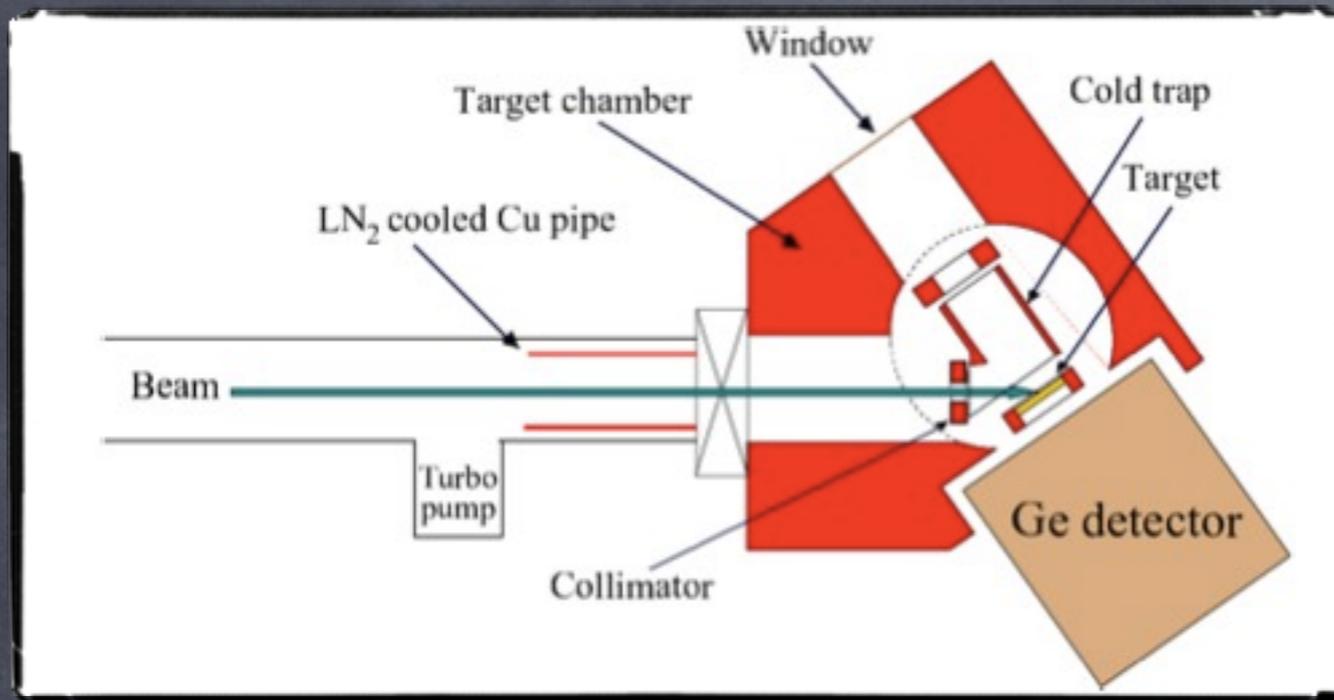
- ➔ trasizioni su livelli intermedi
- ➔ bassa efficienza
- ➔ alta risoluzione

