

PROGETTO PCTO ASTROFISICA NUCLEARE 2022-23

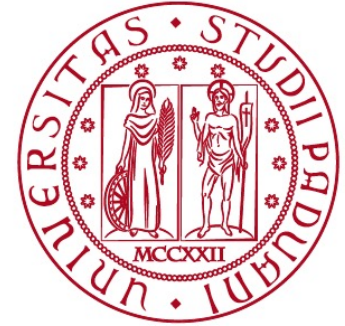
Prima Lezione: 9 Novembre 2022

Seconda Lezione: 7 Dicembre 2022

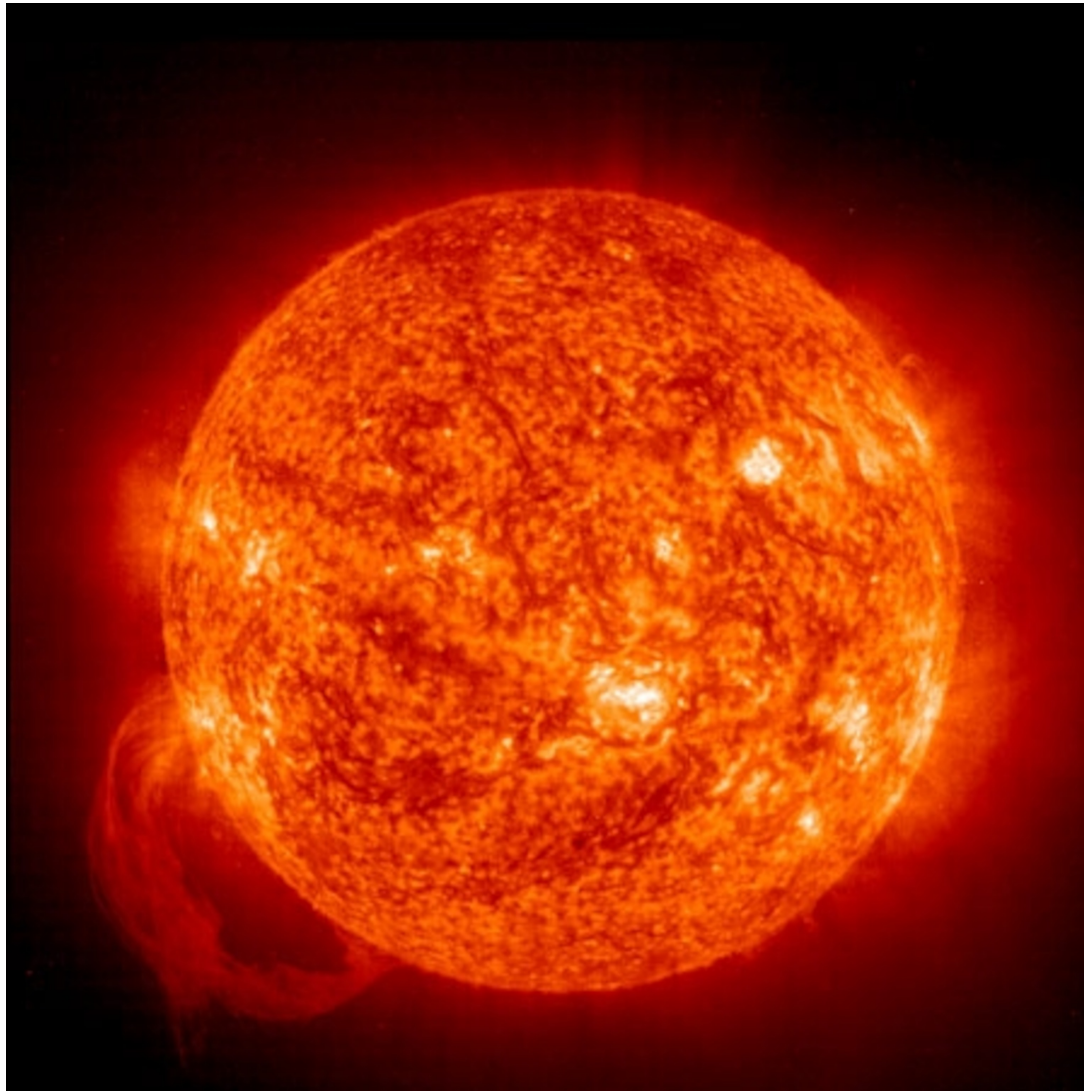
Laboratorio: 23 Gennaio 2022 ore 15.00 - 17.00

Aula Informatica LabP104

Complesso Paolotti - via Belzoni 6 - Padova



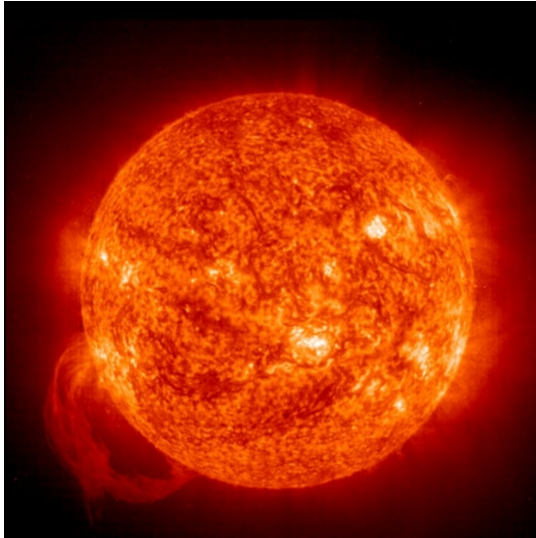
QUANTO È VECCHIO IL SOLE?



Credit: National Geographic



QUANTO È VECCHIO IL SOLE?



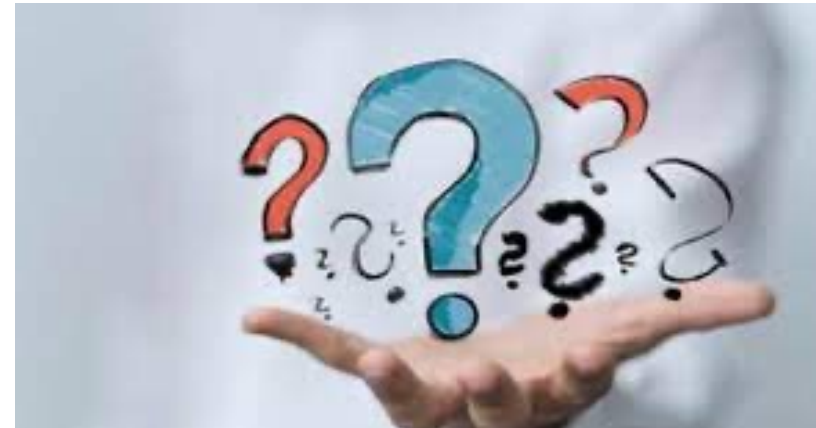
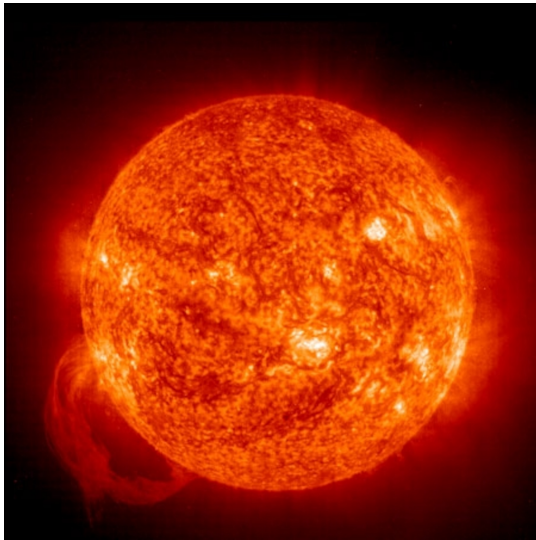
1847: Robert Julius von Mayer: Il Sole riscaldato dalla caduta delle meteore

1854: Hermann von Helmholtz: Energia gravitazionale della nebula protosolare si trasforma in energia cinetica di meteore

Intorno al 1850: William Thompson (Lord Kelvin): Sole creato alla formazione dalla caduta di un meteorite, adesso una mass incandescente e liquida che si sta raffreddando

1859: Charles Darwin «Origine delle specie»: Il rate di erosione della «Weald valley» è 1 inch/secolo che porta ad una età della Terra di almeno 300 milioni di anni

QUANTO È VECCHIO IL SOLE?



1868: scoperta dell'Elio nello spettro solare

1881 e 1895 osservazione di Elio sulla Terra

1847: Robert Julius von Mayer: Il Sole riscaldato dalla caduta delle meteore

1854: Hermann von Helmholtz: Energia gravitazionale della nebula protosolare si trasforma in energia cinetica di meteore

Intorno al 1850: William Thompson (Lord Kelvin): Sole creato alla formazione dalla caduta di un meteorite, adesso una mass incandescente e liquida che si sta raffreddando

1859: Charles Darwin «Origine delle specie»: Il rate di erosione della «Weald valley» è 1 inch/secolo che porta ad una età della Terra di almeno 300 milioni di anni

COM'È FATTO IL SOLE

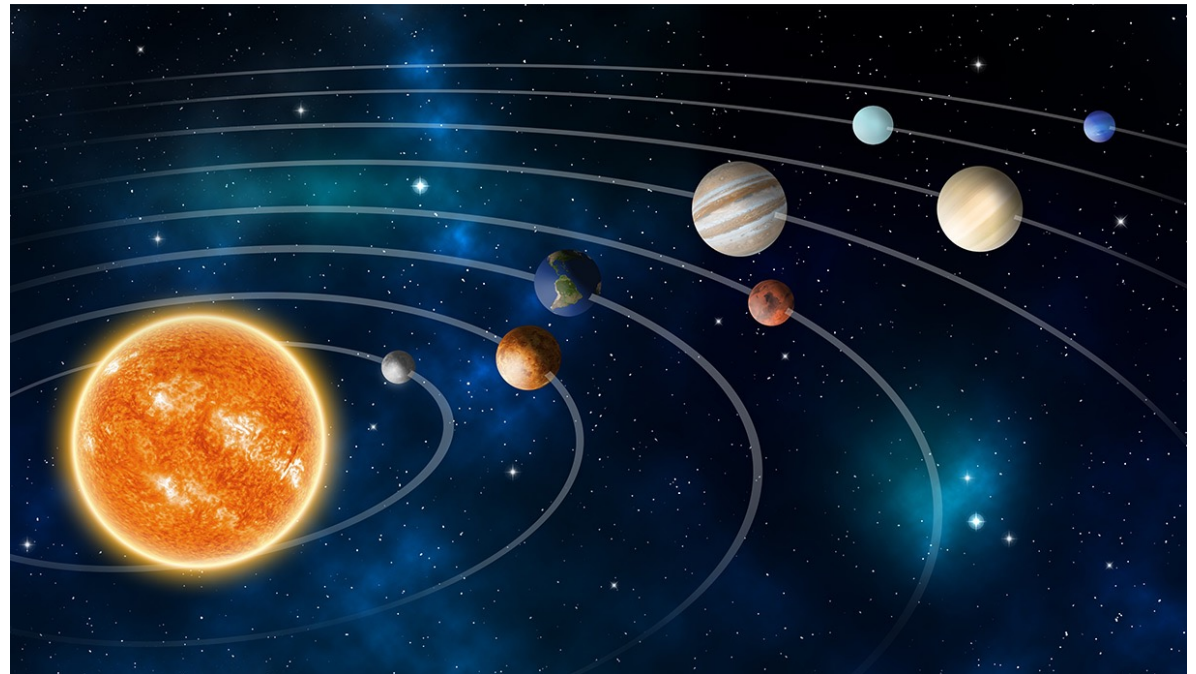
Un sistema isolato nello spazio (Mercurio dista ~ 60 milioni di km)

Una massa gassosa composta da:

H al 70%

He al 28%

"metalli" 2%

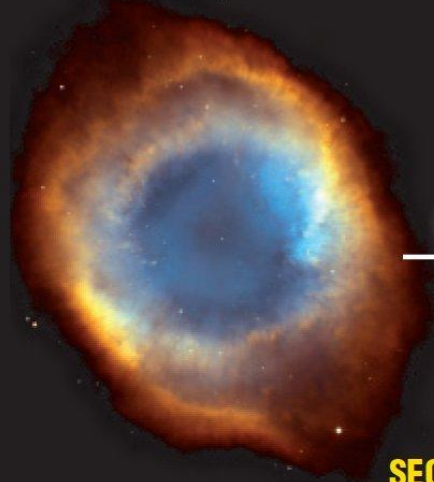


Irraggia energia -> Splende!

