

Come la Materia diventa complessa

(L'origine degli elementi chimici nel cosmo)

M. Busso

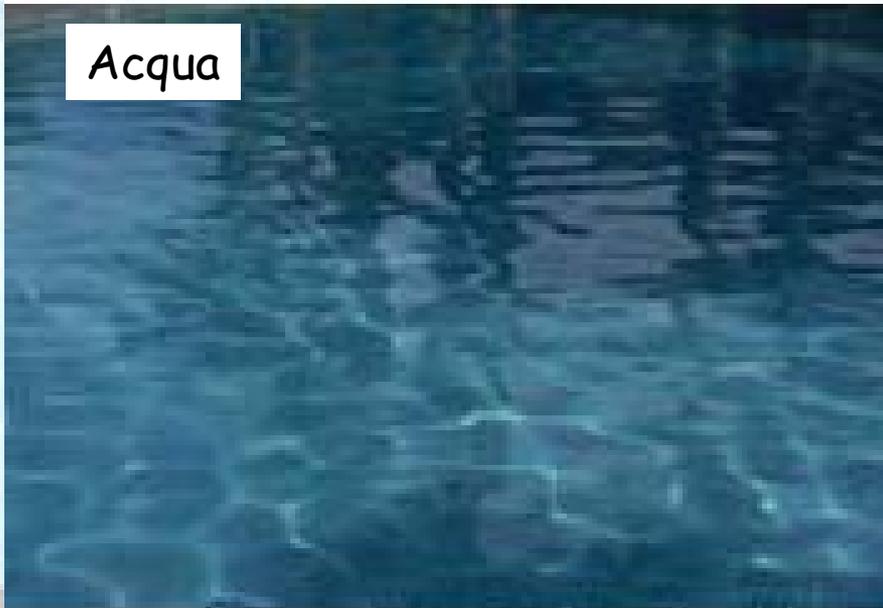
Università di Perugia



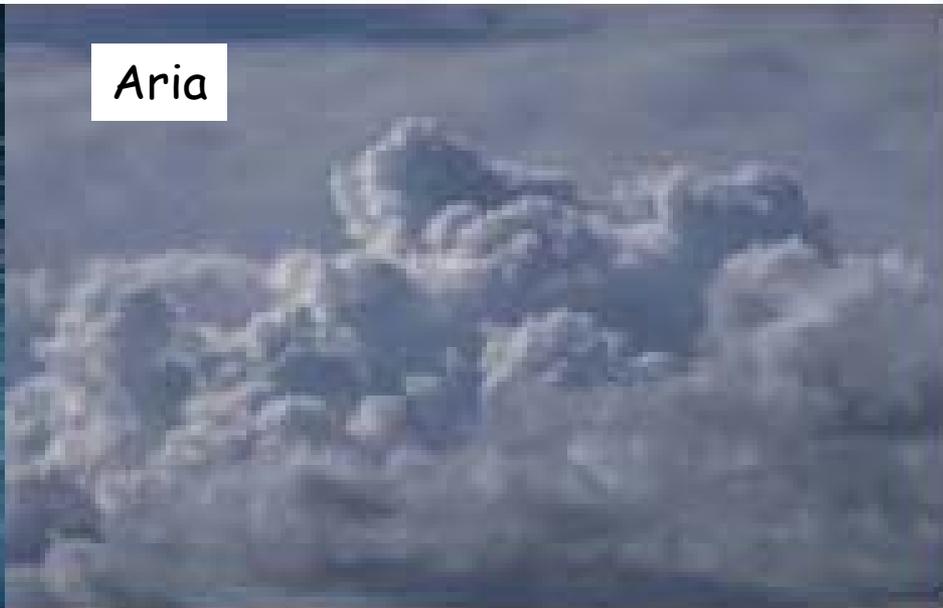
1. Qualche cenno storico e di base
2. L'energia nucleare
3. Burbidge, Burbidge, Fowler e Hoyle
4. I meteoriti
5. Un anno magico: il 1969
6. Il ciclo di produzione nelle stelle
7. Qualche applicazione:
 - a) misure di età, medicina
 - b) la nostra stessa esistenza

Il pensiero greco fino ad Aristotele

Acqua



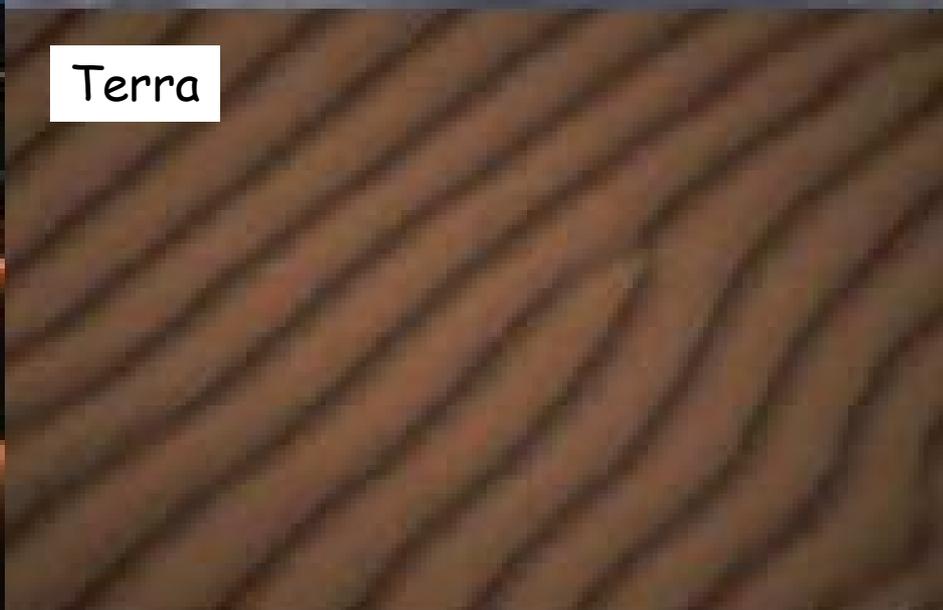
Aria



Fuoco



Terra



(Empedocle, Anassagora, Aristotele)