Bersaglio gassoso + 4π -BGO

- ➔ purezza
- ➔ stabilità

- ➔ fattore astrofisico totale
- ➔ alta efficienza
- ➔ bassa risoluzione

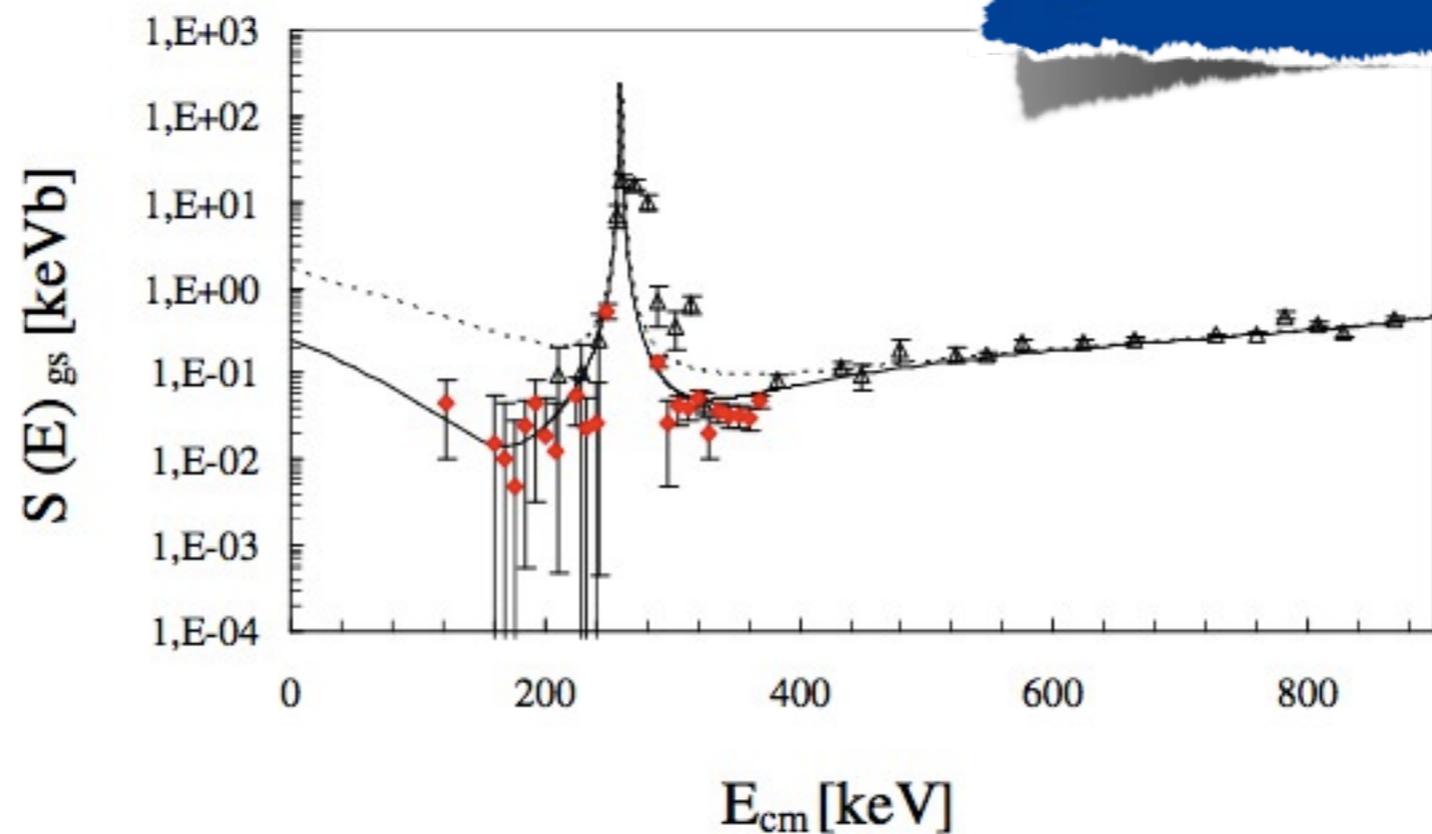
setup con bersaglio solido



Literature value:
 $S_{gs}(0) = 1.55 \pm 0.34 \text{ keVb}$

