Esperimento LUNA: Studiare le stelle sotto il Gran Sasso

Rosanna Depalo

INFN e Università degli Studi di Padova

Incontri di Fisica 2013 – LNF – 9-11/10/2013

Indice

Introduzione astrofisica:

- Abbondanze degli elementi nell'Universo
- Sorgente di energia delle stelle
- Teoria della nucleosintesi stellare
- Vita (e morte) di una stella

Reazioni termonucleari nelle stelle

- Il picco di Gamow
- Perchè misurare sottoterra?

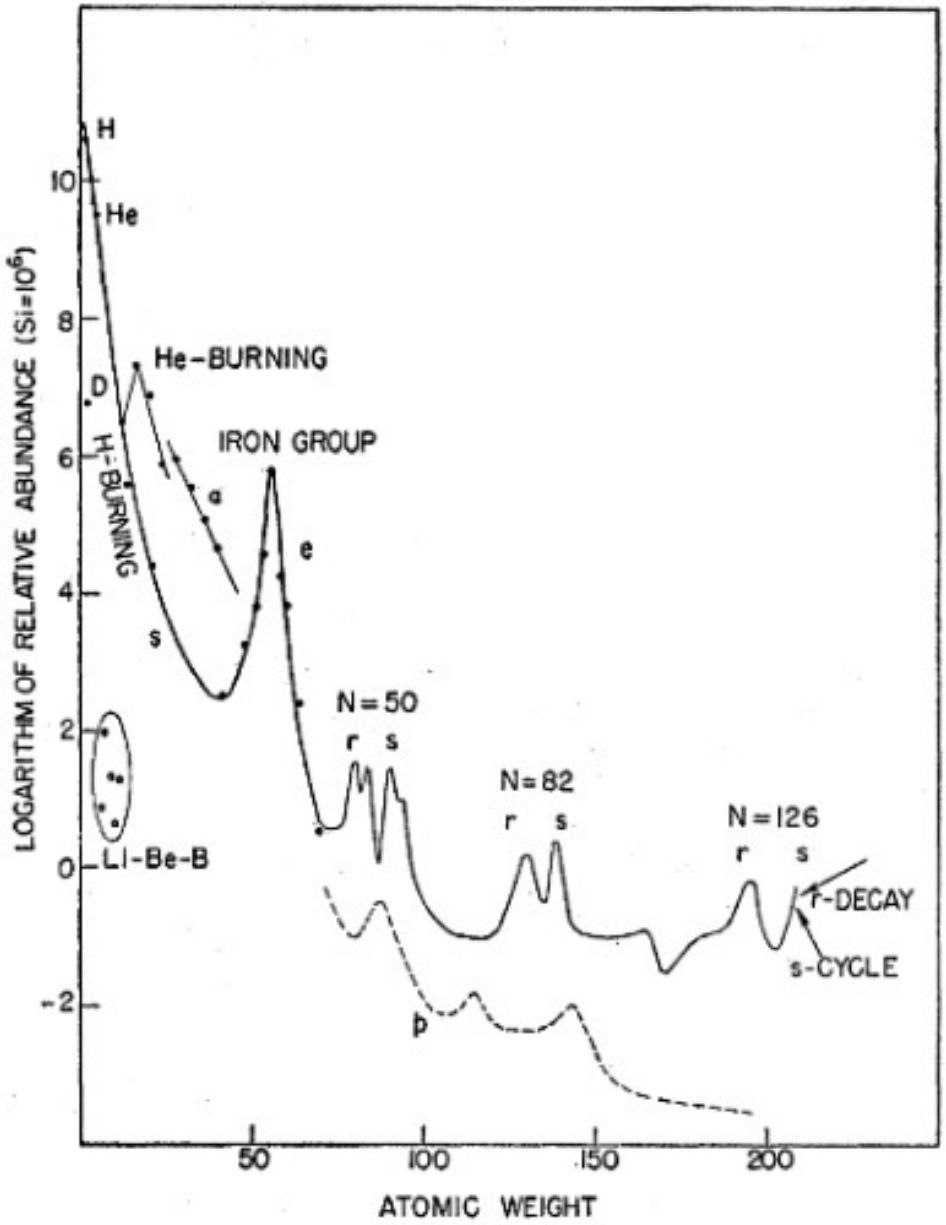
L'esperimento LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics)

- Apparato sperimentale
- Reazioni studiate
- Un esempio: $^{22}Ne + p \rightarrow {}^{23}Na + \gamma$
- Il progetto LUNA MV

Abbondanze degli elementi nell' Universo

Come, dove e quando avviene
la sintesi degli elementi?

Le abbondanze degli elementi seguono dovunque la stessa distribuzione ...



Suess and Urey Reviews of Modern Physics 28 (1956) 53-74

Sorgente di energia delle stelle

Il Sole:

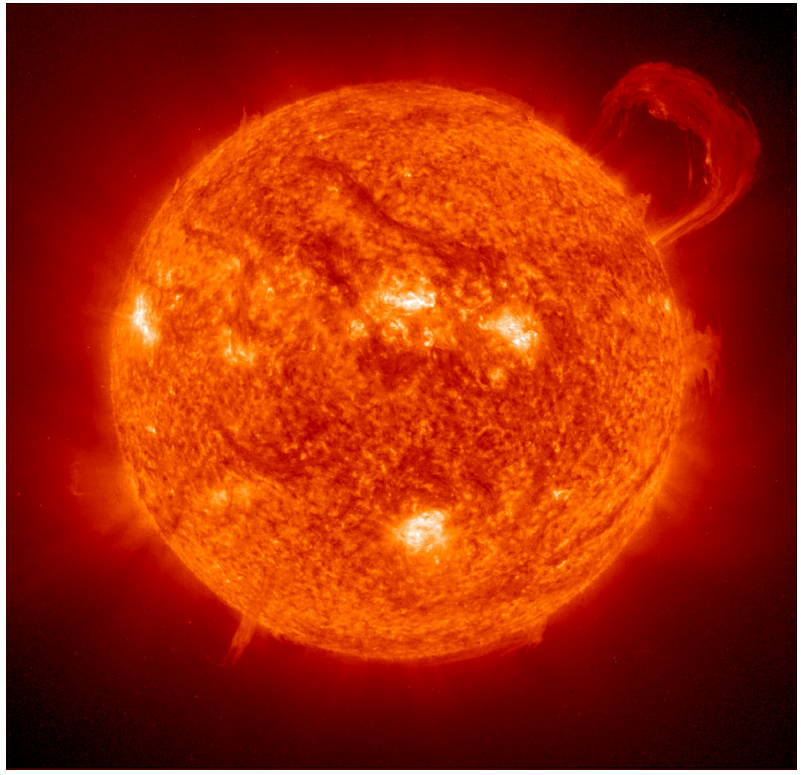
$R_\odot = 6.96 \times 10^8$ m

$M_\odot = 2 \times 10^{30}$ kg

$T_\odot = 5800$ K

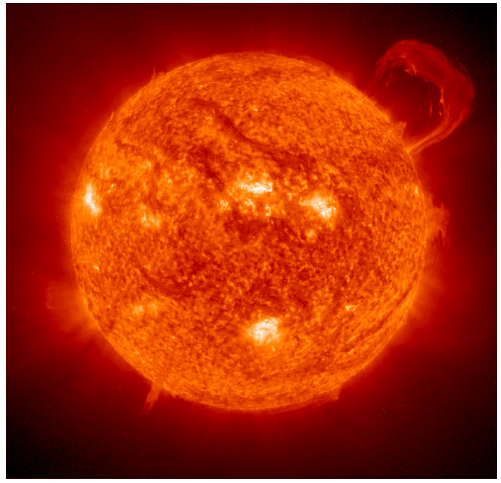
$L_\odot = 3.86 \times 10^{26}$ W $= 2.4 \times 10^{39}$ MeV/s

(1 eV ~ 1.6×10^{-19} J)



Sorgente di energia delle stelle

Energia rilasciata da contrazione gravitazionale:



$$E = \frac{-1}{2}\Omega = \frac{-3}{4}\frac{GM_{\odot}^{2}}{R_{\odot}} \sim 3\cdot 10^{41}\, J \sim 2\cdot 10^{54}\, MeV$$

Sufficiente ad alimentare il Sole per : $t = \frac{E}{L_{\odot}} = 3\cdot 10^{15}\, s = 2.4\cdot 10^{7}\, anni$

Incompatibile con età della terra
~ 4.5 x 10^9 anni

Teoria della nucleosintesi stellare

1920 Aston: M(He) < 4 M(H)

Eddington: conversione 4 H → He come sorgente di energia per le stelle
...T troppo bassa!

