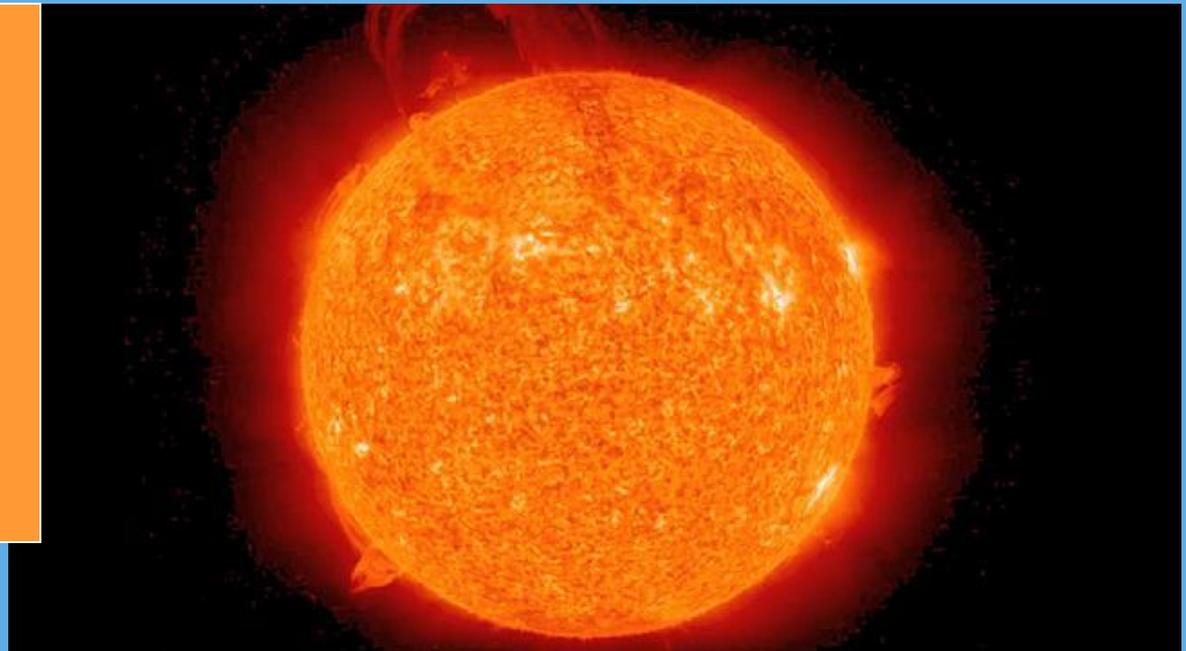


Stelle e Neutrini: il centro del Sole



Marco G. Giammarchi
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Via Celoria 16 – 20133 Milano (Italy)
marco.giammarchi@mi.infn.it
<http://pcgiammarchi.mi.infn.it/giammarchi/>

1. Una storia personale
2. I Neutrini
3. il Centro del Sole
4. Rivelazione di Neutrini
5. La fine della storia



1. Una storia personale

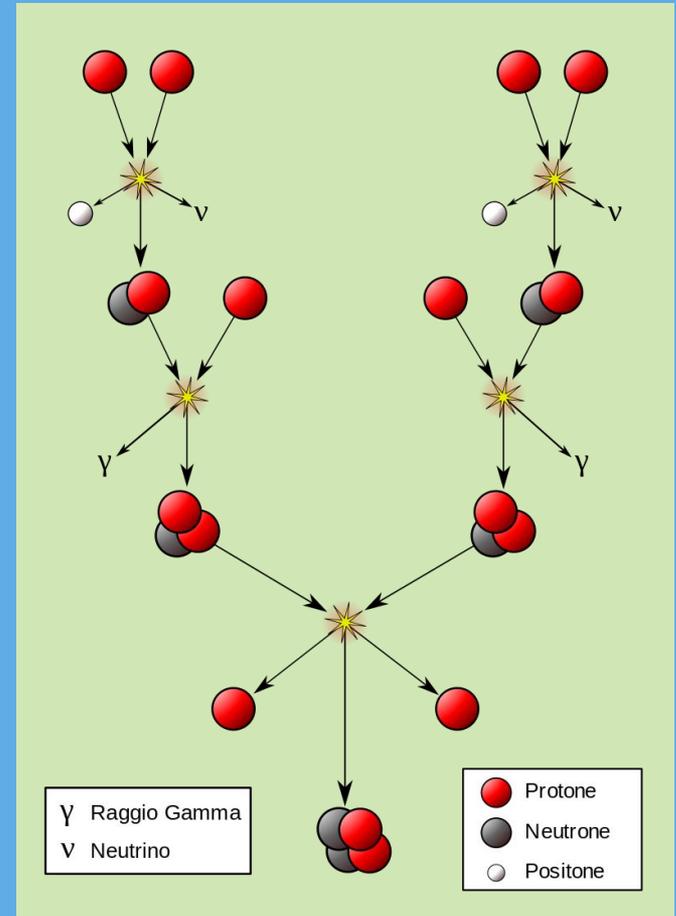
....al Liceo Donatelli di Milano (~1976)



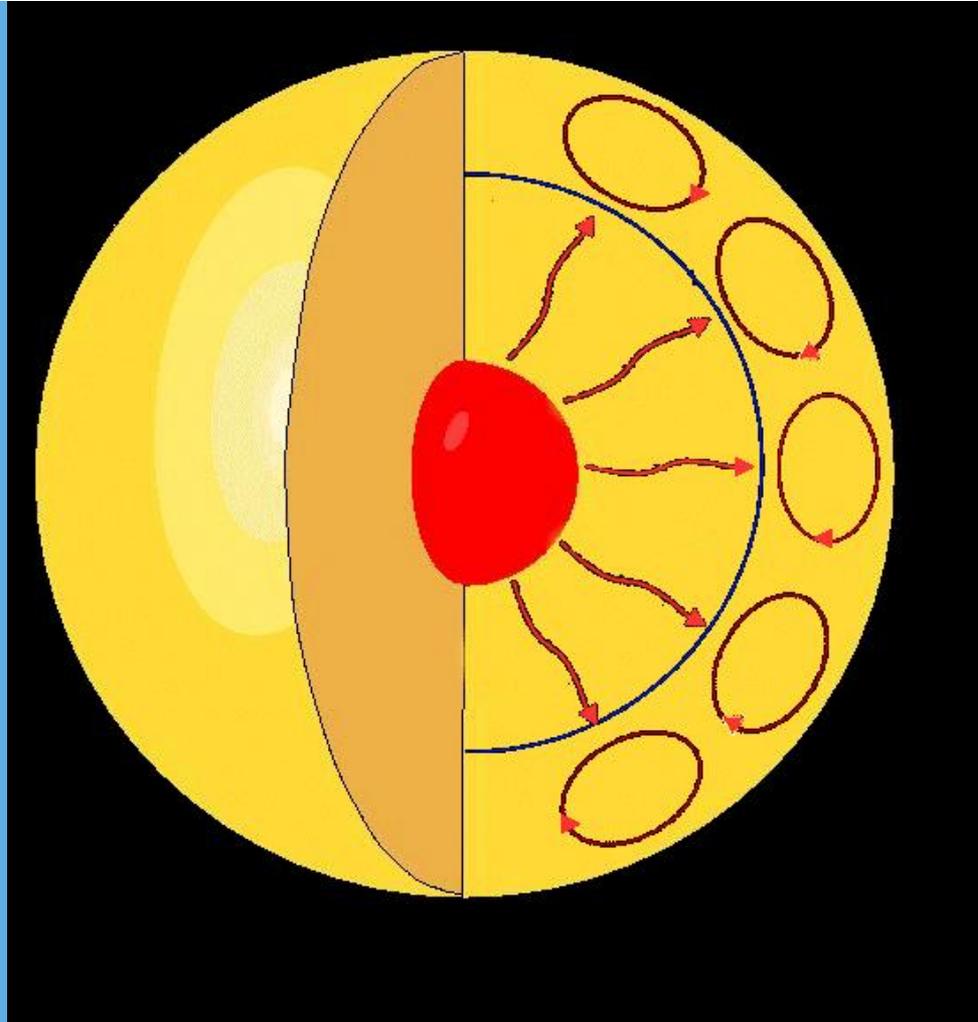
Il libro di Scienze parlava del Sole.