1896 Mendeleev

92 elementi alla base di
tutti i composti esistenti in natura

Periodic Table of Elements

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun								

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



Cosmological Big Bang

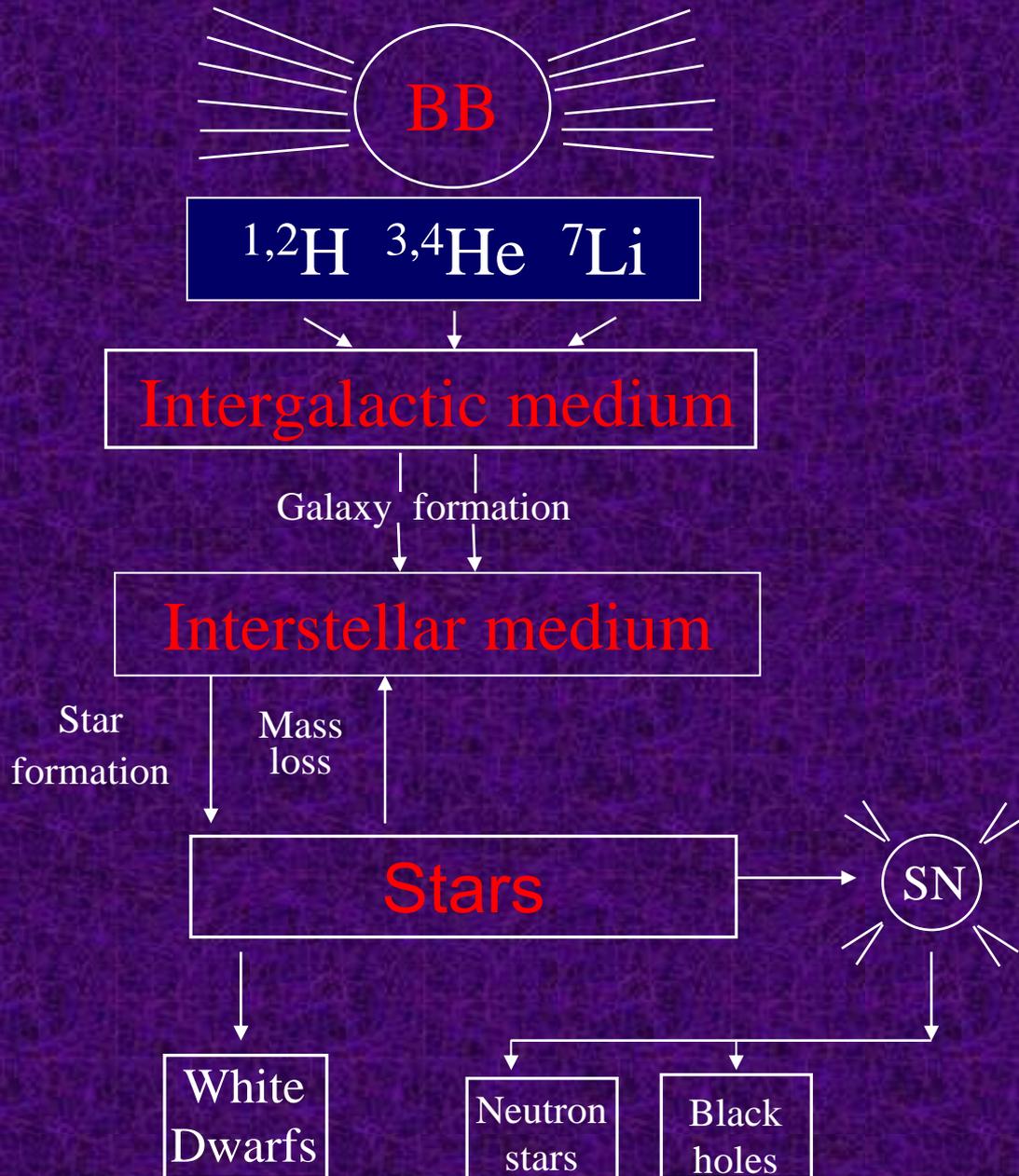


$^1\text{H}, ^2\text{H}, ^3\text{He}, ^4\text{He}, ^7\text{Li}$

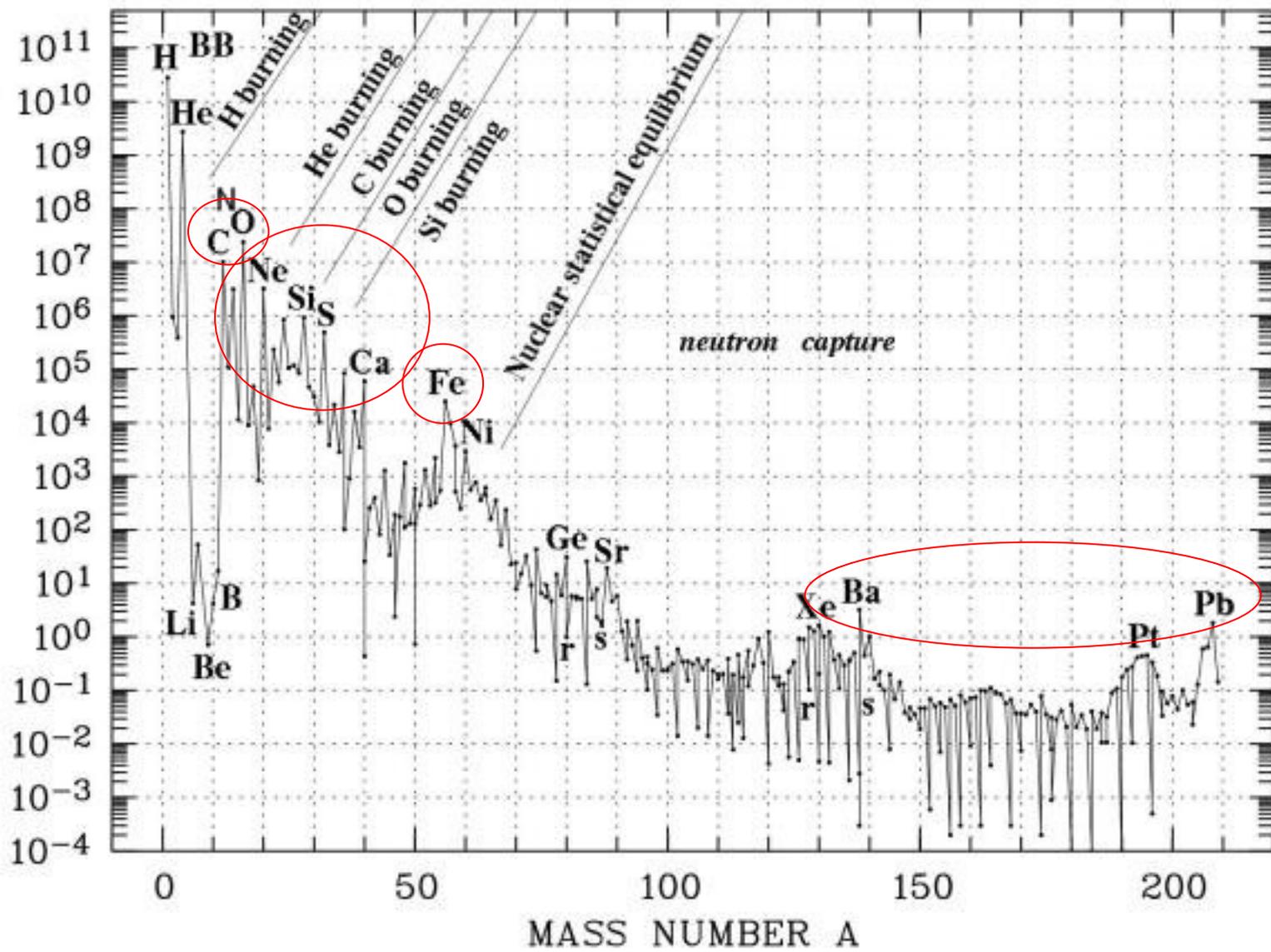
There are naturally occurring elements as heavy as Uranium.
Some elements (e.g., Carbon, Nitrogen, Oxygen) are rather plentiful (1 atom in every 10^5 atoms).

WHERE DO THE OTHER ELEMENTS COME FROM?

Nucleosynthesis theory predicts that these elements were formed in the cores of stars



ABUNDANCE RELATIVE TO SILICON = 10^6



Nel 1896 **Becquerel** scoprì la radioattività (per caso!).

Nel 1898 **Marie and Pierre Curie** scoprirono il Radio e il Polonio.

Studi frenetici nei successivi 10 anni.

Nei primi 10 anni del XX secolo **Rutherford, Ramsey e Boltwood** → età delle rocce dalla radioattività, con età stimate a centinaia di milioni di anni e poi (Holmes) miliardi di anni.

Contrasto aperto con le stime di Lord Kelvin e di Helmholtz (20 Milioni di anni, dal Sole)

1910: Rutherford nota che il sistema solare iniziale conteneva già elementi radioattivi in parte decaduti e i loro prodotti di decadimento.

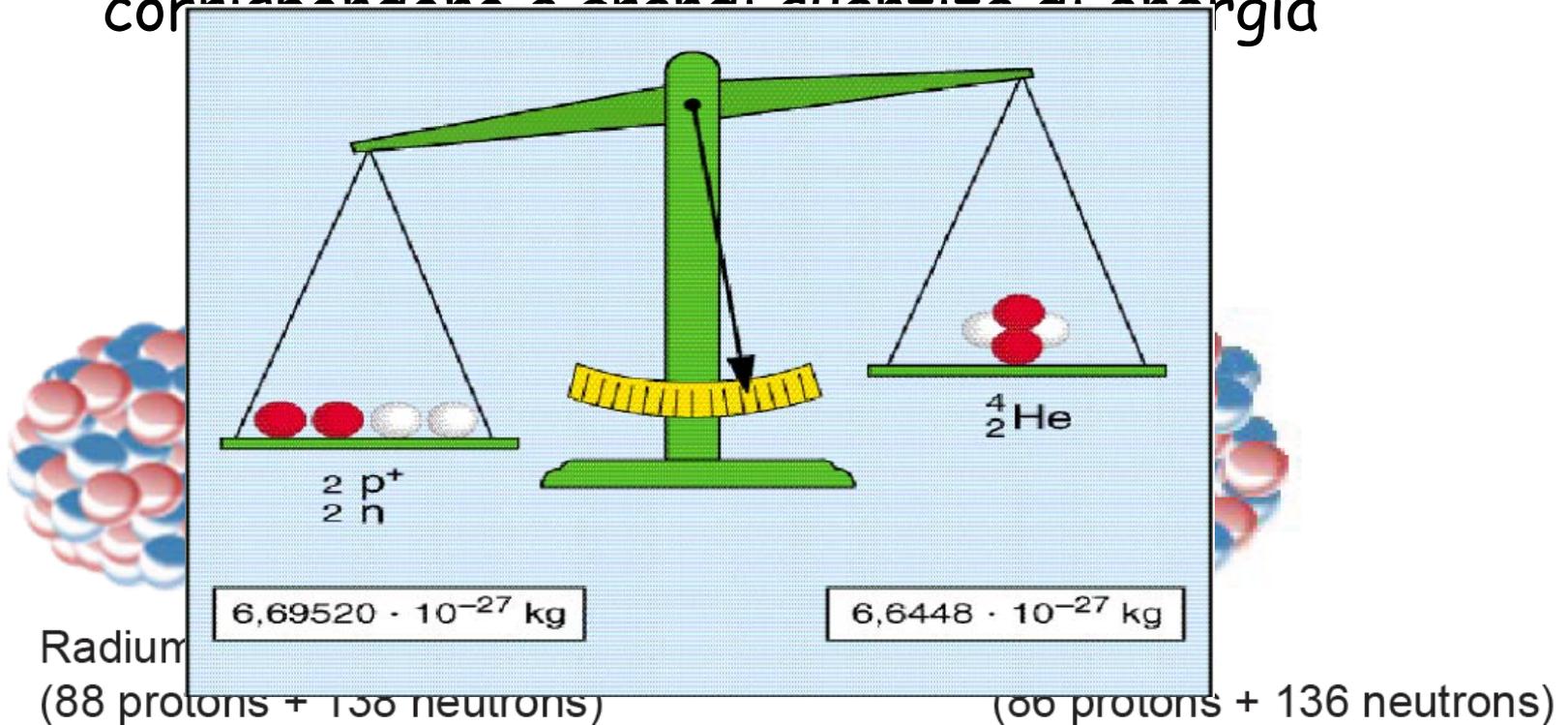
Suggerì che estrapolazioni all'indietro avrebbero fornito l'età della materia.

L'ASTROFISICA NUCLEARE ERA NATA.

1910-2012. OLTRE UN SECOLO!!

Energia Nucleare

Grazie alla equazione $E = Mc^2$ piccole quantità di materia corrispondono a grandi quantità di energia



Si tratta dei processi di fissione e fusione nucleare.