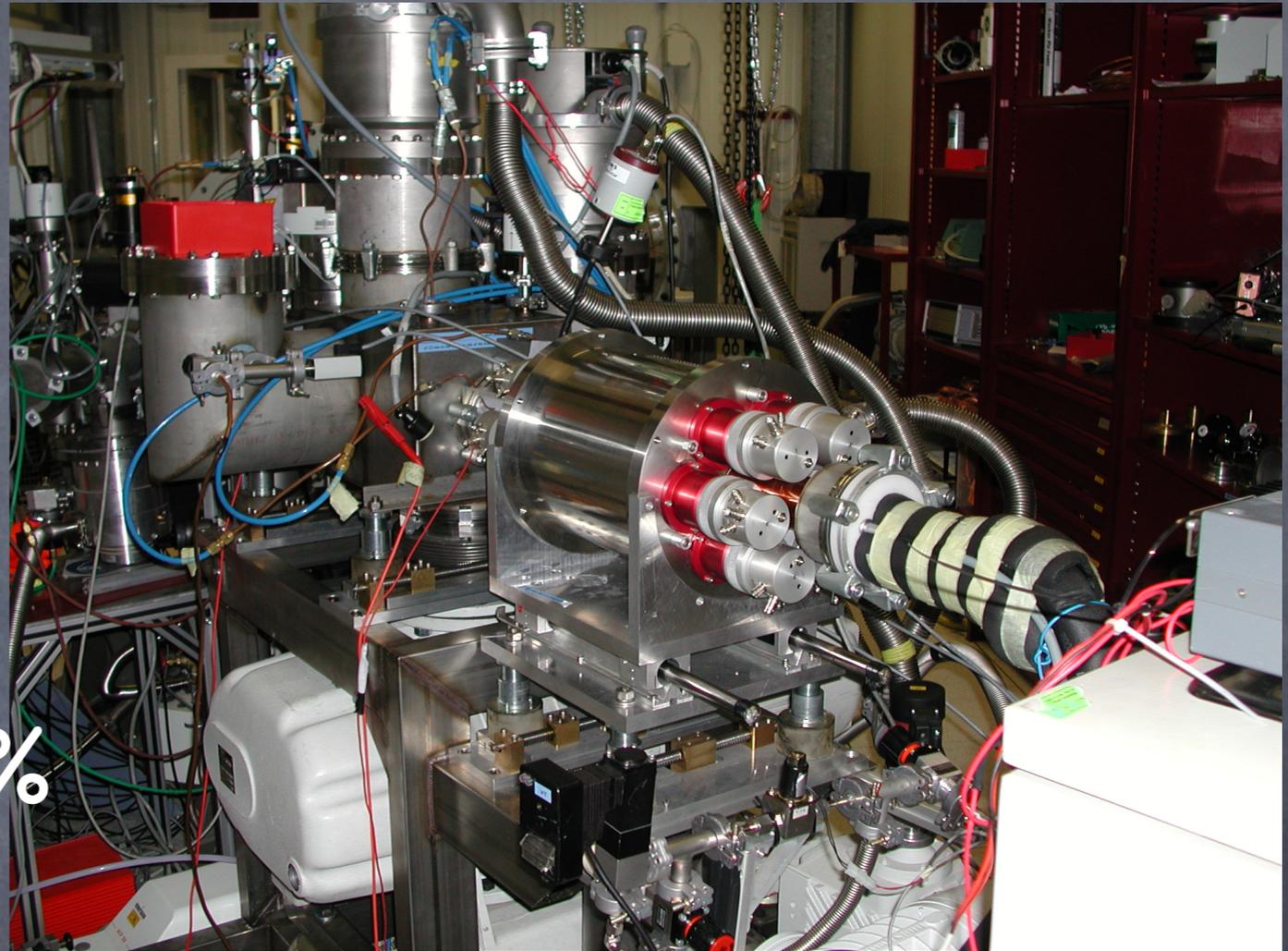
LUNA result:

$S_{gs}(0) = 0.25 \pm 0.06 \text{ keVb}$



setup con bersaglio gassoso

$E_{\text{MIN}} = 70 \text{ keV}$
no finestra d'ingresso
pompaggio differenziale
target: azoto naturale
BGO \rightarrow alta efficienza 68%