1928 Gamow: probabilità effetto tunnel

1936 - 1938 Atkinson - Bethe and Critchfield: catena pp
1938 - 1939 Weizsacker – Bethe: Ciclo CNO

1946 Hoyle: teoria della nucleosintesi nell'evoluzione stellare

1952 Merril: scoperta del tecnezio ($T_{1/2}$ = 4.2 x 10^6 anni) nelle stelle,
dimostrazione di nucleosintesi recente

Le stelle come reattori a fusione nucleare

$$4H \rightarrow He + 2\beta^{+} + 2\nu_e + \underline{26.7\ MeV}$$

Tasso di fusione:

$$N = \frac{L_\odot}{26.7\mathrm{MeV}} \sim 10^{38} \frac{fusioni}{s}$$

Massa di H bruciata per unità di tempo:

$$M = 4\mathrm{M}_{protone} \cdot N \sim 6.4 \cdot 10^{14} \frac{g}{s} = 640 \cdot 10^{6} \frac{t}{s}$$

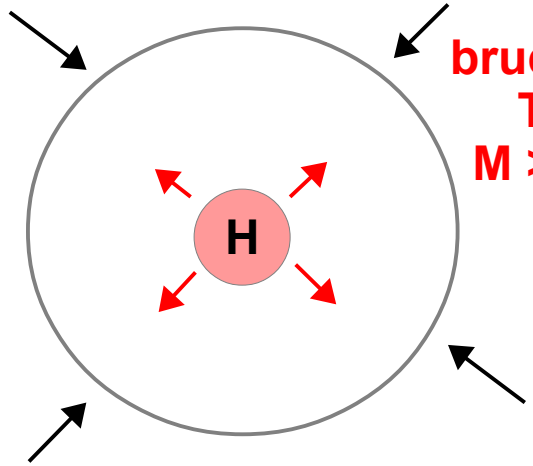
Tempo scala del bruciamento:

$$t = \frac{10\%\ M_\odot}{M} \sim 10^{10} anni$$

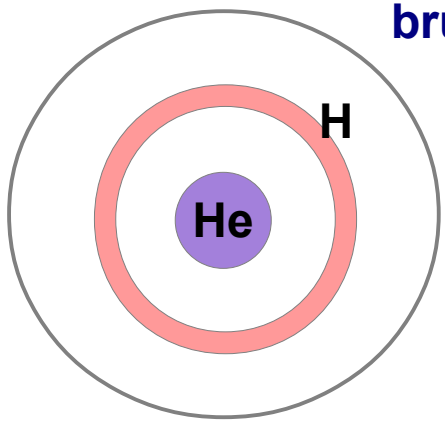
consistente con l'età della Terra!

Vita (e morte) di una stella

Contrazione gravitazionale

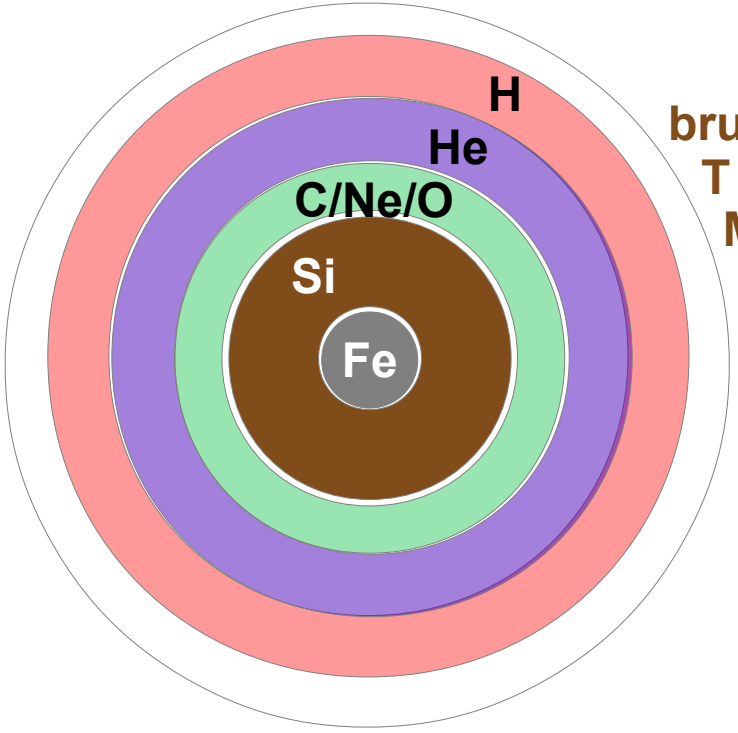


bruciamento H
$T > 10^7$ K
$M > 0.08\ M_{sun}$



bruciamento He
$T > 10^8$ K
$M > 0.4\ M_{sun}$

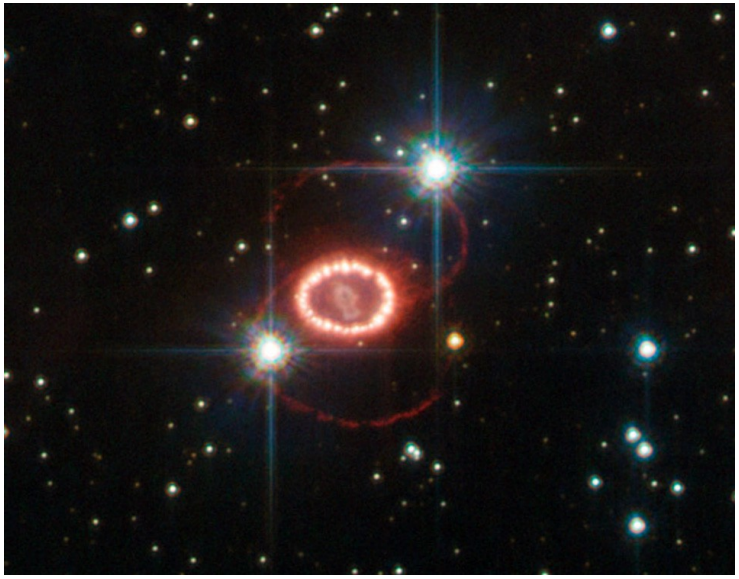
Bruciamenti C, Ne, O



bruciamento Si
$T > 5 \times 10^9$ K
$M > 15\ M_{sun}$

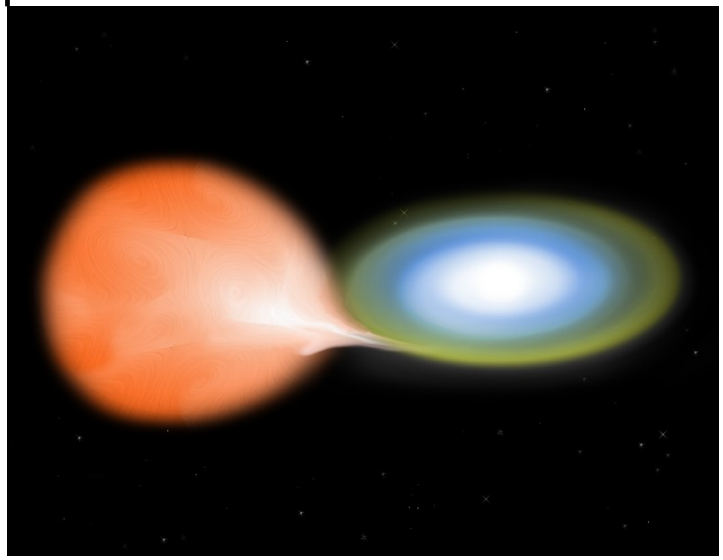
Vita (e morte) di una stella: Fenomeni esplosivi

<u>Stelle massicce</u> (15 < M < 30 M_{sun}):
core collapse supernovae



<u>Sistemi binari</u>: Novae classiche

supernovae Ia



Il materiale espulso arricchisce il mezzo interstellare → Stelle di seconda generazione

Reazioni termonucleari nelle stelle

$$a + b \rightarrow X$$

$$\frac{\text{N° Reazioni}}{\text{tempo} \cdot \text{Volume}} = N_a \cdot N_b \cdot \upsilon \cdot \boxtimes$$

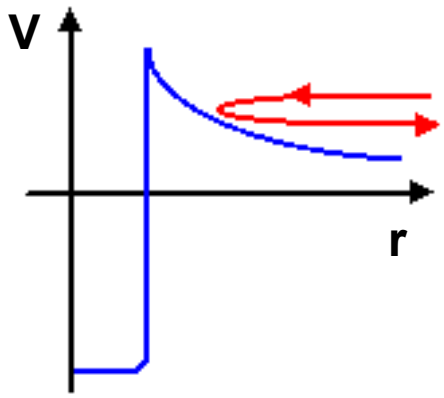
SEZIONE D'URTO

Energia cinetica (Maxwell - Boltzmann) ***VS*** Barriera Coulombiana

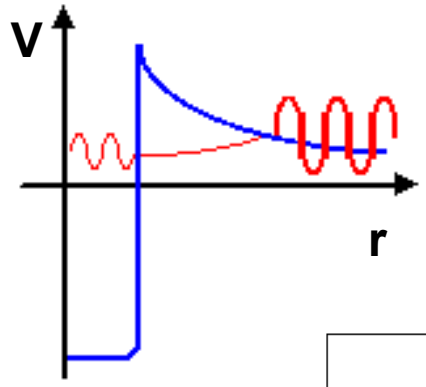
$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} kT \sim keV \quad \longleftrightarrow \quad E_C = \frac{Z_a Z_b e^2}{R} \sim MeV$$

