



Astrofisica Nucleare ai LNGS e l'esperimento LUNA

PID – Programma INFN per la Didattica
Laboratori Nazionali del Gran Sasso
8 aprile 2024

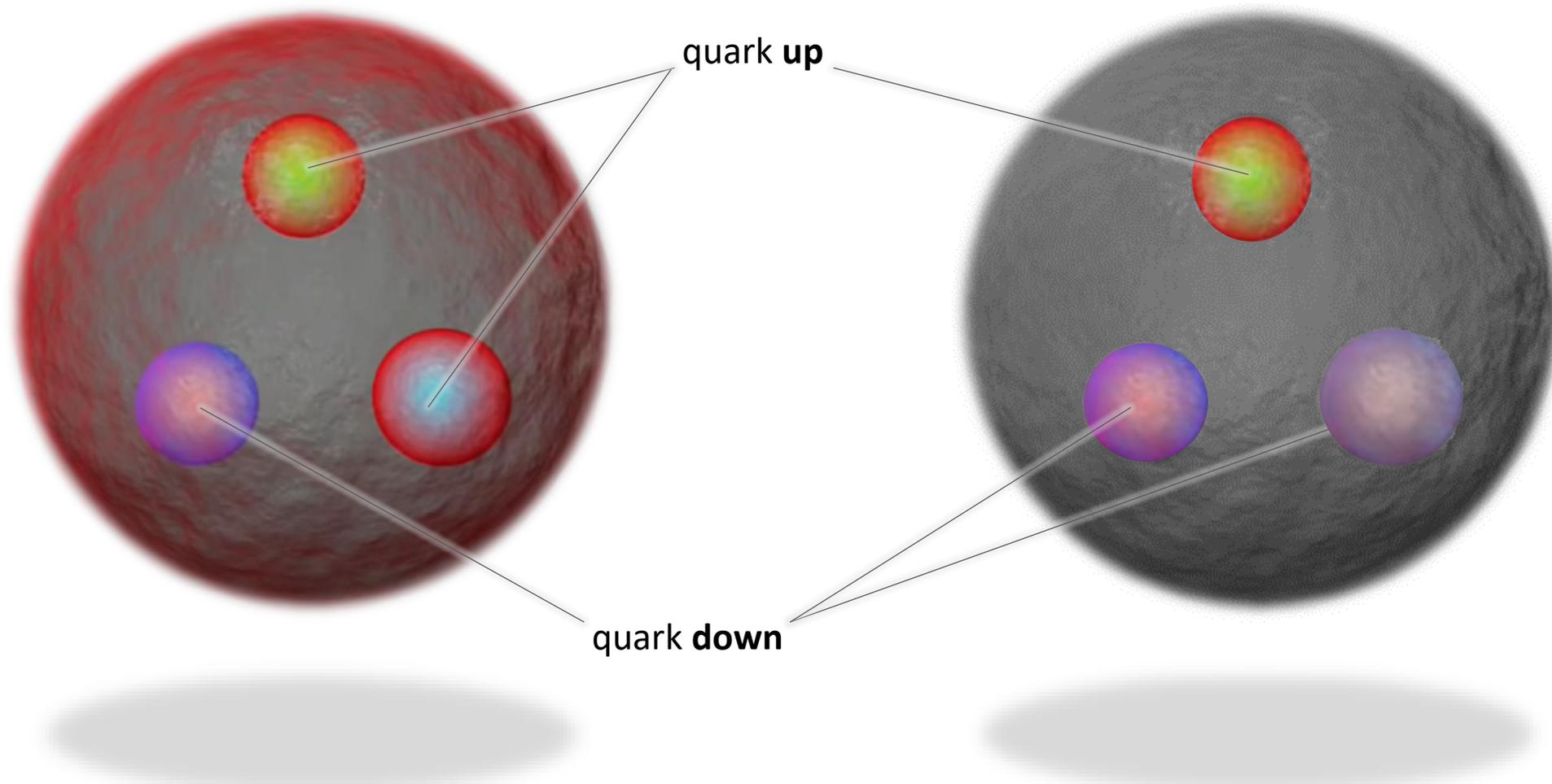
Federico Ferraro

INFN - Laboratori Nazionali del Gran Sasso



Protone

Neutrone



Elettrone



Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)	
	I	II	III	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u up	c charm	t top	\bar{u} antiup	\bar{c} anticharm	\bar{t} antitop	g gluon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	\bar{d} antidown	\bar{s} antistrange	\bar{b} antibottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	e^+ positron	$\bar{\mu}$ antimuon	$\bar{\tau}$ antitau	Z Z ⁰ boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	$\bar{\nu}_e$ electron antineutrino	$\bar{\nu}_\mu$ muon antineutrino	$\bar{\nu}_\tau$ tau antineutrino	W^+ W ⁺ boson	W^- W ⁻ boson
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$
	0	0	0	0	0	0	1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1

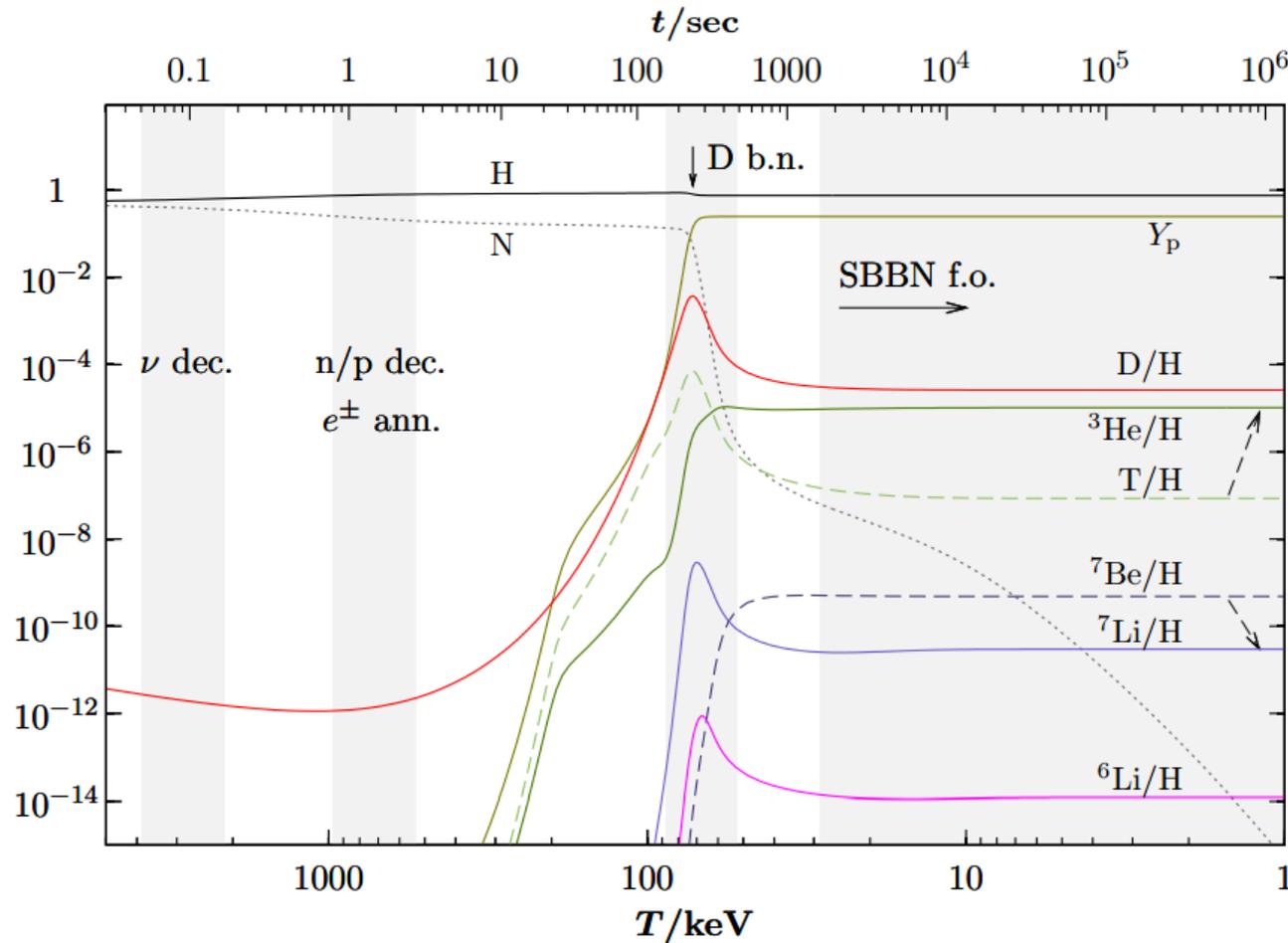
QUARKS

LEPTONS

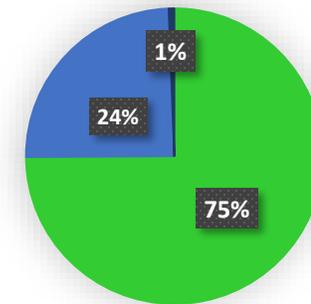
GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

La nucleosintesi primordiale e gli elementi leggeri

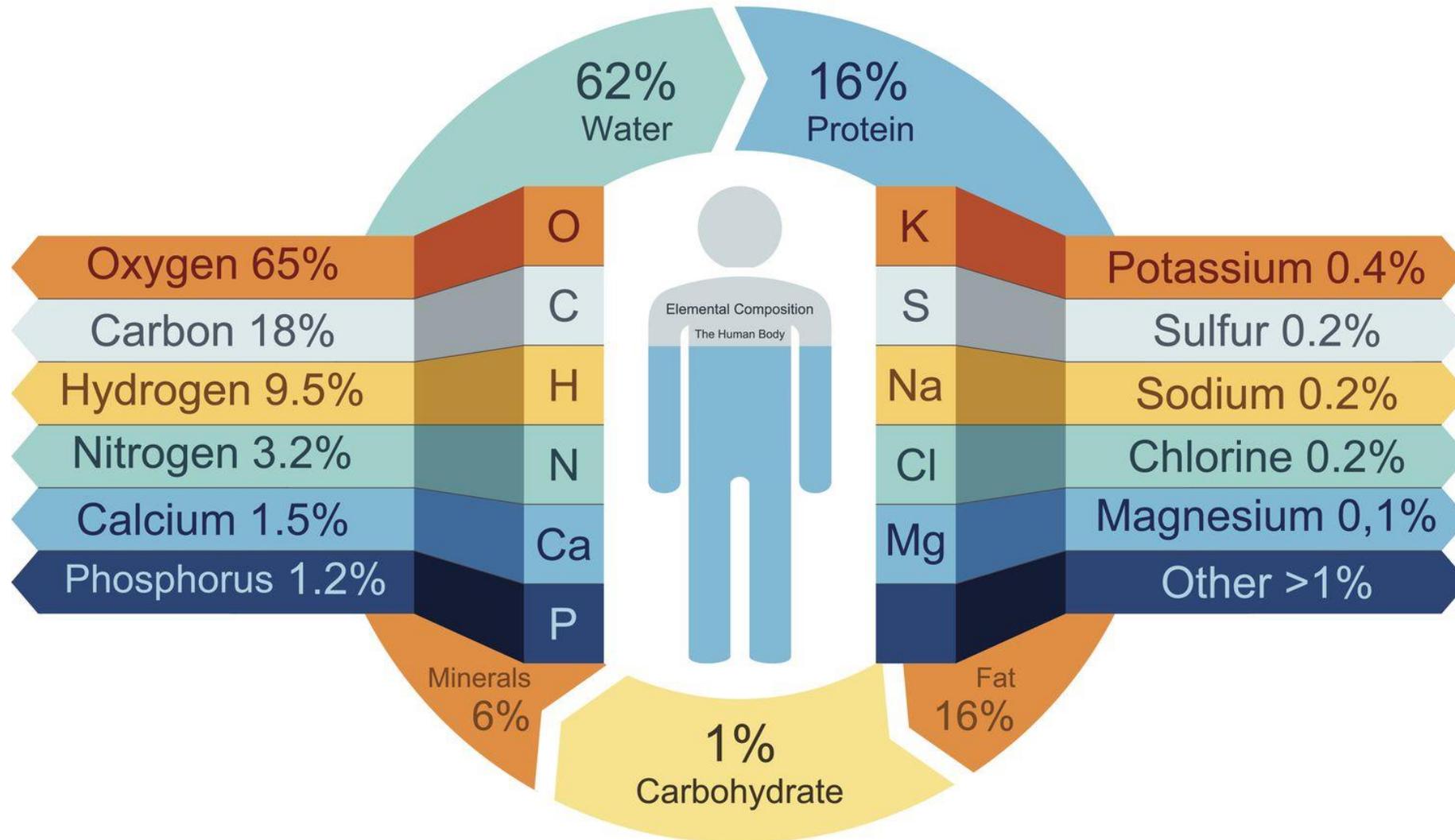


- $n \approx 0$
- $H \approx 0.75$
- ${}^2\text{H} \approx 2.5 \cdot 10^{-5}$
- ${}^4\text{He} \approx 0.25$
- ${}^3\text{He} \approx 1 \cdot 10^{-5}$
- ${}^7\text{Li} \approx 5 \cdot 10^{-10}$
- ${}^6\text{Li} \approx 7 \cdot 10^{-15}$



■ H ■ He ■ Others

THE HUMAN BODY

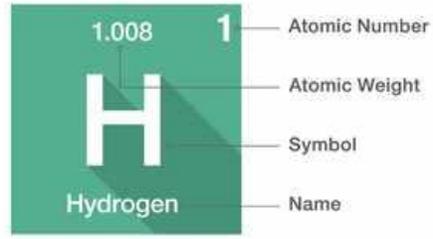


ELEMENTAL COMPOSITION

Programma INFN Docenti - 8 aprile 2024

Periodic Table of Elements

1.008 H Hydrogen																	4.003 He Helium				
6.941 Li Lithium	9.012 Be Beryllium															10.811 B Boron	12.011 C Carbon	14.007 N Nitrogen	15.999 O Oxygen	18.998 F Fluorine	20.180 Ne Neon
22.990 Na Sodium	24.305 Mg Magnesium															26.982 Al Aluminum	28.086 Si Silicon	30.974 P Phosphorus	32.066 S Sulfur	35.453 Cl Chlorine	39.948 Ar Argon
39.098 K Potassium	40.078 Ca Calcium	44.956 Sc Scandium	47.867 Ti Titanium	50.942 V Vanadium	51.998 Cr Chromium	54.938 Mn Manganese	55.845 Fe Iron	58.933 Co Cobalt	58.933 Ni Nickel	63.546 Cu Copper	65.38 Zn Zinc	69.723 Ga Gallium	72.631 Ge Germanium	74.922 As Arsenic	78.971 Se Selenium	79.904 Br Bromine	84.798 Kr Krypton				
84.468 Rb Rubidium	87.62 Sr Strontium	88.906 Y Yttrium	91.224 Zr Zirconium	92.906 Nb Niobium	95.95 Mo Molybdenum	98.907 Tc Technetium	101.07 Ru Ruthenium	102.906 Rh Rhodium	106.42 Pd Palladium	107.868 Ag Silver	112.411 Cd Cadmium	114.818 In Indium	118.710 Sn Tin	121.760 Sb Antimony	127.6 Te Tellurium	126.904 I Iodine	131.294 Xe Xenon				
132.905 Cs Cesium	137.328 Ba Barium	57-71		178.49 Hf Hafnium	180.948 Ta Tantalum	183.84 W Tungsten	186.207 Re Rhenium	186.207 Os Osmium	197.227 Ir Iridium	195.085 Pt Platinum	196.967 Au Gold	200.592 Hg Mercury	204.383 Tl Thallium	207.2 Pb Lead	208.980 Bi Bismuth	208.980 Po Polonium	209 At Astatine	222.018 Rn Radon			
223.020 Fr Francium	226.025 Ra Radium	89-103		(261) Rf Rutherfordium	(262) Db Dubnium	(263) Sg Seaborgium	(264) Bh Bohrium	(265) Hs Hassium	(266) Mt Meitnerium	(267) Ds Darmstadtium	(268) Rg Roentgenium	(272) Cn Copernicium	Unknown 113 Uut Ununtrium	(284) Fl Flerovium	Unknown 115 Uup Ununpentium	(286) Lv Livermorium	Unknown 117 Uus Ununseptium	Unknown 118 Uuo Ununoctium			



■ Alkali Metal ■ Metalloid ■ Lanthanide
■ Alkaline Earth Metal ■ Polyatomic Nonmetal ■ Actinide
■ Transition Metal ■ Diatomic Nonmetal ■ Unknown Properties
■ Post-Transition Metal ■ Noble Gas

Lanthanide Series	138.905 La Lanthanum	140.116 Ce Cerium	140.908 Pr Praseodymium	144.243 Nd Neodymium	144.913 Pm Promethium	150.36 Sm Samarium	151.964 Eu Europium	157.25 Gd Gadolinium	158.925 Tb Terbium	162.500 Dy Dysprosium	164.930 Ho Holmium	167.259 Er Erbium	168.934 Tm Thulium	173.055 Yb Ytterbium	174.967 Lu Lutetium
Actinide Series	227.028 Ac Actinium	232.038 Th Thorium	231.036 Pa Protactinium	238.029 U Uranium	237.048 Np Neptunium	244.064 Pu Plutonium	243.061 Am Americium	247.070 Cm Curium	247.070 Bk Berkelium	251.080 Cf Californium	(254) Es Einsteinium	257.095 Fm Fermium	258.1 Md Mendelevium	259.101 No Nobelium	(262) Lr Lawrencium

Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			Interactions / force carriers (elementary bosons)	
	I	II	III	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	ū antiup	c̄ anticharm	t̄ antitop	g gluon	H higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
LEPTONS	e electron	μ muon	τ tau	e⁺ positron	μ̄ antimuon	τ̄ antitau	γ photon	Z Z ⁰ boson
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$
	-1	-1	-1	1	1	1	0	1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	ν̄_e electron antineutrino	ν̄_μ muon antineutrino	ν̄_τ tau antineutrino	W⁺ W ⁺ boson	W⁻ W ⁻ boson
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 182 \text{ MeV}/c^2$	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 182 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$
	0	0	0	0	0	0	1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1

GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

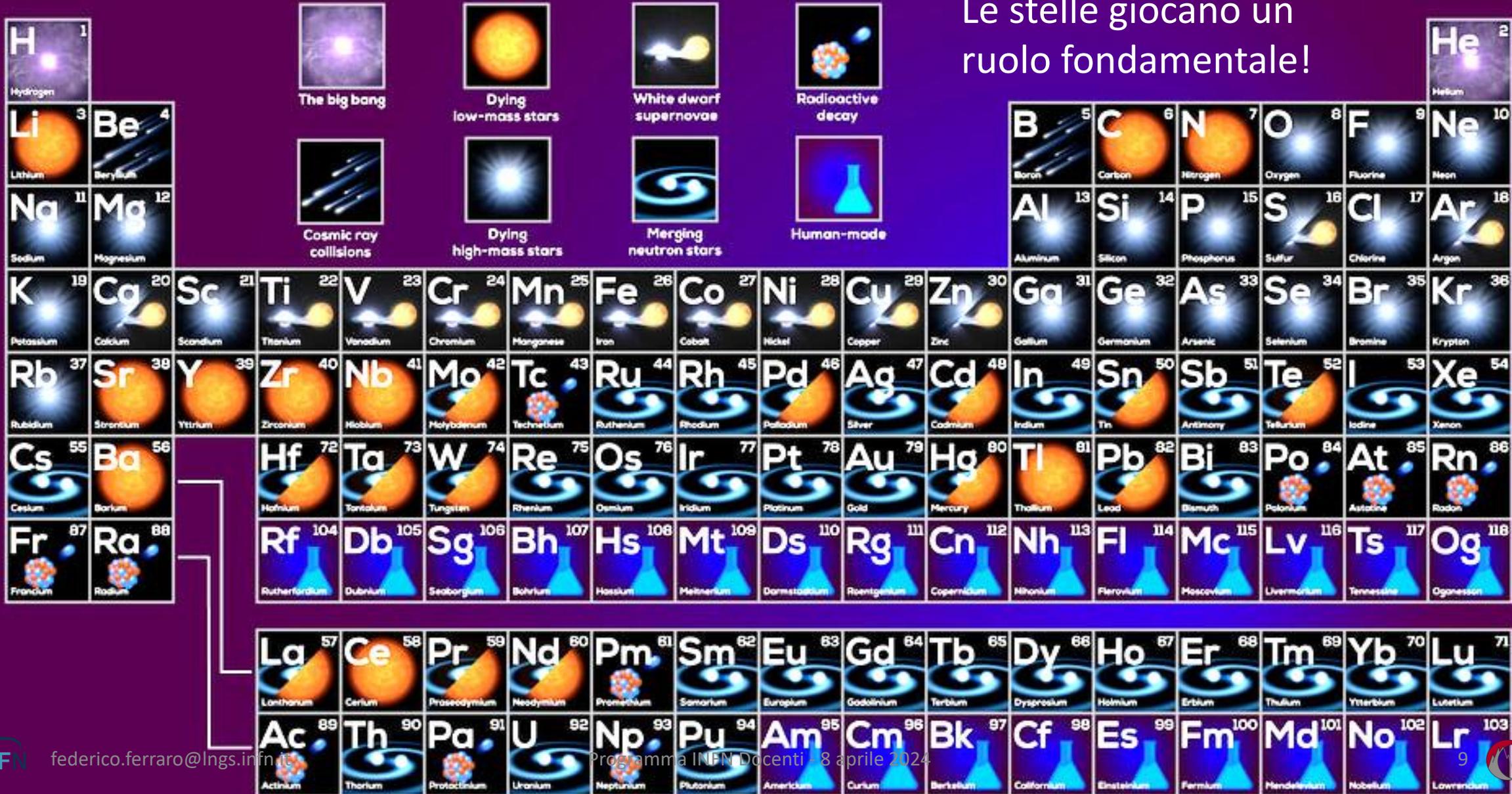
Periodic Table of Elements

Legend for Hydrogen (H):
 1,008 — Atomic Number
 1 — Atomic Weight
 H — Symbol
 Hydrogen — Name

Color-coded categories:
 Alkali Metal (Red), Alkaline Earth Metal (Orange), Transition Metal (Yellow), Post-Transition Metal (Light Green), Metalloid (Green), Polyatomic Nonmetal (Dark Green), Chalcogen (Blue), Halogen (Light Blue), Noble Gas (Purple), Lanthanide (Brown), Actinide (Dark Blue), Unknown Properties (Grey).



ORIGINS OF THE ELEMENTS



Le stelle giocano un ruolo fondamentale!

