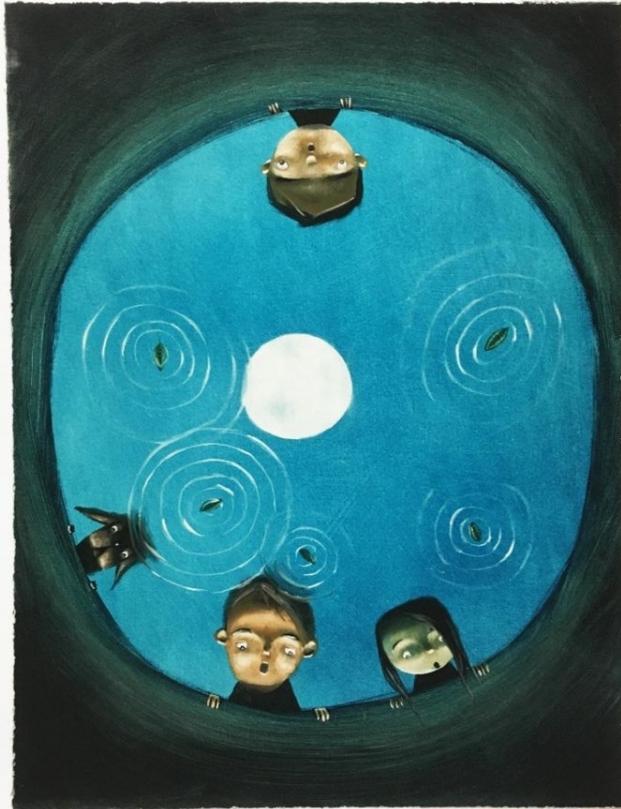


LO STUDIO DELLE STELLE NEI LABORATORI SOTTERRANEI

Testimonianze di
Sandra Zavatarelli
Genova, 27 Aprile 2021



24/50 ~ le lune nel posto! ~ Diego Rivera

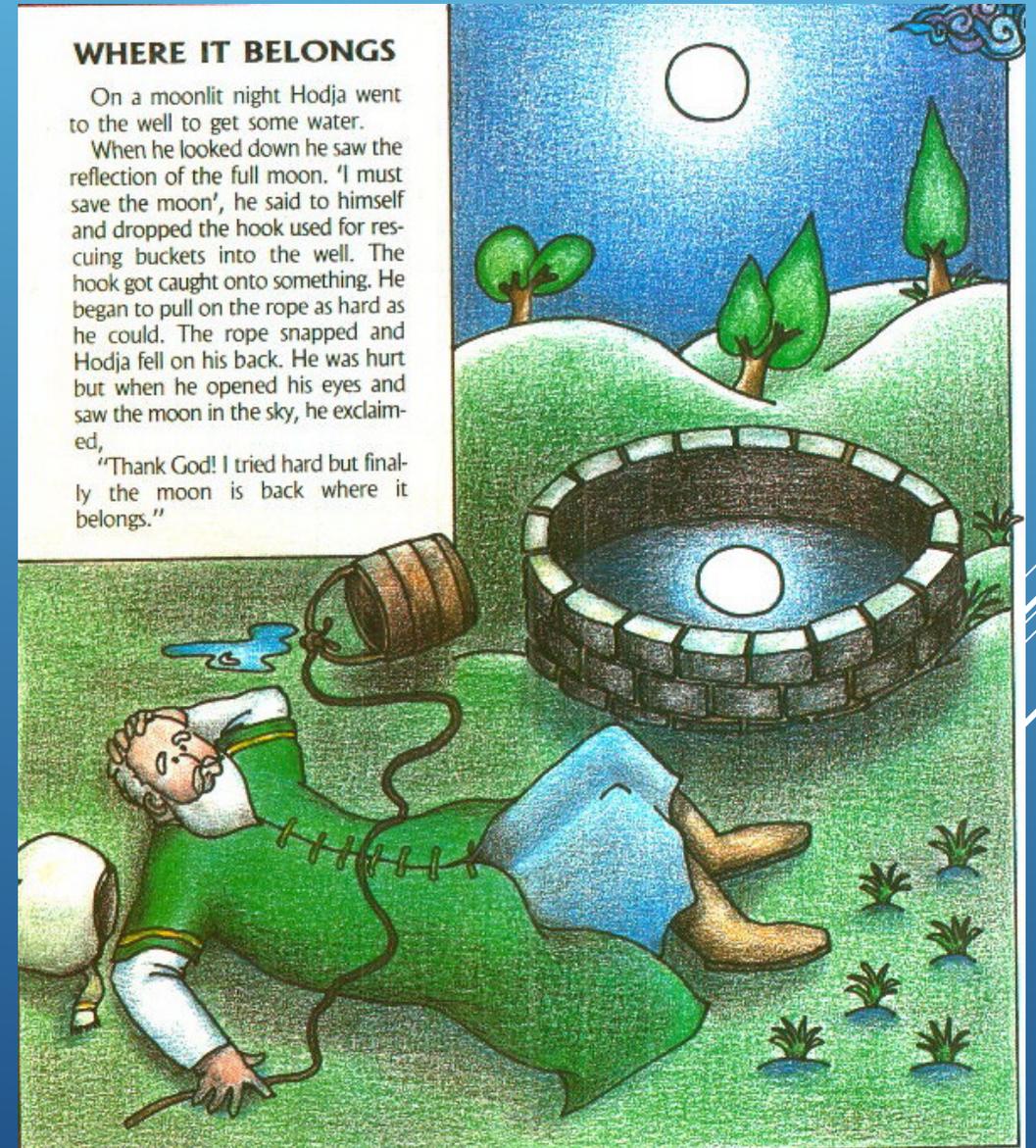
LA LUNA NEL POZZO

“Una notte Hodja camminava nei pressi di un pozzo quando sentì l’impulso di guardare dentro. Stupito vide il riflesso della luna nell’acqua e esclamò: **“La luna è caduta nel pozzo. La devo salvare in qualche modo!”**”

Si guardò attorno e raccolse una fune con un uncino, la gettò nel pozzo e gridò: **“Afferra l’uncino, Luna, e tienilo stretto! Ti tirerò fuori”**. La fune si impigliò in una roccia dentro il pozzo e Hodja tirò verso di sé la fune con tutte le sue forze. Di colpo l’uncino si liberò dalla roccia e Hodja finì disteso per terra.

Con gli occhi rivolti al cielo vide sopra di lui la luna in alto nel cielo. **“Che fatica, ma ne è valsa la pena, sono riuscito a liberare la luna dal pozzo”**, disse con un sospiro di sollievo.”

Antica favola del filosofo turco Nasreddin Hoca (1208)





Le Stelle



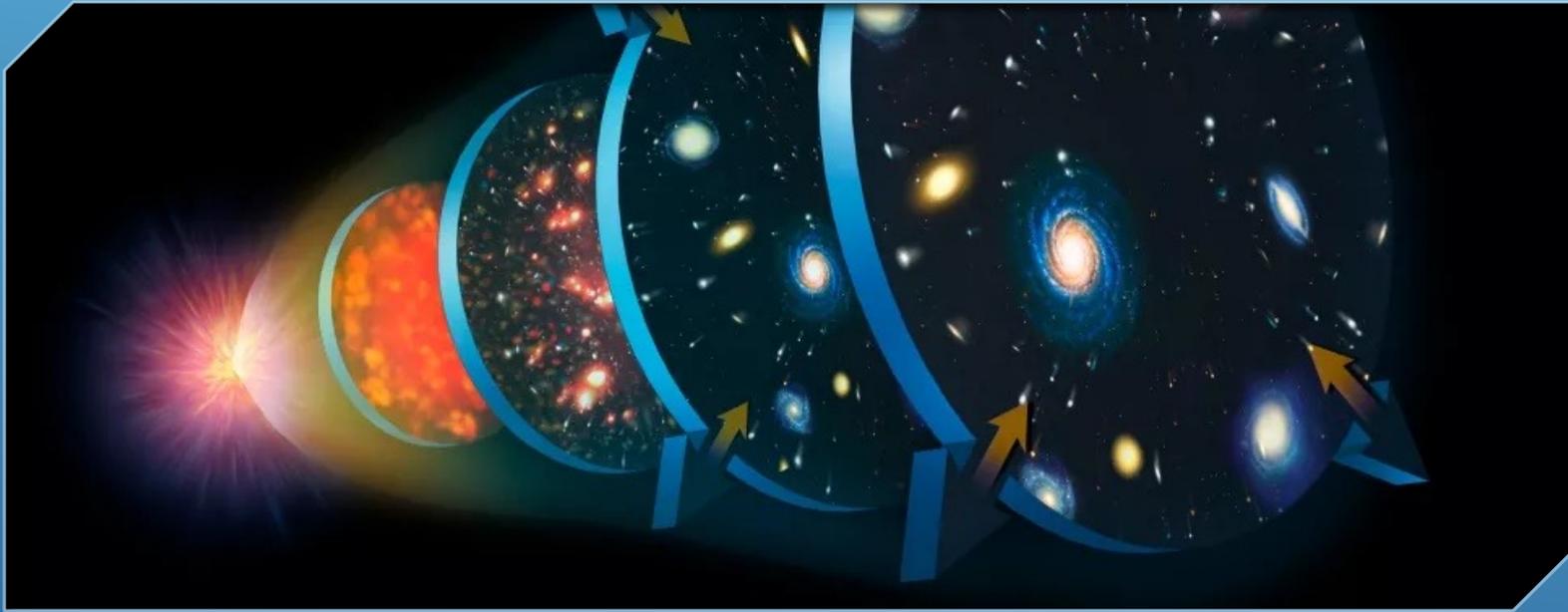
La nostra curiosità' ...



Luoghi sotterranei



Strumenti



LE STELLE :

L'UNIVERSO
DAL BIG BANG AI NOSTRI GIORNI

L'UNIVERSO..

✓ Noi lo osserviamo dalla nostra “navicella spaziale”: la Terra

la Terra e' il terzo pianeta del Sistema Solare: abbiamo altri sette “Fratelli” ruotanti con noi attorno al Sole:

1.Mercurio

4.Marte

7.Urano

2.Venere

5.Giove

8.Nettuno

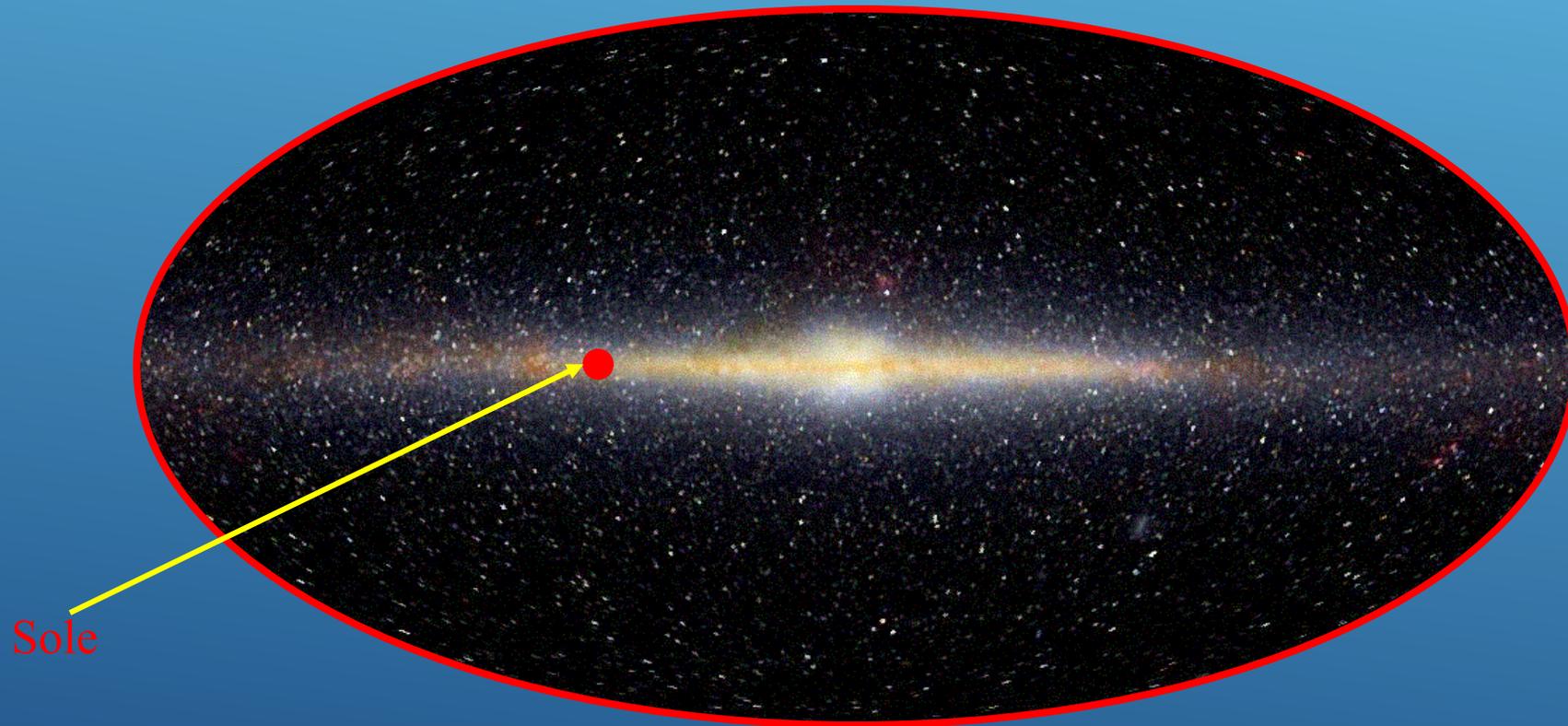
3.Terra

6.Saturno



LA NOSTRA GALASSIA

Il **Sole** è solo una dei 100 miliardi di stelle che popolano la nostra Galassia

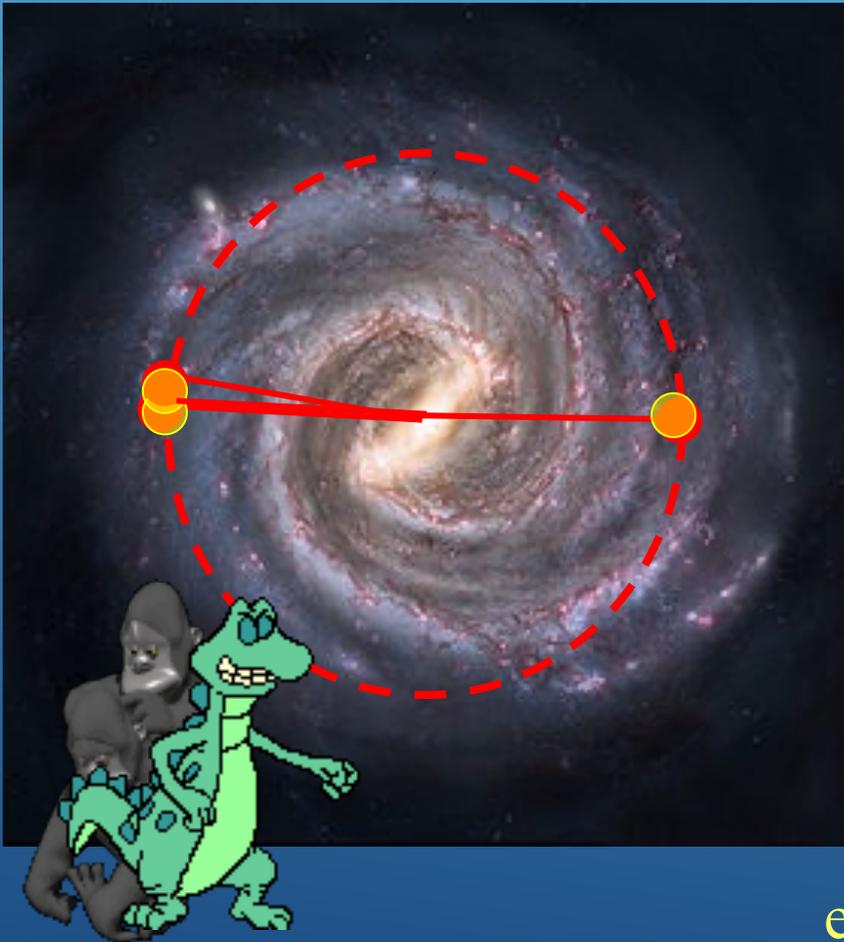


Sole

La Galassia ha la forma di un disco
Il suo raggio è pari a 100.000 anni luce

1 anno luce = 10.000.000.000.000 km (10 mila miliardi km)

UOMO VS DINOSAURI



- ▶ Il nostro Sole con tutti i suoi pianeti impiega circa 360 milioni di anni a compiere una rotazione completa
- ▶ L'uomo e' apparso sulla Terra un milione di anni or sono...
- ▶ Il Sole ha percorso in questo tempo un arco di meno di un grado !!
- ▶ I dinosauri hanno dominato il pianeta Terra molto piu' a lungo! Sono vissuti per quasi mezza circonferenza (180 milioni di anni)



e... dove si trova la nostra Galassia ?