Diceva che il Sole produce energia tramite catene di reazioni nucleari, tipo il Ciclo pp (protone-protone).

1. Una storia personale
2. I Neutrini
3. il Centro del Sole
4. Rivelazione di Neutrini
5. La fine della storia



Reattore a fusione termonucleare con confinamento gravitazionale



2. I Neutrini

Il neutrino: una particella particolare

1. Una storia personale
2. I Neutrini
3. il Centro del Sole
4. Rivelazione di Neutrini
5. La fine della storia

	LEPTONS		QUARKS	
FIRST FAMILY "Ordinary" matter, least massive	 e ⁻ electron	 ν _e electron neutrino	 u up	 d down
SECOND FAMILY Similar properties, more massive	 μ ⁻ muon	 ν _μ muon neutrino	 c charm	 s strange
THIRD FAMILY Rarest particles, most massive	 τ ⁻ tau	 ν _τ tau neutrino	 t top	 b bottom

I tre tipi di neutrini

Costituenti fondamentali

Neutrini: sono (quasi) privi di massa

Neutrini: sono privi di carica elettrica

Neutrini: hanno solo interazioni del tipo «nucleare debole»

Neutrini: compaiono solo in processi nucleari deboli (decadimento beta)

Costituenti fondamentali della materia: Quark e Leptoni

Sono elementari al meglio di 10^{-18} m

Hanno spin e carica ben definiti

Materia ordinaria

Costituiscono la materia in condizioni ordinarie

Costituiscono le particelle instabili

Decadono in particelle stabili

	LEPTONS		QUARKS	
FIRST FAMILY "Ordinary" matter, least massive	 electron	 electron neutrino	 up	 down
SECOND FAMILY Similar properties, more massive	 muon	 muon neutrino	 charm	 strange
THIRD FAMILY Rarest particles, most massive	 tau	 tau neutrino	 top	 bottom

M
a
s
s
a

Un esempio semplice:
l'atomo di deuterio

$$p = (u, u, d)$$

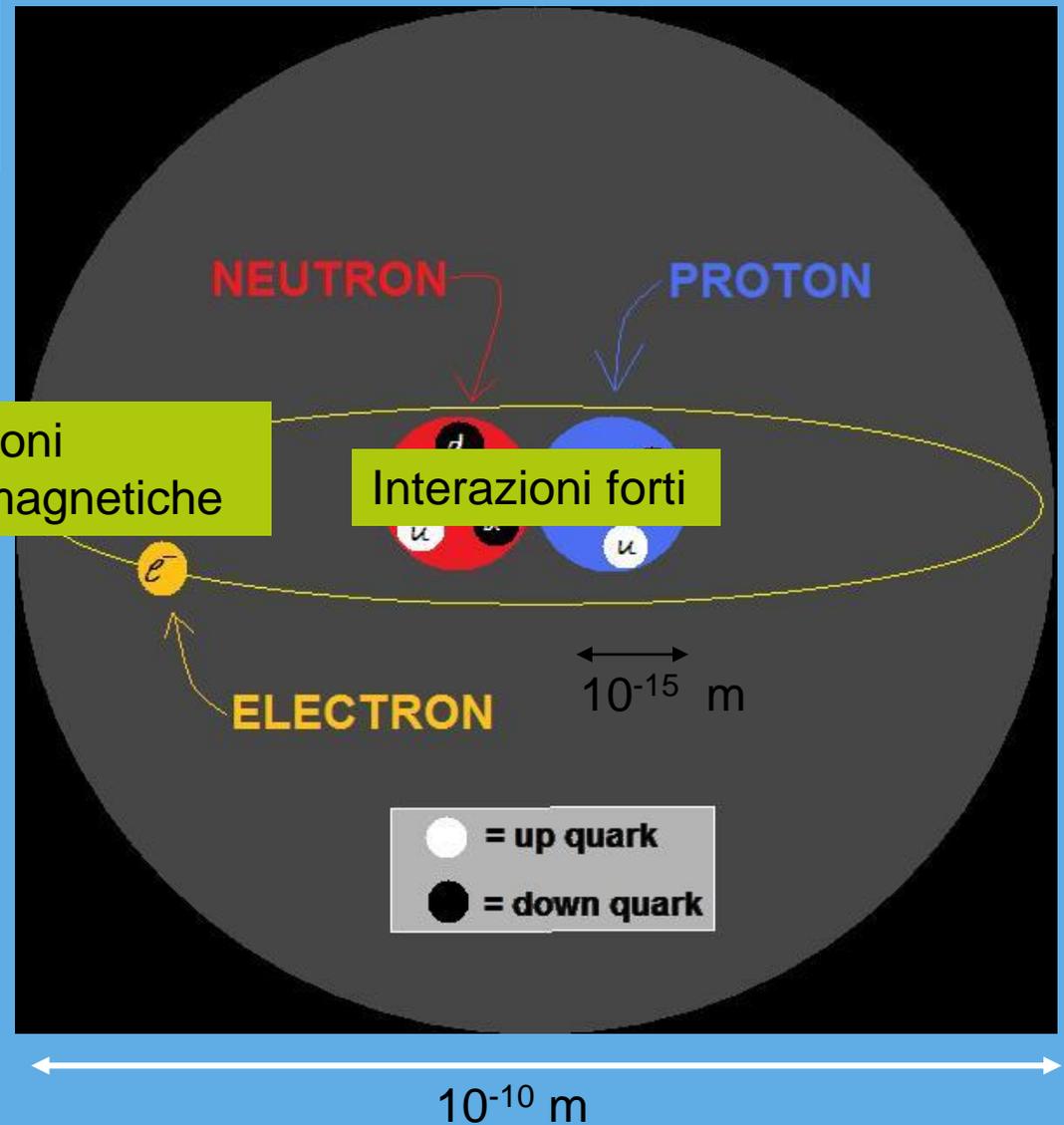
$$n = (u, d, d)$$

Quark:

Cariche frazionarie
Spin semi-intero

Interazioni
elettromagnetiche

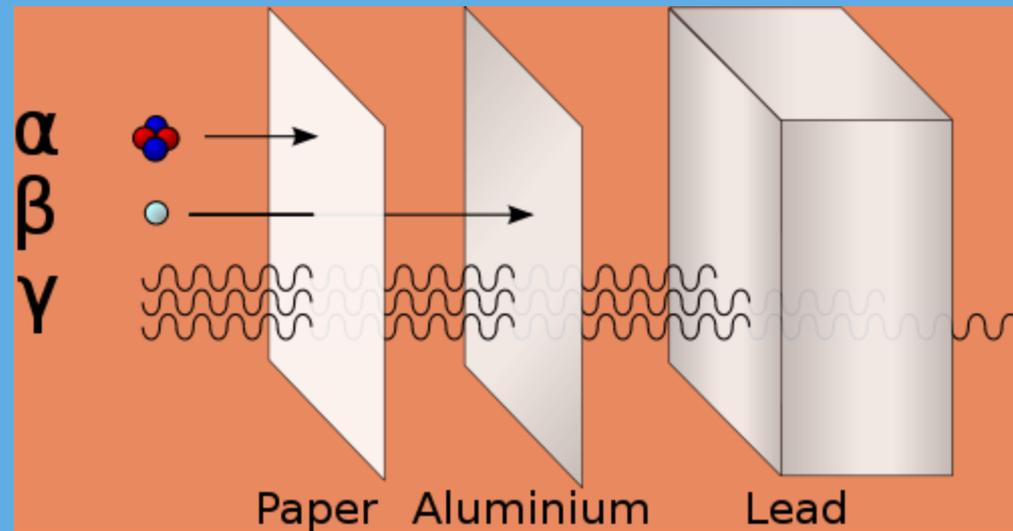
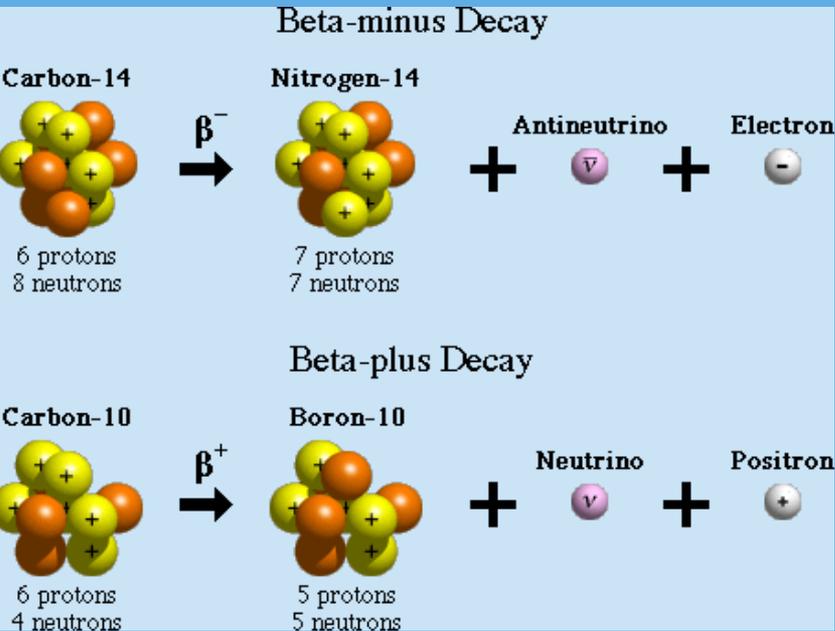
Interazioni forti



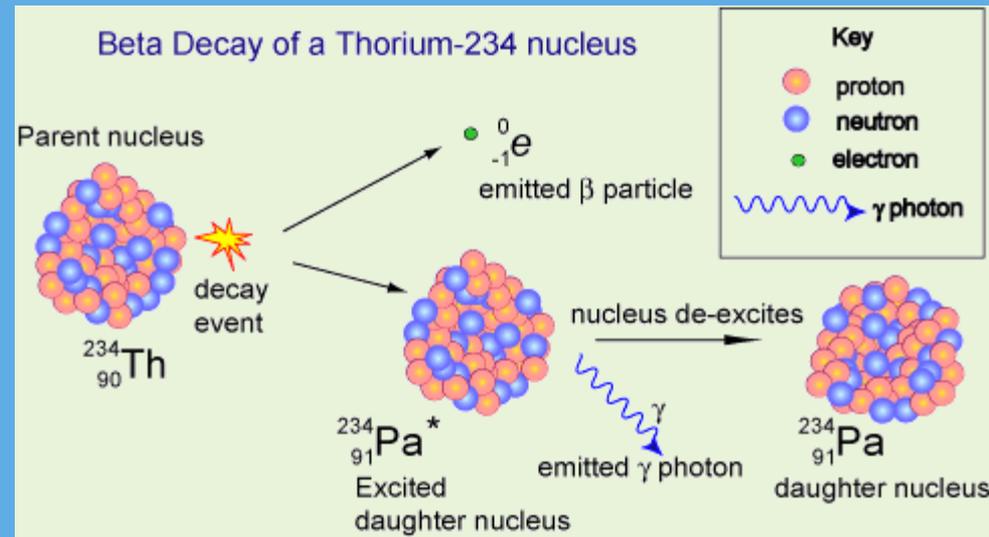
Quark, elettroni e fotoni sono i Costituenti Fondamentali dell'Atomo

I neutrini e il Decadimento Beta

...diverse modalità di decadimento beta, un fenomeno classico della radioattività naturale



Anche: decadimento beta inverso :



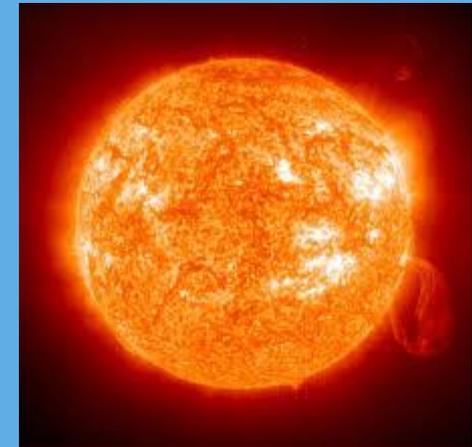
Sorgenti di Neutrini

Sorgenti stazionarie di neutrini sono :

- 1) Radioattività naturale (raggi beta e neutrini associati). Dal punto di vista astronomico questa situazione si può realizzare in un PIANETA



- 2) Reazioni di fusione che coinvolgono decadimenti beta inversi o reazioni simili. Questa situazione può aversi in una STELLA



Sole: una grande massa di idrogeno con un centro ionizzato, tenuta insieme dalla Gravità.