La vita delle stelle

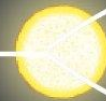
NEBULOSA STELLARE

Una regione più densa della nebulosa inizia a restringersi, a riscaldarsi e diventa una protostella



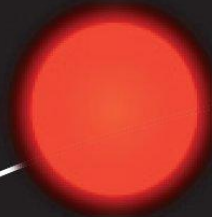
SEQUENZA PRINCIPALE

La stella risplende grazie alle reazioni nucleari che producono luce e calore



SUPERGIGANTE

Le stelle più grandi si espandono, si raffreddano e diventano rosse



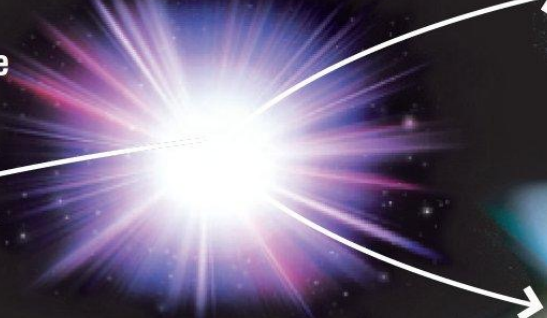
GIGANTE ROSSA

Le stelle più piccole si espandono e diventano rosse



SUPERNOVA

La supergigante esplose diventando brillantissima



NEBULOSA PLANETARIA

I gas più esterni si disperdono



Il nucleo esposto forma una **NANA BIANCA**



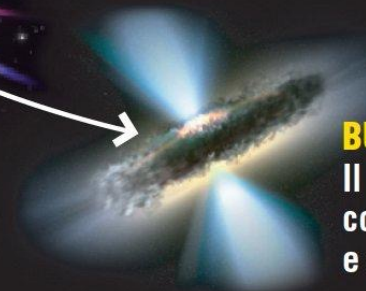
STELLA DI NEUTRONI

Il nucleo della supernova collassa e diventa densissimo



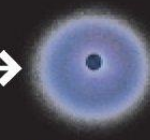
BUCO NERO

Il nucleo collassa completamente e scompare



NANA NERA

La stella smette di bruciare

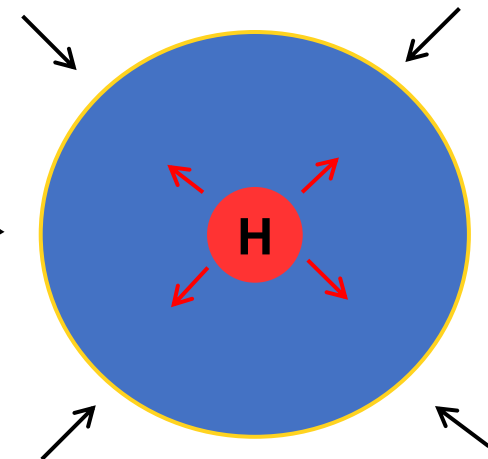


ANSA centimetri

EVOLUZIONE STELLARE

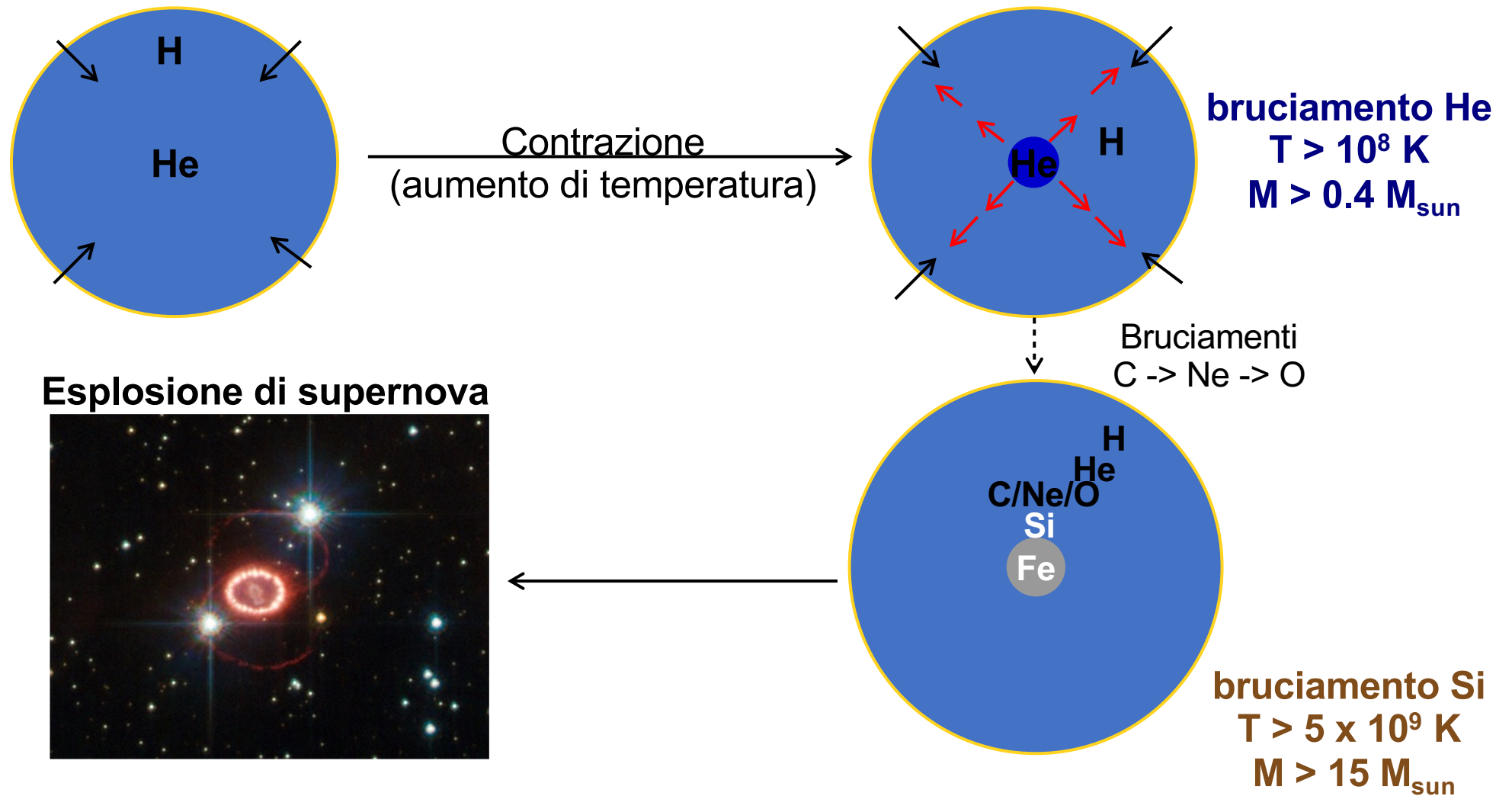


Contrazione
gravitazionale



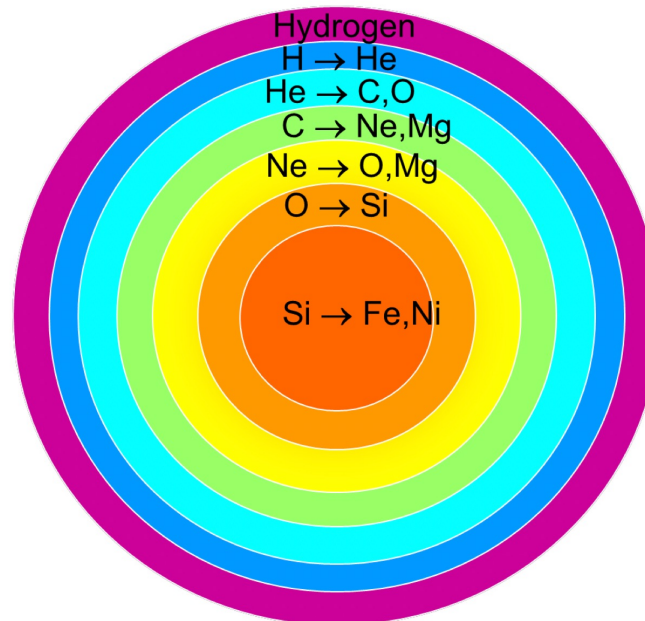
bruciamento H
 $T > 10^7$ K
 $M > 0.08 M_{\text{sole}}$

EVOLUZIONE STELLARE



EVOLUZIONE STELLARE

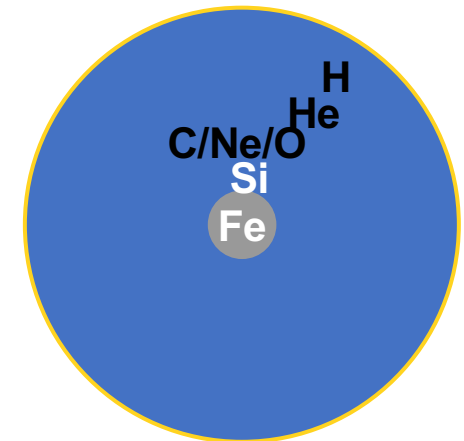
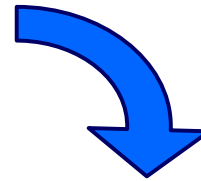
Burning stage	Dominant process	T_c [keV]	ρ_c [g/cm ³]	L_γ [$10^4 L_\odot$]	L_ν/L_γ	Duration [years]
Hydrogen	H \rightarrow He	3	5.9	2.1	—	1.2×10^7
Helium	He \rightarrow C, O	14	1.3×10^3	6.0	1.7×10^{-5}	1.3×10^6
Carbon	C \rightarrow Ne, Mg	53	1.7×10^5	8.6	1.0	6.3×10^3
Neon	Ne \rightarrow O, Mg	110	1.6×10^7	9.6	1.8×10^3	7.0
Oxygen	O \rightarrow Si	160	9.7×10^7	9.6	2.1×10^4	1.7
Silicon	Si \rightarrow Fe, Ni	270	2.3×10^8	9.6	9.2×10^5	6 days



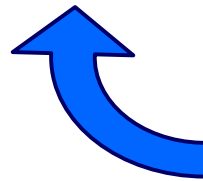
EVOLUZIONE STELLARE



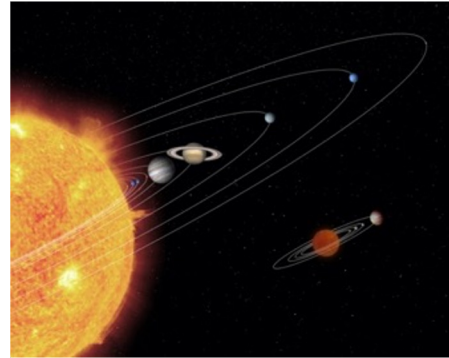
Formazione di stelle e pianeti
a partire da una nube di gas