Il picco di Gamow

FISICA CLASSICA



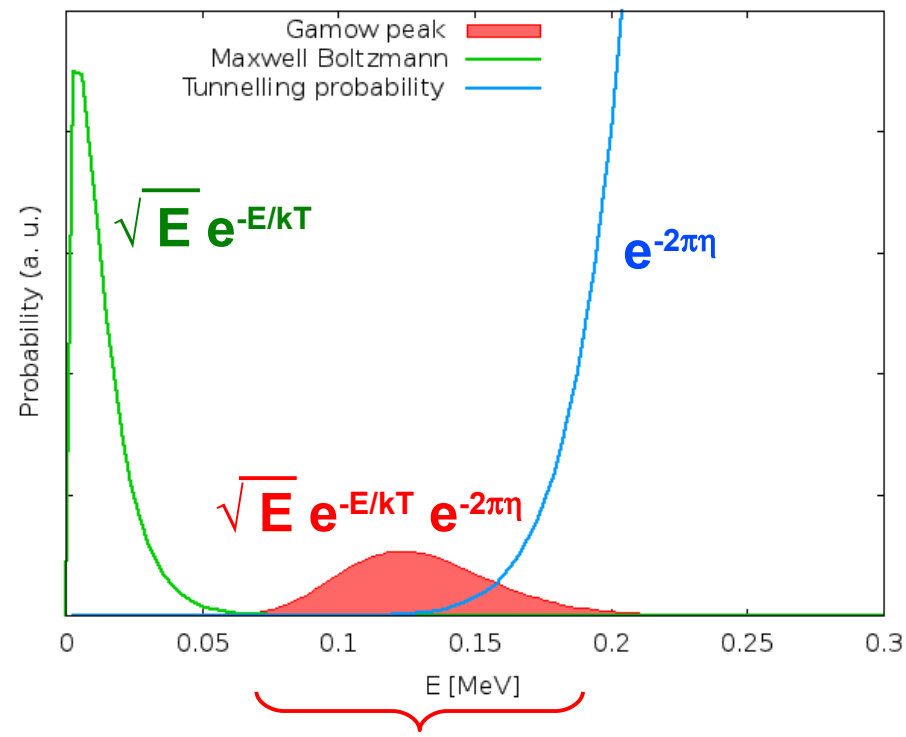
FISICA QUANTISTICA



EFFETTO TUNNEL

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

$$2\pi\eta \sim Z_a Z_b \sqrt{\frac{m_{ab}}{E}}$$

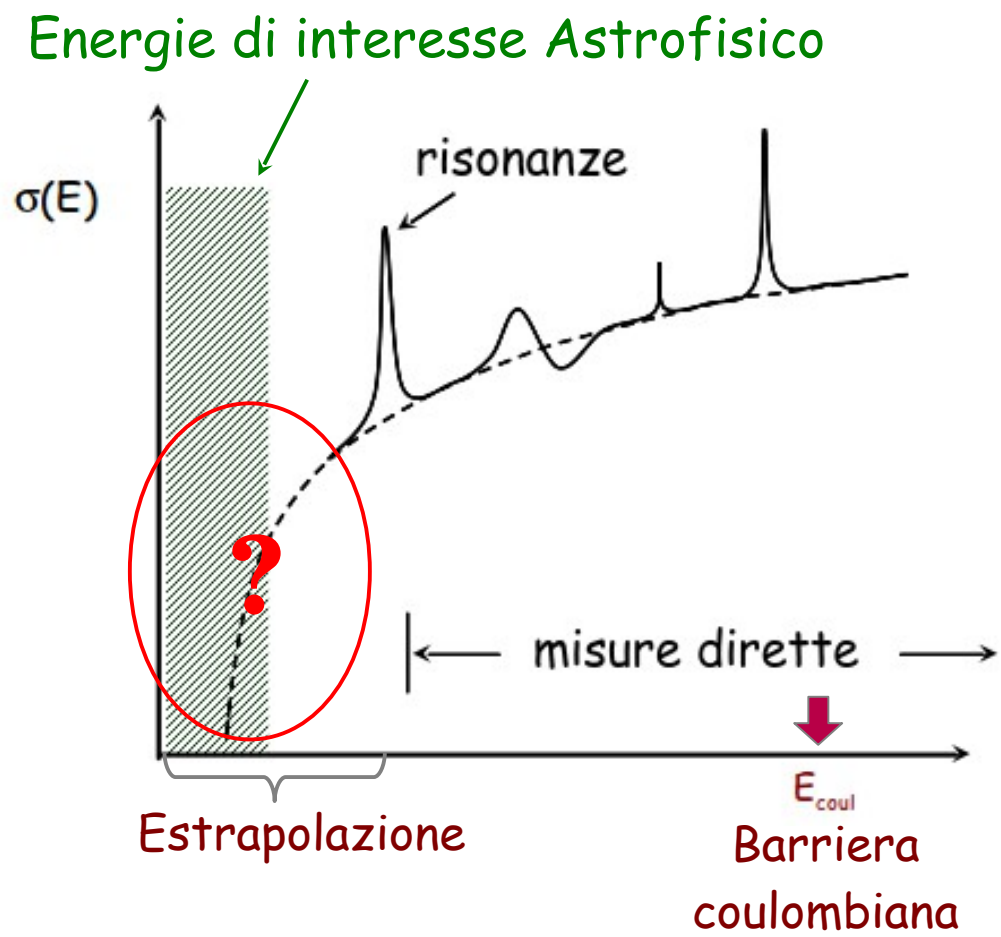


Intervallo in energia
rilevante per l'astrofisica

Reazioni termonucleari nelle stelle

La sezione d'urto diminuisce esponenzialmente con l'energia.

⊠≤ nano-barn (1barn = 10^{-24} cm^2)



"Misura ciò che è misurabile, e rendi misurabile ciò che non lo è."

Galileo Galilei (1564 – 1642)

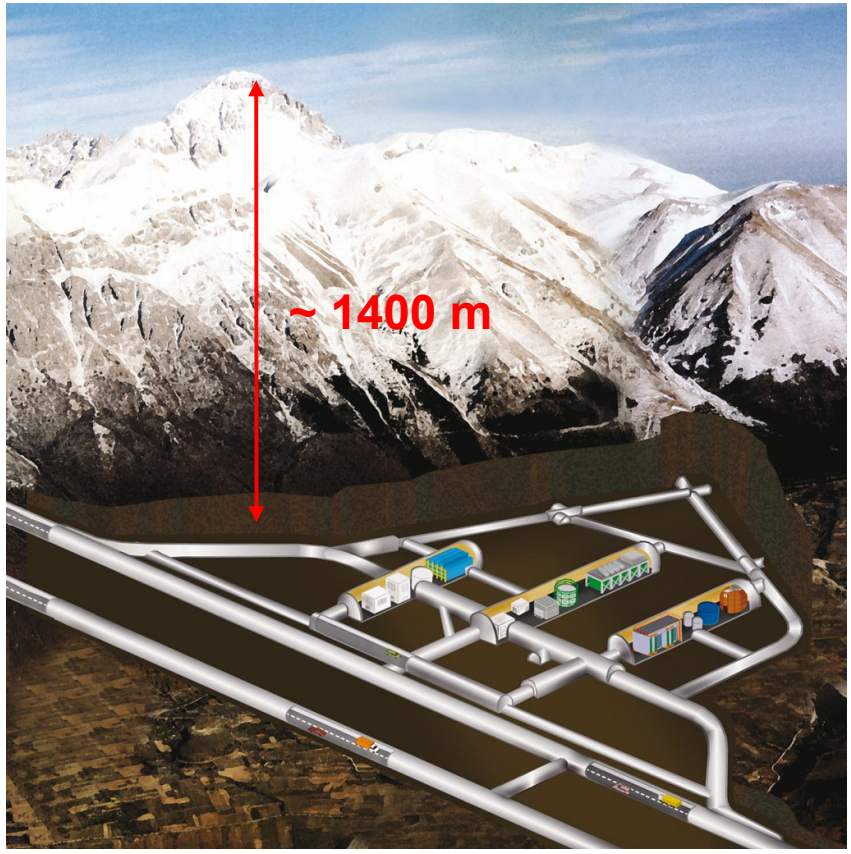
Perchè misurare sottoterra?