1 k La grande quantità di energia emessa dalla fusione permette la lunga vita del Sole e quindi delle rocce (Kelvin aveva torto perché non aveva l'energia nucleare)

TUTTO IL RESTO IN POCHE RIGHE

1. 1925: Eddington suggerisce che la differenza di massa tra 1 nucleo di He e 4 protoni sarebbe una potente sorgente di energia “se l’He fosse fabbricato nelle stelle dai protoni”
2. 1937-38: Chiarimento della generazione di energia nelle stelle da reazioni nucleari (Bethe, Critchfield, von Weizsäcker)

3. 1948: la nucleosintesi stellare è descritta da Gamow. “The results of the Greek letter theory”, *Review*, April 1948, 803-804. The Greek letter theory is often referred to as the alpha, beta, gamma theory. Gamow’s name was changed to Ziegler.



R. A., H. Bethe and G. Gamow, *Review*, **73**, Issue 7,

a letter to *The Physical Review* and Gamow, and is often referred to as the Greek letter theory. It is unfair to the Greek letter theory, and so the name of Dr. H. Bethe was changed to Ziegler when the alpha, beta, gamma theory was considered changing.

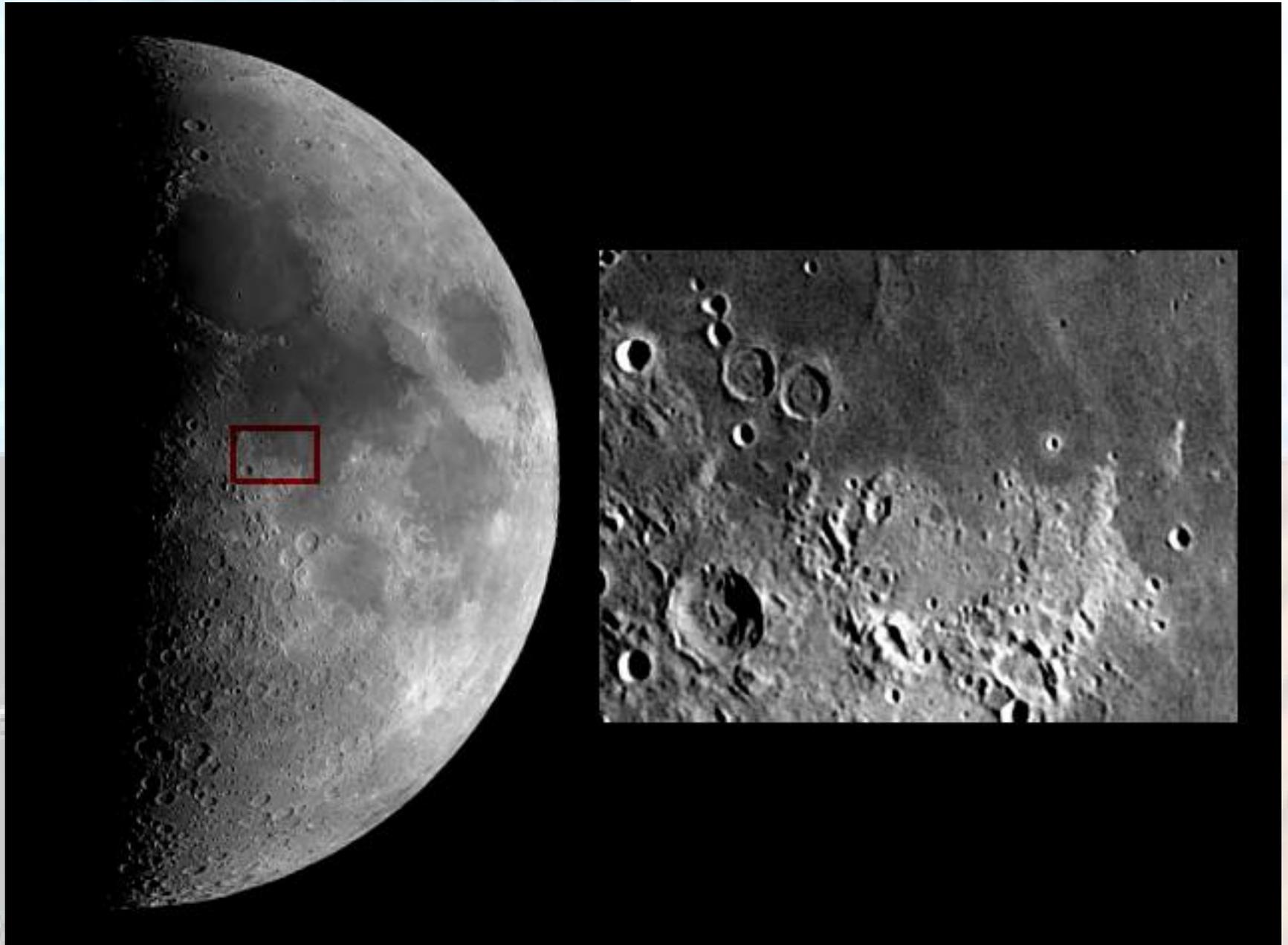
[Gamow, 1952]

4. 1952: Merrill scopre il Tc (instabile) nelle stelle S: è la prova che la nucleosintesi avviene nelle stelle
5. 1957: Burbidge, Burbidge, Fowler and Hoyle, sulla *Review of Modern Physics*, descrivono i processi essenziali della nucleosintesi stellare

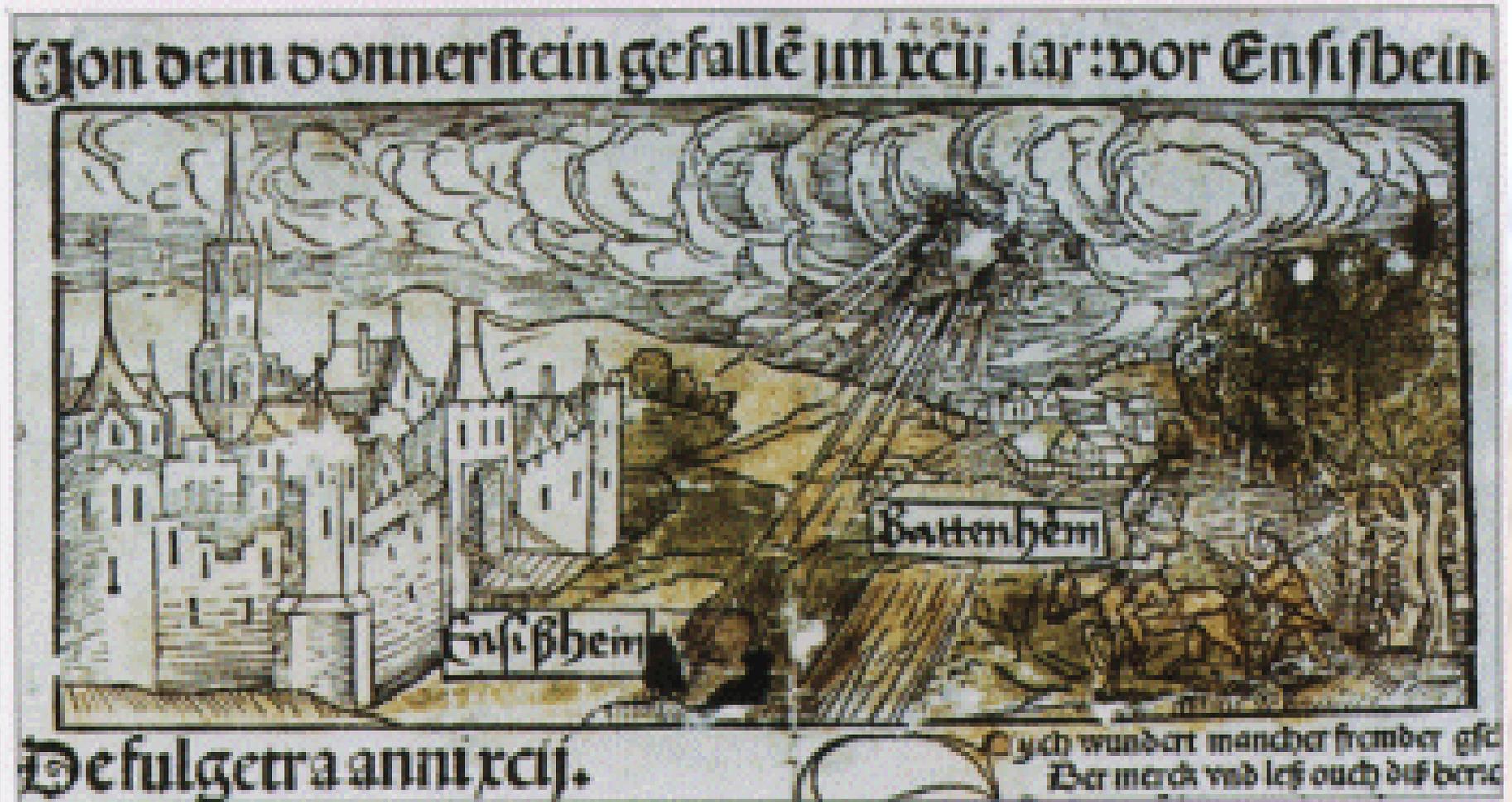
COSA SAPPIAMO OGGI

- A partire da B2FH (1957), la sintesi degli elementi (esclusi D, Li, Be e B) è spiegata da alcuni processi fondamentali nelle stelle.
- Combustione di H (la più efficiente, con una media di 7MeV per nucleone di energia generata): produce ^4He , ^3He , e contributi minori a nuclei intermedi, fino al Si.
 - Combustione di He (la seconda più efficace): produce ^{12}C , ^{16}O , un po' di ^{20}Ne , più catene secondarie che partono da ^{14}N o da ^{13}C e producono neutroni.
 - Fusione di nuclei intermedi in stelle massicce - ^{12}C , ^{16}O , (^{20}Ne), (^{28}Si) \rightarrow nuclei attorno al Fe.
 - Processi di equilibrio statistico nucleare: producono ^{56}Fe - ^{56}Ni e qualche nucleo più pesante nelle supernovae.
 - Nucleosintesi esplosiva nelle supernovae da stelle massicce (tipo II), che riorganizzano le abbondanze fino a $^{63,65}\text{Cu}$
 - Nucleosintesi in esplosioni termonucleari da stelle binarie di massa piccola (SN Ia): producono soprattutto Fe e Ni.
 - Processi rp in nane bianche e stelle a neutroni in sistemi binari (novae; X-ray bursts).
 - Catture neutroniche (lente o veloci) che producono i nuclei oltre il Fe.
 - Disintegrazioni da fotoni veloci, che producono nuclei rari ricchi di protoni (processo p).