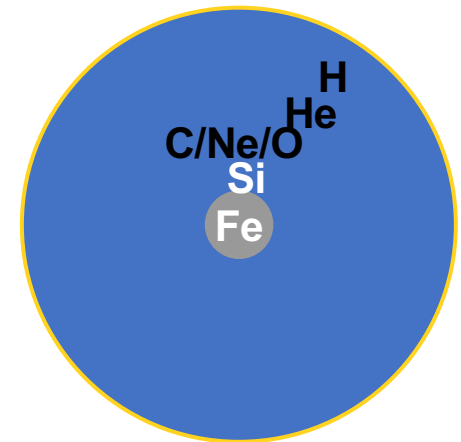
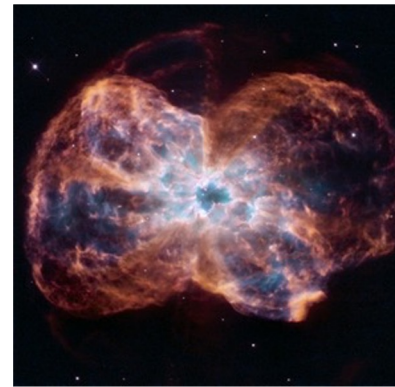
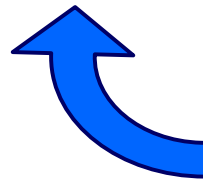
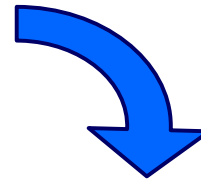
Produzione elementi ed espulsione nel mezzo
interstellare



EVOLUZIONE STELLARE



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

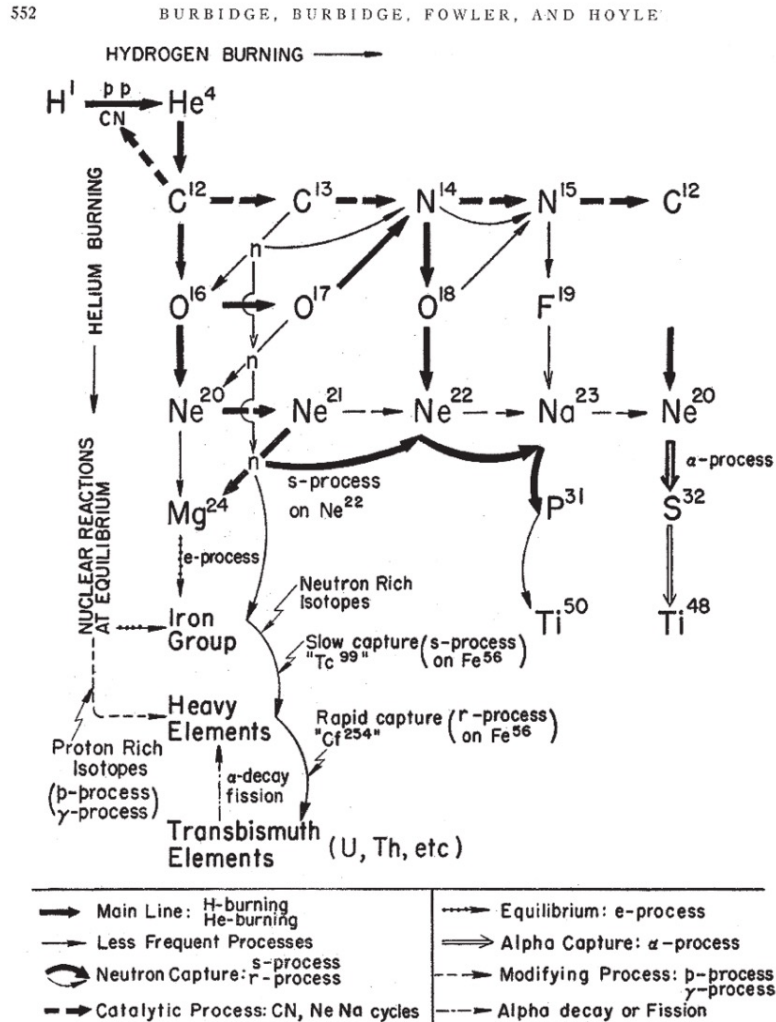


Produzione elementi ed espulsione nel mezzo
interstellare

Landmark paper: **B²FH**

"Synthesis of the Elements in Stars"

(**B**urbidge, **B**urbidge, **F**owler & **H**oyle 1957)

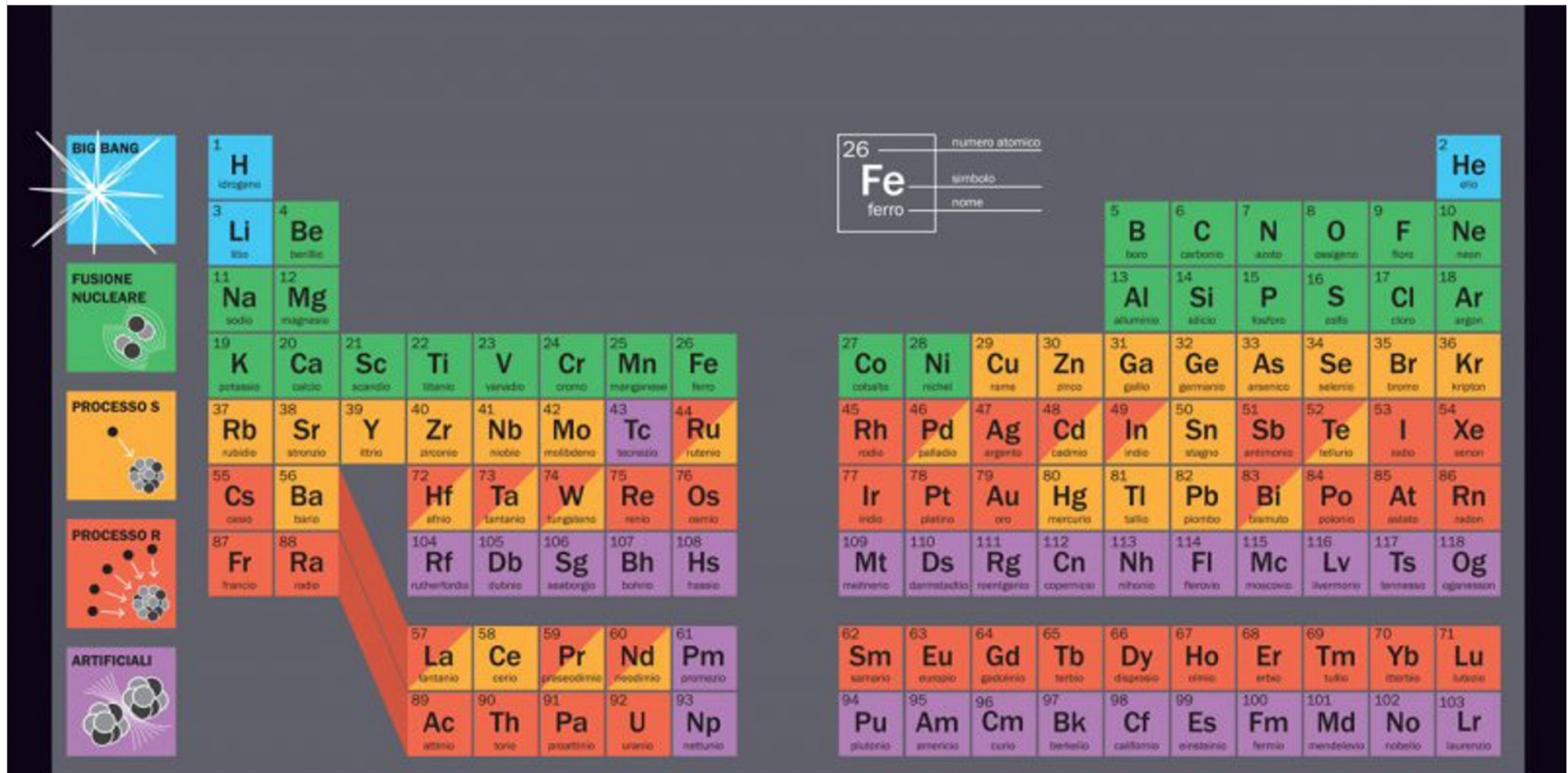


Margaret Burbidge Geoffrey Burbidge
William Fowler Fred Hoyle

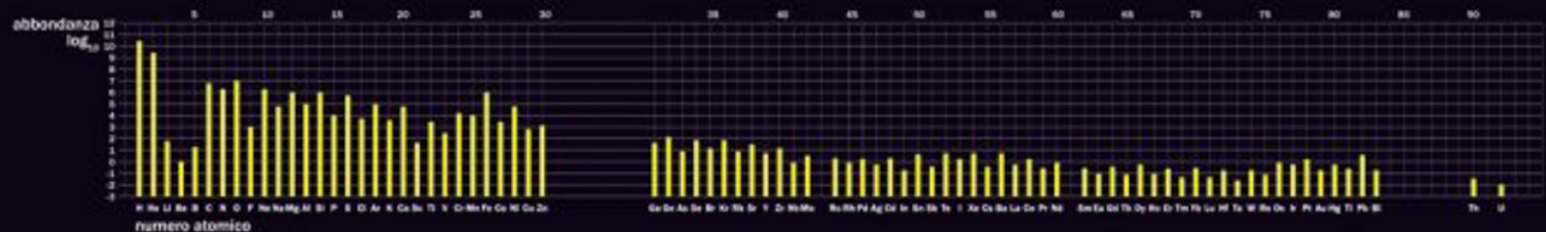


B2FH at the symposium celebrating Willy Fowler's sixtieth birthday at the Institute of Theoretical Astronomy, Cambridge in 1971. The fully working miniature steam engine was a sixtieth birthday present to Willy, who was a steam engine enthusiast.

