A.D. 1308

unipg

DIPARTIMENTO
DI FISICA E GEOLOGIA

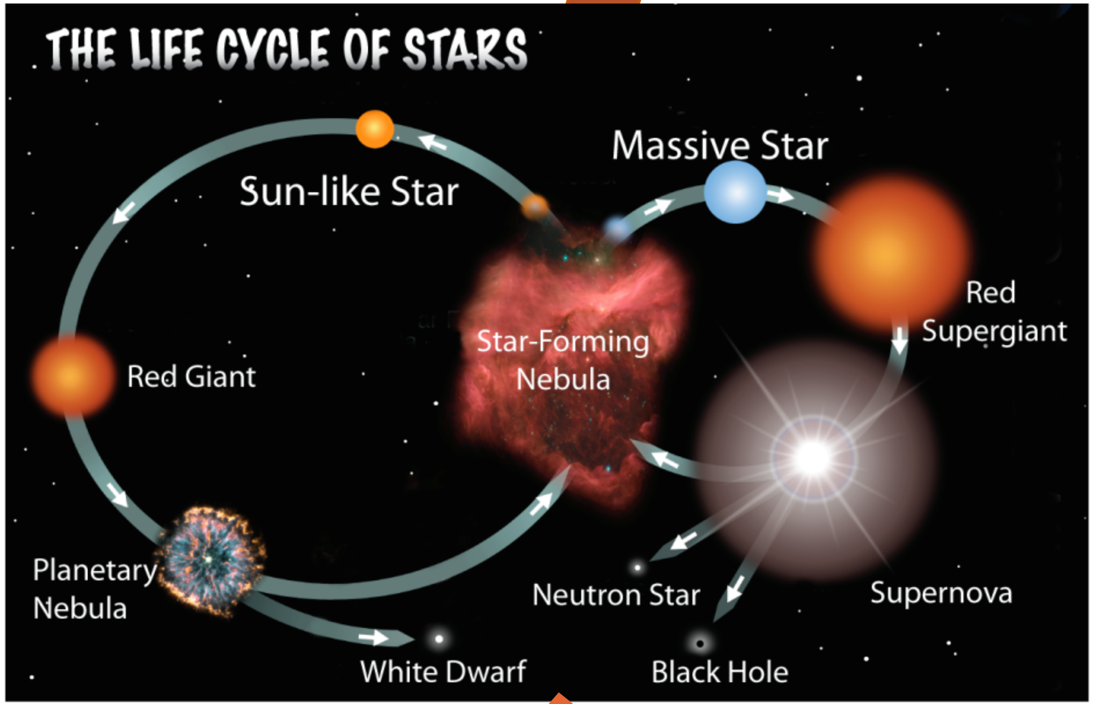
INFN
PERUGIA
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Perugia

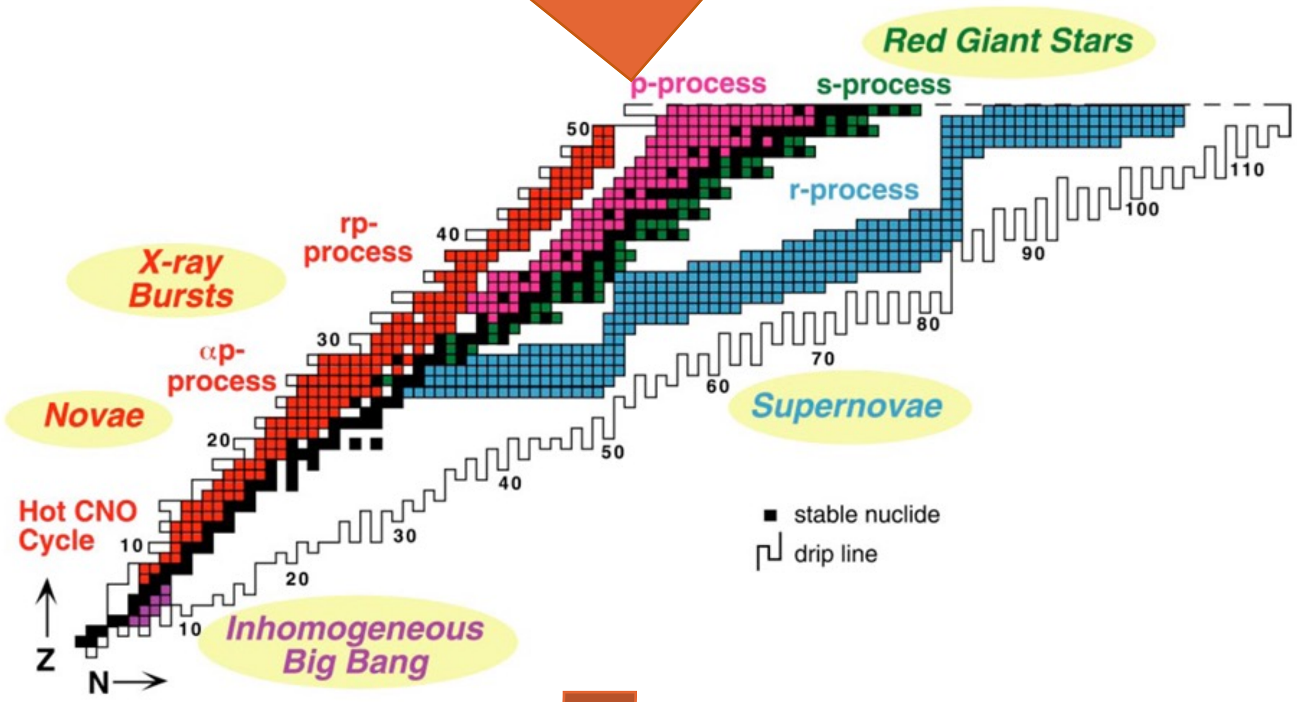
Astrofisica Nucleare @ UniPG

Workshop di orientamento alla Laurea Magistrale in Fisica: corsi, curricola, tesi e attività di ricerca a Perugia

Sara Palmerini – sara.palmerini@unipg.it

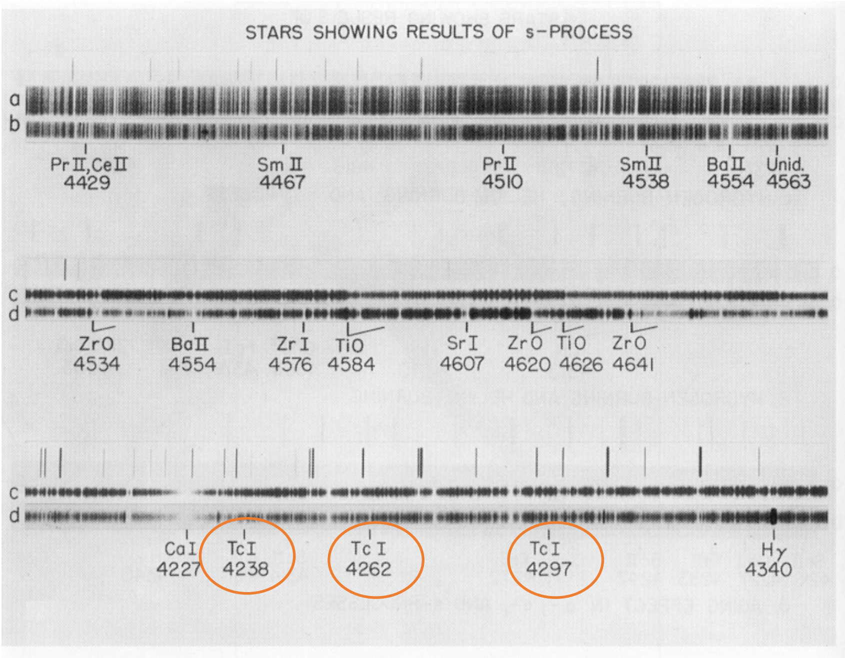
ASTROFISICA NUCLEARE





Merrill 1952:
s-star contains Tc
(Z=43 $T_{1/2}$= 4 Gyr)

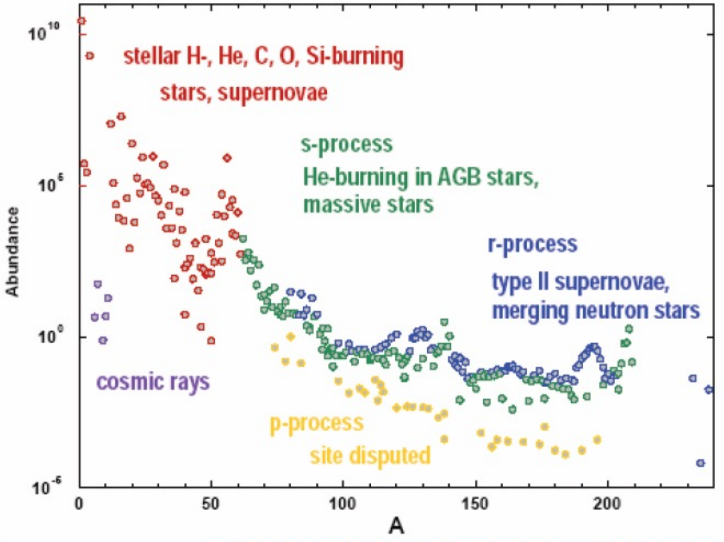
- Known at the time that Tc is an «artificial» element
- Aritificial = someone has to make it
- Meril 1952: «it is surprising to find an unstable element in stars [...] (1) A stable isotope (of technitium) actually exixts although not yet found an Earth; or (2) s-type stars somehow produce technitium as they go along; or (3) s-type stars represent a comparativly transient phase of stellar existence»



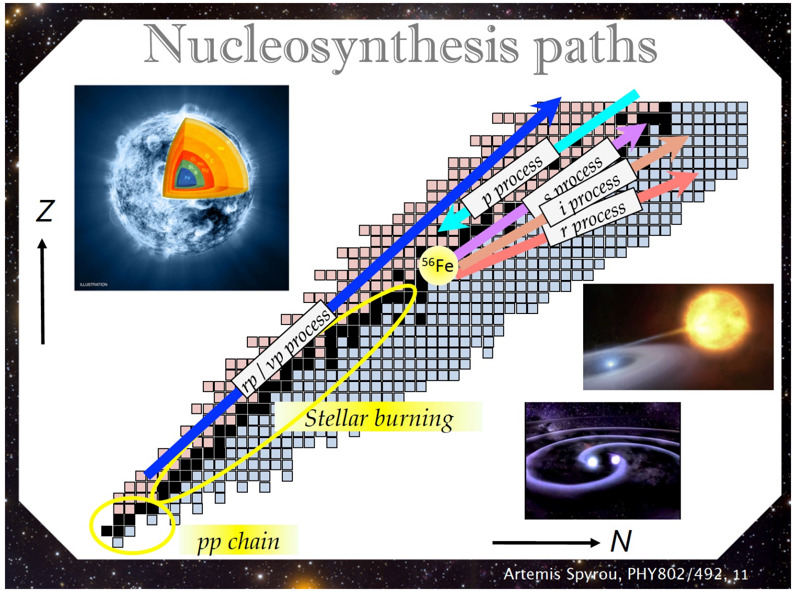
97Ru 2.83 D ε: 100.00%	98Ru STABLE 1.87%	99Ru STABLE 12.76%	100Ru STABLE 12.60%	101Ru STABLE 17.06%	102Ru STABLE 31.55%
96Tc 4.28 D ε: 100.00%	97Tc 4.21E+6 Y ε: 100.00%	98Tc 4.2E+6 Y β-: 100.00%	99Tc 2.111E+5 Y β-: 100.00%	100Tc 15.46 S β-: 100.00% ε: 2.6E-3%	101Tc 14.02 M β-: 100.00%
95Mo STABLE 15.84%	96Mo STABLE 16.67%	97Mo STABLE 9.60%	98Mo STABLE 24.39%	99Mo 65.976 H β-: 100.00%	100Mo 7.3E+18 Y 9.82% 2β-: 100.00%

