



La Fisica Nucleare delle stelle

Rosanna Depalo

Università degli Studi di Milano e INFN Milano

Argomento di questa presentazione

ASTROFISICA

branca dell'Astronomia che applica
le leggi della fisica allo studio
dei corpi celesti

FISICA NUCLEARE

branca della Fisica che
studia le proprietà dei nuclei atomici

Argomento di questa presentazione

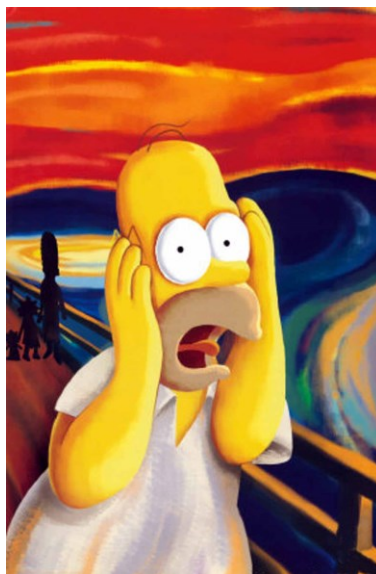
ASTROFISICA

branca dell'Astronomia che applica
le leggi della fisica allo studio
dei corpi celesti

FISICA NUCLEARE

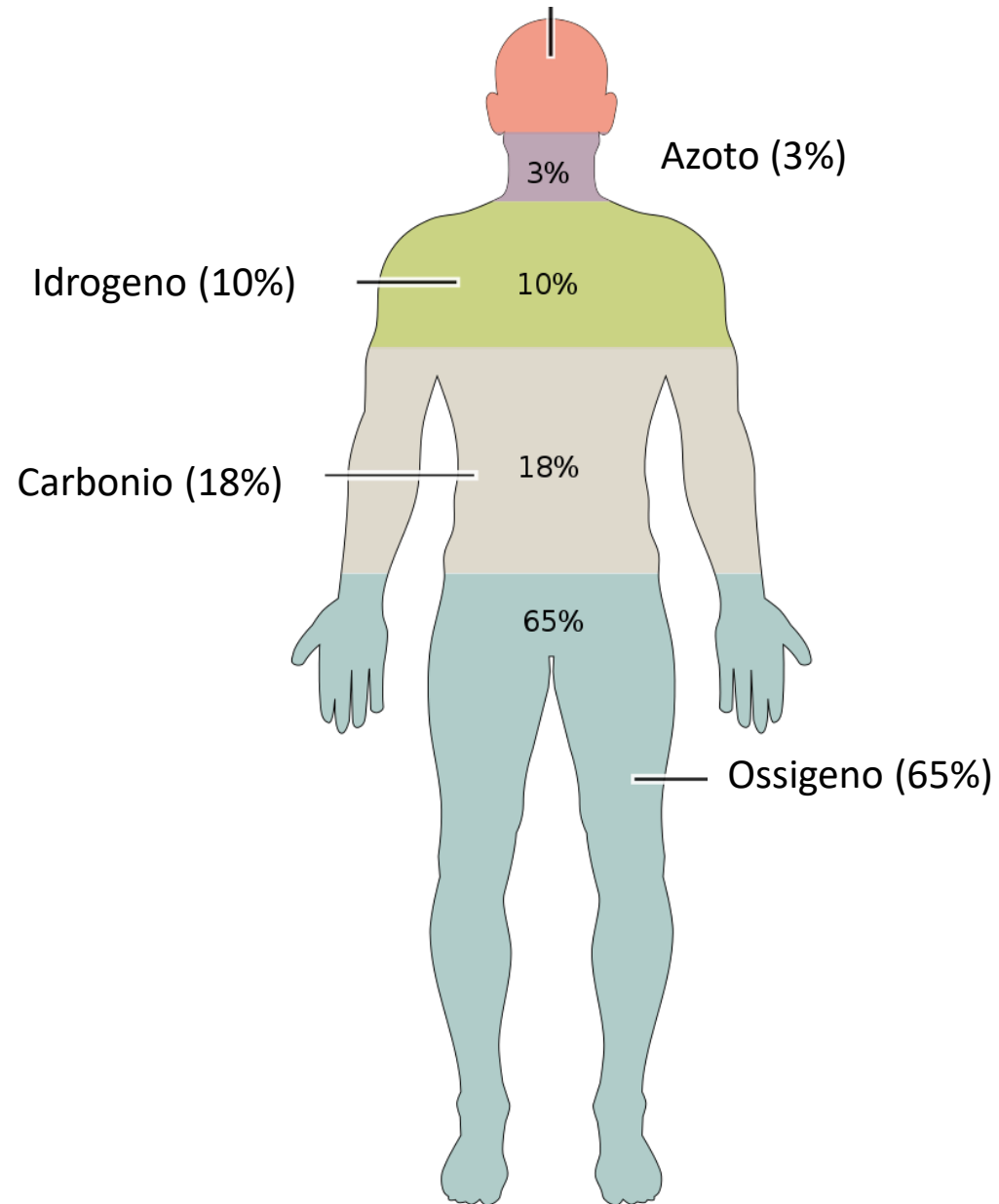
branca della Fisica che
studia le proprietà dei nuclei atomici

ASTROFISICA NUCLEARE

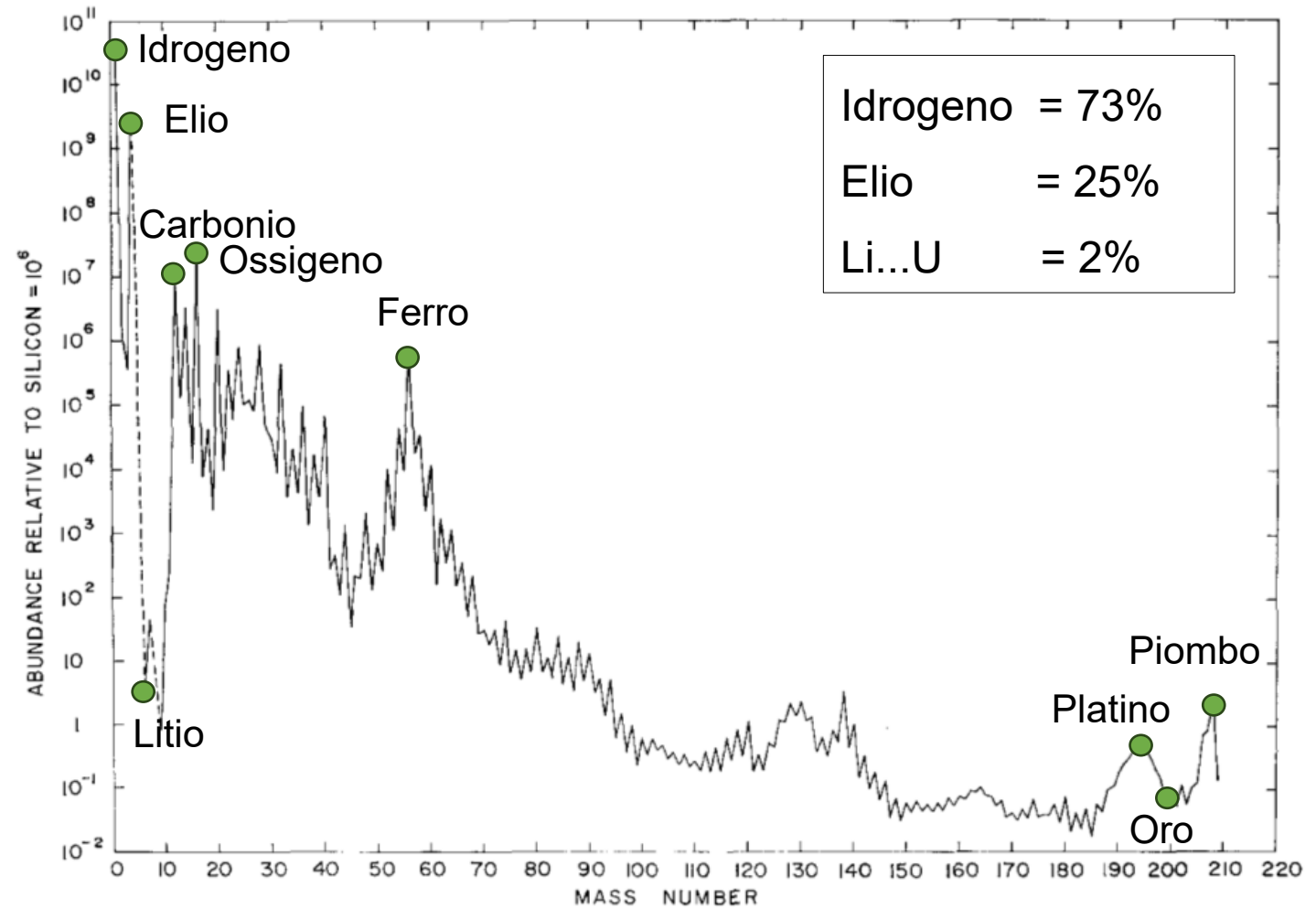


Da dove arrivano gli elementi di cui siamo fatti?

Calcio, fosforo, potassio, zolfo, sodio, cloro, magnesio (4%)

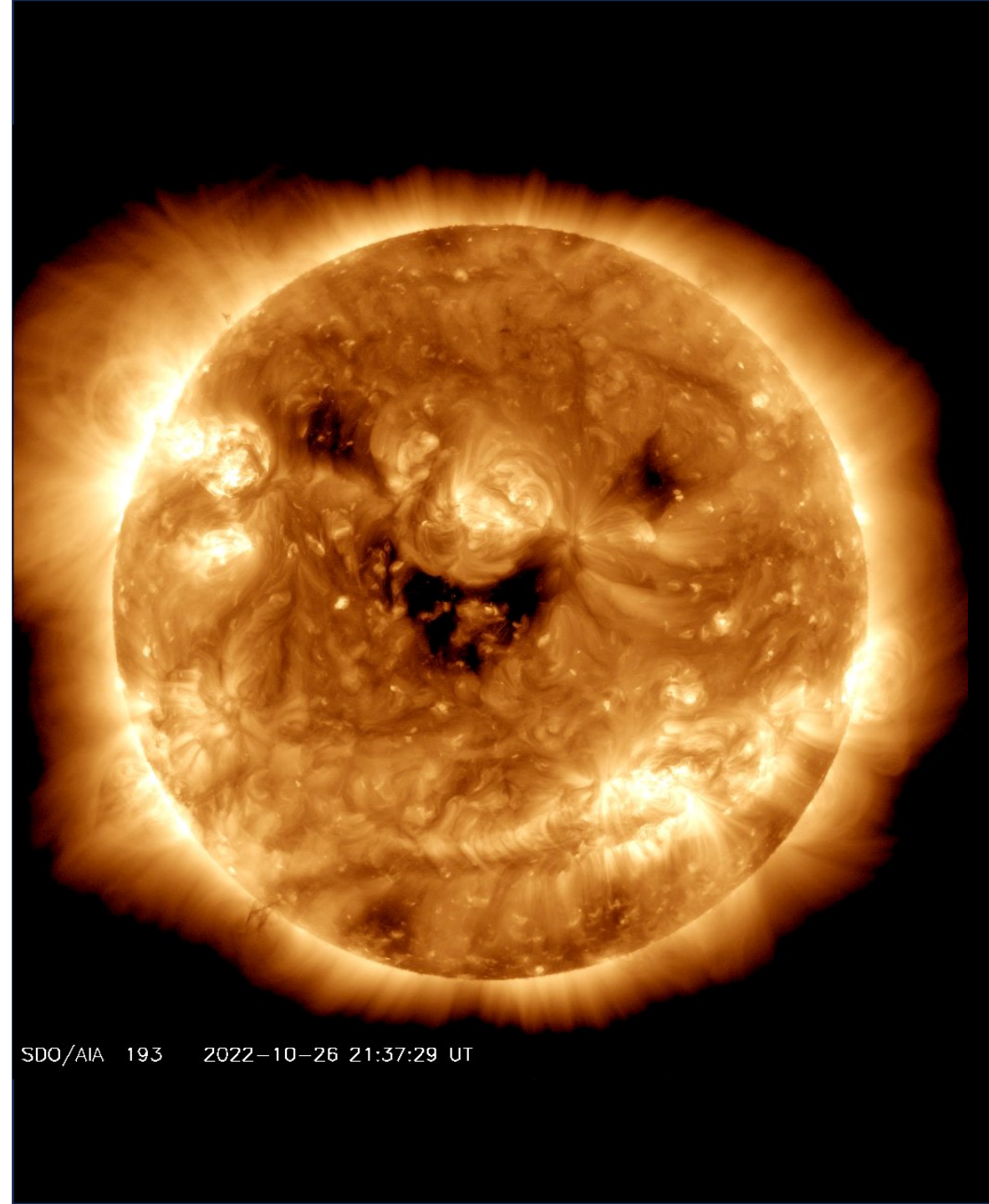


**Perché alcuni
elementi sono più
abbondanti di altri?**



Qual è la sorgente di energia delle stelle?