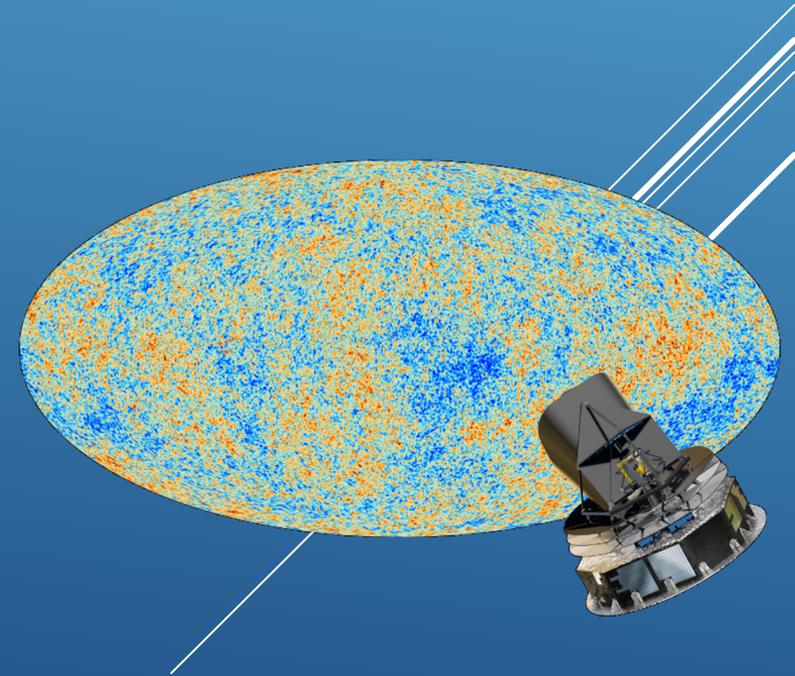
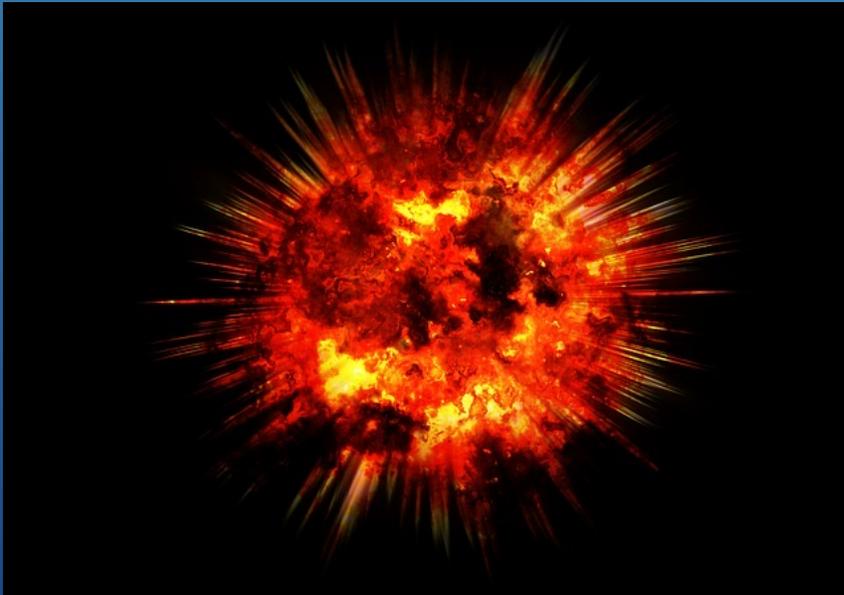
Essa non è che una dei 100 miliardi di galassie che popolano uniformemente l'Universo conosciuto

COME HA AVUTO ORIGINE L'UNIVERSO?

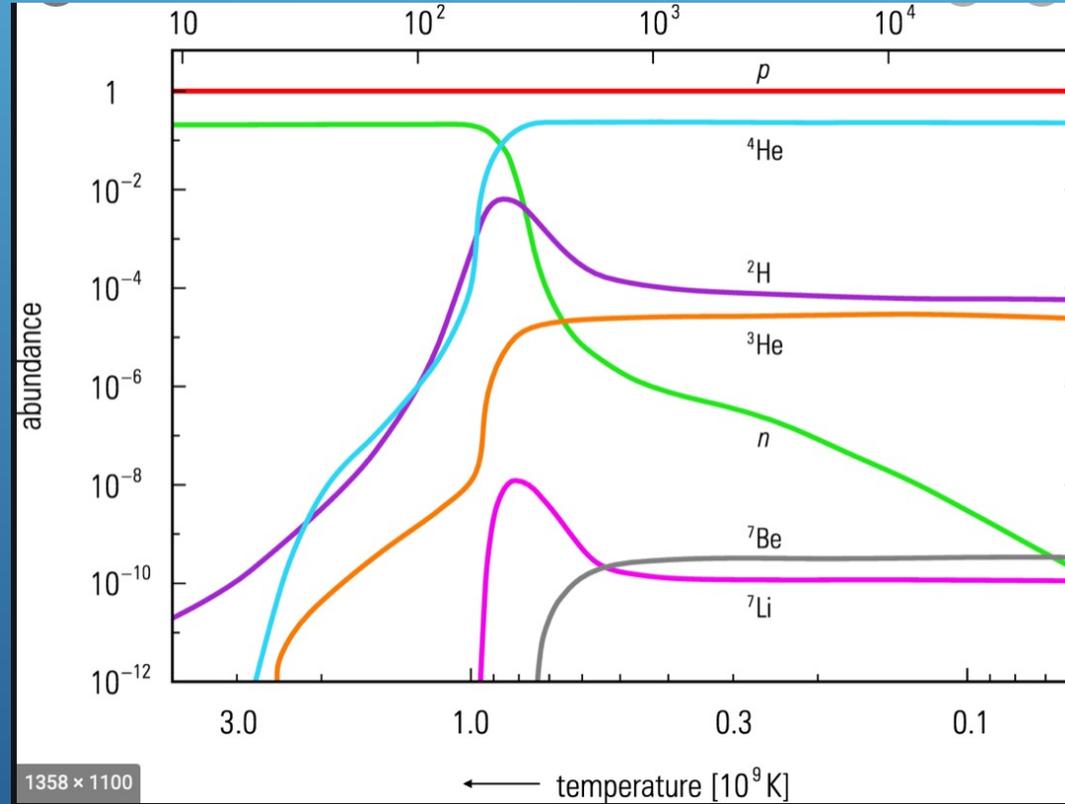
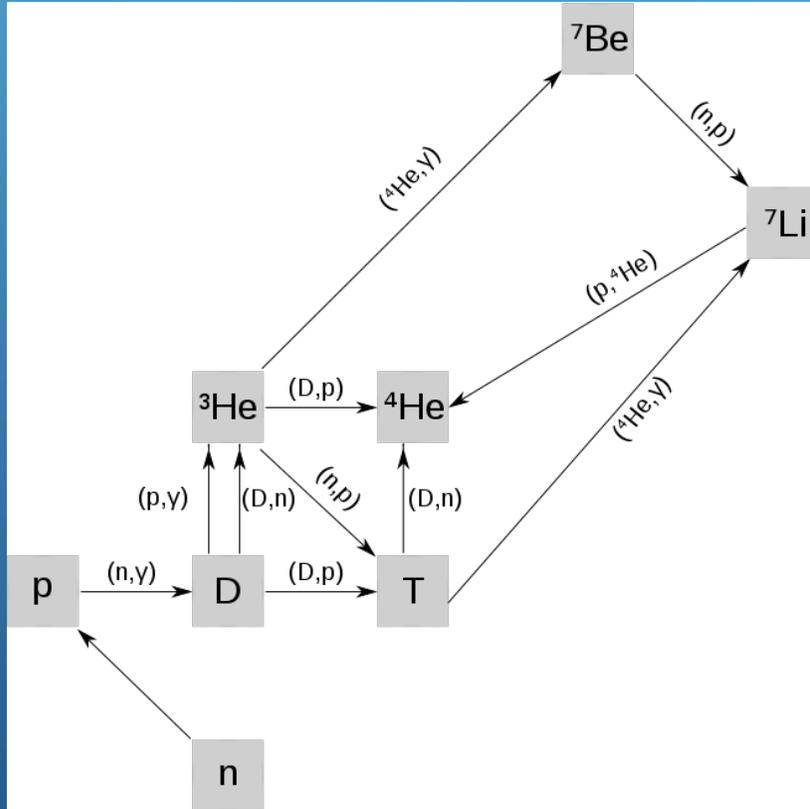
- ▶ In un lontano passato (\approx tempo di Hubble, H^{-1}) tutta la materia contenuta nell'Universo doveva essere compressa "ovunque" ad una densità arbitrariamente elevata.
- ▶ L'età dell'Universo è stimata essere 13.72 ± 0.12 miliardi di anni

Modello del Big Bang: pilastri

- Espansione delle galassie (legge di Hubble: $v = H_0 D$)
- Misura della radiazione cosmica di fondo (cioè della luce emessa dopo 380000 anni, quando l'Universo ha cessato di essere opaco)
- Le abbondanze degli elementi leggeri



L'ABBONDANZA DEGLI ELEMENTI LEGGERI



Pochi minuti dopo il Big Bang, quando la temperatura è scesa sotto 10^9 gradi si sono attivate delle reazioni nucleari => produzione elementi leggeri (He, D, Li, Be)

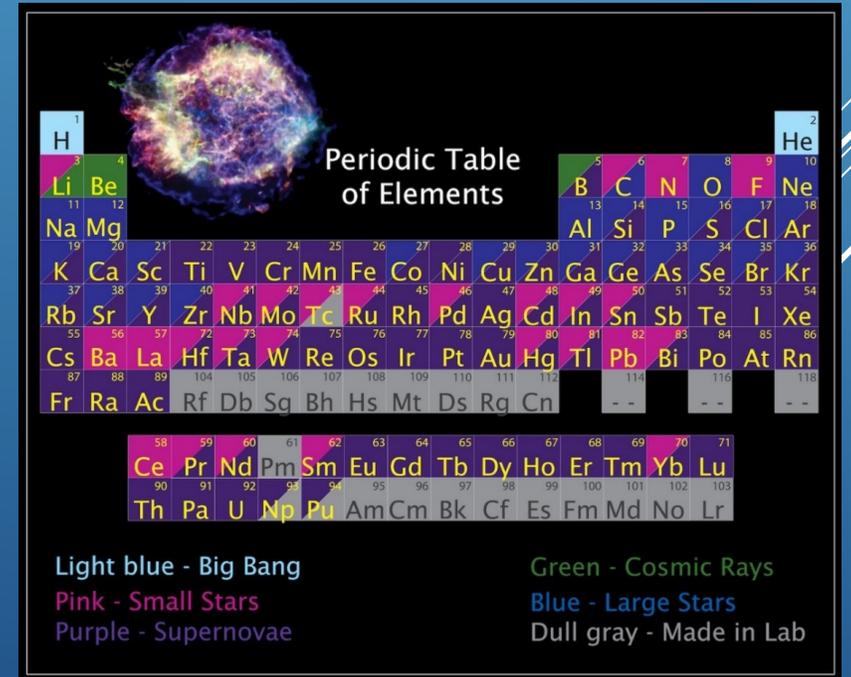
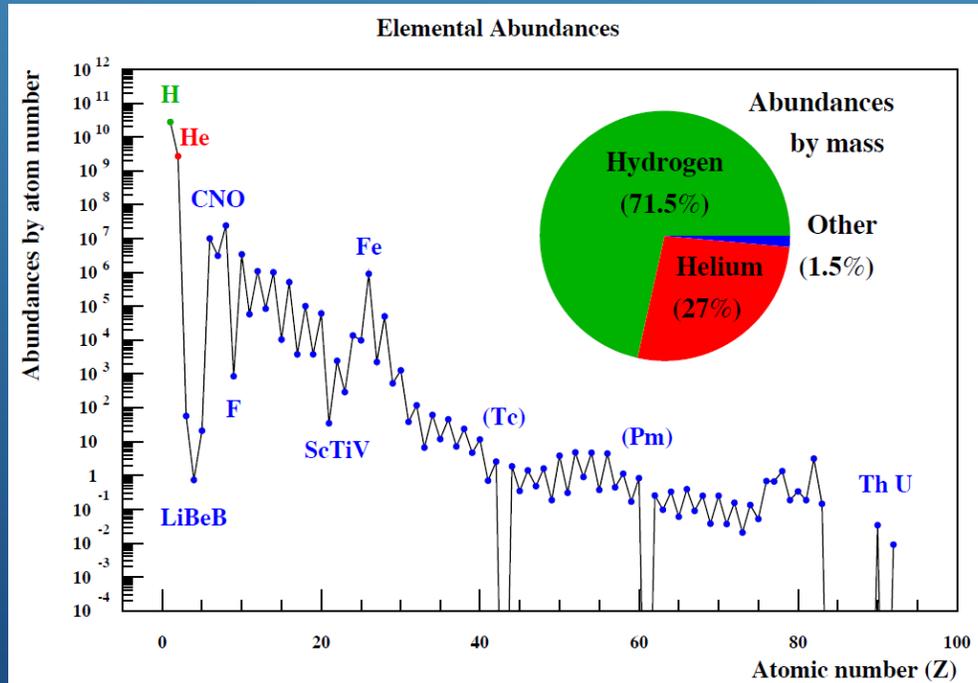
Le **predizioni** basate sulla teoria del Big Bang **concordano con le osservazioni in stelle molto antiche** (con poche eccezioni)

MA DOVE SI SONO FORMATI GLI ALTRI ELEMENTI?

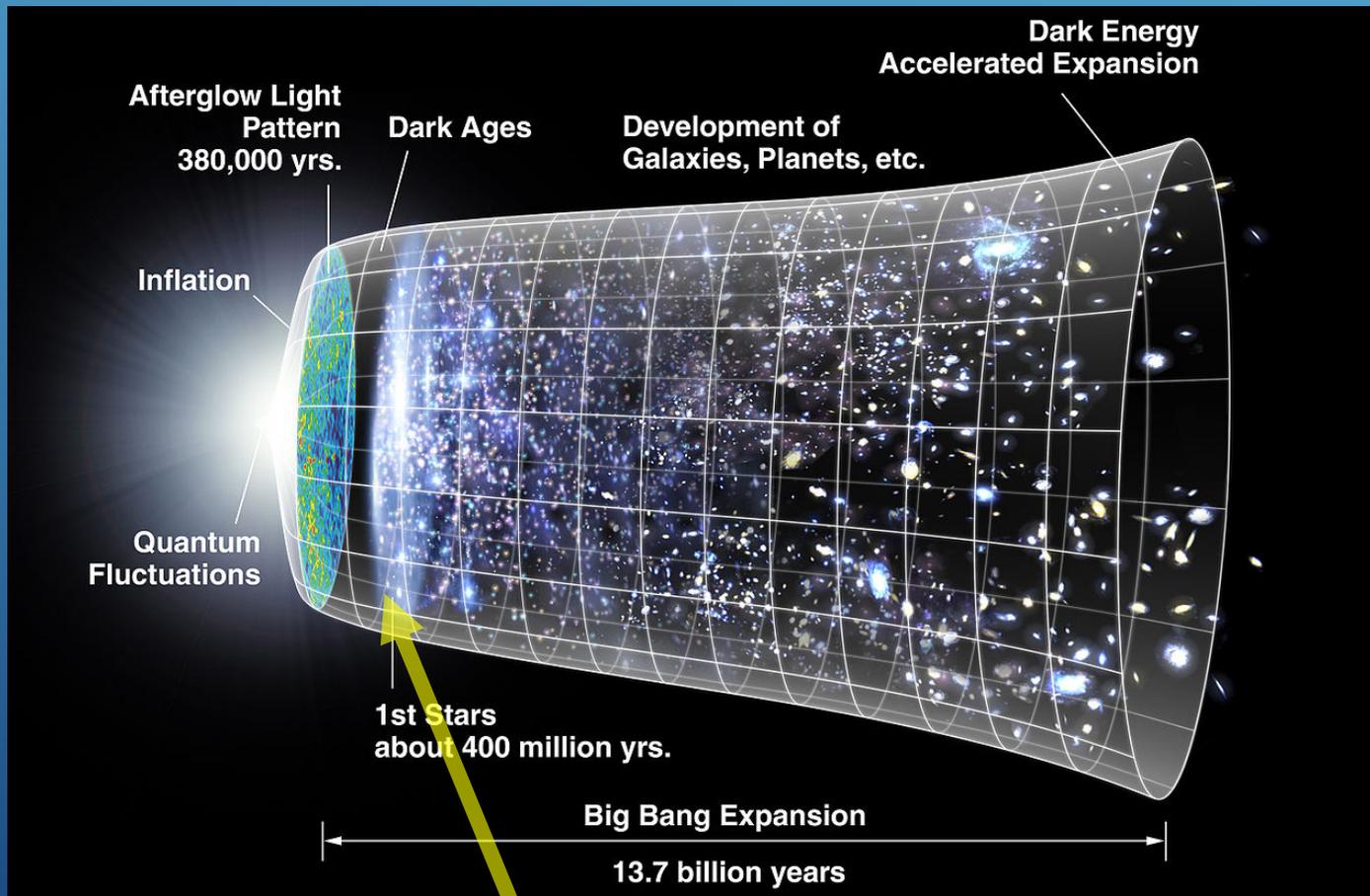
- ▶ Da dove derivano l'Ossigeno che respiriamo, il Ferro del nostro sangue, il Carbonio e l'Azoto presente nei nostri tessuti e il Calcio delle nostre ossa?