Stelle

enormi masse di gas
temperatura estremamente alta
brillano di luce propria
tenute insieme dalla forza di gravità

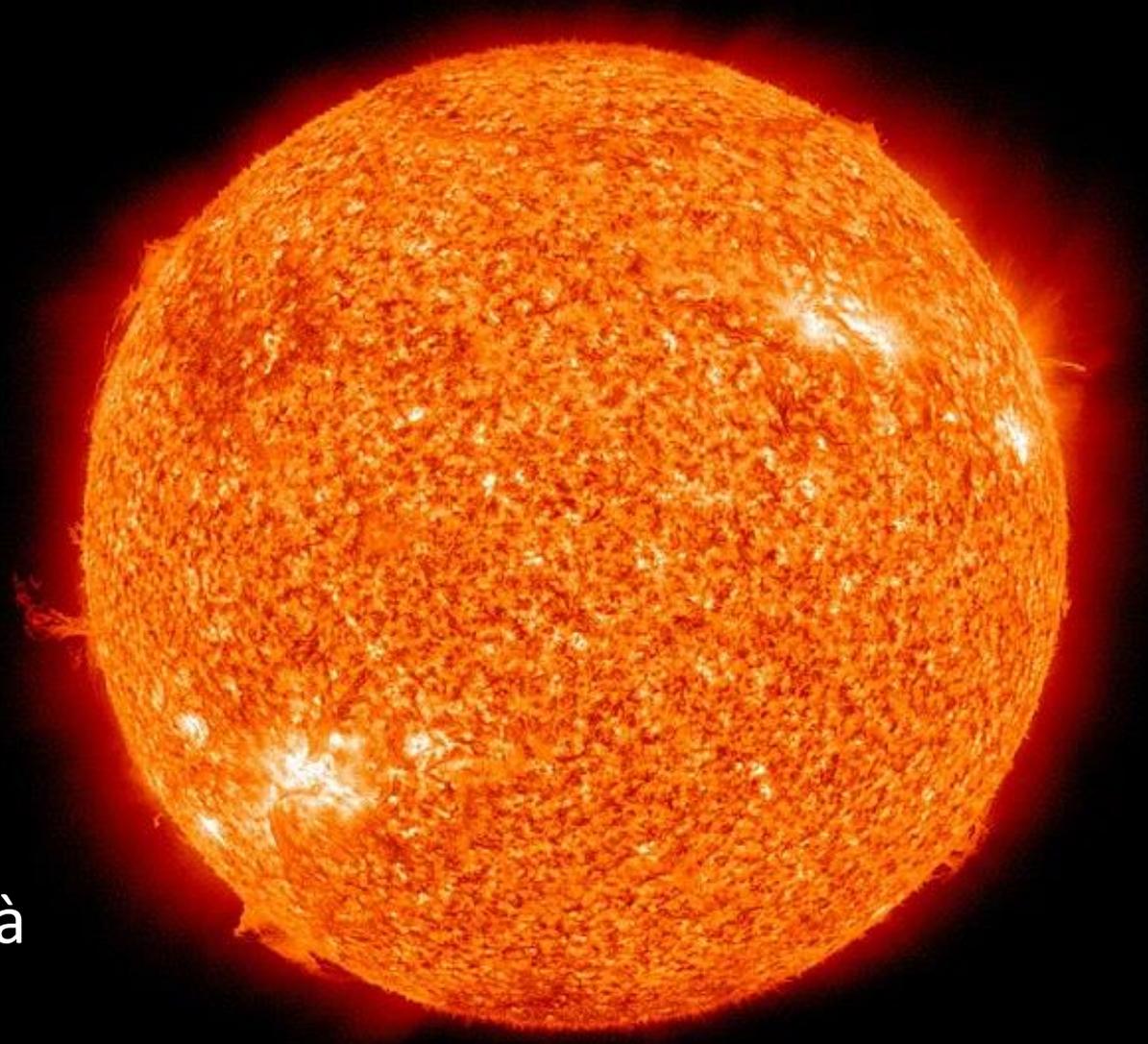


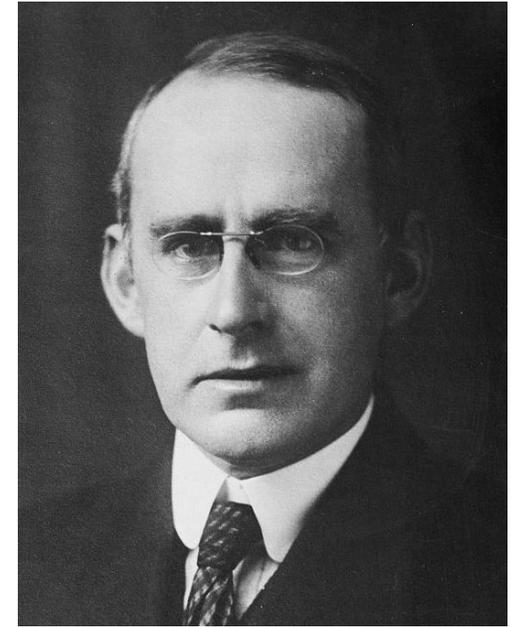
Immagine a falsi colori del Sole ottenuta nello spettro ultravioletto estremo (NASA/SDO).

Perché le stelle brillano?

1920

Arthur Eddington

“le stelle producono energia grazie a **reazioni di fusione nucleare**”



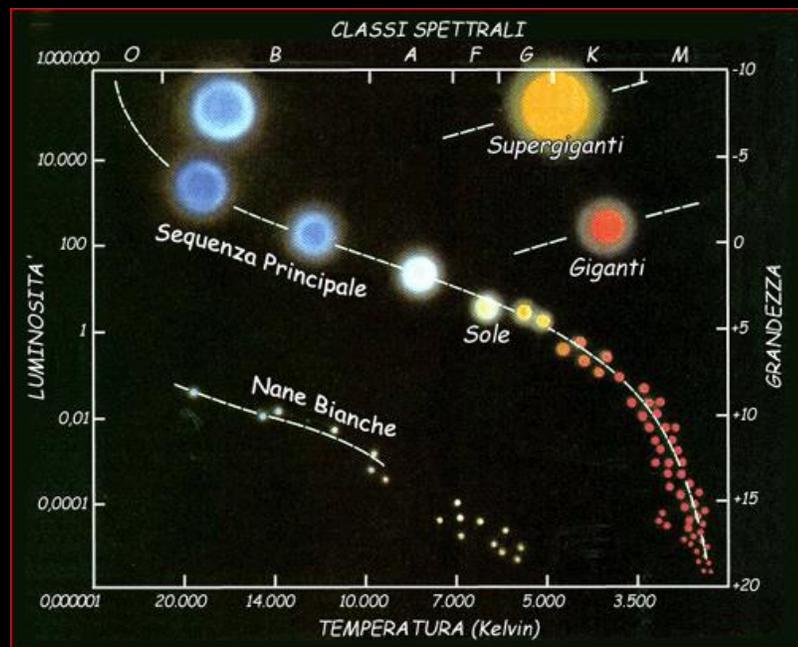
1939

Hans Bethe

“le sequenze di reazioni nucleari responsabili della produzione di energia sono la **catena pp** e il **ciclo CN**”



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

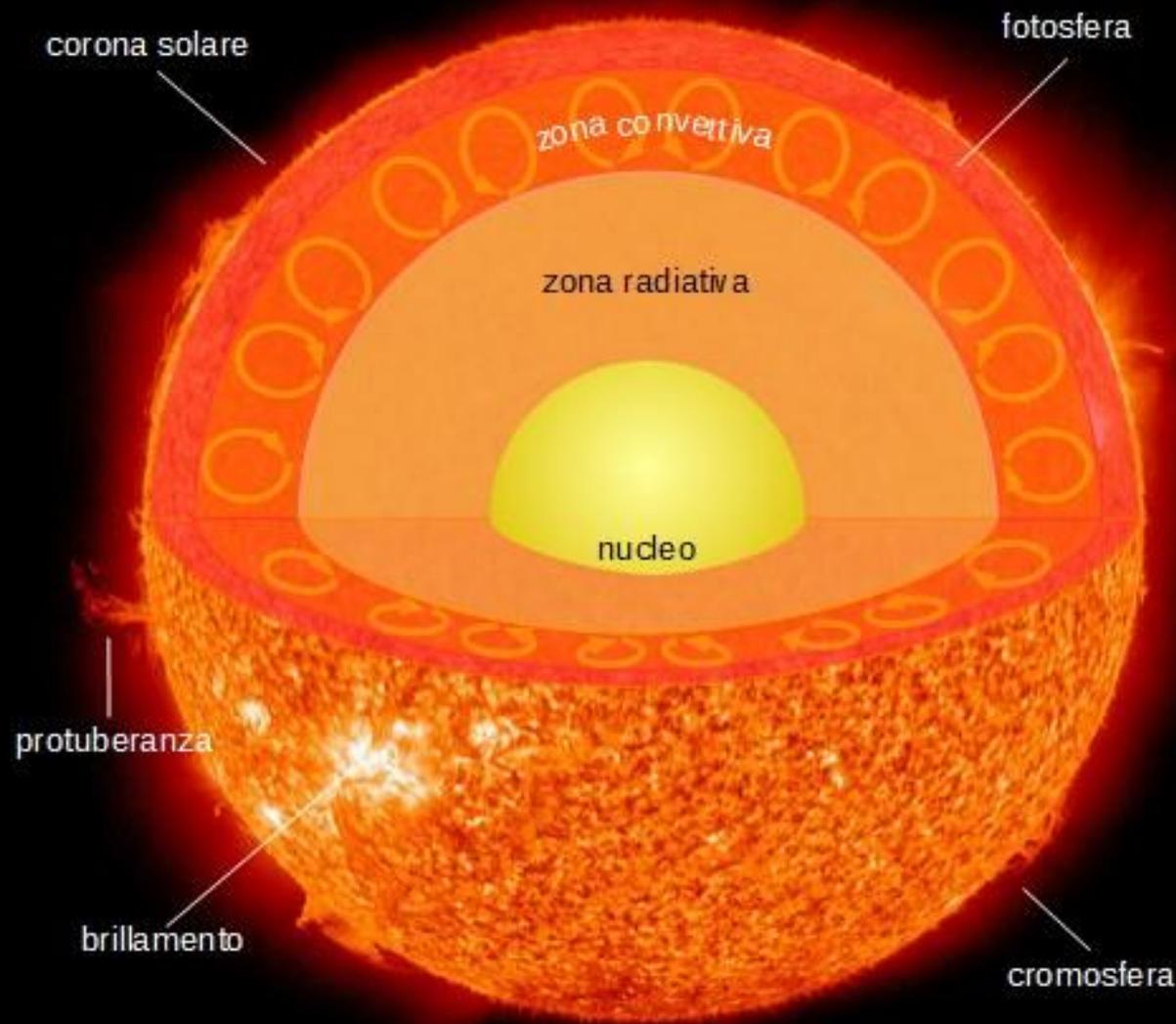
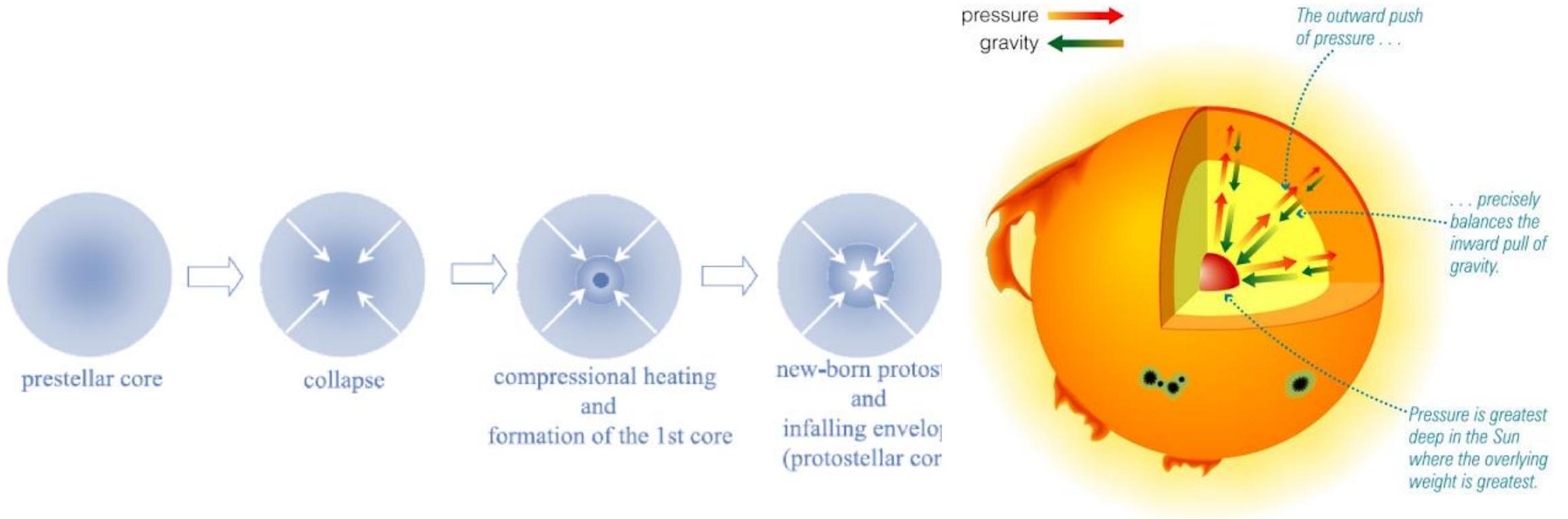
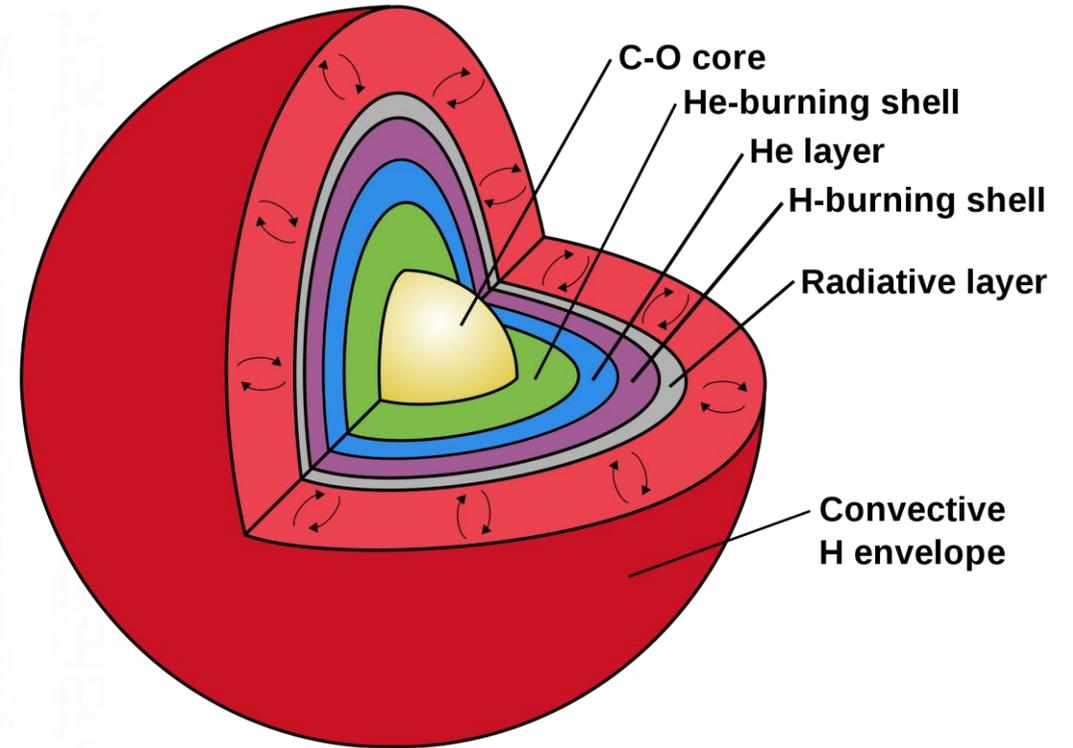
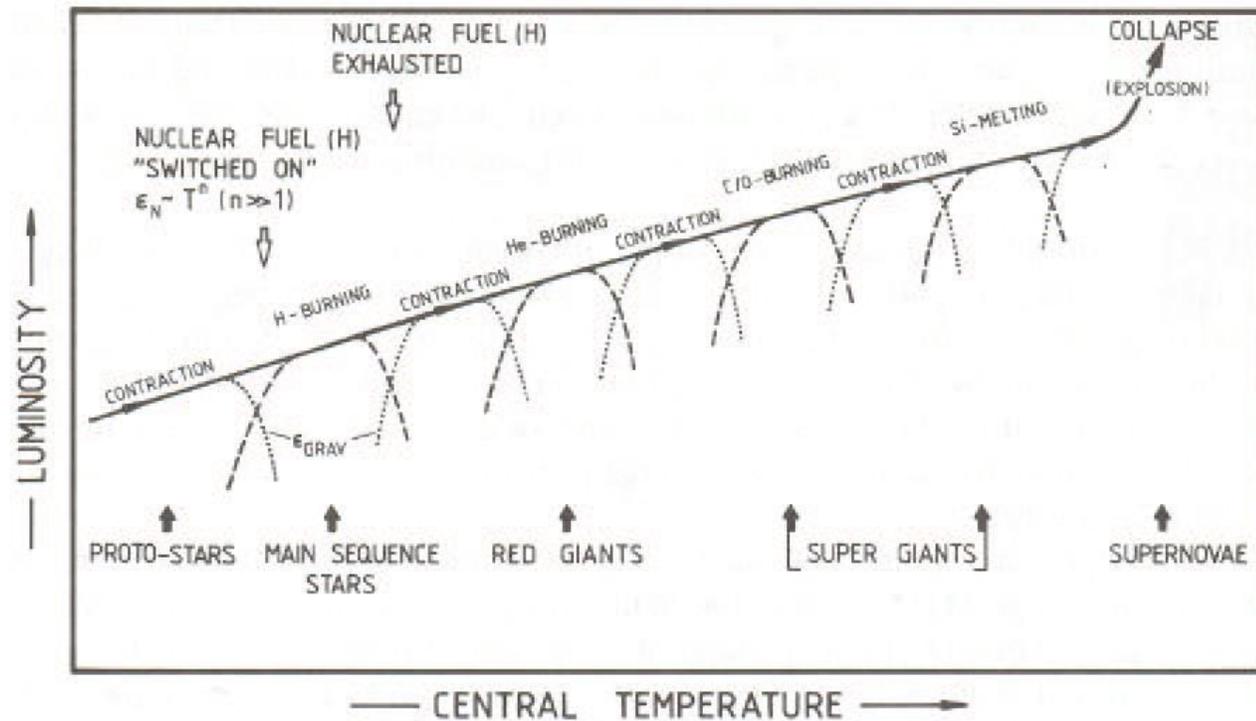


Immagine a falsi colori del Sole ottenuta nello spettro ultravioletto estremo (NASA/SDO).

Come si formano le stelle? Come funzionano?



Come si evolvono le stelle massicce



Il ciclo di vita delle stelle

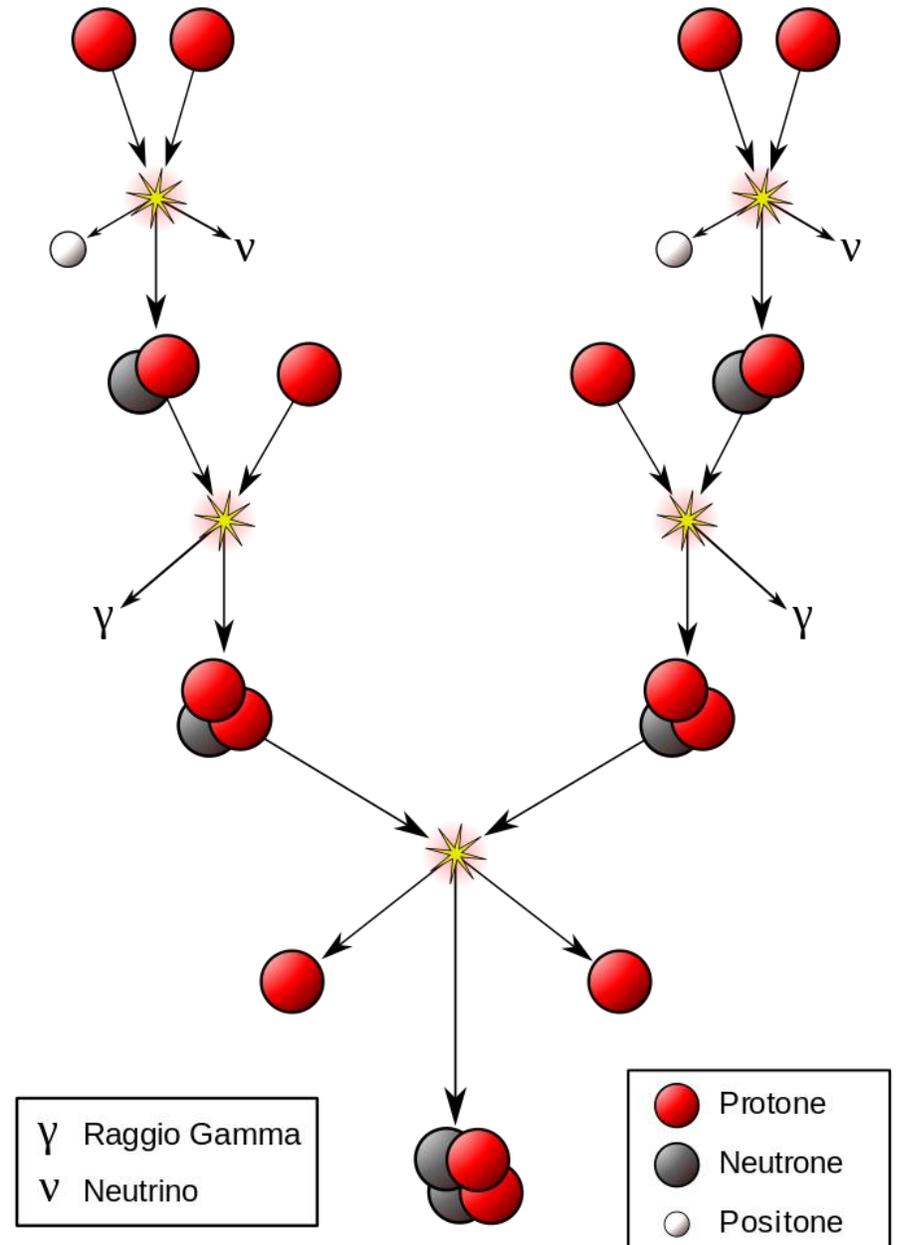


Catena pp

(protone-protone)

Sequenza di reazioni nucleari che complessivamente:

- trasforma 4 nuclei di H in un nucleo di He
- produce **energia**
- produce **particelle**

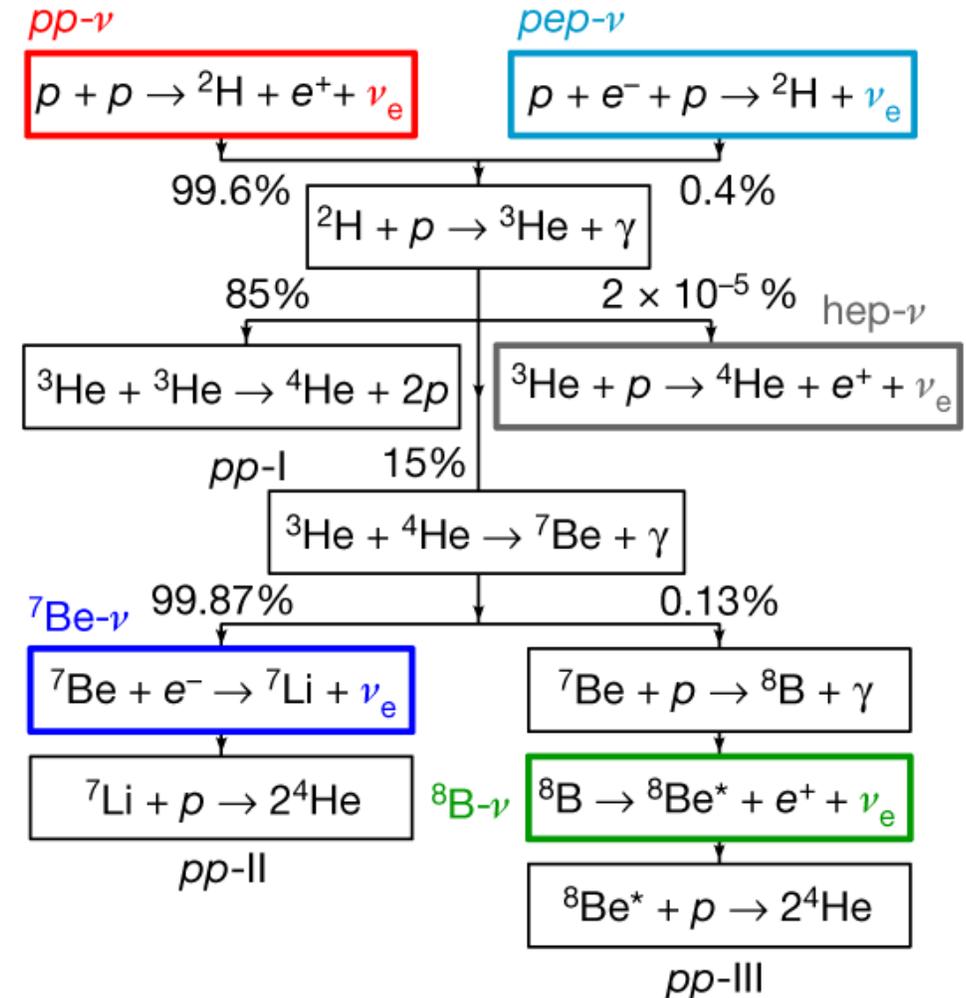


Catena pp

(protone-protone)

Sequenza di reazioni nucleari che complessivamente:

- trasforma 4 nuclei di H in un nucleo di He
- produce **energia**
- produce **particelle**