1969: Lo Sbarco sulla Luna



Ensisheim

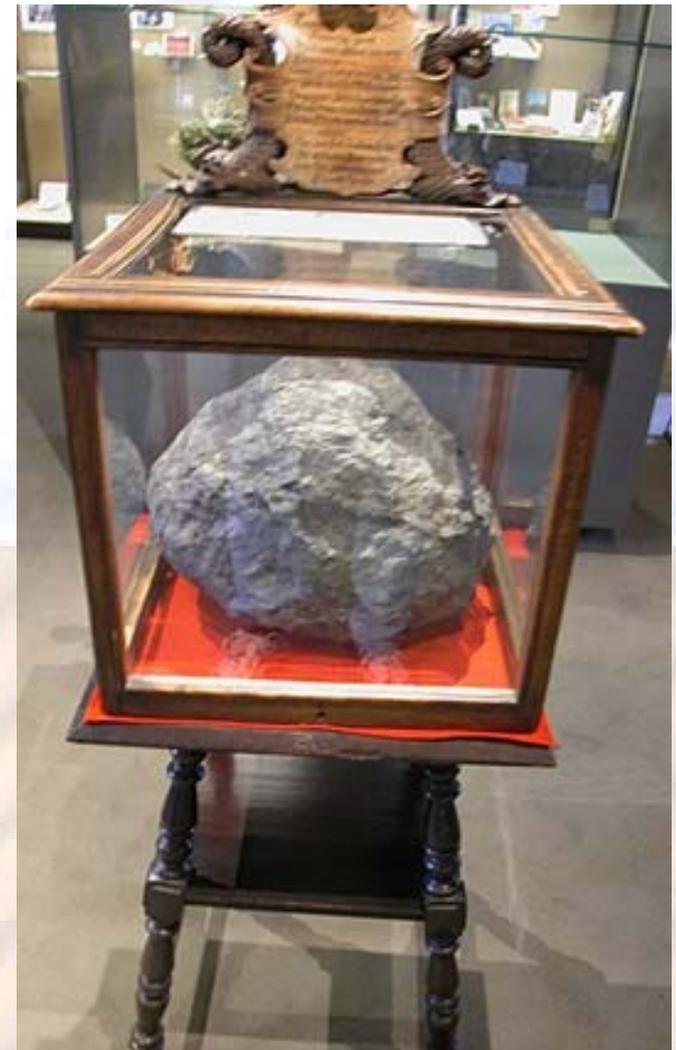


Caduta di un bolide e relativi meteoriti a Ensisheim, Alsazia, nel 1492

Ensisheim II

Narrano le cronache del tempo, a cui gli scienziati si mostrarono scettici (mai credere agli scienziati!!), che la folla che assistette al fenomeno ricuperò poi molto materiale, tra cui una roccia di ben 150 Kg. Variamente rotta e sacchegggiata nei secoli, oggi è esposta (almeno quel che rimane) nello stesso villaggio dove cadde.

Alla natura celeste dell'evento credette l'imperatore Massimiliano D'Austria, che 'passava' per la Francia perché stava appunto combattendo i francesi. Ritenendo il meteorite un segno del Cielo, lo visitò in pellegrinaggio. Pochi giorni dopo sconfisse i francesi nella battaglia di Salins.



Il meteorite di Murchison (Australia, 1969)



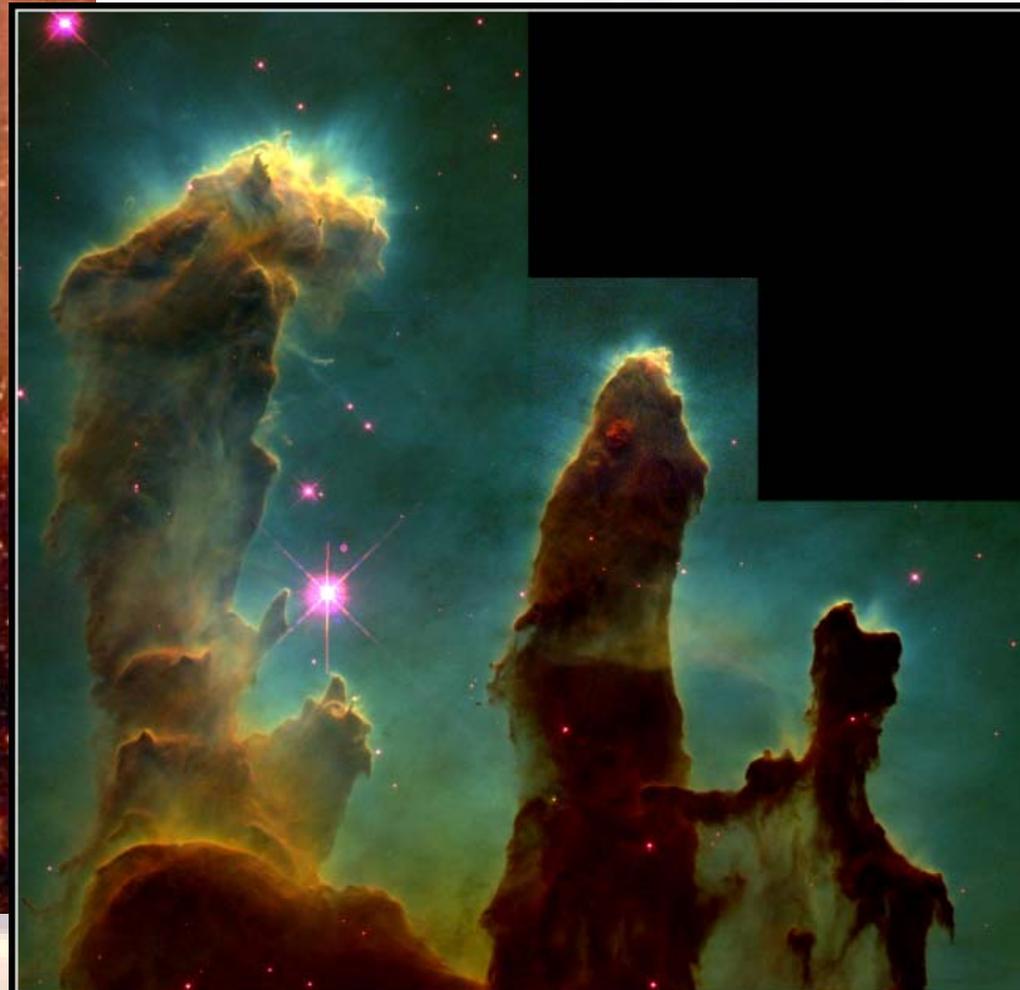
IL METEORITE DI ALLENDE (MESSICO 1969)



Molte informazioni vennero nel 1969: caduta dei meteoriti Allende e Murchison, prelievo delle rocce lunari.

Si scoprì che nel sistema solare primitivo c'erano molti isotopi radioattivi di vita "breve" (1 milione di anni), come ^{26}Al , che decadendo diedero il calore necessario a fondere i pianeti "piccoli" e a differenziarli chimicamente. Il successivo raffreddamento formò le rocce con cristalli estesi. [$^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 5 \times 10^{-5}$]

Formazione delle stelle (HST)



Gaseous Pillars • M16

HST • WFPC2

PRC95-44a • ST ScI OPO • November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