I dieci elementi più comuni nella nostra galassia

Elemento	Parti per milione
Idrogeno	739 000
Elio	240 000
Ossigeno	10 700
Carbonio	4 600
Neon	1 340
Ferro	1 090
Azoto	950
Silicio	650
Magnesio	580
Zolfo	440
Rimanti	650



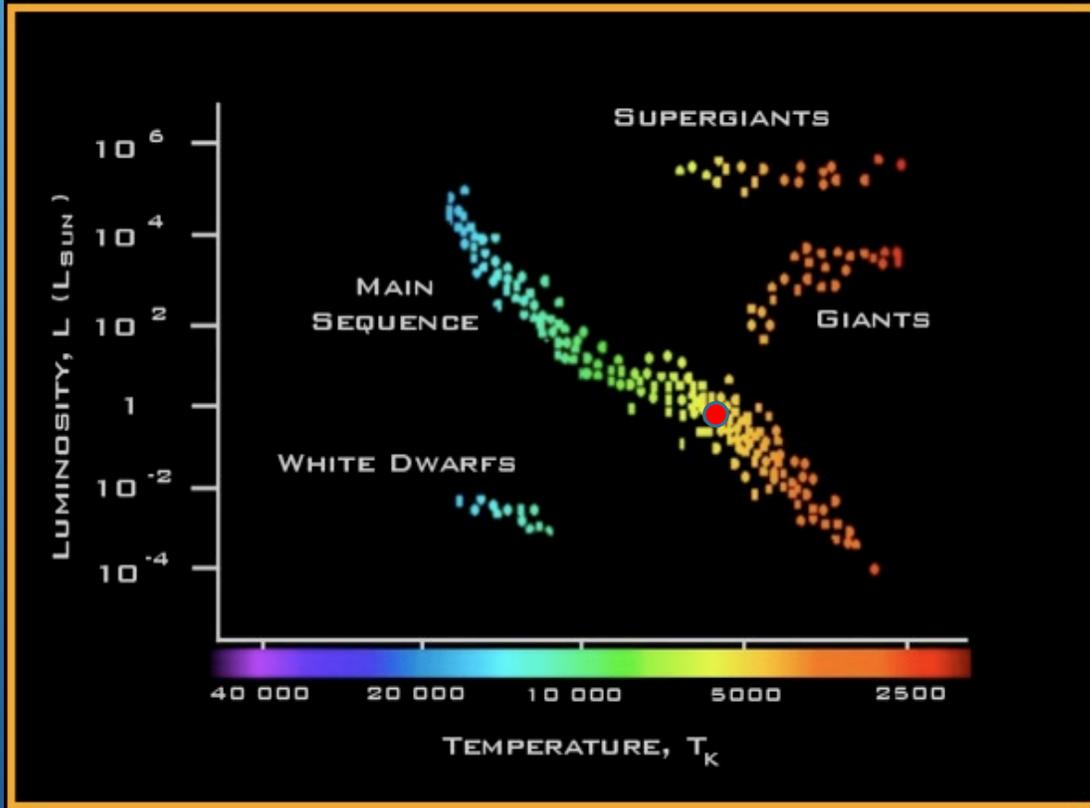
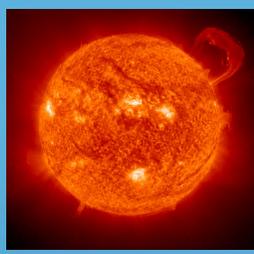
SI SONO FORMATI DOPO 380-400 MILIONI DI ANNI...



....ALL'INTERNO
DELLE STELLE

L'universo si raffredda e si formano le prime stelle

COSA SUCCEDDE DENTRO UNA STELLA?



Le stelle formano delle «famiglie»

Il Sole:

$$R_{\odot} = 6.96 \times 10^8 \text{ m}$$

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

$$T_{\odot} = 5800 \text{ K}$$

$$D_{\odot} = 150 \text{ milioni di km}$$

$$L_{\odot} = 4 \times 10^{23} \text{ kW} = 2.4 \times 10^{39} \text{ eV/s}$$

(1 eV ~ 1.6 x 10⁻¹⁹ J)

- ▶ La potenza irradiata nello spazio e' $P = 4 \cdot 10^{23} \text{ kW}$ pari a quella prodotta da 400 milioni di miliardi di centrali nucleari!! (50 milioni di centrali per ogni abitante della terra...)

SE IL SOLE FUNZIONASSE CHIMICAMENTE...

- ▶ Potere calorico delle reazioni chimiche: $Q = 3 \cdot 10^7 \text{ J/kg}$
- ▶ Massa di combustibile: $M = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
- ▶ Potenza sviluppata: $P = 4 \cdot 10^{26} \text{ W}$
- ▶ Potrebbe restare acceso per un tempo massimo pari a:
- ▶ $\Delta t = M \cdot Q / P = 10^{11} \text{ s} \sim 5.000 \text{ anni}$
- ▶ Sufficiente ad alimentare il Sole per circa 5.000 anni



Incompatibile con età della Terra
~ 4.5 miliardi di anni

Devono esistere dei meccanismi naturali che producano energia in quantità 1.000.000 di volte maggiori di quella chimica !!!

ENERGIA NUCLEARE!!!!



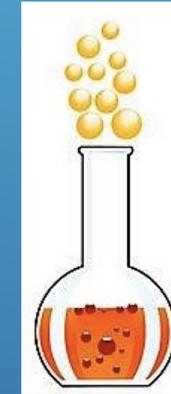
COS'E' UNA REAZIONE NUCLEARE?



Reazione Chimica : coinvolge gli elettroni esterni degli atomi e forze di natura elettrostatica



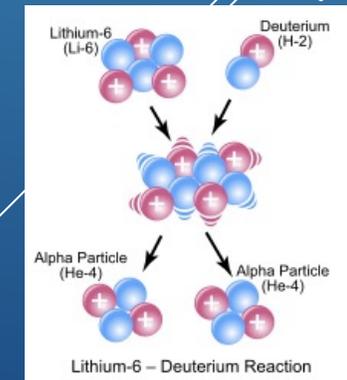
Numero atomi per molecola



Reazione Nucleare : riguarda il nucleo di un elemento chimico che viene convertito in un altro a diverso numero atomico e coinvolge le forze nucleari



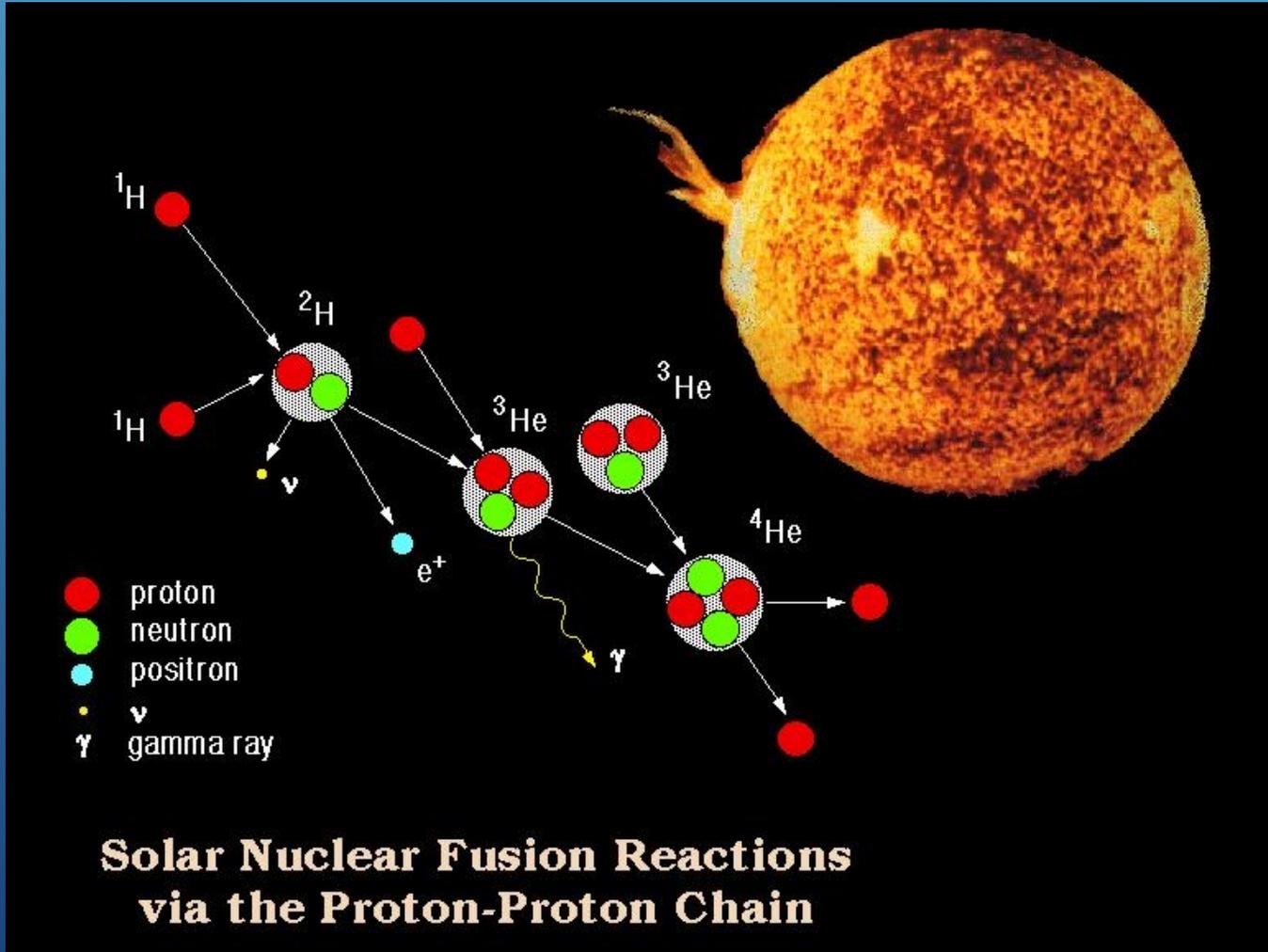
Numero nucleoni = Protoni + Neutroni



Radioattivit  naturale : decadimenti alfa, beta o gamma

LE STELLE COME REATTORI A FUSIONE

Il Sole brucia in un secondo 600 milioni di tonnellate di idrogeno!!! Come?



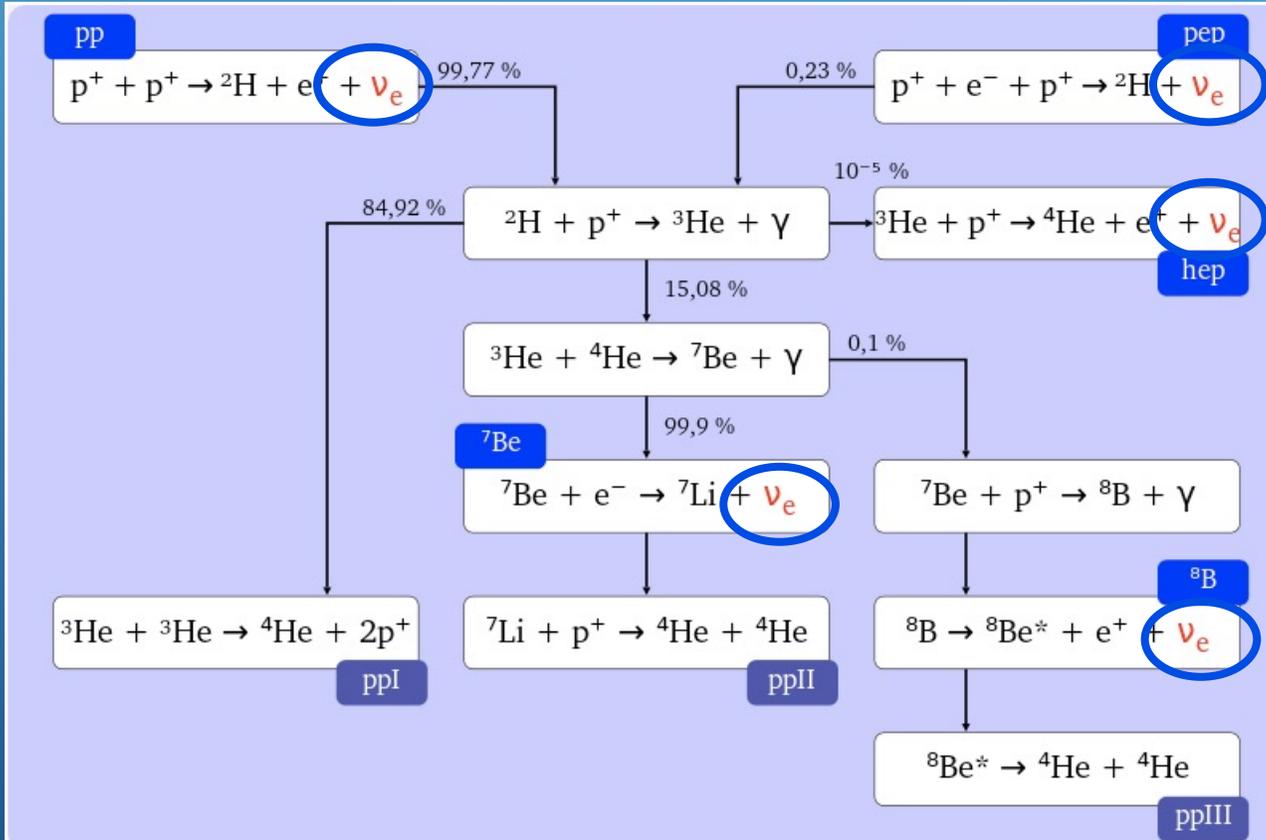
L'idrogeno viene trasformato in elio...



In realtà la probabilità di fusione contemporanea di 4 nuclei è pressoché nulla..

Il processo ha luogo attraverso una serie di reazioni a due corpi equivalenti

Combustione idrogeno: Catena protone-protone

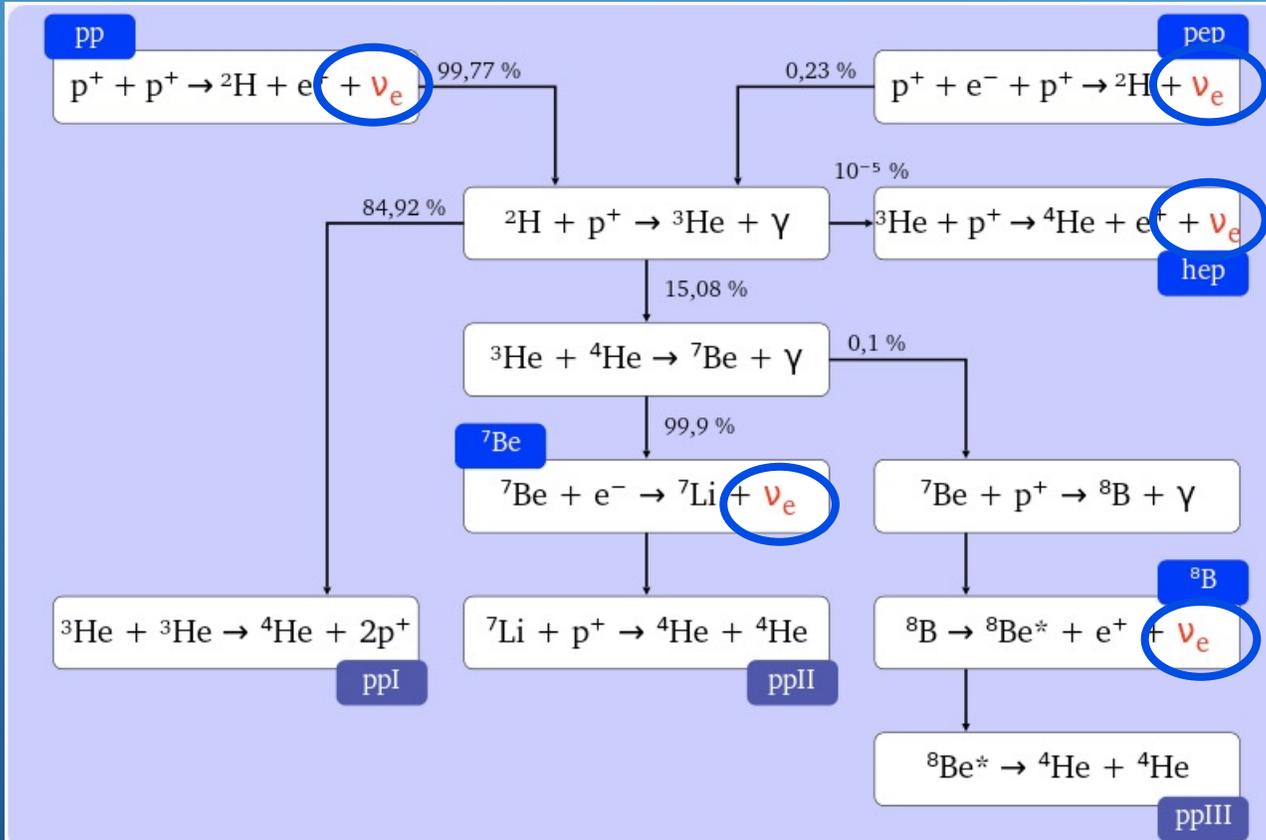


IL SOLE E LA FUSIONE

► Il 99% dell'energia solare è prodotta attraverso la catena protone-protone

Bilancio complessivo: $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$

Combustione idrogeno: Catena protone-protone



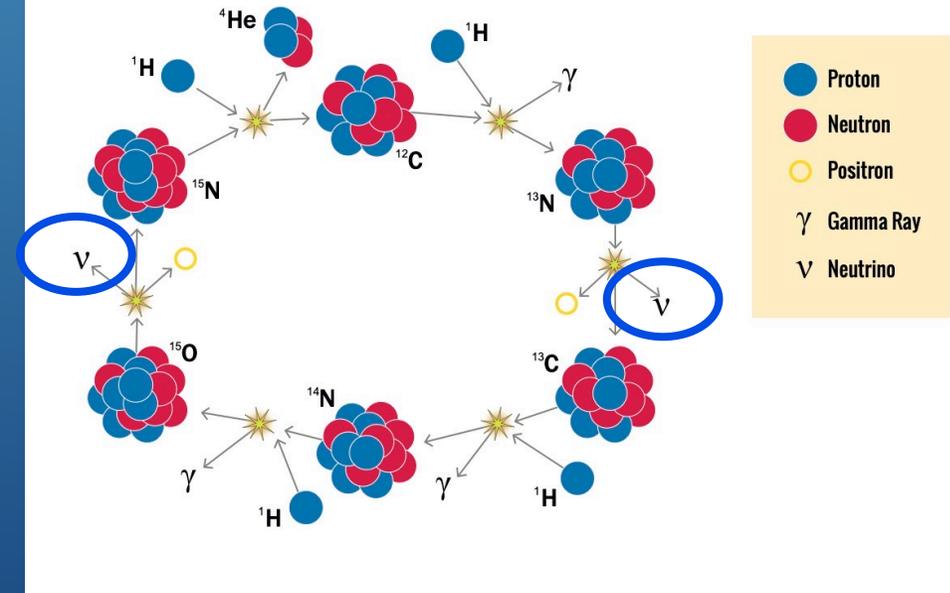
Bilancio complessivo: $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$