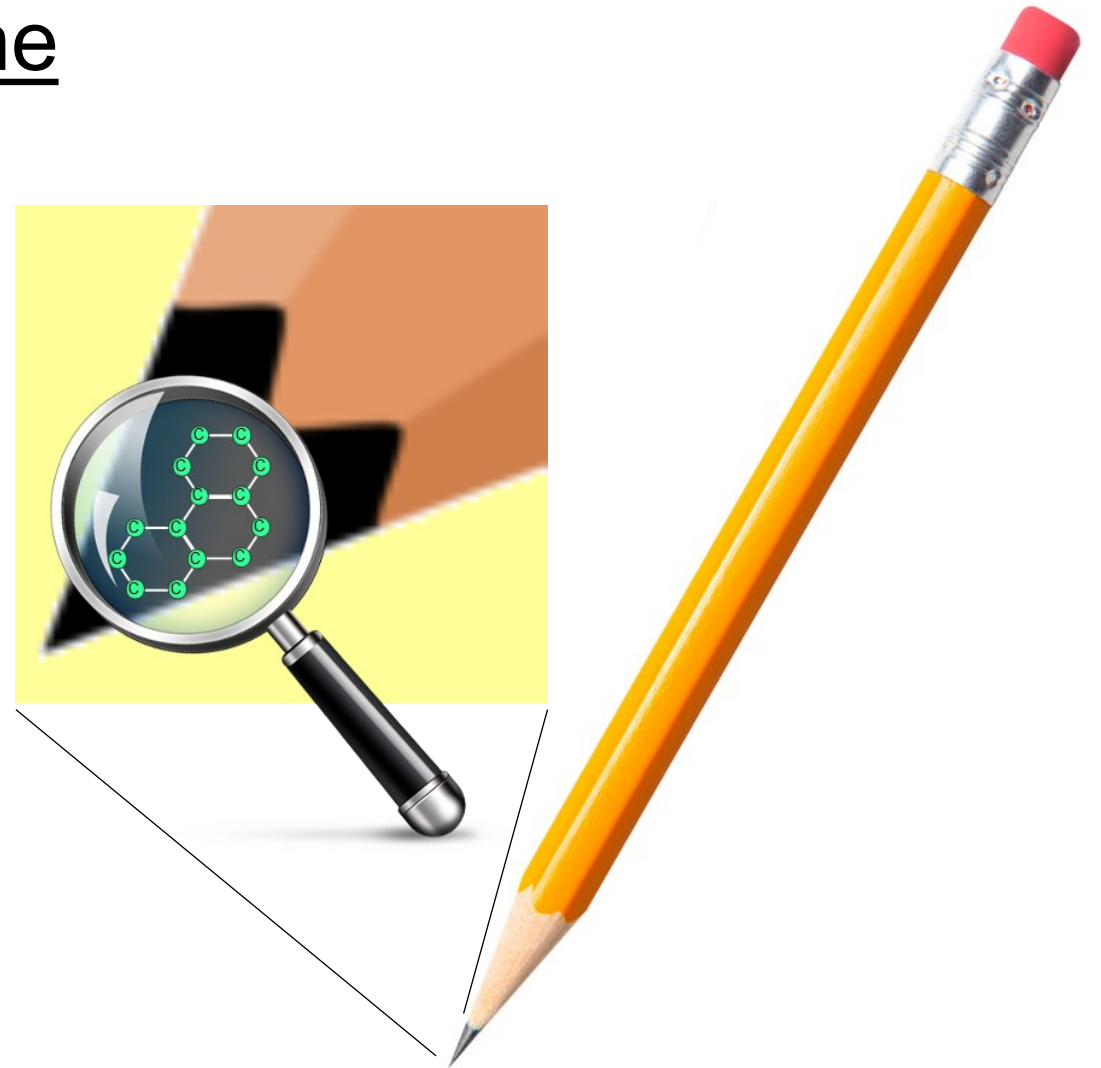
Luminosità Sole = 3.86×10^{26} W
(386 000 000 000 000 000 000 000 000 W)



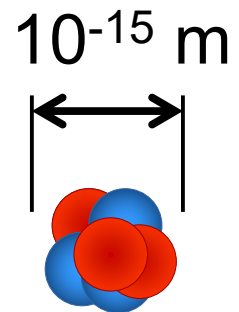
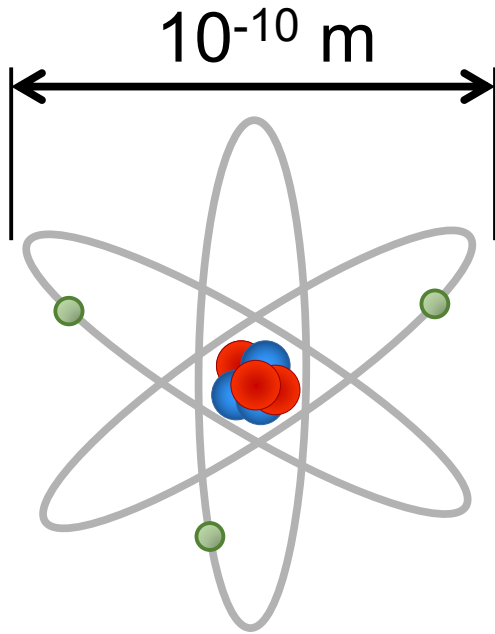
L' **ATOMO** (dal greco ἄτομος - àtomos = indivisibile) è la più piccola parte di ogni elemento esistente in natura che ne conserva le caratteristiche chimiche

L' **ATOMO** (dal greco ἄτομος - àtomos = indivisibile) è la più piccola parte di ogni elemento esistente in natura che ne conserva le caratteristiche chimiche

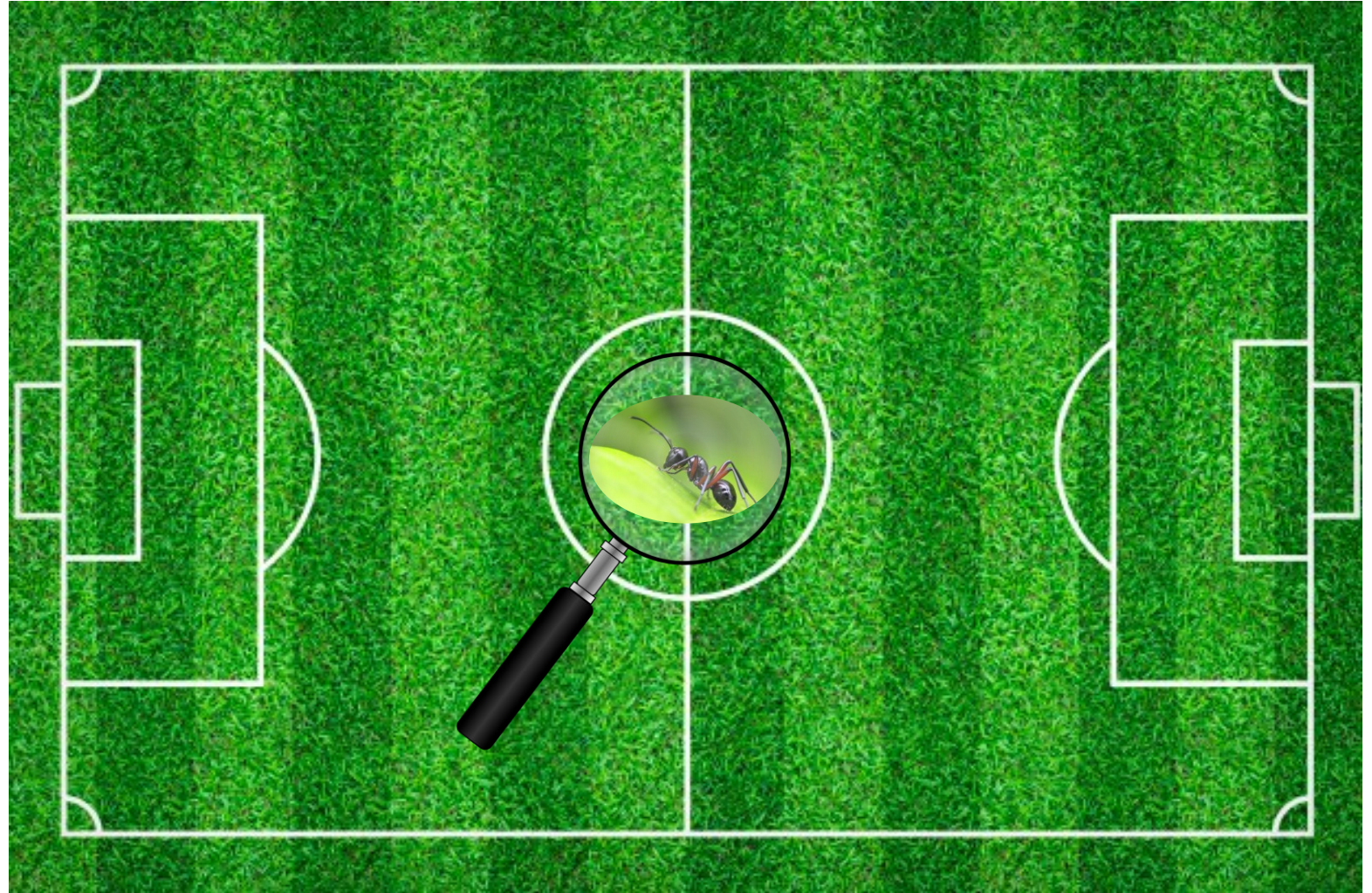
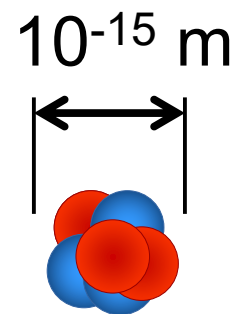
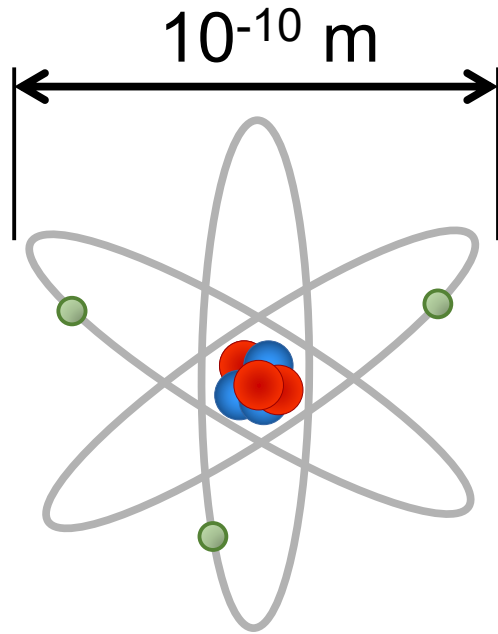
Nella punta di una matita, ci sono circa
10.000.000.000.000.000.000.000
(Diecimila miliardi di miliardi) di atomi
di carbonio!



Dimensioni dell'atomo



Dimensioni dell'atomo



Il nucleo è composto da **PROTONI** e **NEUTRONI**
e racchiude quasi tutta la massa del nucleo



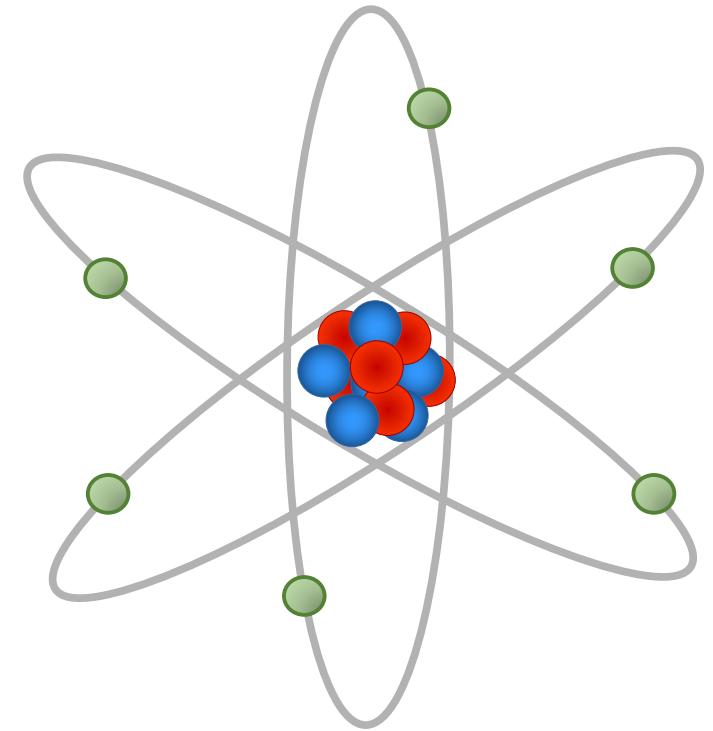
Carica elettrica positiva
Massa = 1.673×10^{-27} kg



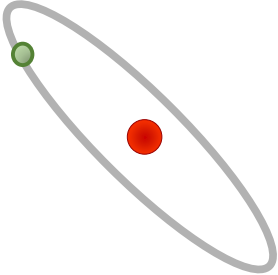
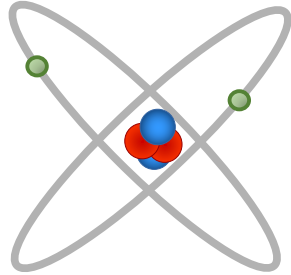
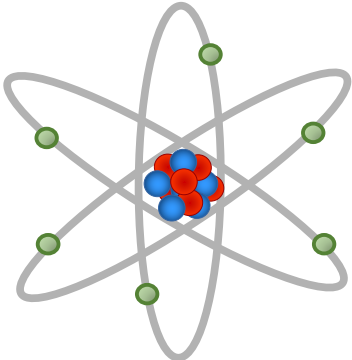
Non ha carica elettrica
Massa = 1.675×10^{-27} kg



Carica elettrica negativa
Massa = 9.1×10^{-31} kg

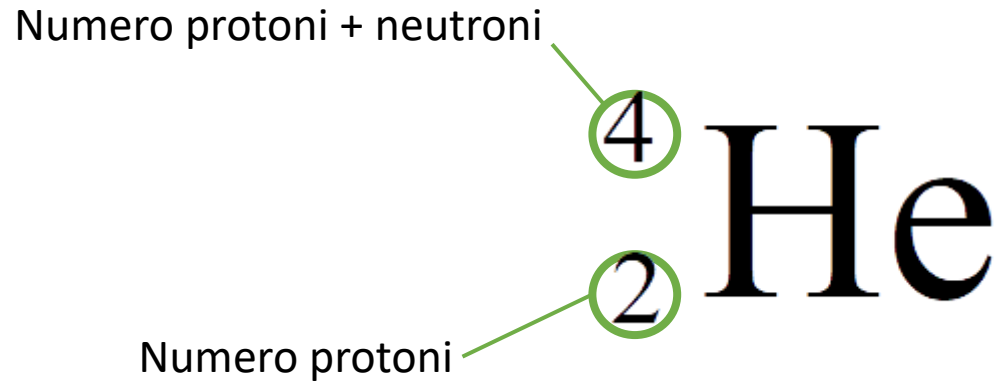


Atomi di **ELEMENTI** diversi hanno un **DIVERSO NUMERO DI PROTONI** nel nucleo

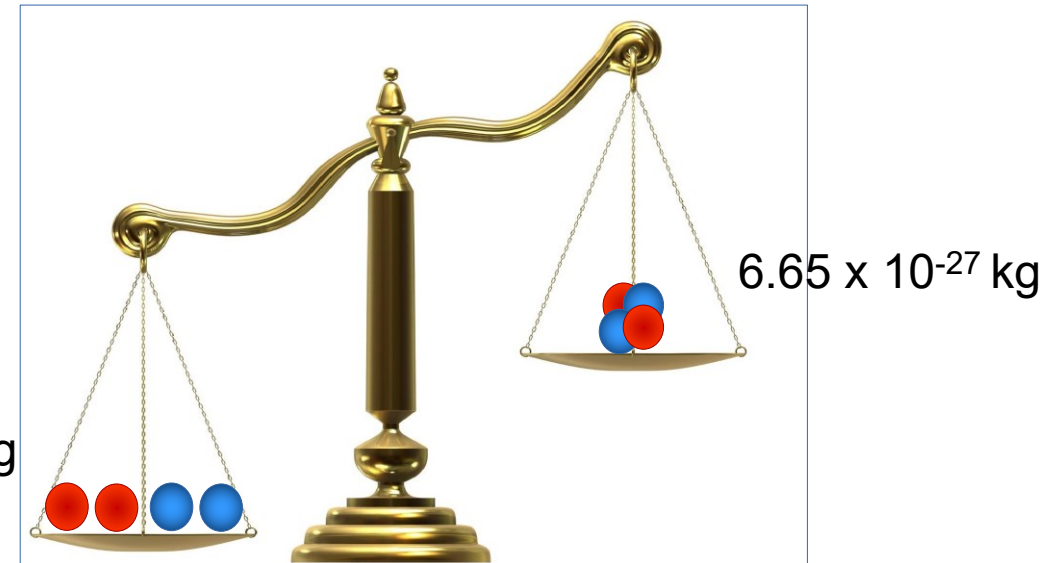
idrogeno	${}^1\text{H}$		1p
elio	${}^4_2\text{He}$		2p + 2n
carbonio	${}^{12}_6\text{C}$		6p + 6n