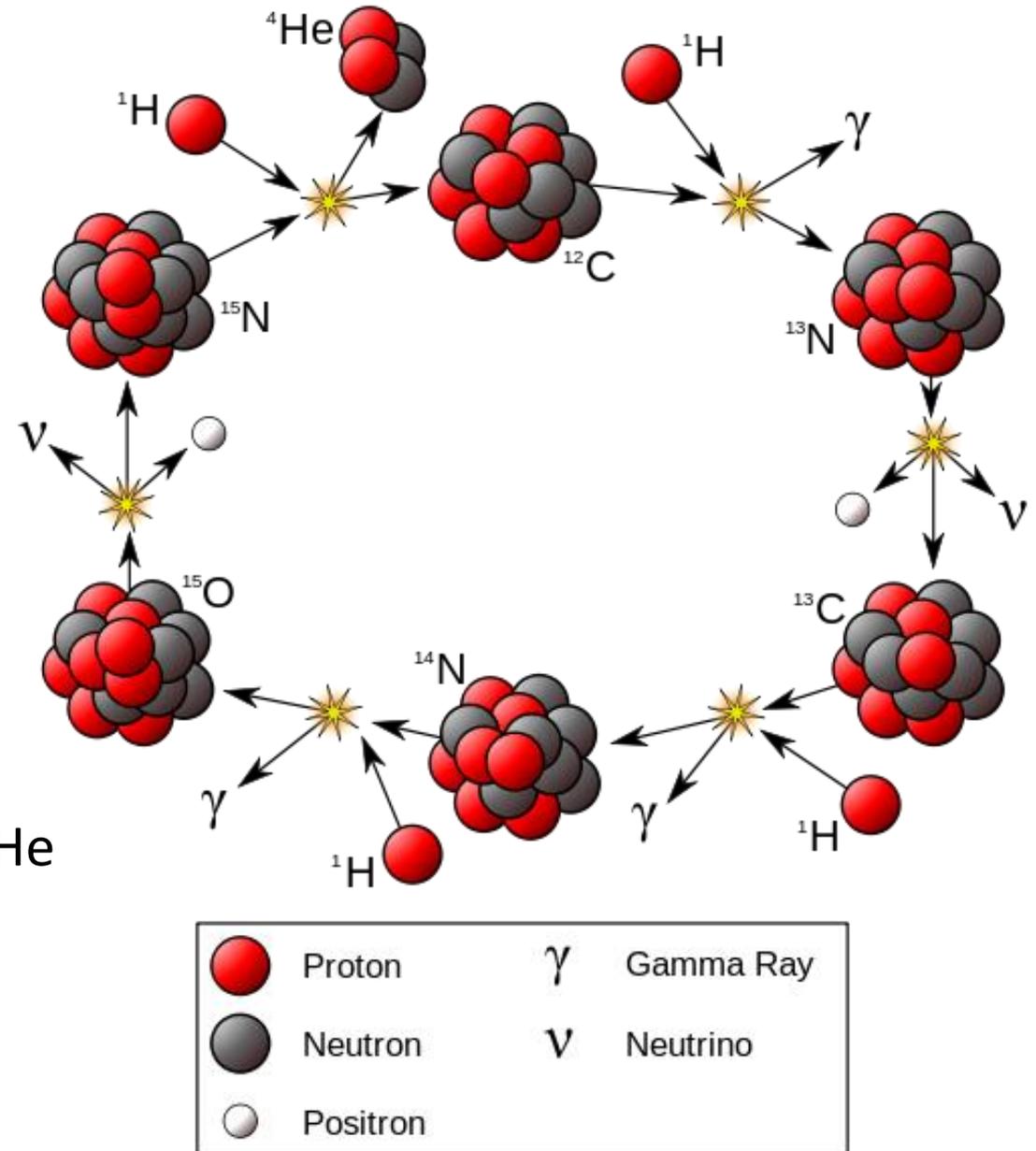


Ciclo CNO

(carbonio-azoto-ossigeno)

Sequenza di reazioni nucleari che complessivamente:

- trasforma 4 nuclei di H in un nucleo di He
- produce **energia**
- produce **particelle**

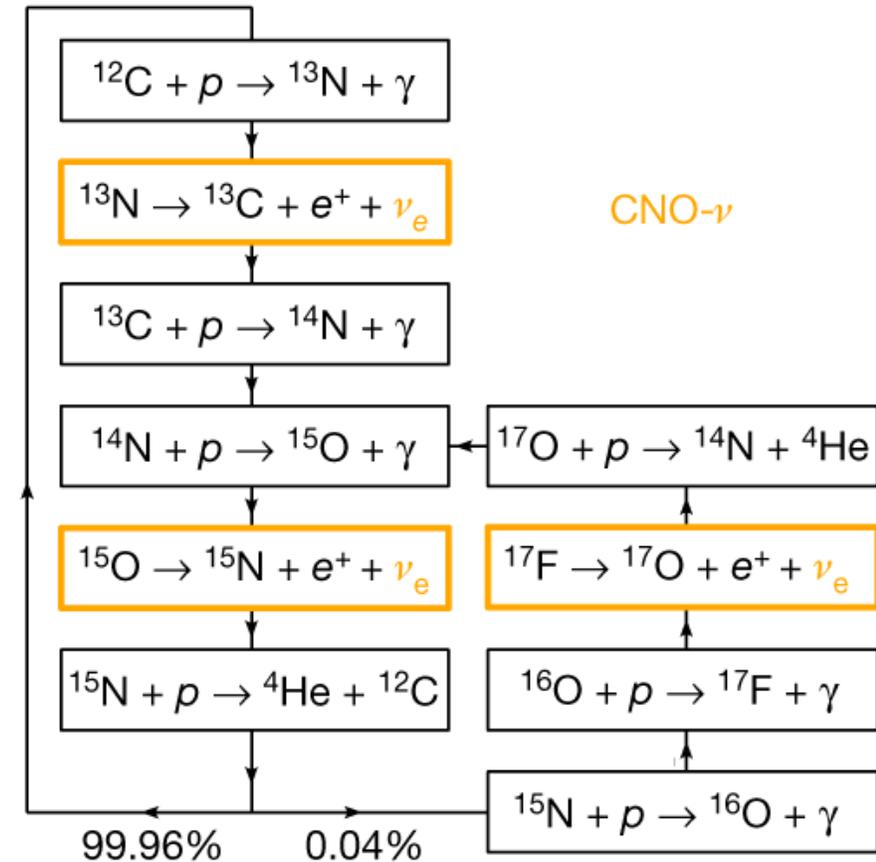


Ciclo CNO

(carbonio-azoto-ossigeno)

Sequenza di reazioni nucleari che complessivamente:

- trasforma 4 nuclei di H in un nucleo di He
- produce **energia**
- produce **particelle**



Per studiare le reazioni nucleari dobbiamo conoscere la **sezione d'urto**

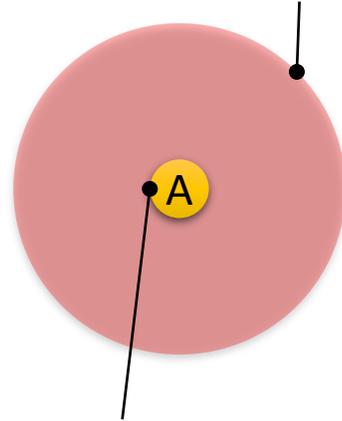
La sezione d'urto è una misura della probabilità che una interazione possa avvenire, espressa come un'area efficace che una particella bersaglio espone alla particella proiettile

- Esistono diversi tipi di interazione
- Ogni interazione ha la propria sezione d'urto
- La sezione d'urto caratterizza il modo in cui ciascun tipo di bersaglio interagisce con ciascun tipo di proiettile



nucleo A

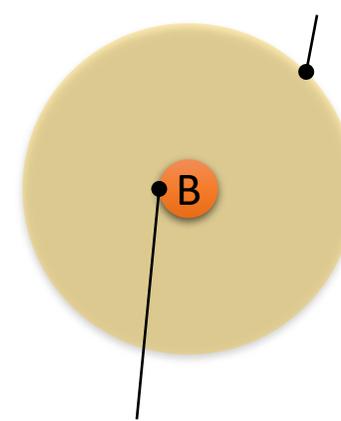
area, attorno al nucleo A, nella quale il passaggio del nucleo B dà luogo ad una interazione **repulsiva**



area, attorno al nucleo A, nella quale il passaggio del nucleo B dà luogo ad una interazione **attrattiva**

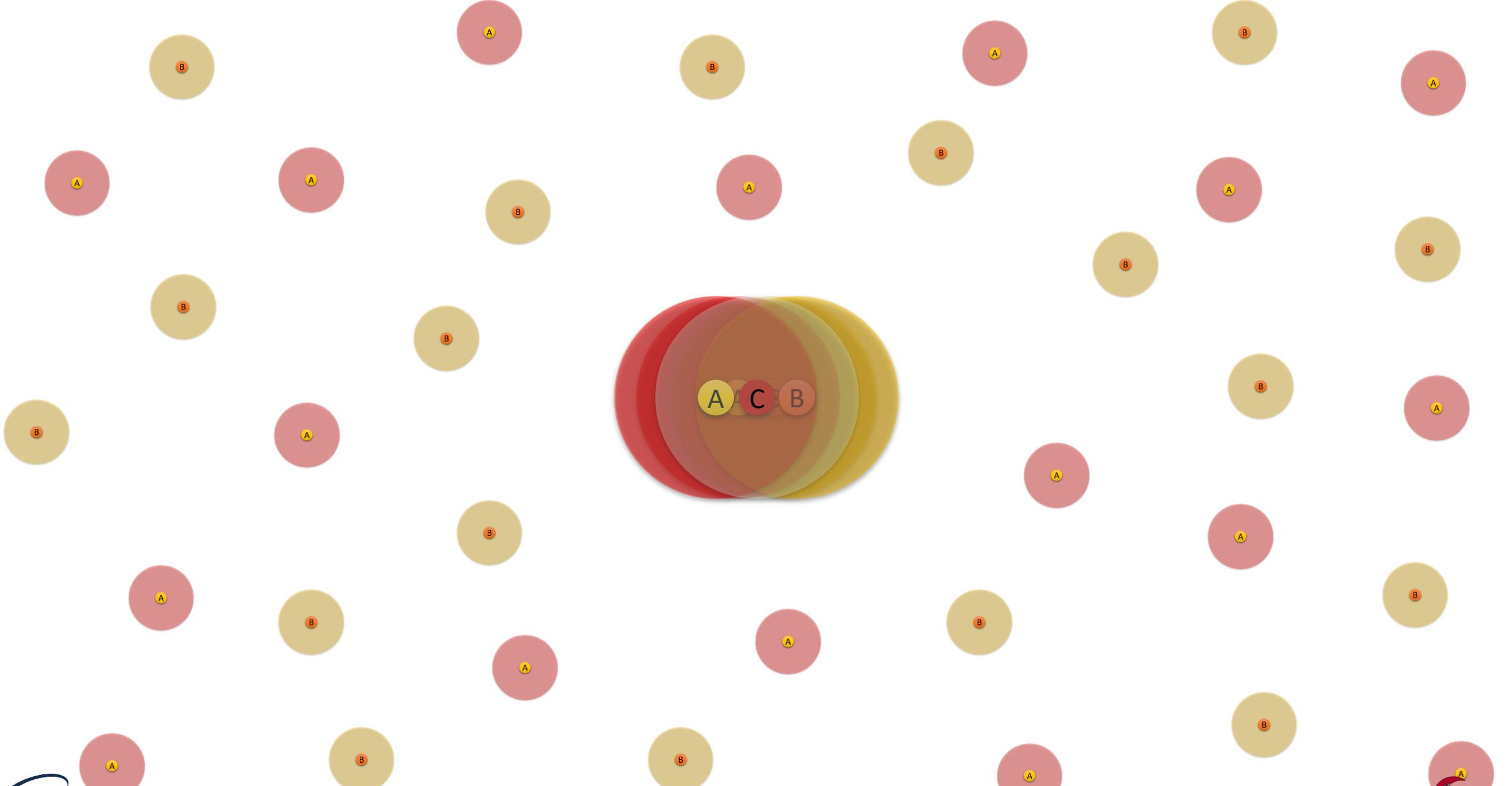
nucleo B

area, attorno al nucleo B, nella quale il passaggio del nucleo A dà luogo ad una interazione **repulsiva**

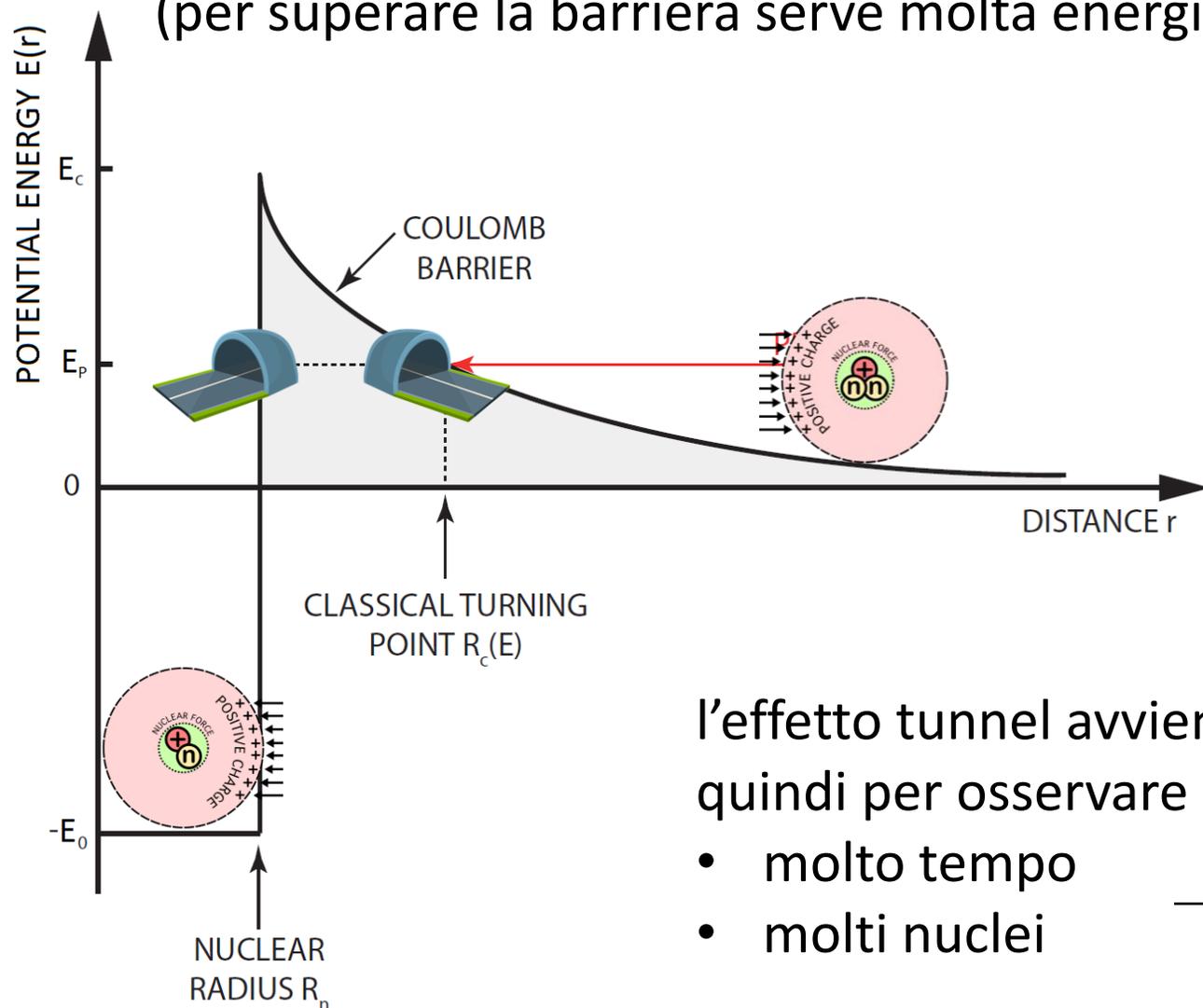


area, attorno al nucleo B, nella quale il passaggio del nucleo A dà luogo ad una interazione **attrattiva**

Una delle possibili interazioni (molto rara) è la fusione: $A + B \rightarrow C$



i nuclei sono carichi positivamente, quindi esiste una **barriera elettrostatica** (per superare la barriera serve molta energia)



se li avviciniamo abbastanza subentra l'**effetto tunnel**

la barriera può essere attraversata (invece che sormontata) e i due nuclei si fondono

l'effetto tunnel avviene con **bassissima probabilità**, quindi per osservare uno di questi processi servono:

- molto tempo
- molti nuclei

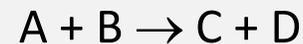
→ **stelle**

Come avvengono queste reazioni nelle stelle?

L'energia dei nuclei in un plasma segue la **distribuzione di Maxwell-Boltzmann**

la **sezione d'urto** decresce più che esponenzialmente al decrescere dell'energia

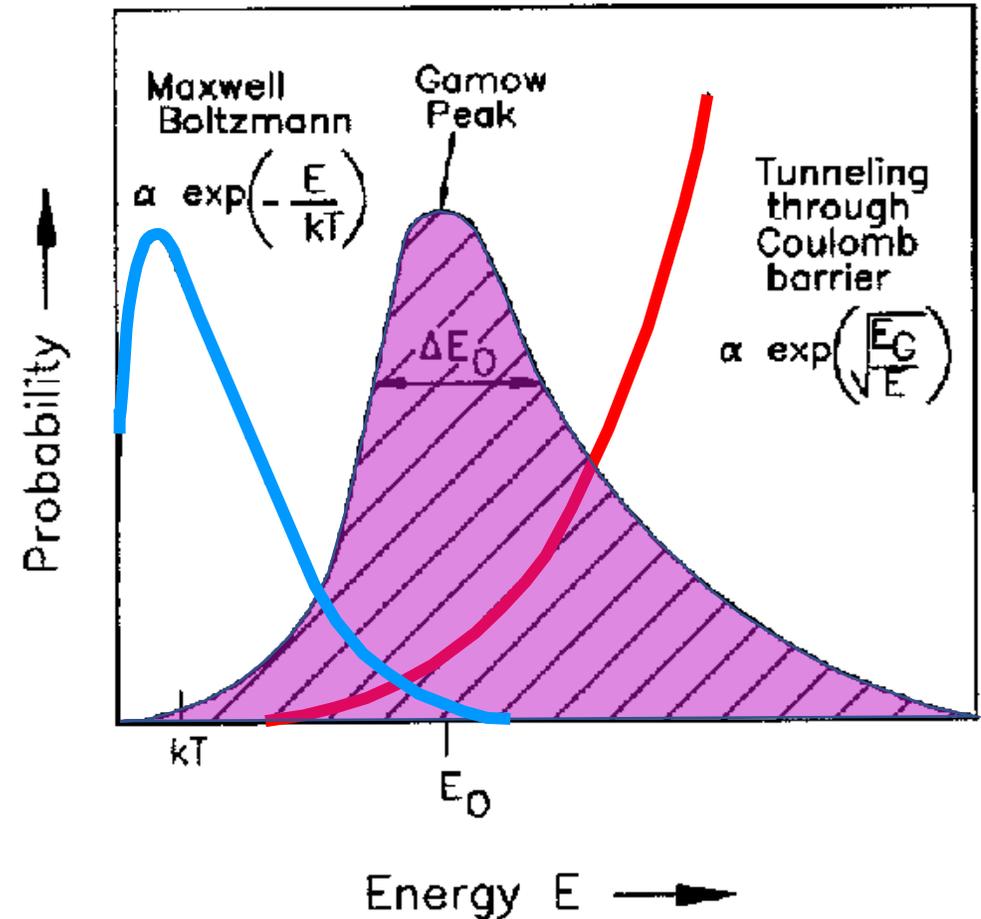
consideriamo una reazione



il tasso di reazione è dato da

$$\langle r \rangle = N_A N_B \int_0^{\infty} \phi(v) \sigma(v) v dv$$

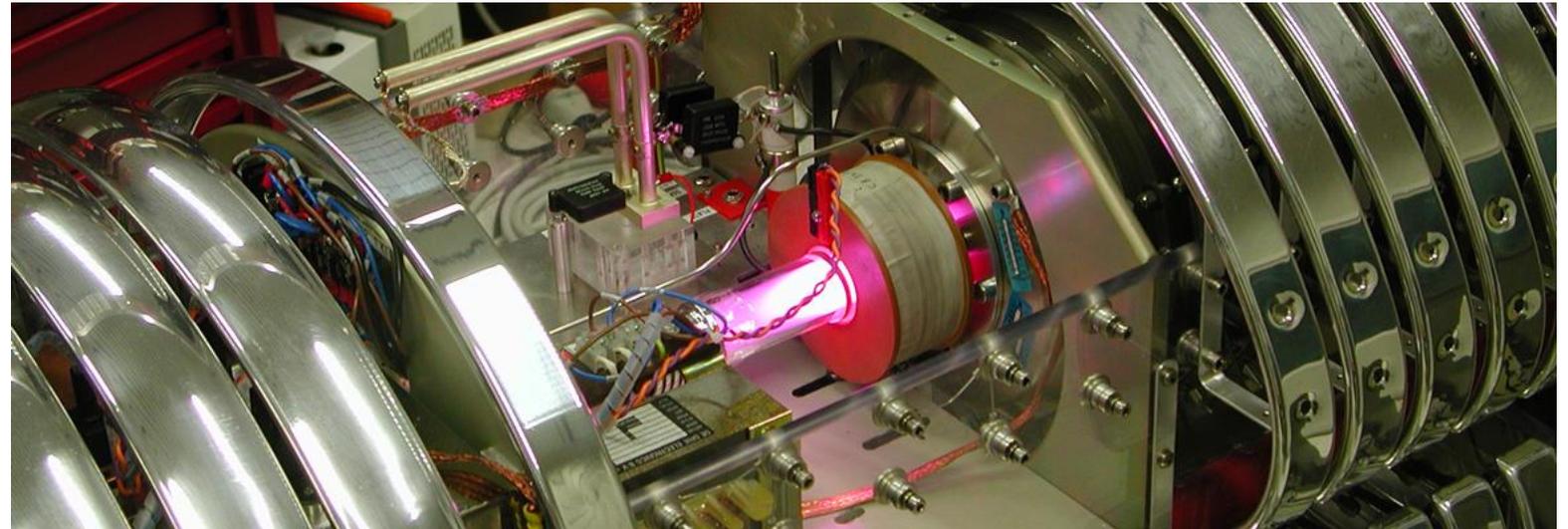
il **picco di Gamow** definisce l'intervallo di energia nel quale la reazione avviene più frequentemente



Possiamo studiare tutto questo in laboratorio!