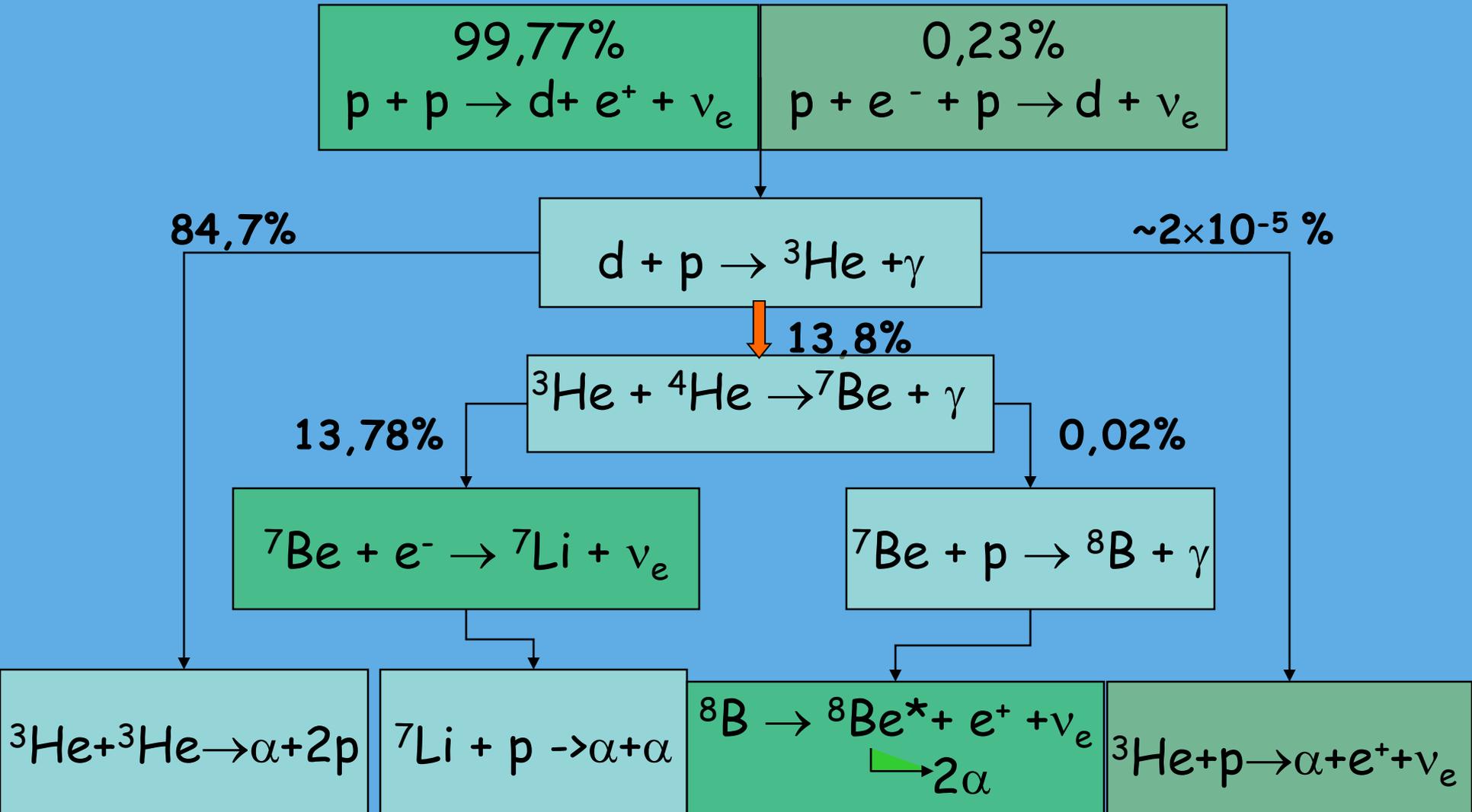


Mean diameter	1.392×10 ⁶ km 109 × Earth
Mass	1.9891×10 ³⁰ kg 333,000 × Earth
Average density	1.408×10 ³ kg/m ³
Density	Center (model): 1.622×10 ⁵ kg/m ³ Lower photosphere: 2×10 ⁻⁴ kg/m ³ Lower chromosphere: 5×10 ⁻⁶ kg/m ³ Corona (avg.): 1×10 ⁻¹² kg/m ³
Equatorial surface gravity	274.0 m/s ² 27.94 g 28 × Earth
Temperature	Center (modeled): ~1.57×10 ⁷ K Photosphere (effective): 5,778 K Corona: ~5×10 ⁶ K
Luminosity (L _{sol})	3.846×10 ²⁶ W ~3.75×10 ²⁸ lm ~98 lm/W efficacy

Energia solare che arriva a Terra:

1.36 kW/m²

Reazioni nucleari nel Sole: il ciclo pp



4. Rivelazione di Neutrini

1. Una storia personale
2. I Neutrini
3. il Centro del Sole
- 4. Rivelazione di Neutrini**
5. La fine della storia

Il Sole produce una energia di:

$$P = 3.846 \times 10^{26} \text{ W}$$

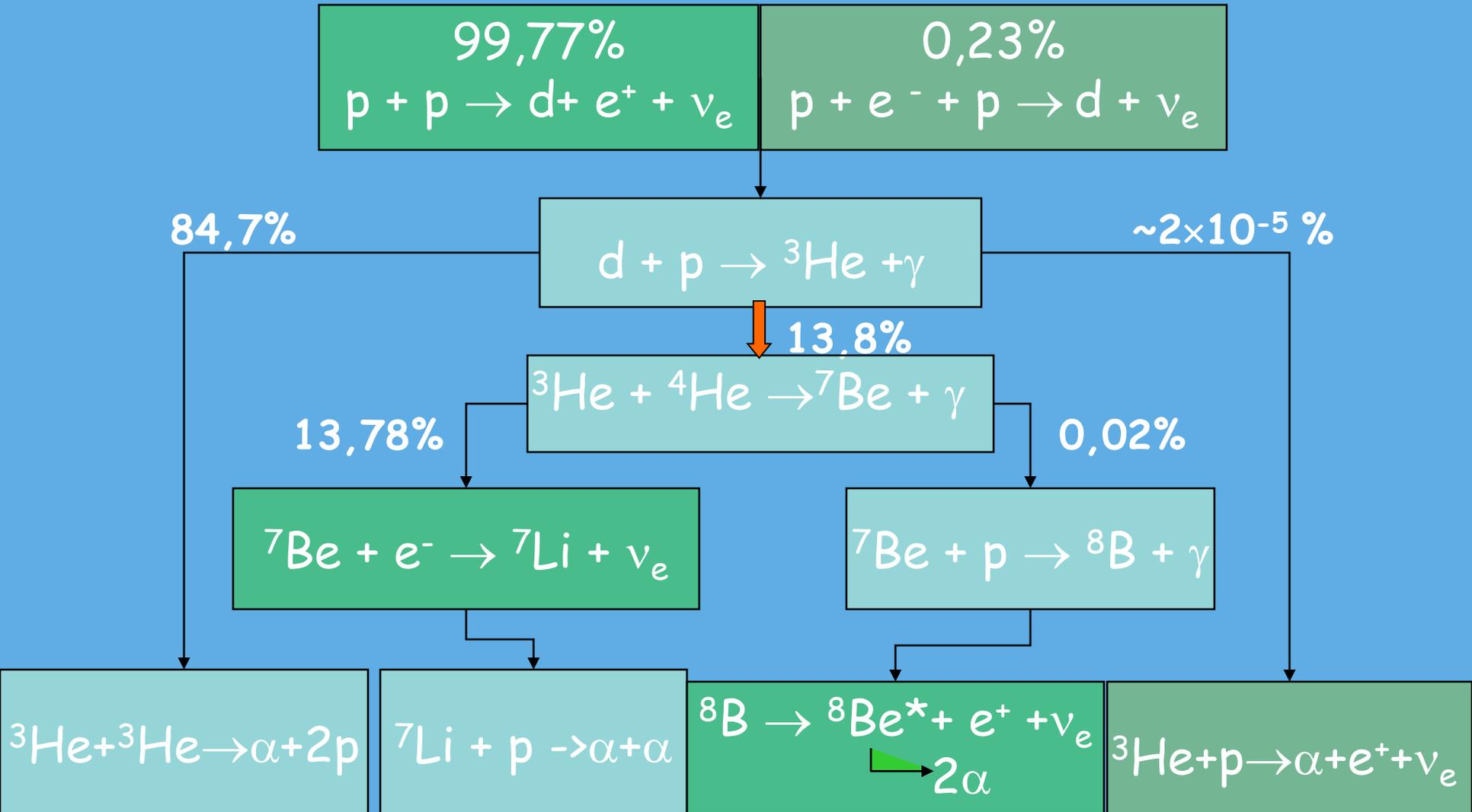
...e una piccola parte di questa energia proviene da neutrini prodotti nel suo nucleo