B^2FH: the birth of nuclear astrophysics

Burbidge, Burbidge, Fowler & Hoyle (B^2FH): Rev. Mod. Phys. 29 (1957) 547



from: M. Wiescher, JINA lectures on Nuclear Astrophysics



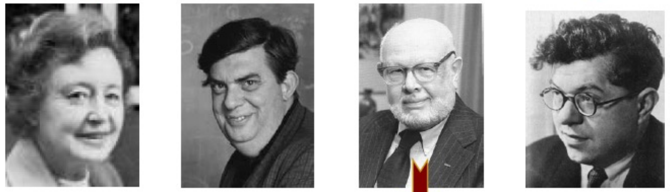
REVIEWS OF
MODERN PHYSICS

VOLUME 29, NUMBER 4 OCTOBER, 1957

Synthesis of the Elements in Stars*

E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE

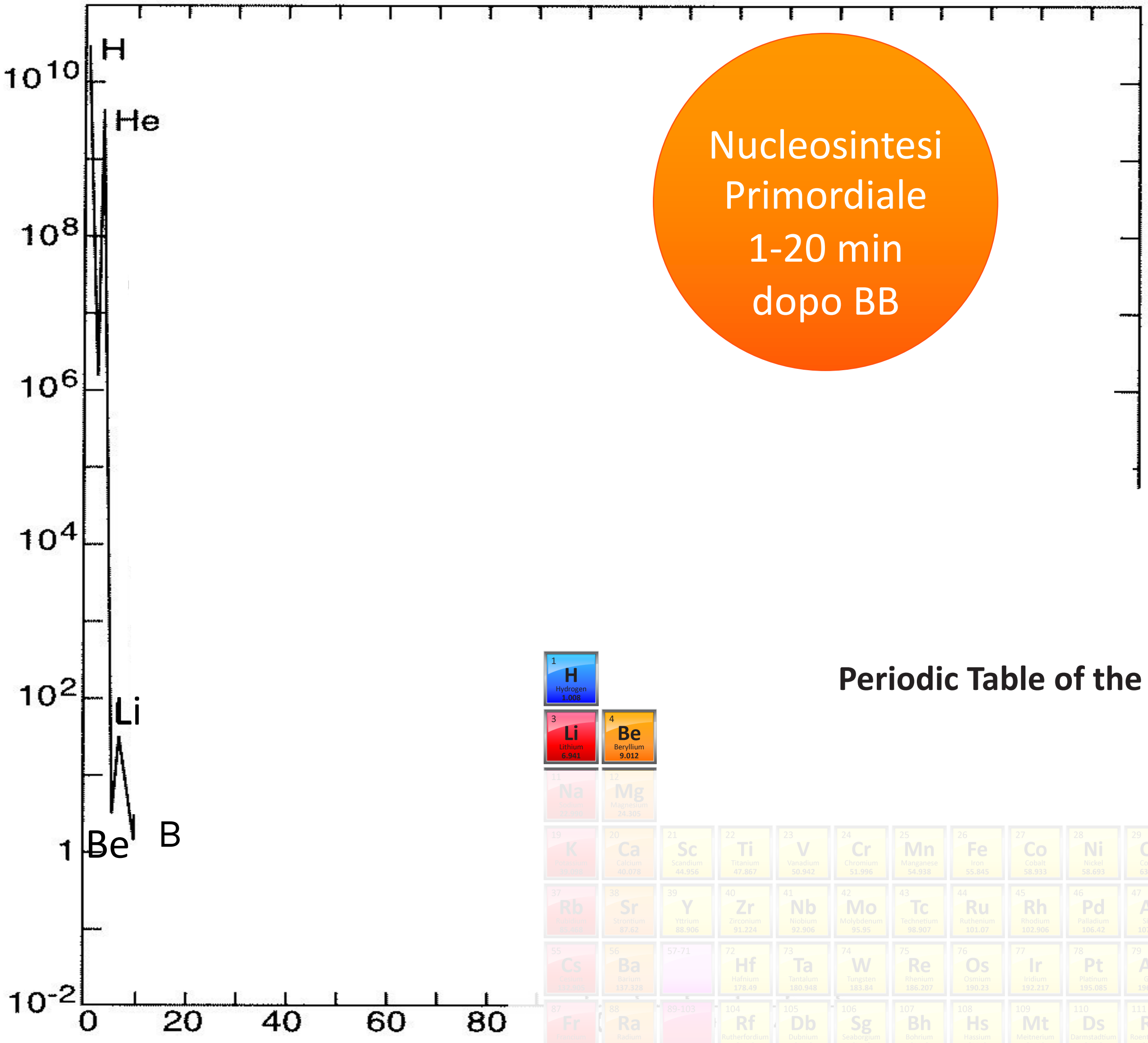
Burbidge Burbidge Fowler Hoyle

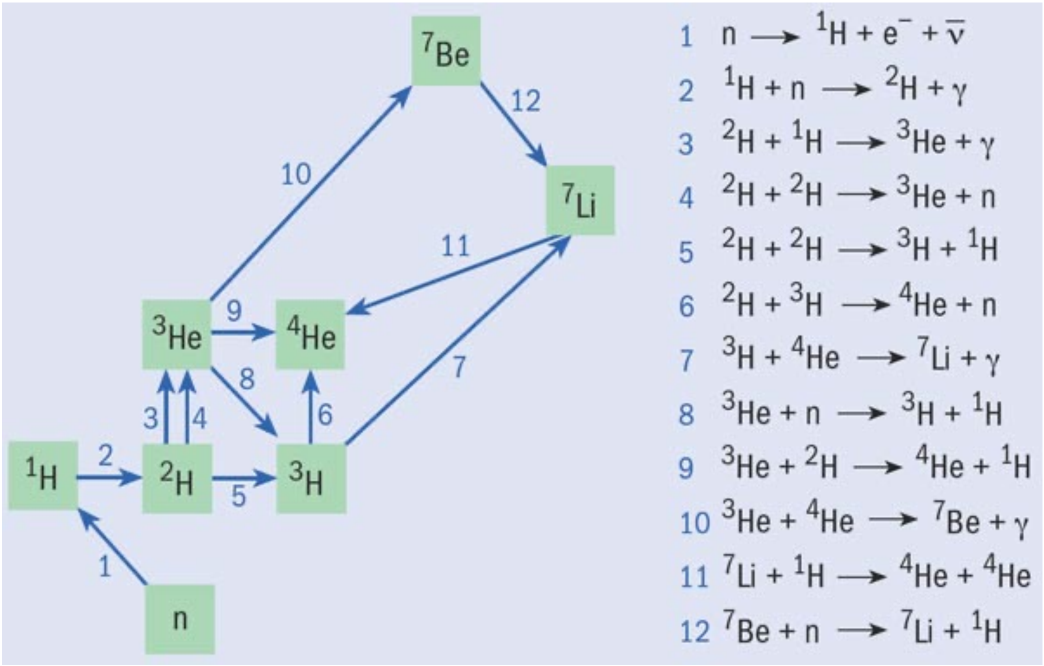


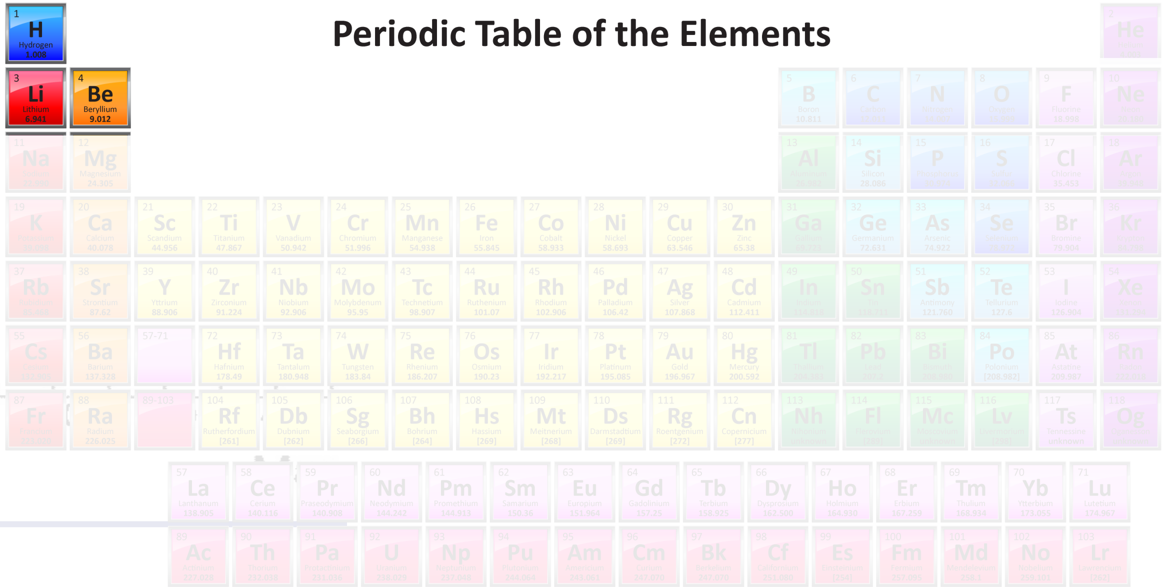
1983
Nobel Prize

"for his theoretical and experimental studies of the nuclear reactions of importance in the formation of the chemical elements in the universe"

Nucleosintesi Primordiale 1-20 min dopo BB

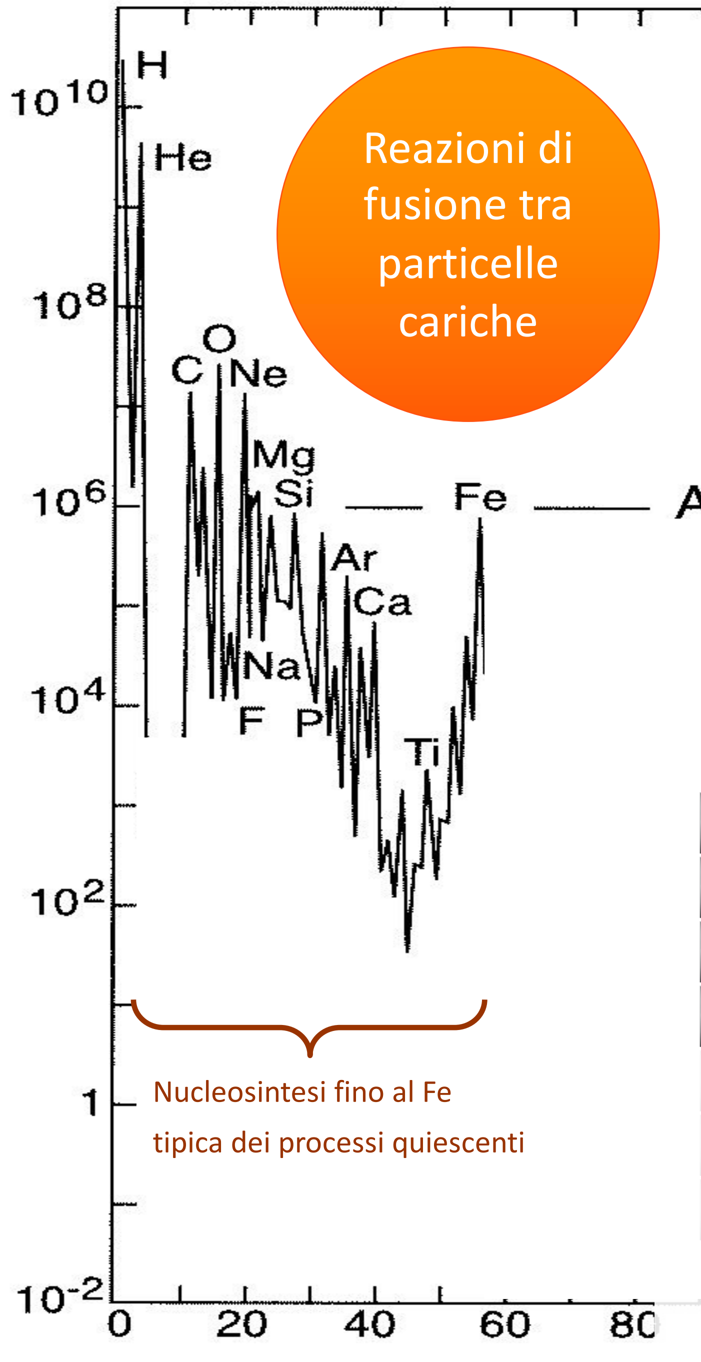






CORE STELLAR BURNING (QUIESCENT)

Reazioni di fusione tra particelle cariche



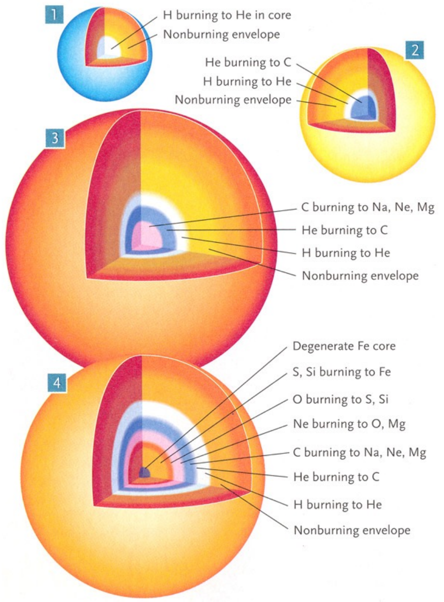
Nucleosintesi fino al Fe
tipica dei processi quiescenti