Regioni oscurate dalla polvere



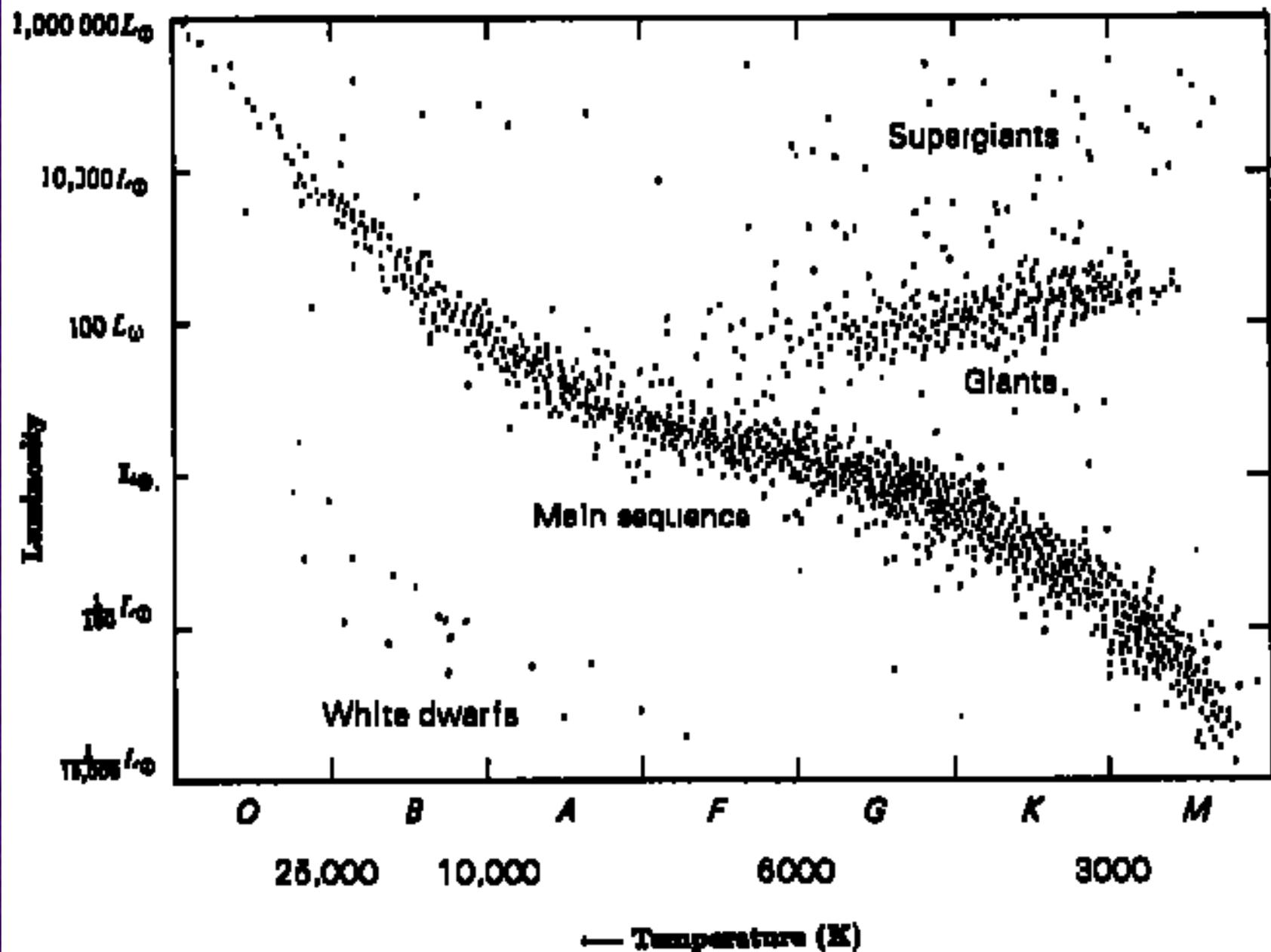
Nelle zone fredde nuove stelle si formano, dopo un processo complicato in cui hanno grande rilevanza sia l'azione del campo Magnetico che la gravità.

La Nebulosa Solare



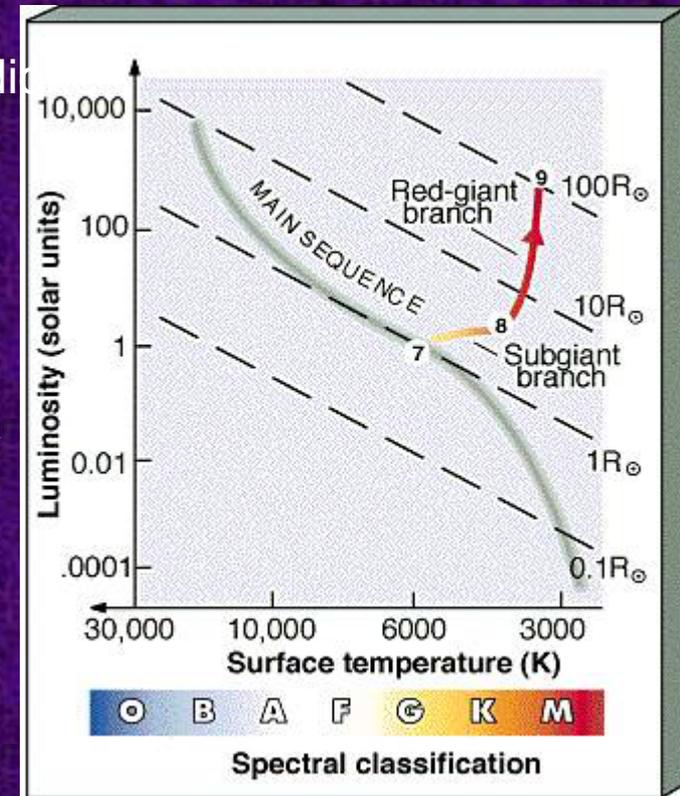
Per contrarsi e formare una stella la massa deve essere superiore alla
(Massa di Jeans) pari a: $M_J = 2 \times 10^{35} \times T^{3/2} / n^{1/2}$ (T = temperatura; n = particelle per cm^3).

Nella sola nebula ($T = 20\text{K}$, $n = 10^{14}$) $M_J = 2 \times 10^{30}\text{g} = 1/1000 M(\text{Sole}) = M(\text{Saturno})$



Evoluzione al ramo delle giganti

- L'energia prodotta in una 'shell' di H causa l'espansione dell'involuppo.
 - La superficie si espande e si raffredda diventando di colore rosso.
 - La luminosità aumenta.
 - Nel diagramma H-R la stella si muove a destra e in alto.



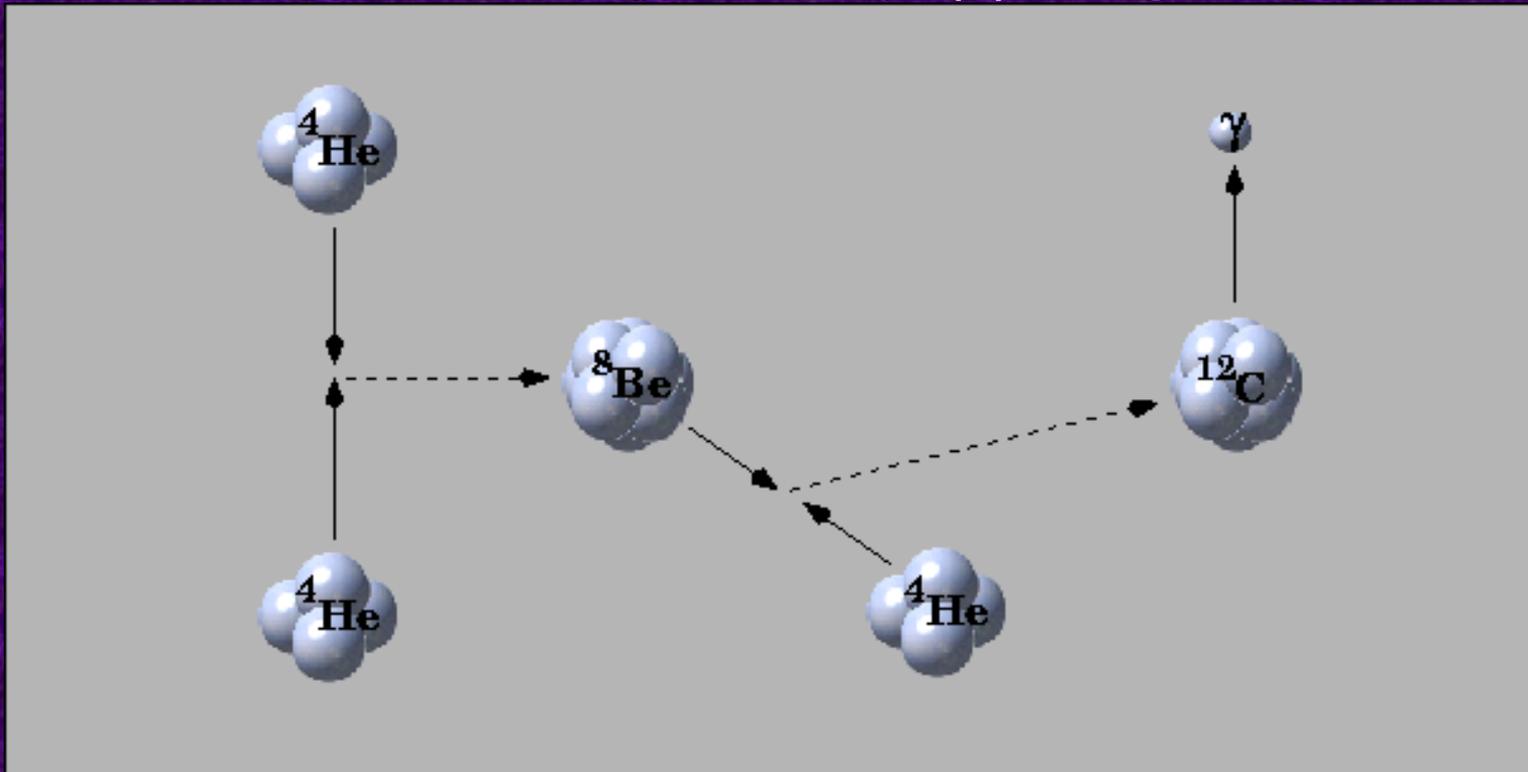
Dopo questa fase l'evoluzione dipende dalla massa.