1.9%

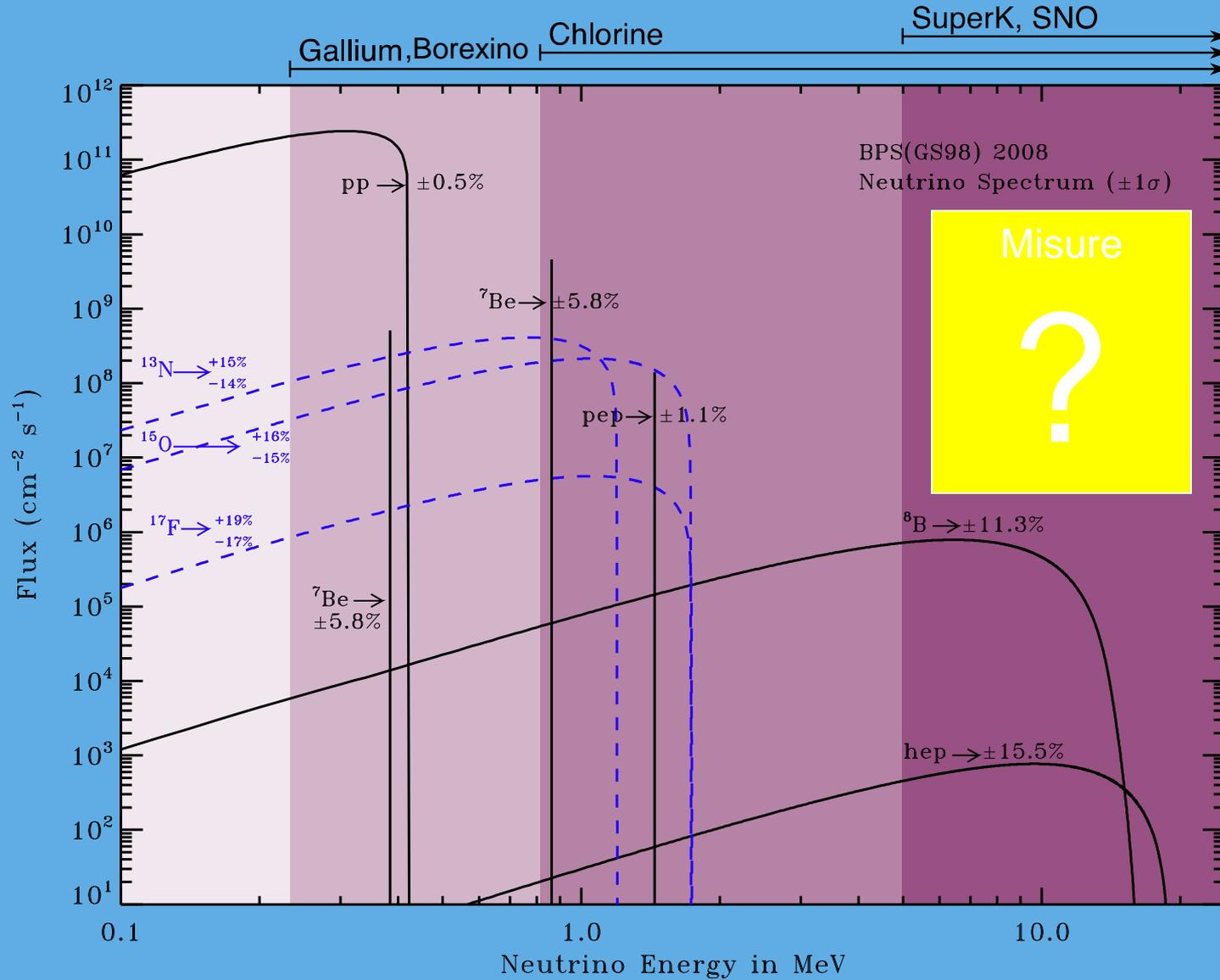
$$\Phi_{\nu}(Terra) = 6.5 \times 10^{10} / (cm^2 s)$$

Ma quale e' l'energia dei neutrini che arrivano dal Sole ?