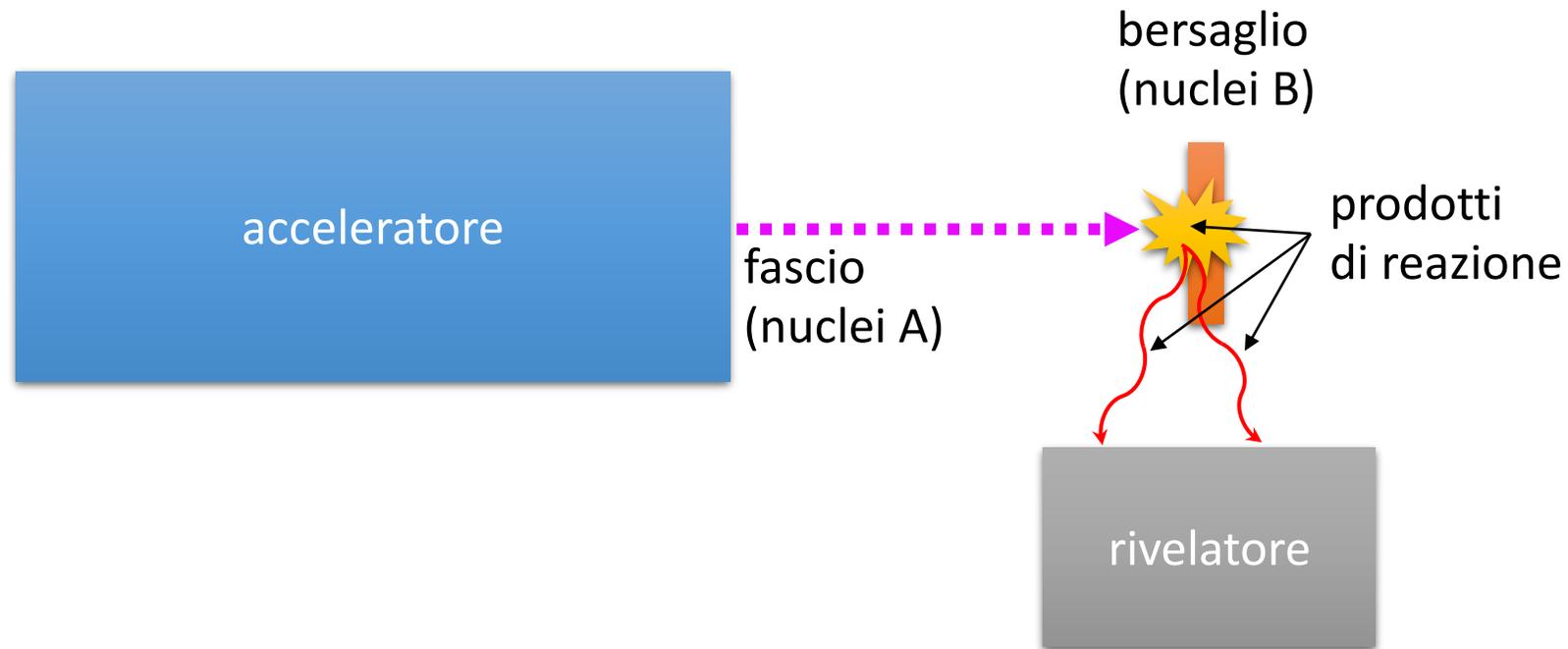
LUNA
Laboratory for Underground
Nuclear Astrophysics



studia reazioni nucleari (misura sezioni d'urto) di interesse per

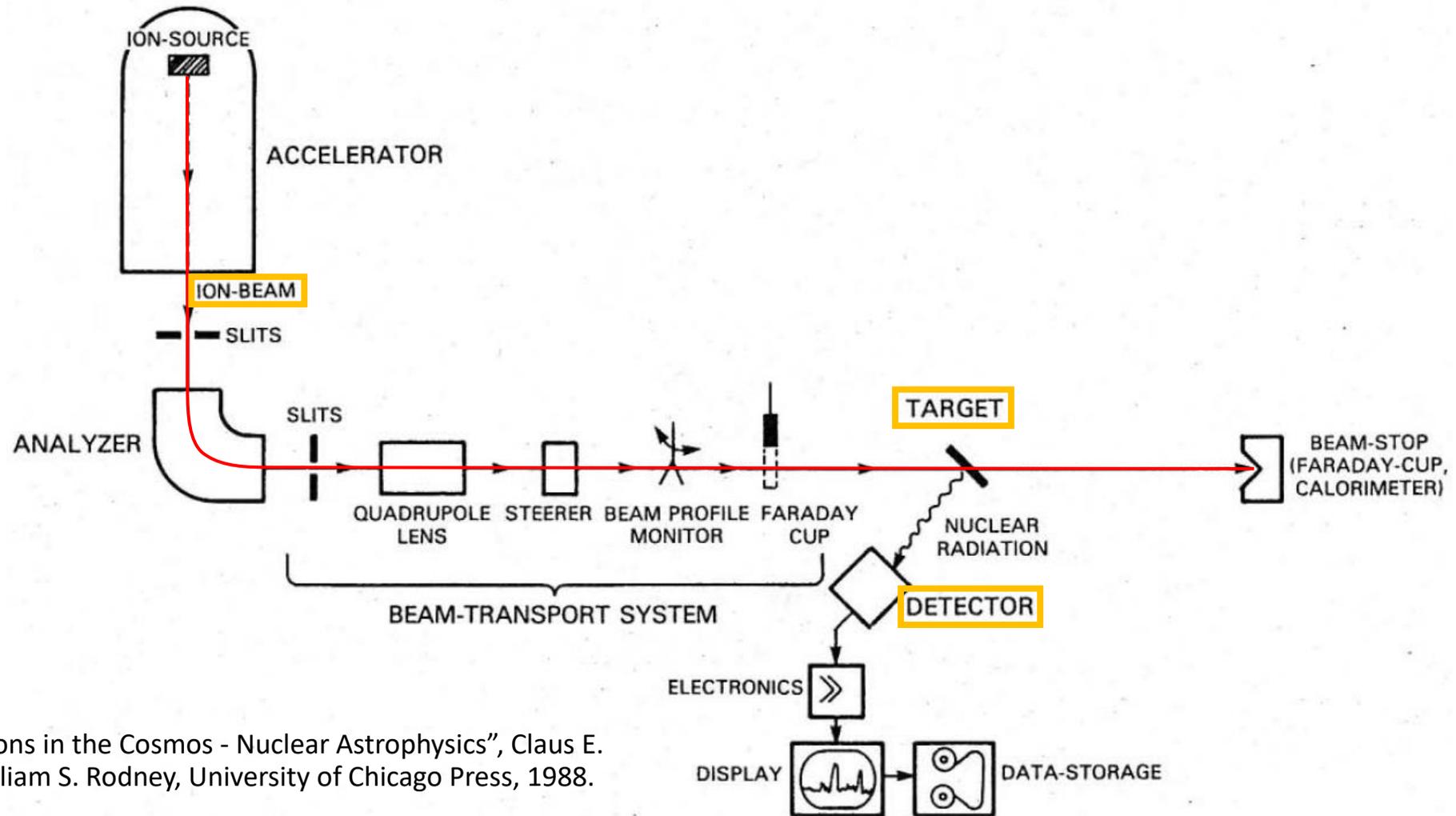
fisica del sole	(neutrino solari)
modello cosmologico	(densità barionica)
nucleosintesi primordiale	(BBN)
nucleosintesi stellare	(combustione H, He, C)

Possiamo studiare tutto questo in laboratorio!



questi sono processi estremamente rari, spesso nascosti da processi più comuni

Come studiare queste reazioni in laboratorio?

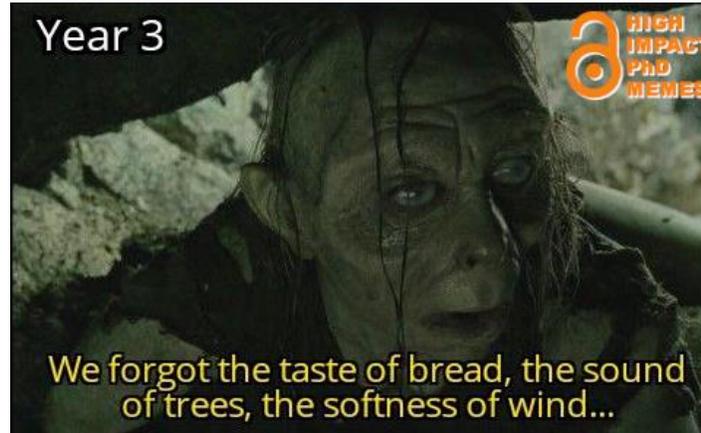


From "Cauldrons in the Cosmos - Nuclear Astrophysics", Claus E. Rolfs and William S. Rodney, University of Chicago Press, 1988.

Come studiare queste reazioni in laboratorio?

$$\begin{aligned} \text{tasso di conteggio} &= \text{flusso di particelle proiettile} && 10^{14} \text{ particelle al secondo (100 } \mu\text{A)} \\ &\times \\ &\text{densità areale di nuclei bersaglio} && 10^{19} \text{ atomi/cm}^2 \text{ (spesso minore)} \\ &\times \\ &\text{sezione d'urto della reazione} && 10^{-36} \text{ cm}^2 \text{ (spesso minore)} \\ &\times \\ &\text{efficienza di rivelazione} && 10^{-1} \text{ (spesso minore)} \end{aligned}$$

pochi conteggi/giorno



è fondamentale avere basso fondo ("rumore")

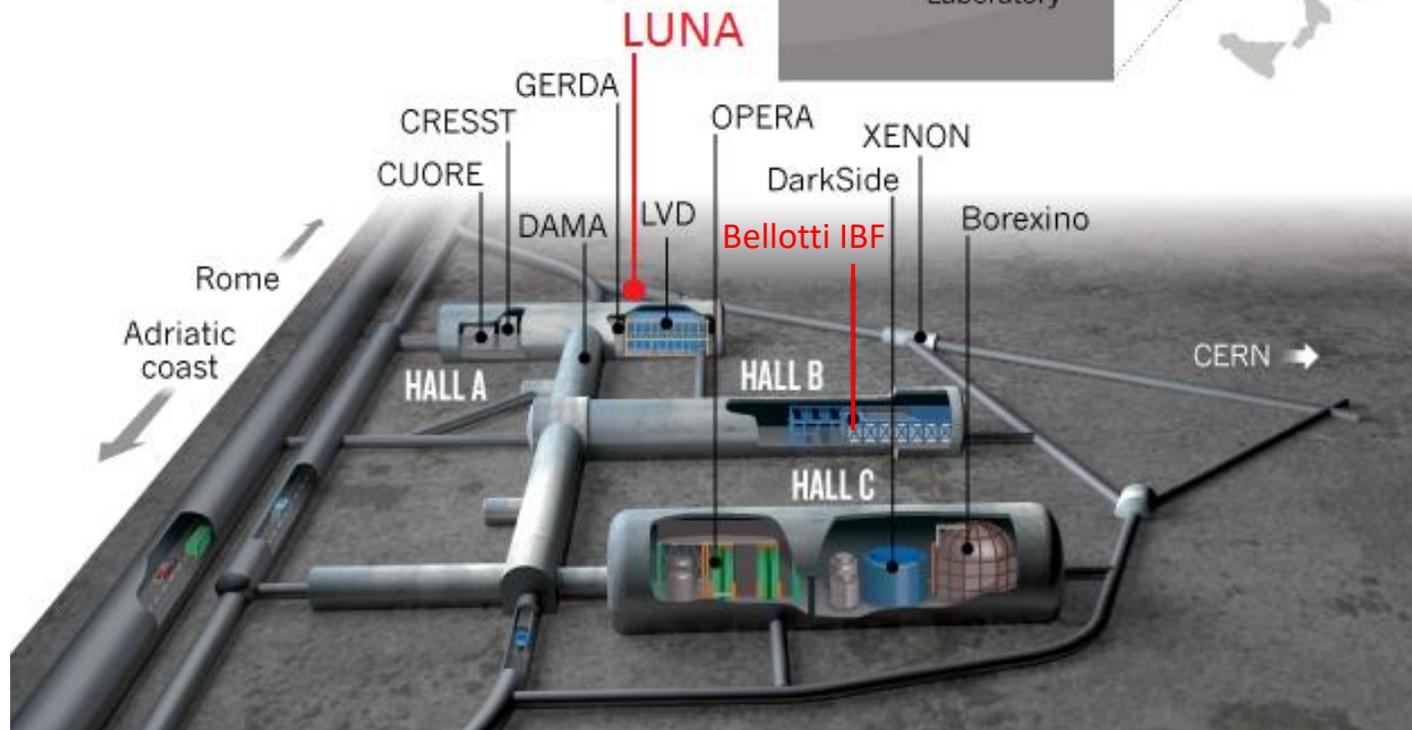
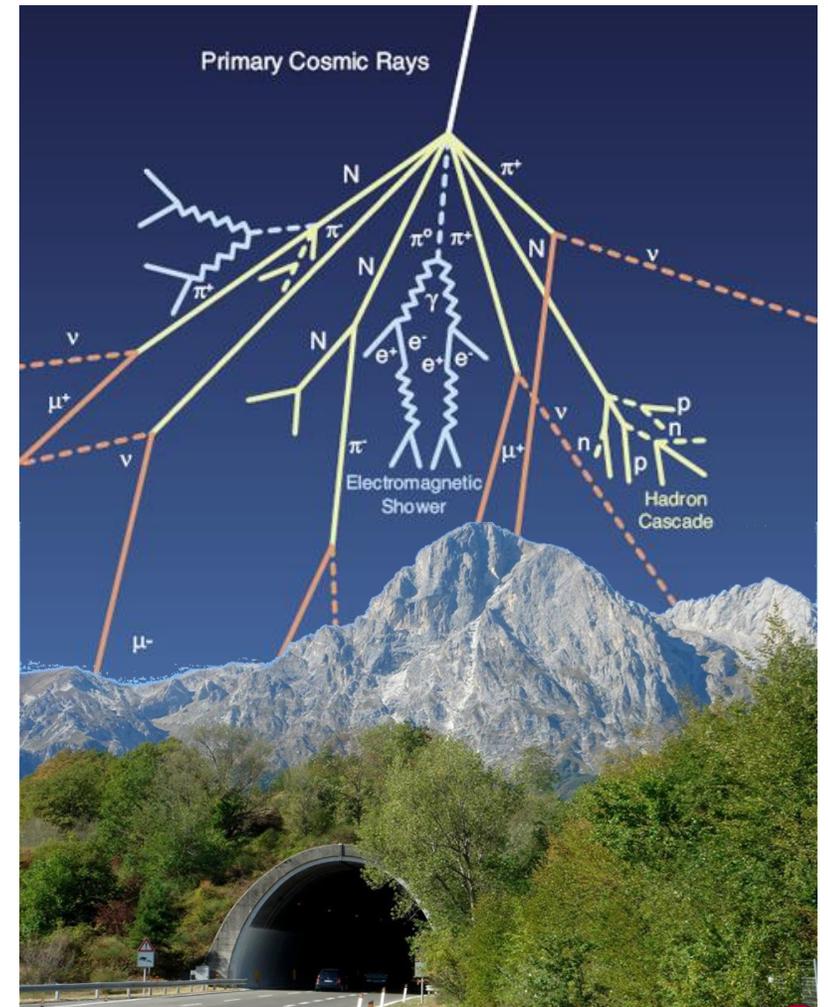
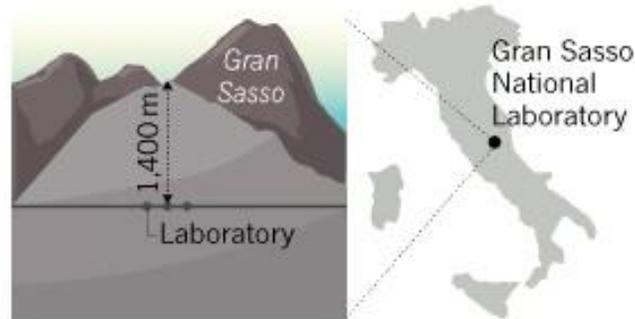
**LABORATORI
SOTTERRANEI**

I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

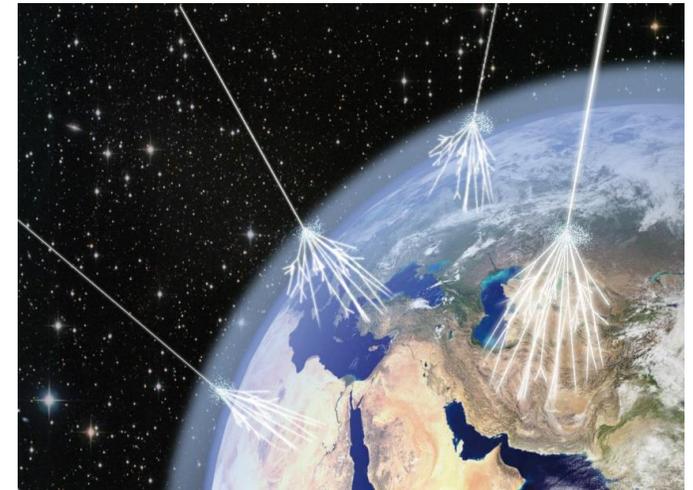
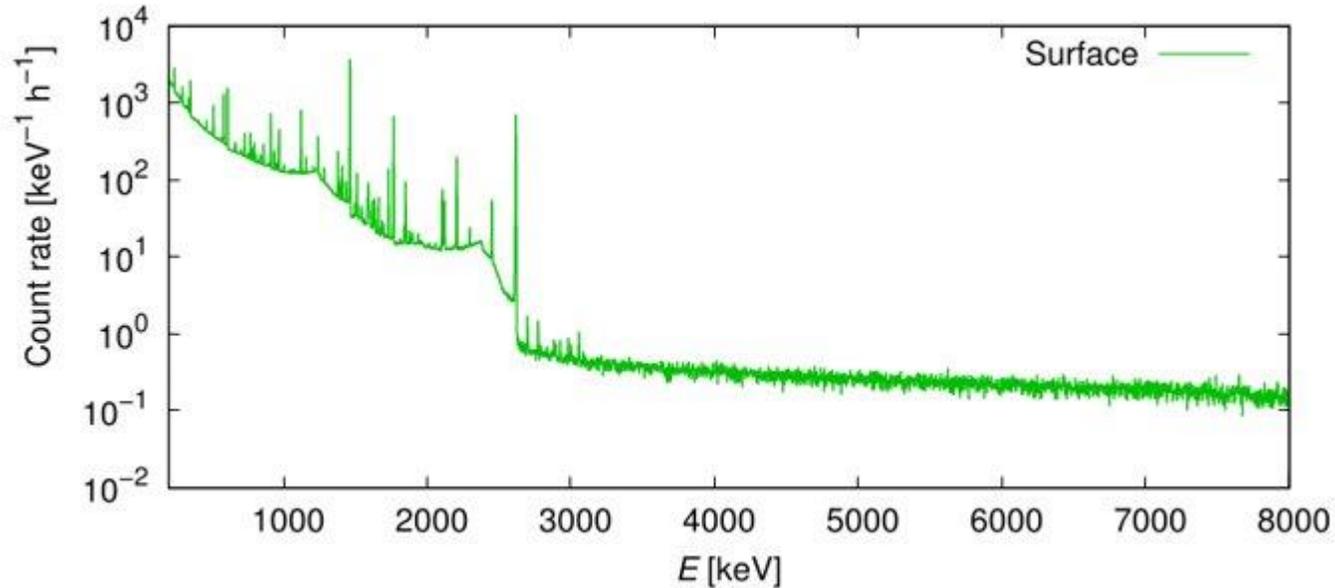
schermatura: 3400 m acqua eq.

riduzione flusso muoni: $\sim 10^6$

riduzione flusso neutroni: $\sim 10^3$



Il “rumore” nasconde i segnali interessanti!

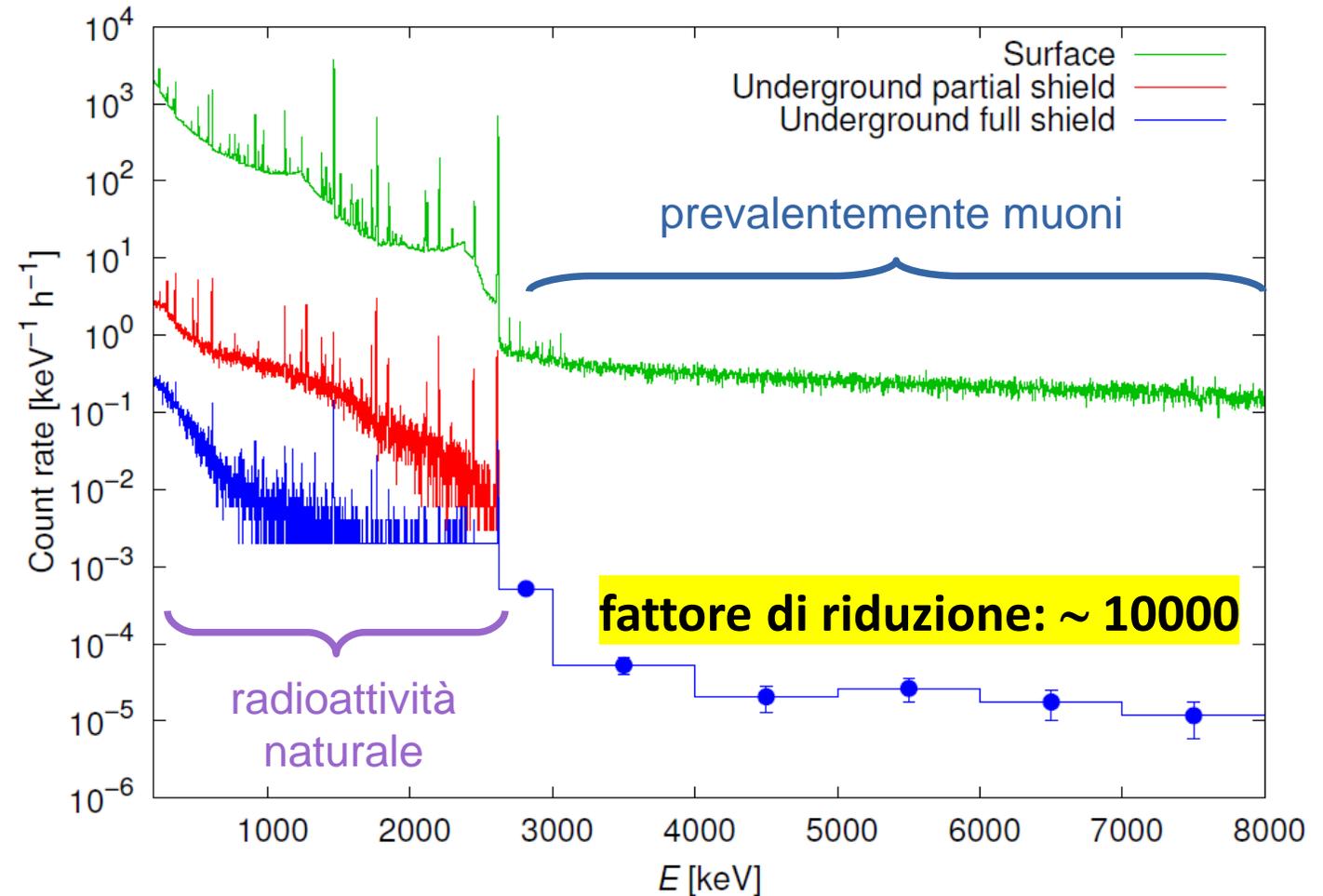
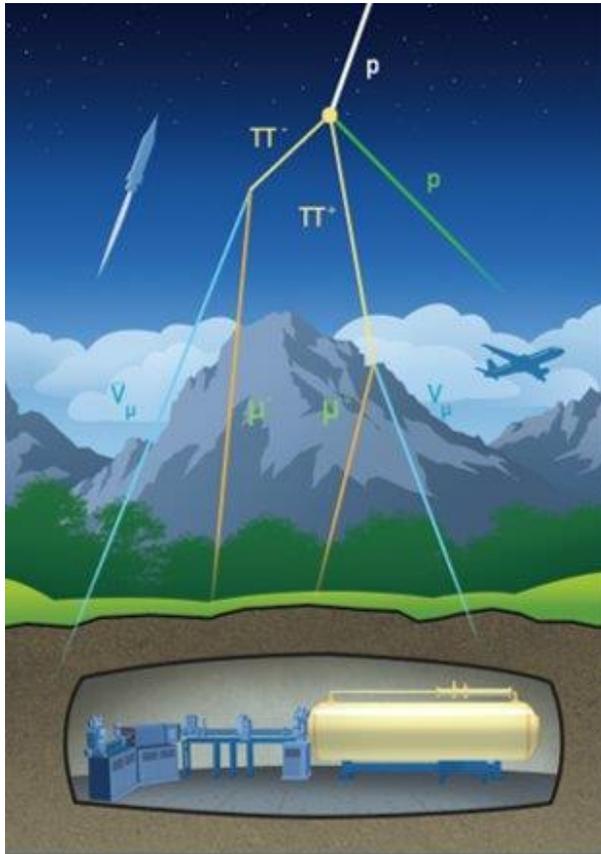


La causa del “rumore” sono i raggi cosmici

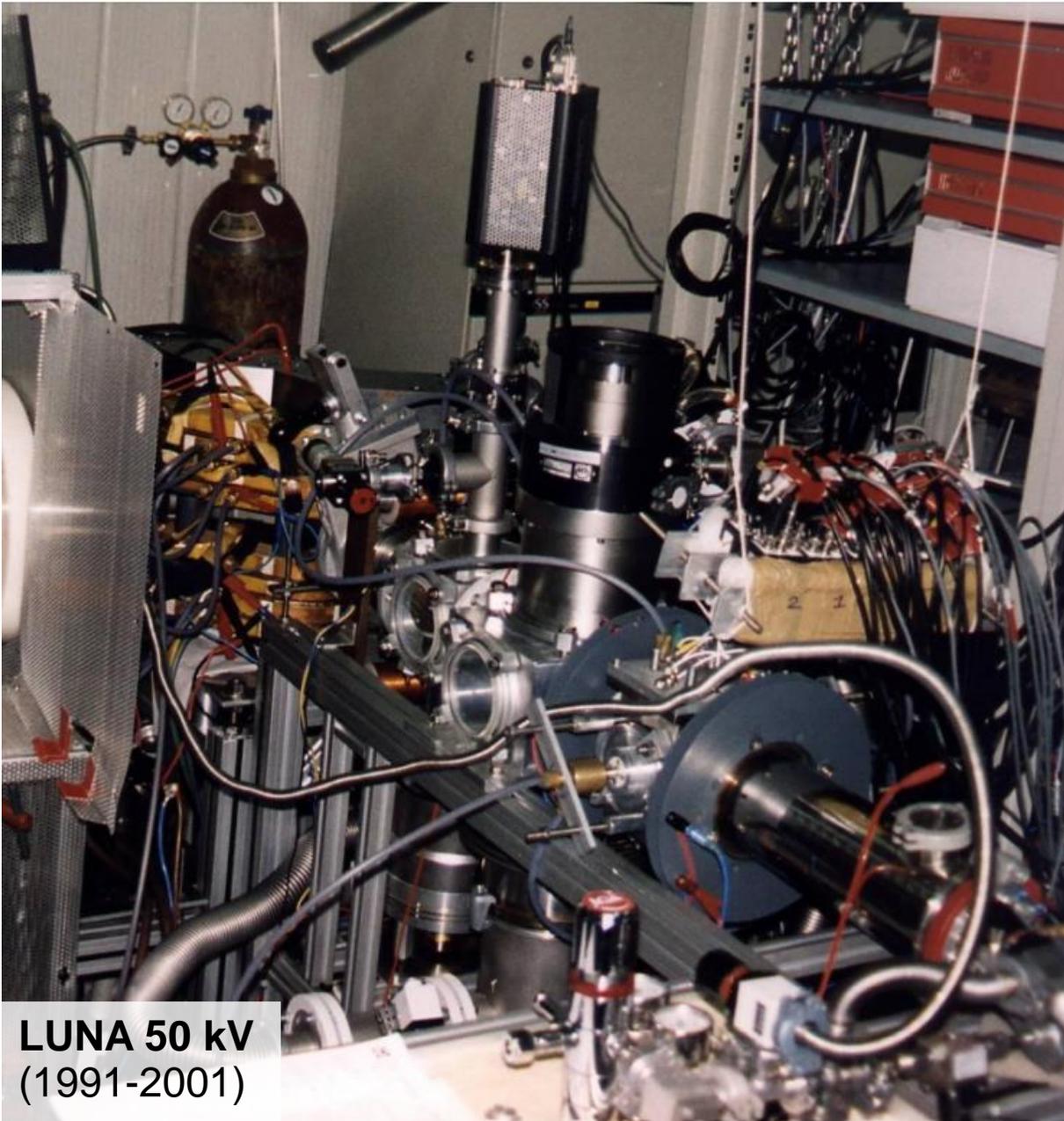
attraversando l’atmosfera producono muoni, che passano nei nostri rivelatori e causano “rumore”