1) MASSE PICCOLE

2) MASSE GRANDI

Evoluzione di masse piccole

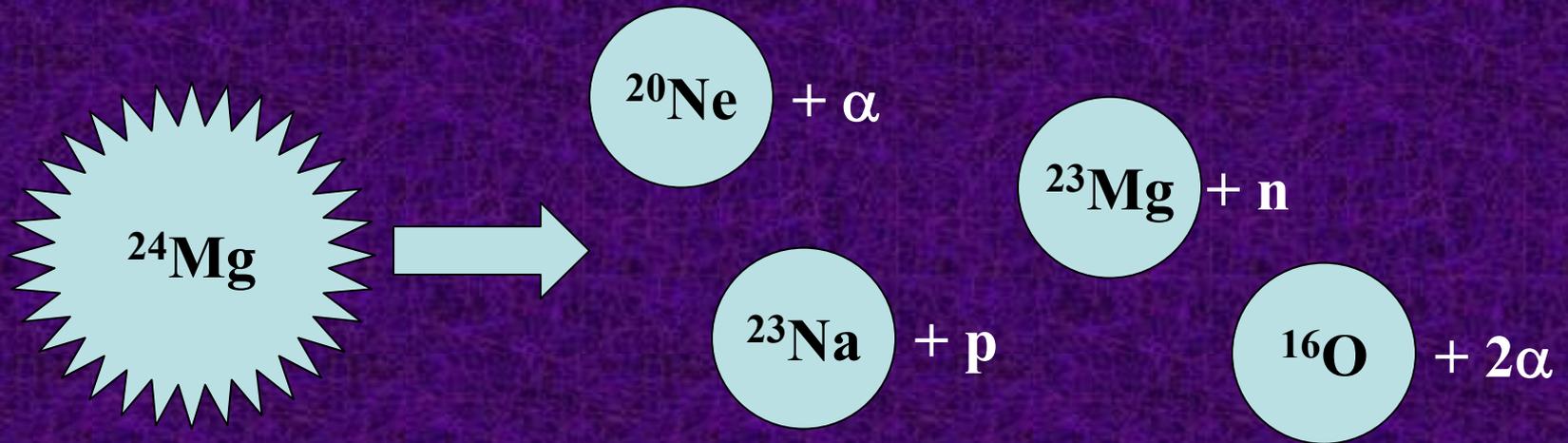
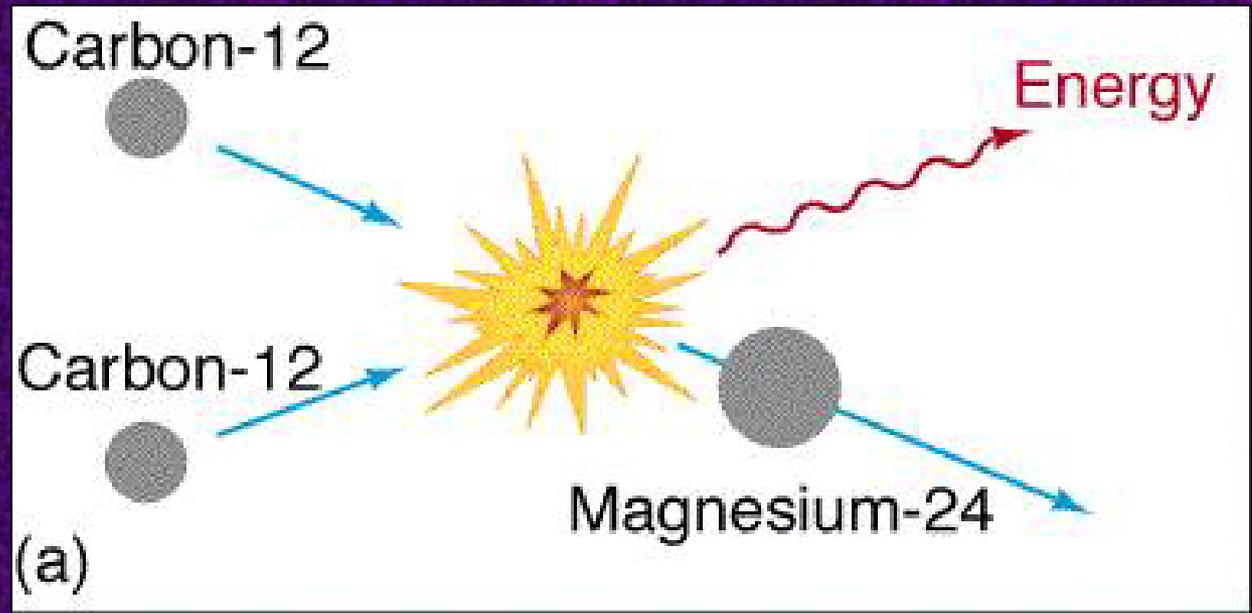
- Quando il nucleo di elio raggiunge $T=10^8$ K, la reazione 3α può avvenire



STELLE MASSICCE

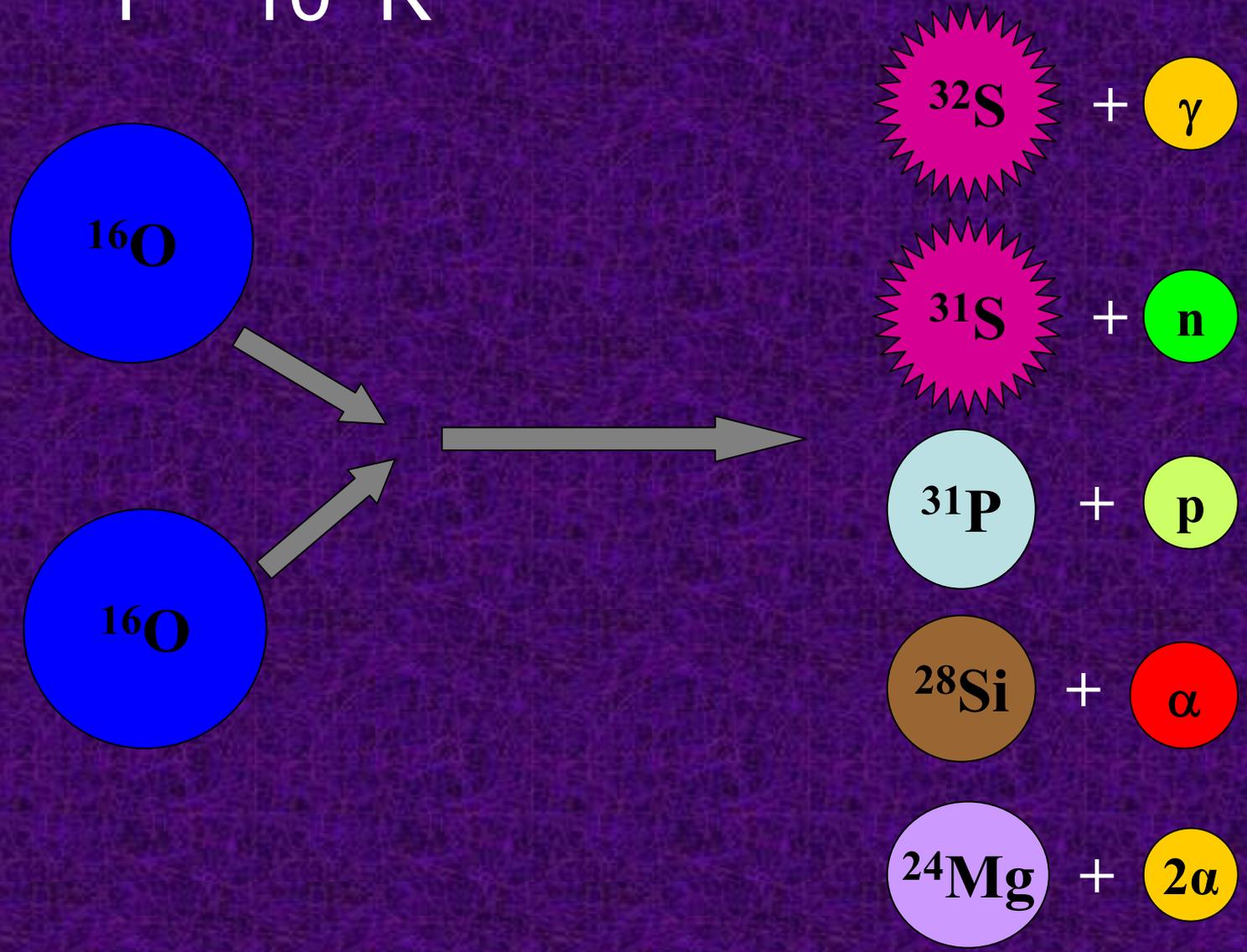
Carbon burning

$T = 5 \times 10^8 \text{ K}$



Oxygen burning

$T \sim 10^9 \text{ K}$



Silicon burning

$$T = 3 \times 10^9 \text{ K}$$



PHOTODISINTEGRATION: Interaction between massive particles and energetic photons

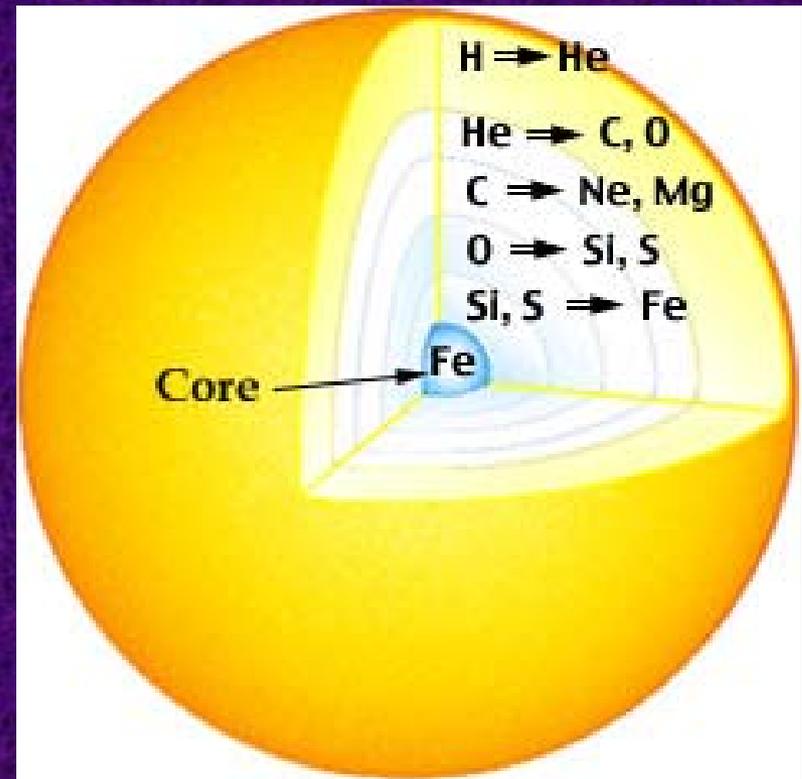
Helium-4 Helium-4 Helium-4 Helium-4 Helium-4 Helium-4 Helium-4