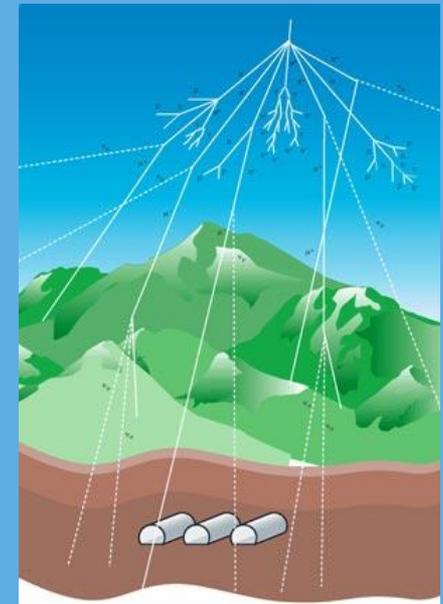
Reazioni nucleari nel Sole: il ciclo pp



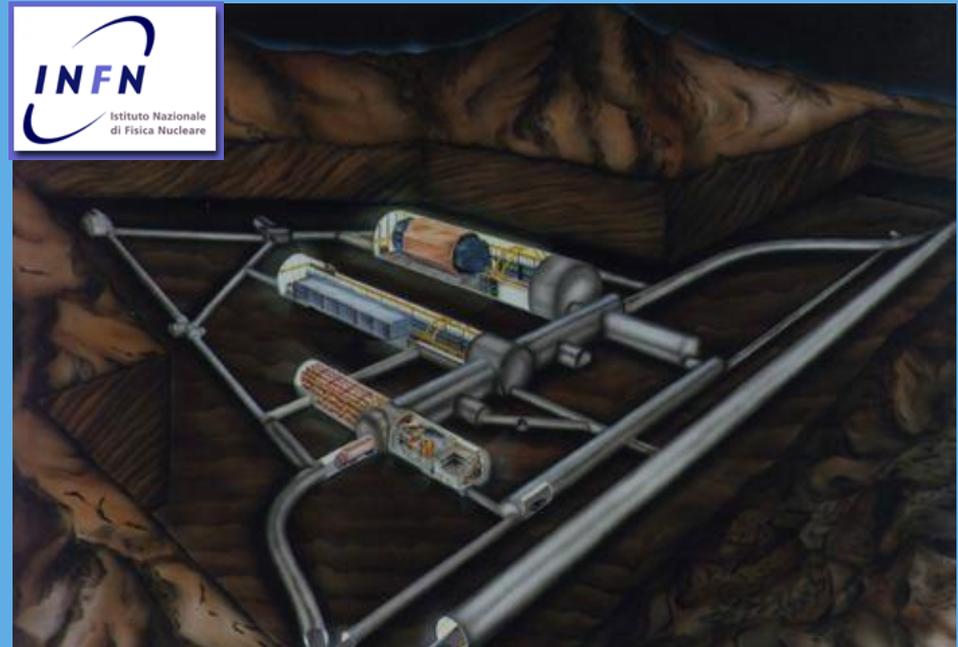
Flusso dei neutrini prodotti dal Sole



Laboratori Nazionali del Gran Sasso

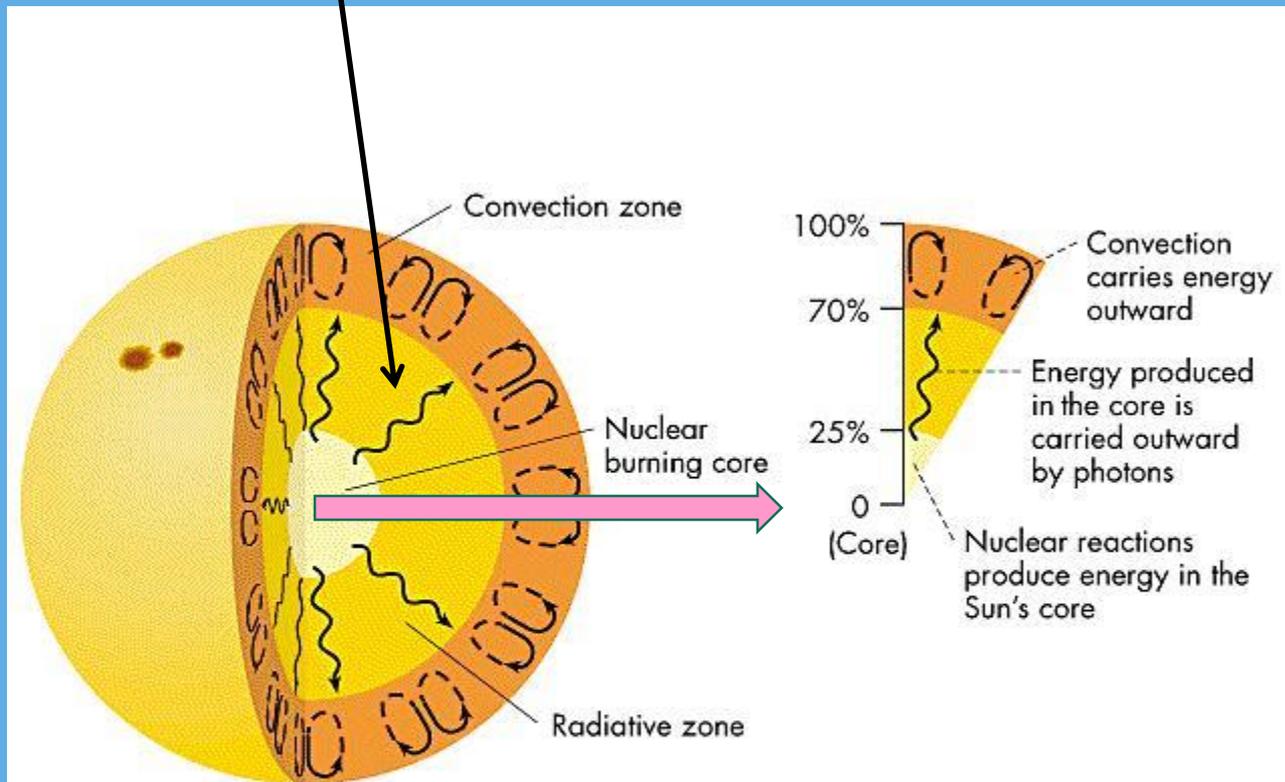


Schermo costituito da 1700 m di roccia



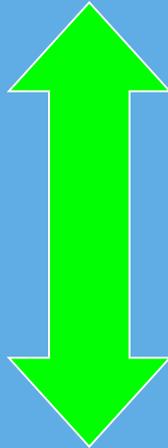
Produzione di energia : al centro del Sole. Energia, fotoni, neutrini

Energia associata ai fotoni: 200 mila anni di tempo per uscire dal Sole !



I neutrini escono dal Sole in 2 secondi !