IL SOLE E LA FUSIONE

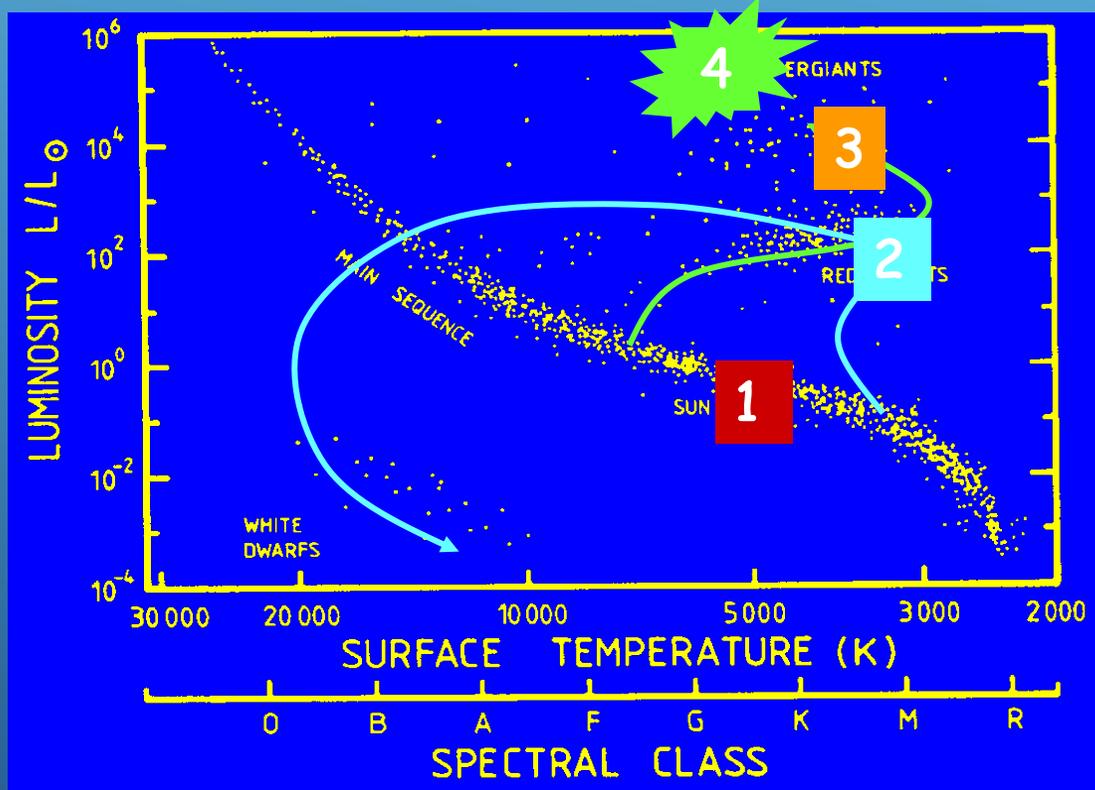
► L'1% dell'energia solare è prodotta attraverso il ciclo CNO

Il ciclo di CNO

Nel ciclo CNO, da quattro nuclei di idrogeno H (ossia quattro protoni) si produce un nucleo di elio He, due positroni (antielettroni), due neutrini ed energia rilasciata sotto forma di raggi gamma (fotoni). Questo processo di fusione dell'idrogeno avviene indirettamente attraverso i nuclei di carbonio C, azoto N e ossigeno O, che fungono da catalizzatori e da cui il ciclo prende il nome.



EVOLUZIONE DELLE STELLE: STADI SUCCESSIVI



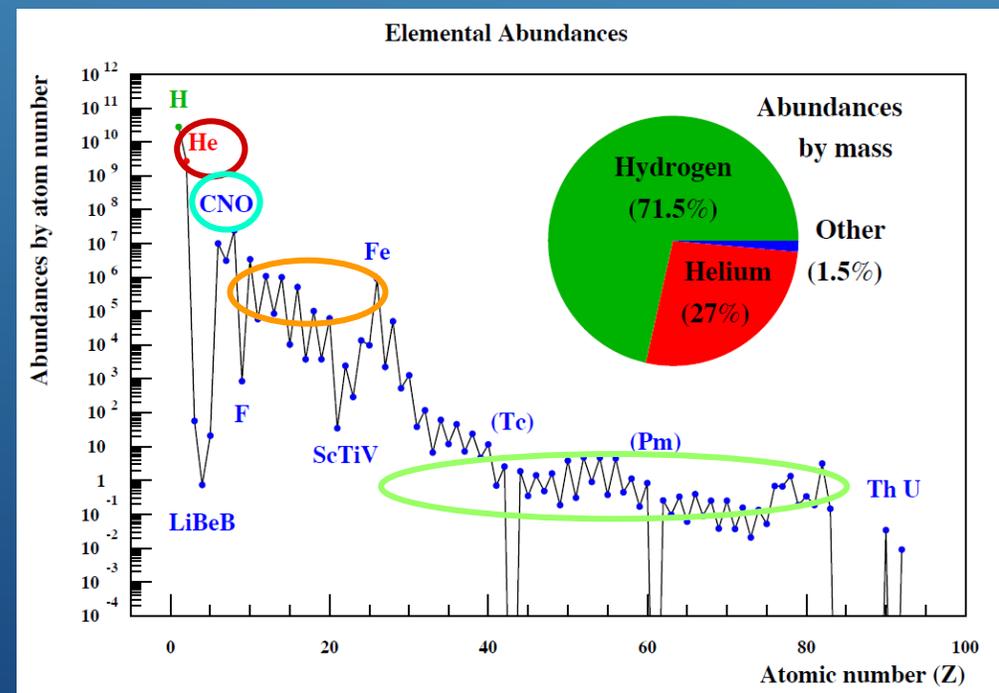
$M < 1.4 M$

La stella si spegne
(nana bianca → nana nera)

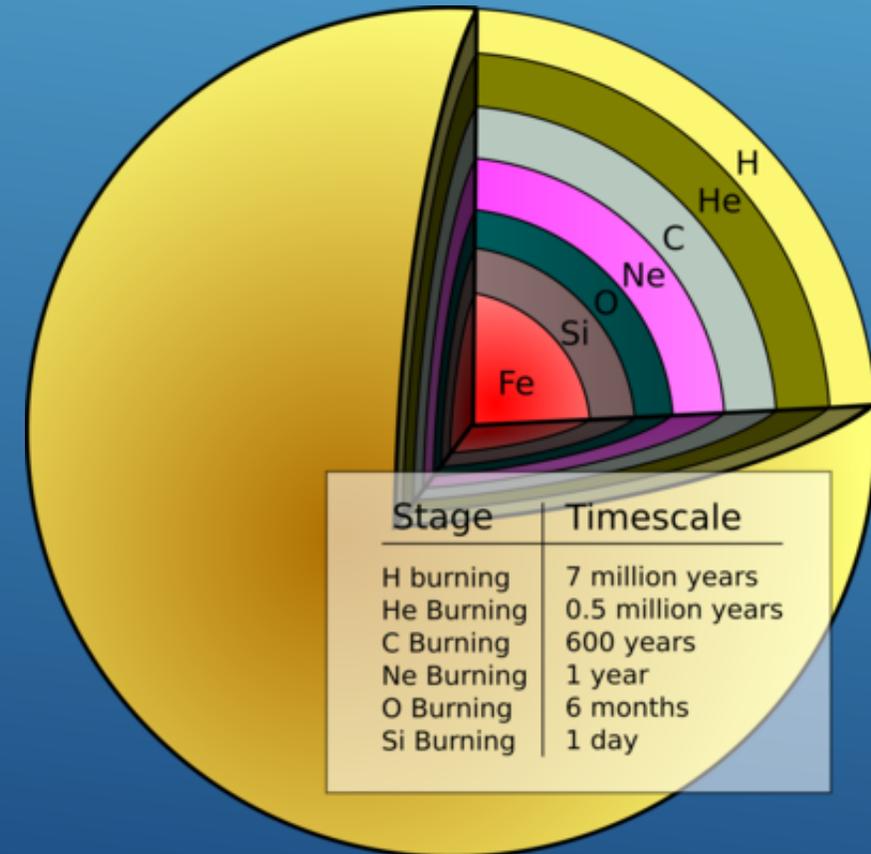
$M > 8 M$

La stella esplode (supernova)

- Combustione $H \rightarrow He$ (es. Sole)
- Combustione $He \rightarrow C, O, Ne$
- Combustione $C/O \dots Si \rightarrow Fe$
- Combustione esplosiva



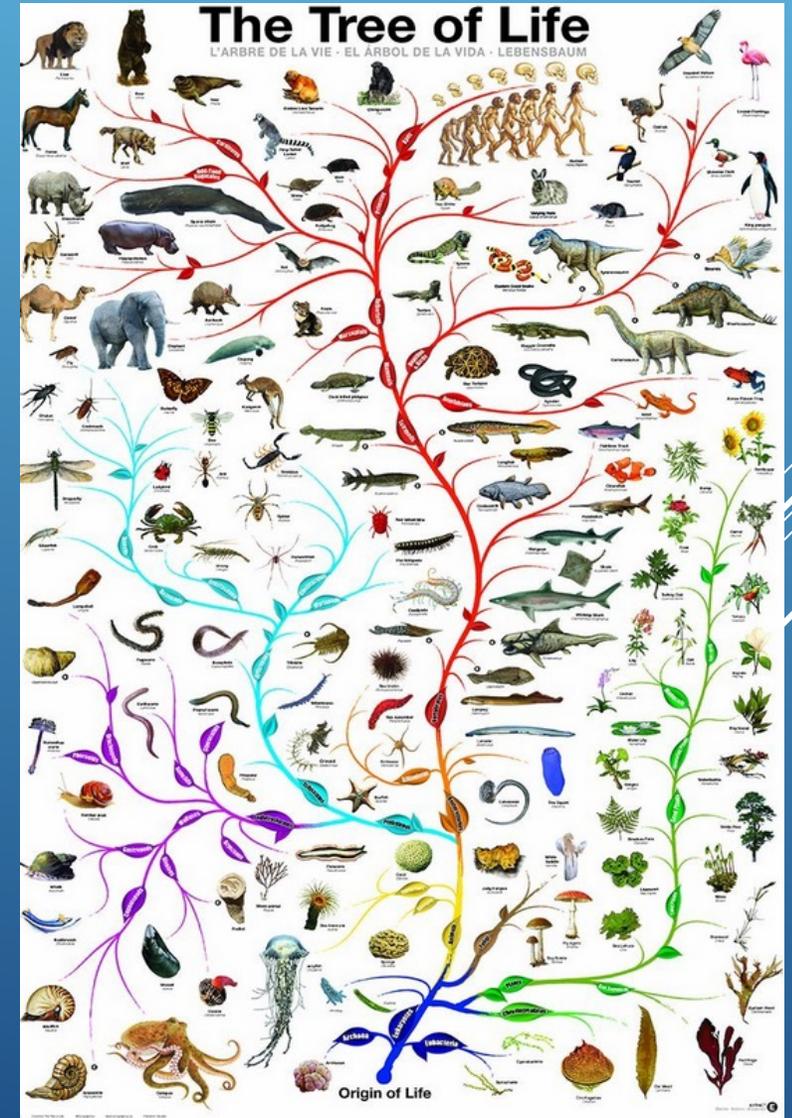
EVOLUZIONE DELLE STELLE : SCALA TEMPI



SONO PROCESSI LENTI....

E QUESTO È MOLTO,
MOLTO, MOLTO POSITIVO !

IL «BRODO PRIMORDIALE» È
COLLOCATO A CIRCA 4.5
MILIARDI DI ANNI FA



EVOLUZIONE DELLE STELLE



Gli atomi della vostra mano sinistra provengono probabilmente da una stella diversa da quelli della vostra mano destra. È davvero la cosa più poetica che conosca della fisica: siamo fatti di stelle.

Lawrence M. Krauss

Le stelle sono quindi ... “pentoloni cosmici”

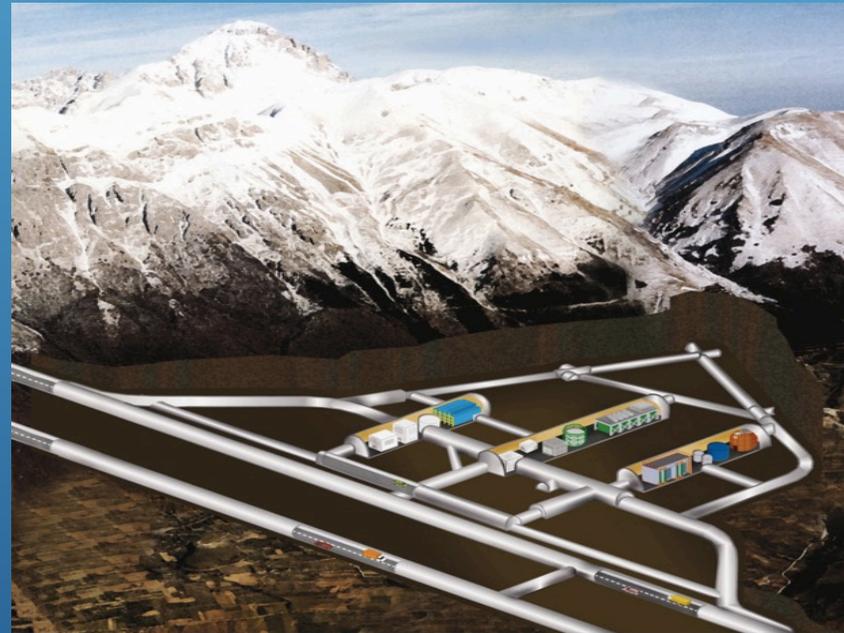
... e noi siamo le ceneri delle giganti rosse !



LUOGHI SOTTERRANEI...

E' il principale Laboratorio di Fisica delle Astroparticelle al mondo

La sua costruzione e' stata proposta nel 1979 da A. Zichichi durante la realizzazione dell'autostrada A 24 Roma-Teramo, approvato dal Parlamento nel 1982



La scienza ai
LNGS:

Fisica dei neutrini
Ricerca di
materia oscura
Astrofisica
nucleare
Geofisica

LNGS – LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO

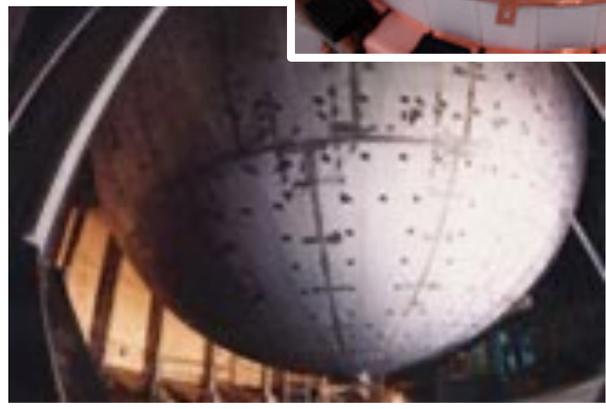
La sala B durante gli scavi e appena completata

~ 1985



IN COSTRUZIONE..

LNGS – LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO



Esperimenti condotti da ~ 1000 ricercatori provenienti da ~30 paesi del mondo

LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO .. OGGI!!!



PERCHE' UN
LABORATORIO
SOTTERRANEO?

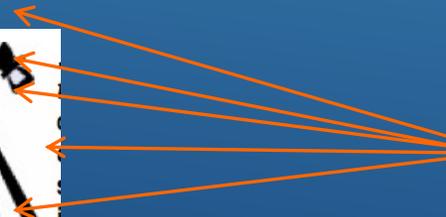
STRUMENTI
per studiare la
fusione nelle stelle

COME STUDIARE LA FUSIONE NELLE STELLE ?