Stellar mass ($M_\odot$)	Stage reached
< 0.08	no thermonuclear fusion
0.1 -0.5	H burning
0.5 - 8	He burning
8 - 11	C burning
> 11	all stages

Main parameters:

1) mass $\Rightarrow$ central temperature
2) chemical composition

$\Rightarrow$ nuclear processes

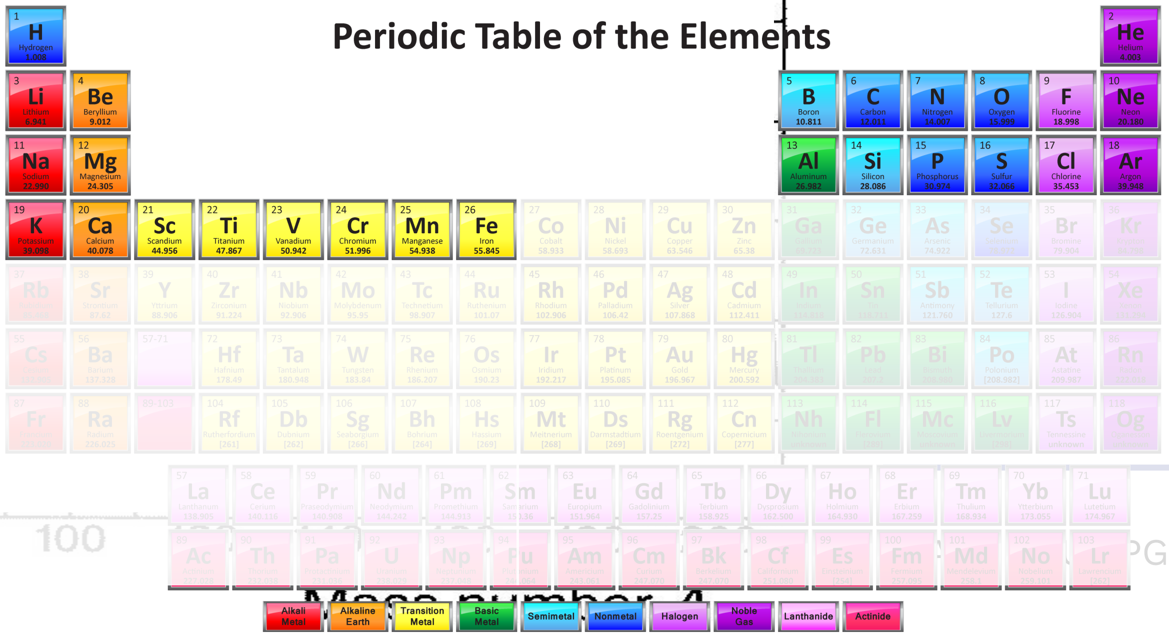


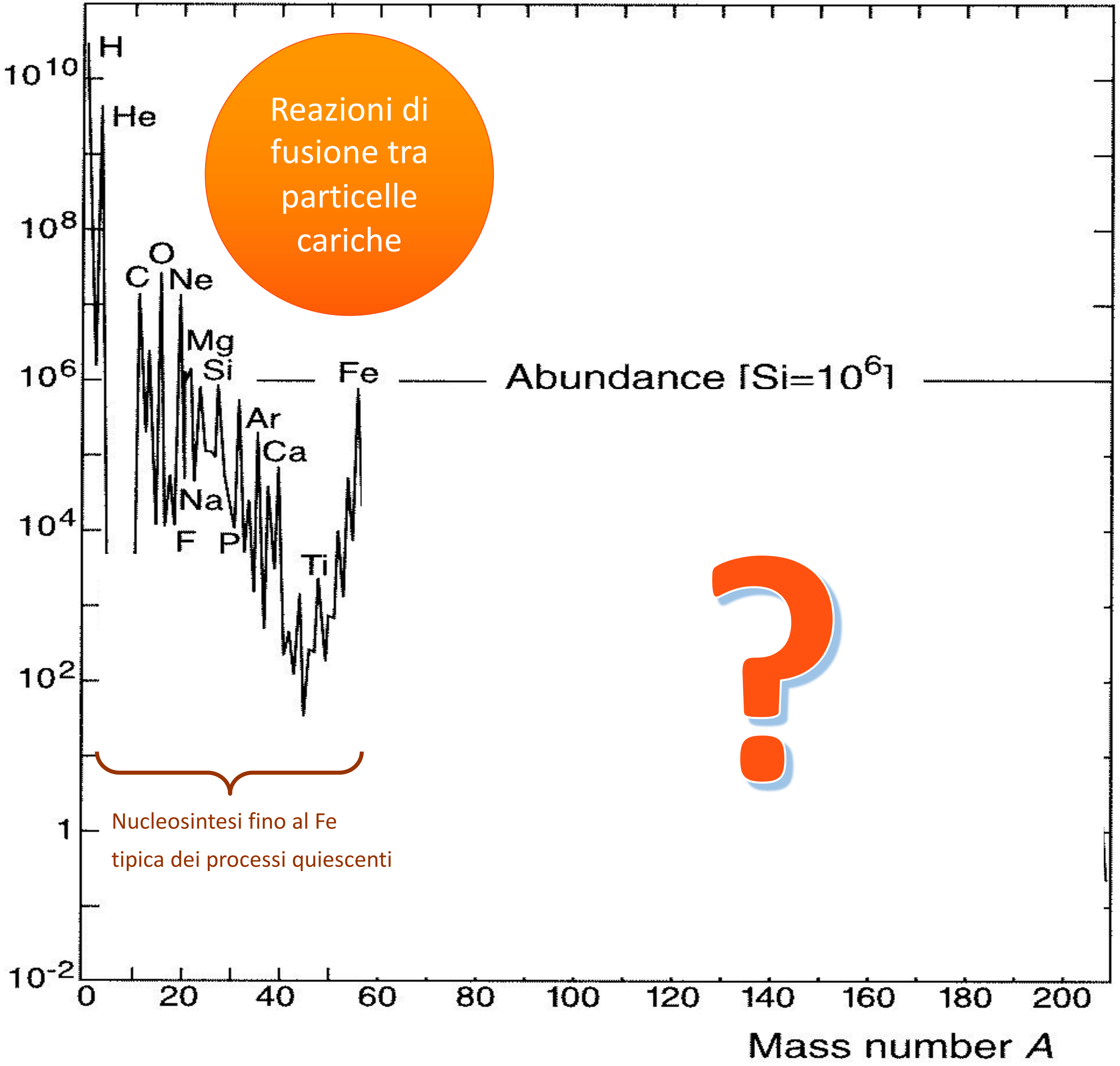
Evolution stages of a 25 $M_\odot$ star

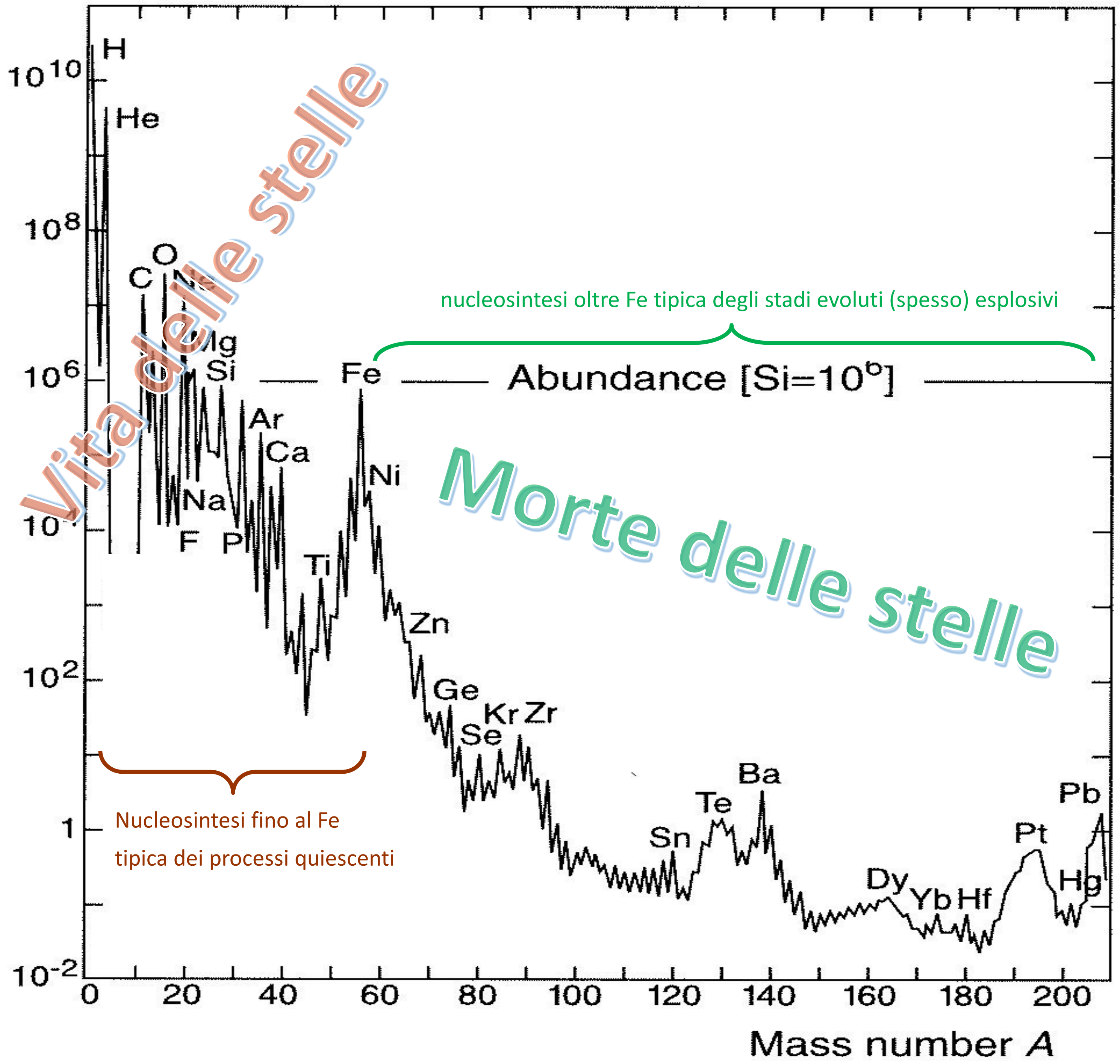
T, ρ

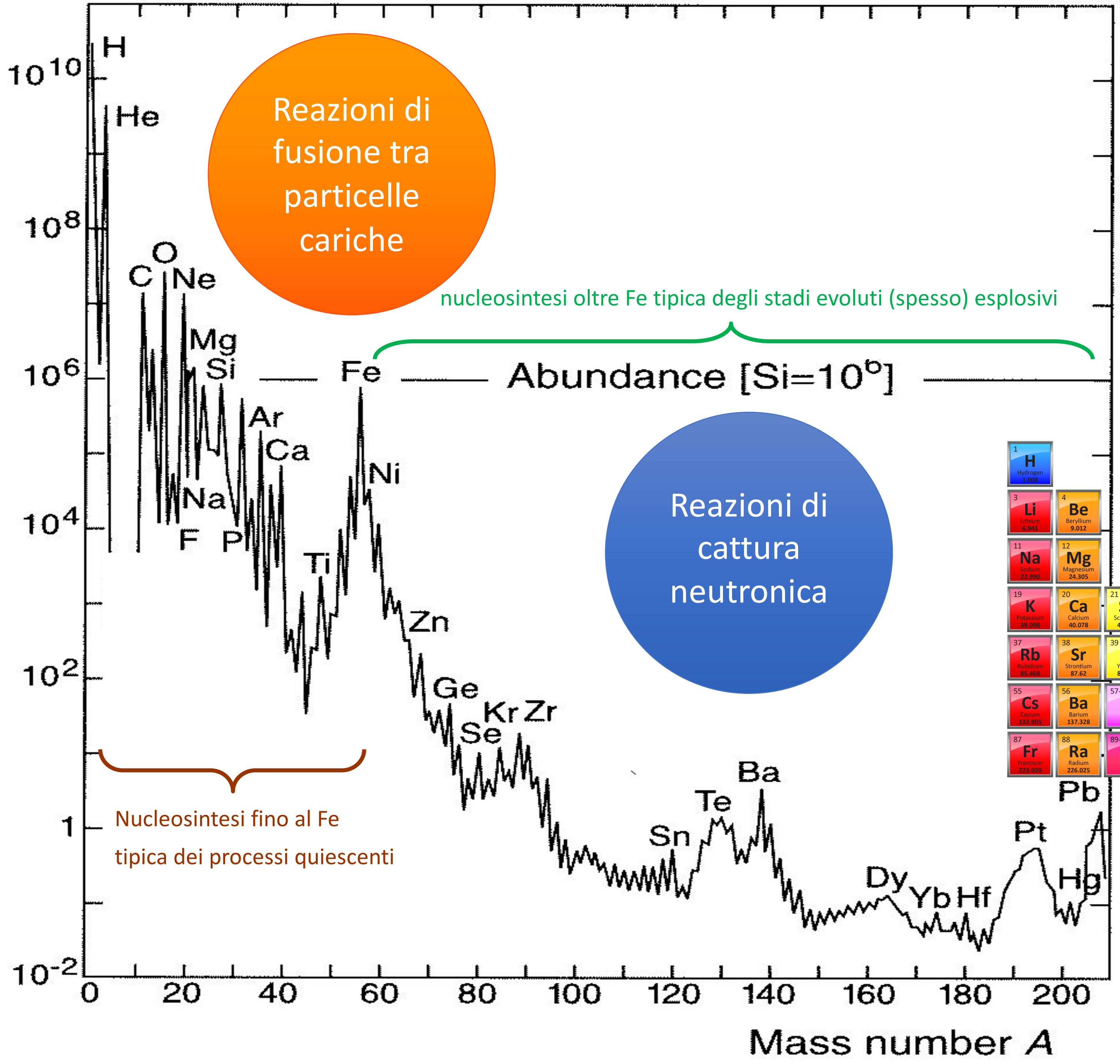
Stage reached	Timescale	T_{core} (10^9 K)	Density (g cm^{-3})
H burning	7×10^6 y	0.06	5
He burning	5×10^5 y	0.23	7×10^2
C/O burning	600 y / 6 months	0.93 – 2.3	2×10^5 – 1×10^7
Si melting	1 d	4.1	3×10^7
Explosive burning	0.1 – 1 s	1.2 - 7	varies