Sorgenti naturali di fondo:

- **Radioattività naturale**:
  catene di decadimento di U e Th

- **Raggi cosmici:**
  al livello del mare, principalmente muoni

Laboratori Nazionali del Gran Sasso:
1400 m di roccia come schermo naturale

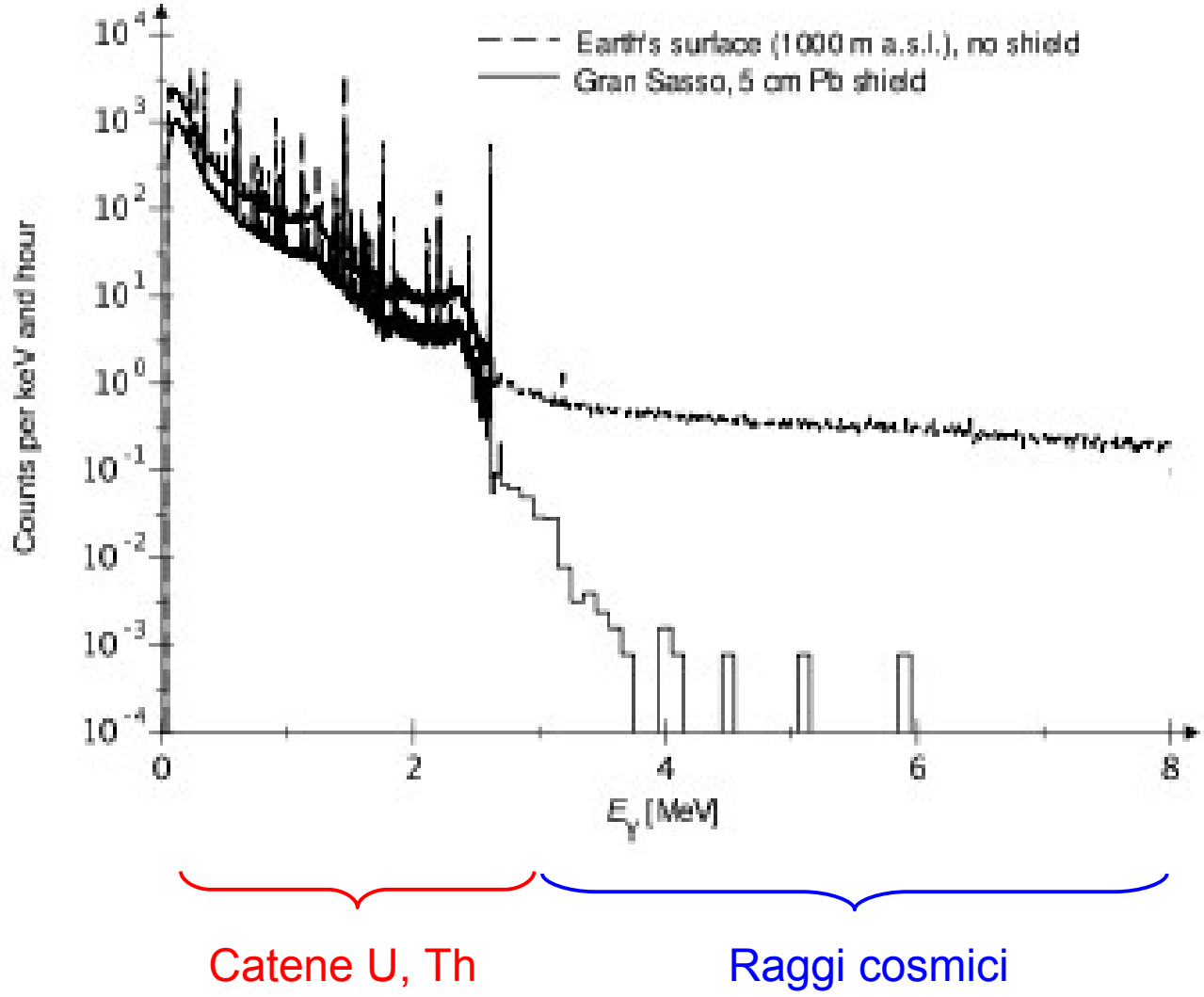


Perchè misurare sottoterra?

Riduzione del fondo cosmico:

γ → 10^{-6}

n → 10^{-3}



Come riprodurre cio` che accade nelle stelle?

$$\sigma = \frac{N_{reazioni} / t}{N_{proiettili} / t \;\; N_{bersagli} / A}$$

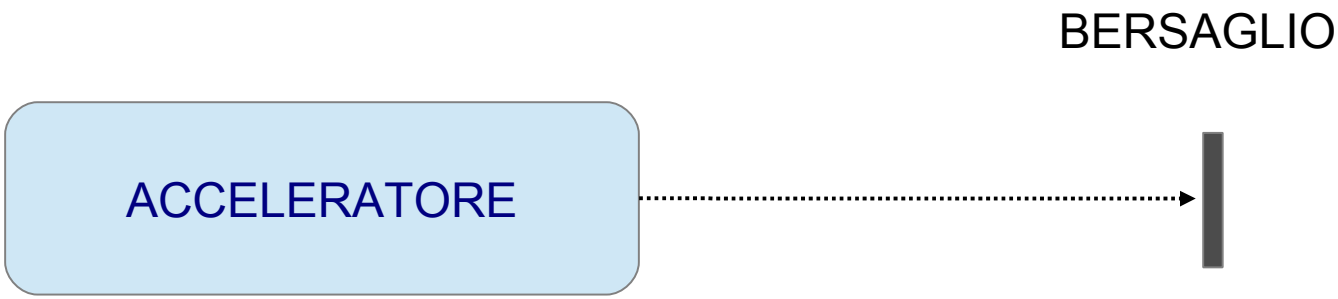
ACCELERATORE

→ Fascio molto intenso

→ Buona risoluzione energetica (Δ E/E)

Come riprodurre cio` che accade nelle stelle?

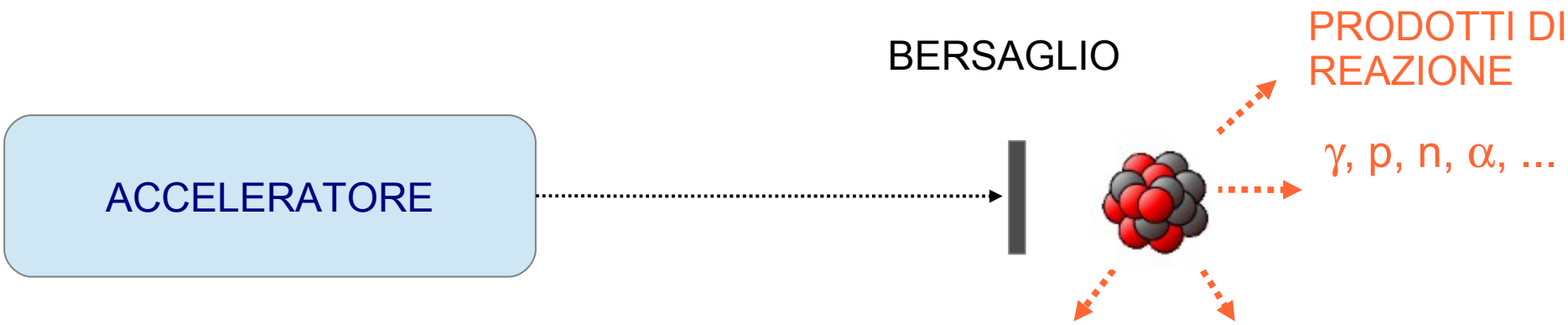
$$\sigma = \frac{N_{reazioni} / t}{N_{proiettili} / t \quad N_{bersagli} / A}$$