- ▶ **In modo diretto**, cercando di ripetere le reazioni in Laboratorio



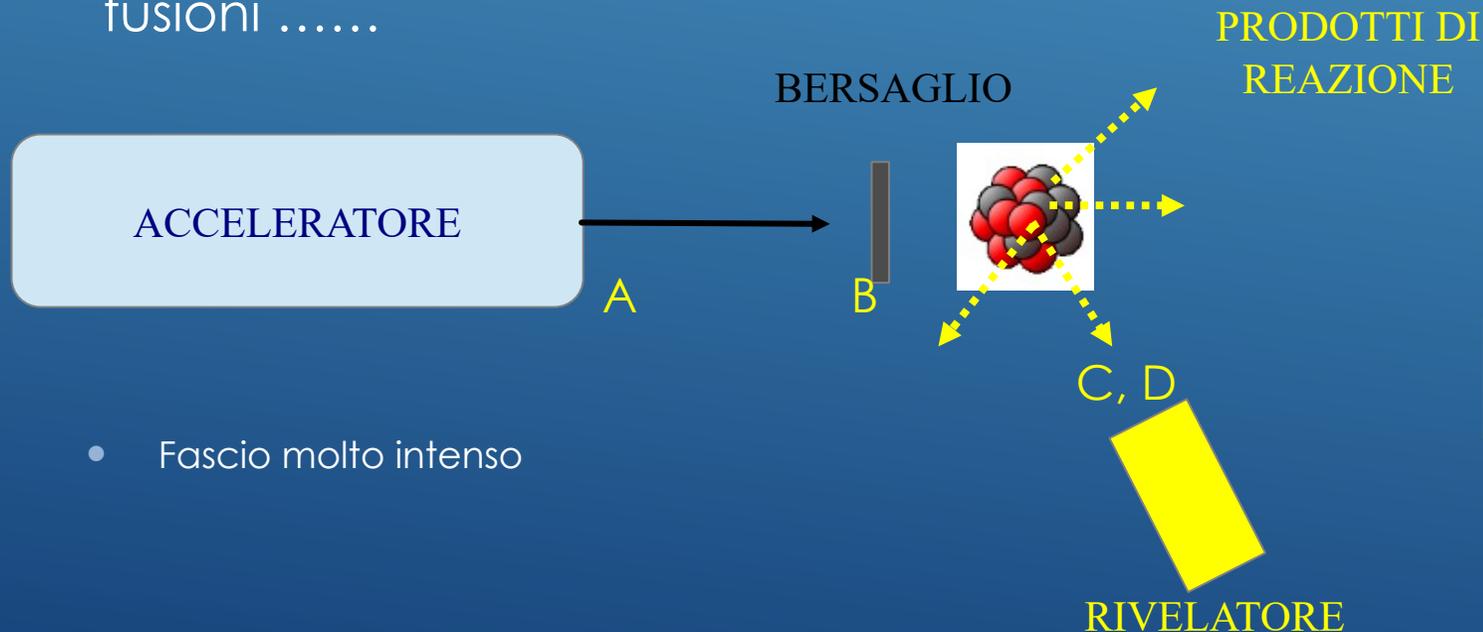
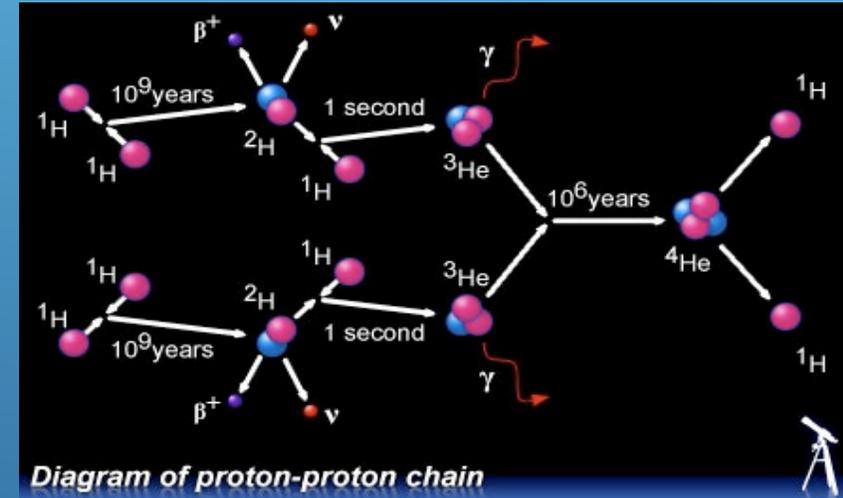
- ▶ **In modo indiretto**: studiando le particelle emesse in queste reazioni che riescono ad arrivare sulla Terra
- ▶ (fotoni=calore/luce solare, neutrini..!!)



LO STUDIO DIRETTO : COME SI FA? INGREDIENTI:



- ▶ Un acceleratore per ottenere le stesse energie delle stelle;
- ▶ Un bersaglio che contiene i nuclei che ci interessano;
- ▶ Un rivelatore per studiare le particelle emesse dalle fusioni



Ma non e' banale ..

PROBLEMI:

- Per un nucleo d'idrogeno all'interno del Sole la probabilita' di dar luogo ad una fusione e' piuttosto bassa...ma naturalmente nel Sole ci sono moltissimi nuclei..
- ..questo non e' pero' vero nei nostri laboratori....perche' ci aspettiamo di osservare pochissimi eventi di interesse (es. decine al giorno o al mese..)

L'esperimento è possibile SOLO se segnale \geq "rumore di fondo"



Dal Sole ci arriva addosso
una pioggia di particelle:
Flusso Raggi cosmici
 $\approx 200 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

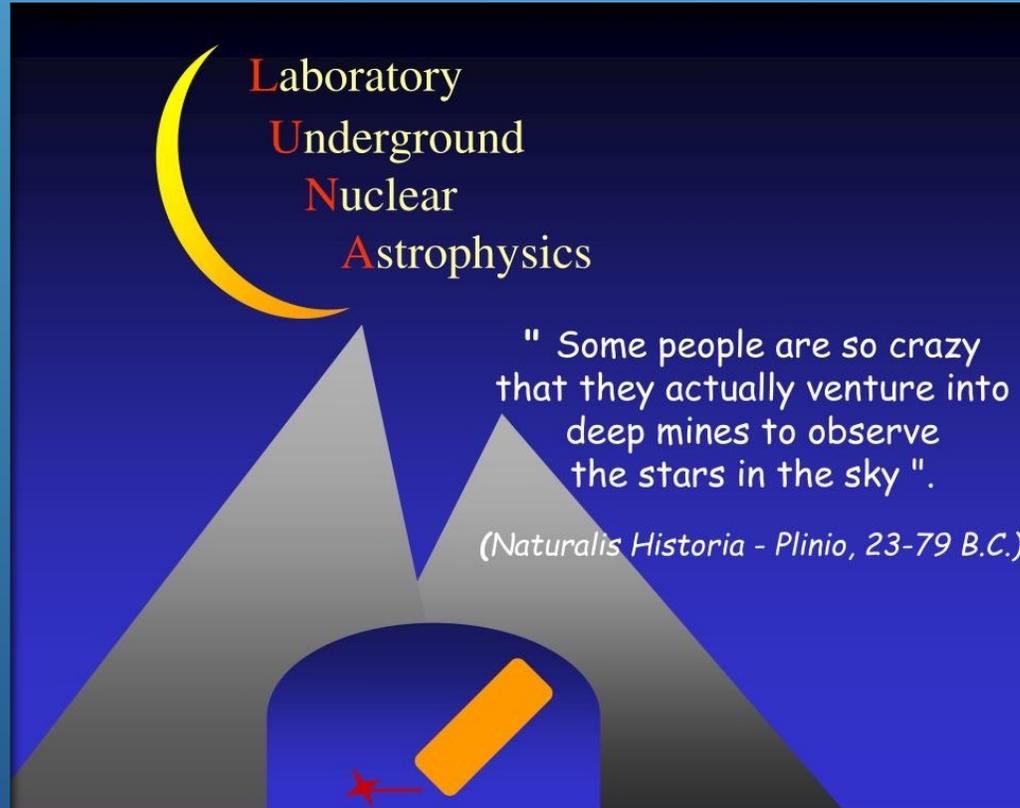


su un riv. da 10 cm^2
 ≈ 20000 eventi/giorno !



ESPERIMENTO LUNA

NEI LABORATORI DEL GRAN SASSO



Che silenzio!!



► Come riprodurre il Sole in un laboratorio..

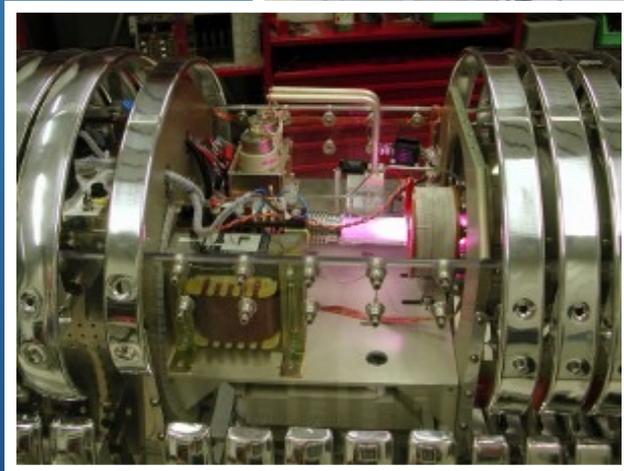
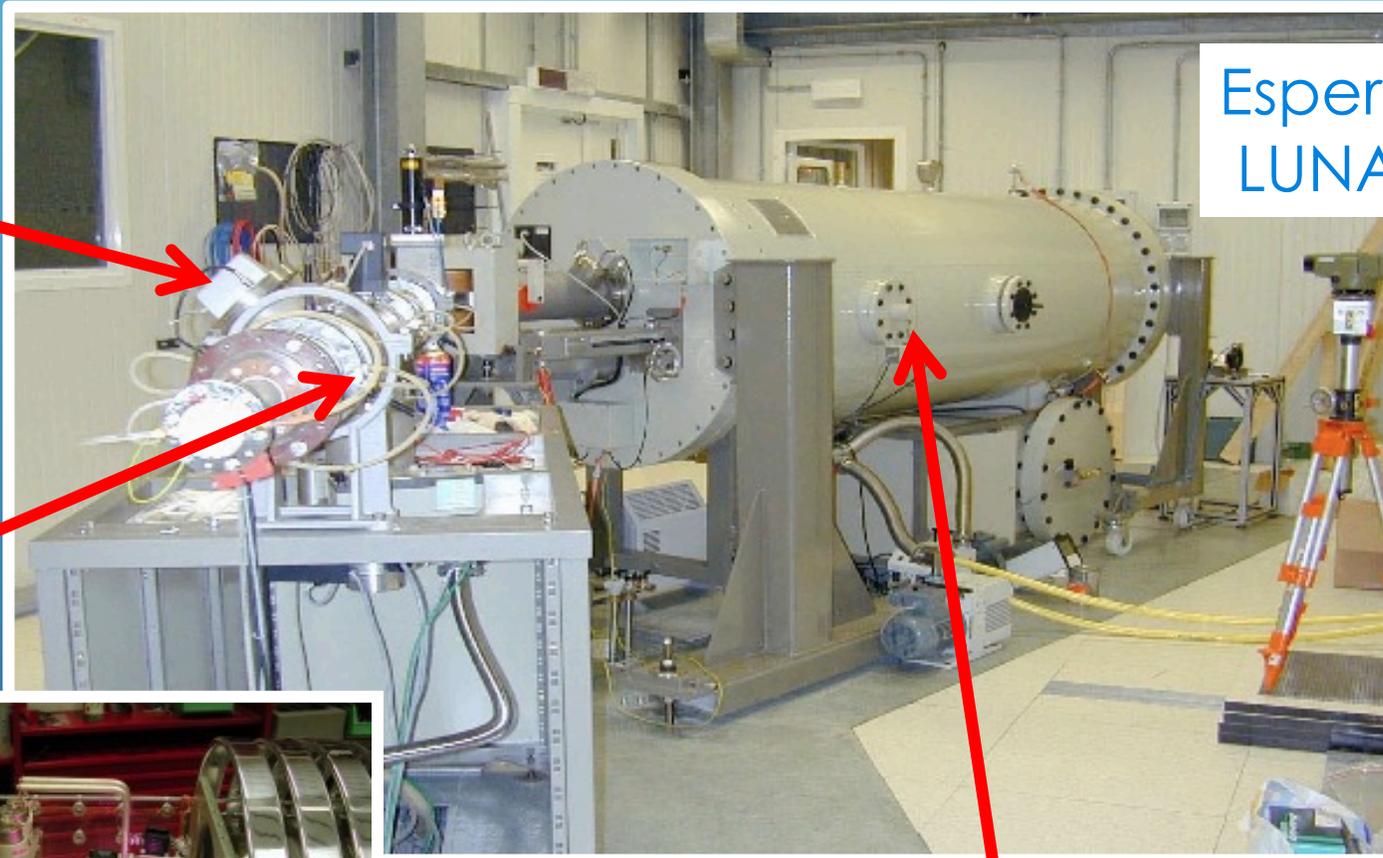
LA LUNA ..
NEL POZZO

Lo scopo dell'esperienza è lo studio di tutte le reazioni importanti nelle varie fasi dell'evoluzione stellare

Rivelatore

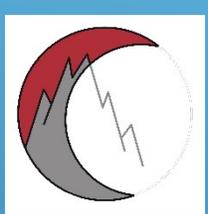
Bersaglio

Esperimento
LUNA

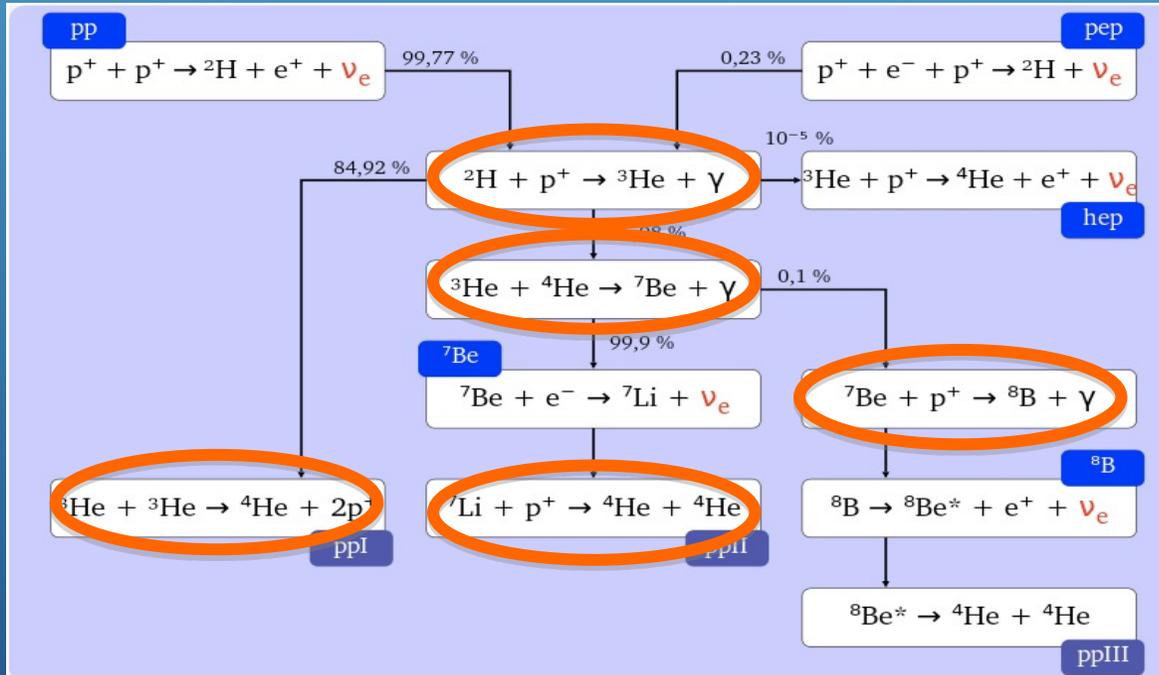


L'acceleratore

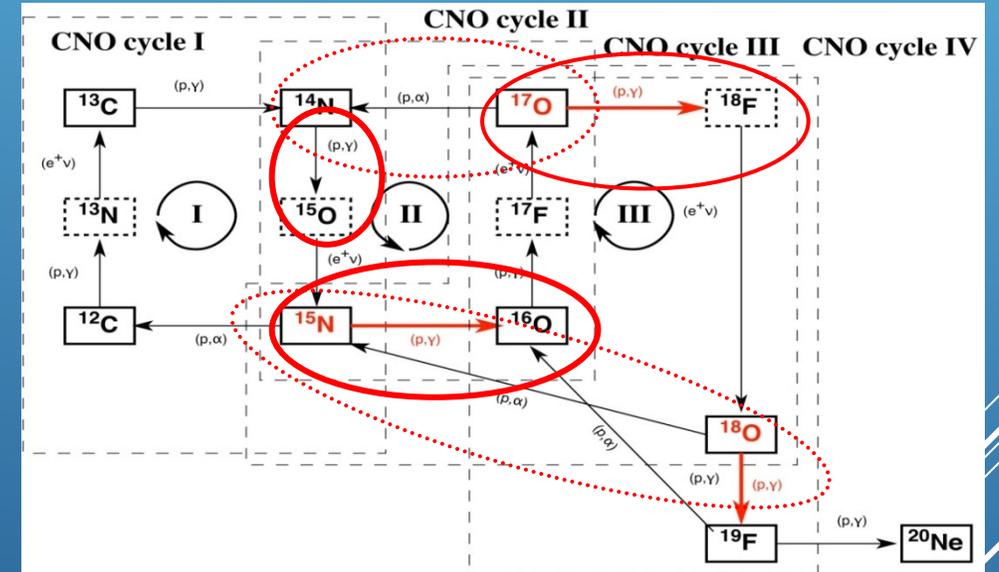
IL SOLE E LA FUSIONE



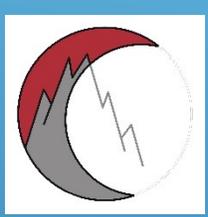
COMPORRE IL MOSAICO DELLA COMBUSTIONE DELL'IDROGENO A LUNA:



Tra i risultati.. stime dell'eta' dell'Universo

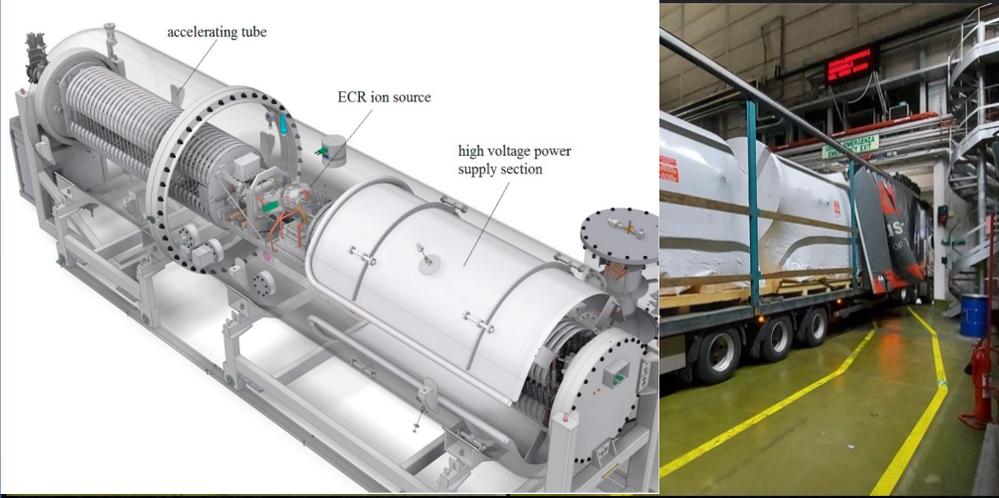


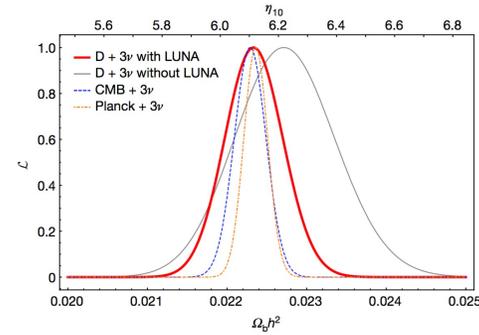
26 anni di lavoro...e ancora non è finita !!!!