→ SUPERNOVA EXPLOSION (type II) M ≥ 8 $M_\odot$

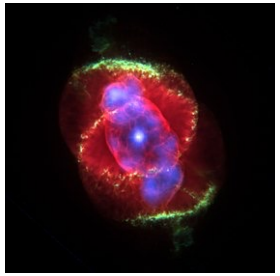
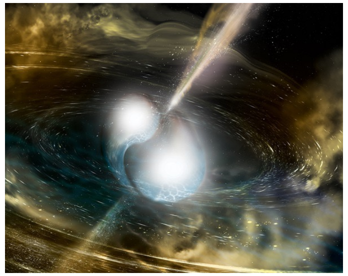


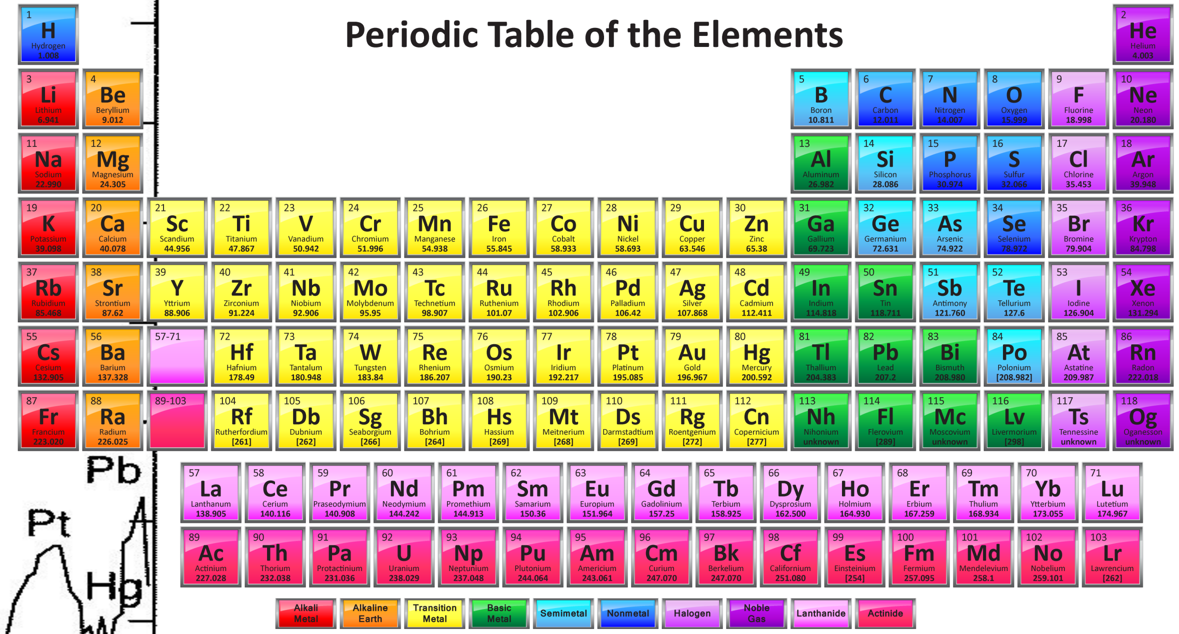

H
He
O
C
Ne
Mg
Si
Fe
Abundance [Si=10^6]
Ar
Ca
Na
F
P
Ti
Reazioni di fusione tra particelle cariche
?
Nucleosintesi fino al Fe
tipica dei processi quiescenti
Mass number A


Vita delle stelle
Morte delle stelle
nucleosintesi oltre Fe tipica degli stadi evoluti (spesso) esplosivi
Abundance [Si=10^6]
Nucleosintesi fino al Fe
tipica dei processi quiescenti
H
He
C
O
Mg
Si
Fe
Ar
Ca
Na
F
P
Ni
Ti
Zn
Ge
Se
Kr
Zr
Sn
Te
Ba
Dy
Yb
Hf
Pt
Pb
Hg
Mass number A



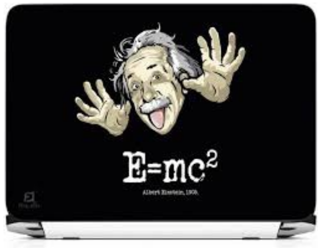
- S-process (lento)
- R-process (rapido)
- i-process (lento)

La fisica nucleare delle stelle

Per la reazione : A(B,C)D cioè A+B-->C+D



Il Q-valore: $Q=[(m_A+m_B)-(m_C+m_D)]c^2$

(energia prodotta per singola reazione)

✓ TASSO (RATE) DI REAZIONE r

(numero di reazioni per unità di tempo e volume)

$$r = \frac{1}{1+\delta_{AB}} N_A \, N_B \langle \sigma v \rangle$$

N_i = densità numerica delle specie interagenti

v = velocità relative

$\phi(v)$ = distribuzione della velocità nel plasma

$\sigma(v)$ = sezione d'urto della reazione

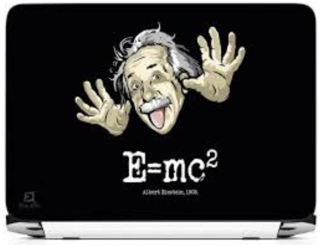
$$\langle \sigma v \rangle = \int \sigma(v)\varphi(v) v dv$$

✓ TASSO DI PRODUZIONE DI ENERGIA ε

$\varepsilon = rQ/\rho$ unità: MeV g^{-1} s^{-1}

La fisica nucleare delle stelle

Per la reazione : A(B,C)D cioè A+B-->C+D



Il Q-valore: $Q=[(m_A+m_B)-(m_C+m_D)]c^2$

(energia prodotta per singola reazione)

Misurate dall'A.N. sperimentale

✓ TASSO (RATE) DI REAZIONE r

(numero di reazioni per unità di tempo e volume)

$$r = \frac{1}{1+\delta_{AB}} N_A \, N_B \langle \sigma v \rangle$$

N_i = densità numerica delle specie interagenti

v = velocità relative

$\phi(v)$ = distribuzione della velocità nel plasma

$\sigma(v)$ = sezione d'urto della reazione

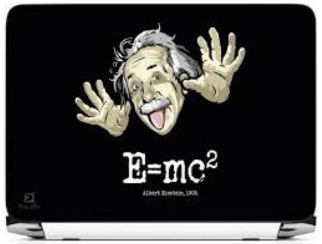
$$\langle \sigma v \rangle = \int \sigma(v) \varphi(v) v dv$$

✓ TASSO DI PRODUZIONE DI ENERGIA ε

$\varepsilon = rQ/\rho$ unità: MeV g^{-1} s^{-1}

La fisica nucleare delle stelle

Per la reazione : A(B,C)D cioè A+B-->C+D



Il Q-valore: $Q=[(m_A+m_B)-(m_C+m_D)]c^2$

(energia prodotta per singola reazione)

Misurate dall'A.N. sperimen-tale

✓ TASSO (RATE) DI REAZIONE r

(numero di reazioni per unità di tempo e volume)

$$r = \frac{1}{1+\delta_{AB}} N_A \, N_B \langle \sigma v \rangle$$

N_i = densità numerica delle specie interagenti

v = velocità relative

$\phi(v)$ = distribuzione della velocità nel plasma

$\sigma(v)$ = sezione d'urto della reazione

$$\langle \sigma v \rangle = \int \sigma(v)\varphi(v) v dv$$

Usate nelle simulazioni di nucleosintesi per spiegare le osservazione dagli A.N. teorica