2019 Anno Internazionale della Tavola Periodica UNESCO

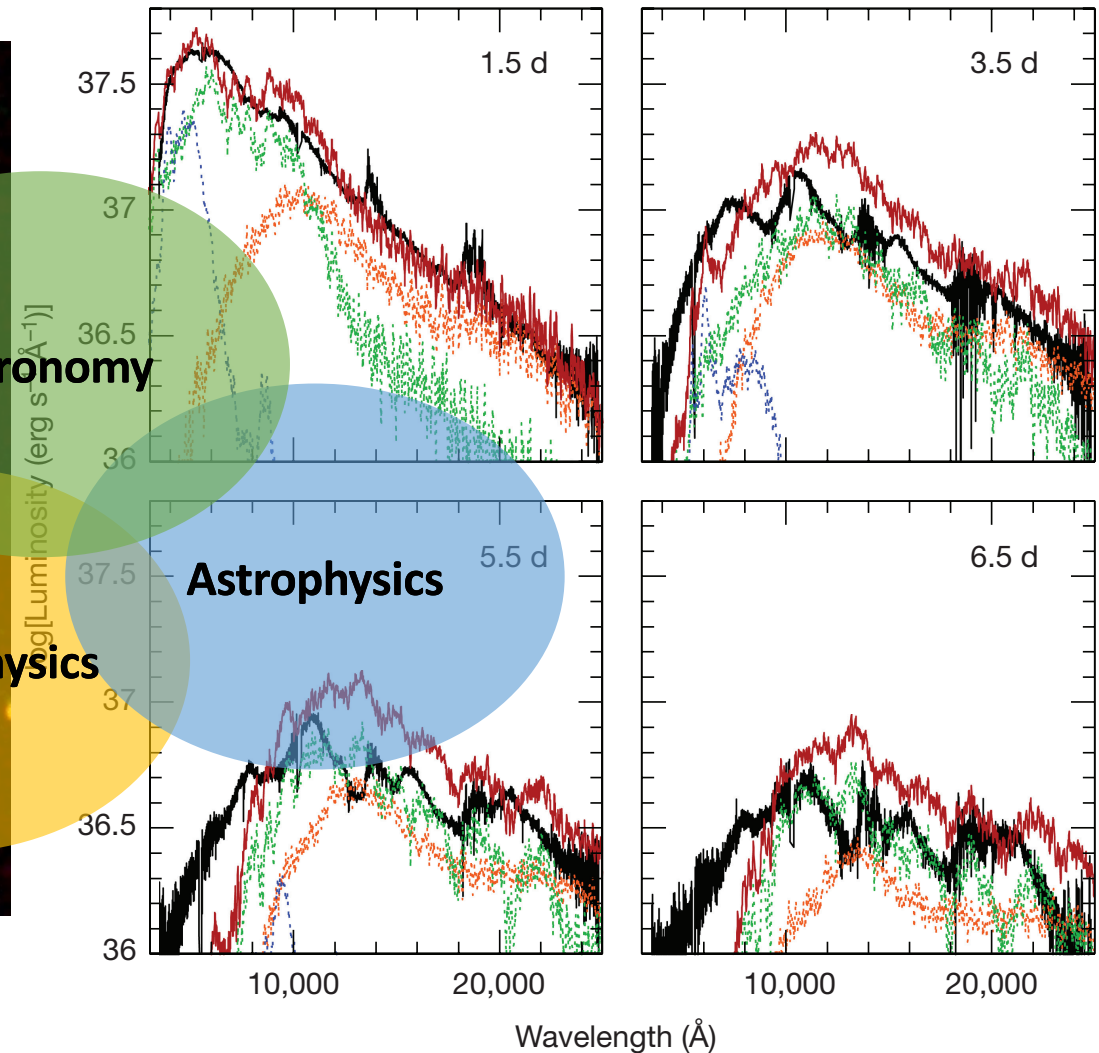
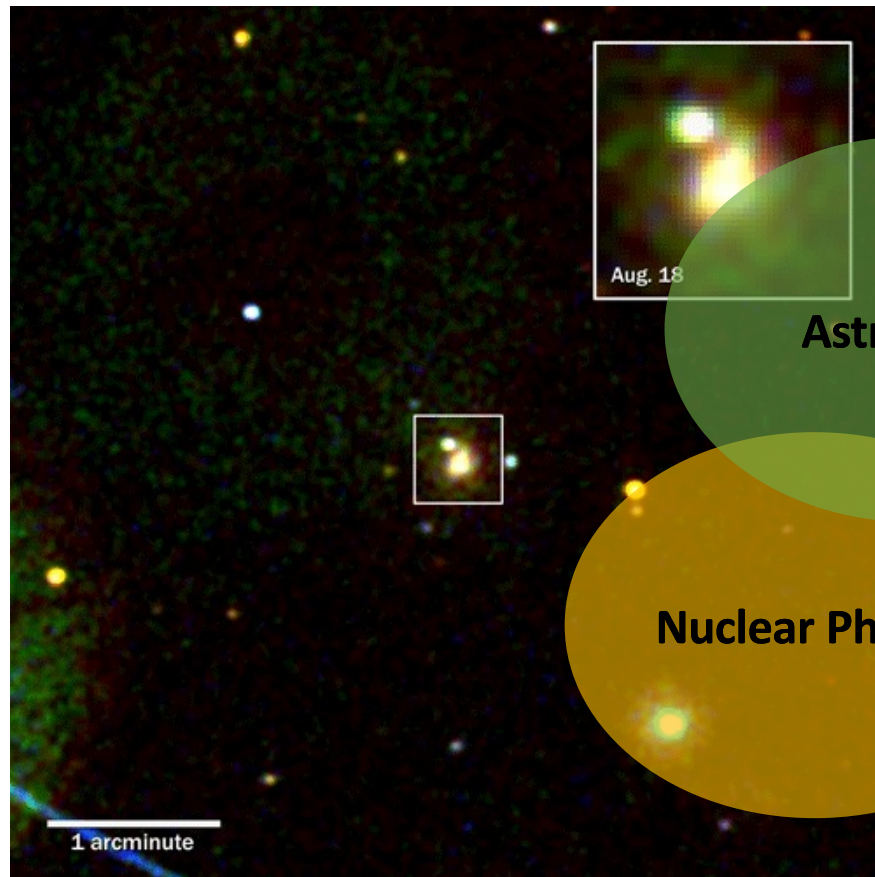


ASIMMETRIE
N° 46
2019

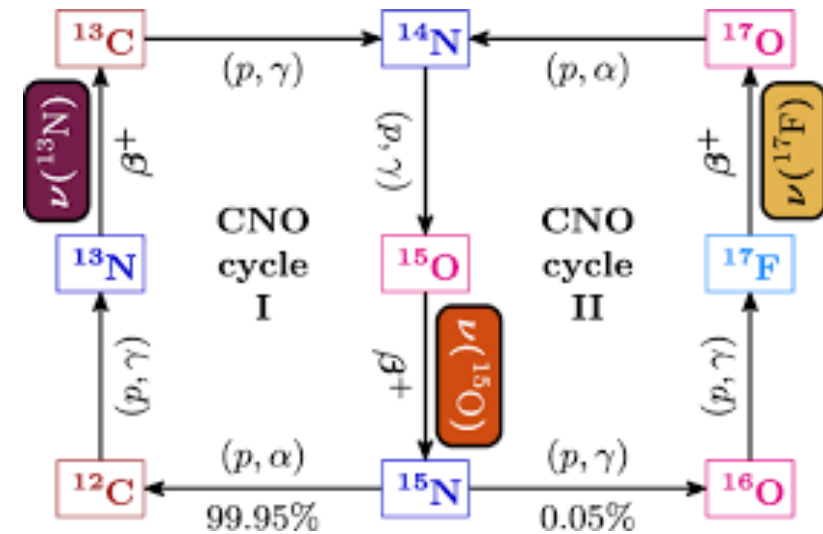
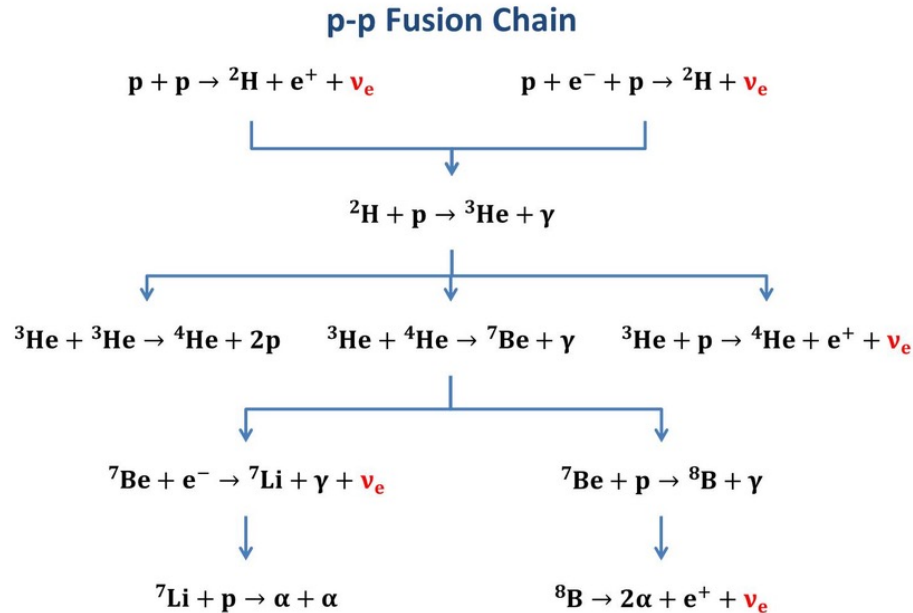


ASTROFISICA NUCLEARE COME INTERSEZIONE DI TRE DISCIPLINE

GW170817 and its kilonova



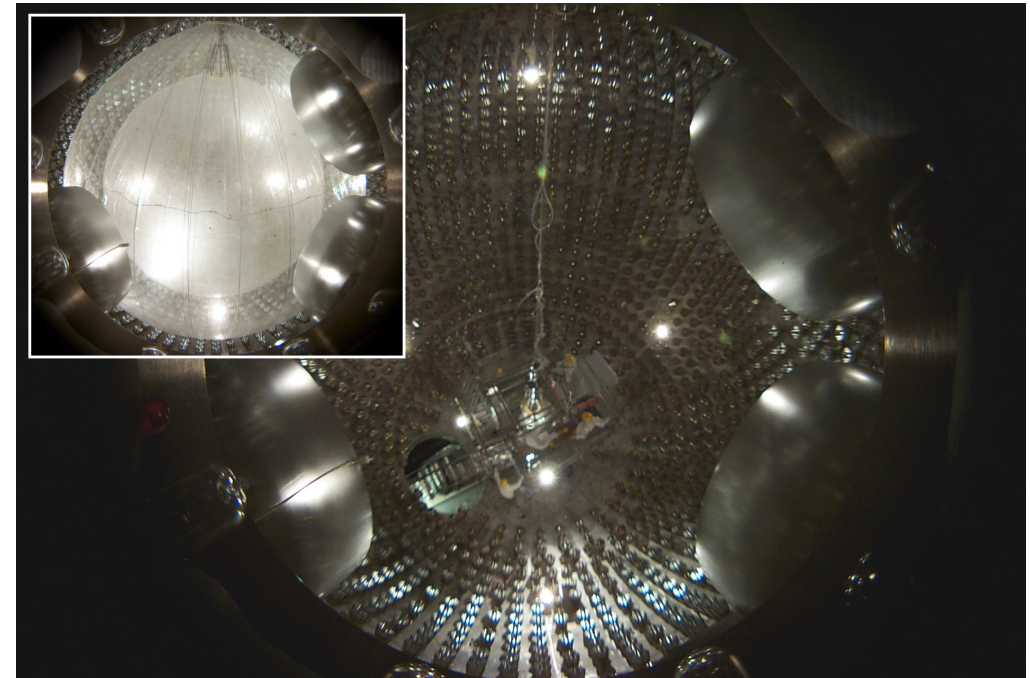
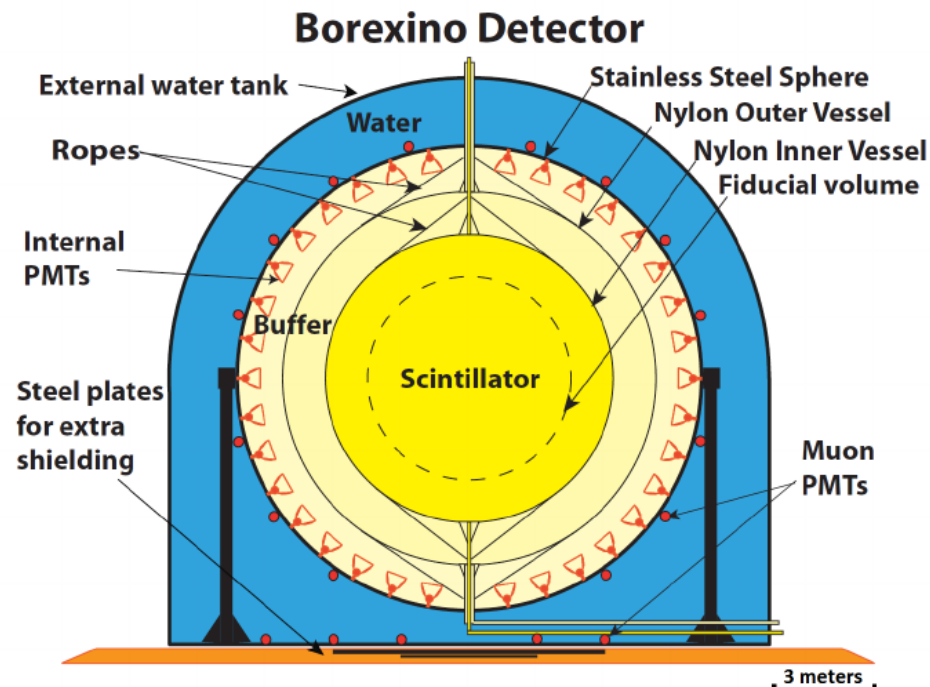
I NEUTRINO COME SONDE PER CONOSCERE L'INTERNO DEL SOLE