UN NUOVO ACCELERATORE PIU' POTENTE

- Appena arrivato ai Laboratori del Gran Sasso
- Acceleratore LUNA - 3.5 MV
- Permetterà di studiare la combustione di Elio e Carbonio!!!



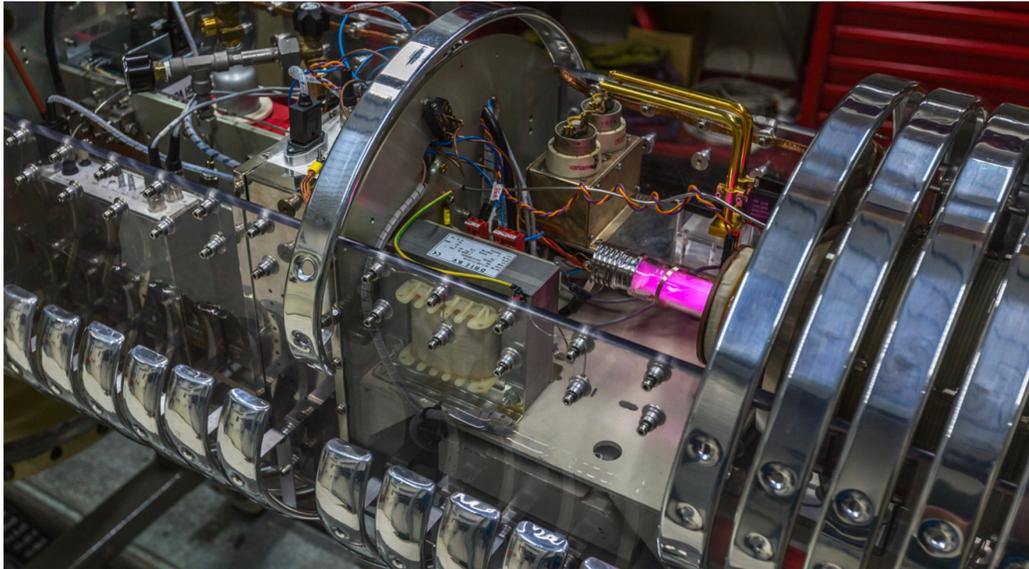


IL SOLE MA NON SOLO...

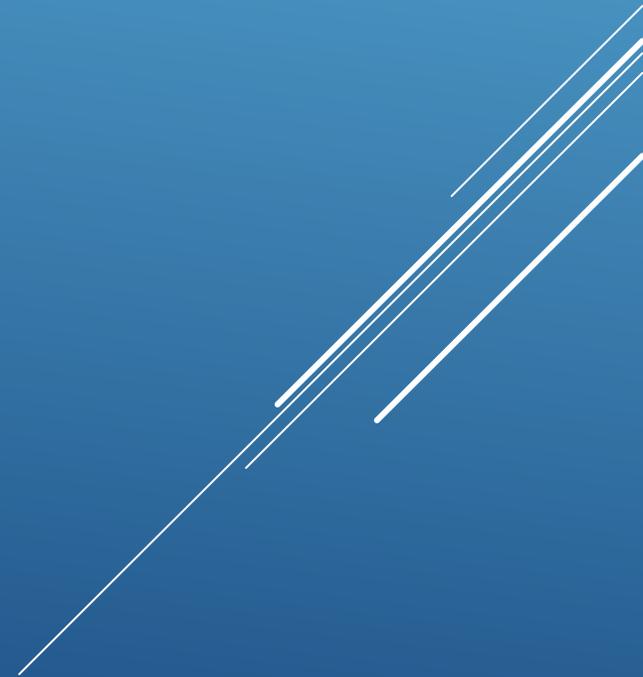
- LUNA ha recentemente misurato una reazione chiave delle nucleosintesi del Big Bang: la ${}^2\text{H}(p,\gamma){}^3\text{He}$
- Con questo risultato la nucleosintesi del Big Bang prevede un valore per la densità di materia ordinaria nell'universo primordiale in ottimo accordo con quello ricavato dallo studio della radiazione cosmica di fondo e fornisce ulteriore supporto al modello cosmologico standard.

Nature volume 587, pages 210–213 (2020)

LA NUCLEOSINTESI DURANTE IL BIG BANG

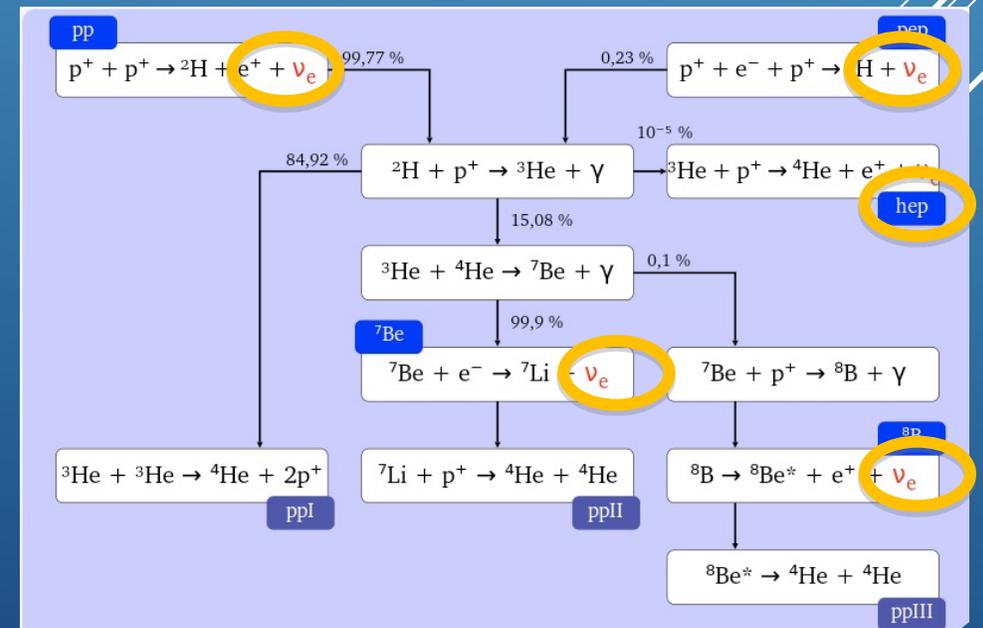
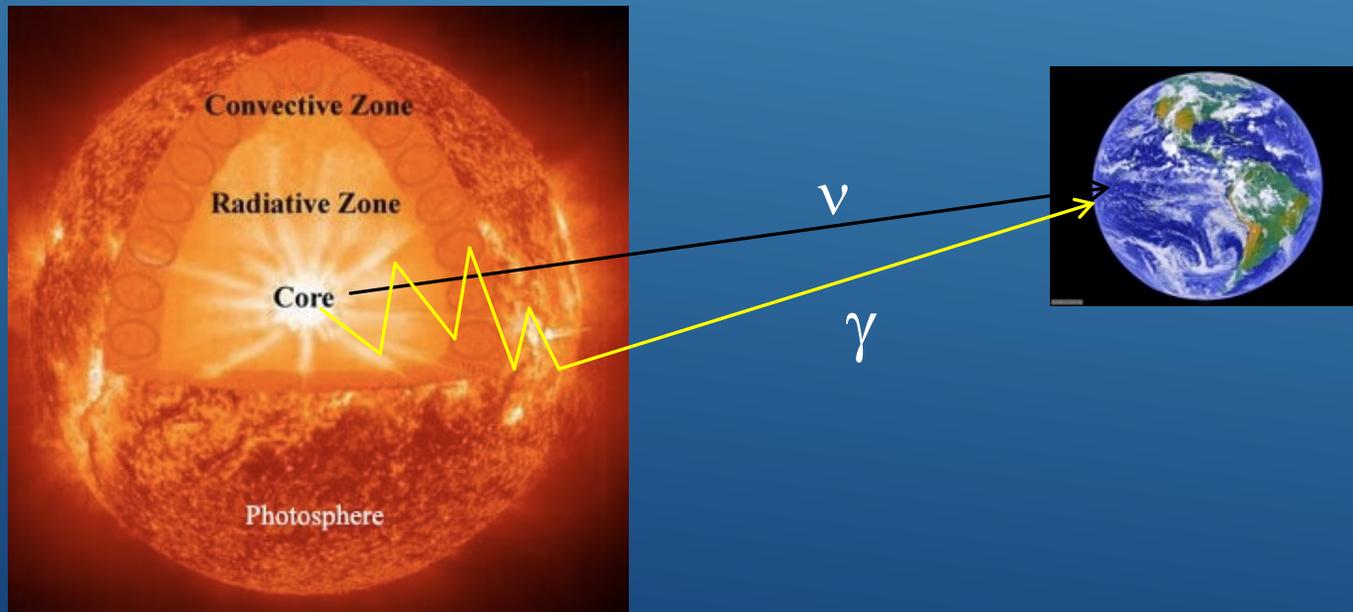


LO STUDIO INDIRECTO



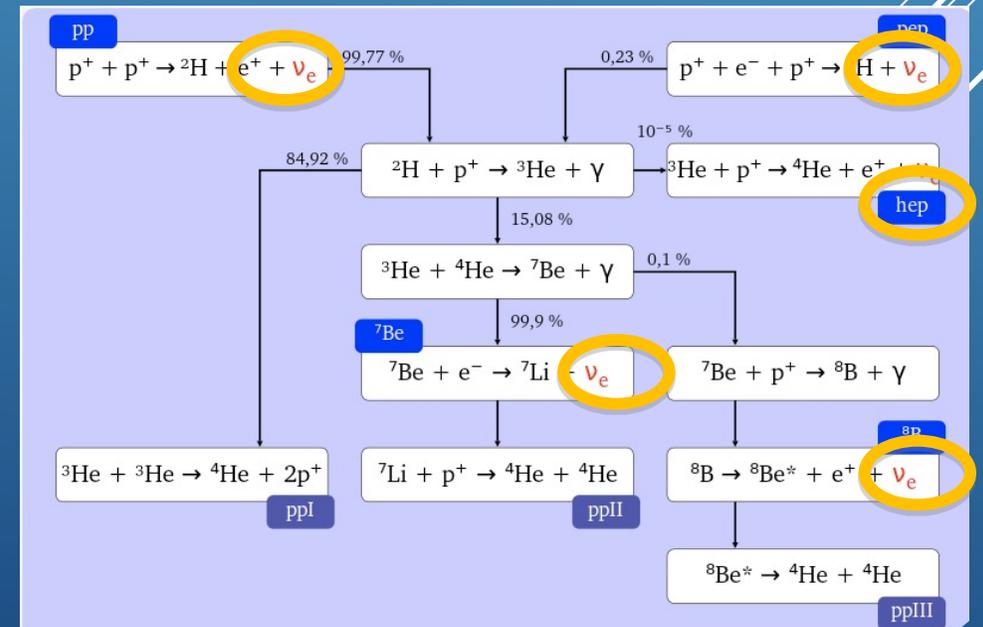
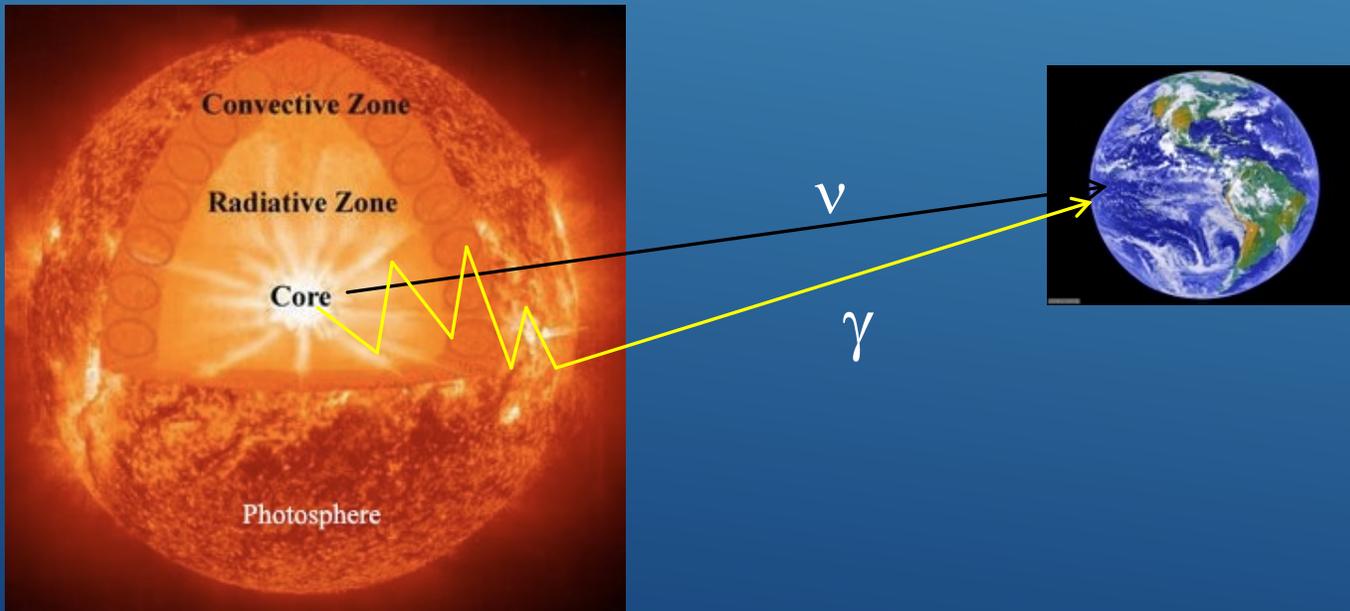
UNO STRUMENTO FORMIDABILE: I NEUTRINI

- Il calore che viene emesso al centro del Sole impiega centinaia di migliaia di anni ad arrivare sulla sua superficie;
- I neutrini impiegano solo 8 minuti e 20 secondi => informazione in tempo reale del Sole!!!



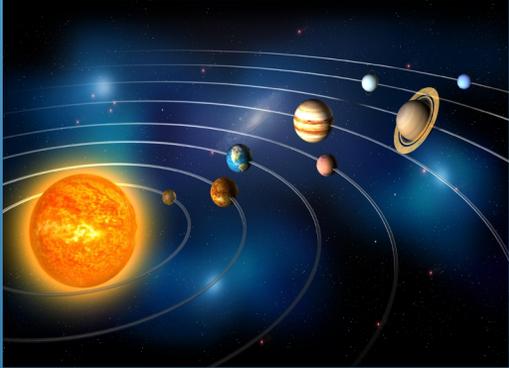
I NEUTRINI SONO PARTICELLE SPECIALI

- Sulla Terra, sulla punta di un dito, “piovono” 10 miliardi di neutrini al secondo prodotti dal Sole
- Ma tranquilli ... un tipico neutrino solare è in grado di percorrere (in acqua) una distanza dell'ordine dello spessore del disco della galassia ($2.5 \cdot 10^{20}$ cm) prima di interagire
- Ma come fanno??



PARTICELLE QUASI INARRESTABILI..

Forze in Natura



Gravitazionale



Elettromagnetica



Nucleare forte



Nucleare debole

Un neutrino risente solo della forza nucleare debole e della forza gravitazionale (ma poco perche' e' leggerissimo!)