(b)

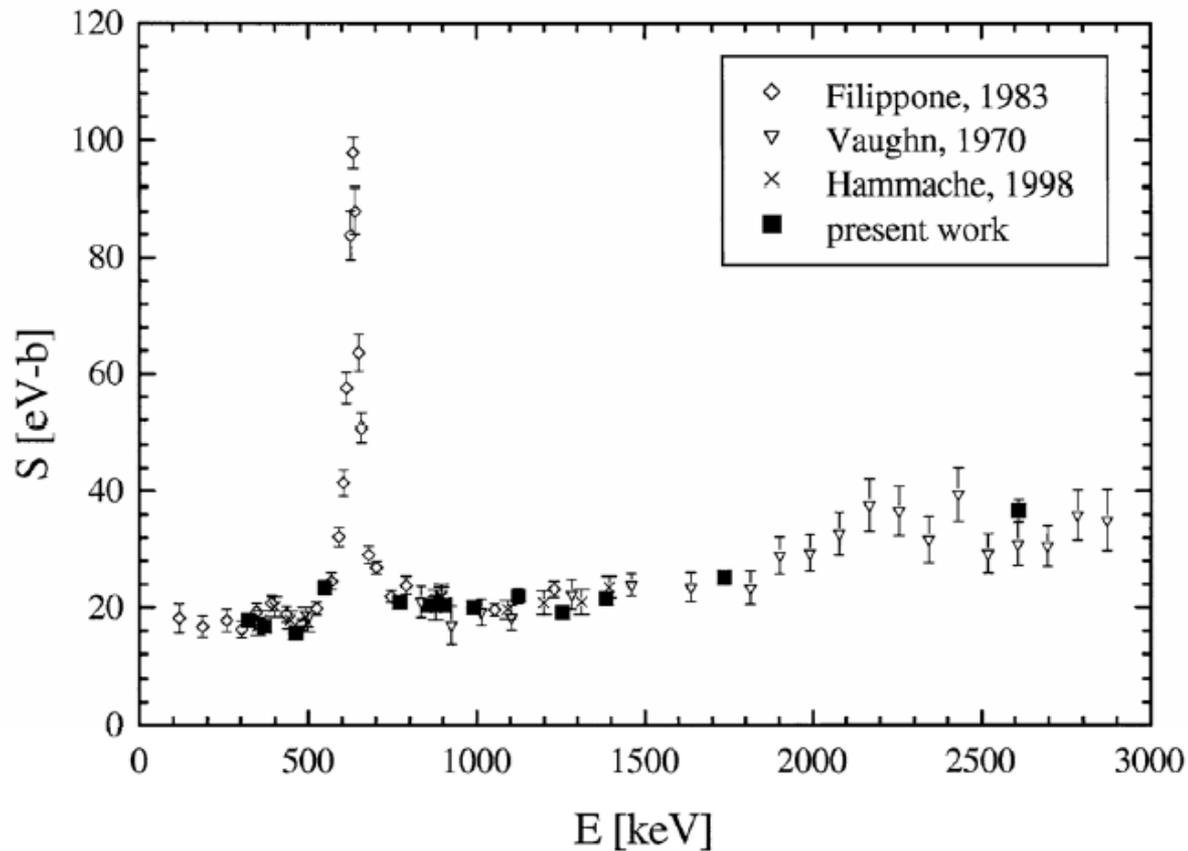
Evolution of High Mass Stars

- In the late stages of the life of a massive star...
 - Helium converted into heavier elements (carbon, oxygen, ..., iron)
 - The star has an onion-like structure



Un primato italiano: nel laboratorio del Gran Sasso. Reazioni di combustione di H misurabili

Courtesy Imbriani



$$S_{17}(0) = 18.4 \pm 1.4 \text{ eV b}$$

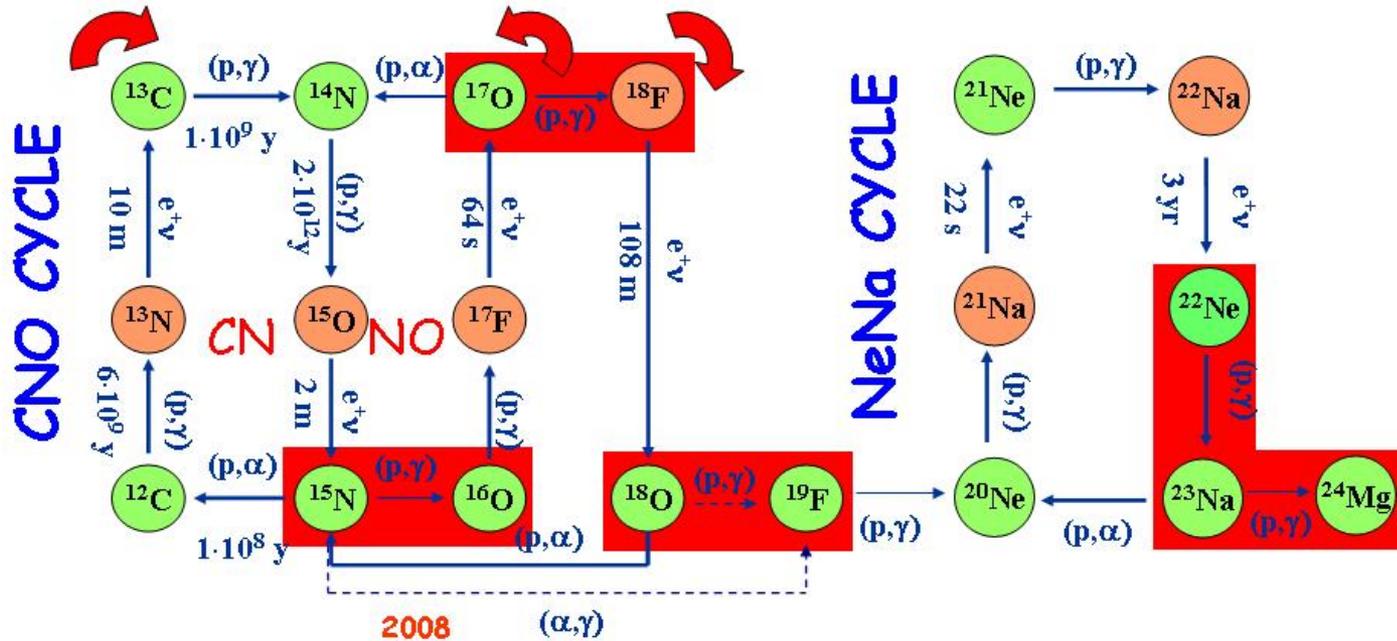
Absolute cross section of ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$.
Nucl. Phys. A 696 (2001) 219S.

LUNA 2008-2012

Important
(stelle gic)

e

Runkle
Formic
Runkle



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

$^{15}\text{N}(p,\alpha)$

$^{16}\text{O}(p,\gamma)$

$^{17}\text{O}(p,\gamma)$

$^{17}\text{O}(p,\alpha)$

$^{18}\text{O}(p,\alpha)$

$^{17}\text{O}(p,\alpha)$

$^{18}\text{O}(p,\alpha)$

La Cognata 2008
Chafa et al.

Chafa et al.