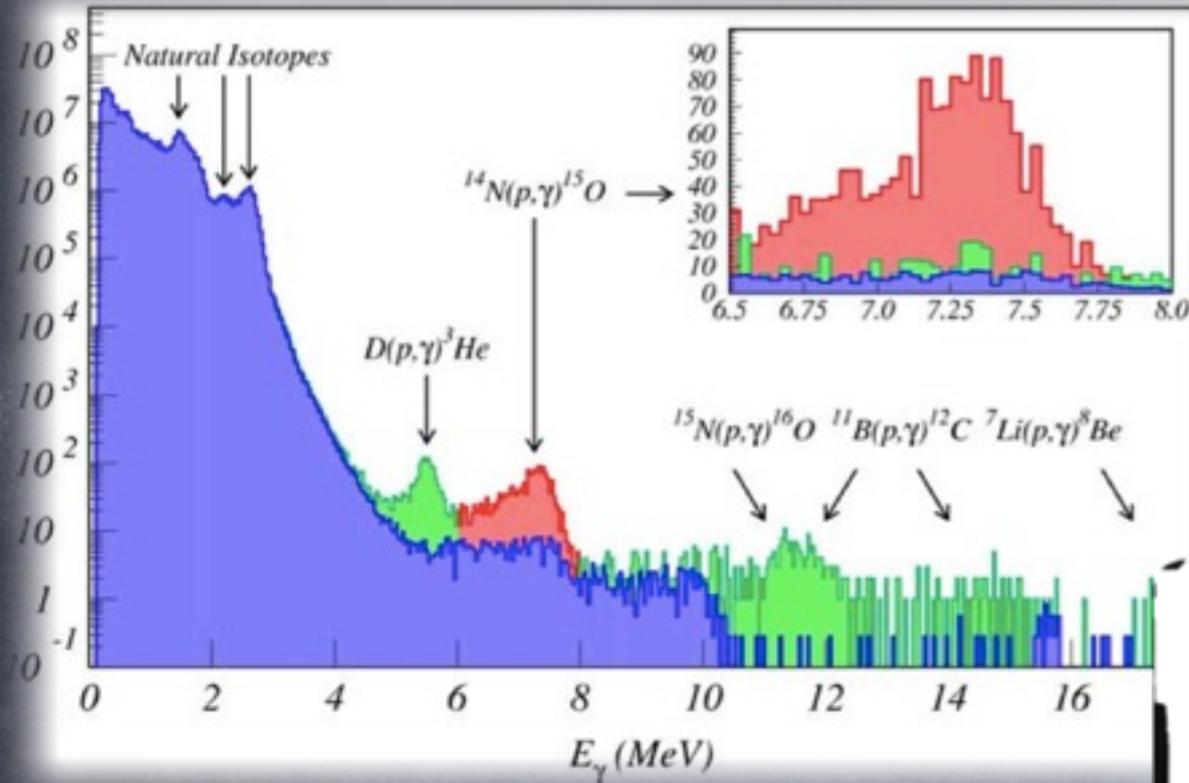


Bemmerer et al. NPA779(2006)297
Lemut et al. PLB634(2006)483

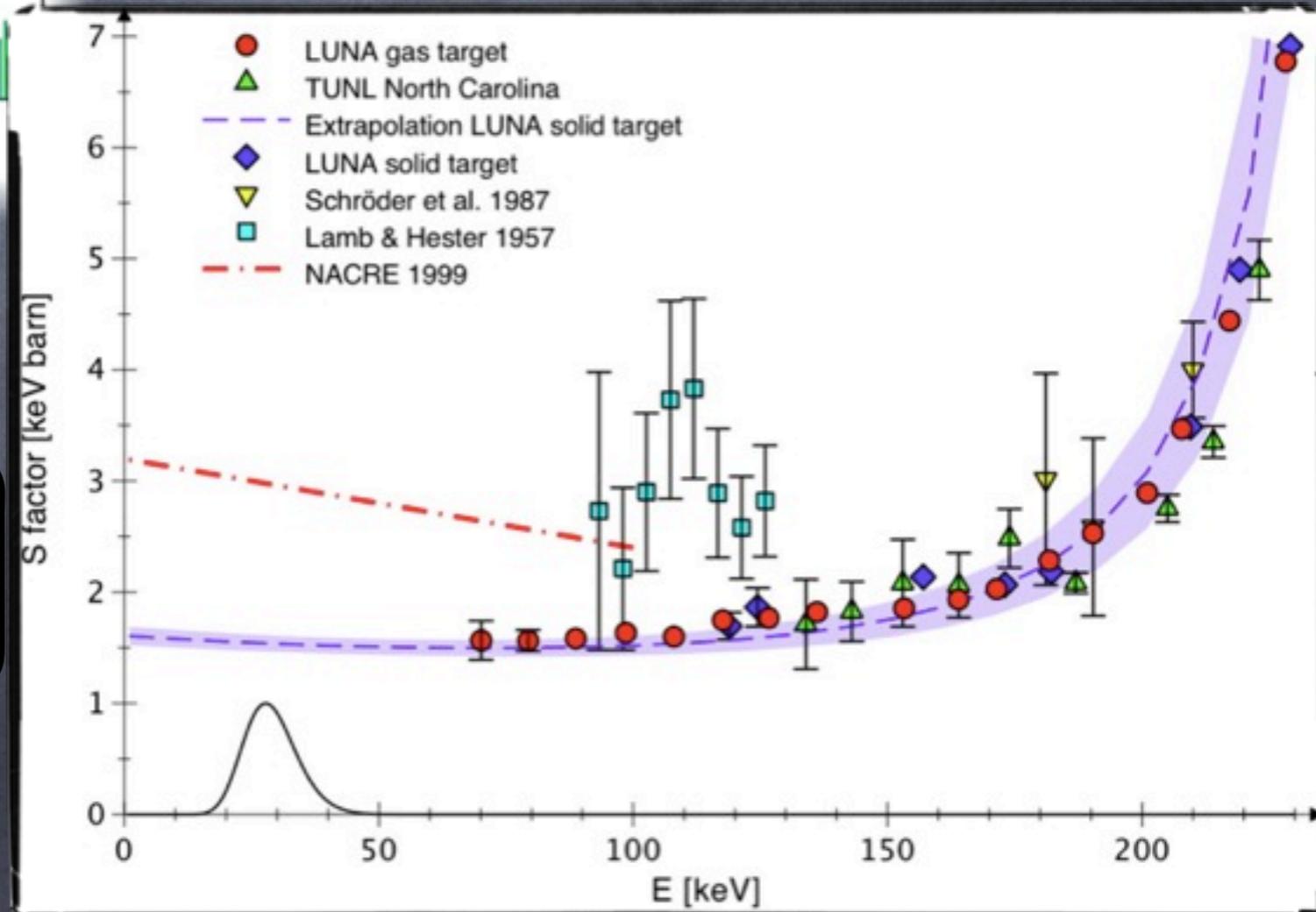
i gamma prodotti dalle cascate sugli stati intermedi vengono sommate nel picco di caduta allo stato fondamentale