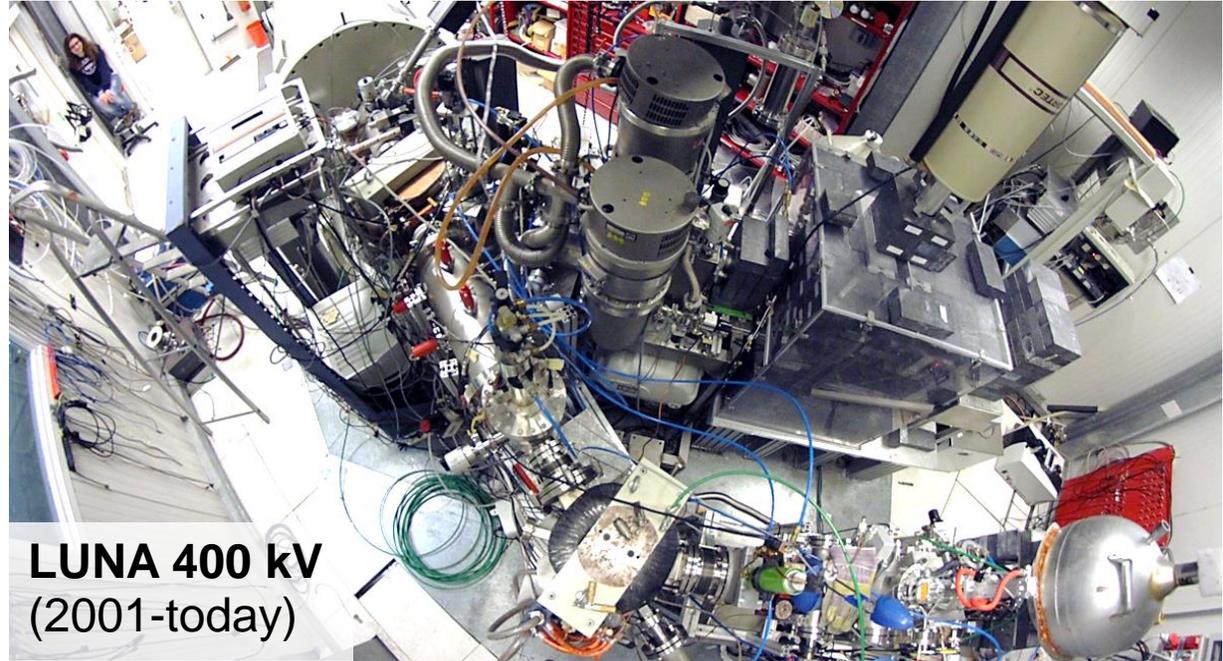
Il “rumore” è più basso nei laboratori sotterranei!



La roccia del Gran Sasso scherma i rivelatori dai muoni, quindi ci protegge dal “rumore”!



LUNA 50 kV
(1991-2001)



LUNA 400 kV
(2001-today)



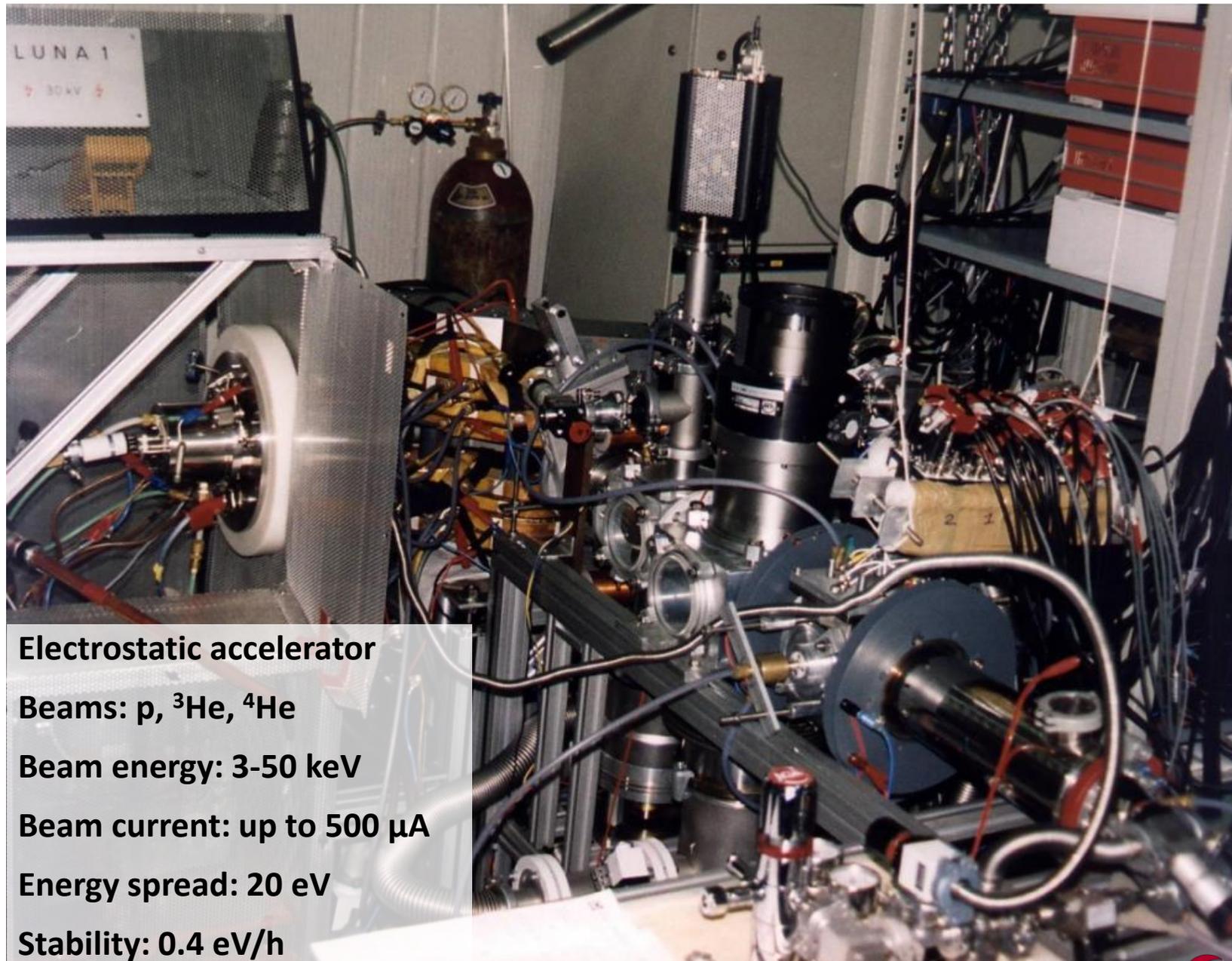
LUNA-MV @ Bellotti IBF
(today-????)



LUNA

Laboratory for Underground
Nuclear Astrophysics

LUNA 50 kV
(1991-2001)



Electrostatic accelerator

Beams: p, ^3He , ^4He

Beam energy: 3-50 keV

Beam current: up to 500 μA

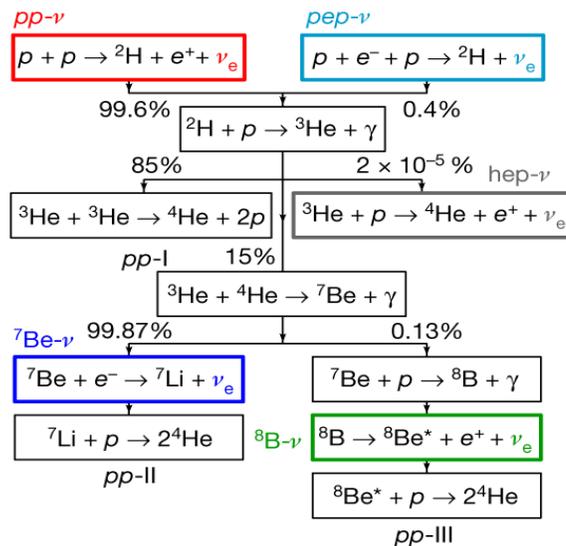
Energy spread: 20 eV

Stability: 0.4 eV/h

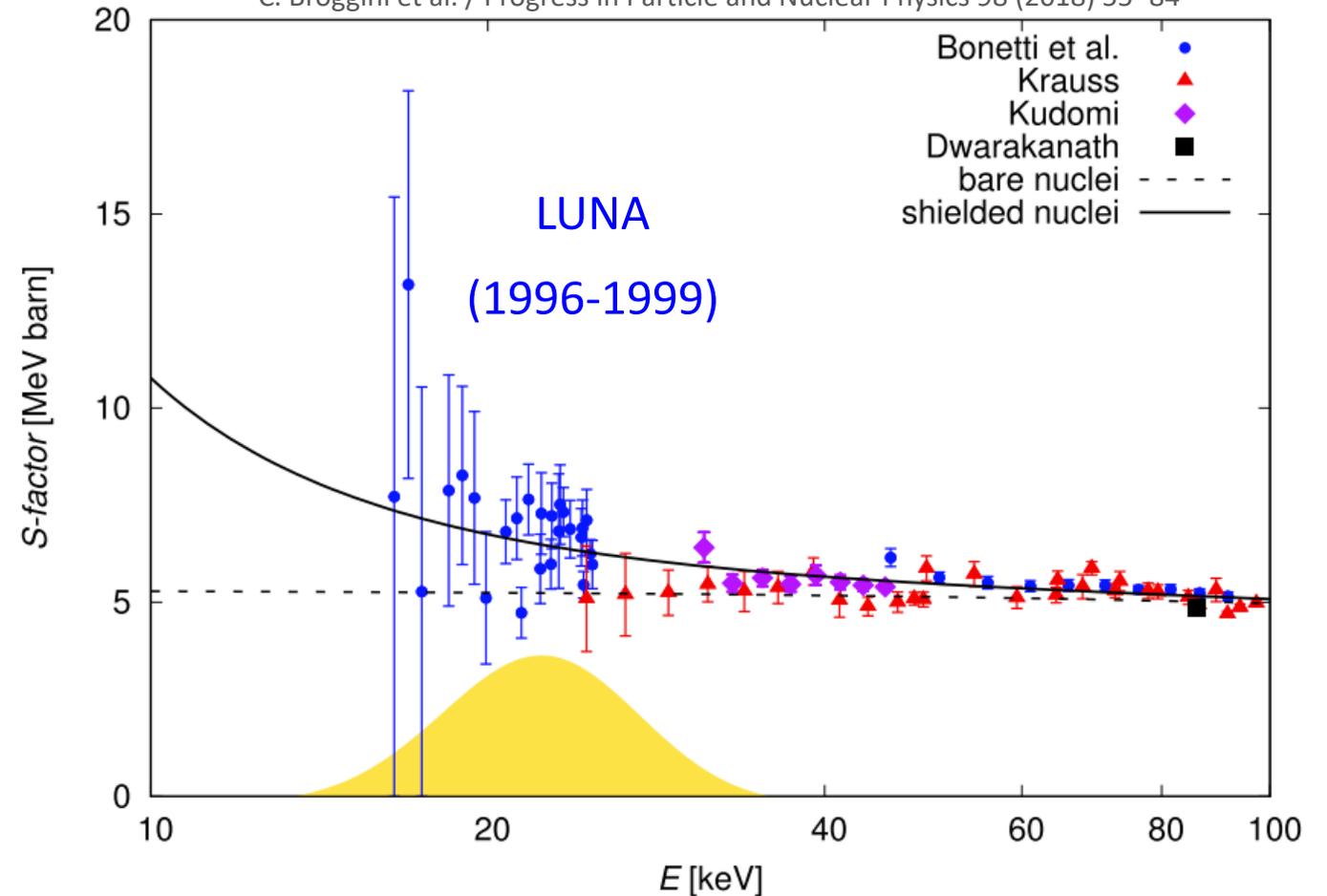
Una misura storica: ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$

Prima misura di questa reazione nella finestra di Gamow (2 eventi/mese)

L'assenza di risonanze nella finestra di Gamow ha permesso di scartare una possibile soluzione nucleare al problema dei neutrino solari



C. Brogгинi et al. / Progress in Particle and Nuclear Physics 98 (2018) 55–84





LUNA

Laboratory for Underground
Nuclear Astrophysics

LUNA 400 kV
(2001-today)

Electrostatic accelerator

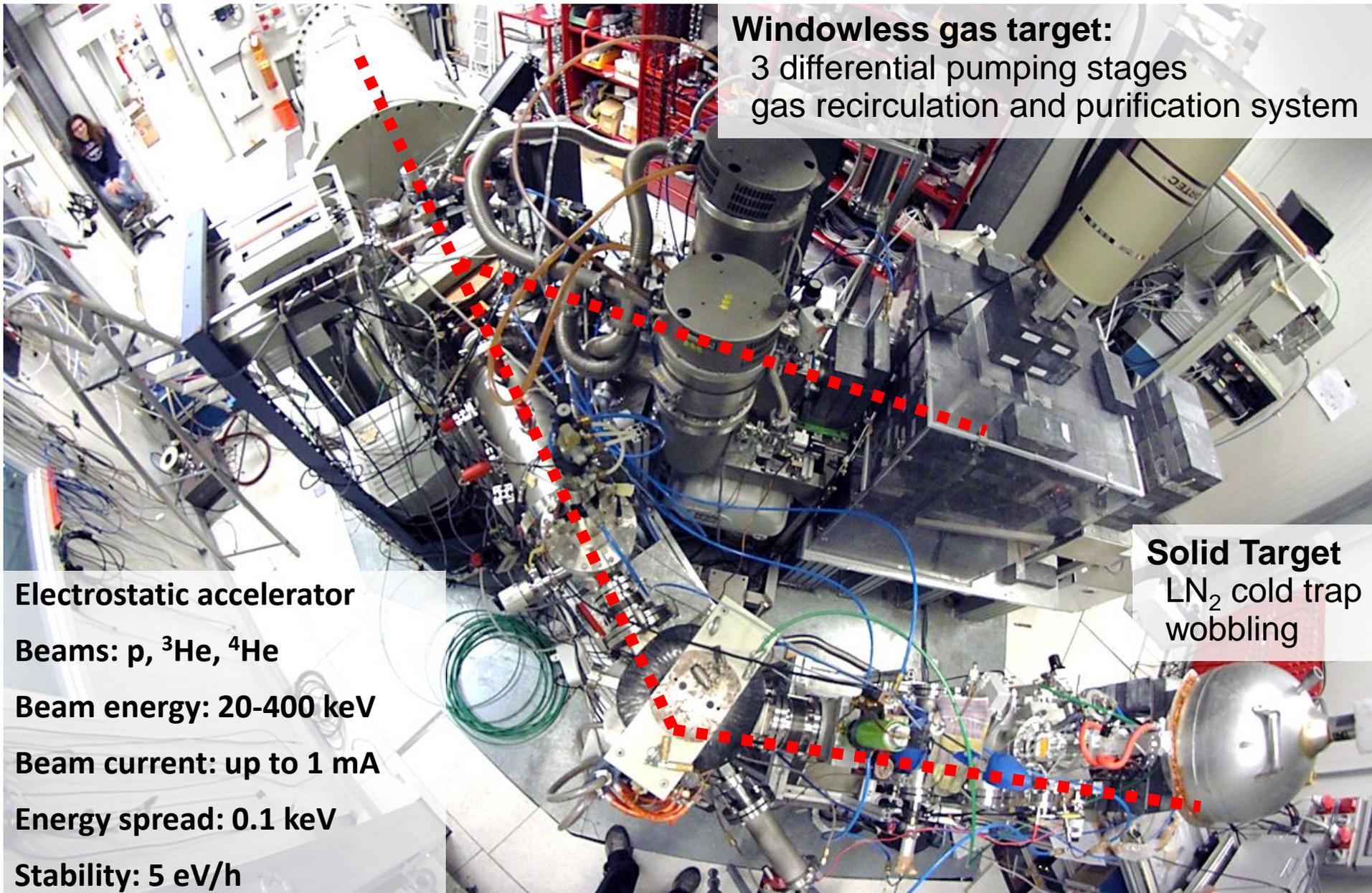
Beams: p, ^3He , ^4He

Beam energy: 20-400 keV

Beam current: up to 1 mA

Energy spread: 0.1 keV

Stability: 5 eV/h



Windowless gas target:
3 differential pumping stages
gas recirculation and purification system

Solid Target
 LN_2 cold trap
wobbling

Una misura recente: $D(p,\gamma)^3\text{He}$

It was the most uncertain nuclear physics input to BBN calculations

nature

Explore content ▾ About the journal ▾ Publish with us ▾

nature > articles > article

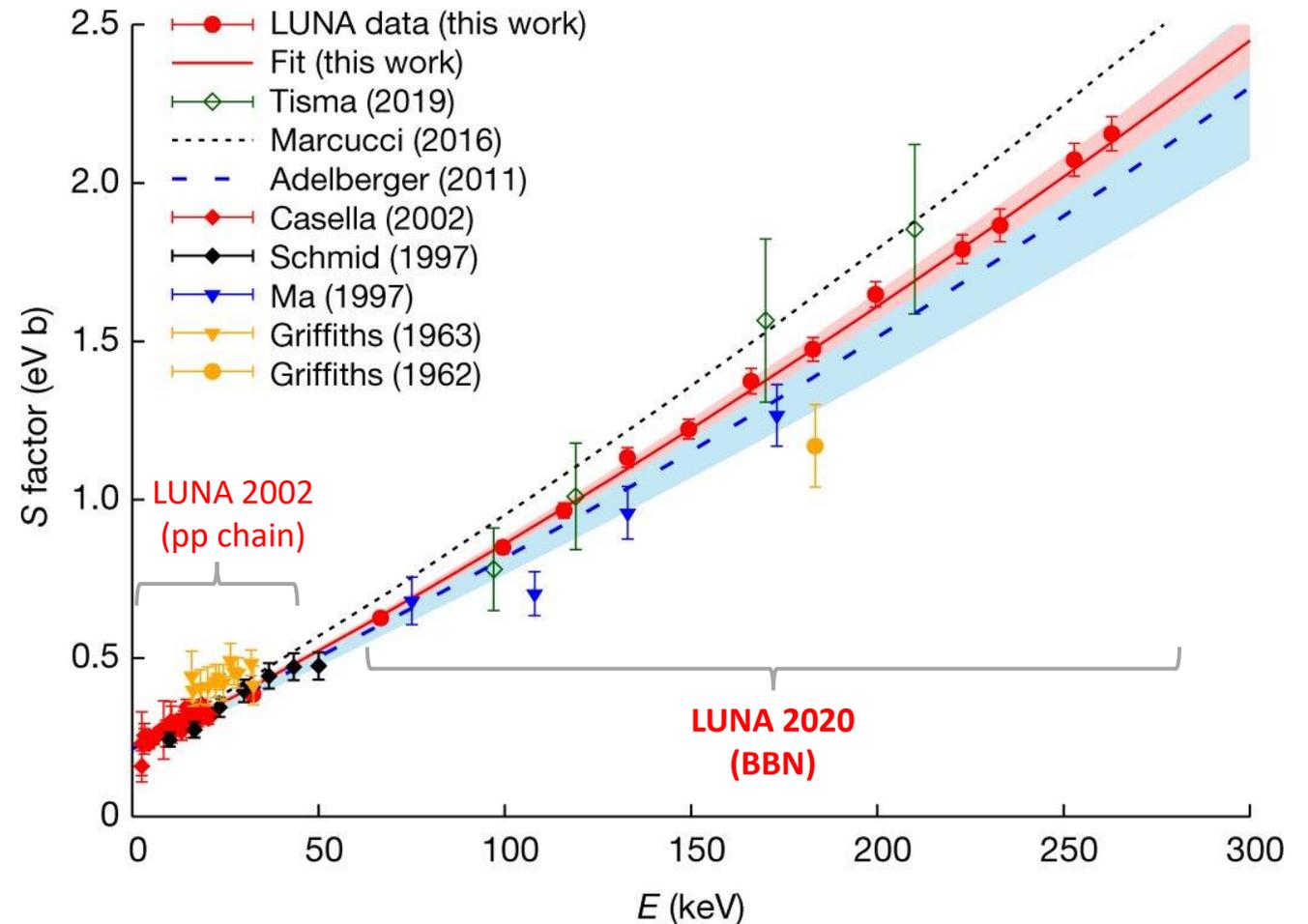
Article | Published: 11 November 2020

The baryon density of the Universe from an improved rate of deuterium burning

V. Mossa, K. Stöckel, F. Cavanna, F. Ferraro, M. Aliotta, F. Barile, D. Bemmerer, A. Best, A. Boeltzig, C. Broggini, C. G. Bruno, A. Cacioli, T. Chillery, G. F. Ciani, P. Corvisiero, L. Csedreki, T. Davinson, R. Depalo, A. Di Leva, Z. Elekes, E. M. Fiore, A. Formicola, Zs. Fülöp, G. Gervino, A. Guglielmetti, C. Gustavino, G. Gyürky, G. Imbriani, M. Junker, A. Kievsky, I. Kochanek, M. Lugaro, L. E. Marcucci, G. Mangano, P. Marigo, E. Masha, R. Menegazzo, F. R. Pantaleo, V. Patricchio, R. Perrino, D. Piatti, O. Pisanti, P. Prati, L. Schiavulli, O. Straniero, T. Szücs, M. P. Takács, D. Trezzi, M. Viviani & S. Zavatarelli - Show fewer authors

Nature 587, 210–213 (2020) | Cite this article
4403 Accesses | 168 Altmetric | Metrics

Our measurement improved the reliability in the use of primordial abundances as probes of the physics of the early Universe



Una misura recente: $D(p,\gamma)^3\text{He}$

Si trattava della reazione più incerta tra quelle che è necessario conoscere per calcolare la densità di materia barionica

Ω_b ottenuta col codice PARTHENOPE confrontando $[D/H]_{\text{OBS}}$ and $[D/H]_{\text{BBN}}$
 N_{eff} dal Modello Standard
Confronto con il risultato di Planck (esperimento su satellite)

nature

Explore content ▾ About the journal ▾ Publish with us ▾

nature > articles > article

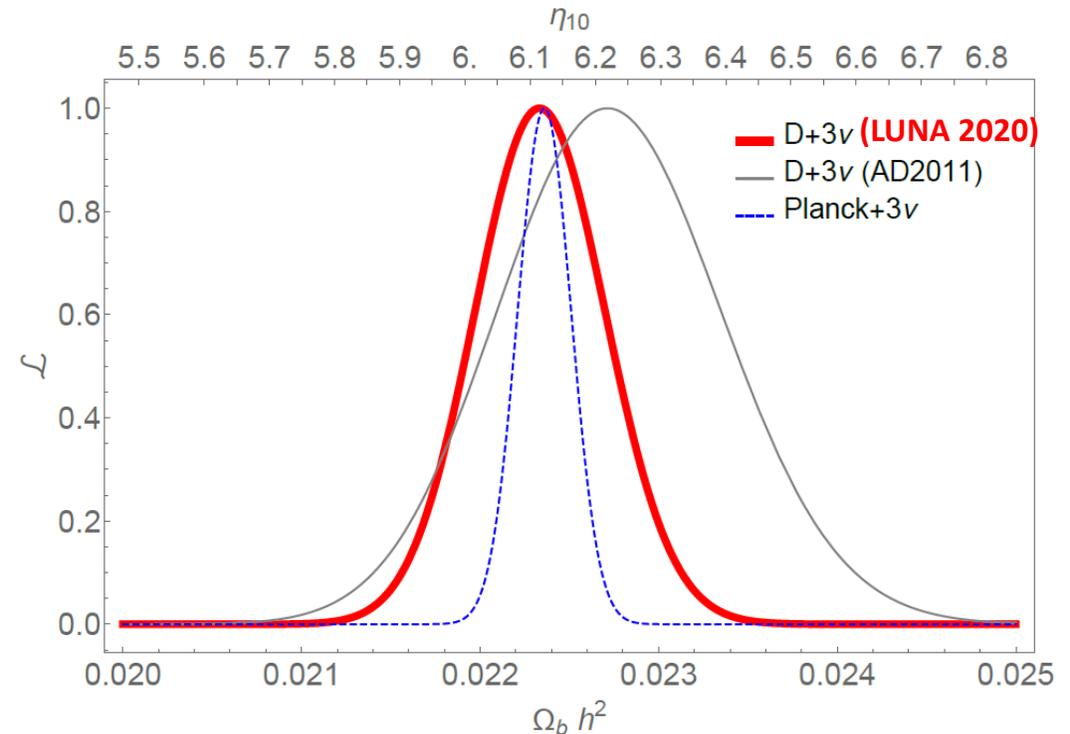
Article | Published: 11 November 2020

The baryon density of the Universe from an improved rate of deuterium burning

V. Mossa, K. Stöckel, F. Cavanna, F. Ferraro, M. Aliotta, F. Barile, D. Bemmerer, A. Best, A. Boeltzig, C. Broggini, C. G. Bruno, A. Cacioli, T. Chillery, G. F. Ciani, P. Corvisiero, L. Csedreki, T. Davinson, R. Depalo, A. Di Leva, Z. Elekes, E. M. Fiore, A. Formicola, Zs. Fülöp, G. Gervino, A. Guglielmetti, C. Gustavino, G. Gyürky, G. Imbriani, M. Junker, A. Kievsky, I. Kochanek, M. Lugaro, L. E. Marcucci, G. Mangano, P. Marigo, E. Masha, R. Menegazzo, F. R. Pantaleo, V. Patricchio, R. Perrino, D. Piatti, O. Pisanti, P. Prati, L. Schiavulli, O. Straniero, T. Szücs, M. P. Takács, D. Trezzi, M. Viviani & S. Zavatarelli - Show fewer authors