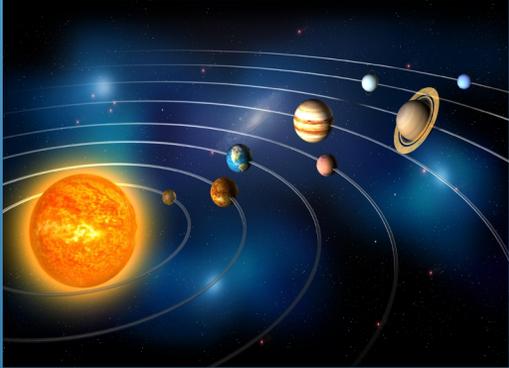


- I neutrini sono leptoni neutri
- Un leptone e' una particella che non risente dell'interazione forte

Consentono di ricostruire le loro sorgenti!!!

PARTICELLE QUASI INARRESTABILI..

Forze in Natura



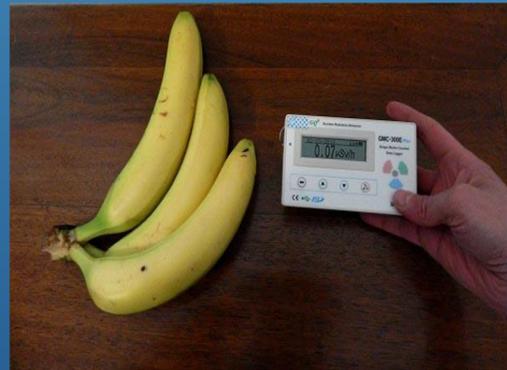
Gravitazionale



Elettromagnetica



Nucleare forte



Nucleare debole

Un neutrino risente solo della forza nucleare debole e della forza gravitazionale (ma poco perche' e' leggerissimo!)

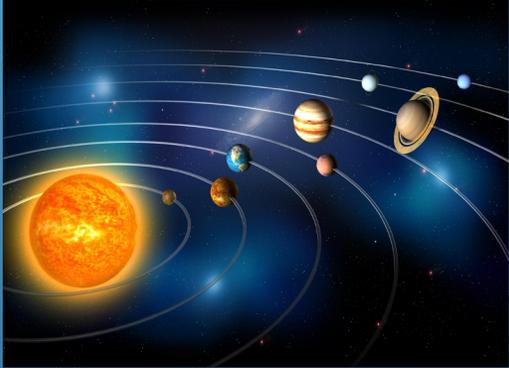


- I neutrini sono leptoni neutri
- Un leptone e' una particella che non risente dell'interazione forte

Consentono di ricostruire le loro sorgenti!!!

PARTICELLE QUASI INARRESTABILI..

Forze in Natura



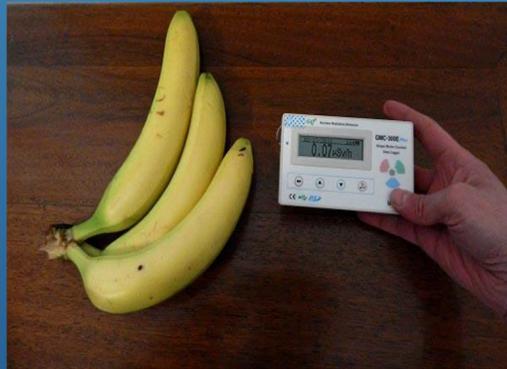
Gravitazionale



Elettromagnetica



Nucleare forte



Nucleare debole

Un neutrino risente solo della forza nucleare debole e della forza gravitazionale (ma poco perche' e' leggerissimo!)

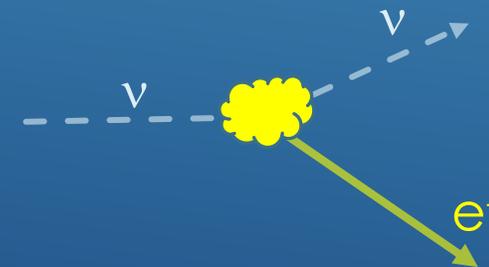
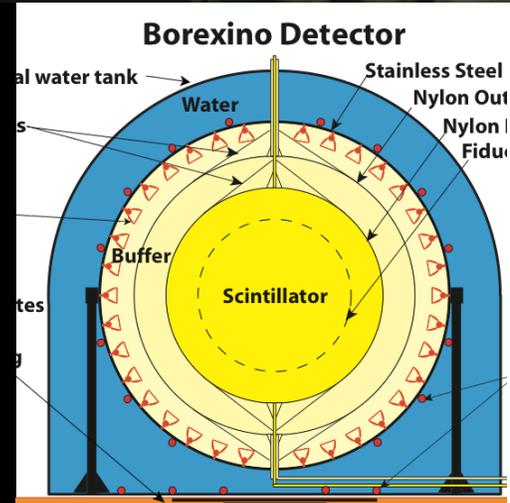
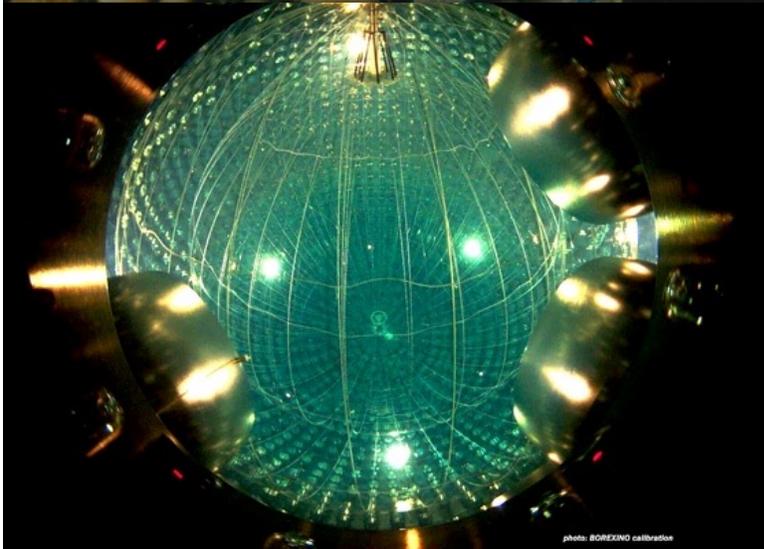
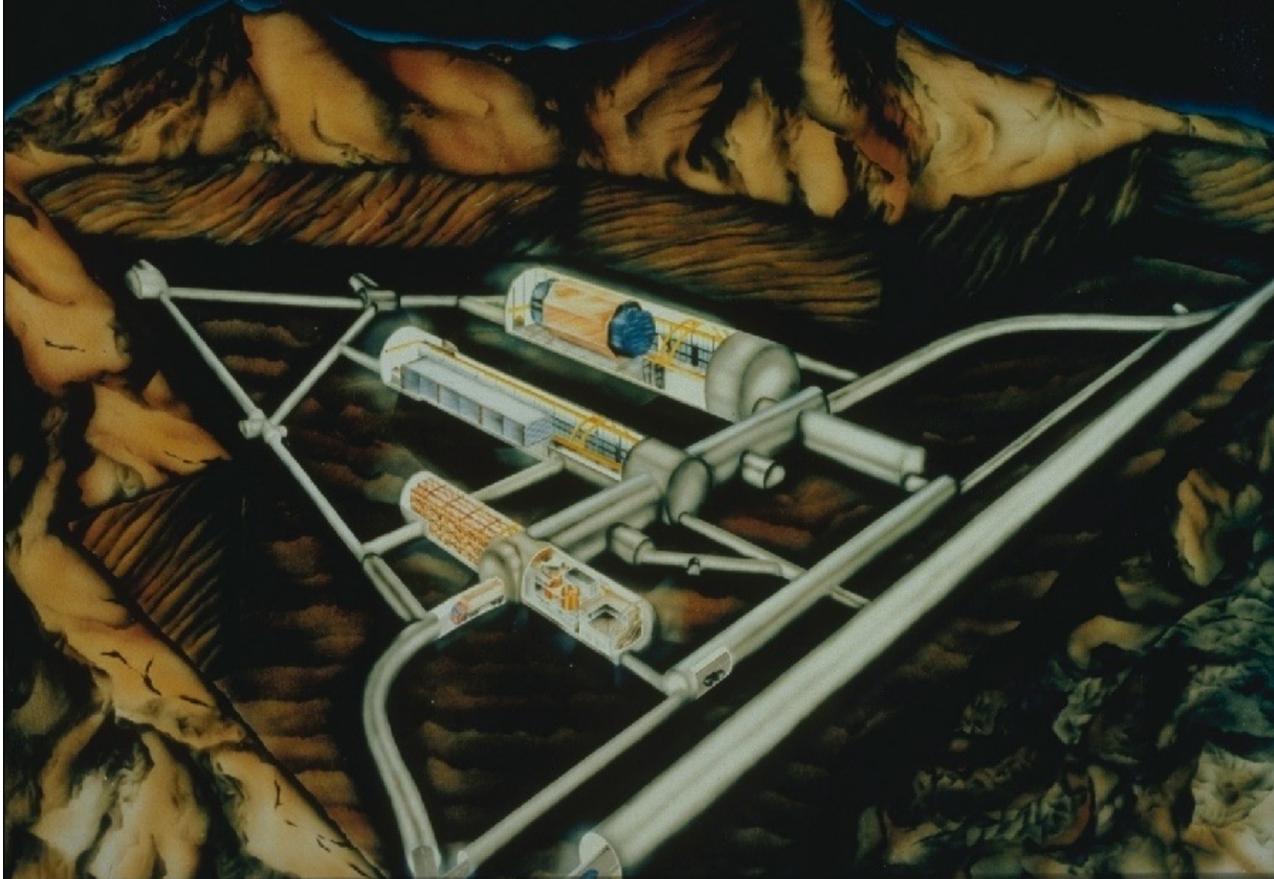


- I neutrini sono leptoni neutri
- Un leptone e' una particella che non risente dell'interazione forte

Consentono di ricostruire le loro sorgenti!!!

COME SI "CATTURANO" I NEUTRINI?

- ▶ SILENZIO COSMICO: servono rivelatori molto grandi in laboratori sotterranei o negli abissi marini
- ▶ Quando i neutrini urtano gli elettroni o i nuclei della materia **IN UN SCINTILLATORE** viene emessa luce



- ▶ **BOREXINO AL GRAN SASSO**

DIFFICOLTA' ...

Il segnale atteso dei neutrini solari e'
~ 100 eventi/giorno/100t

Tipiche radioattività ambientali:

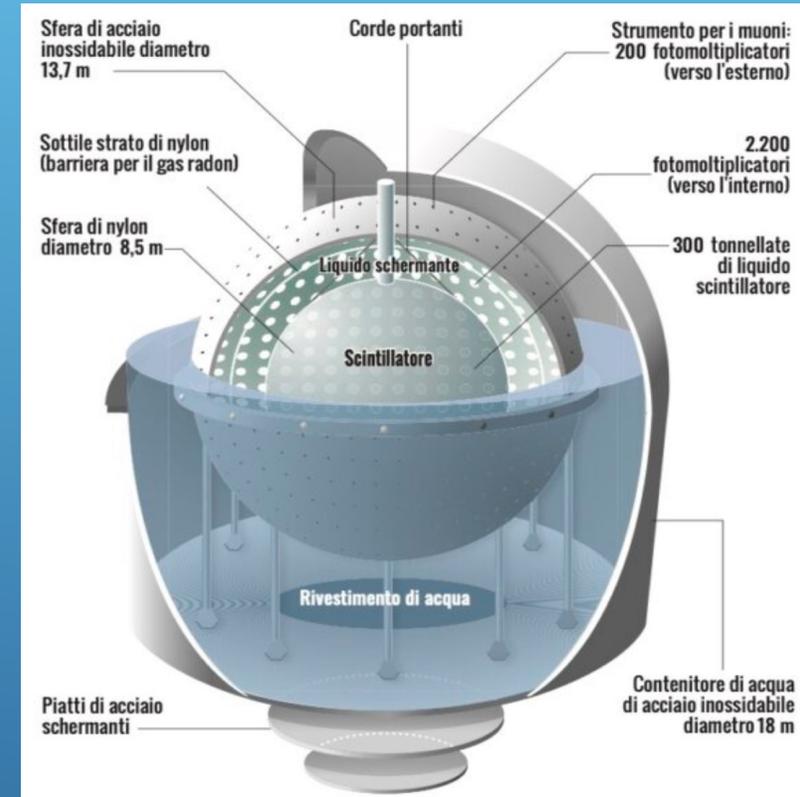
Bicchiere d'acqua ~ 10 decadimenti radiattivi/secondo/Kg;

Roccia ~ 100-1000 decadimenti radiattivi/secondo/Kg;

Quindi il nucleo del rivelatore deve essere di almeno 10 ordini di grandezza più radiopuro di un tipico oggetto sulla Terra!!!

Strategie di soppressione del fondo = 15 anni di lavoro

Un'enorme sforzo è stato compiuto nel progetto del rivelatore, nella selezione dei materiali, nelle procedure di pulizia, di manipolazione e di purificazione dello scintillatore



RIVELATORE PURISSIMO



Impianti e volumi di stoccaggio



CTF: prototipo

Il cuore dell'esperimento Borexino e' il luogo meno radioattivo del pianeta !!!

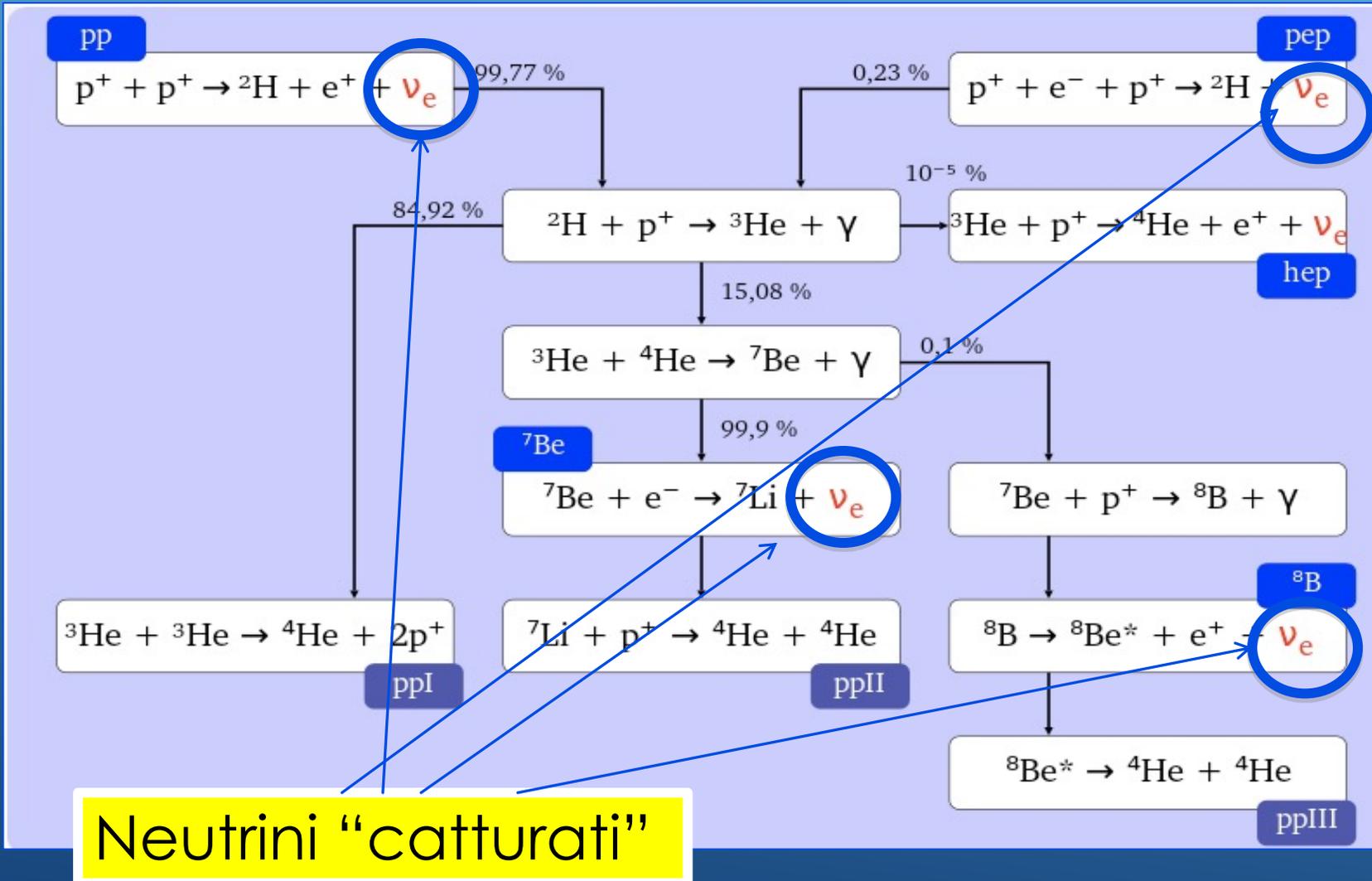


Impianto di purificazione dell'acqua

- La collaborazione Borexino ha maturato un'esperienza di fama mondiale nella purificazione dei materiali dalla radioattività naturale
- Borexino e' in funzione ai Laboratori del Gran Sasso dal 15 maggio 2007