Massa dell'atomo

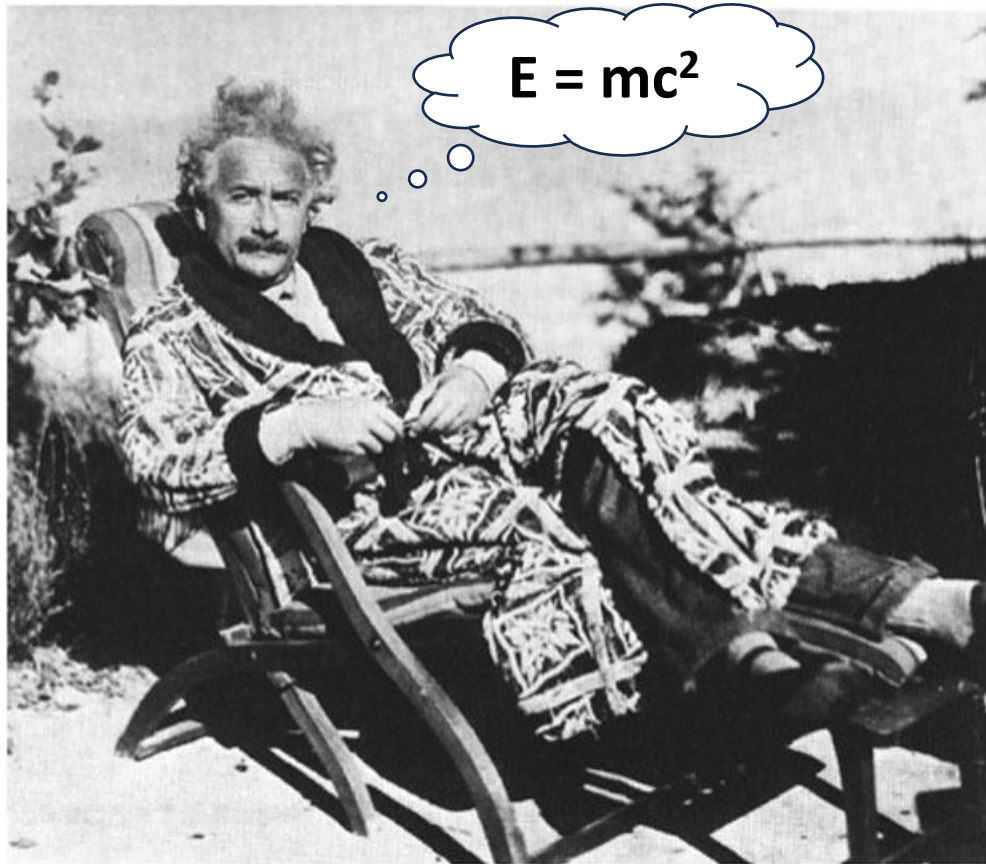
Nel **1920**, Francis W. **Aston** effettua misure precise delle masse di diversi atomi, e scopre che la massa degli atomi è **minore** della somma delle masse dei costituenti.



$6.70 \times 10^{-27} \text{ kg}$



Massa dell'atomo

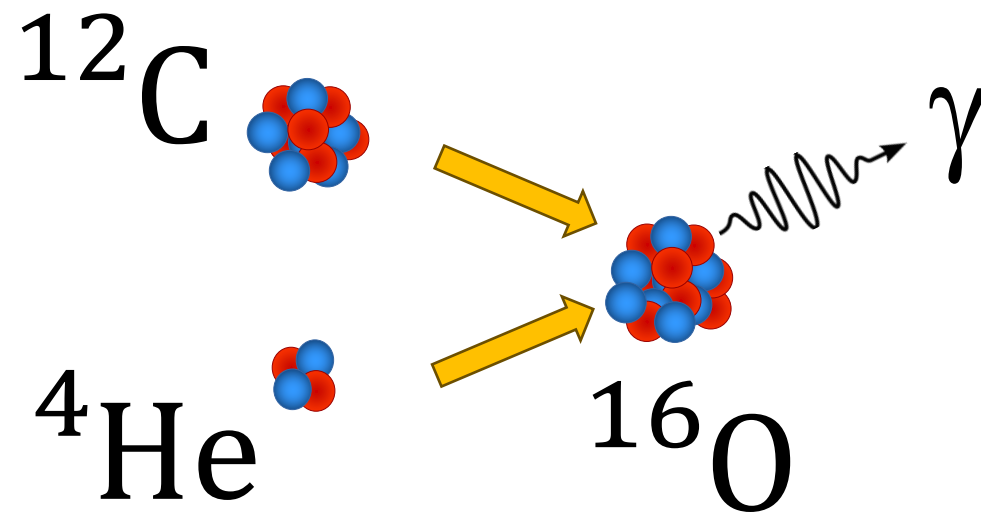


Il difetto di massa
è dovuto all'**energia di legame**,
necessaria per tenere assieme
protoni e neutroni nel nucleo

Cos'è una reazione di fusione nucleare?

In una reazione di fusione nucleare, due nuclei si **UNISCONO** e formano un **NUCLEO PIU' PESANTE**.

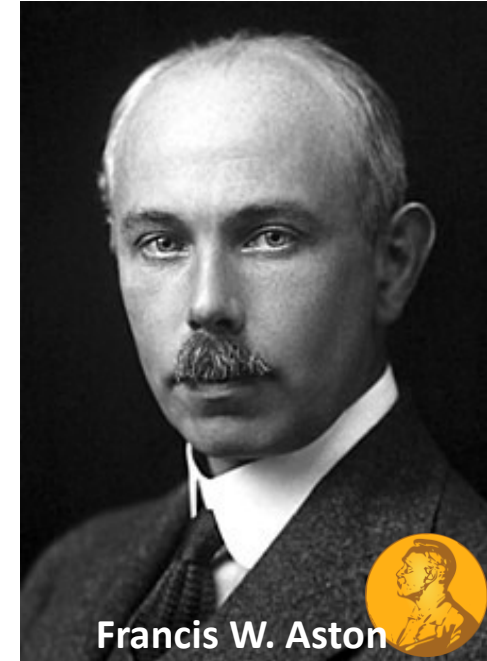
Se l'energia di legame del prodotto è maggiore di quella dei reagenti, la massa in eccesso viene liberata sotto forma di **energia**



Francis W. Aston Nobel Lecture (1922)

Prendiamo il caso di 1 grammo-atomo di idrogeno, che è **la quantità di idrogeno in 9 ml di acqua**. Se questo venisse interamente trasformato in elio, verrebbero liberati **200,000 kW h**.

Abbiamo qui una **sorgente di energia sufficiente per coprire il calore del sole**. In connessione con questo, Eddington osservò che se solo il 10% dell'idrogeno totale del Sole fosse convertito in elio, abbastanza energia sarebbe liberata per mantenere la sua luminosità attuale per miliardi di anni.



Reazioni nucleari nell'Universo

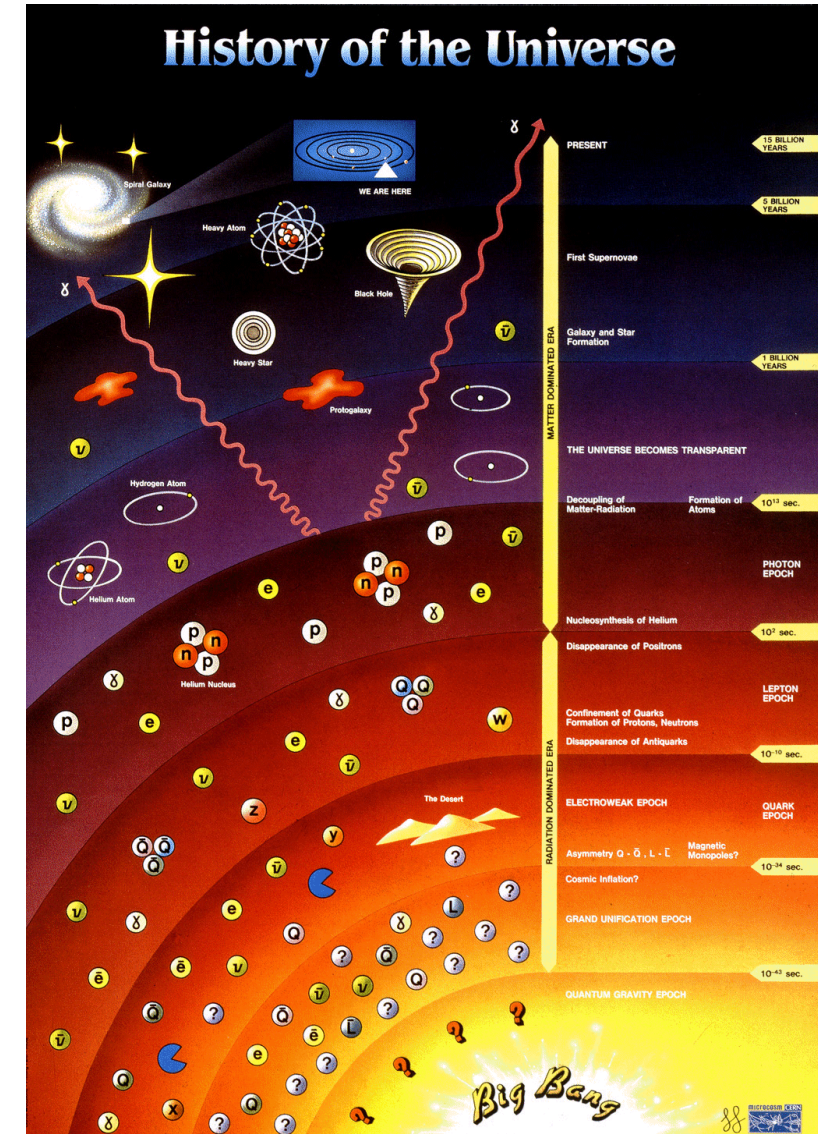
Il primo evento di nucleosintesi è avvenuto nei primi 20 minuti dopo il Big Bang ($T \sim 10^9 \rightarrow 10^8 \text{ K}$)

Universo formato da **protoni e neutroni** (+ elettroni, neutrini, fotoni)



Universo formato da **idrogeno (75%), elio (25%)** e tracce di litio

Gli elementi più pesanti di H ed He (ad eccezione di Li, Be, B) vengono prodotti all'interno delle stelle!



Come si forma una stella?



Credits: Image: NASA, ESA, CSA. Image Processing: Joseph DePasquale (STScI)

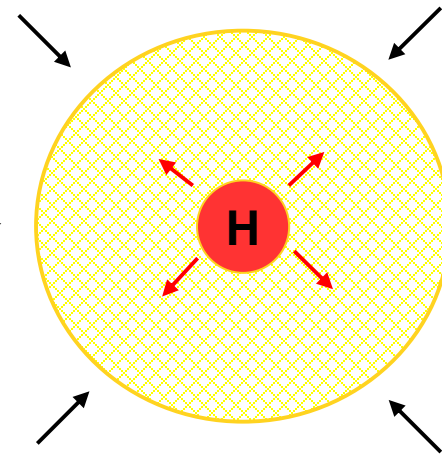


Credits: NASA, ESA, CSA, STScI

Come si forma una stella?



Contrazione
gravitazionale

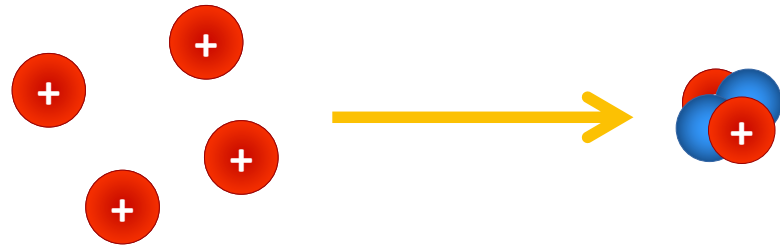


Bruciamento H
 $T > 10^7$ K
 $M > 0.08 M_{\text{sole}}$

Bruciamento dell'idrogeno

Il bruciamento dell'idrogeno trasforma **4 protoni** in un nucleo di **elio**

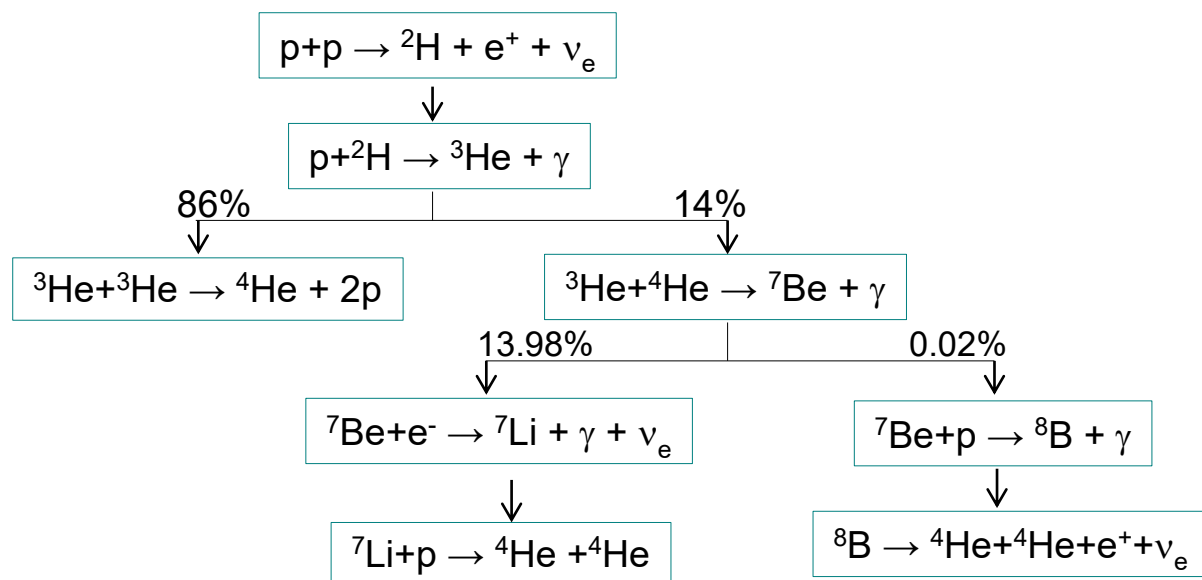
La fusione simultanea di 4 protoni è un processo poco probabile, inoltre due protoni devono trasformarsi in neutroni.