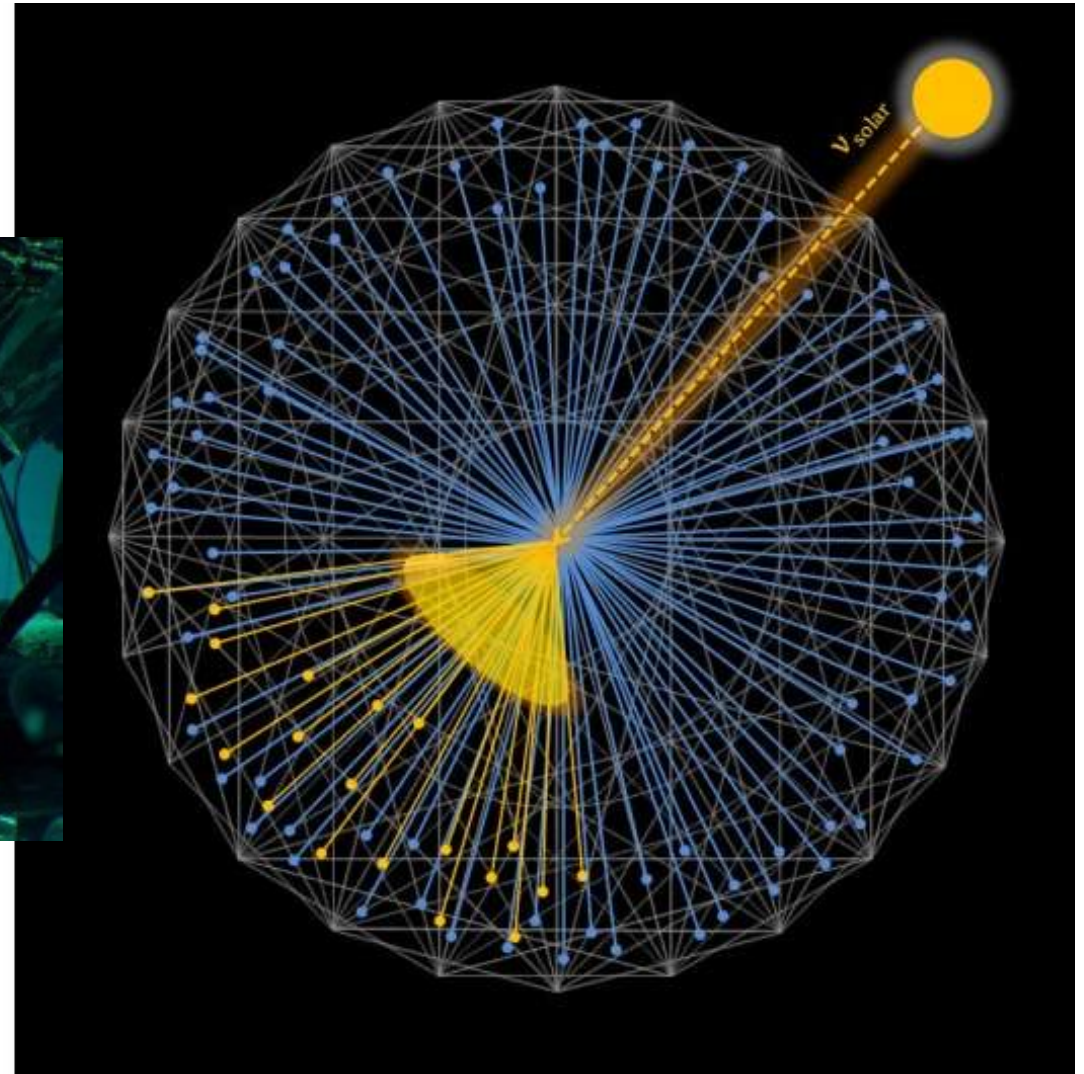
I fotoni raggiungono la Terra dopo 8 minuti se partono dalla superficie, ma quelli che vengono prodotti dalle reazioni nucleari impiegano circa 100.000 anni a raggiungere la superficie del Sole

I neutrini impiegano pochi secondi ad uscire dal Sole e 8 minuti ad arrivare a noi

BOREXINO: UNA MACCHINA FOTOGRAFICA PER NEUTRINO SOLARI



BOREXINO: UNA MACCHINA FOTOGRAFICA PER NEUTRINO SOLARI



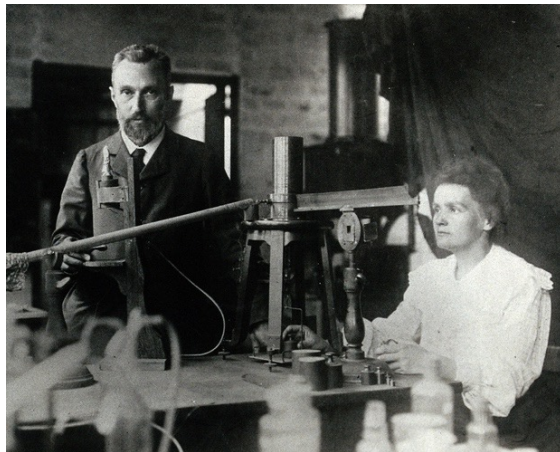
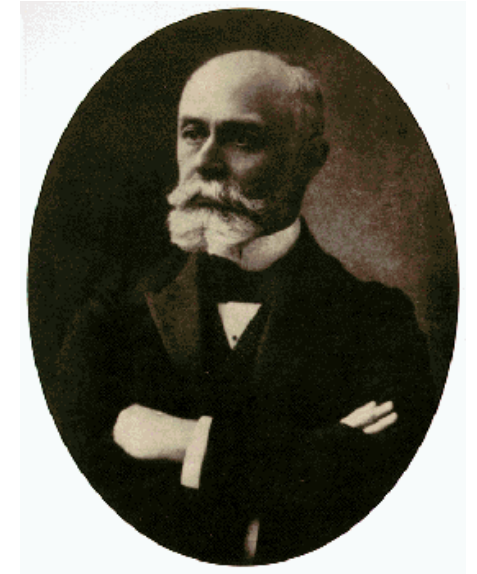
SCOPERTA RADIOATTIVITÀ E NASCITA DELLA FISICA MODERNA

While it is never safe to affirm that the future of Physical Science has no marvels in store even more astonishing than those of the past, **it seems probable that most of the grand underlying principles have been firmly established and that further advances are to be sought chiefly in the rigorous application of these principles to all the phenomena which come under our notice.** It is here that the science of measurement shows its importance — where quantitative work is more to be desired than qualitative work. An eminent physicist remarked that the future truths of physical science are to be looked for in the sixth place of decimals.

Albert Michelson in 1894

SCOPERTA RADIOATTIVITÀ E NASCITA DELLA FISICA MODERNA

1896: scoperta della radioattività nei sali di Uranio di Bequerel



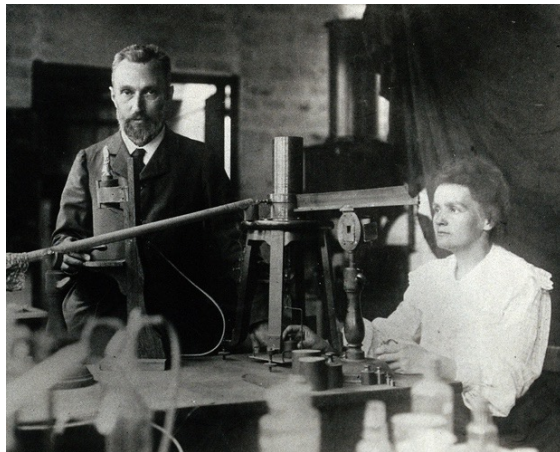
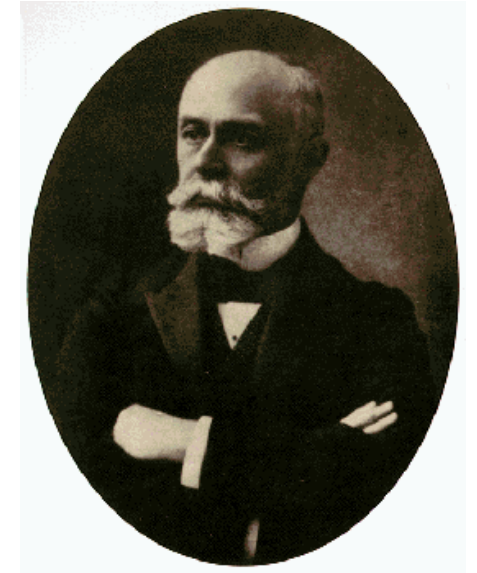
1896 - 1897: identificazione degli elementi radioattivi polonio e radio (Pierre e Marie Curie)

1897: scoperta dell'elettrone J.J. Thompson

1897: identificazione dei raggi alpha, beta e gamma

SCOPERTA RADIOATTIVITÀ E NASCITA DELLA FISICA MODERNA

1896: scoperta della radioattività nei sali di Uranio di Bequerel



1896 - 1897: identificazione degli elementi radioattivi polonio e radio (Pierre e Marie Curie)

1897: scoperta dell'elettrone J.J. Thompson

1897: identificazione dei raggi alpha, beta e gamma

Legge di Geiger Nuttal sul decadimento alpha 1911

Descrizione di Gamow del decadimento alpha 1928

Teoria del decadimento beta Fermi 1933

STORIA DELL'ATOMO

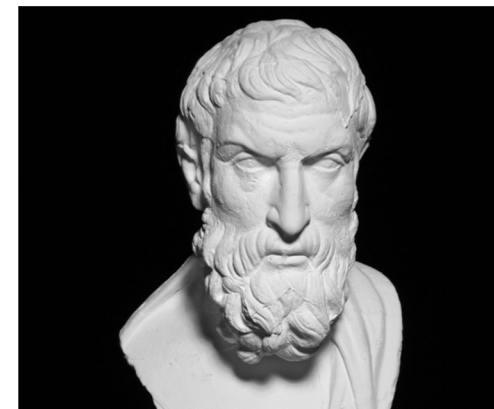
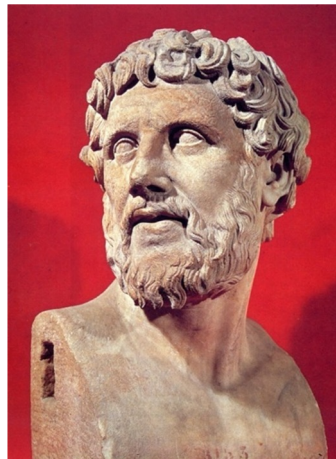
L' **ATOMO** (dal greco ἄτομος - àtomos = indivisibile)

è la più piccola parte di ogni elemento esistente in natura
che ne conserva le caratteristiche chimiche