gas target: risultati

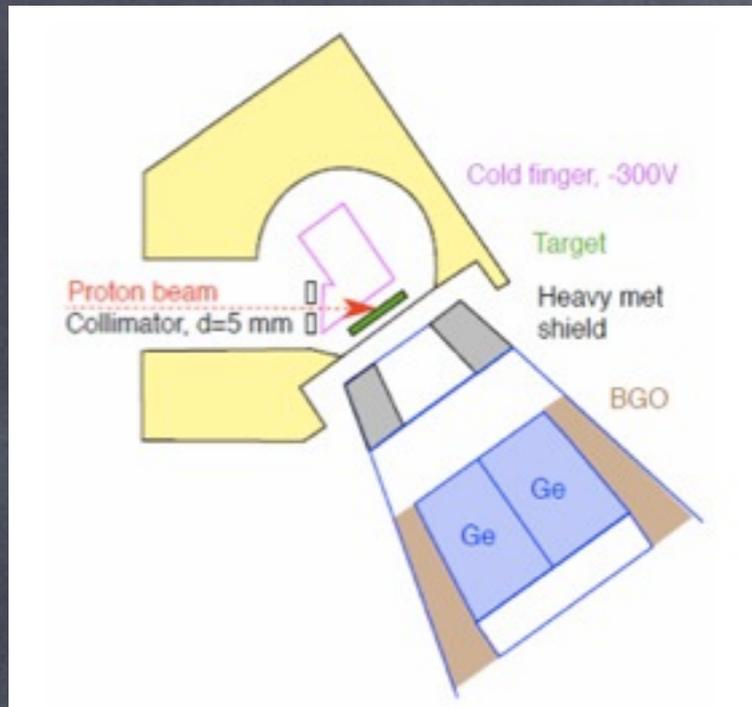
- flusso di neutrini ridotto di un fattore 2
- età degli ammassi globulari aumentata di 0.7 - 1.0 Gy