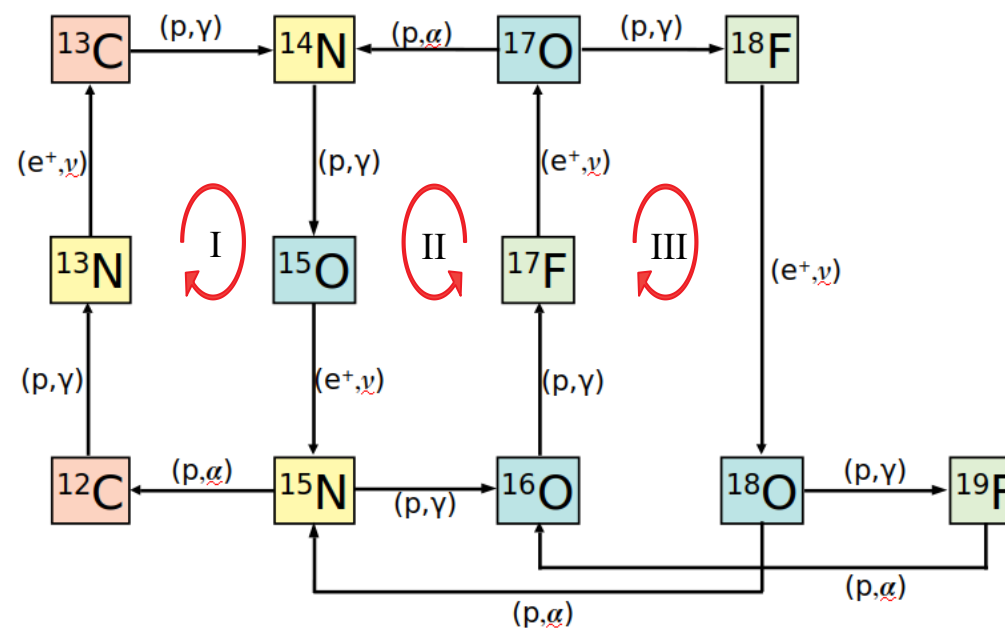
Bruciamento dell'idrogeno

Esistono in realtà diverse sequenze di reazioni possibili:

Catene pp



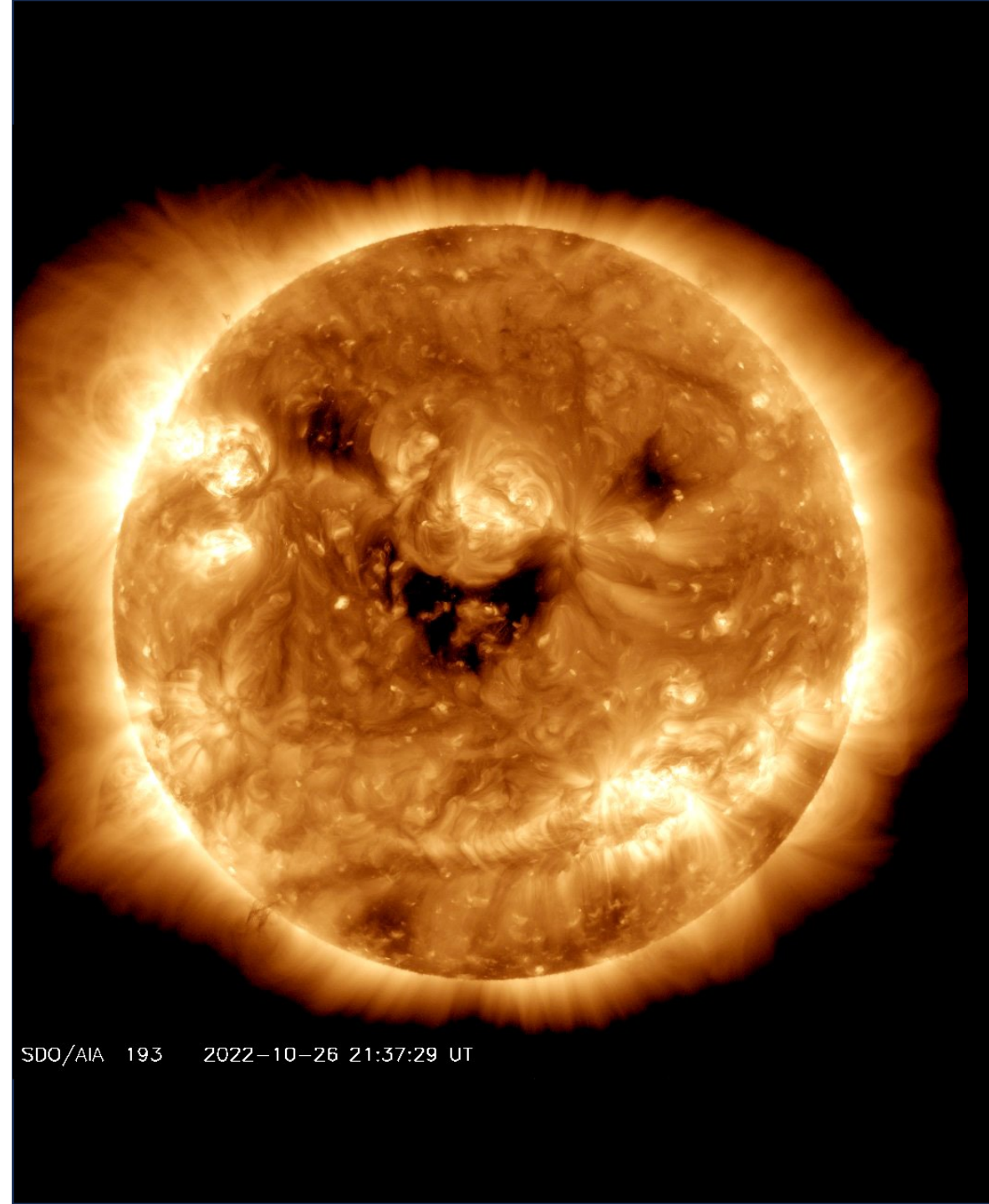
cicli CNO



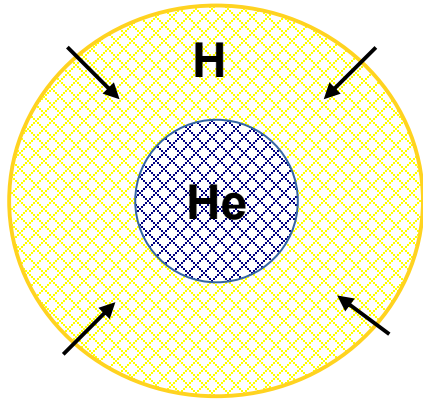
Quanto idrogeno brucia il sole?

Tasso di fusione $\sim 10^{38} \frac{\text{fusioni}}{\text{s}}$

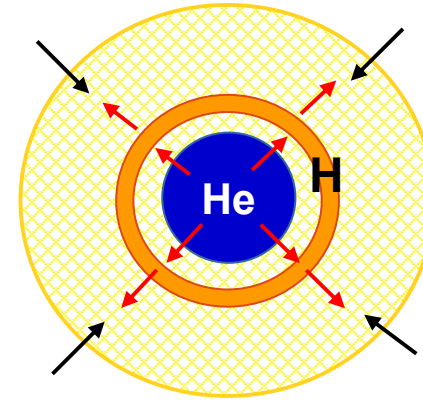
**640 milioni di tonnellate di
idrogeno bruciati ogni secondo!**



Reazioni nucleari nelle stelle

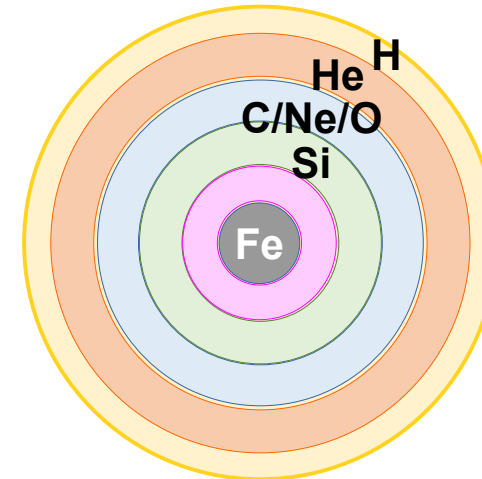


contrazione
(aumenta la temperatura)



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

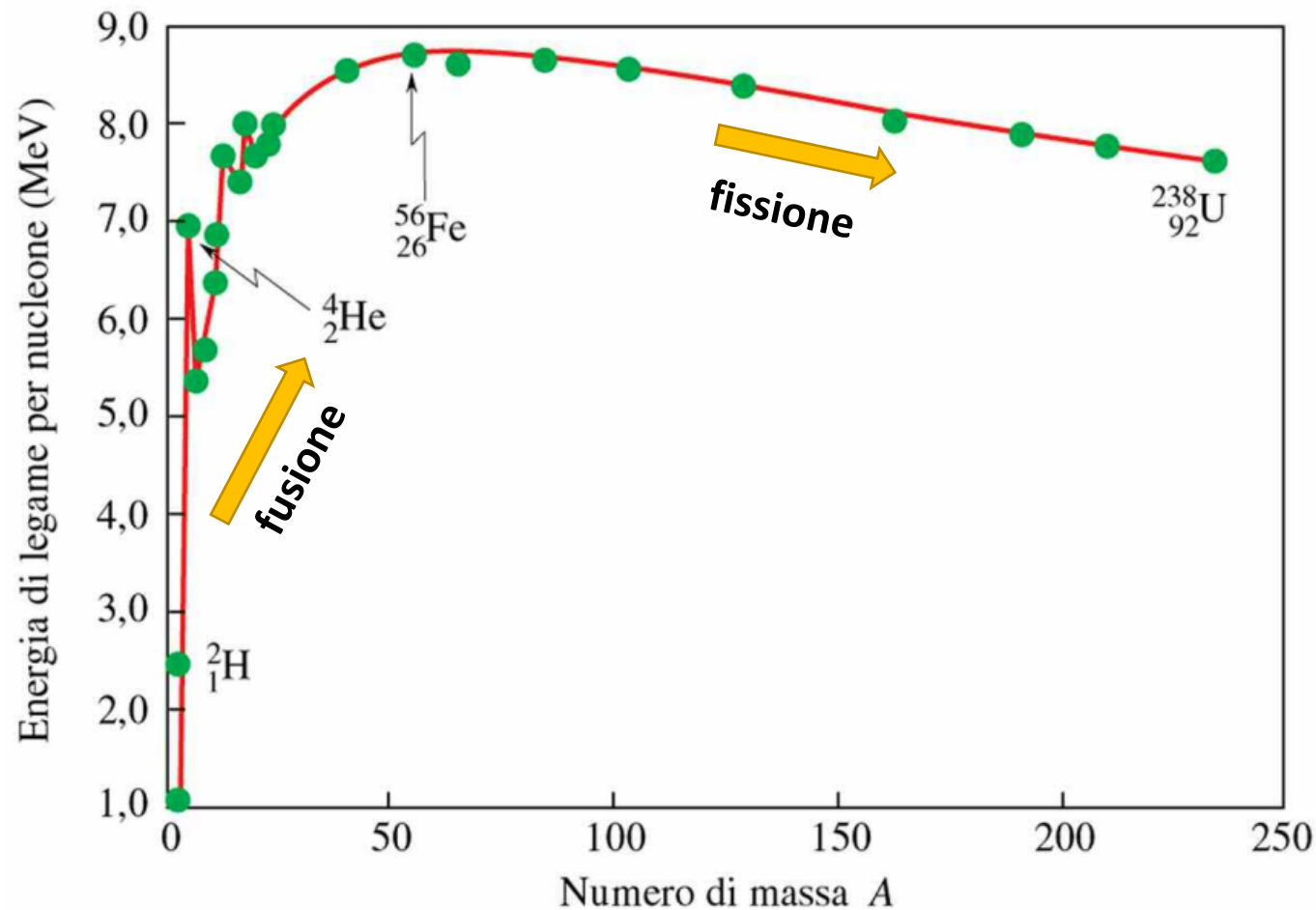
Bruciamenti
 $\text{C} \rightarrow \text{Ne} \rightarrow \text{O}$



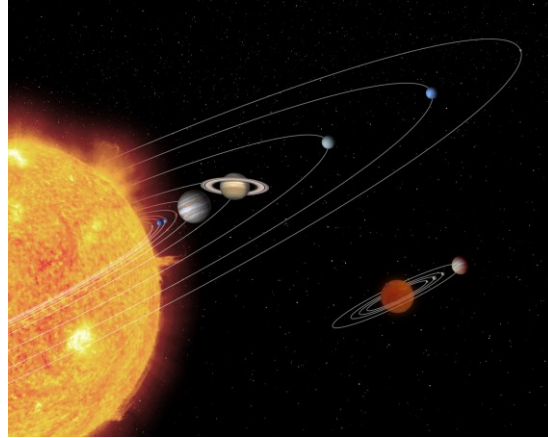
bruciamento Si
 $T > 5 \times 10^9 \text{ K}$
 $M > 15 M_{\text{sole}}$