→ Elevata densità e purezza

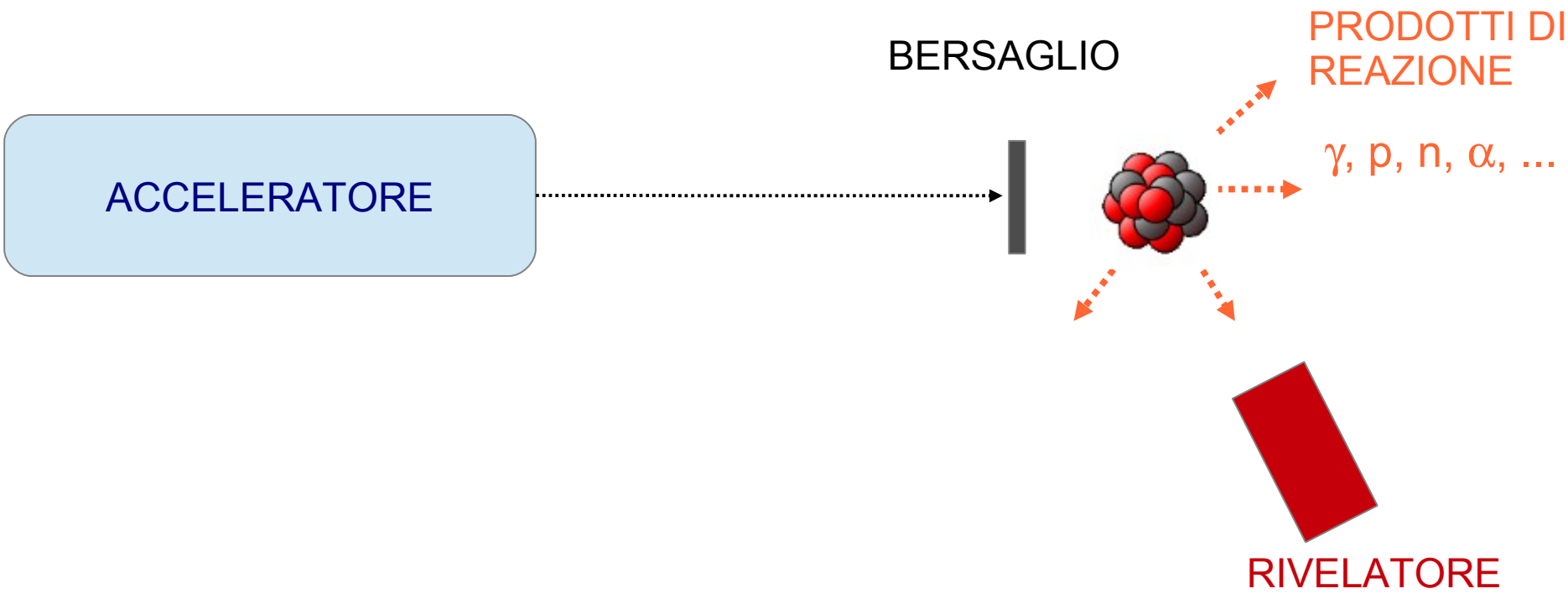
Come riprodurre cio` che accade nelle stelle?

$$\sigma = \frac{N_{reazioni} / t}{N_{proiettili} / t \;\; N_{bersagli} / A}$$



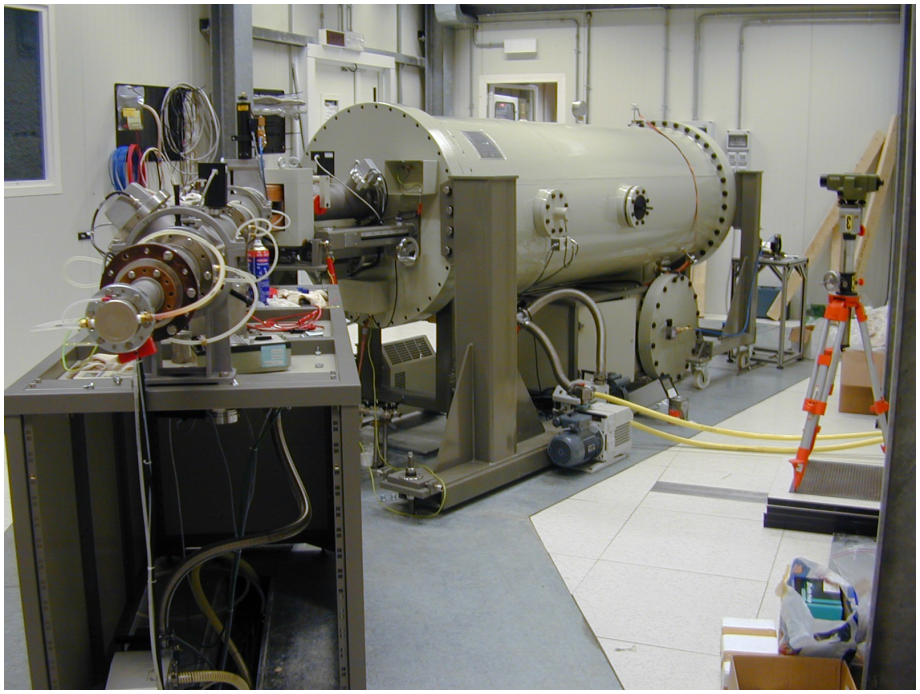
Come riprodurre cio` che accade nelle stelle?

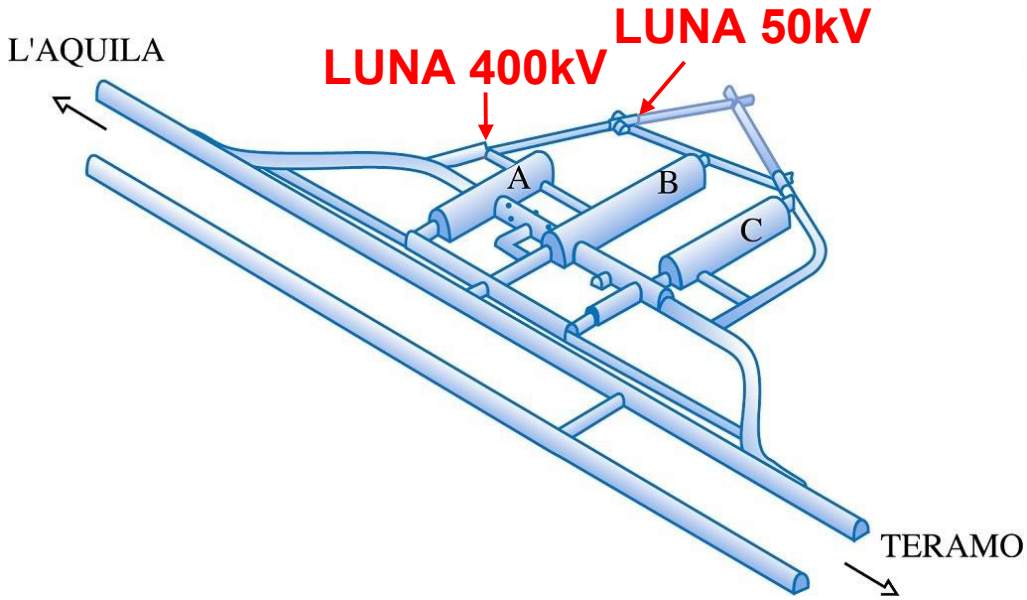
$$\sigma = \frac{N_{reazioni} / t}{N_{proiettili} / t \;\; N_{bersagli} / A}$$