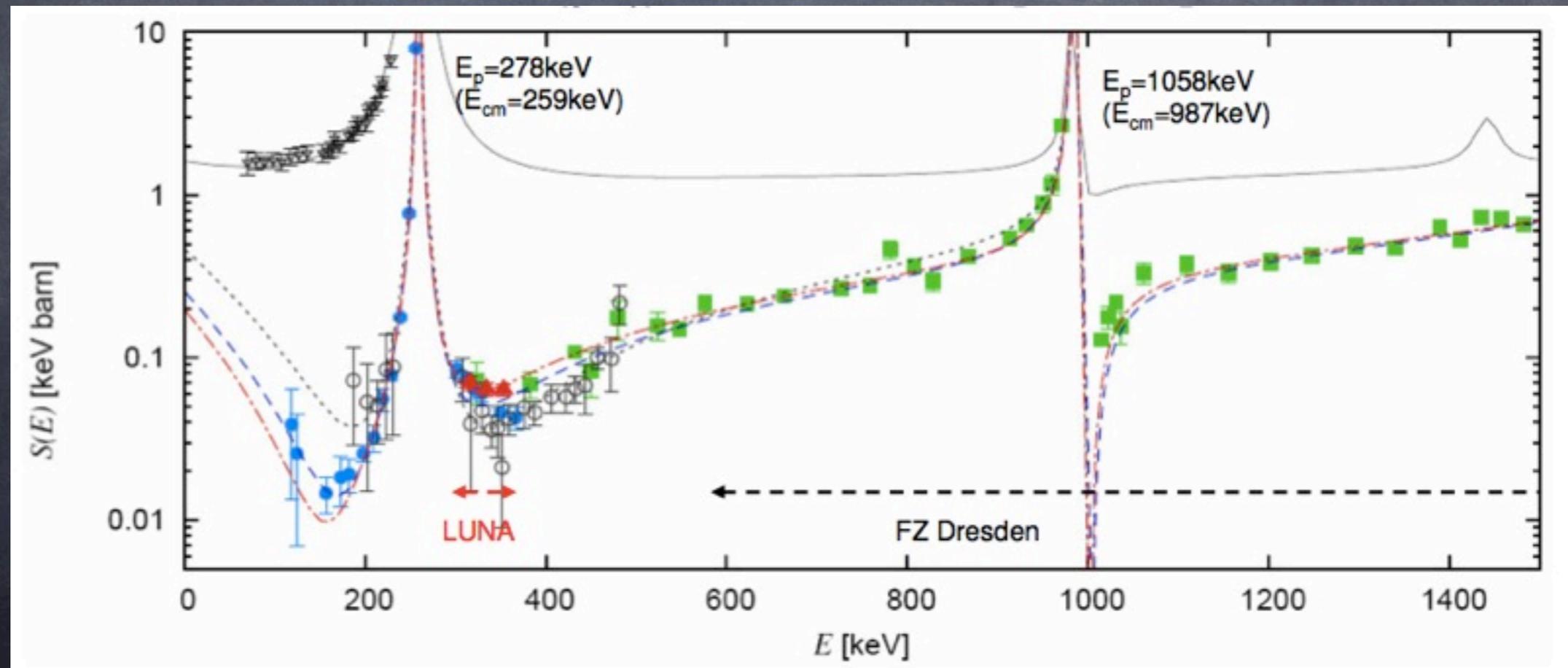
$$S(0) = 1.61 \pm 0.18 \text{ keV barn}$$



$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$: fase clover



irrisolta discrepanza su $S_{gs}(0)$
LUNA = 0.25 ± 0.06 keV barn
TUNL = 0.49 ± 0.08 keV barn
problemi di summing?