✓ TASSO DI PRODUZIONE DI ENERGIA ε

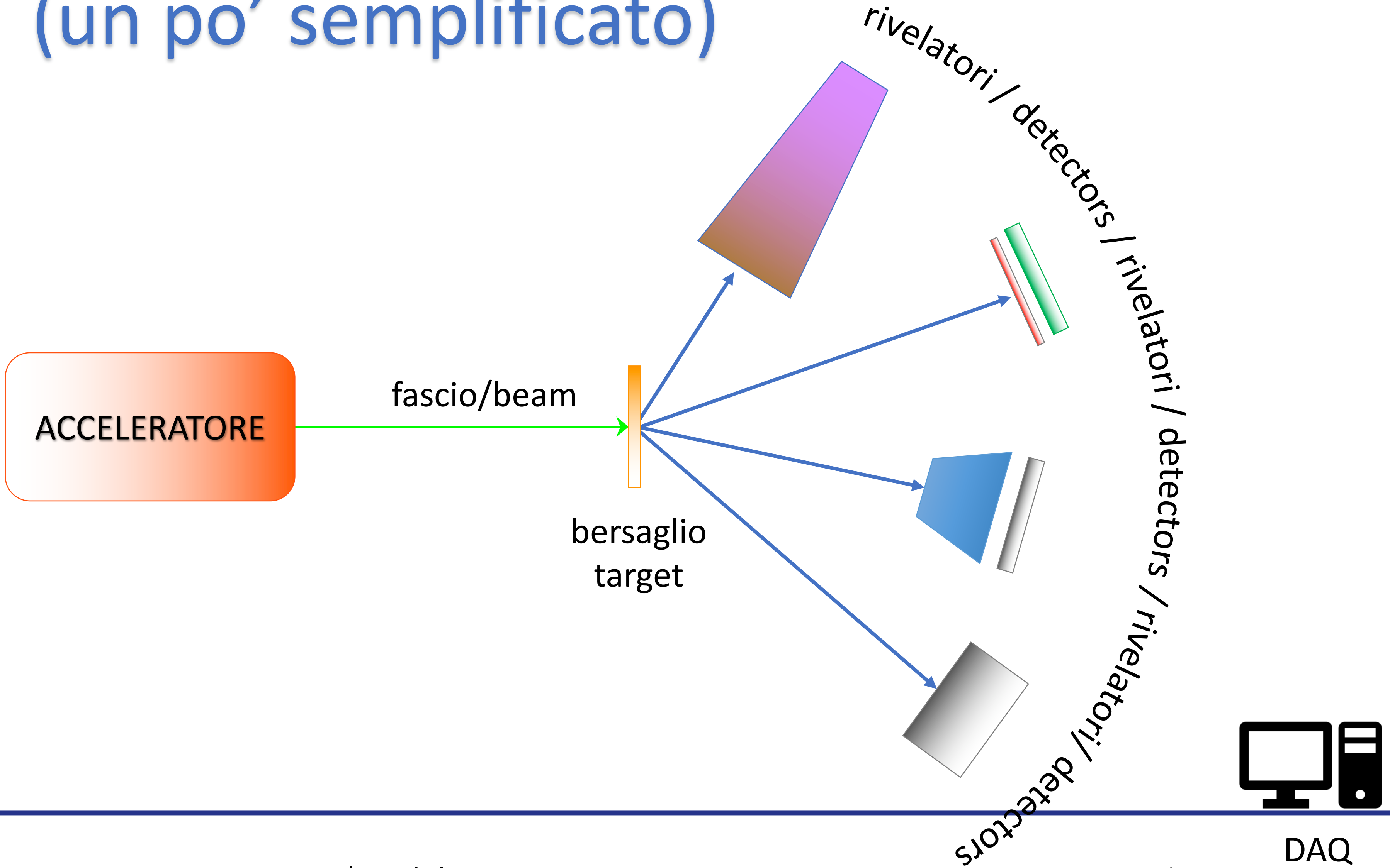
$$\varepsilon = rQ/\rho$$

unità: MeV g^{-1} s^{-1}

Attività e tesi sperimentali

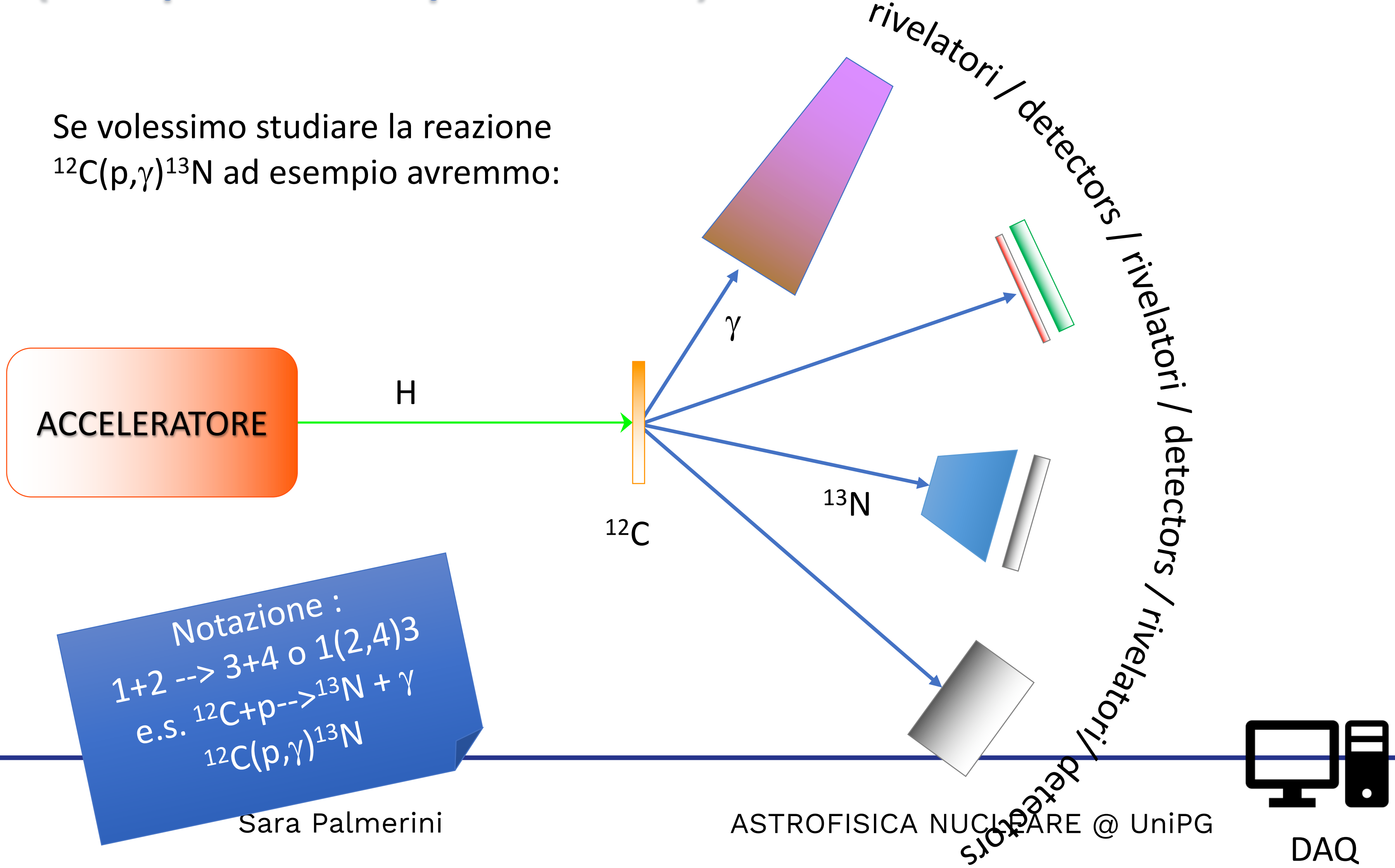
Gli acceleratori

Un esperimento di fisica nucleare
(un po' semplificato)



Un esperimento di fisica nucleare (un po' semplificato)

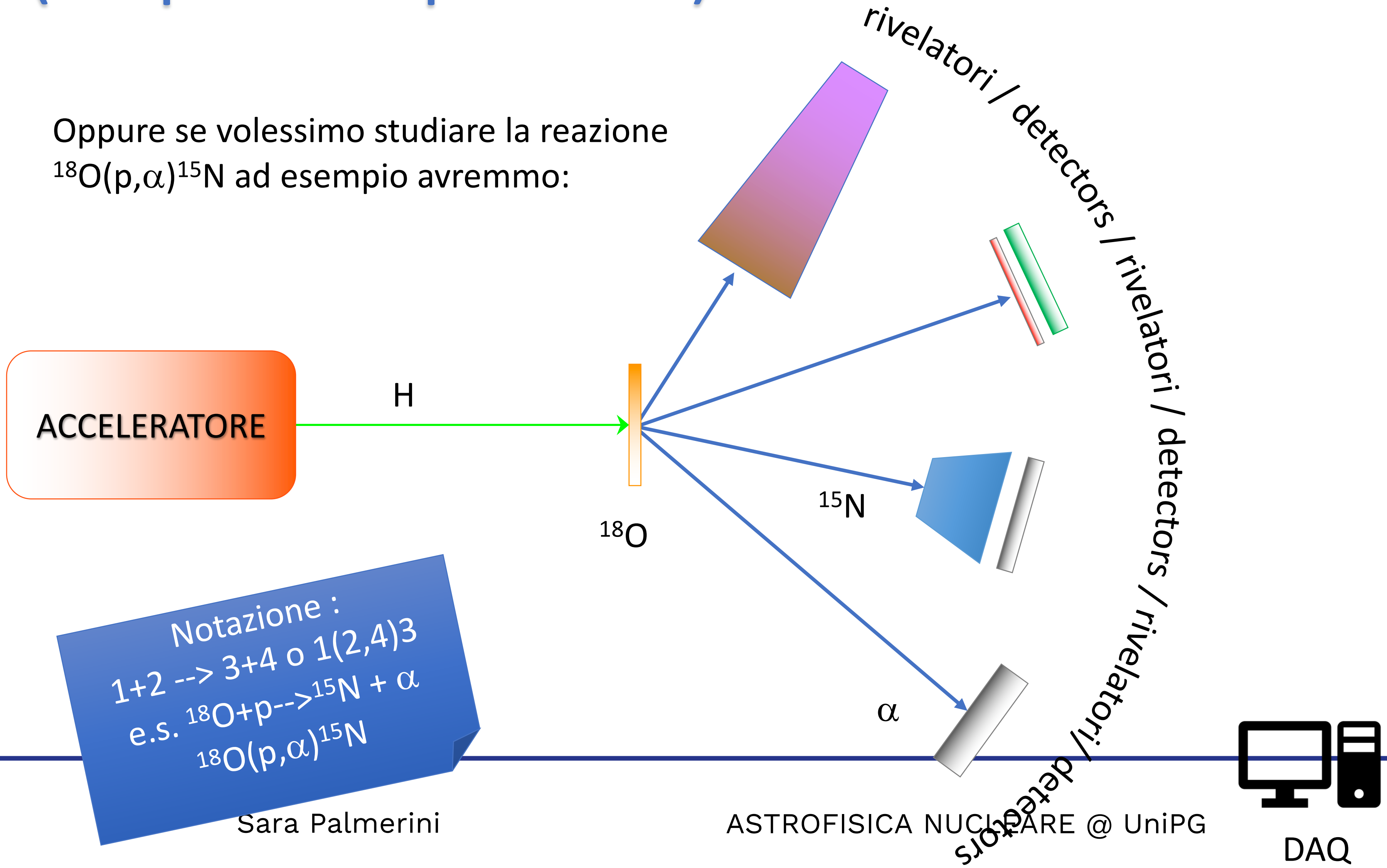
Se volessimo studiare la reazione $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ ad esempio avremmo:



Notazione :
1+2 --> 3+4 o 1(2,4)3
e.s. $^{12}C+p \rightarrow ^{13}N + \gamma$
$^{12}C(p,\gamma)^{13}N$

Un esperimento di fisica nucleare (un po' semplificato)

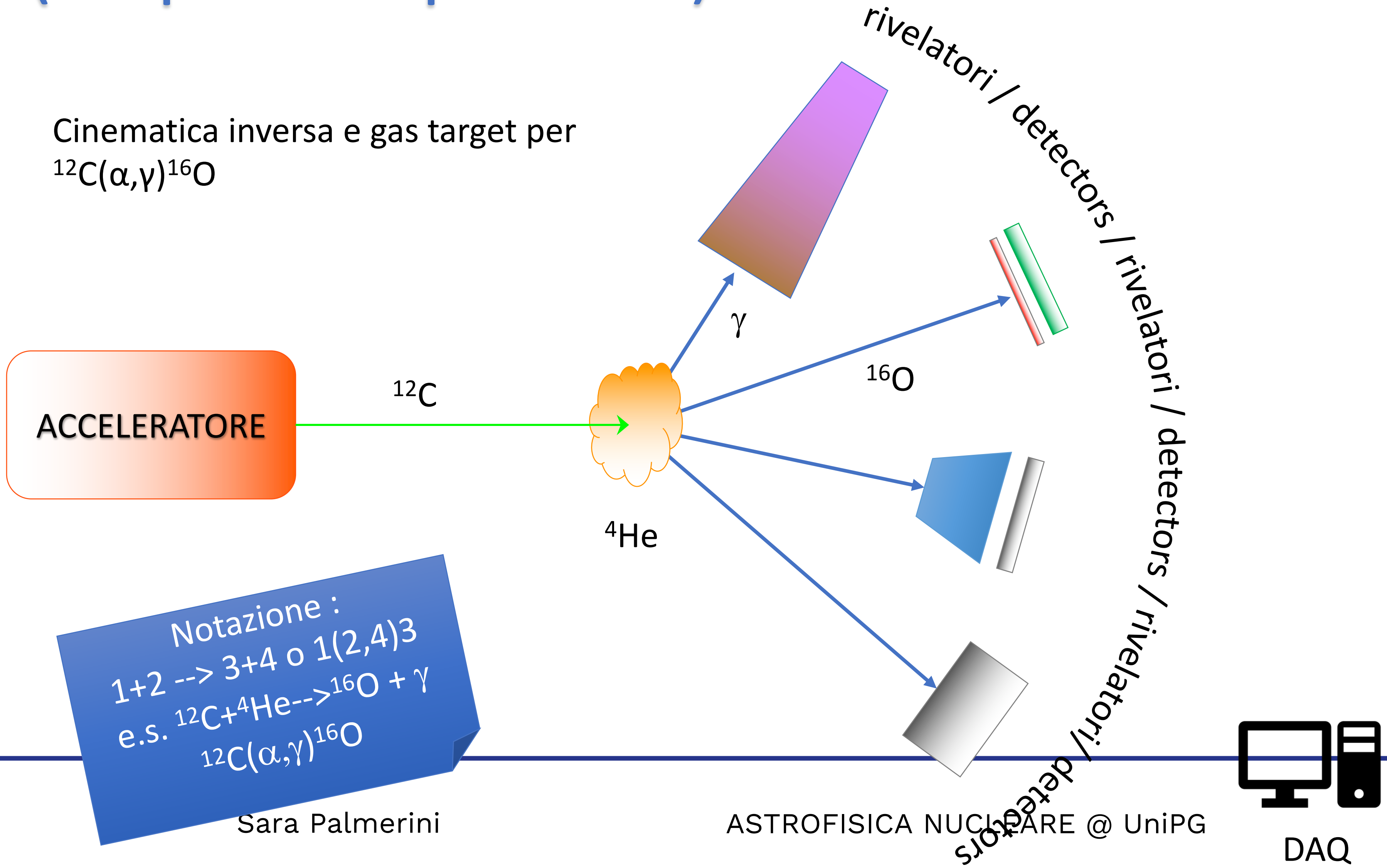
Oppure se volessimo studiare la reazione $^{18}O(p,\alpha)^{15}N$ ad esempio avremmo:



Notazione :
1+2 --> 3+4 o 1(2,4)3
e.s. $^{18}O+p \dashrightarrow ^{15}N + \alpha$
$^{18}O(p,\alpha)^{15}N$

Un esperimento di fisica nucleare (un po' semplificato)

Cinematica inversa e gas target per $^{12}C(\alpha,\gamma)^{16}O$



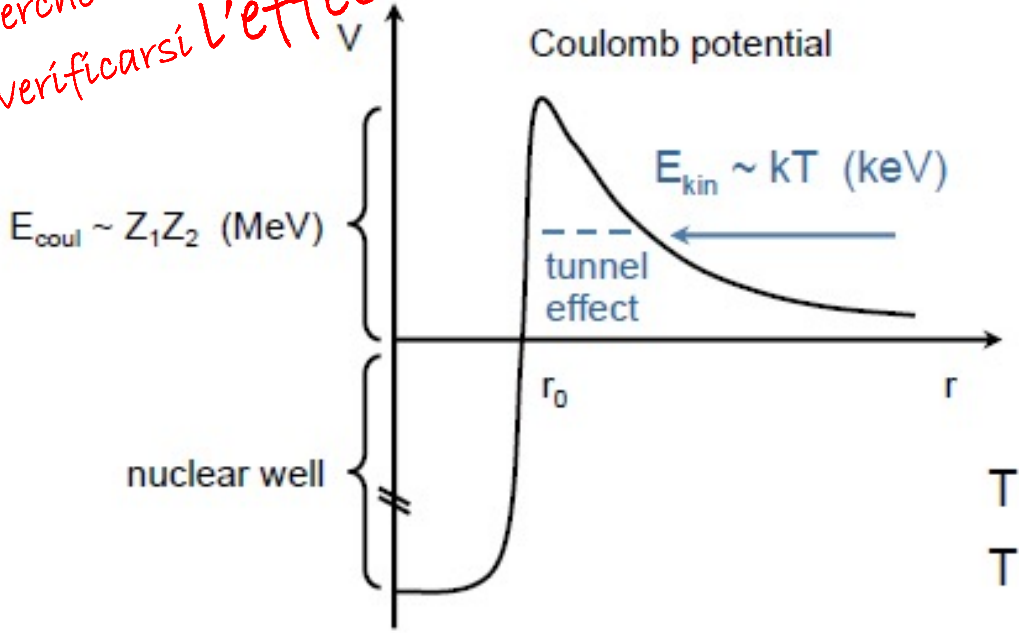
Notazione :
1+2 --> 3+4 o 1(2,4)3
e.s. $^{12}C+^{4}He \to ^{16}O + \gamma$
$^{12}C(\alpha,\gamma)^{16}O$

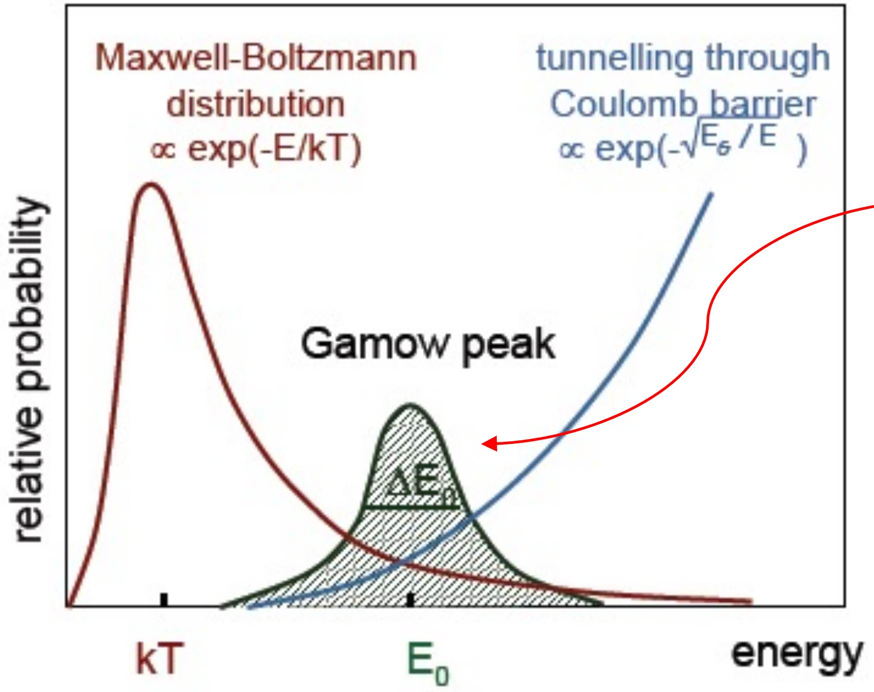
2 problemi da risolvere

- Reazioni di cattura neutronica:
  - REPERIRE TARGET O FASCIO ACCELERATO DI NEUTRONI
- Reazioni tra particelle cariche:
  - LA REPULSIONE COULOMBIANA

Misurare reazioni di fusione tra particelle cariche

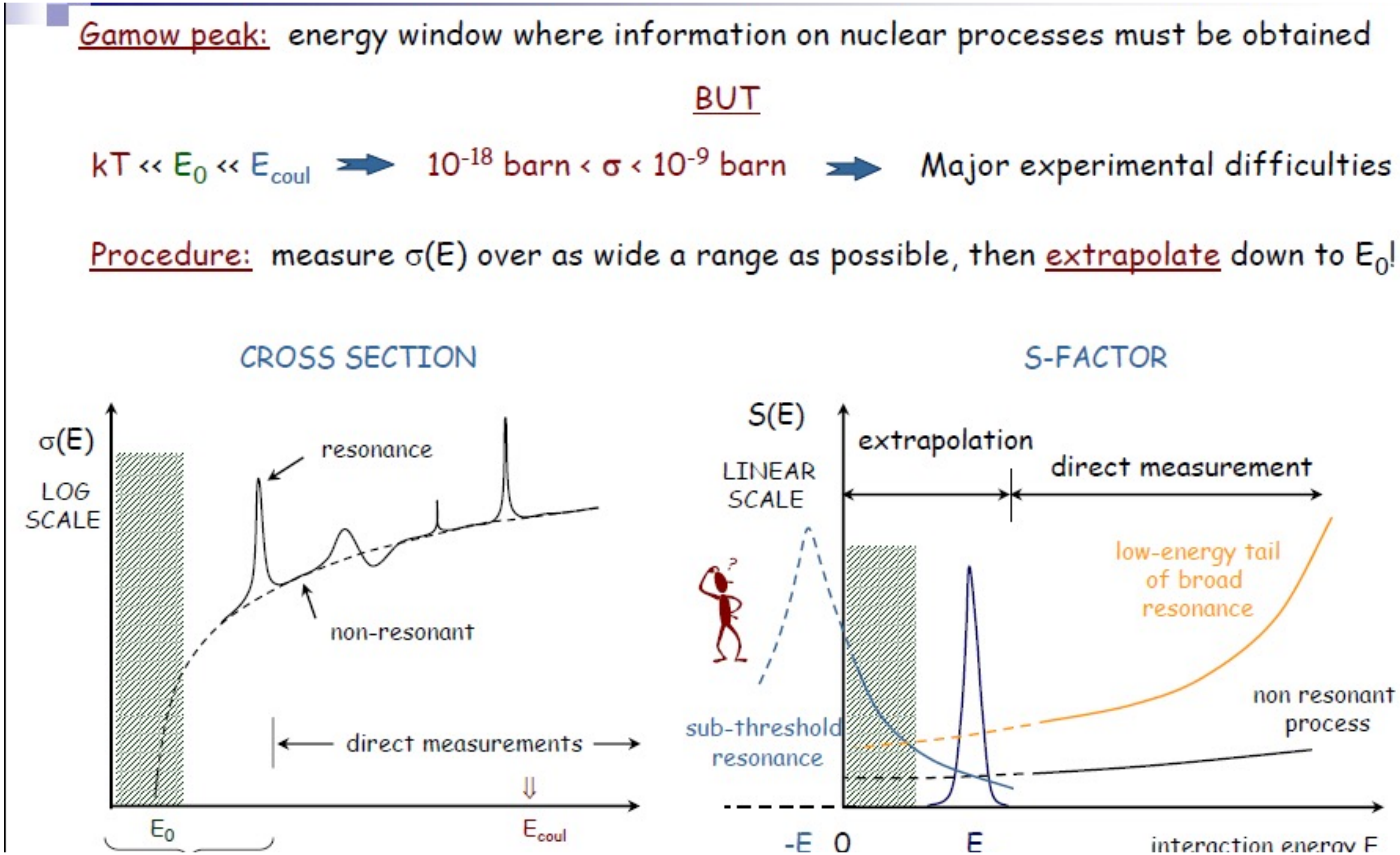
Perché una reazione avvenga deve verificarsi l'effetto tunnel





Massima probabilità che avvenga la reazione dipende da T

Misurare reazioni di fusione tra particelle cariche



N_p = numero di ioni proiettili in genere, intensità del fascio stabile 10^{14} pps

N_t = numero di atomi bersaglio tipicamente 10^{19} atoms/cm^2

σ = sezione trasversale di reazione (data dalla natura) tipicamente, 10^{-15} barn (1 barn = 10^{-24} cm^2)

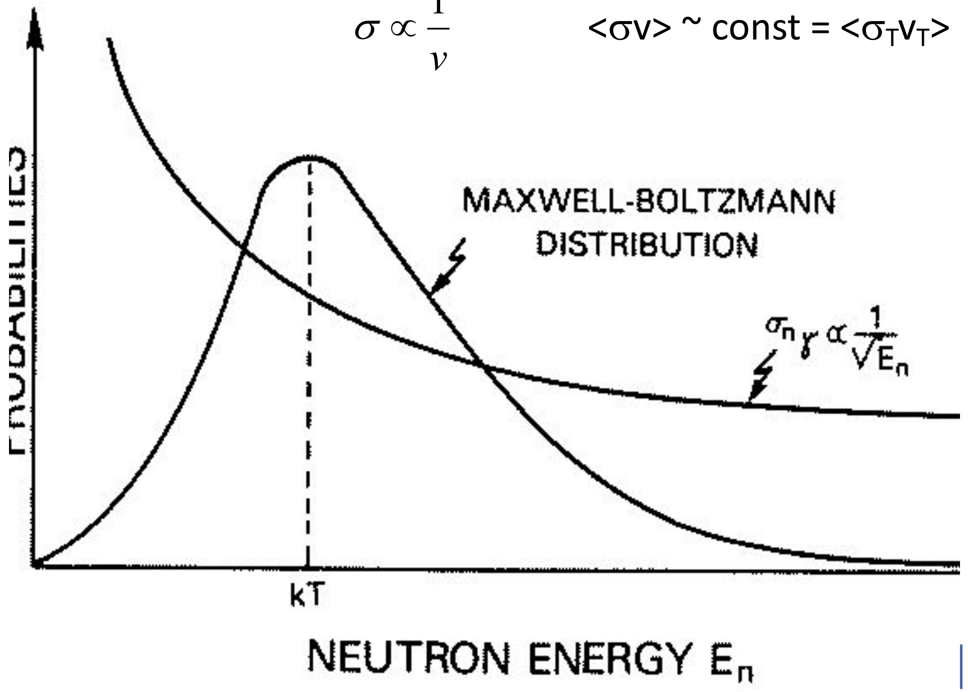
e = efficienza di rilevamento in genere, 100% per particelle cariche ~ 1% per i raggi

Misurare reazioni di cattura neutronica

$E_0 \sim kT$ = energia di interesse

(e.g. $T \sim 1\text{-}6 \times 10^8$ K $\Rightarrow$ $E_0 \sim 30$ keV)

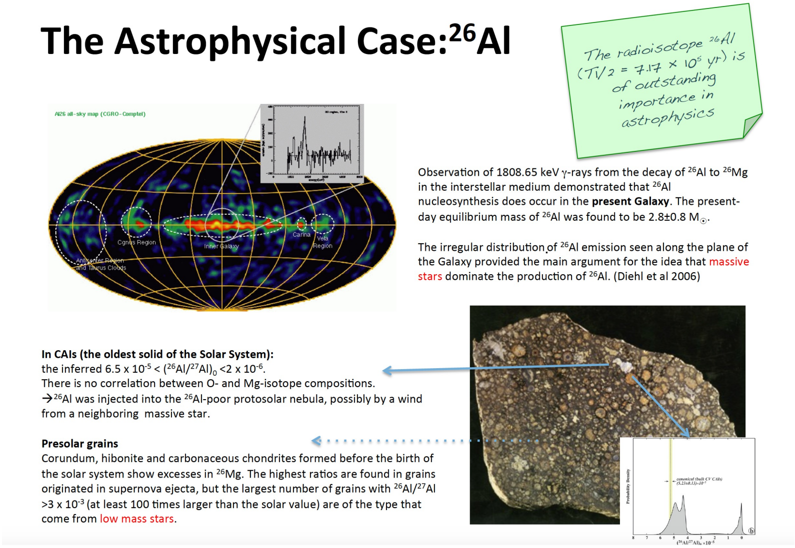
$\sigma \propto \frac{1}{v}$ $\langle \sigma v \rangle \sim \text{const} = \langle \sigma_T v_T \rangle$