I neutrini sono particelle elementari



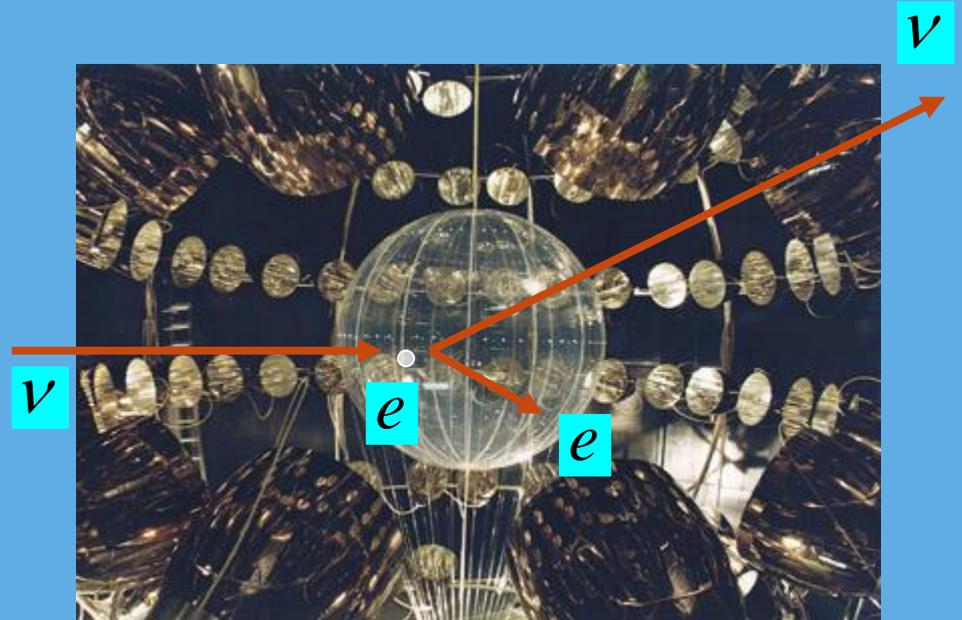
con altre particelle

rivelabili per mezzo di urti nucleari

Ad esempio: diffusione elastica
sugli elettroni del mezzo



Gli elettroni (carichi!) lasciano
un segnale rivelabile



Interno del rivelatore Borexino al Laboratorio Nazionale del Gran Sasso

11 m

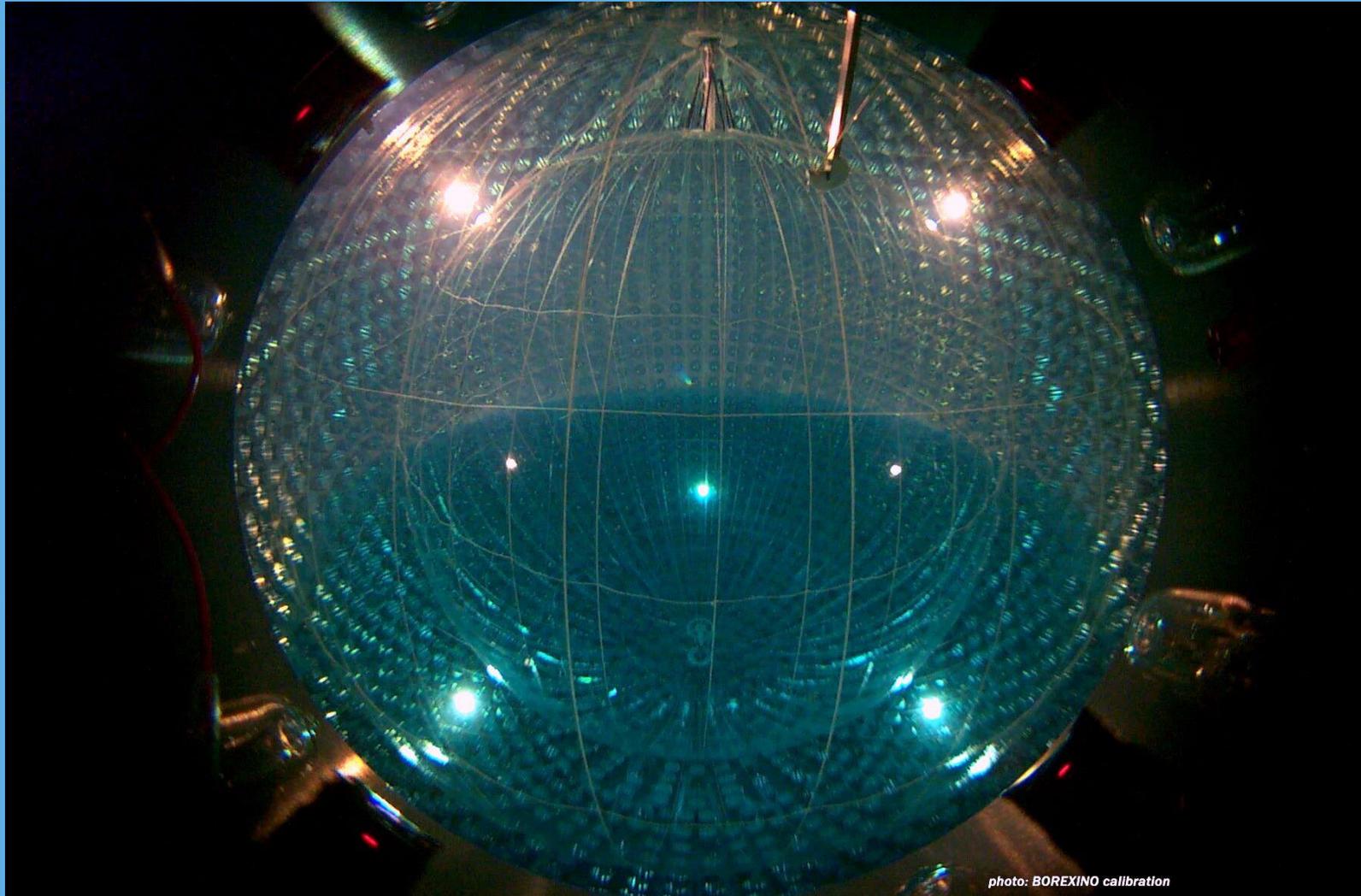
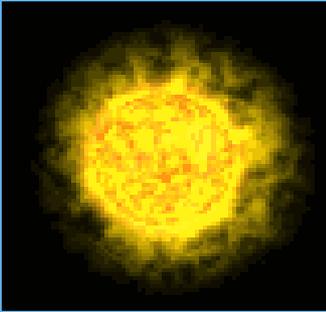


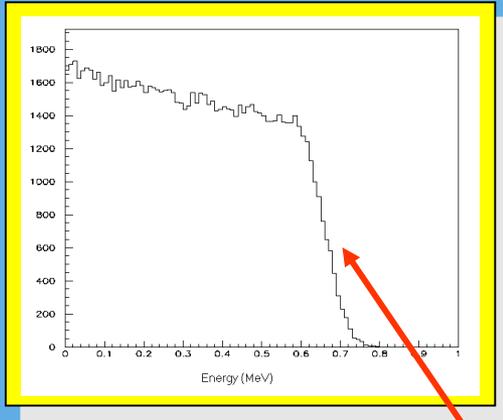
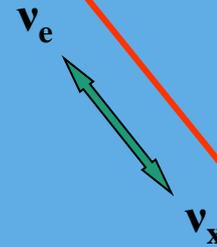
photo: BOREXINO calibration



Questi rivelatori (e altri) hanno reso possibile l'Astronomia dei Neutrini



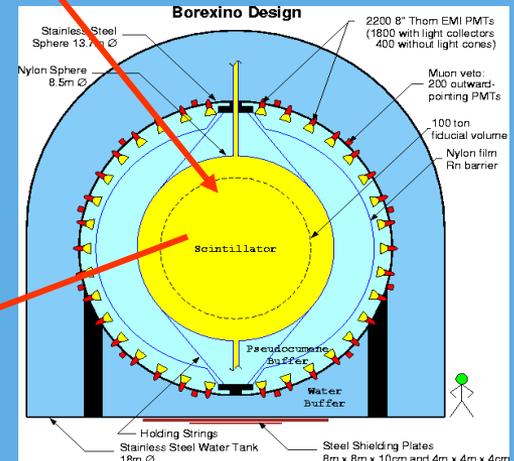
$E_\nu = 862 \text{ keV}$ (monocromatico)
 $\Phi_{\text{SSM}} = 4.8 \cdot 10^9 \text{ v s}^{-1} \text{ cm}^2$



Spettro d'elettrone scatterato



Sezione d'urto $\approx 10^{-44} \text{ cm}^2$ (@ 1 MeV)