Reazioni nucleari nelle stelle

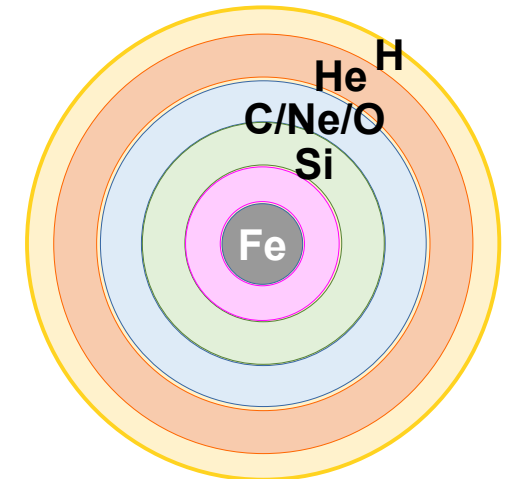
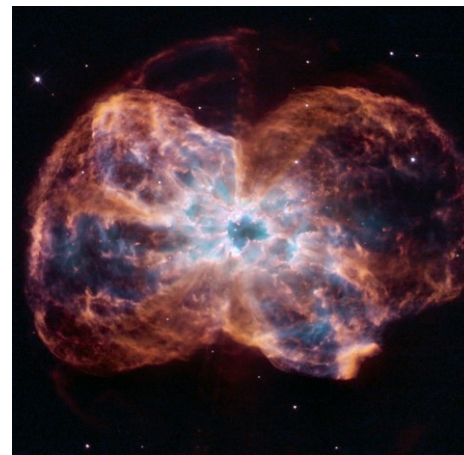
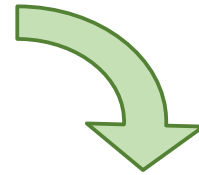
Le reazioni di fusione nelle stelle non procedono oltre il **picco del ferro**, perché il processo sarebbe endotermico



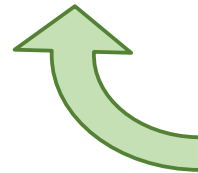
Origine degli elementi



Formazione di stelle e pianeti a partire da una nube di gas

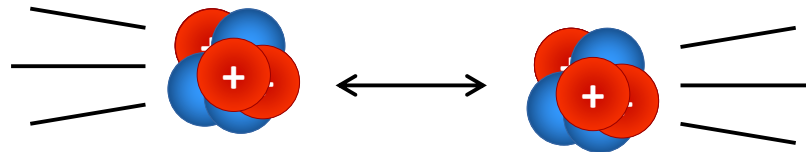


Produzione elementi ed espulsione nel mezzo interstellare



Reazioni nucleari nelle stelle

Tutti i nuclei atomici hanno **CARICA ELETTRICA POSITIVA**,
quindi tendono a **RESPINGERSI**



Secondo le leggi della Fisica classica, solo i nuclei con energia cinetica maggiore della barriera di repulsione coulombiana possono fondersi.

Reazioni nucleari nelle stelle

Nelle stelle, l'energia con cui si scontrano i nuclei dipende dalla temperatura. Ad esempio, nel centro del Sole $T \approx 15$ Milioni di gradi

Energia cinetica protoni

$\approx 1300 \text{ eV}$

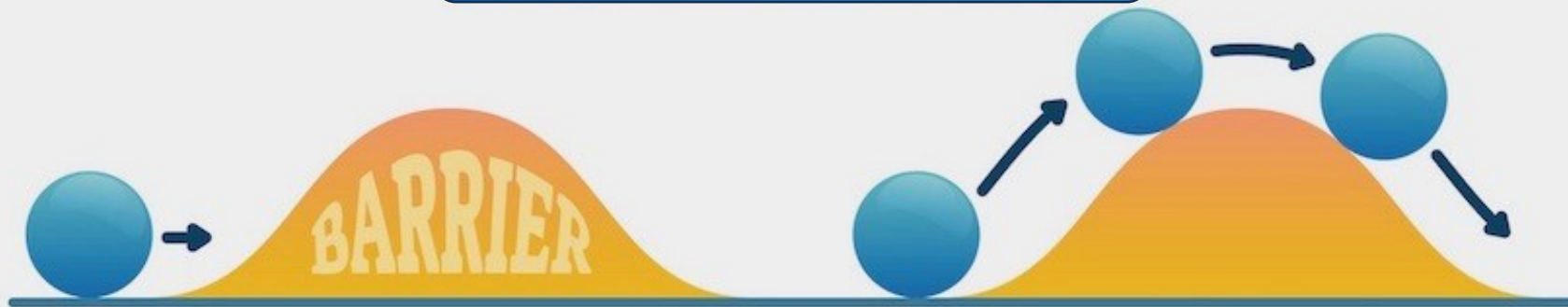


Energia di repulsione
Coulombiana tra due protoni

$\approx 1.200.000 \text{ eV}$

Effetto tunnel quantistico

Meccanica classica



Meccanica quantistica



Reazioni nucleari nelle stelle

La probabilità di superare la barriera per effetto tunnel diminuisce **ESPONENZIALMENTE** con l'energia



Probabilità di fusione molto piccola!

Reazioni nucleari nelle stelle

La probabilità di superare la barriera per effetto tunnel diminuisce **ESPONENZIALMENTE** con l'energia



Probabilità di fusione molto piccola!



La probabilità che la reazione $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ avvenga è molto più bassa ($\sim 2 \times 10^{-31}$)

Ma se così non fosse, il Sole avrebbe vita più breve!

Come riprodurre in laboratorio ciò che accade nelle stelle?

Due approcci possibili:

Misure dirette

Si studia direttamente la reazione nucleare di interesse

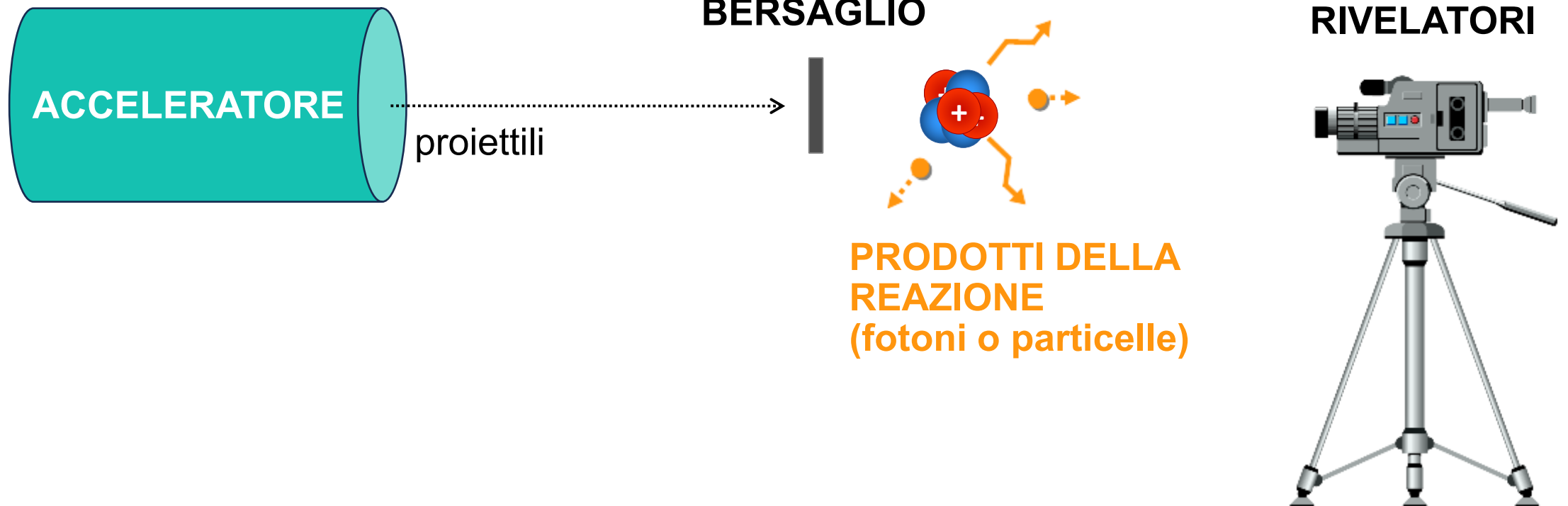


Misure indirette

si utilizza una reazione nucleare diversa per popolare lo stesso nucleo finale, e studiarne le proprietà



Come riprodurre in laboratorio ciò che accade nelle stelle?



Misure dirette

Con un **acceleratore** che fornisce **1 000 000 000 000 000 000** particelle al **secondo**, ed un **bersaglio** contenente **10^{18} atomi/cm²**,

Misure dirette

Con un **acceleratore** che fornisce **1 000 000 000 000 000 000** particelle al **secondo**, ed un **bersaglio** contenente **10^{18} atomi/cm²**,

il numero di **reazioni attese** è **~ 0.001 conteggi all'ora** (**0.05 conteggi in 2 gg**)

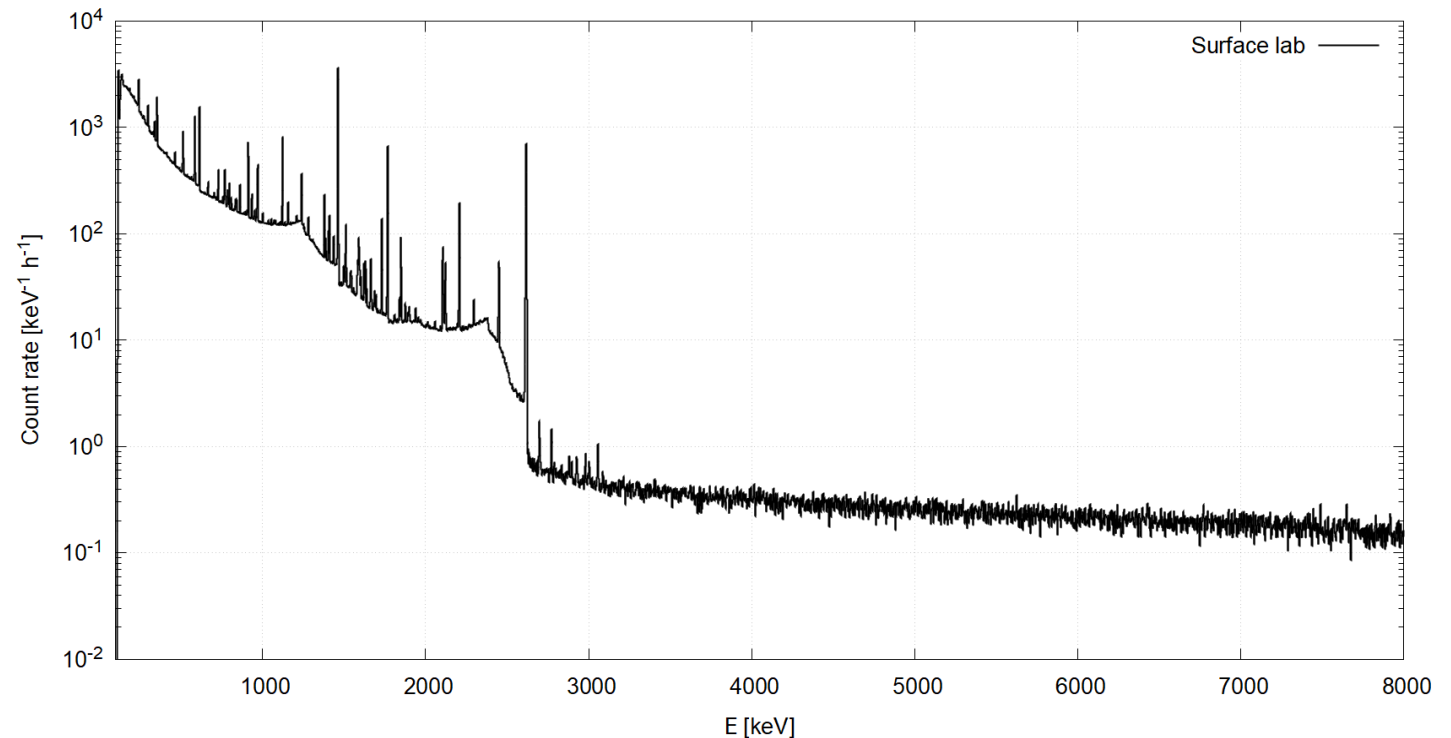


Misure dirette

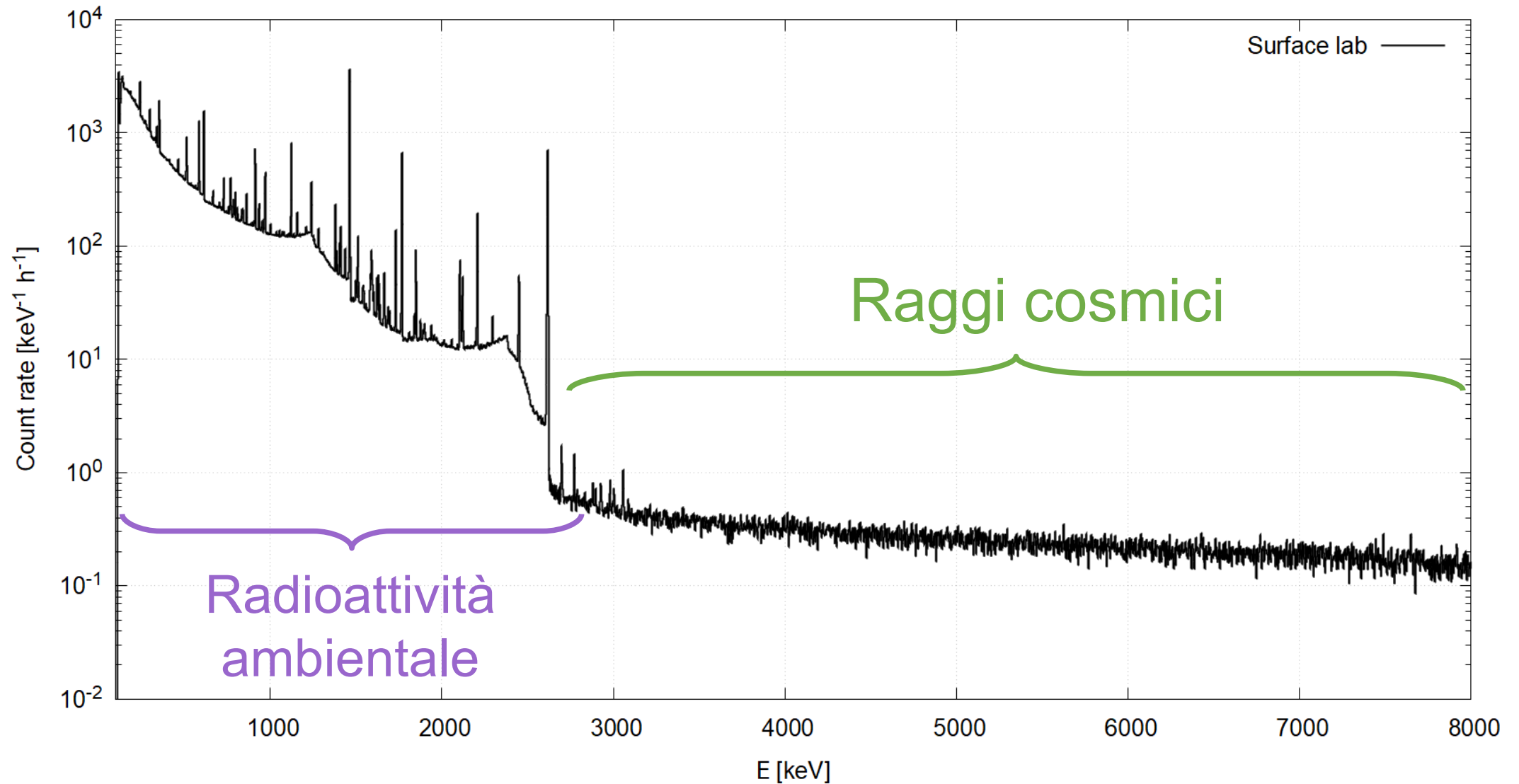
Con un **acceleratore** che fornisce **1 000 000 000 000 000 000** particelle al **secondo**, ed un **bersaglio** contenente **10^{18} atomi/cm²**,

il numero di **reazioni attese** è **~ 0.001 conteggi all'ora** (**0.05 conteggi in 2 gg**)