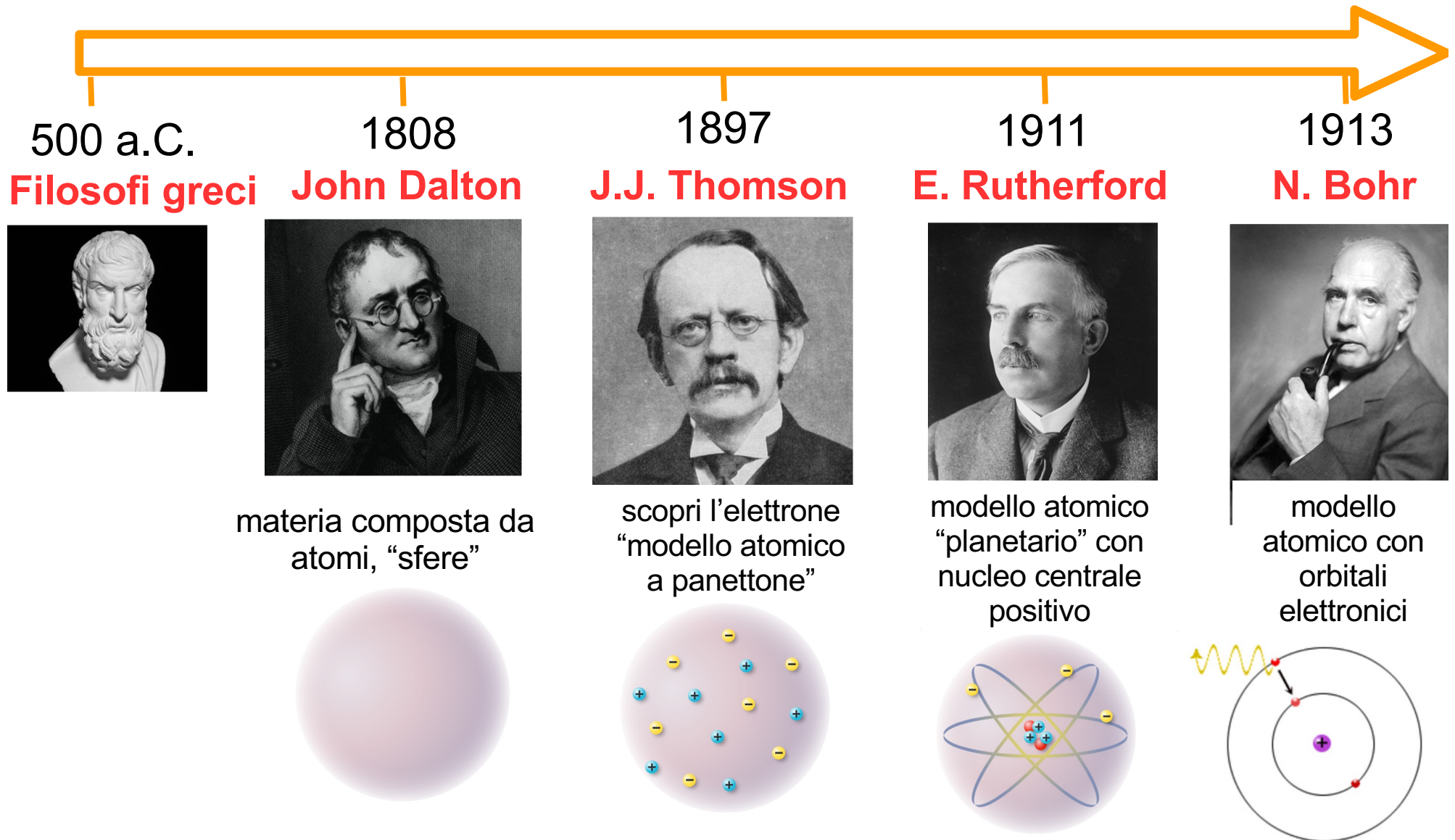
Le origini della teoria atomica risalgono al **500 a.C.**



Filosofi greci atomisti (Leucippo, Democrito, Epicuro):
Materia costituita da particelle molto piccole, indivisibili.



TEORIE ATOMICHE



COSTITUENTI DELL'ATOMO

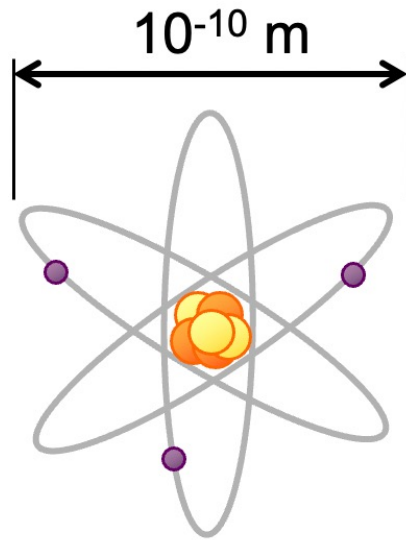
Particella	Simbolo	Carica (C)	Massa (kg)
Elettrone	e^-	$-1,6 \times 10^{-19}$	$9,1 \times 10^{-31}$
Protone	p	$+1,6 \times 10^{-19}$	$1,672 \times 10^{-27}$
Neutrone	n	0	$1,675 \times 10^{-27}$



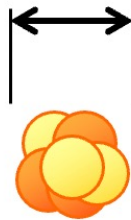
$$9.1 \times 10^{-31} = \frac{9.1}{10.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000}$$

La massa di un protone è circa **1800** volte più grande della massa di un elettrone!

DIMENSIONI DELL'ATOMO



10^{-15} m ~ 1 fm



MASSA DEI NUCLEI (PRIME MISURE DI WILLIAM ASTON ~ 1920)

In prima approssimazione, la massa di un nucleo è uguale alla somma delle masse dei suoi costituenti:

$$M(Z, N) \sim Zm_p + Nm_n$$

Si noterà che **la massa di un atomo è concentrata nel nucleo**, visto che la massa di protoni e neutroni è circa 1800 volte più grande di quella degli elettroni

Particella	Massa (kg)
Elettrone	$9,1 \times 10^{-31}$
Protone	$1,6726 \times 10^{-27}$
Neutrone	$1,6749 \times 10^{-27}$

Nucleo	Somma masse protoni e neutroni	Massa reale (kg)
${}^4_2\text{He}$	6.70×10^{-27}	6.65×10^{-27}
${}^{12}_6\text{C}$	2.01×10^{-26}	1.99×10^{-26}
${}^{16}_8\text{O}$	2.68×10^{-26}	2.66×10^{-26}
${}^{56}_{26}\text{Fe}$	9.37×10^{-26}	9.29×10^{-26}



ENERGIA DI LEGAME

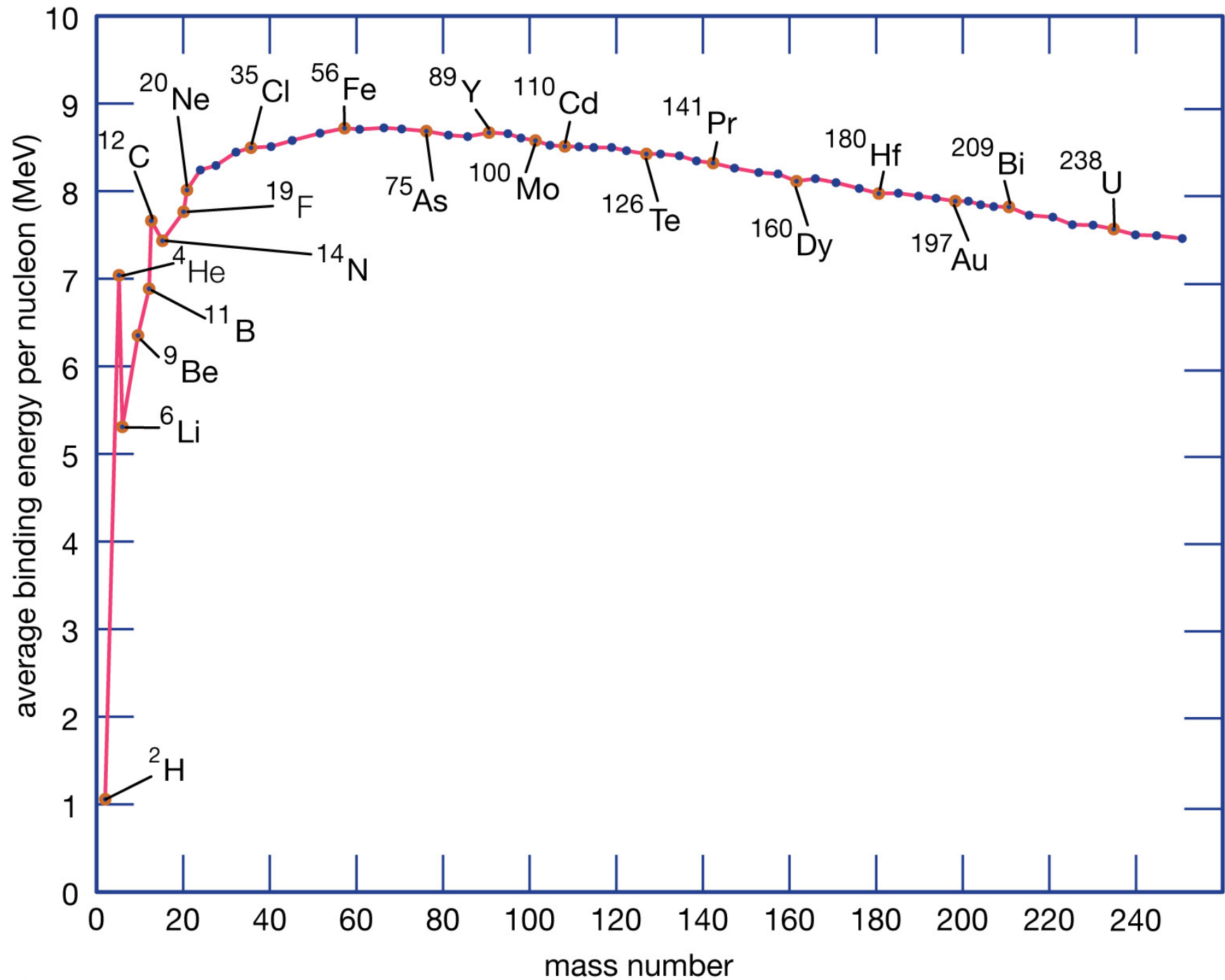
Secondo la relatività, esiste una equivalenza tra massa ed energia:
 $E = mc^2$, dunque le energie di interazione fra i costituenti del nucleo contribuiscono alla sua massa:

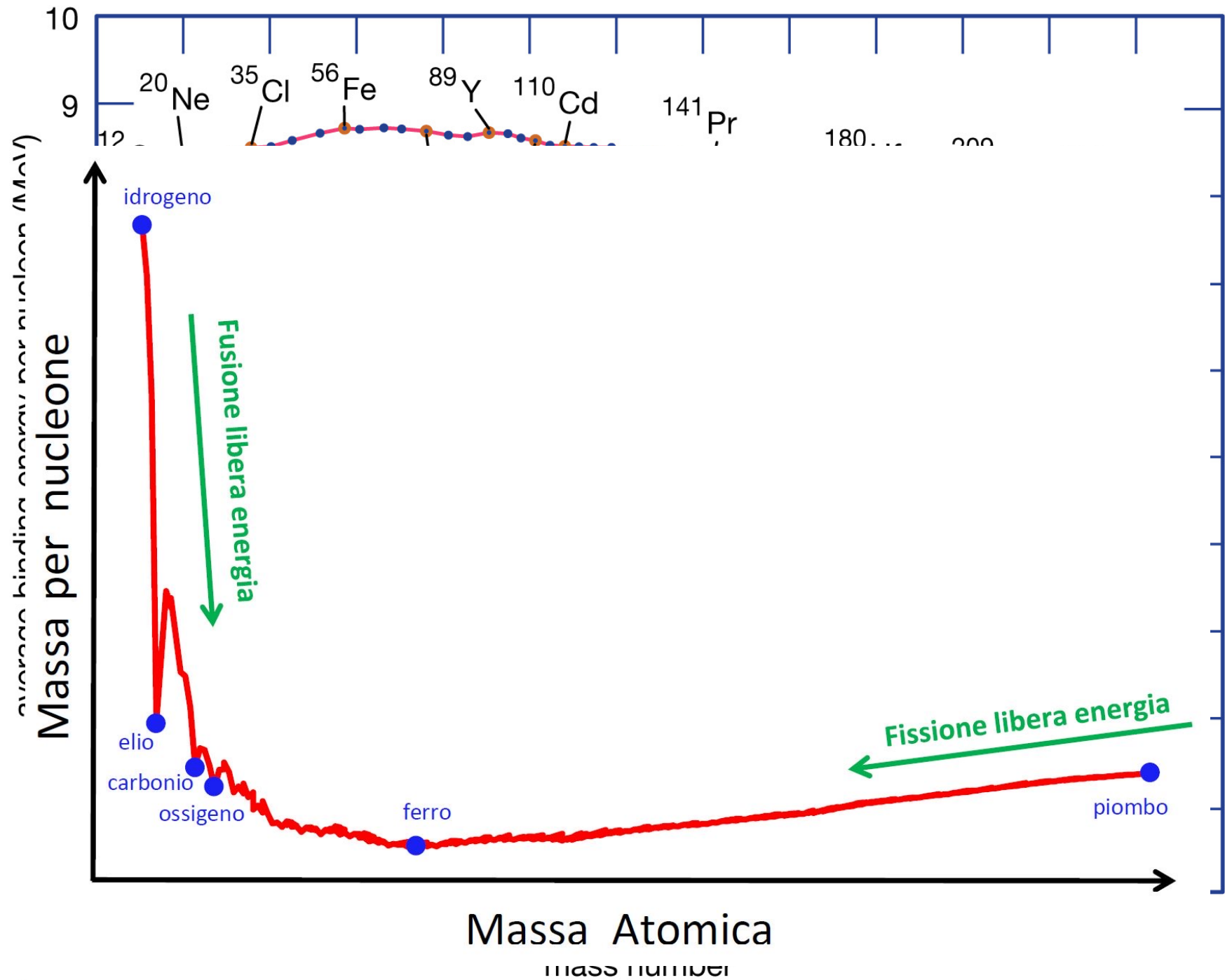
$$M(Z,N) = Zm_p + Nm_n - E_b/c^2$$

dove E_b è l'**energia di legame** del sistema.