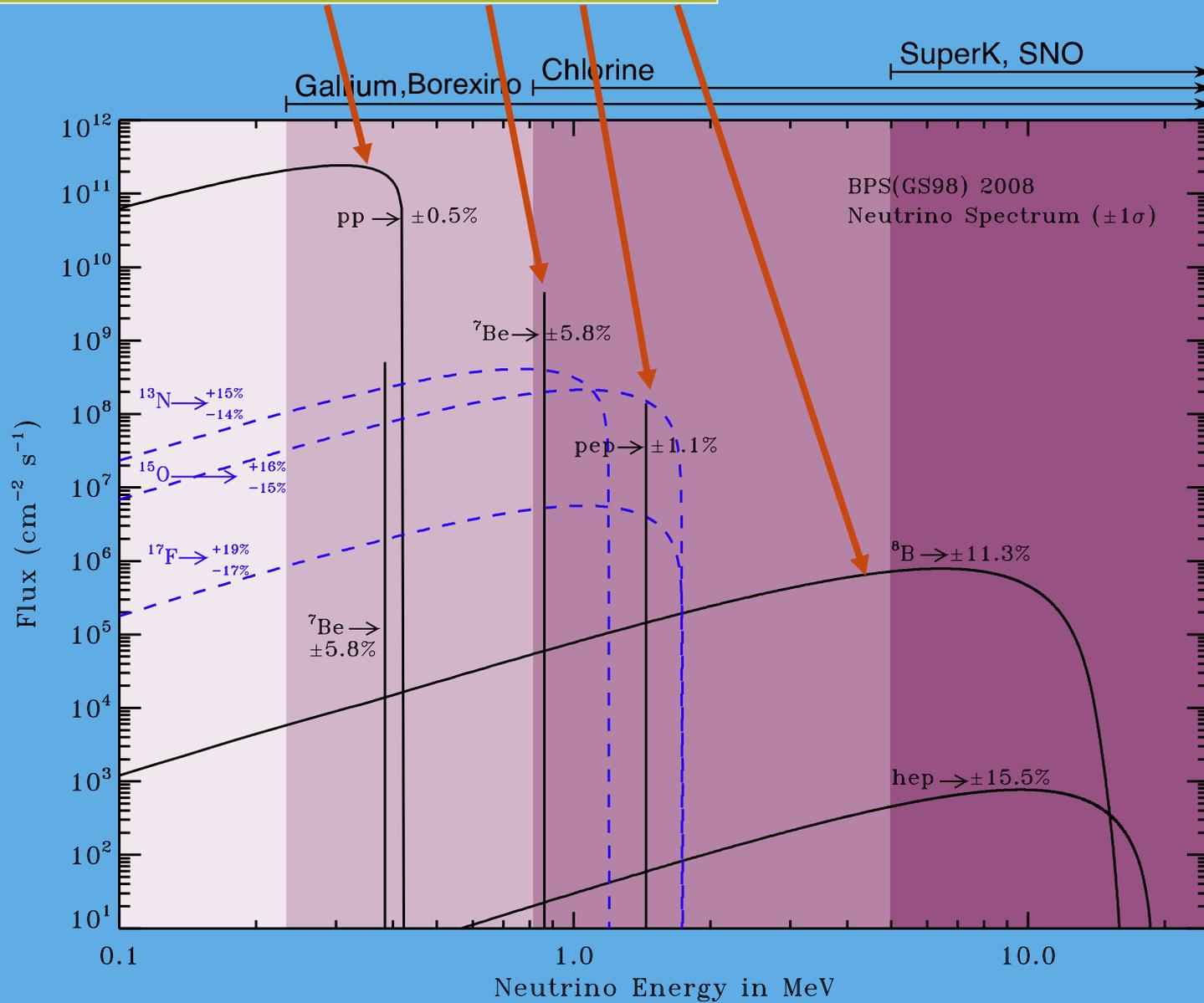
5. La fine della storia

1. Una storia personale
2. I Neutrini
3. il Centro del Sole
4. Rivelazione di Neutrini
- 5. La fine della storia**



Our international Borexino collaboration

Componenti misurate del flusso di neutrini





Available online at www.sciencedirect.com



Physics Letters B 658 (2008) 101–108

PHYSICS LETTERS B

www.elsevier.com/locate/physletb

First real time detection of ${}^7\text{Be}$ solar neutrinos by Borexino

Borexino Collaboration

ARTICLE

<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0624-y>

Comprehensive measurement of *pp*-chain solar neutrinos

The Borexino Collaboration*

PRL 108, 051302 (2012)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
3 FEBRUARY 2012



First Evidence of *pep* Solar Neutrinos by Direct Detection in Borexino

BOREXINO E LO SPLENDORE DELLE STELLE



Studiando i neutrini provenienti dal Sole, **Borexino dimostra che i meccanismi che fanno brillare le stelle funzionano veramente così come era stato ipotizzato.**

SOLE
O STELLE SIMILI



STELLE GRANDI ALMENO
UNA VOLTA E MEZZO IL SOLE



La temperatura interna del Sole raggiunge i 10 milioni di gradi

Fondono nuclei

di Idrogeno (H^1) e formano Deuterio (D^2) (ciclo PP dominante)

Laboratori sotterranei del Gran Sasso dell'INFN



neutrini ν



La temperatura interna delle stelle massive supera i 18 milioni di gradi

Fondono nuclei

di Carbonio, Azoto e Ossigeno (ciclo CNO dominante)

Anche la reazione CNO è stata studiata attraverso i neutrini emessi dal Sole.

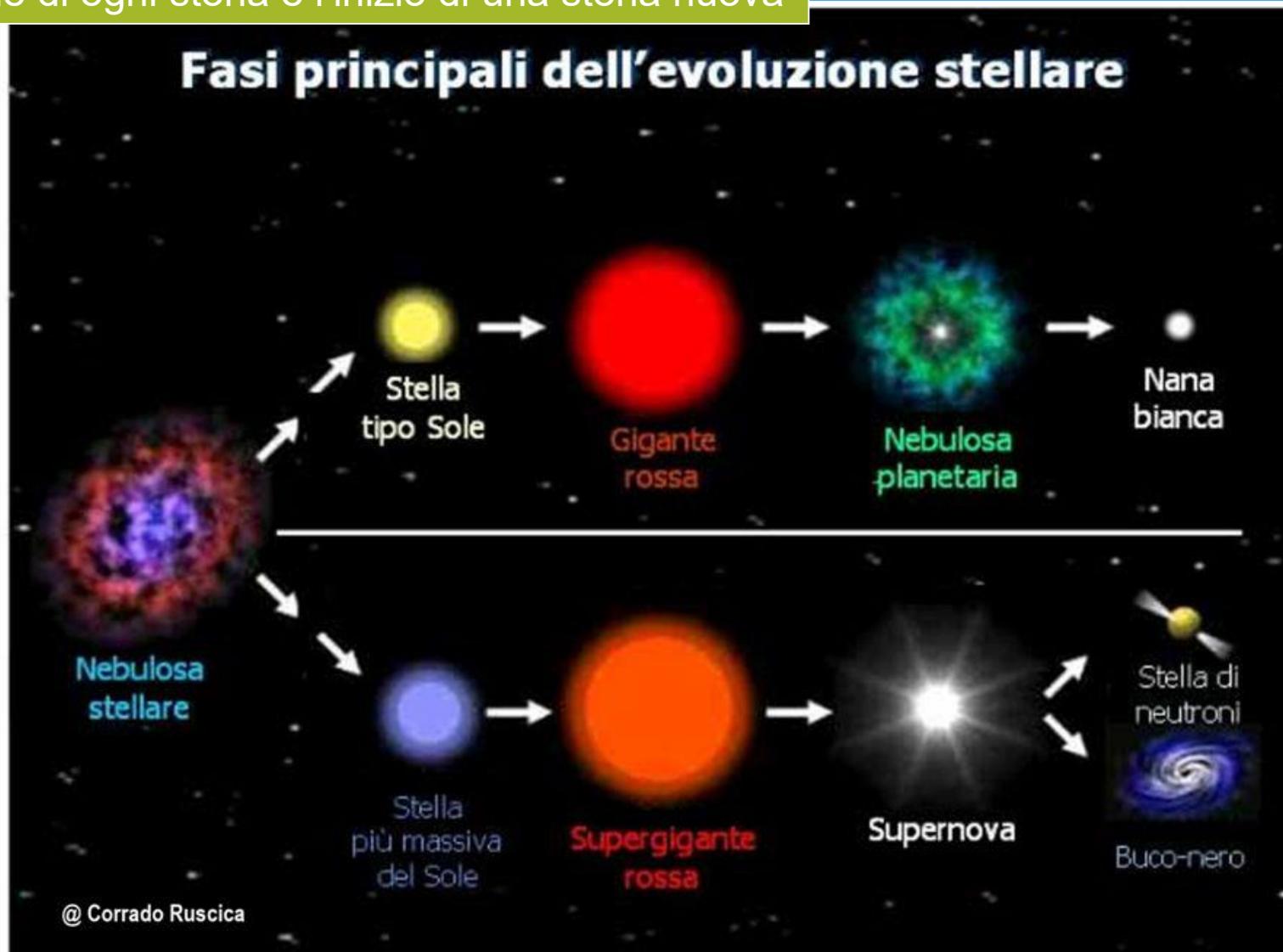


Rivelatore di neutrini Borexino

Borexino ha ottenuto la prova sperimentale di questa reazione

CESTIMISPI.IT

La fine di ogni storia è l'inizio di una storia nuova



81 - La vita di una stella dipende dalla sua massa iniziale

ARTICLE

doi:10.1038/nature13702

Neutrinos from the primary proton–proton fusion process in the Sun

Borexino Collaboration*

In the core of the Sun, energy is released through sequences of nuclear reactions that convert hydrogen into helium. The primary reaction is thought to be the fusion of two protons with the emission of a low-energy neutrino. These so-called *pp* neutrinos constitute nearly the entirety of the solar neutrino flux, vastly outnumbering those emitted in the reactions that follow. Although solar neutrinos from secondary processes have been observed, proving the nuclear origin of the Sun's energy and contributing to the discovery of neutrino oscillations, those from proton–proton fusion have hitherto eluded direct detection. Here we report spectral observations of *pp* neutrinos, demonstrating that about 99 per cent of the power of the Sun, 3.84×10^{33} ergs per second, is generated by the proton–proton fusion process.

...il libro di Scienze del Liceo aveva ragione.