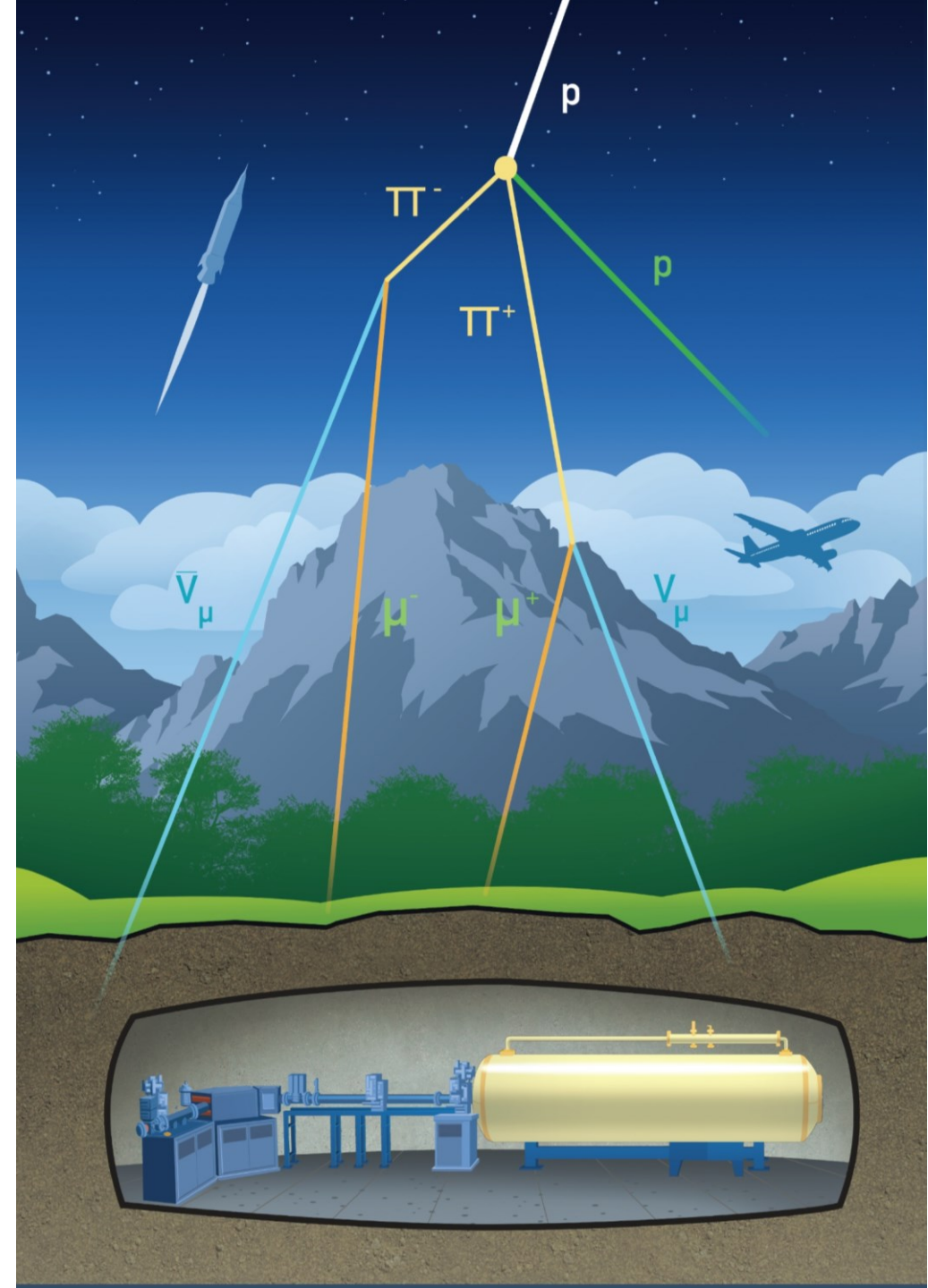
Tipico segnale di fondo in un rivelatore di raggi gamma



Segnale di fondo ambientale



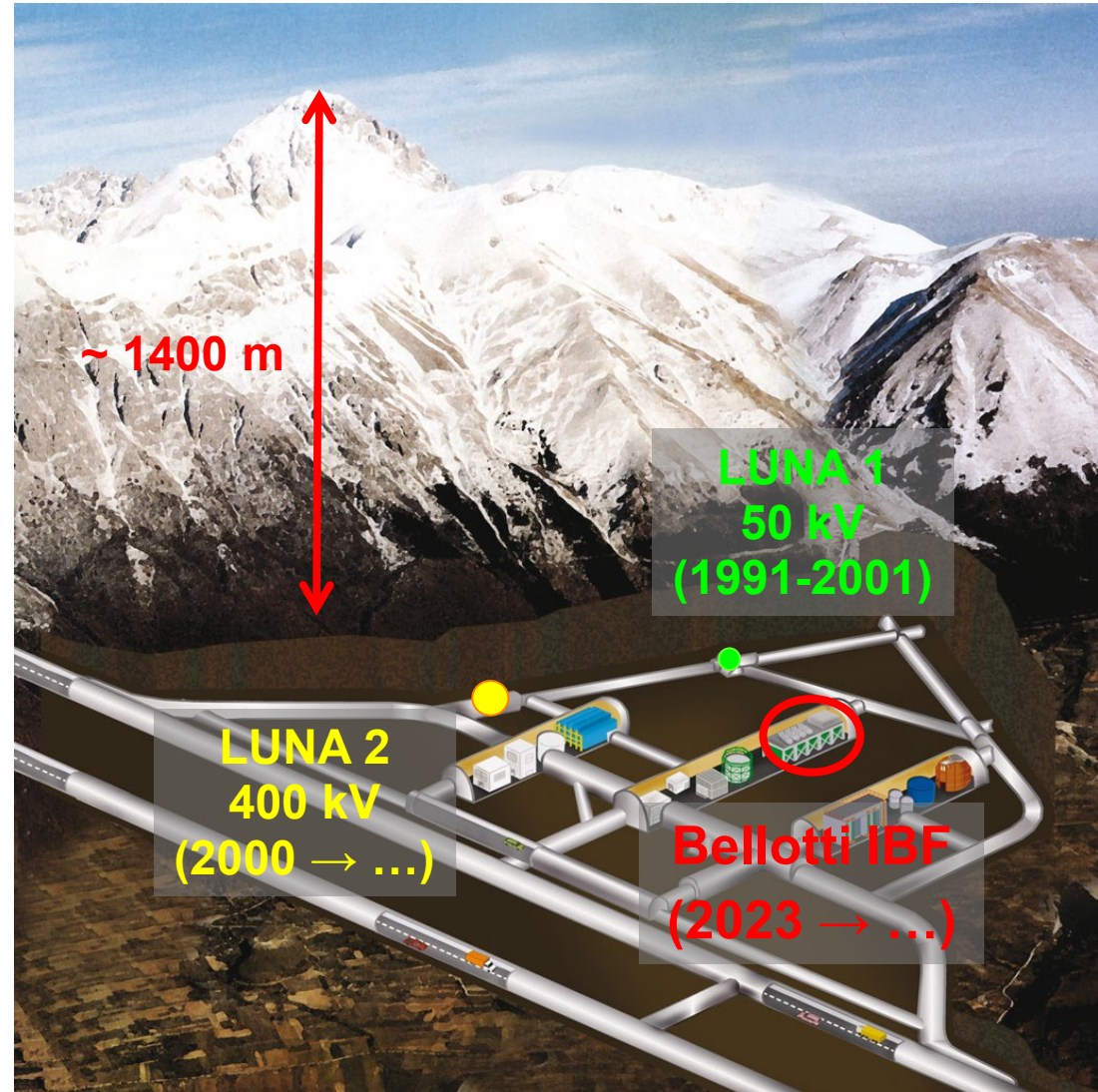
**Una possibile soluzione:
fare esperimenti in
laboratori sotterranei!**



I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

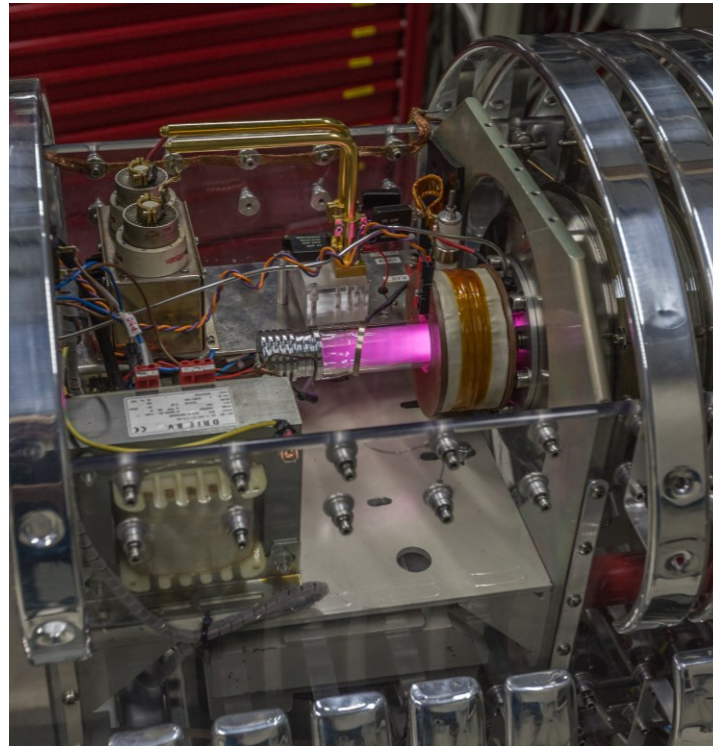


I Laboratori Nazionali del Gran Sasso



LUNA

(Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics)



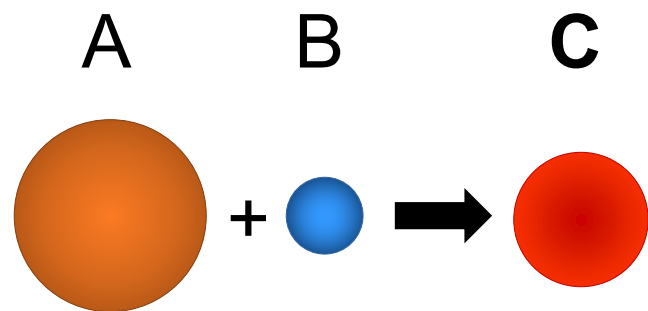
Acceleratore da 400 kV, ideale per lo studio del bruciamento di idrogeno nelle stelle e della nucleosintesi del Big Bang

Bellotti Ion Beam Facility

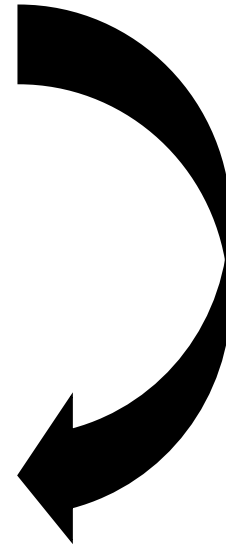
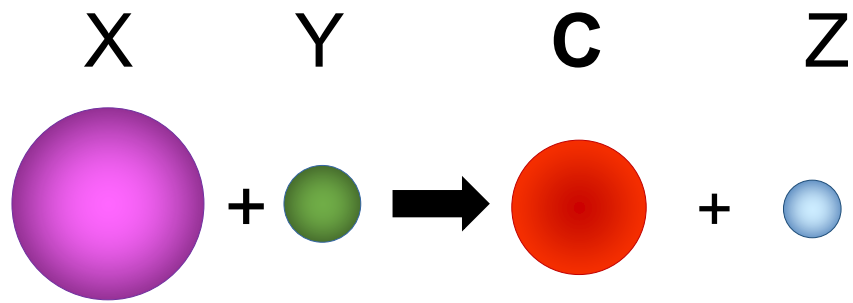
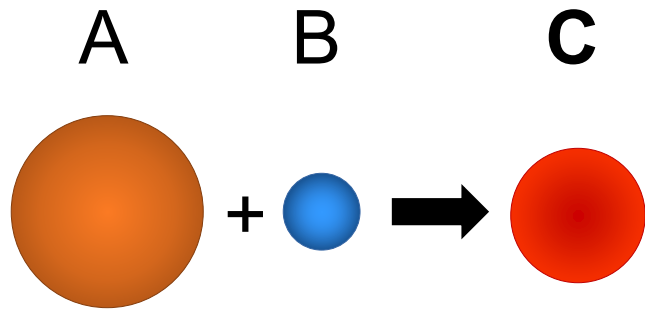