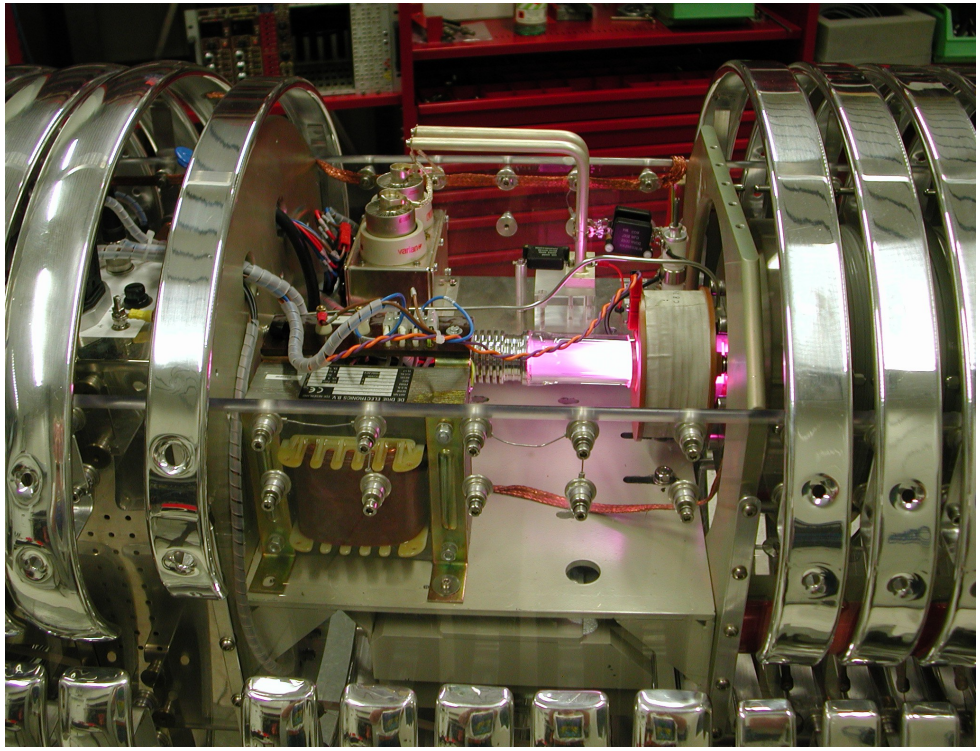


→ Alta efficienza

L'esperimento LUNA







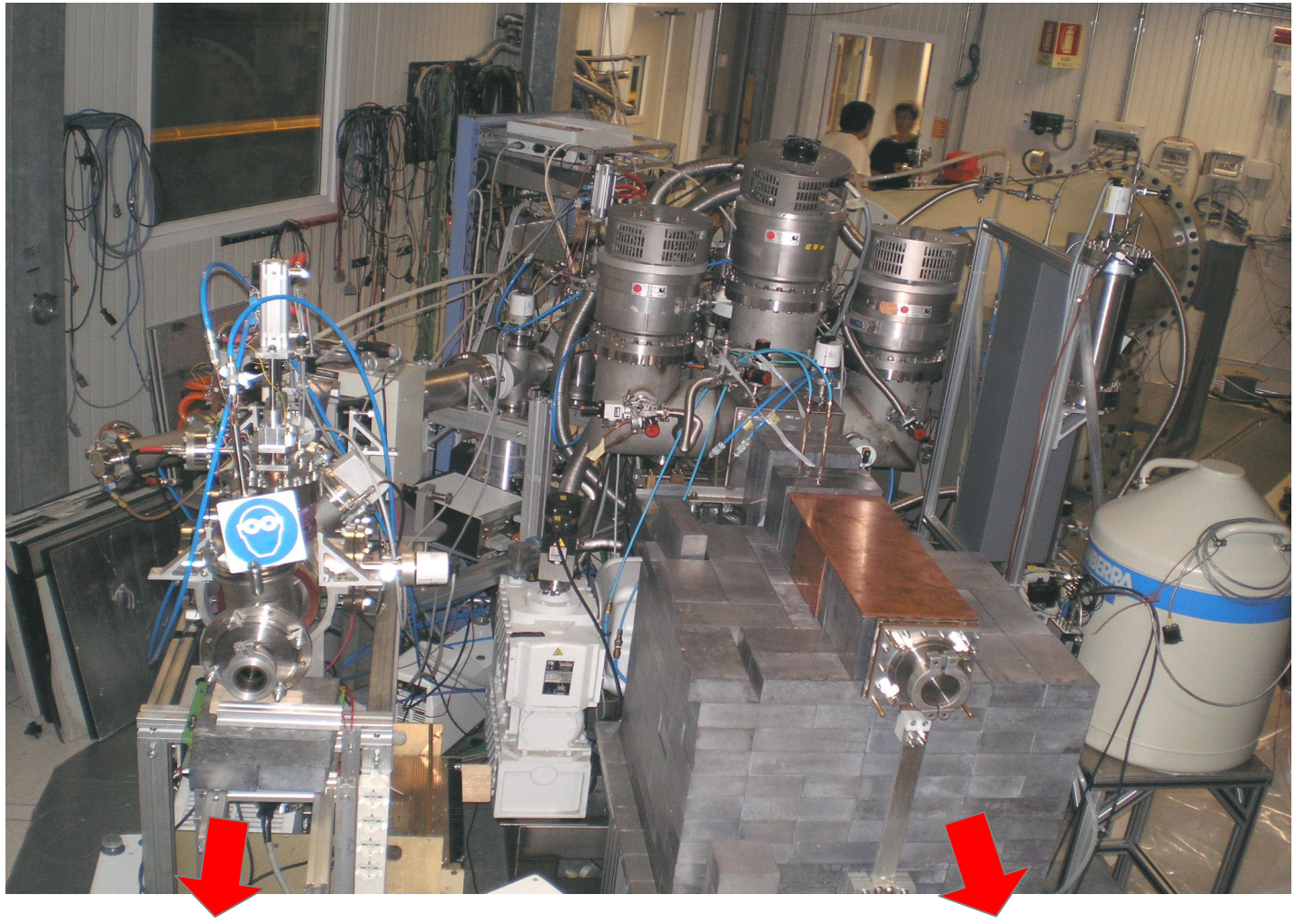
ENERGIA FASCIO: 50 - 400 keV

CORRENTE: 10^{15} part./s (~100 μA)

ΔE: ~ 100 eV

STABILITÀ: ~ 5 eV/h

L'esperimento LUNA

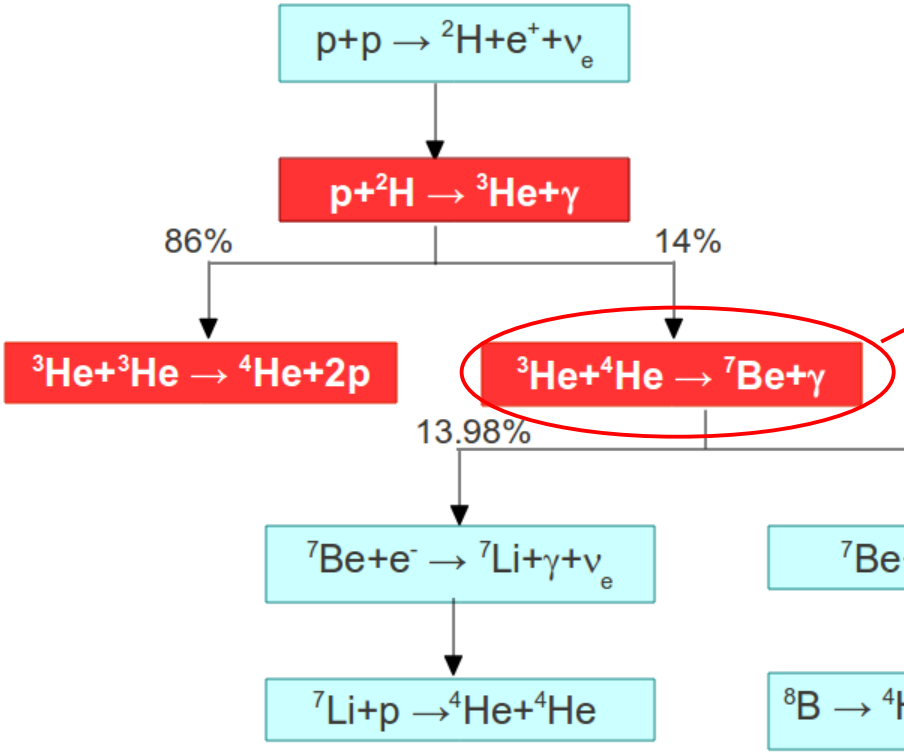


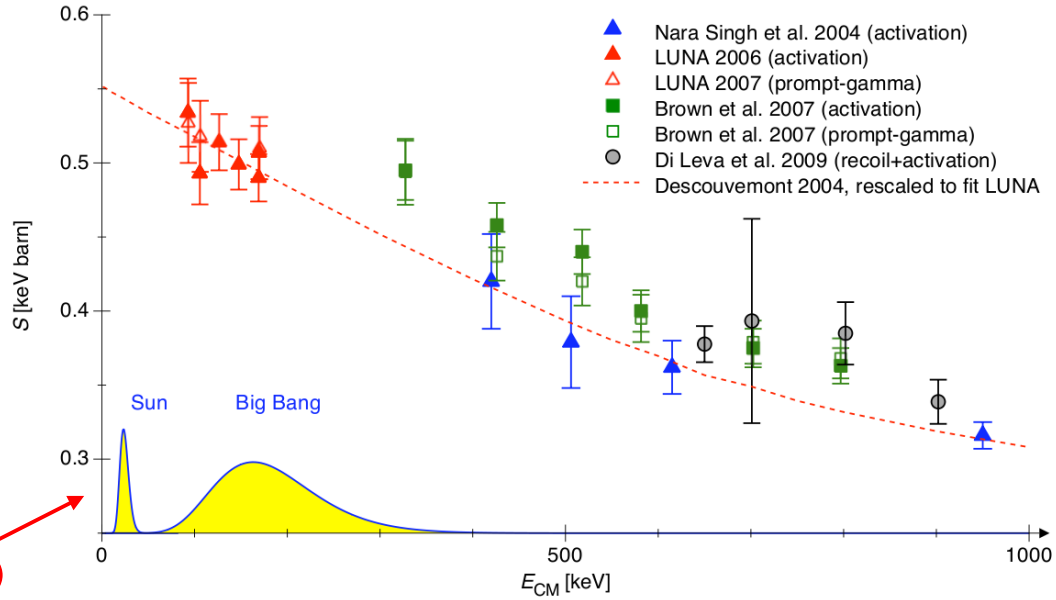
Bersaglio Solido

Bersaglio Gassoso

Possibilità di ottimizzare l'efficienza con diversi rivelatori di fotoni o particelle