NOTA: Nel caso dei nuclei, il termine E_b/c^2 è dell'ordine di 1/1000 rispetto alla massa totale; per confronto negli atomi questo termine è dell'ordine 1/10⁹.

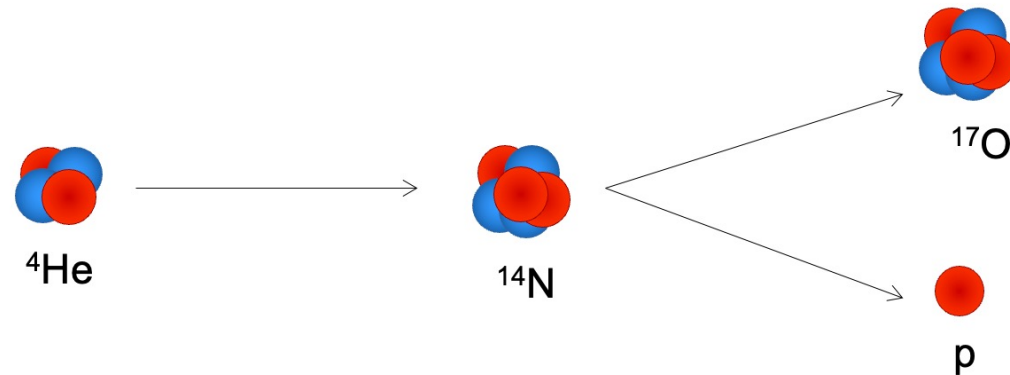




LA FUSIONE DI 4 IDROGENI IN UN NUCLEI DI ELIO

1919 Rutherford

Scoperta delle reazioni nucleari

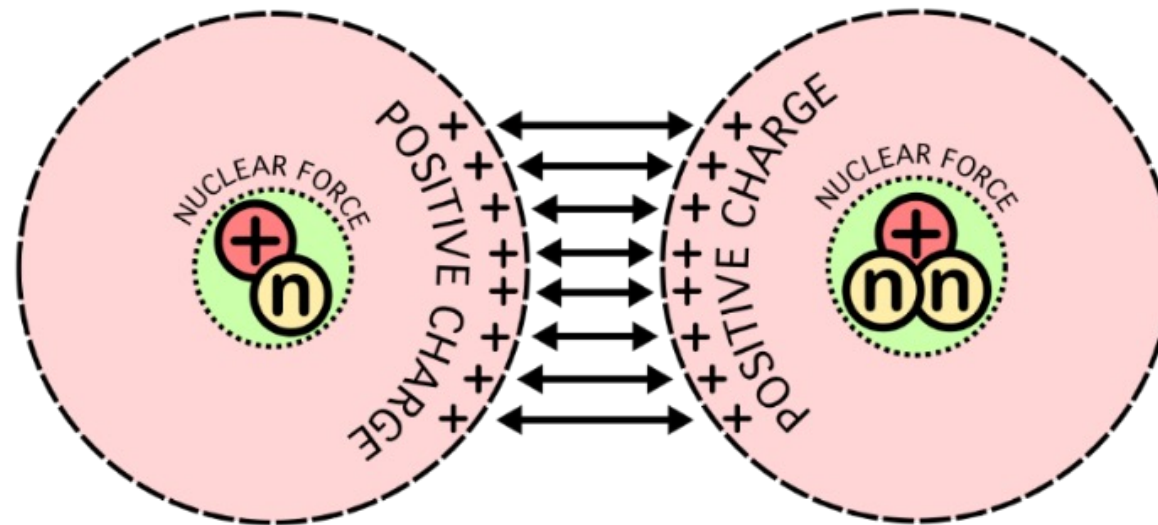


1920 Eddington *“Ciò che succede al Laboratorio Cavendish potrebbe non essere troppo difficile nel Sole”*

conversione $4 \text{ H} \rightarrow \text{He}$ come sorgente di

energia per le stelle...T troppo bassa!

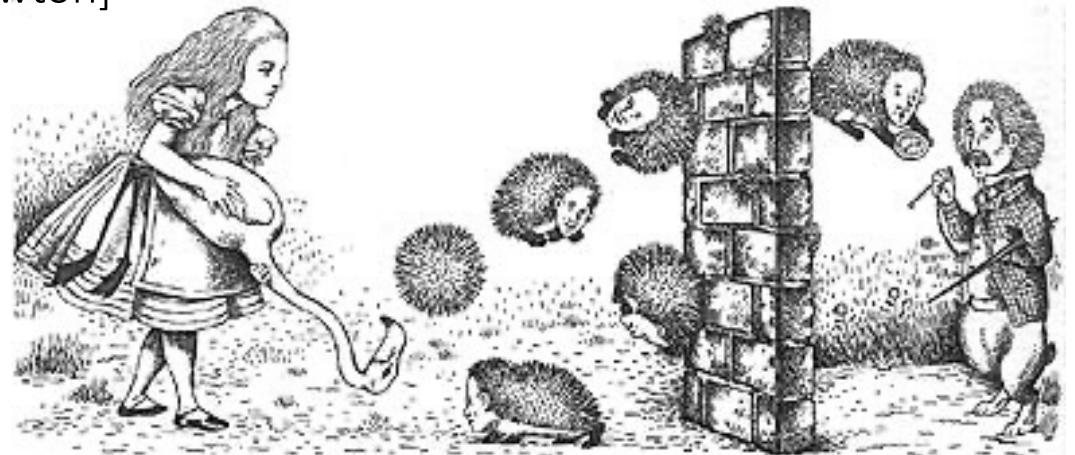
REAZIONI DI FUSIONE NELLE STELLE



REAZIONI DI FUSIONE NELLE STELLE

“Se l’energia della particella incidente è minore della barriera Coulombiana del nucleo bersaglio, è impossibile avere reazioni di fusione.”

[Isaac Newton]



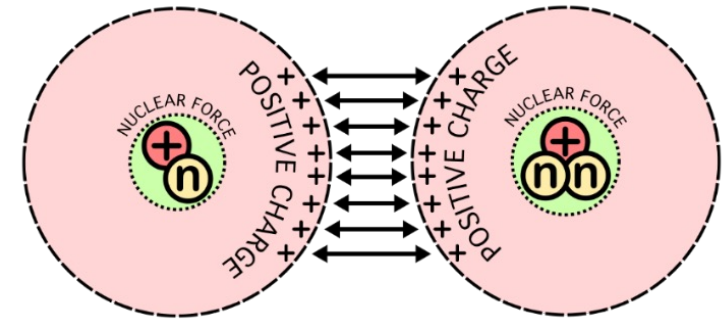
“Falso.”

[George Gamow]