BOREXINO HA CATTURATO TUTTI I NEUTRINI DELLA CATENA PP

Catena pp



BOREXINO E I NEUTRINI SOLARI

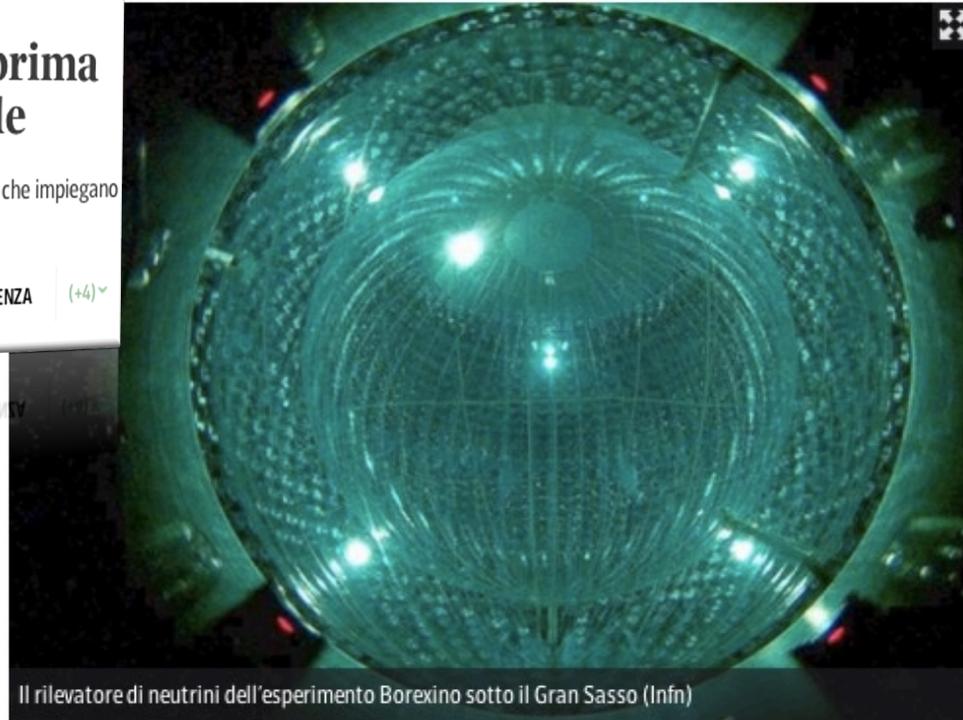
GRAZIE ALL'ESPERIMENTO BOREXINO, PROTETTO DA 1.400 METRI DI ROCCIA SOTTO IL GRAN SASSO

Con i neutrini misurata per la prima volta in tempo reale energia Sole

Finora le misurazioni del cuore della nostra Stella erano basati sui fotoni, che impiegano 100 mila anni per uscire in superficie

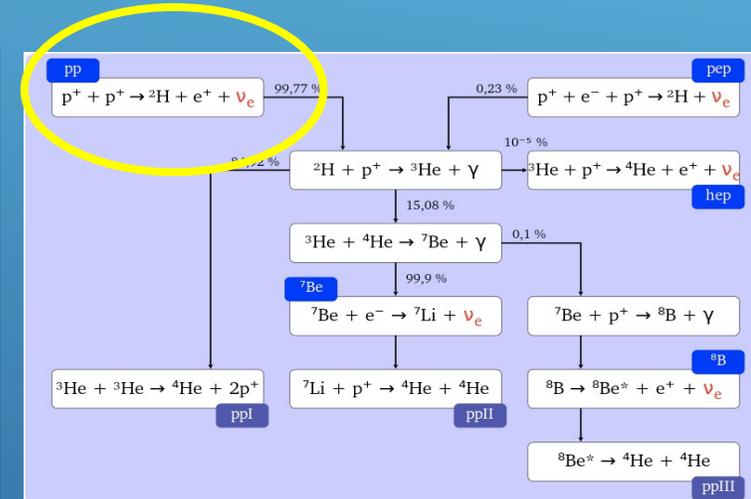
di Redazione Online

SCIENZA (+4)

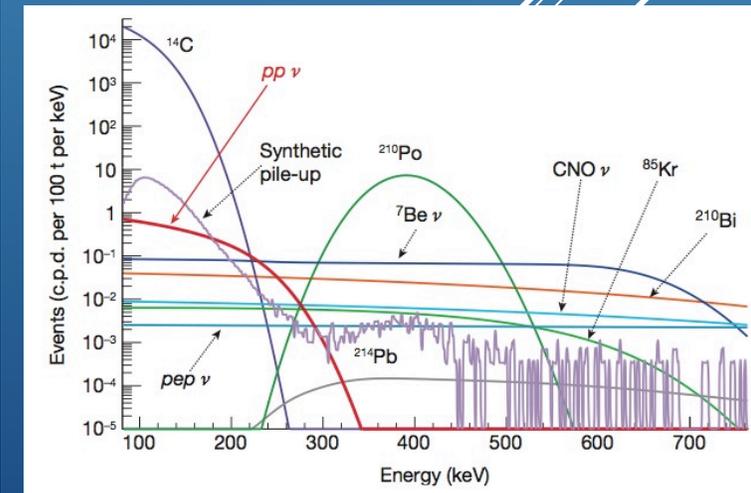


Il rivelatore di neutrini dell'esperimento Borexino sotto il Gran Sasso (Infn)

Per la prima volta è stata misurata in tempo reale l'energia del Sole nel momento stesso in cui viene generata nel suo nucleo. L'esperimento, condotto in Italia e pubblicato sulla rivista *Nature*, è stato possibile studiando i neutrini solari prodotti dalla fusione protone-protone. L'esperimento chiamato Borexino è stato condotto nei Laboratori nazionali dell'Istituto nazionale di fisica nucleare (Infn) protetti da 1.400 metri di roccia sotto il Gran Sasso.



Corriere.it del 28 agosto 2014

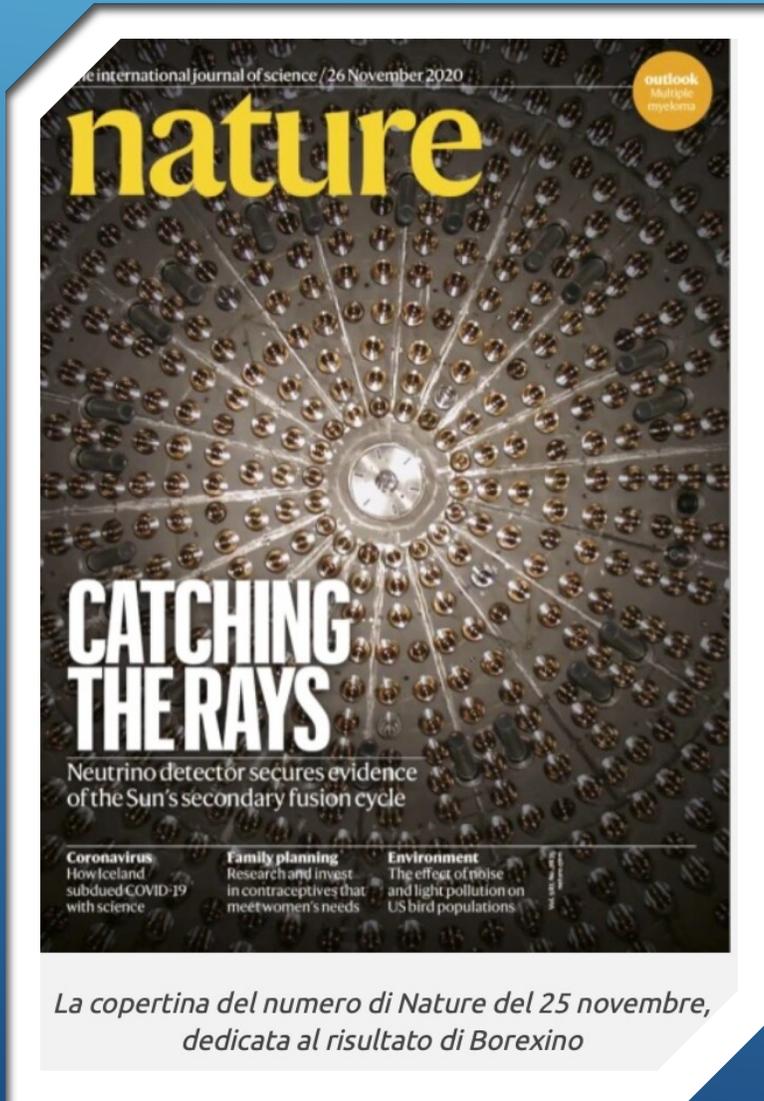
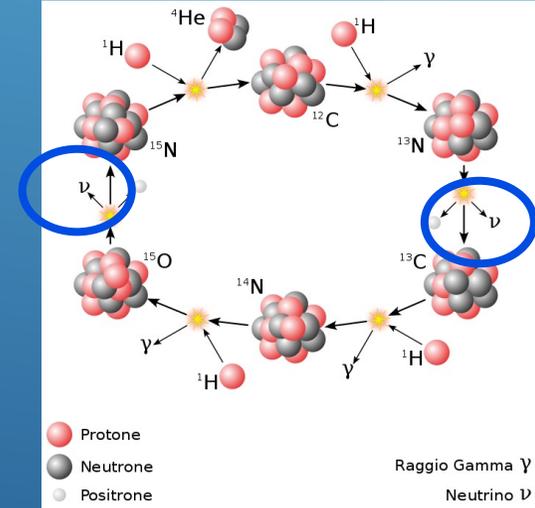


ULTIME NOTIZIE (nov. 2020):

Borexino: così brillano le stelle massive

► NOVEMBRE 2020: La collaborazione scientifica Borexino, pubblica su *Nature* LA prima rivelazione in assoluto dei neutrini prodotti nel Sole dal ciclo CNO (carbonio-azoto-ossigeno): un risultato sperimentale di valore storico, che completa un capitolo della fisica iniziato negli anni '30 del secolo scorso.

► L'implicazione di questa nuova misura per la comprensione dei meccanismi stellari è enorme: infatti, poiché il ciclo CNO è preponderante nelle stelle più massicce del Sole, con questa osservazione Borexino ha raggiunto l'evidenza sperimentale di quello che di fatto è il canale dominante nell'universo per la combustione dell'idrogeno.





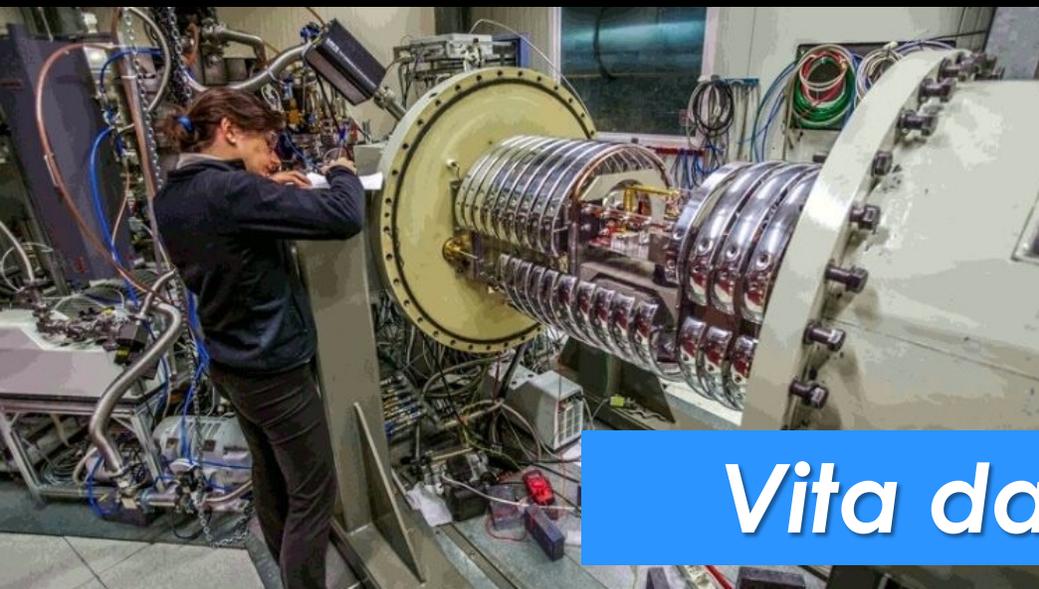
- I neutrini al momento sono le uniche particelle che non si comportano come previsto dal modello Standard (lo stesso che ha previsto l'esistenza del bosone di Higgs ...)

NEUTRINI :
MOLTISSIMI STUDI IN CORSO IN TUTTO IL MONDO



LA NOSTRA CURIOSITA'





Vita da ...ricercatori ...

MAGARI SI
DIVENTA
FAMOSI...
NOBEL PER LA
FISICA



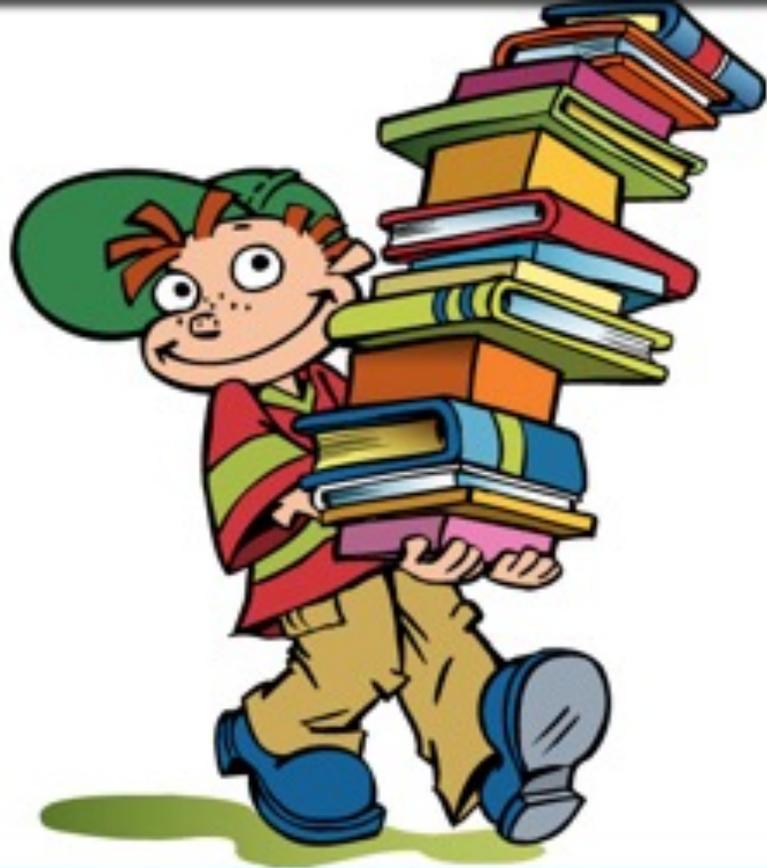
Guglielmo Marconi
1909



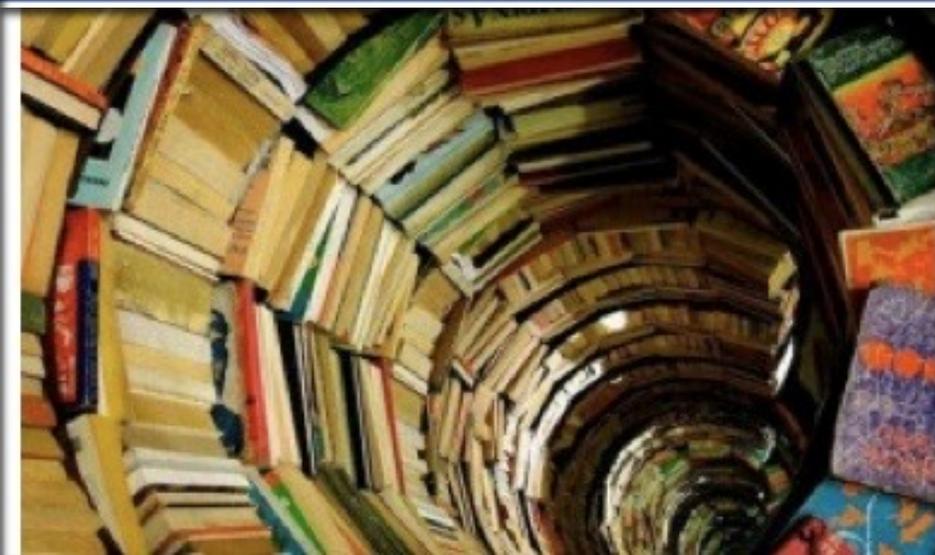
Emilio
Segrè
1959



Carlo Rubbia
1984



MA L'ASPETTO IMPORTANTE
È DARE UN CONTRIBUTO
(PICCOLO O GRANDE..) AL
PROGREDIRE DELLE NOSTRE
CONOSCENZE





... ED ESSERE UN
POCO MATTI DA
CERCARE LA LUNA
NEL POZZO...





GRAZIE per l'attenzione!!!!!!!

...ERE UN
POCO MATTI DA
CERCARE LA LUNA
NEL POZZO...



SCUOLA - LA FISICA SBAGLIATA: ECCO I VINCIT



356 stu
team vi
errori d
concor:

La sple
restare
in *Flyin*
volare c

Lois acchiappandola a pochi metri da Terra quando precipita da un palazzo scuola secondaria di I e II grado che, scovando errori di fisica nelle opere del concorso di ScienzaPerTutti, il portale di divulgazione per le scuole di

Oggi ScienzaPerTutti ha proclamato le squadre che hanno vinto la sfida e classificati ai primi posti o distinti per menzioni speciali

fisica Kids
a cura di INFN
8-12 anni

- Giovedì 29 aprile
Neutrini fantasma
Giulliana Galati
- Giovedì 6 maggio
Rompiatomi e altre
storie sulla materia
Pierluigi Paolucci
- Giovedì 13 maggio
Dove sta andando l'Universo
Fernando Ferroni



**IL FUTURO È
... VOSTRO**

- ▶ <https://www.youtube.com/user/comunicazioneNFN>
- ▶ <https://home.infn.it/it/comunicazione>
- ▶ http://www.lngs.infn.it/home_it.htm