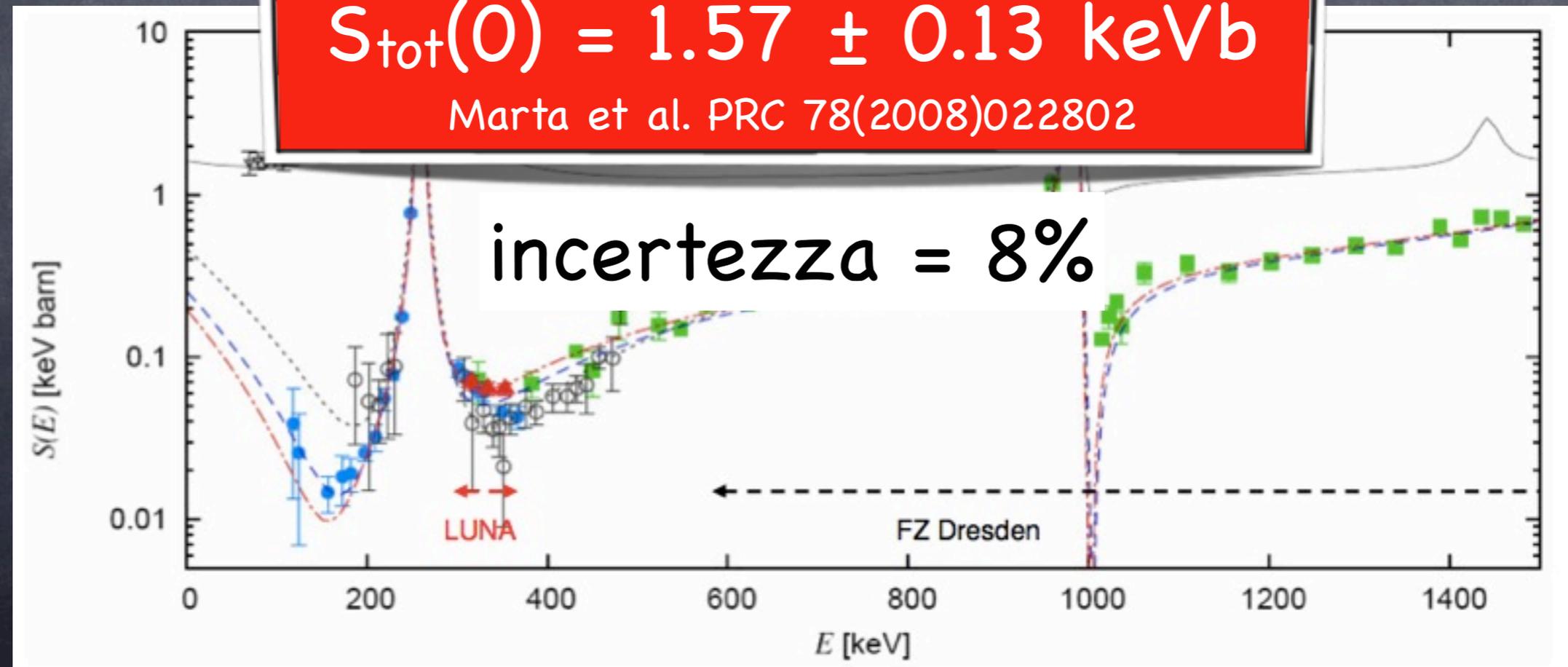
$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$: fase clover



irrisolta discrepanza su $S_{gs}(0)$
LUNA = 0.25 ± 0.06 keV barn
TUNL = 0.49 ± 0.08 keV barn

$$S_{gs}(0) = 0.20 \pm 0.05 \text{ keVb}$$
$$S_{tot}(0) = 1.57 \pm 0.13 \text{ keVb}$$