Acceleratore da 3.5 MV, ideale per lo studio di reazioni attive in stelle massicce e ambienti esplosivi

Misure indirette



Misure indirette

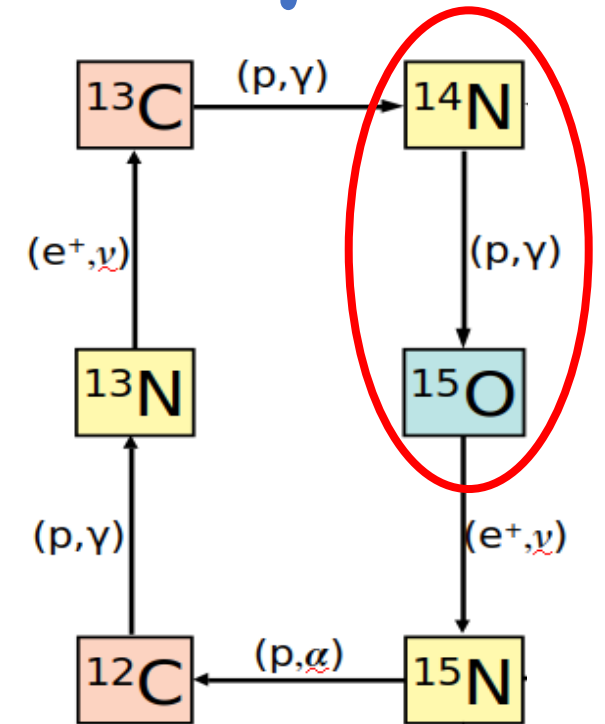
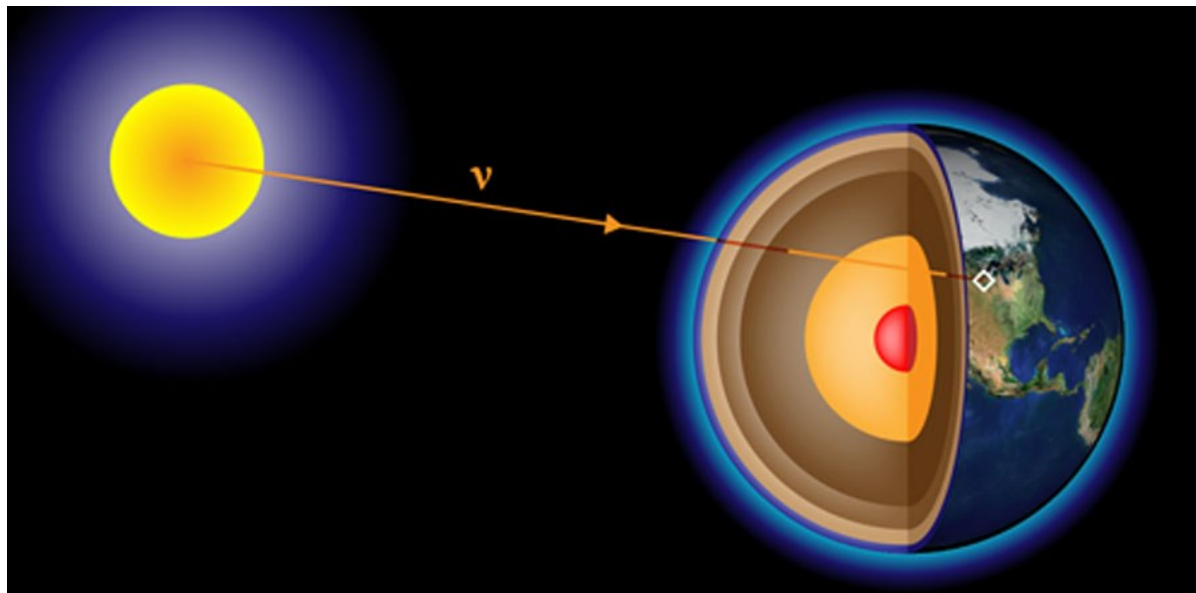


Uso una combinazione diversa di proiettile e bersaglio per popolare lo stesso nucleo **C**, e studiarne le proprietà

Un esempio: $^{14}\text{N} + \text{p} \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$

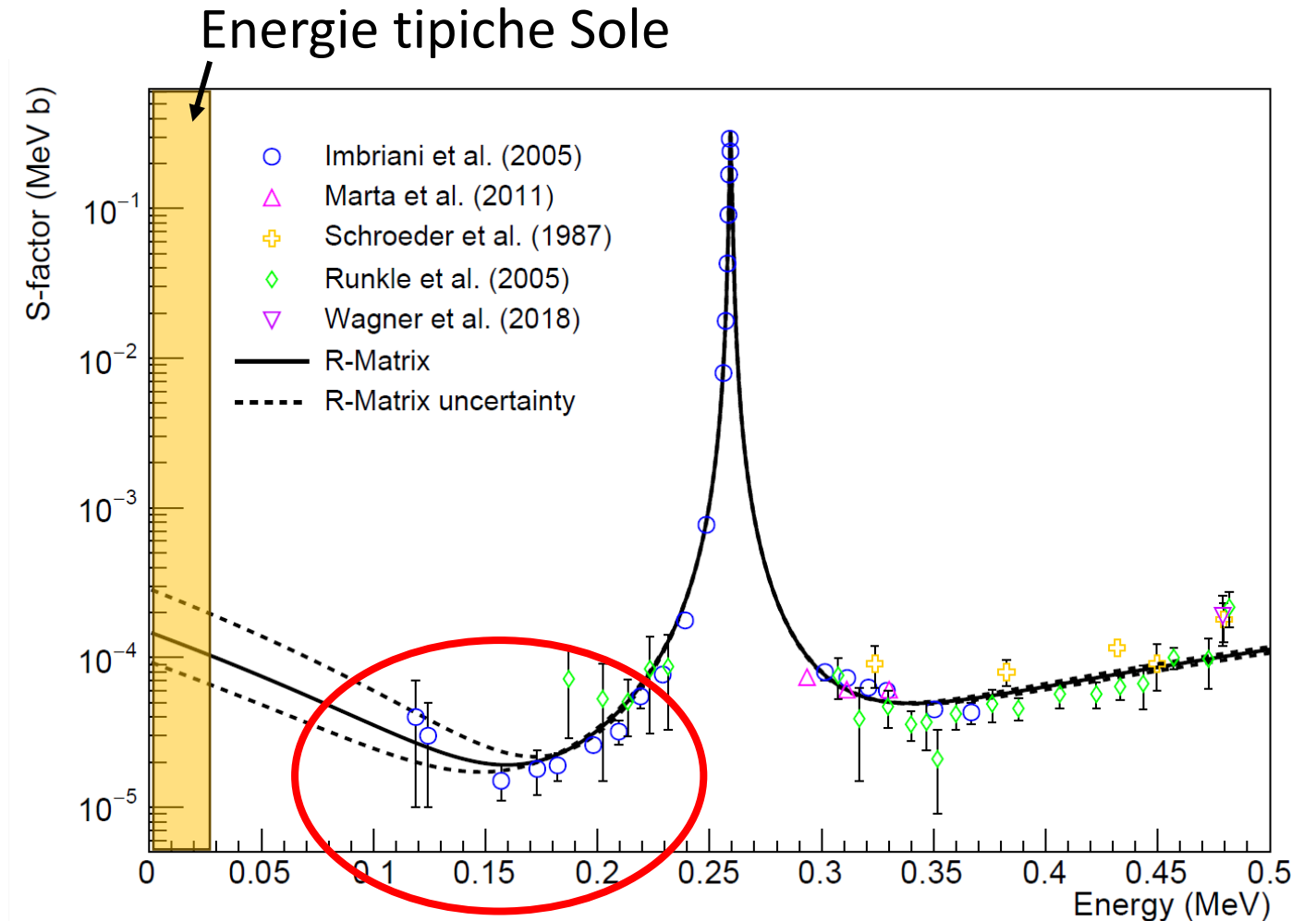
È la reazione **più lenta** del ciclo CNO, quindi ne determina il rate totale

- Influenza le stime dell'età dell'Universo fatte guardando particolari ammassi di stelle
- Determina il flusso di **neutrini solari CNO**, recentemente osservato per la prima volta da Borexino (LNGS)

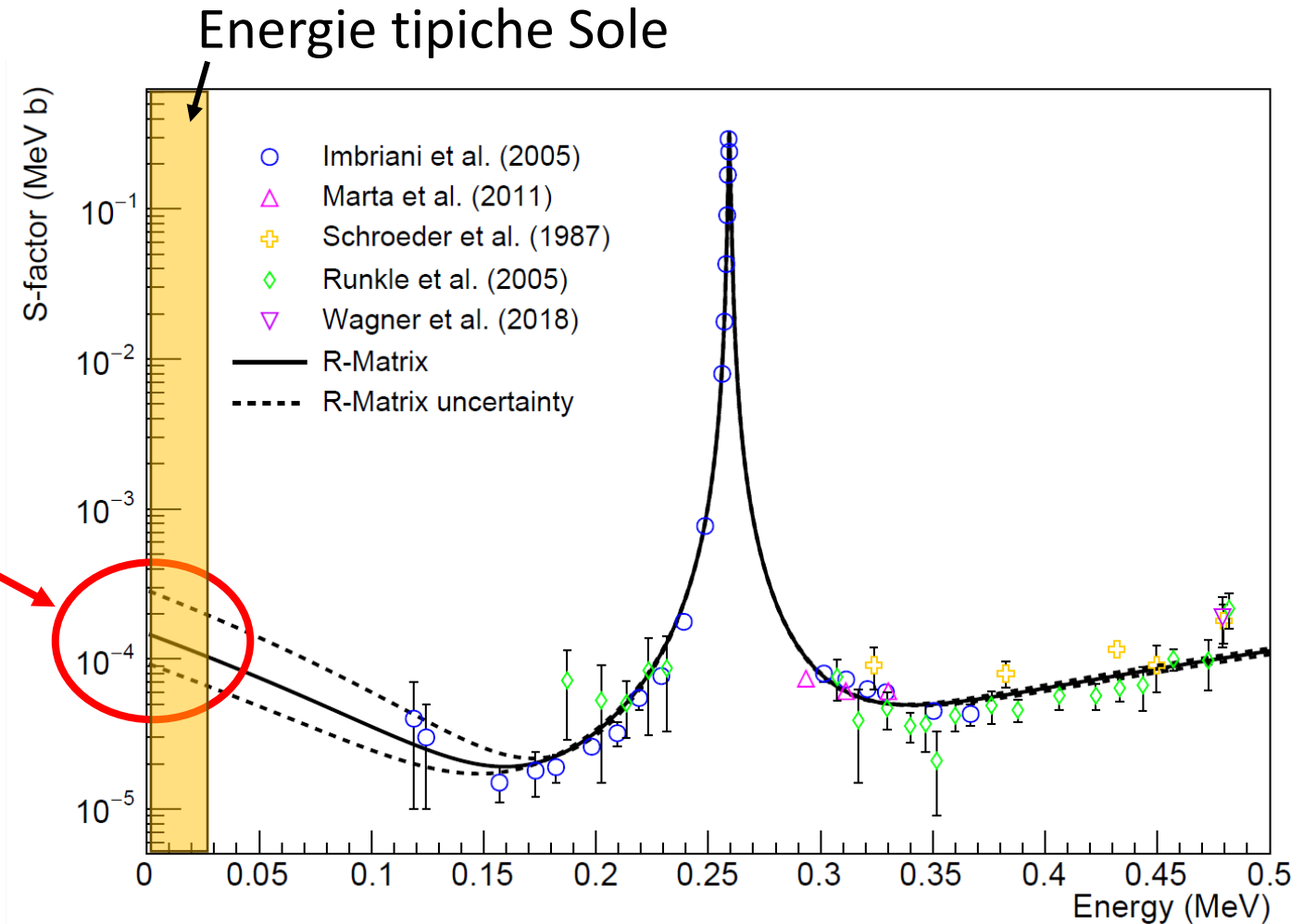
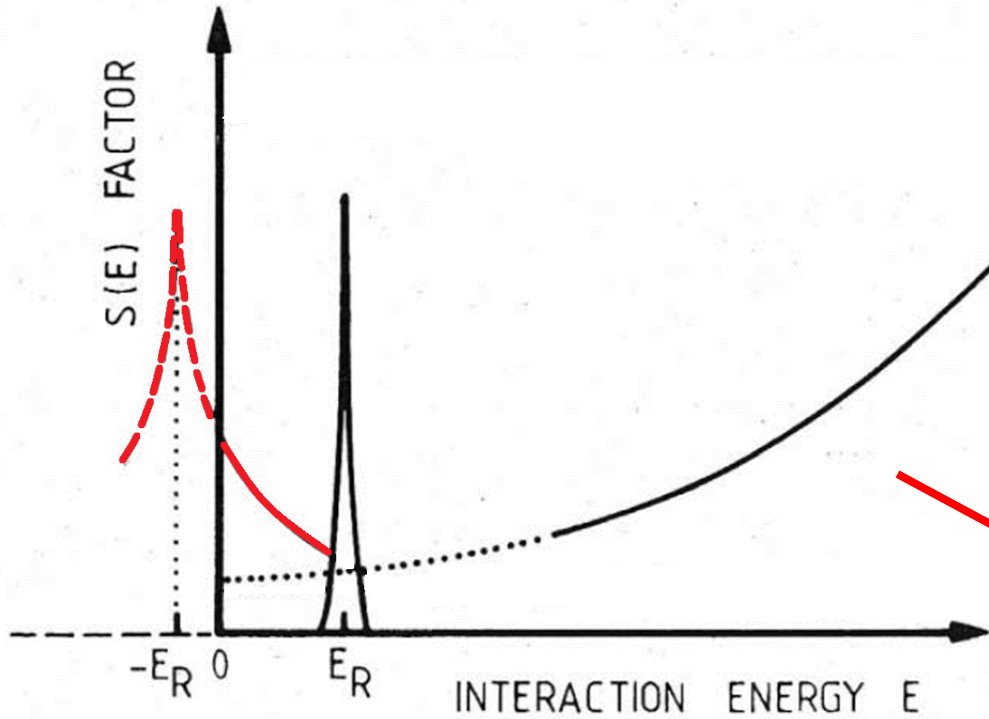


$^{14}\text{N} + \text{p} \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$: Misure Dirette

- Stima dell'età dell'Universo aumentata di **1 miliardo di anni**
- Flusso atteso di **neutrini solari CNO** ridotto di un **fattore 2**