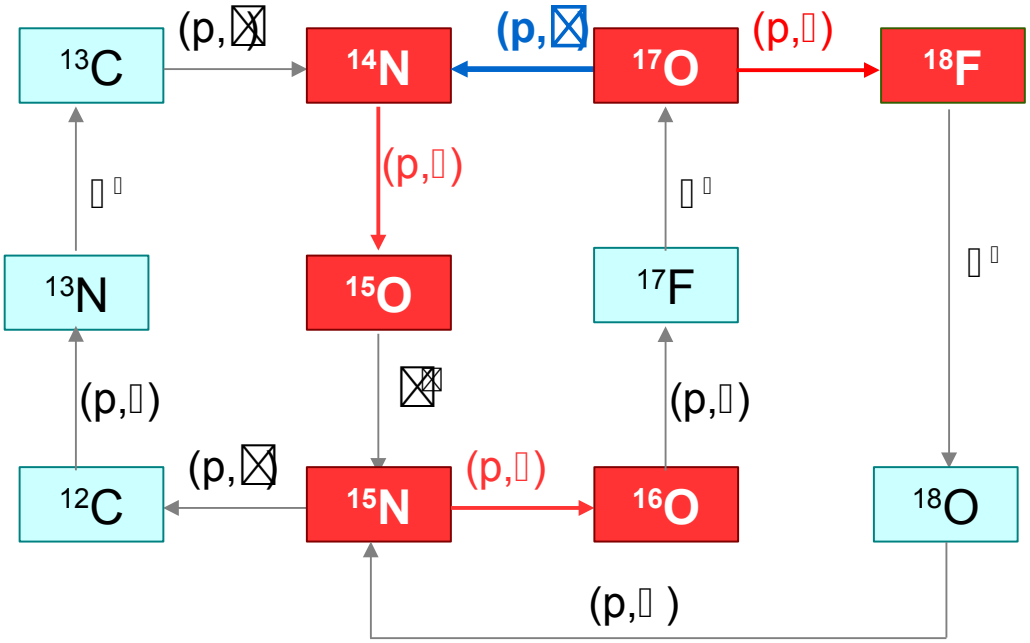
Reazioni studiate: catena p-p



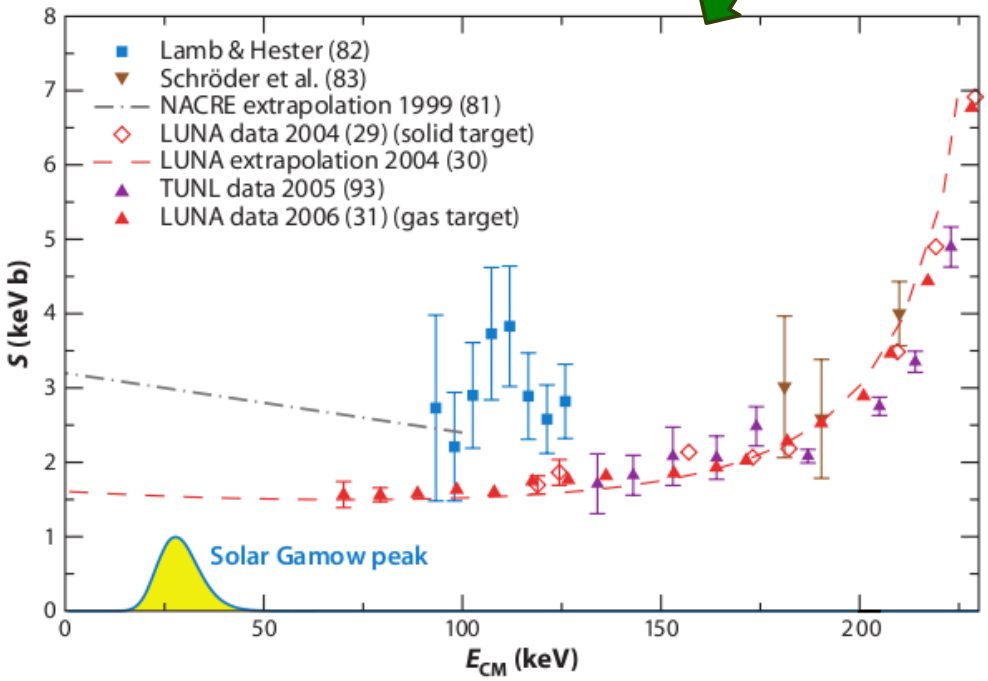


Riduzione dell'incertezza sul flusso di ν (^{7}Be,^{8}B) previsti dai modelli solari

Reazioni studiate: ciclo CNO



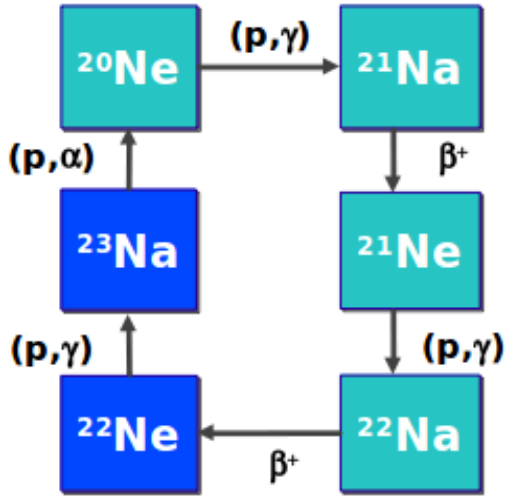
$^{14}N + p \rightarrow {}^{15}O + \gamma$ => "collo di bottiglia" del ciclo CN



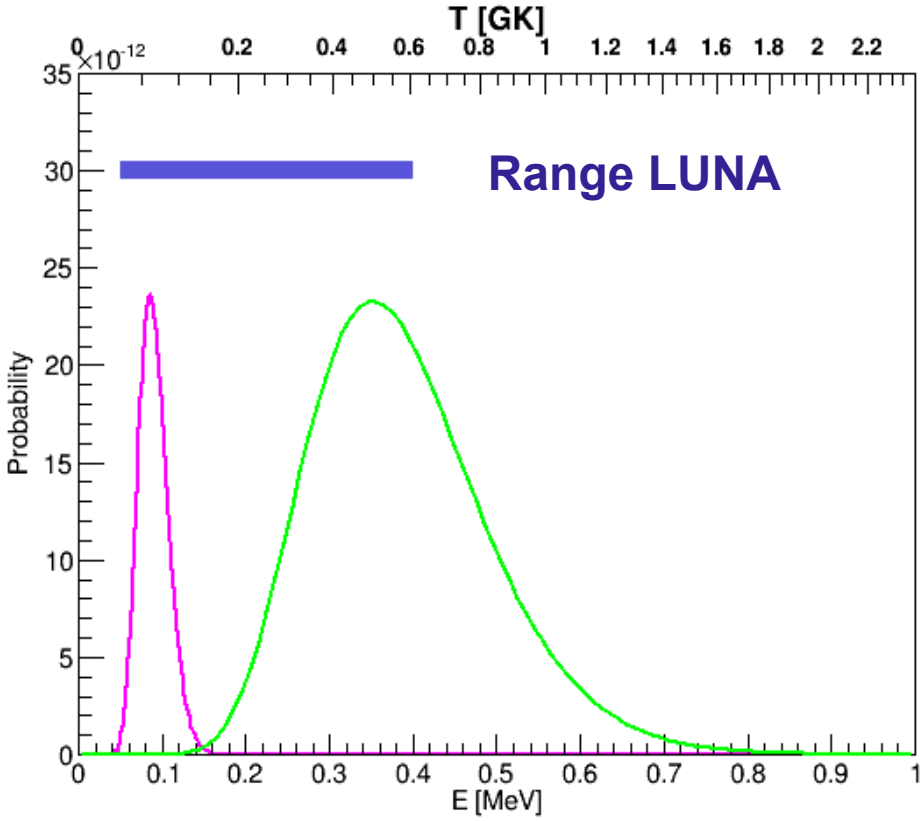
→ Limite sull'eta` dell'Universo aumentato di 1Gy

→ Flusso ν_{CNO} ridotto di un fattore 2

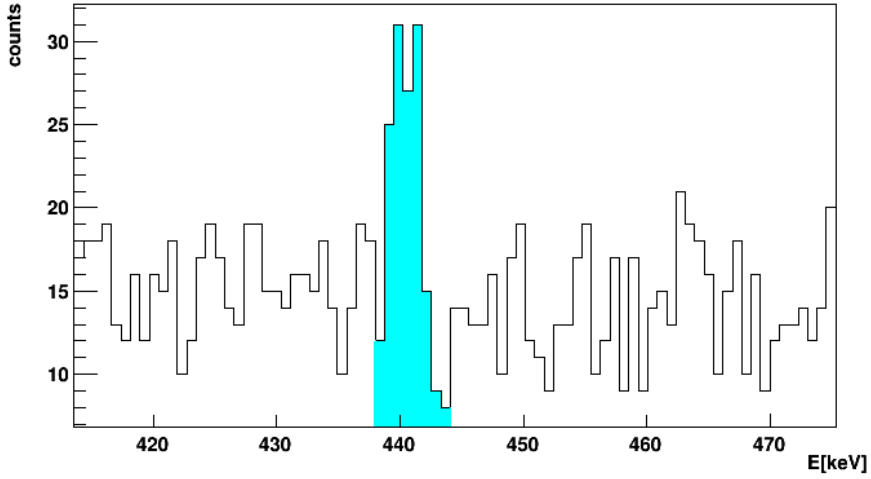
$^{22}Ne + p \rightarrow {}^{23}Na + \gamma$



Regola la produzione degli elementi tra ^{20}Ne e ^{27}Al nelle **giganti rosse** e nelle **esplosioni di novae**



TEST RUN:
OSSERVATI 42 EVENTI IN 12h!