Nature 587, 210–213 (2020) | Cite this article
4403 Accesses | 168 Altmetric | Metrics

Questa misura ha reso possibile utilizzare efficacemente le abbondanze isotopiche osservate per calcolare la densità di materia barionica

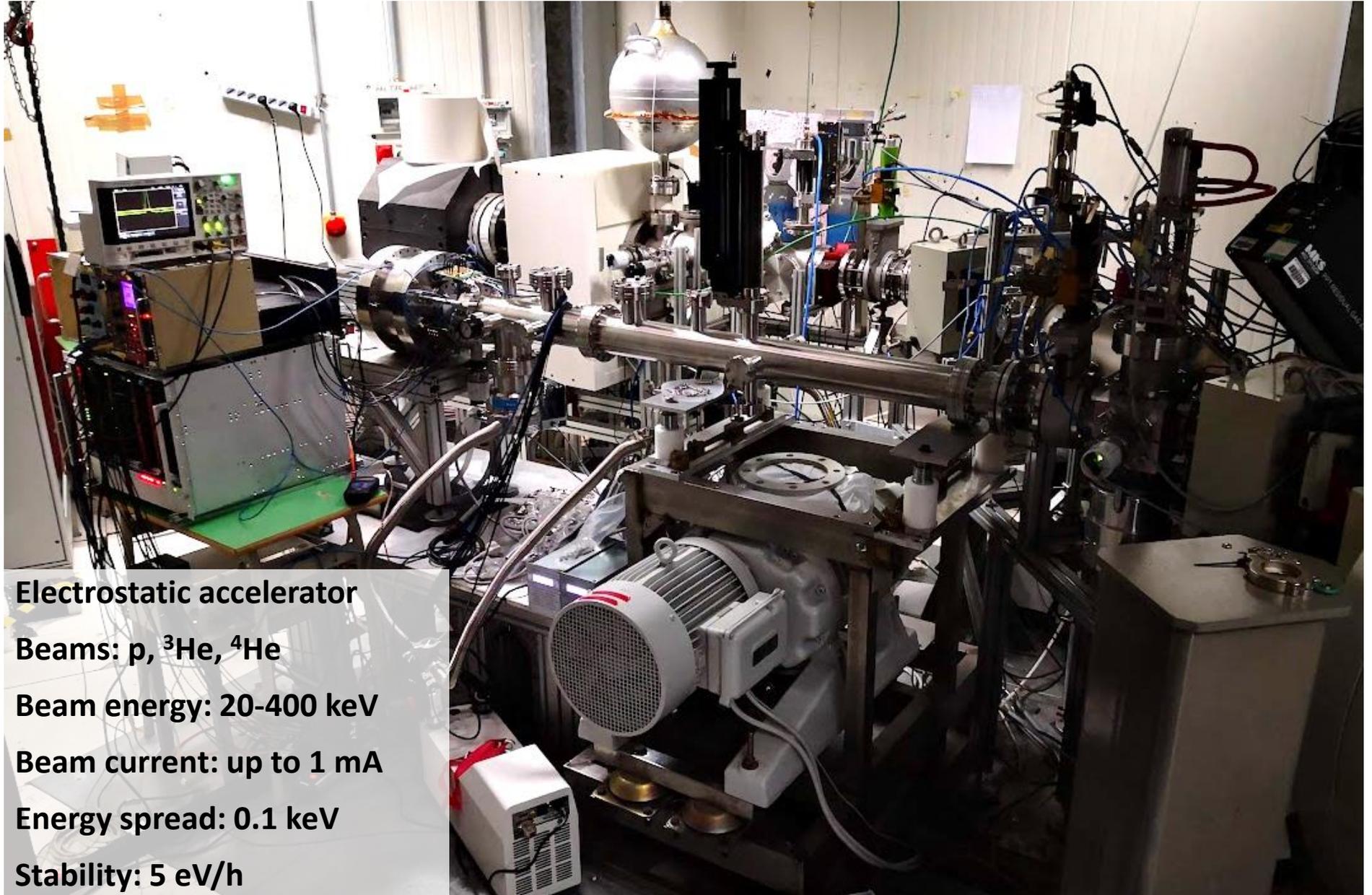




LUNA

Laboratory for Underground
Nuclear Astrophysics

LUNA 400 kV
(2001-oggi)



Electrostatic accelerator

Beams: p, ^3He , ^4He

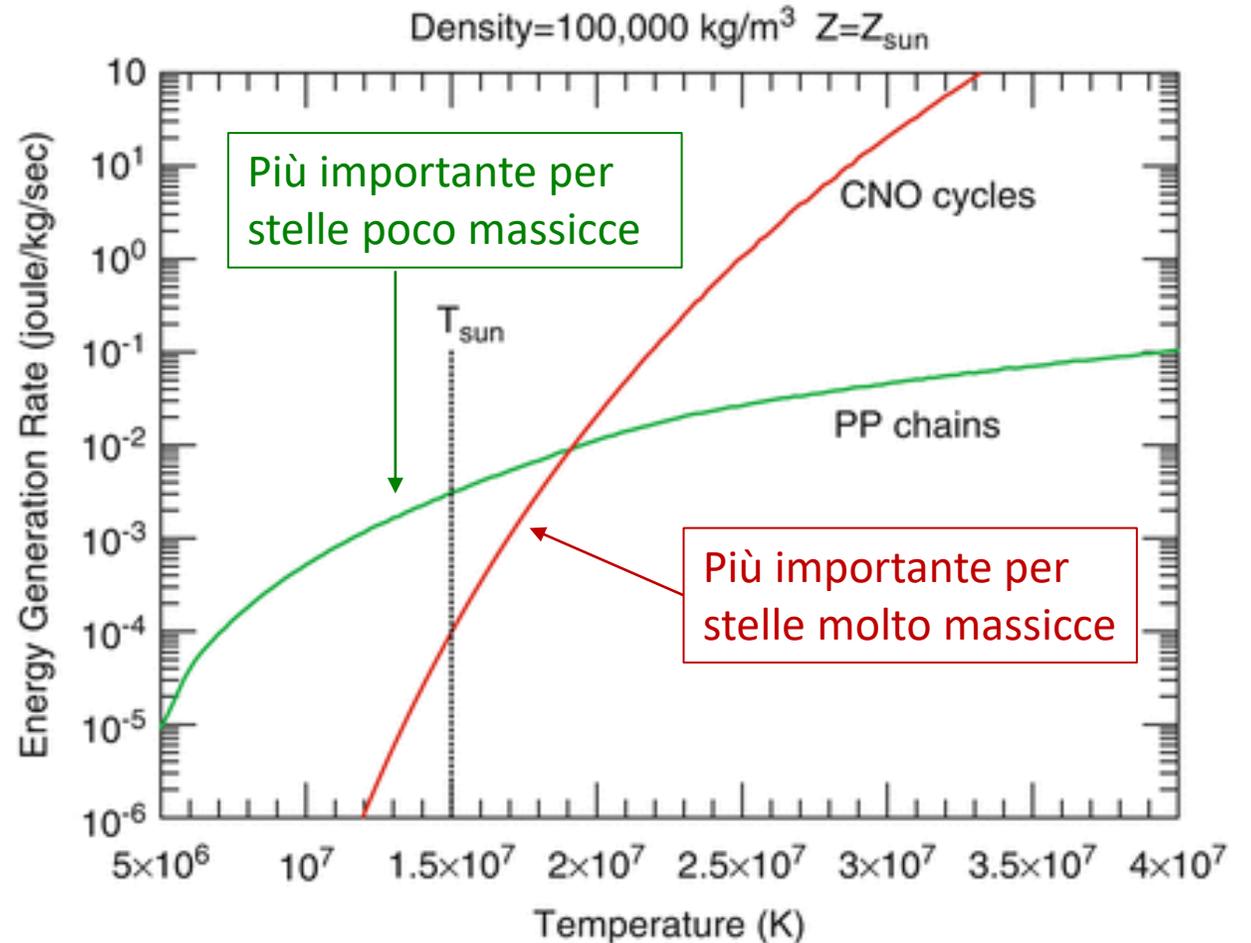
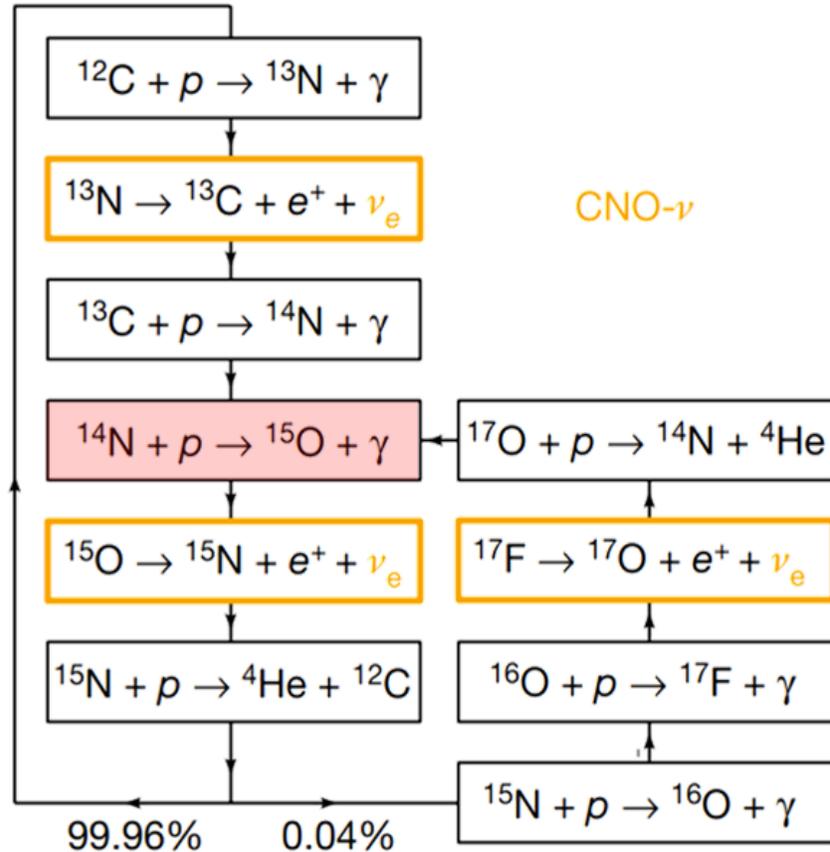
Beam energy: 20-400 keV

Beam current: up to 1 mA

Energy spread: 0.1 keV

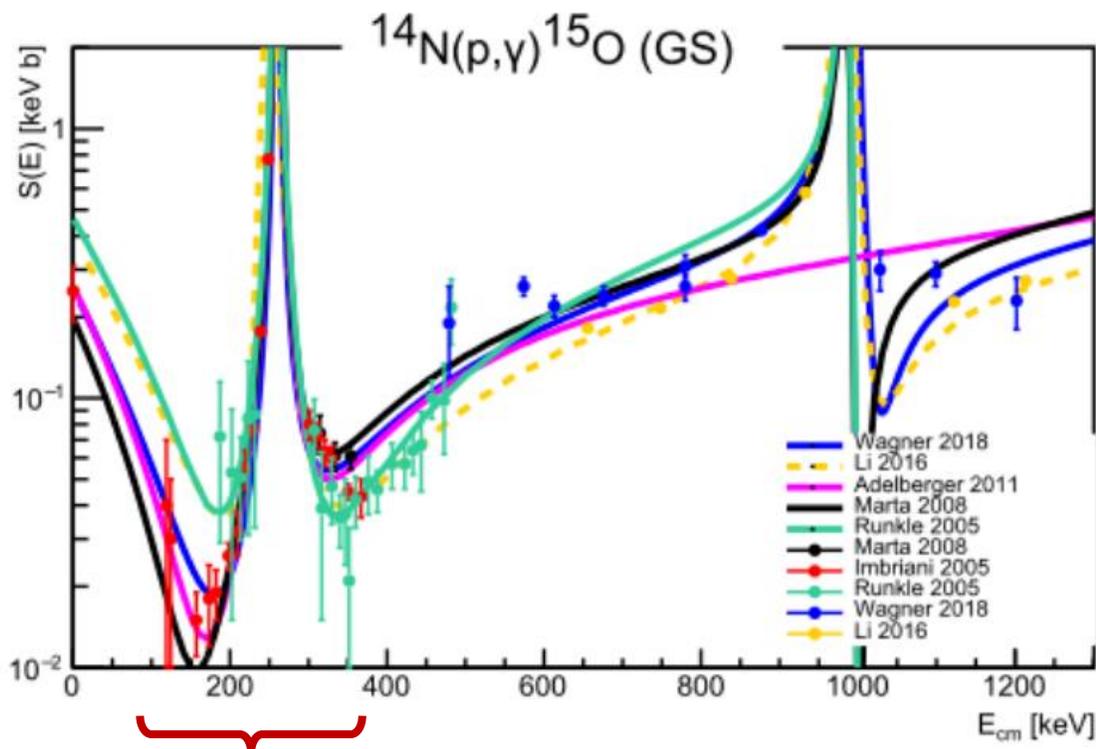
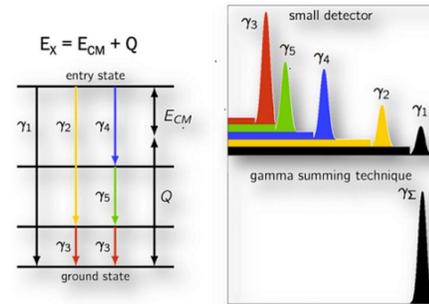
Stability: 5 eV/h

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





SoCIAL
Solar Composition Investigated At Luna



LUNA-400
70-370 keV

Lo studio della reazione $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$

- in un vasto intervallo energetico
- con una migliore capacità di distinguere diverse transizioni

può contribuire a risolvere il problema della metallicità solare

Obiettivi della misura:

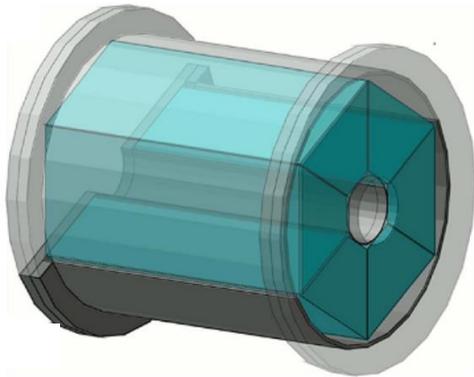
- sotto 100 keV → sezione d'urto totale
- 100-370 keV → contributi da ciascuno stato eccitato

using a segmented high-efficiency detector

• $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$



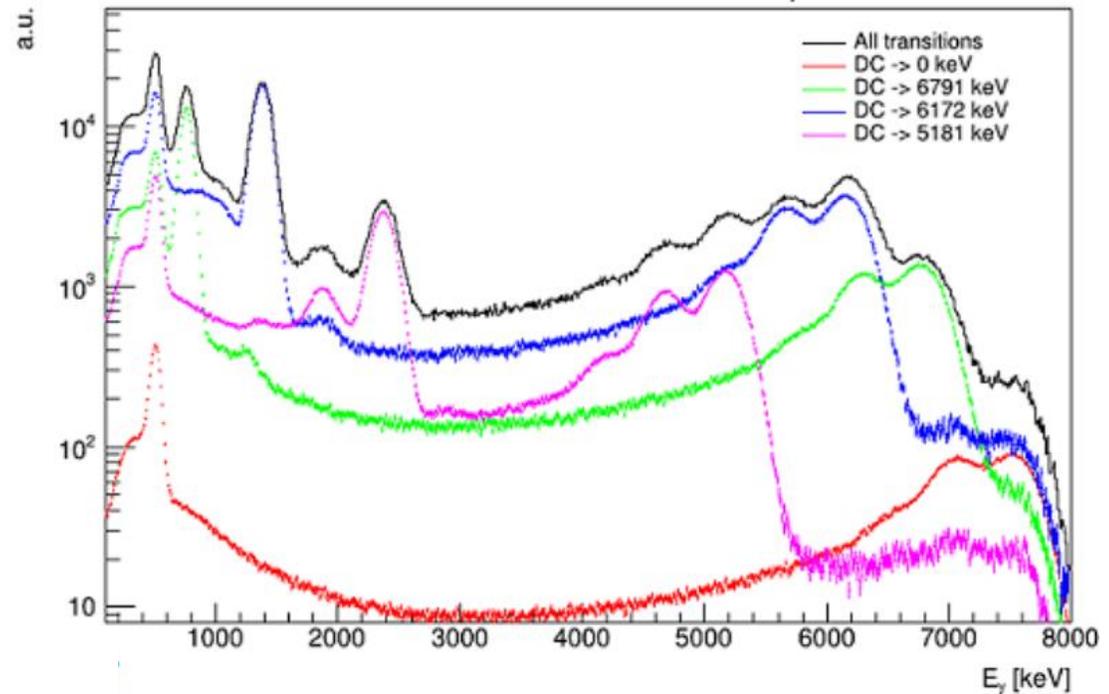
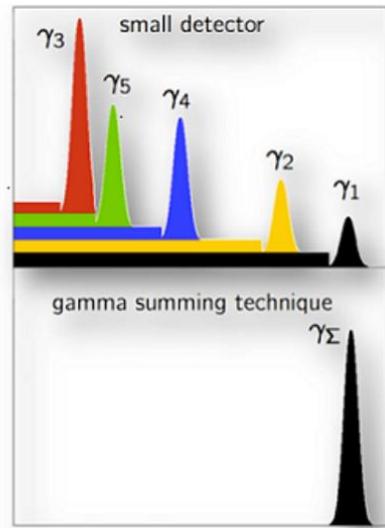
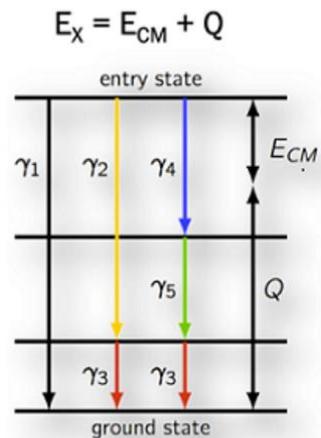
SoCIAL
SoLar Composition
Investigated At Luna



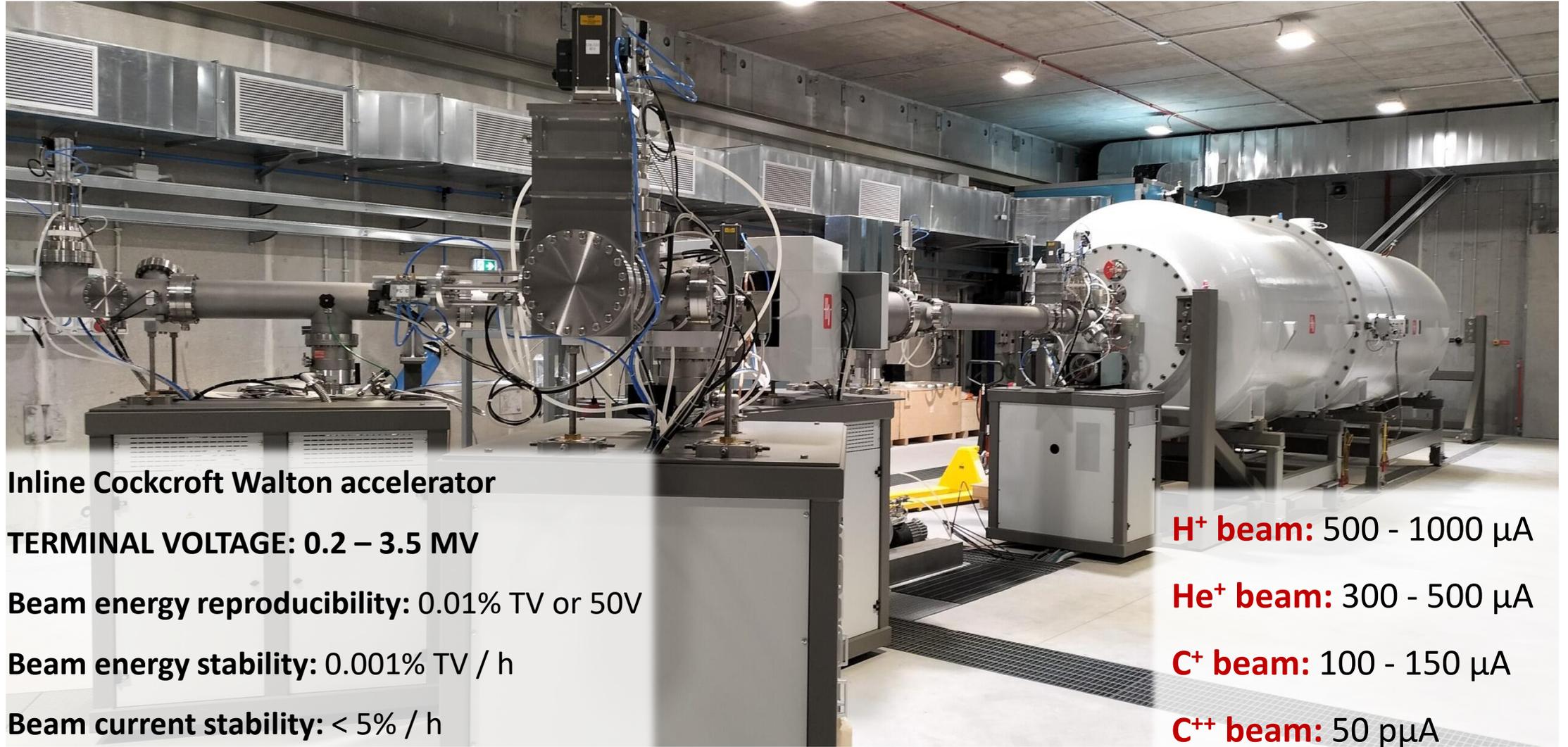
È possibile sia vedere l'energia totale rilasciata complessivamente, sia quella rilasciata dai diversi decadimenti

quindi

È possibile determinare accuratamente la sezione d'urto, senza trascurare i contributi più deboli