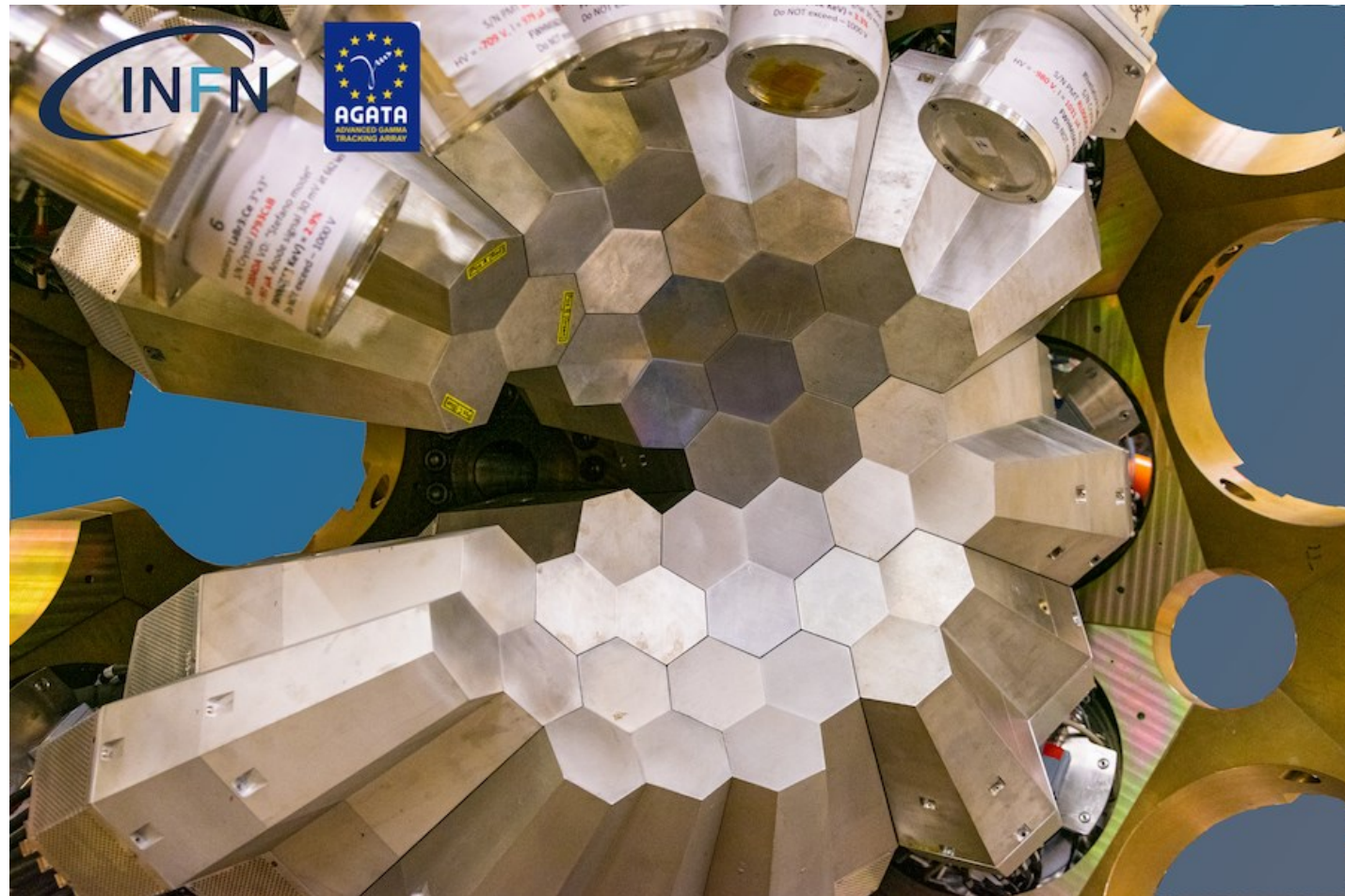
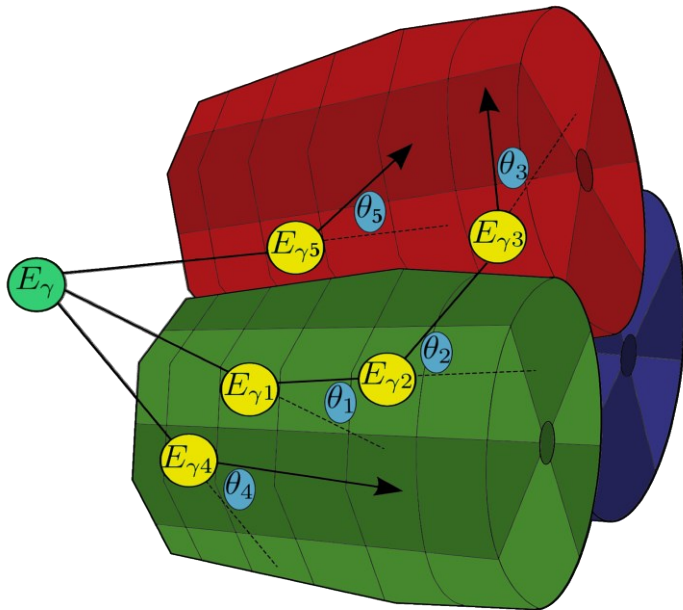
$^{14}\text{N} + \text{p} \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$: Misura INdirette



$^{14}\text{N} + p \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$: Misure INdirette

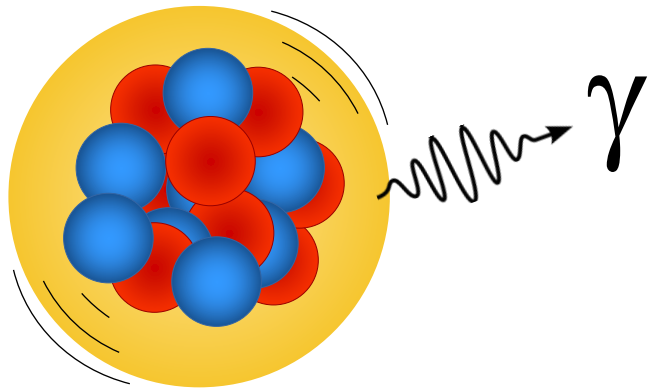
AGATA (Advanced Gamma-ray Tracking Array)

Rivelatore di raggi gamma usato per studiare le proprietà del nucleo e dei suoi stati eccitati

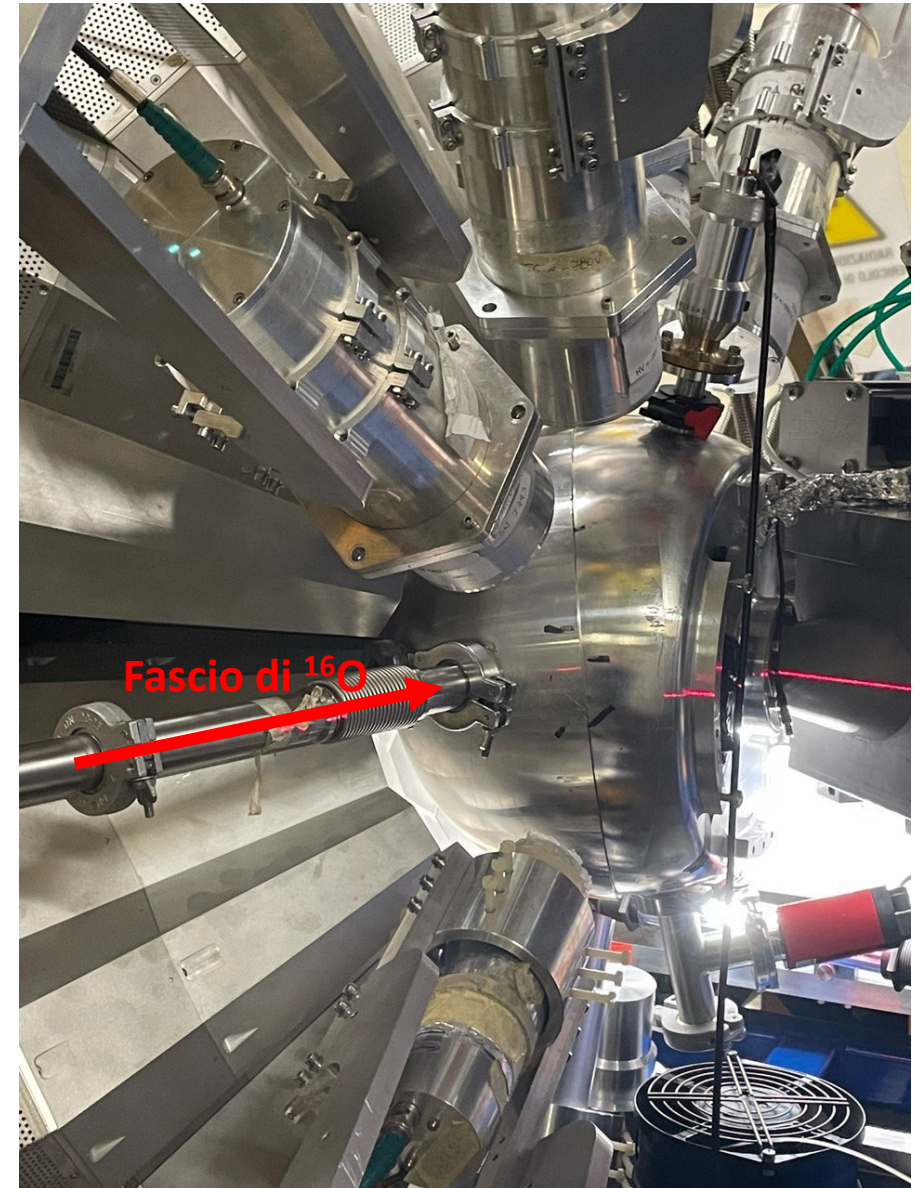


$^{14}\text{N} + \text{p} \rightarrow \gamma + ^{15}\text{O}$: Misure INdirette

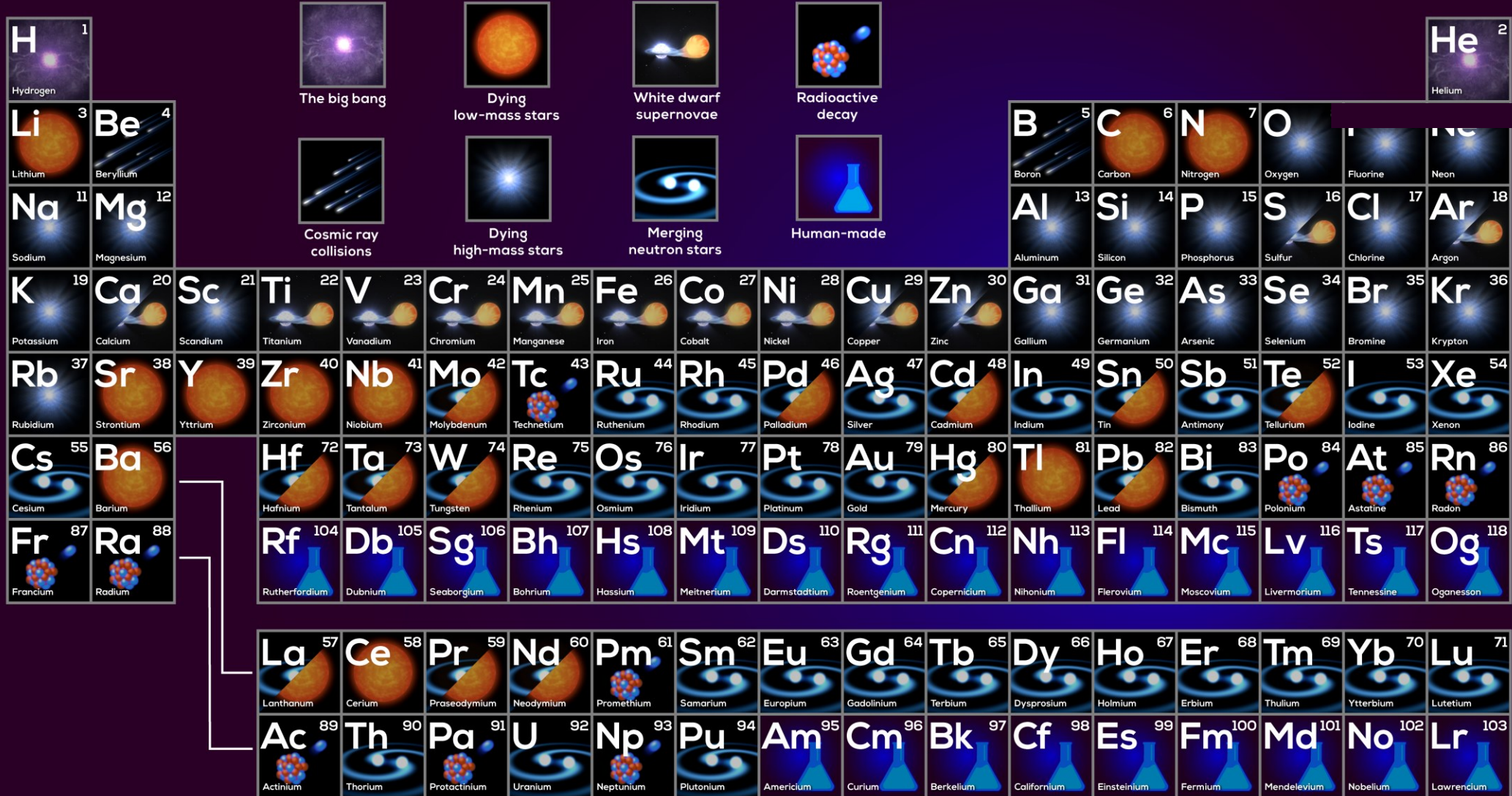
Reazione $^3\text{He}(^{16}\text{O}, \alpha)^{15}\text{O}$



Misura del tempo caratteristico di
diseccitazione del ^{15}O ,
minore di **0.000000000000000001 s**



ORIGINS OF THE ELEMENTS



A deep space photograph showing a vast field of stars and galaxies against a dark background. The stars are scattered across the frame, with some appearing as bright yellow or white points and others as faint blue or red dots. Several galaxies are visible, including a prominent one in the upper right corner and another in the lower center. The overall scene is a rich, multi-colored starfield.

«Se vuoi preparare una torta di mele a partire da zero, devi prima inventare l'Universo»

Carl Sagan