Marta et al. PRC 78(2008)022802



solar composition problem

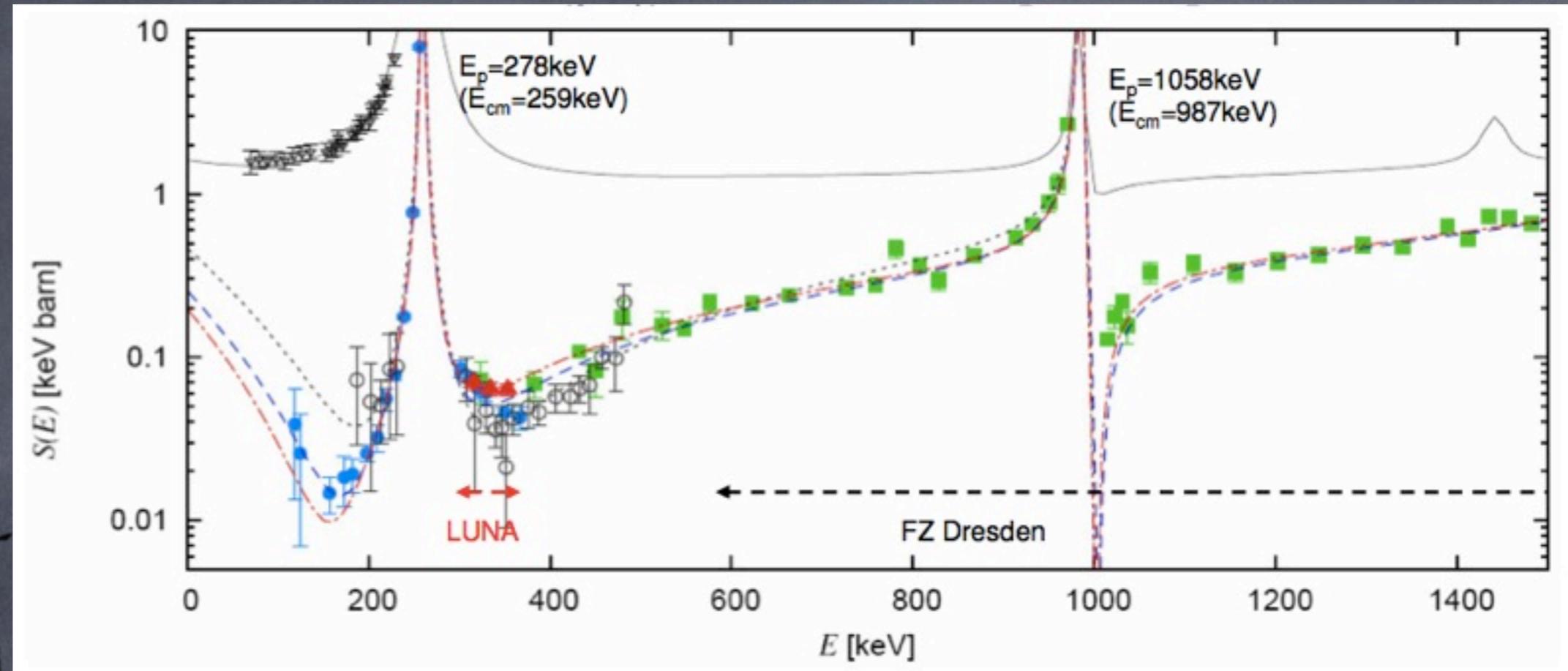
- nuovi risultati per le composizioni chimiche nella fotosfera
- le predizioni dei modelli solari sono in forte disaccordo con le misure di eliosismologia
- errore nella metallicità?

le abbondanze di C e N all'interno del Sole possono essere misurate da: il flusso dei neutrini del CNO (Borexino, SNO+), la temperatura al centro (neutrini del ^8B), **rate delle reazioni nucleari**

W. C. Haxton e A. M. Serenelli, *Astrophys. J.* 687, 678–691 (2008)

incertezze entro il 5% necessarie!

solar composition problem



misurare ad: il flusso dei neutrini del CNO (Borexino, SNO+),

misura della vita media del livello 6.8 MeV di ^{15}O
R. Menegazzo e C. A. Ur proposal approvato ad
AGATA (LNL)

incertezze entro il 5% necessarie!

Conclusioni

- LUNA ha misurato le principali reazioni di interesse per la determinazione dei neutrini solari
 - ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow 4\text{He} + 2\text{p}$
esclusa risonanza al picco di Gamow
 - ${}^3\text{He}({}^4\text{He}, \gamma){}^7\text{Be}$
ridotta incertezza sul flusso dei neutrini ${}^7\text{Be}$
da 9.4% a 5.5%
 - ${}^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma){}^{15}\text{O}$
ridotto il flussi di ν fattore 2 (8%
incertezza), età ammassi glubulari aumentata
di 1 Gy

Grazie!

The  Laboratory
Underground
Nuclear collaboration:
Astrophysics

ATOMKI (Z. ELEKES, Zs. FÜLÖP, Gy. GYURKY, E. SOMORJAI),

BOCHUM (C. ROLFS, F. STRIEDER, H.P. TRAUTVETTER),

DRESDEN (D. BEMMERER, M. MARTA, M. ANDERS),

GENOVA (P. CORVISIERO, H. COSTANTINI, A. LEMUT, P. PRATI),

LNGS (A. FORMICOLA, C. GUSTAVINO, M. JUNKER),

MILANO (V. CAPOGROSSO, A. GUGLIEMMETTI, C. MAZZOCCHI),

NAPOLI (G. IMBRIANI, B. LIMATA, V. ROCA, F. TERRASI),

PADOVA (C. BROGGINI, A. CACIOLLI, M. ERHARD, R. MENEGAZZO, C. ROSSI ALVAREZ),

TERAMO (O. STRANIERO),

TORINO (G. GERVINO)