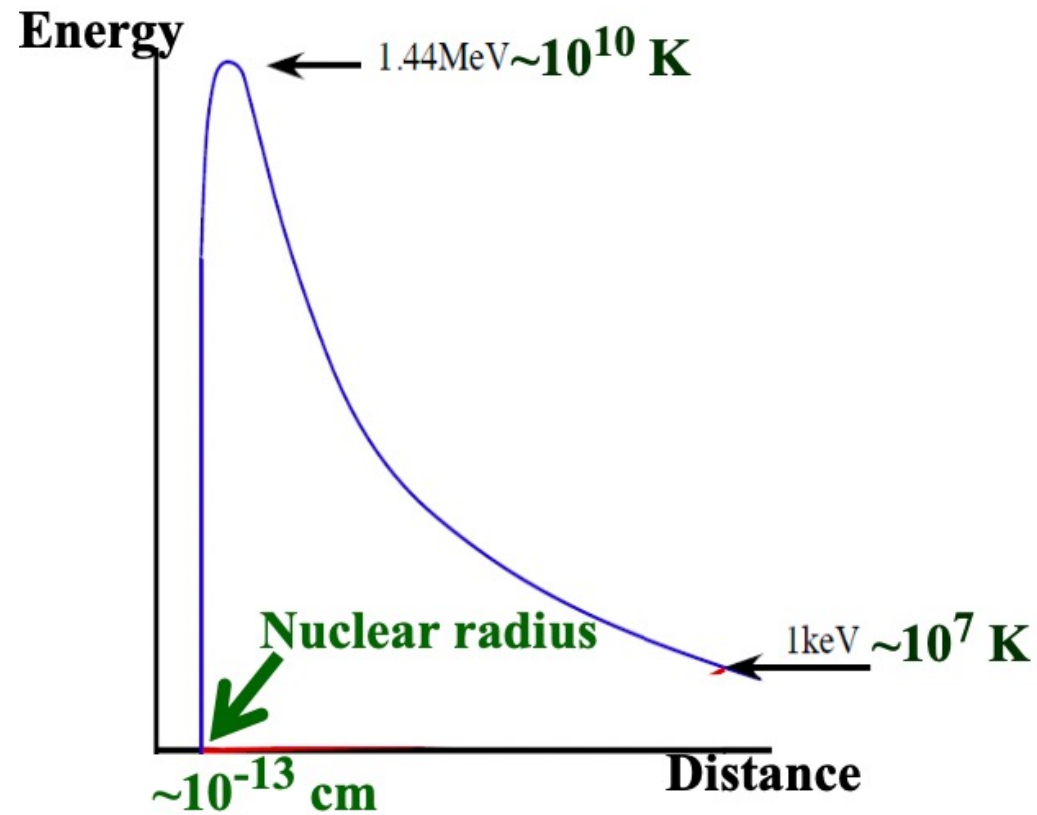
Energia cinetica

vs

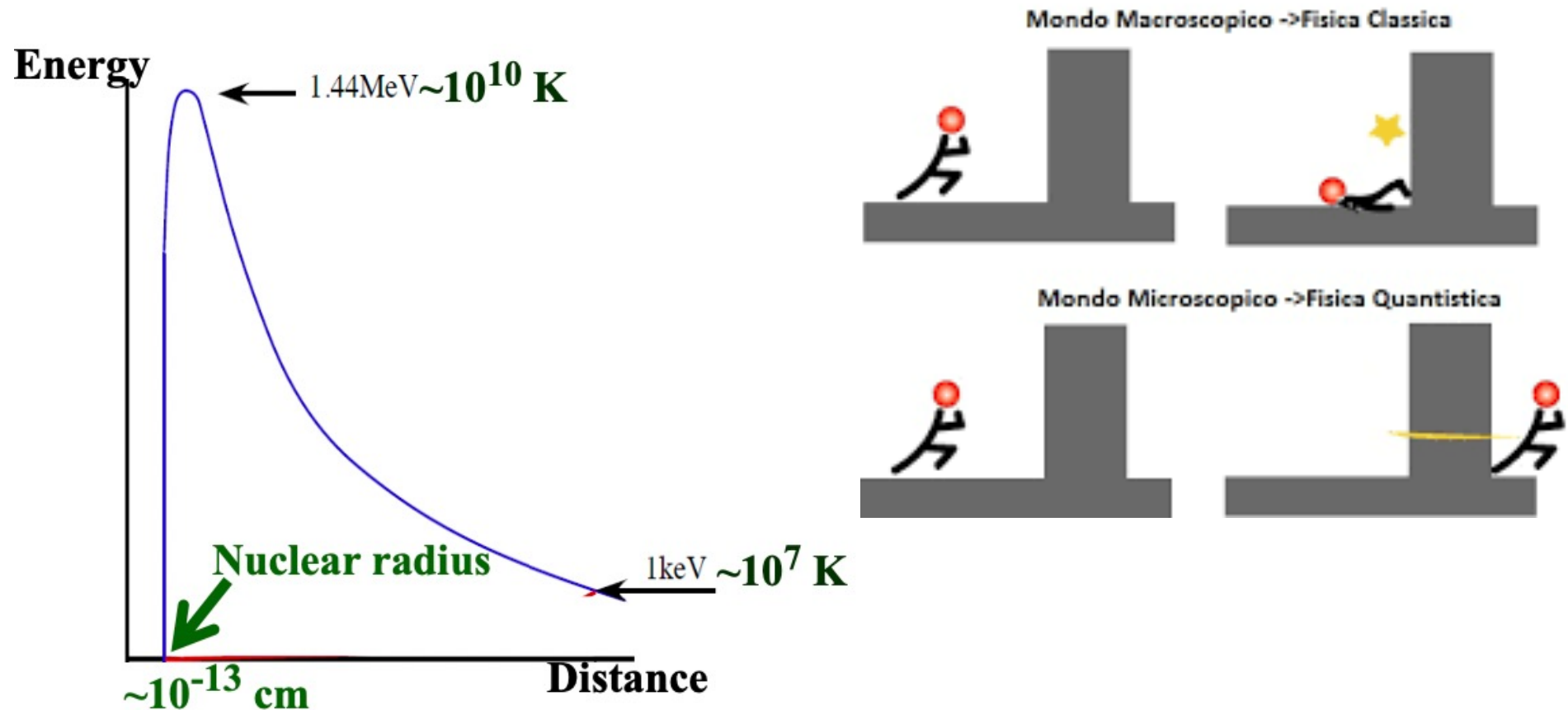
Barriera Coulombiana



LA FUSIONE DI 4 IDROGENI IN UN NUCLEI DI ELIO



LA FUSIONE DI 4 IDROGENI IN UN NUCLEI DI ELIO



1928 Gamow Effetto tunnel: fusione possibile anche se la temperatura sembra troppo bassa

1 ogni miliardo di scontri produce una reazione nucleare nel Sole

1936 - 1938 Atkinson, Bethe, Critchfield

LA CATENA PROTONE PROTONE

AUGUST 15, 1938

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 54

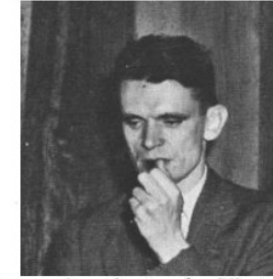


The Formation of Deuterons by Proton Combination

H. A. BETHE, *Cornell University, Ithaca, N. Y.*

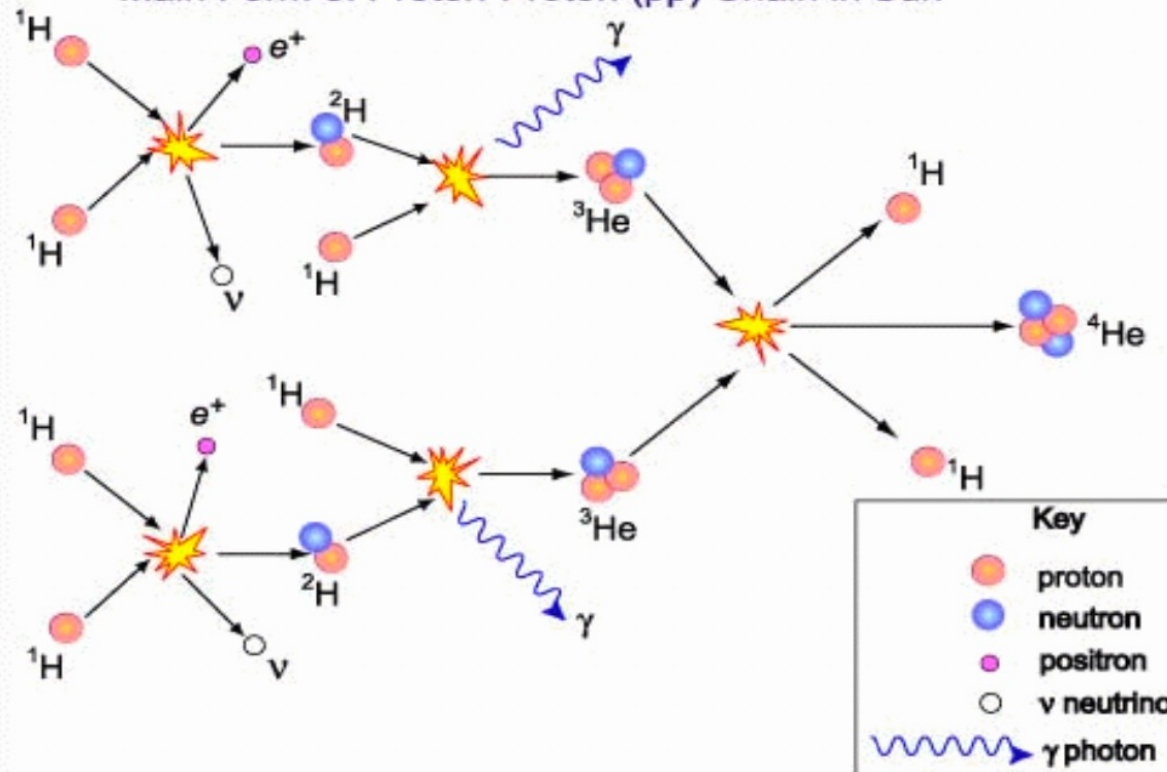
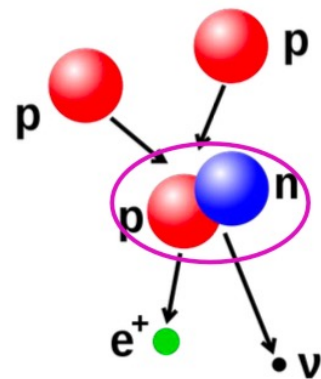
AND

C. L. CRITCHFIELD, *George Washington University, Washington, D. C.*



The probability of the astrophysically important reaction $H+H=D+\epsilon^+$ is calculated. For the probability of p through their mutual evolution due to the at the center of the sun degrees). This is almi tion of the sun (2 er

Main Form of Proton-Proton (pp) Chain in Sun



IL CICLO CNO

1938 – 1939: Bethe, Weizsacker

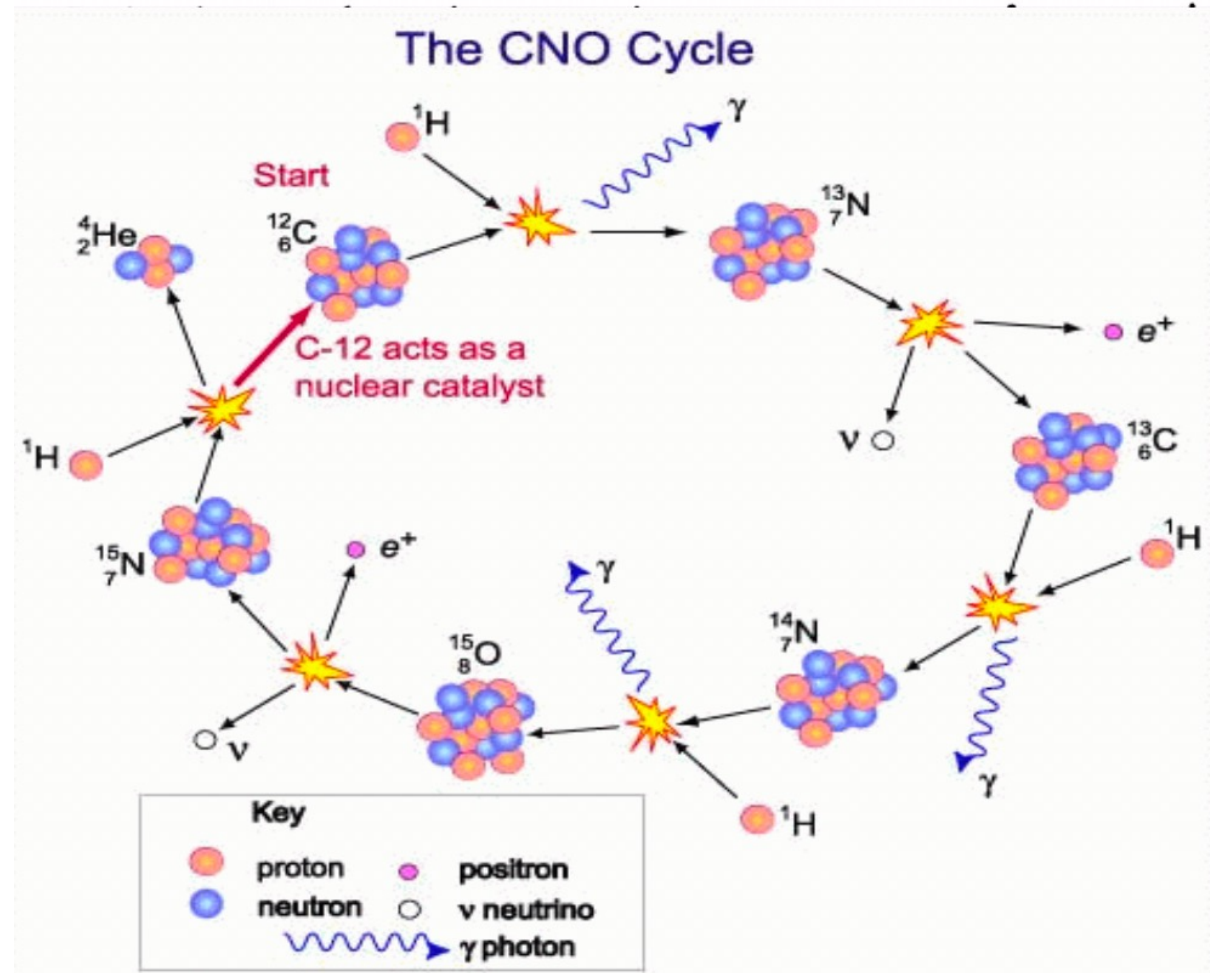
Energy Production in Stars*

MARCH 1, 1939

PHYSICAL REVIEW

H. A. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York



SOLE COME REATTORE A FUSIONE



Tasso di fusione:

$$N = \frac{L_{\odot}}{26.7 \text{ MeV}} = \frac{2.4 \cdot 10^{39} \text{ MeV/s}}{26.7 \text{ MeV}} \sim 10^{38} \frac{\text{fusioni}}{\text{s}}$$

Massa di H bruciata per unità di tempo:

$$M = 4M_{\text{protone}} \cdot N \sim 6.4 \cdot 10^{14} \frac{\text{g}}{\text{s}} = 640 \text{ Milioniditonnellate al secondo!}$$

Tempo scala del bruciamento:

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

consistente con l'età della Terra!

1920 Aston: $M(\text{He}) < 4 M(\text{H})$

Eddington: conversione $4 \text{ H} \rightarrow \text{He}$ come sorgente di energia per le stelle ...T troppo bassa per superare la barriera Coulombiana!

1928 Gamow: probabilità effetto tunnel

1936 - 1938 Atkinson - Bethe and Critchfield: catena pp

1938 - 1939 Weizsacker – Bethe: Ciclo CNO

1946 Hoyle: teoria della nucleosintesi nell'evoluzione stellare

1952 Merril: scoperta del ^{98}Tc ($T_{1/2} = 4.2 \times 10^6$ anni) nelle stelle, dimostrazione di nucleosintesi recente

ASTROFISICA NUCLEARE: UNA RICERCA INTERDISCIPLINARE