La nuova “Bellotti” Ion Beam Facility



Inline Cockcroft Walton accelerator

TERMINAL VOLTAGE: 0.2 – 3.5 MV

Beam energy reproducibility: 0.01% TV or 50V

Beam energy stability: 0.001% TV / h

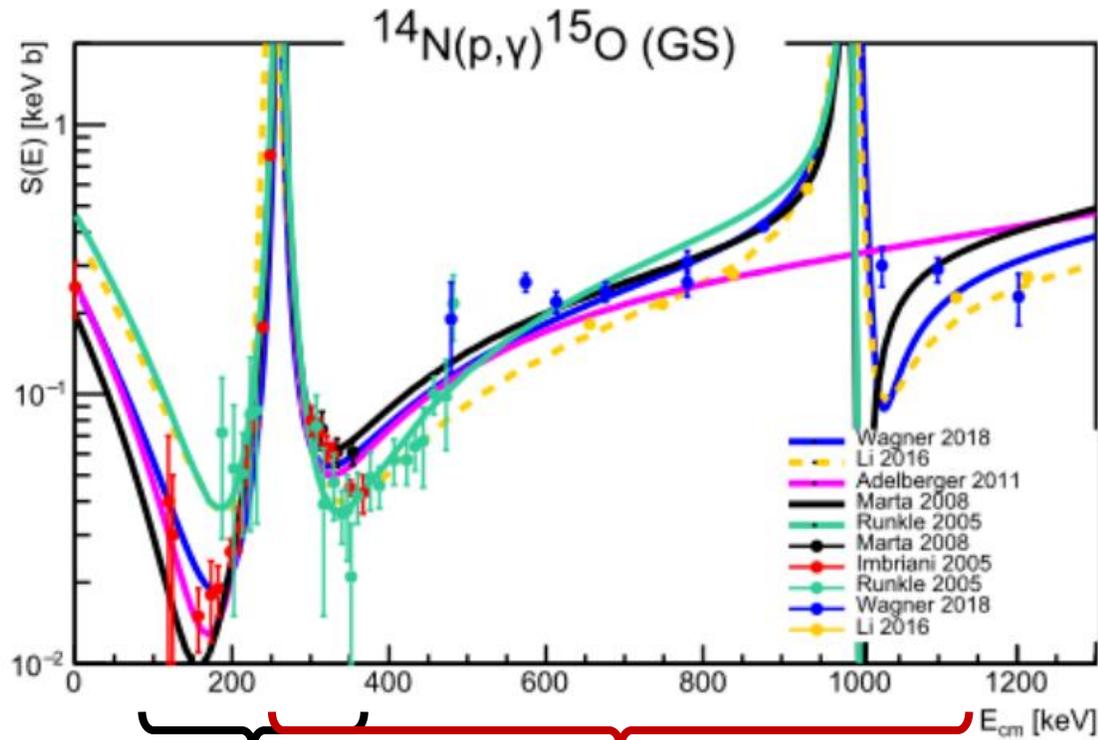
Beam current stability: < 5% / h

H⁺ beam: 500 - 1000 μ A

He⁺ beam: 300 - 500 μ A

C⁺ beam: 100 - 150 μ A

C⁺⁺ beam: 50 p μ A



LUNA-400
70-370 keV

LUNA-MV
250-1 keV

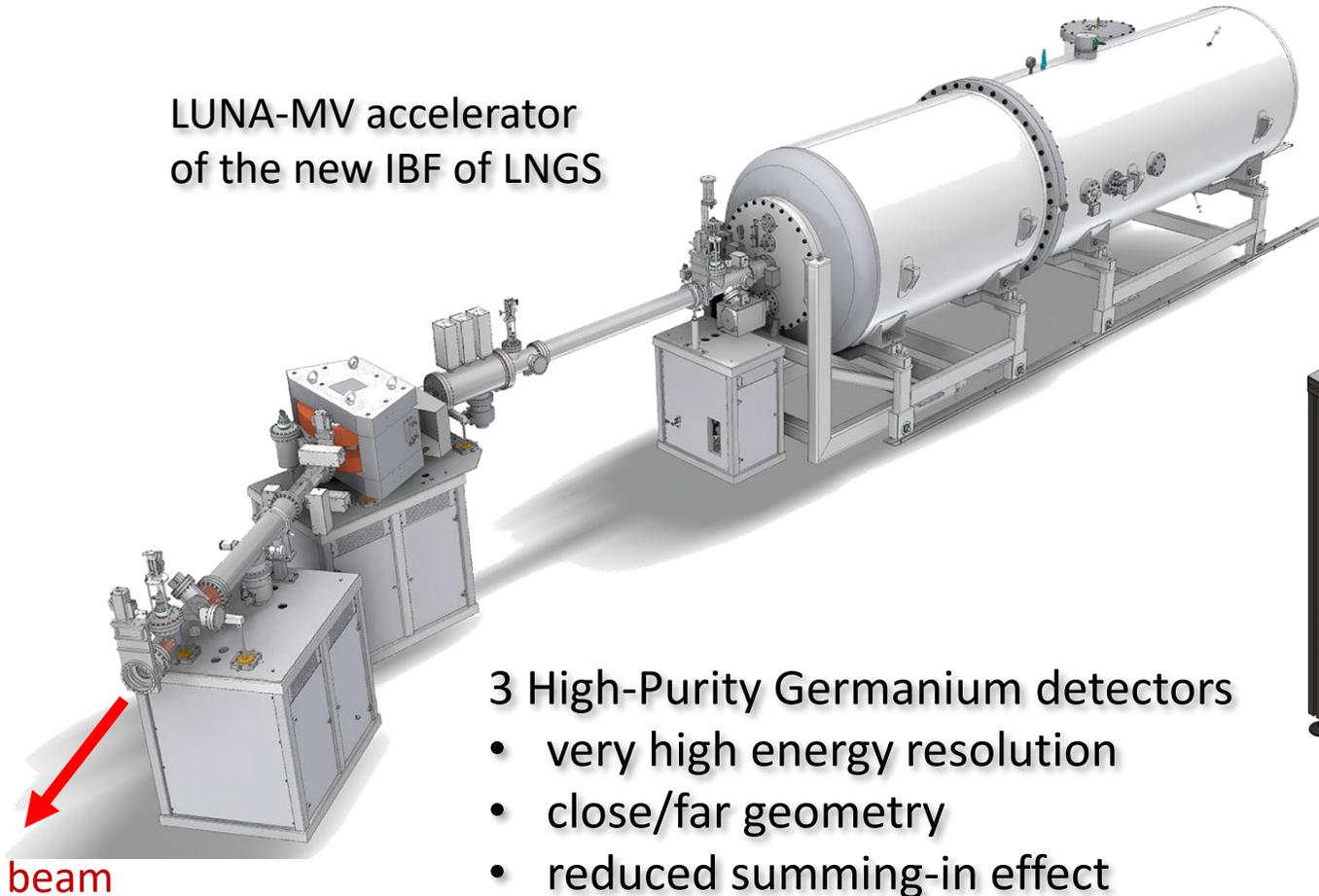
Obiettivi della misura ad alta energia

- Componente non risonante
- Transizioni più deboli
- Correzioni dovute a coincidenze
- Distribuzioni angolari

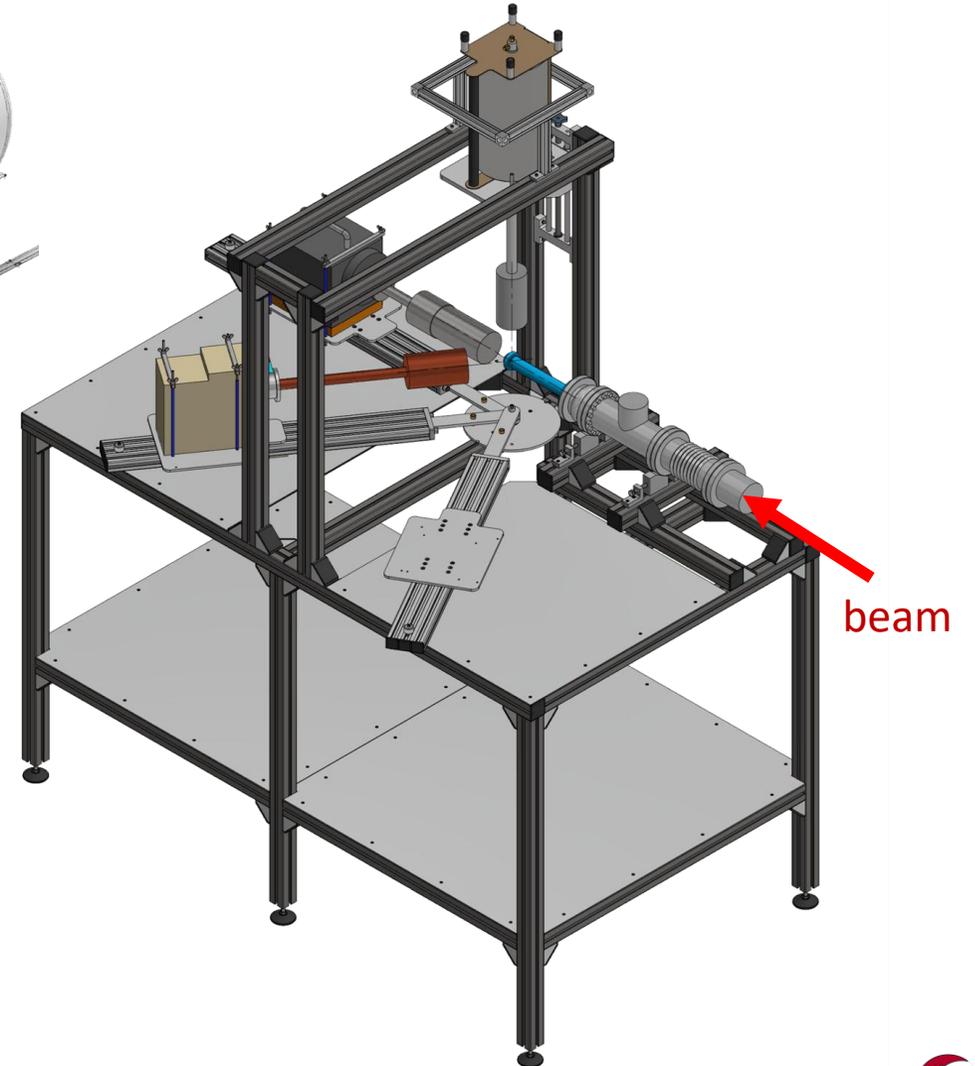
Tutto ciò in un intervallo di energia molto ampio e complementare...

$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$: experimental setup @ Bellotti IBF

LUNA-MV accelerator
of the new IBF of LNGS



- 3 High-Purity Germanium detectors
- very high energy resolution
 - close/far geometry
 - reduced summing-in effect
 - sensitivity to angular distribution







Conclusioni

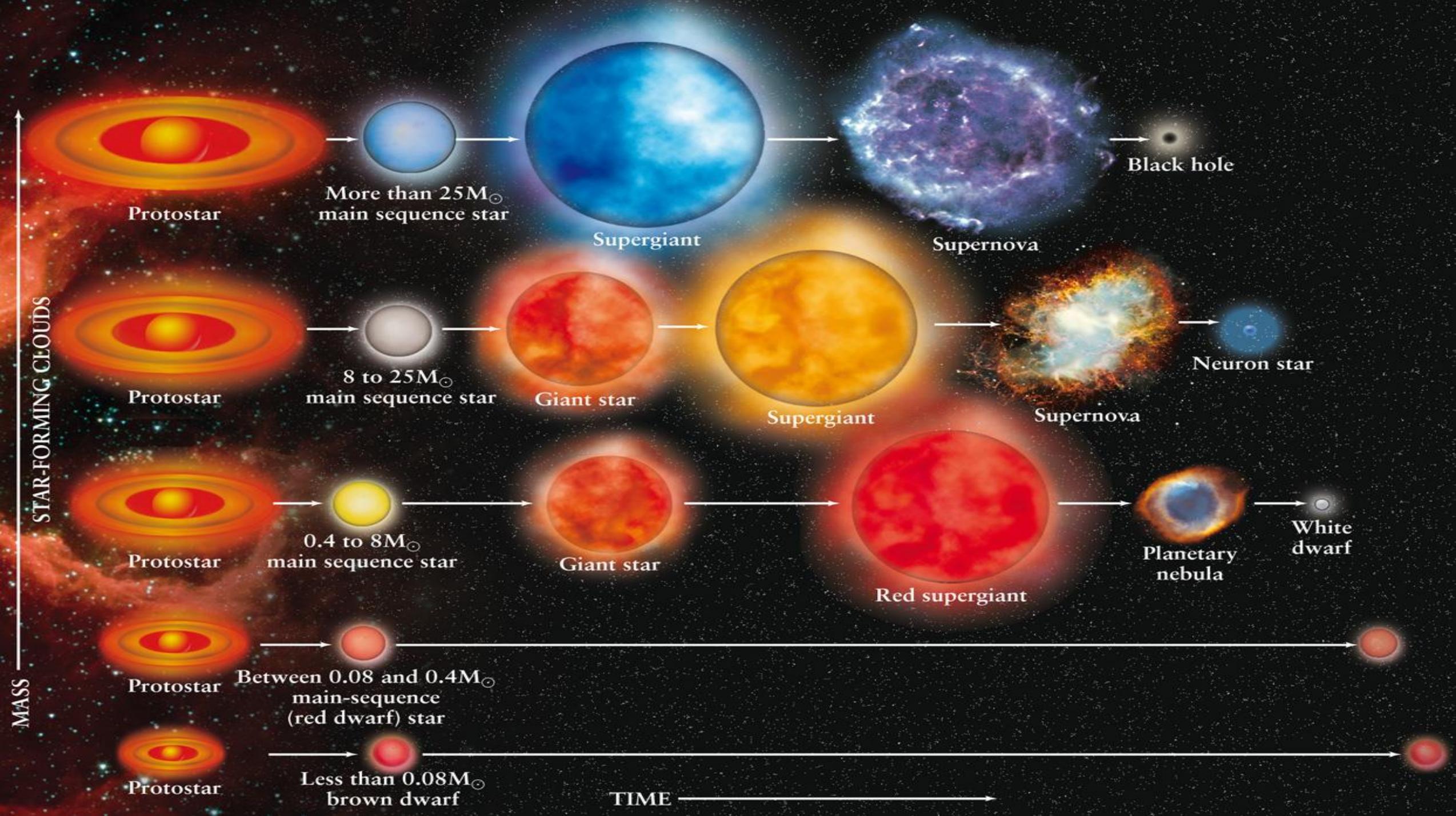
- Con rare eccezioni, gli elementi più pesanti dell'elio sono stati formati ad opera delle stelle
- La sezione d'urto delle reazioni nucleari ci permette di calcolare quanto è probabile formare gli elementi dei quali è composto l'universo
- LUNA, attivo ai LNGS dal 1991, studia queste reazioni e le loro sezioni d'urto

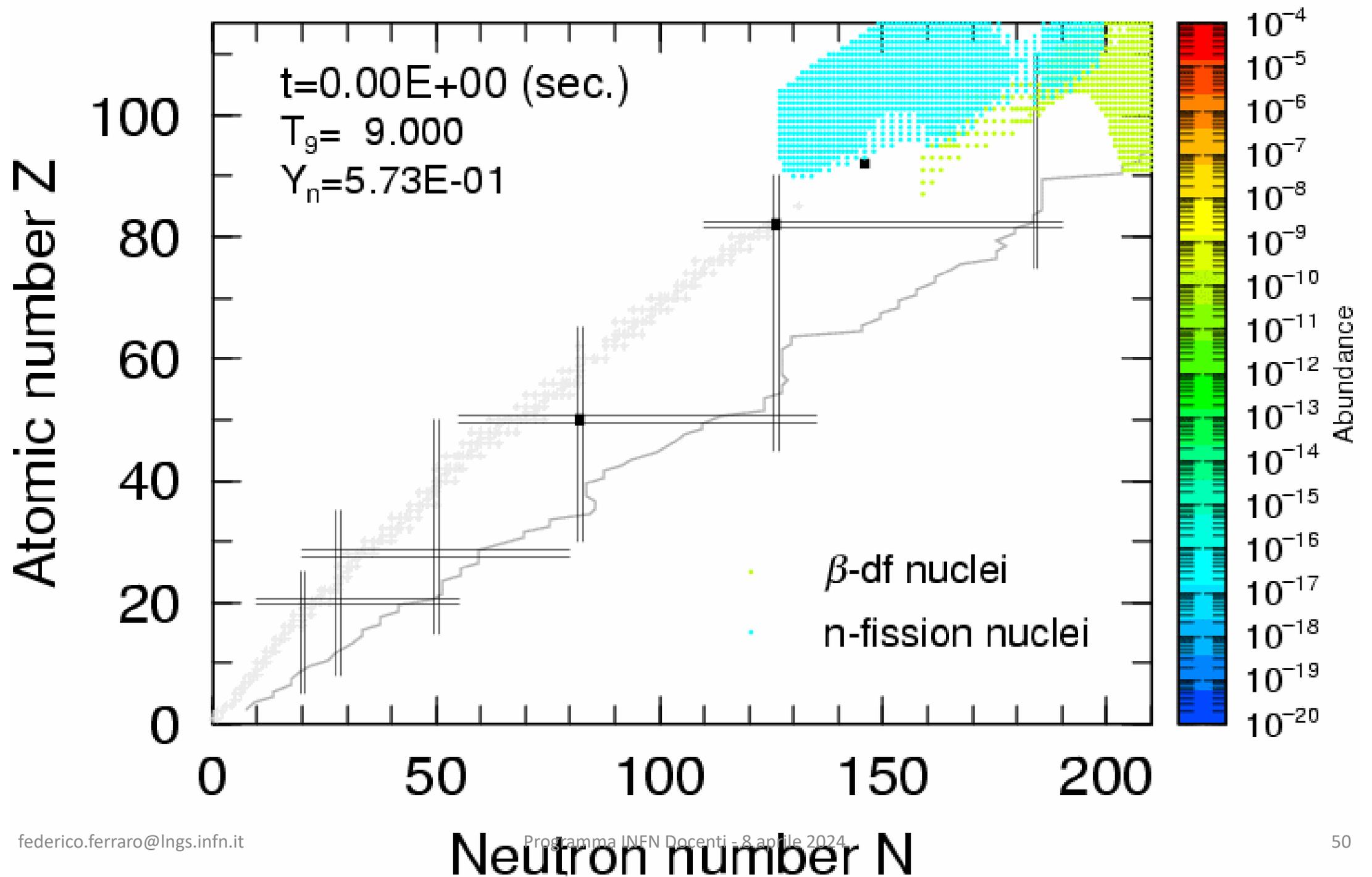


LUNA
Laboratory for Underground
Nuclear Astrophysics

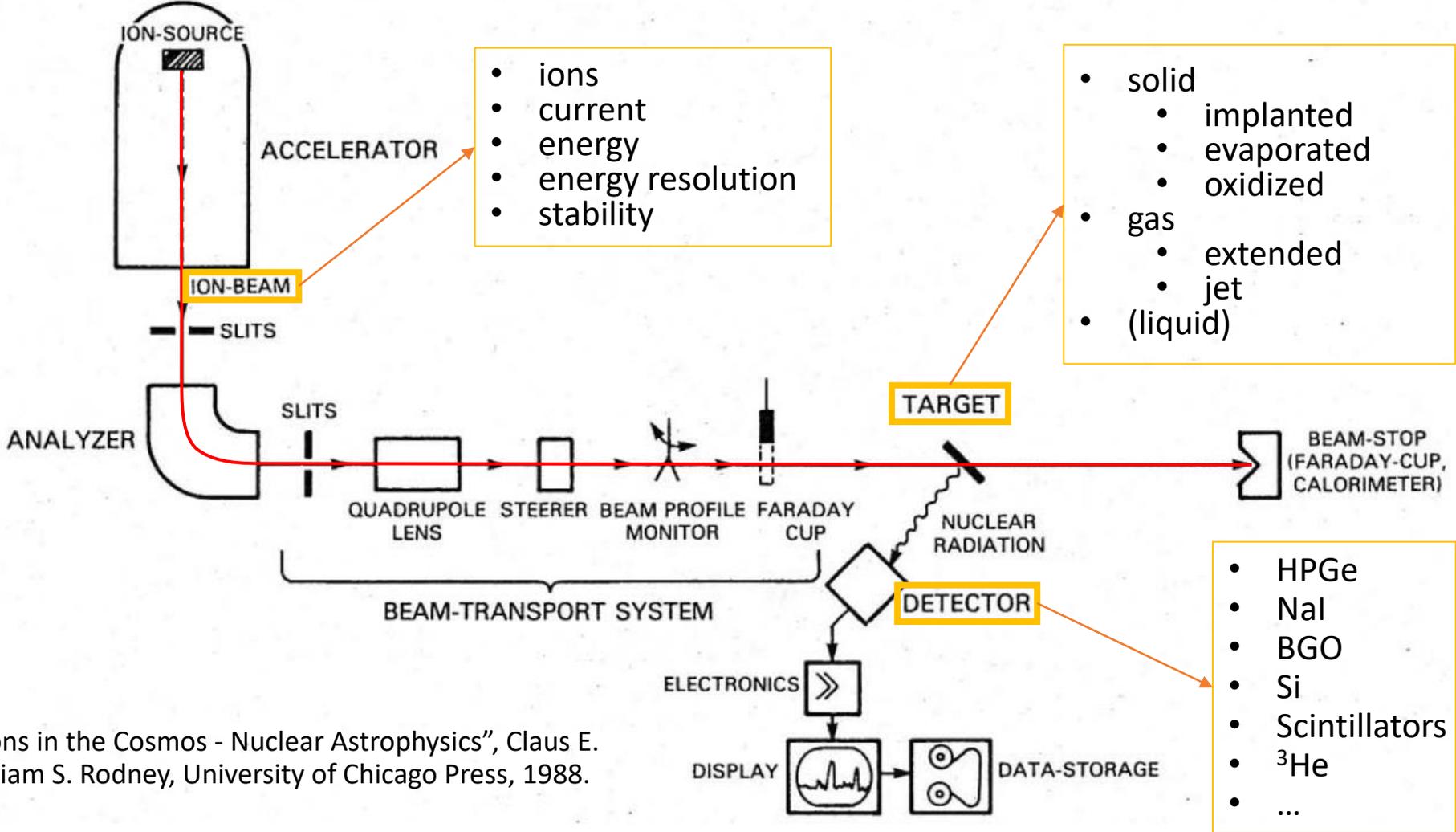


Fate domande!!!





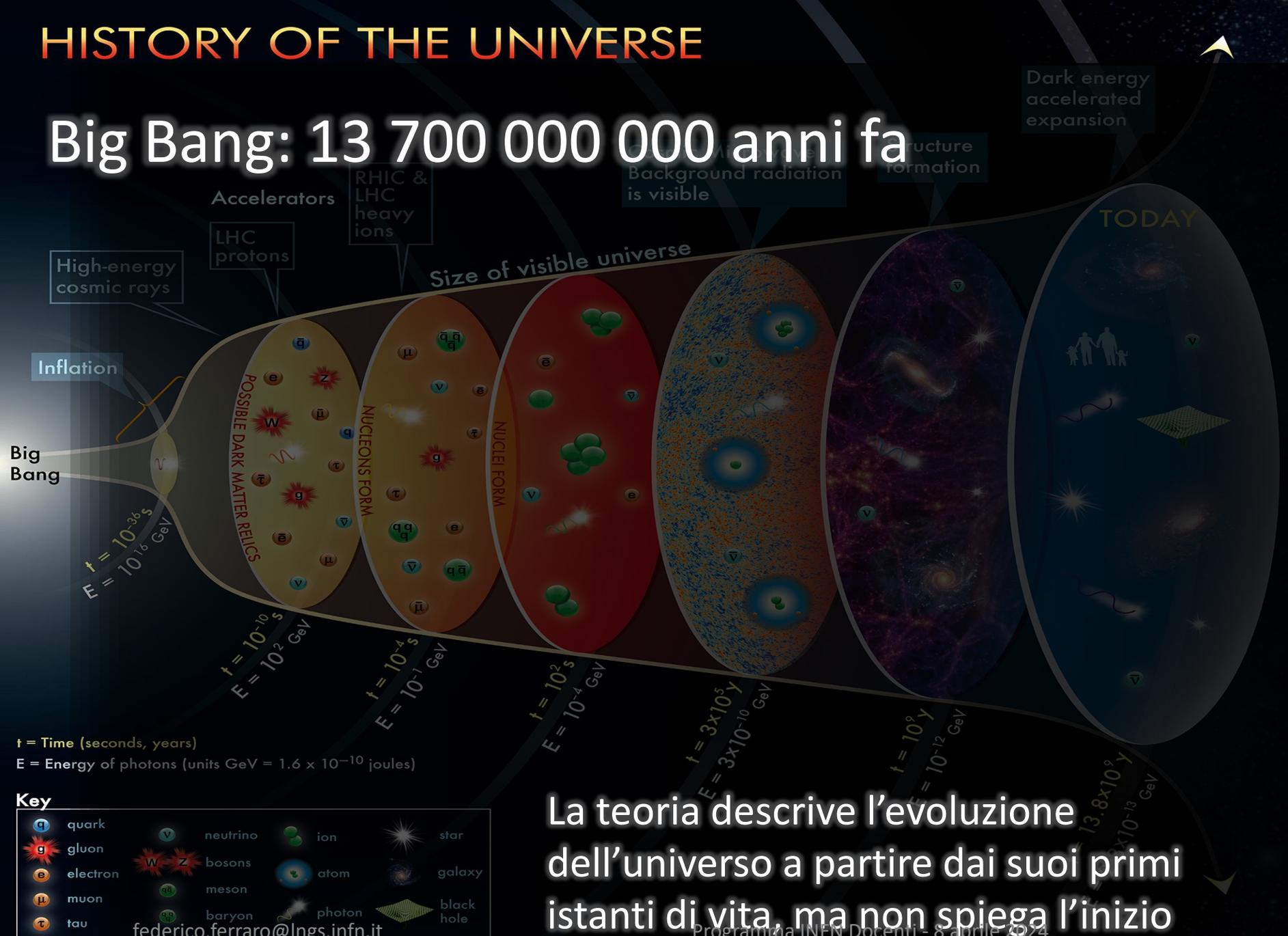
How to measure a nuclear cross section



From "Cauldrons in the Cosmos - Nuclear Astrophysics", Claus E. Rolfs and William S. Rodney, University of Chicago Press, 1988.