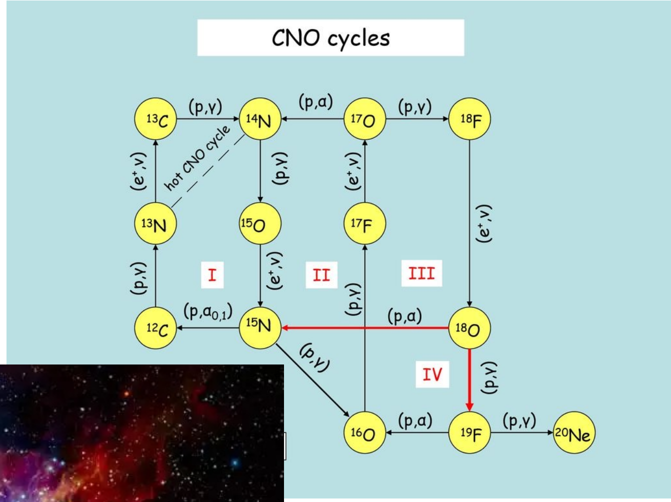


- Non c’è problema di barriera coulombiana
- Le sezioni d’urto possono essere misurate direttamente alle energie di ’’astrofisiche’’
- ….basta avere i neutroni all’energia giusta

2 proposte di tesi sperimentali

- Misura della sezione d'urto delle reazioni ^{26}Al(p,α)^{24}Mg e/o ^{26}Al(n,α)^{23}Mg alle energie tipiche della nucleosintesi stellare



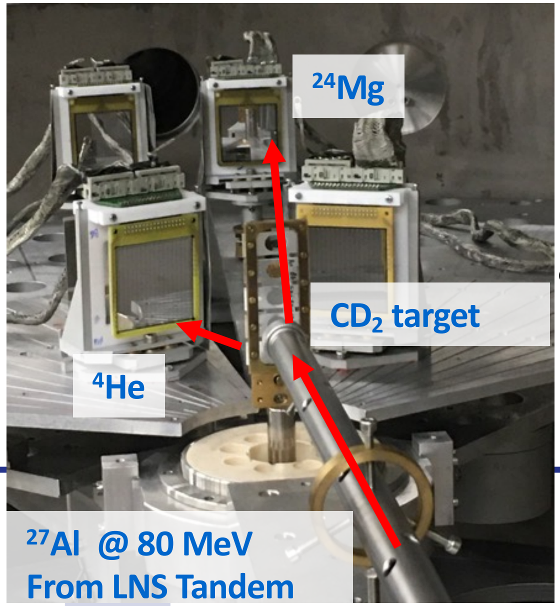


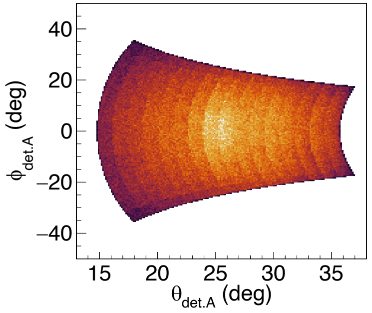
- Misura della sezione d'urto delle reazioni ^{19}F(p,α)^{16}O alle energie tipiche della nucleosintesi stellare

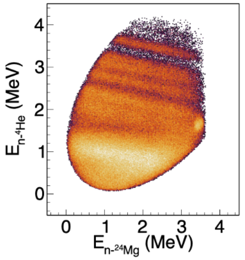
Iter dell’ esperi-mento (lavoro tesi)

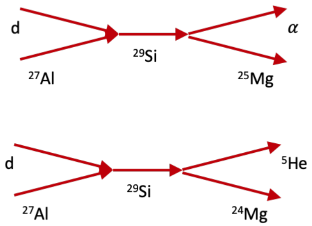
Selezione problema «astrofisico» → progetto esperimento → misura (allestimento e data taking) → Detector calibration

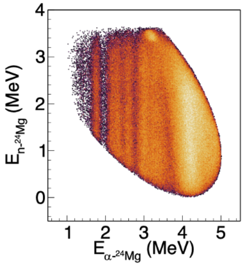
Detector calibration ↓ Particle identification ↓ Reaction channel selection ↓ QF process selection ↓ C-M energy spectra ↓ Reaction rate extraction

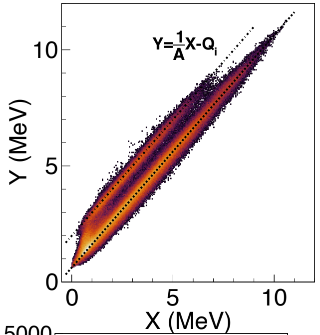


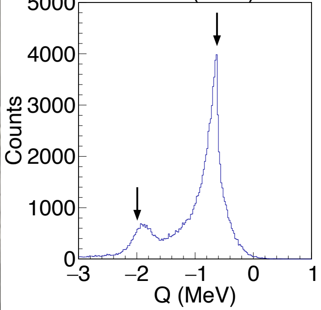


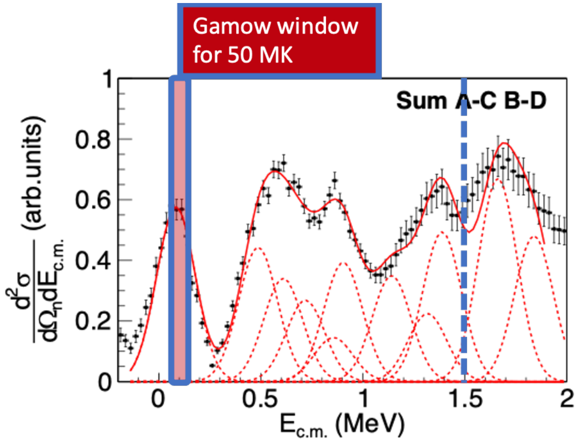


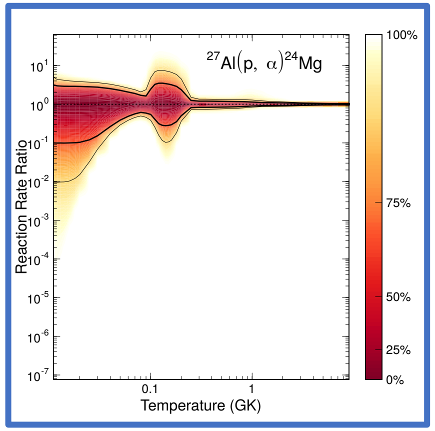






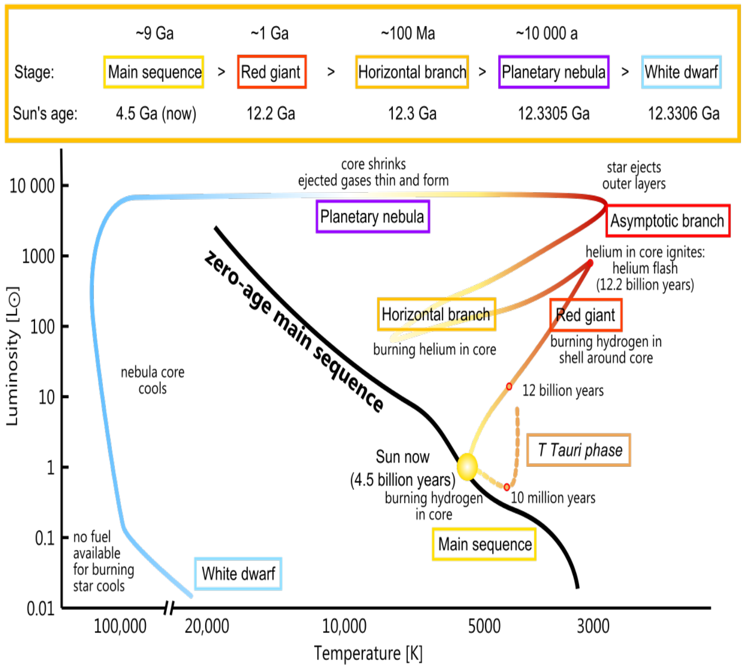


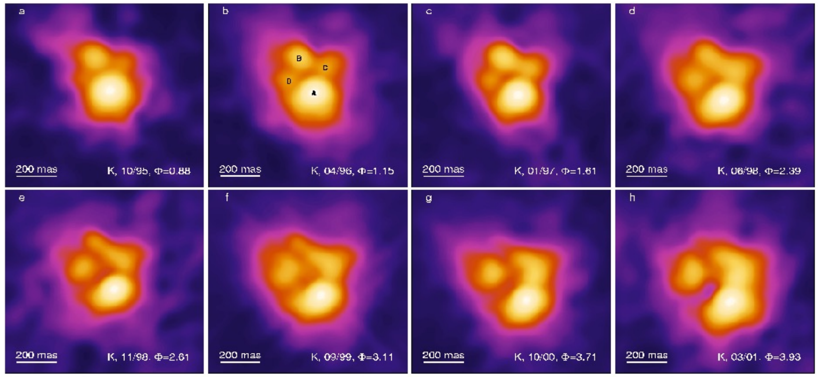


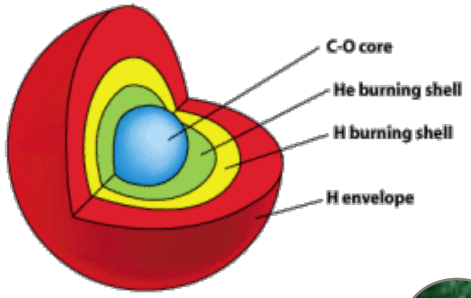


Attività e tesi teoriche

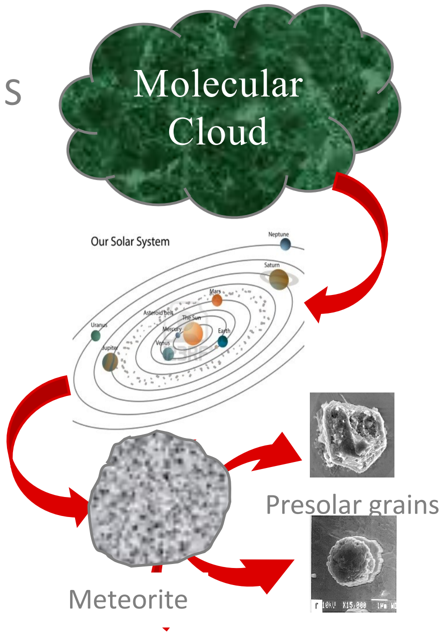
Stelle del braccio asintotico (AGB) delle giganti e processo s