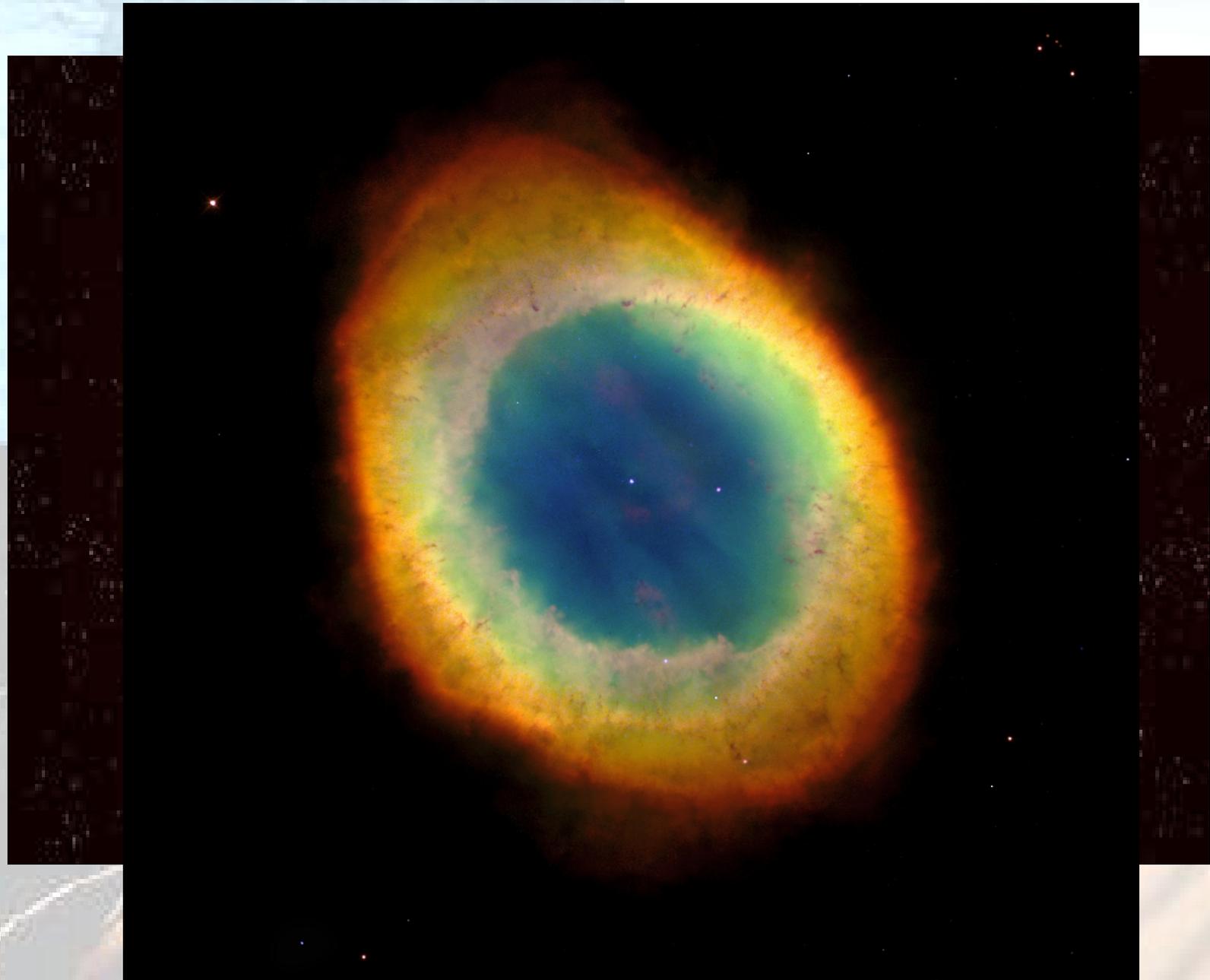
La Cognata 2008

PRL 2008 (PASA 2009)
PhysRev C 2007

PhysRev C 2007

PRL 2008 (PASA 2009)

Alla fine di tutto.....



SN 1987A



SN 1987A



Gas interstellare



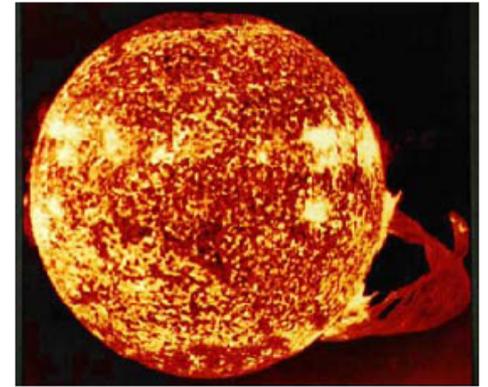
Mescolamento degli
elementi nella
Galassia

Formazione
Contraz. Gravitazionale



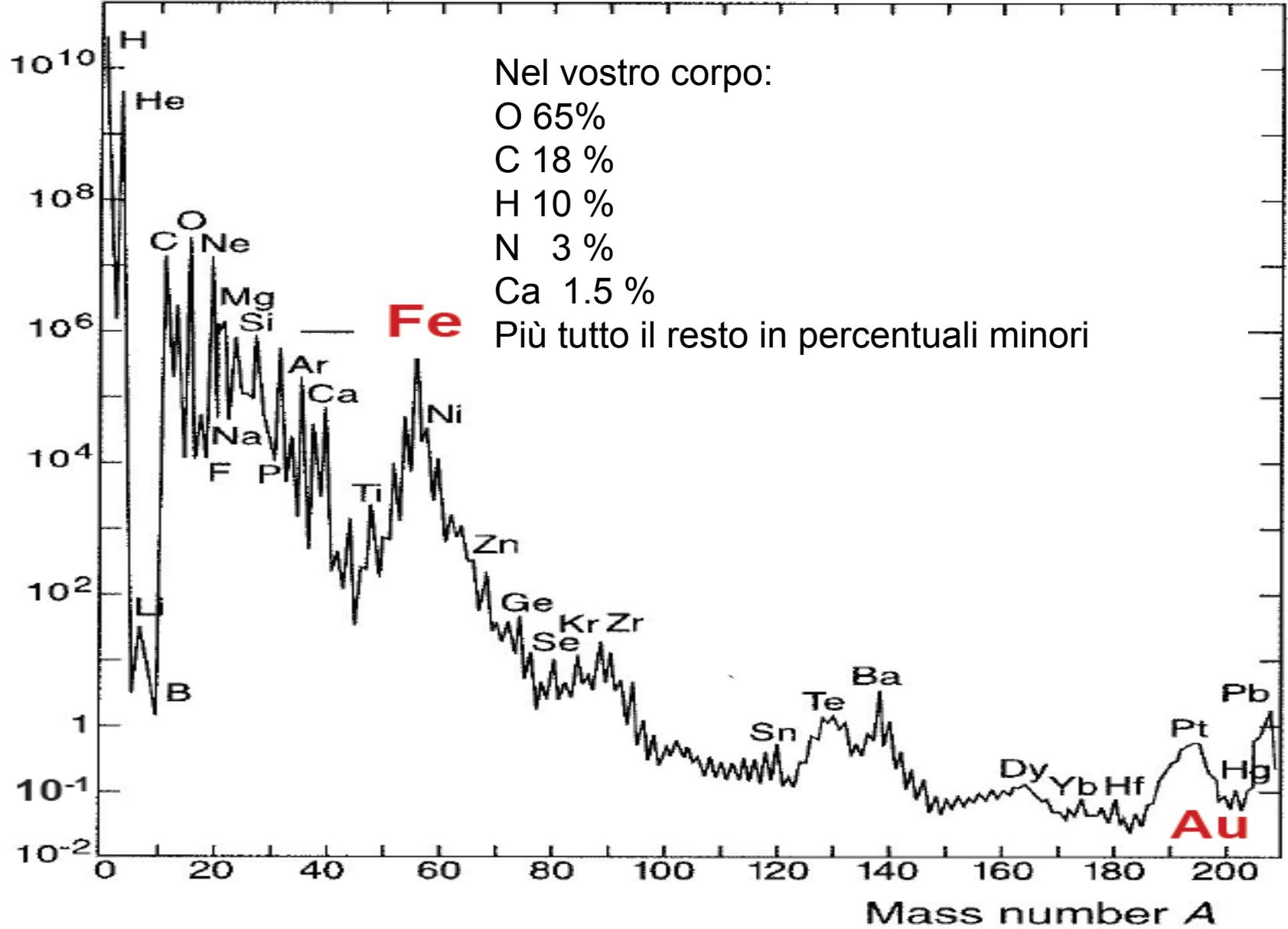
Venti stellari,
esplosione

Stelle



Reazioni
Termonucleari





Qualche aspetto pratico

Nella medicina nucleare il ^{99}Tc (osservato da Merrill nel 1952 nelle stelle, prodotto in laboratorio da Segré e Cacciapuoti nel 1938) è usato nell'85% delle immagini a scansione ("scans") fatte negli ospedali

Isotopi radioattivi come il ^{14}C (5730 anni di vita media) sono usati per datare i reperti archeologici (e.g. la Sindone, caso però molto difficile)

Isotopi radioattivi che emettono radiazione ionizzante (molto pericolosi per noi) possono diventare utili se usati con cautela, ad esempio per uccidere i batteri (irradiazione degli alimenti permette la loro conservazione)

Ma soprattutto.....

L' ^{26}Al (vita media 1 Myr) era presente in grande quantità nel sistema solare iniziale (informazione dovuta ai meteoriti Allende e Murchison!): $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 5 \times 10^{-5}$ (nella Galassia in media questo rapporto è 2×10^{-6}).

L' ^{26}Al scaldò il materiale portandolo a liquefarsi, poi il raffreddamento formò le rocce dei pianeti solidi. Senza (o con poco) ^{26}Al , per es. quello galattico, niente Terra!

Niente di niente questa sera.... Neanche i vini piemontesi che aspettiamo!
(Siamo soli nell'Universo??)

Delle cose che sono improbabili

L'uomo che non crede alle cose improbabili non ha difficoltà ad accettare quelle impossibili (Oscar Wilde)



**Dunque siamo fatti di polvere.
Ma è polvere di stelle.**

Meglio degli astronomi, a volte, lo sanno i poeti:

E che senso ha tutta questa chiacchierata?

Come dice Cardarelli,

“Una pausa di Meraviglia, in tanto daffare che ci illude”

Se vi ho permesso una pausa di meraviglia, ho
raggiunto il mio scopo!

GRAZIE A TUTTI!!

Obbligarsi a sostare.

Che senso ha tutto questo?”

[Vincenzo Cardarelli]