HISTORY OF THE UNIVERSE

Big Bang: 13 700 000 000 anni fa



The universe begins in 5...

La teoria descrive l'evoluzione dell'universo a partire dai suoi primi istanti di vita, ma non spiega l'inizio

t = Time (seconds, years)
E = Energy of photons (units GeV = 1.6 x 10⁻¹⁰ joules)

Key

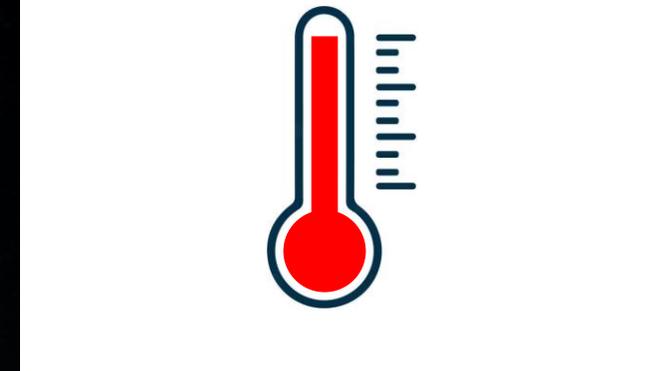
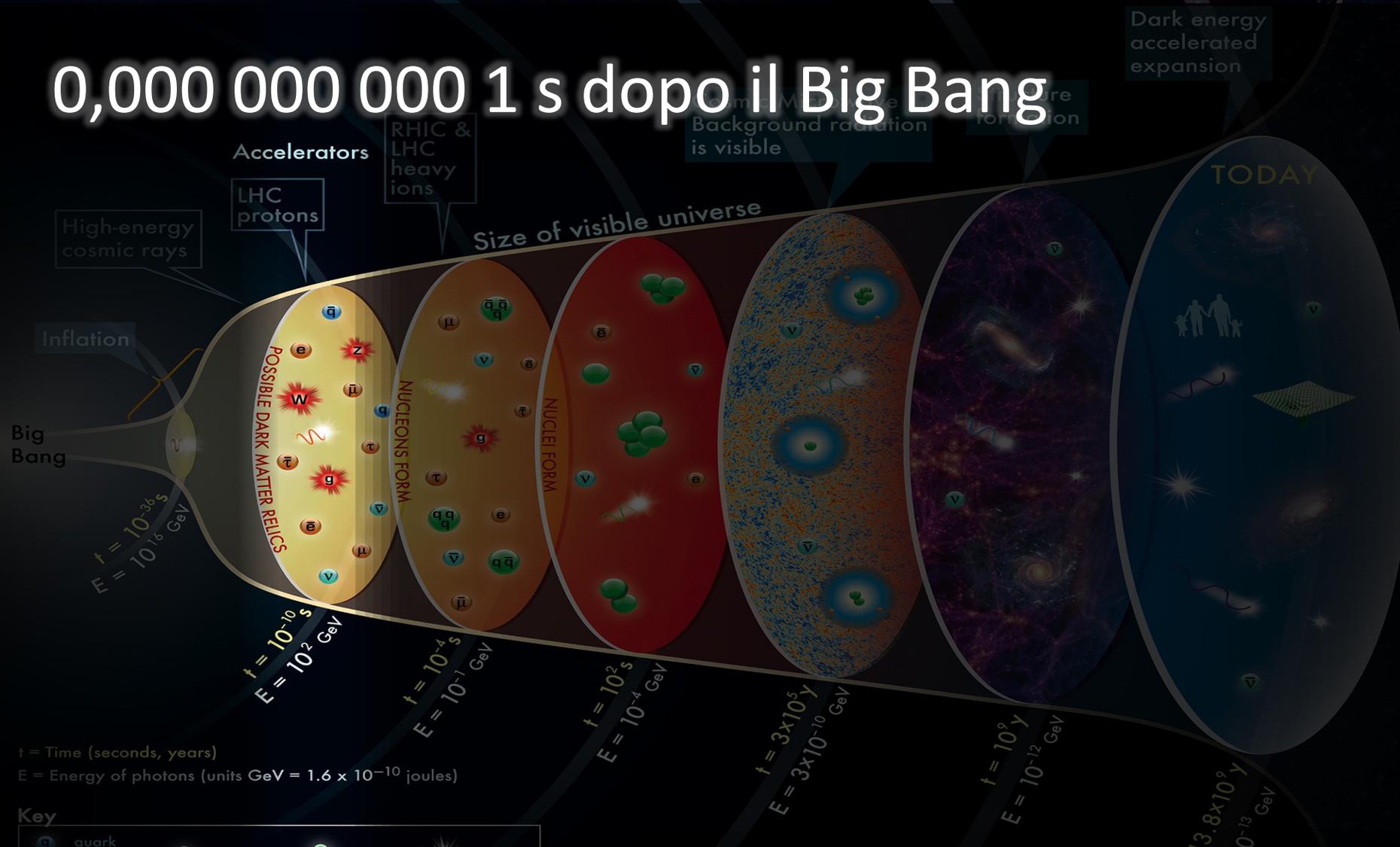
quark	neutrino	ion	star
gluon	bosons	atom	galaxy
electron	meson	photon	black hole
muon	baryon		
tau			

federico.ferraro@lngs.infn.it

The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

HISTORY OF THE UNIVERSE

0,000 000 000 1 s dopo il Big Bang



T = 1 160 000 000 000 000 °C

t = Time (seconds, years)
E = Energy of photons (units GeV = 1.6 x 10⁻¹⁰ joules)

Key

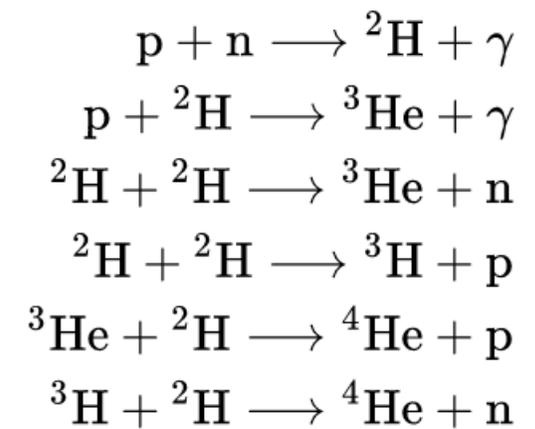
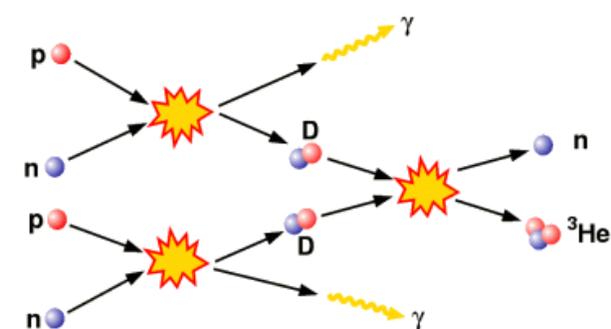
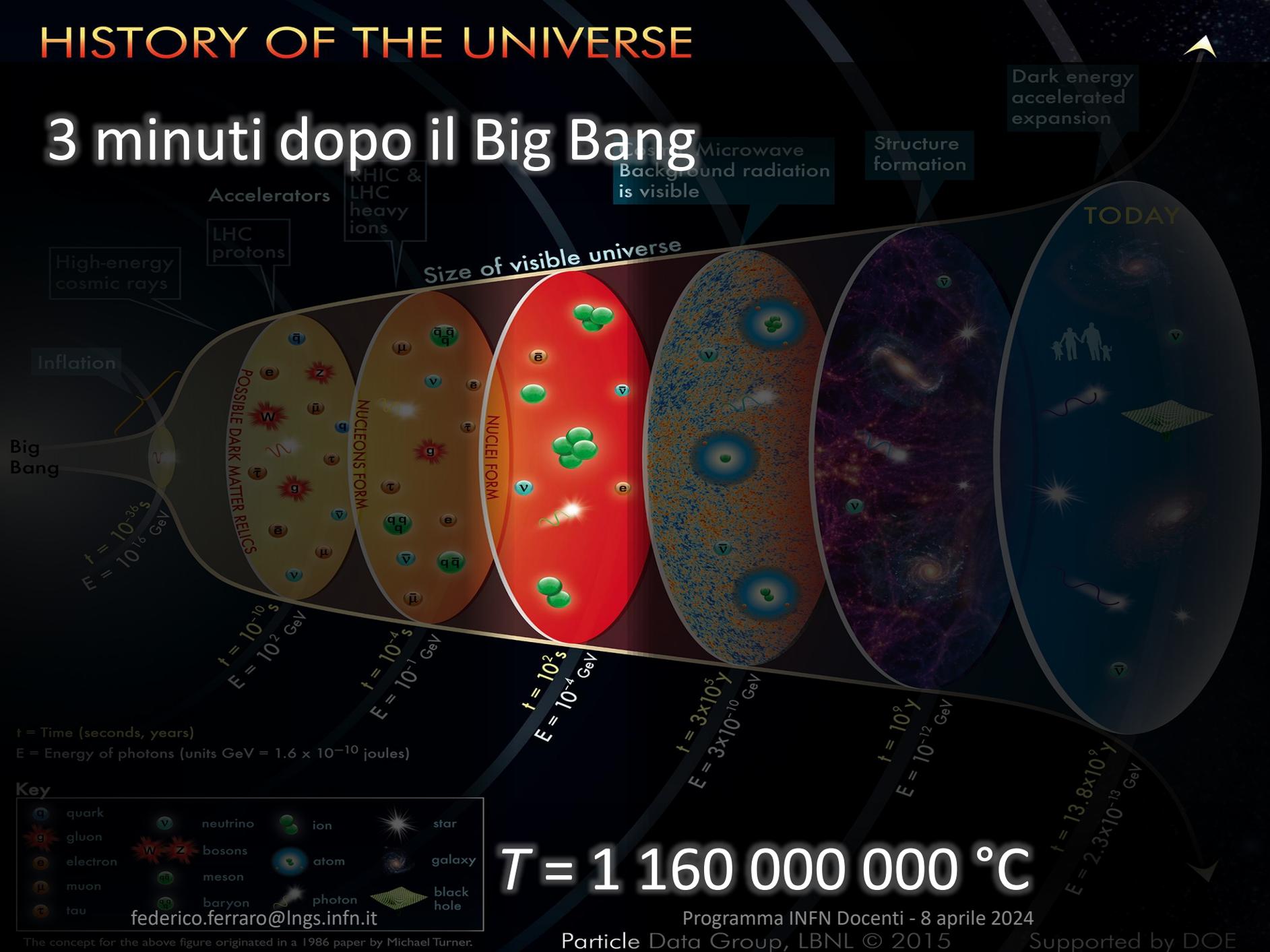
quark	neutrino	ion	star
gluon	W, Z bosons	atom	galaxy
electron	meson	photon	black hole
muon	baryon		
tau			

federico.ferraro@lngs.infn.it

The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

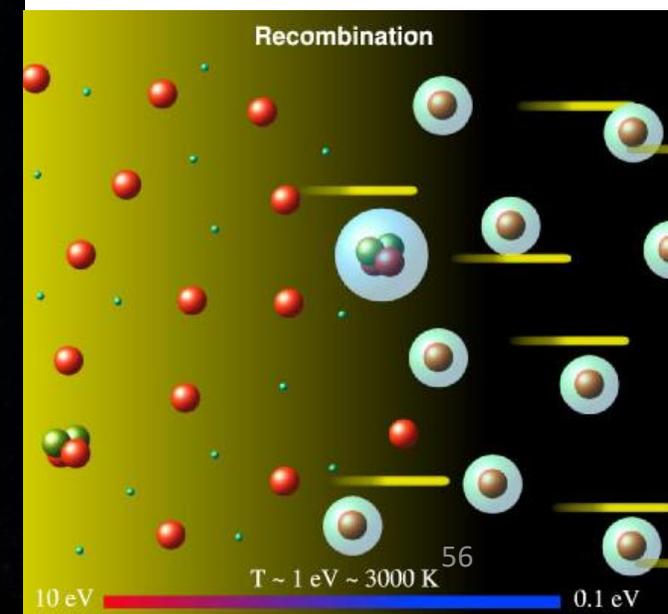
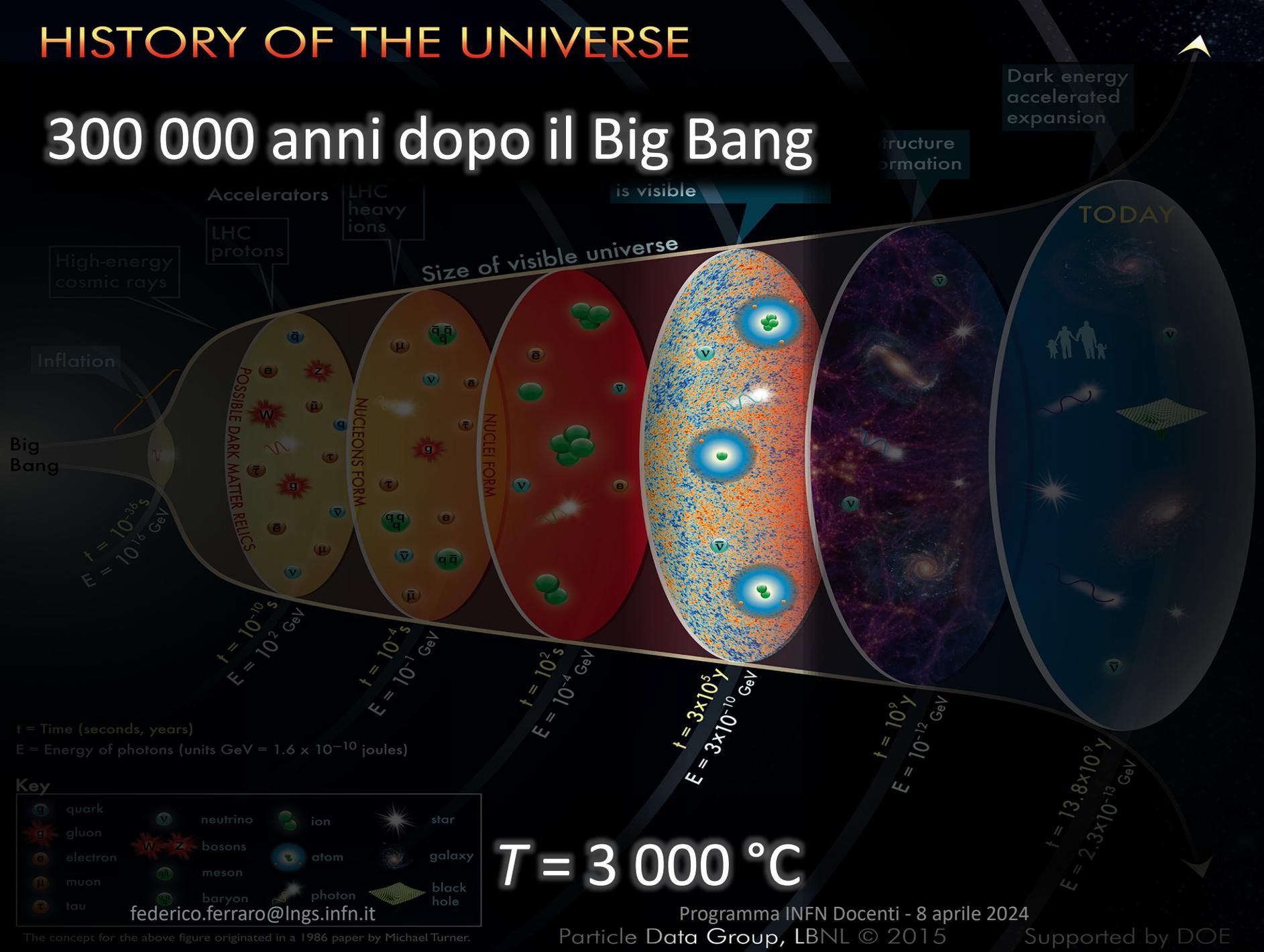
HISTORY OF THE UNIVERSE

3 minuti dopo il Big Bang



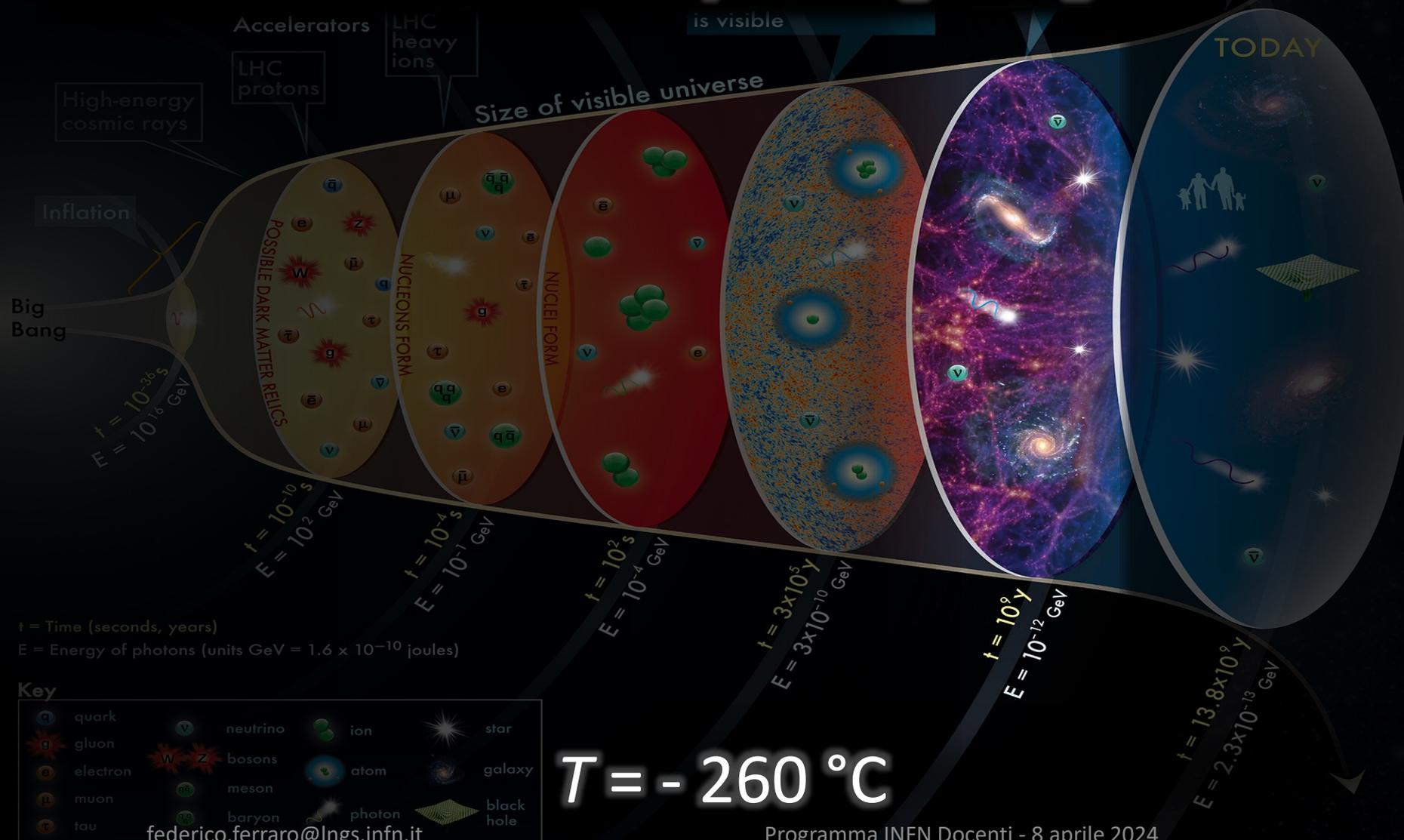
HISTORY OF THE UNIVERSE

300 000 anni dopo il Big Bang

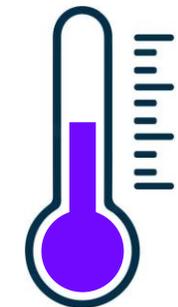


HISTORY OF THE UNIVERSE

1 000 000 000 anni dopo il Big Bang

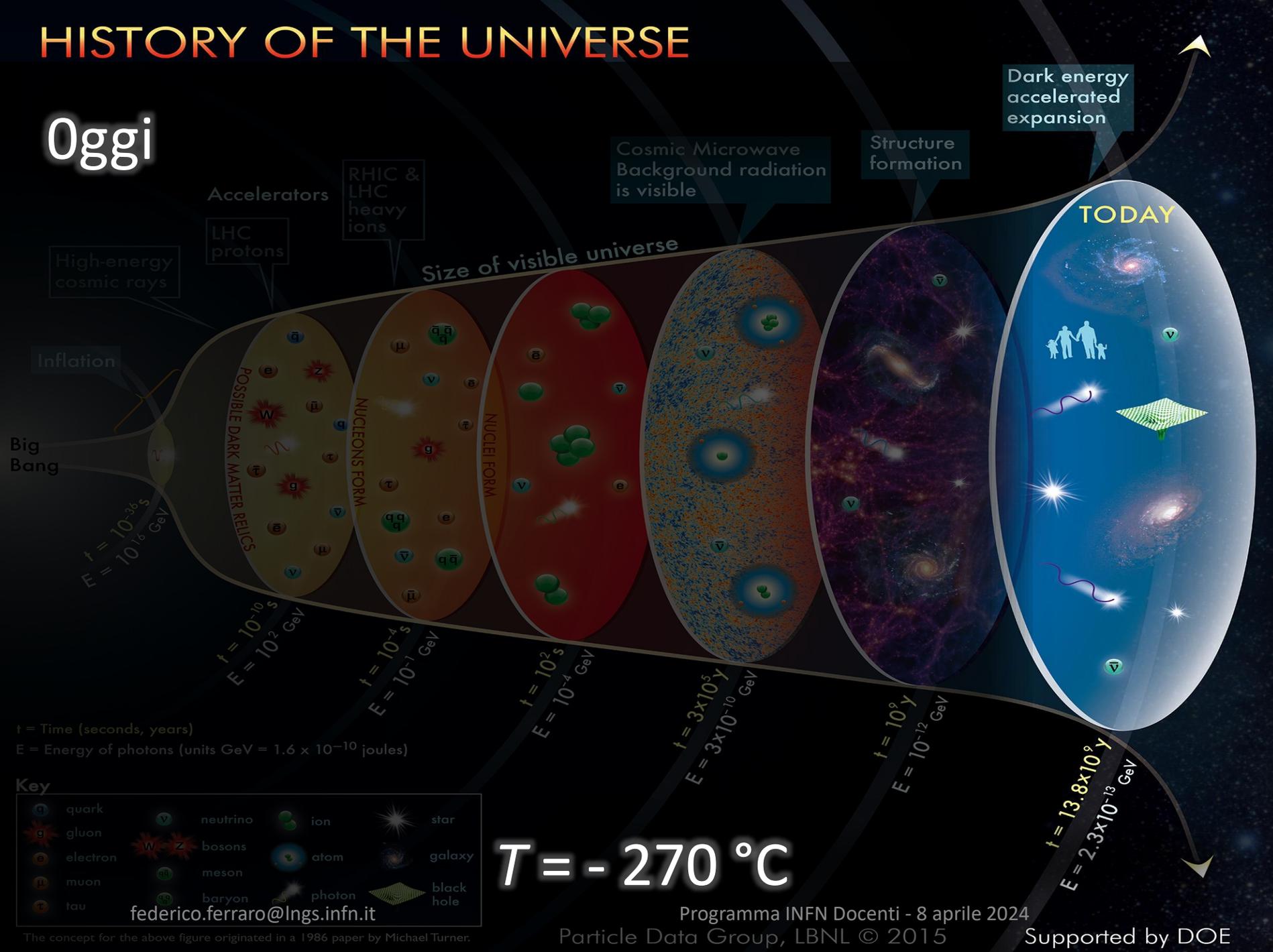


T = -260 °C



HISTORY OF THE UNIVERSE

Oggi



$T = -270 \text{ } ^\circ\text{C}$

t = Time (seconds, years)
E = Energy of photons (units GeV = 1.6×10^{-10} joules)

Key

quark	neutrino	ion	star
gluon	bosons	atom	galaxy
electron	meson	photon	black hole
muon	baryon		
tau			

federico.ferraro@lngs.infn.it