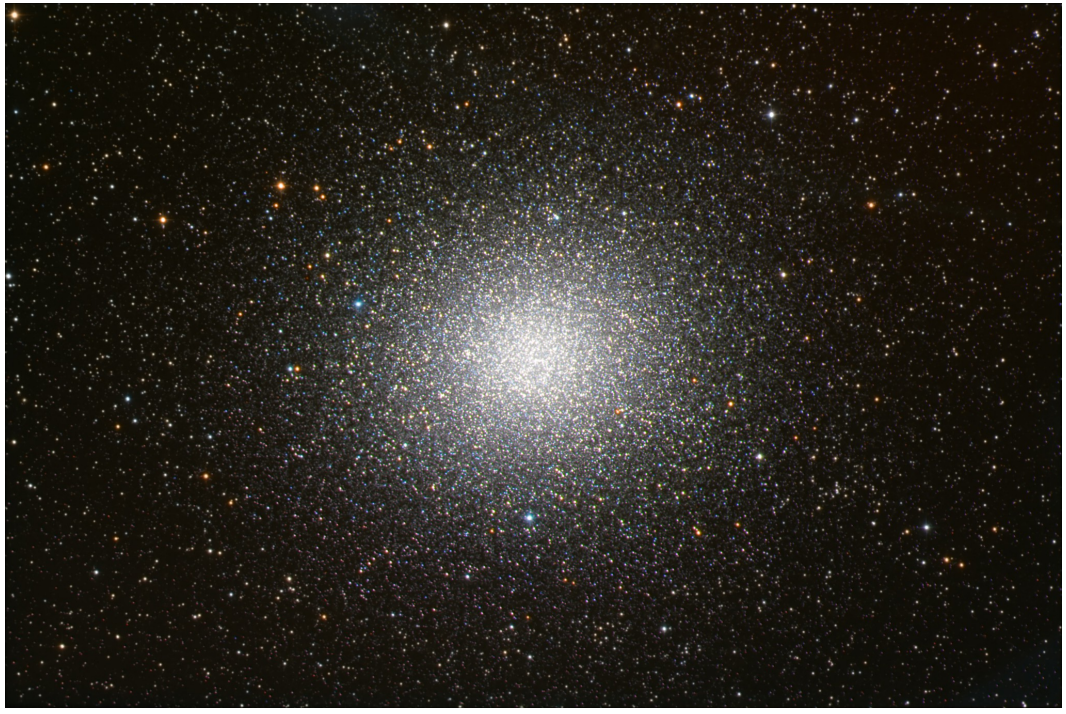
Il progetto LUNA MV

Reazioni chiave per il bruciamento dell' He:

$$\begin{cases} {}^{12}C + \alpha \rightarrow {}^{16}O + \gamma \\ {}^{13}C + \alpha \rightarrow {}^{16}O + n \\ {}^{22}Ne + \alpha \rightarrow {}^{25}Mg + n \end{cases}$$

Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics

LUNA MV



T più alte rispetto al bruciamento dell' H

Acceleratore di più alta energia → 3.5 MV

Collaborazione LUNA

INFN - LNGS (Italia): A. Best, A. Formicola M. Junker

HZDR (Germania): D. Bemmerer, Z. Elekes, T. Szucs

INFN Padova (Italia): C. Broggini, A. Caciolli, R. Depalo, R. Menegazzo

INFN Roma La Sapienza (Italia): C. Gustavino

ATOMKI, Debrecen (Ungheria): Zs.Fülöp, Gy. Gyurky, E.Somorjai

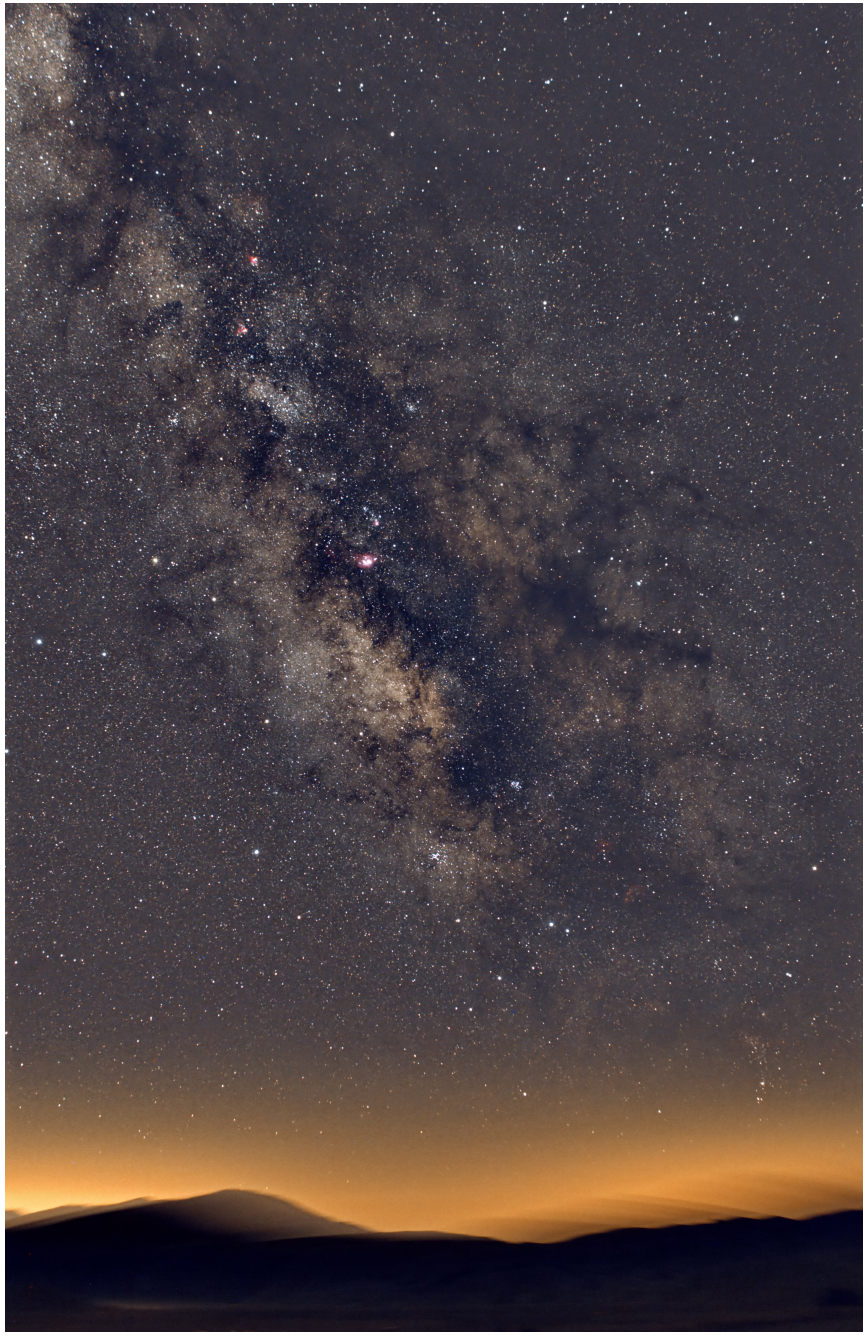
Osservatorio di Collurania (Italia): O. Straniero

Ruhr-Universität Bochum (Germania): F. Strieder

University of Edinburgh (UK): M. Aliotta, T. Davinson, D. Scott, C. Bruno

Università di Genova (Italia): F. Cavanna, P. Corvisiero, P. Prati

Università e INFN Milano (Italy): A. Guglielmetti, D. Trezzi

Università e INFN Napoli (Italia): G.Imbriani, A. Di Leva

Università e INFN Torino (Italia): G.Gervino