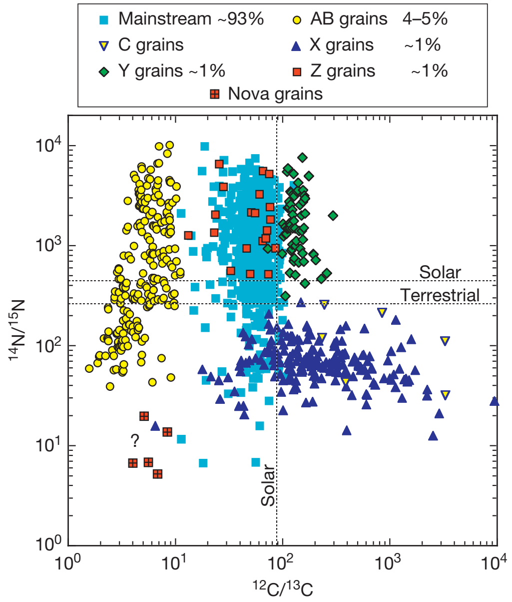






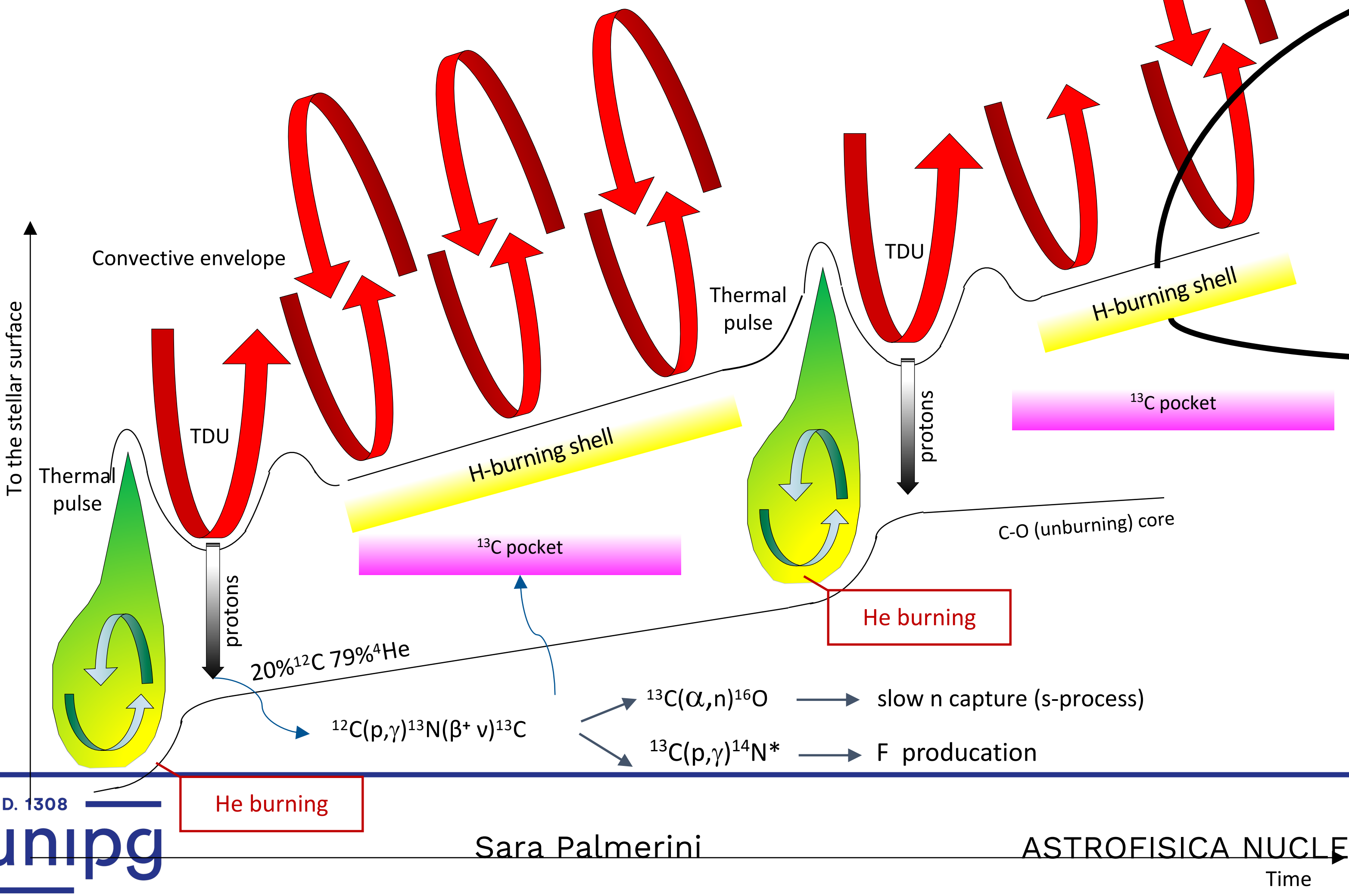
Despite their low masses LMS are so numerous to contribute for 75% to the total mass return from stars to the ISM (Sedlmayr 1994);

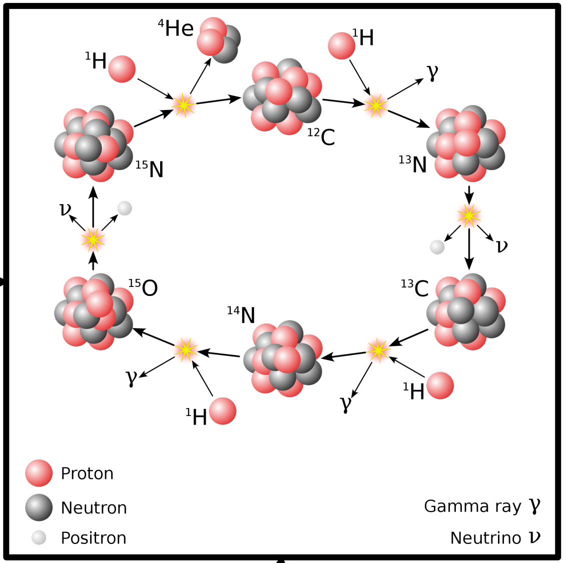


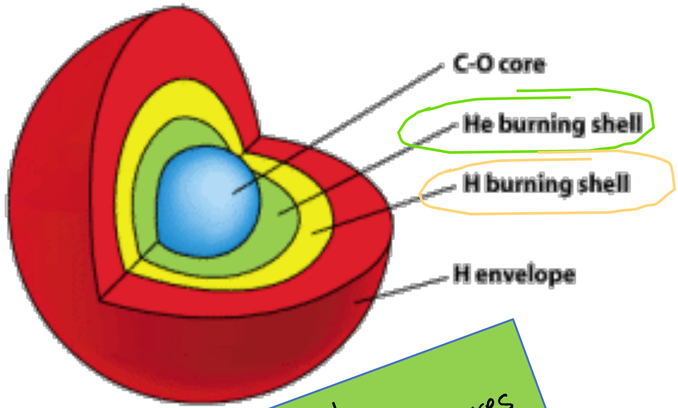


HOW DOES AN AGB STAR WORK?

$M \leq 3M_\odot$

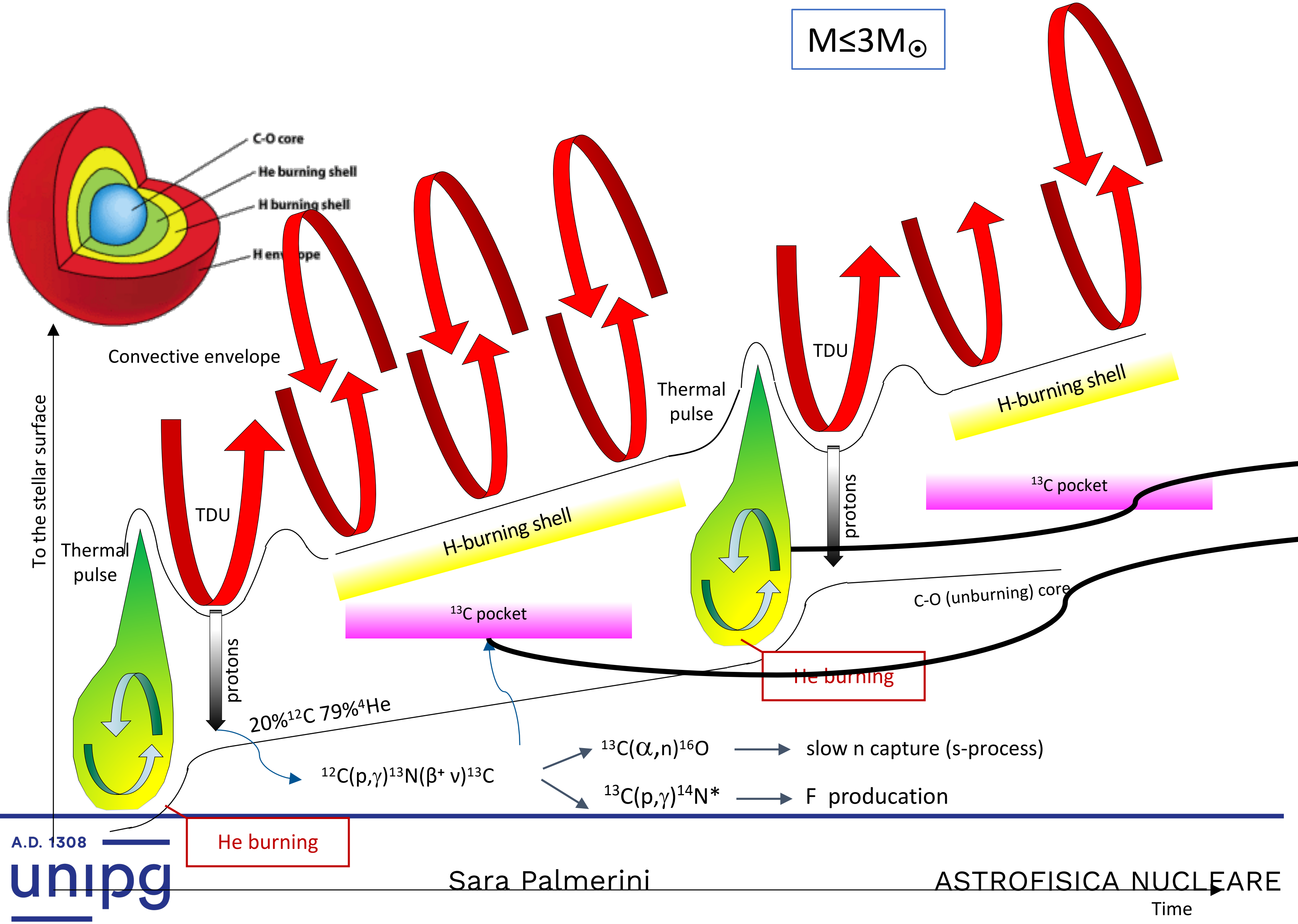


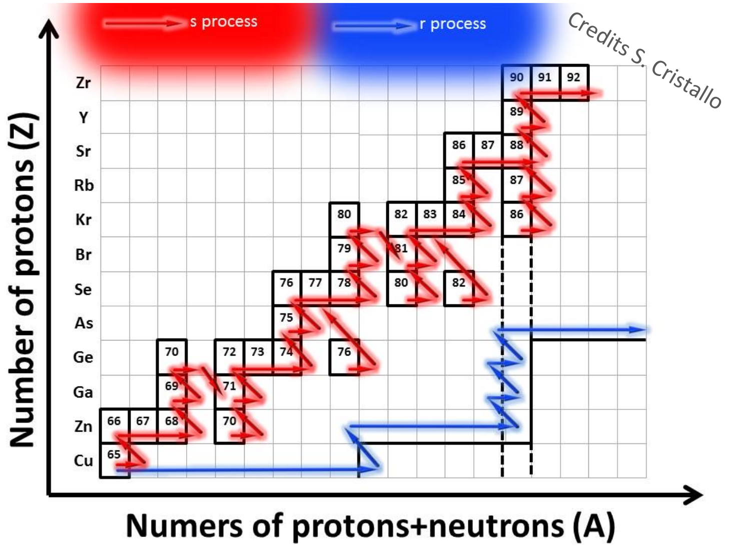


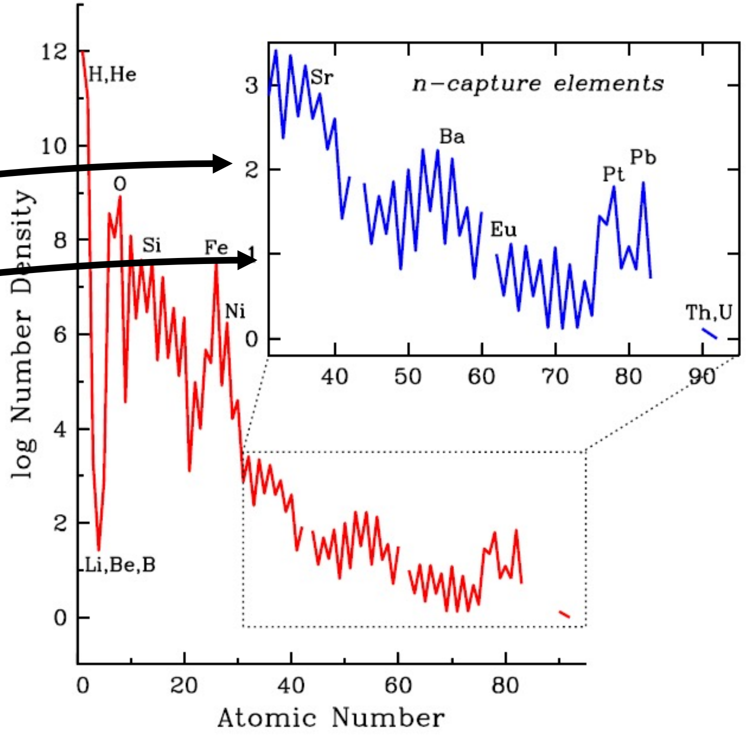


+ slow neutron captures
s-process

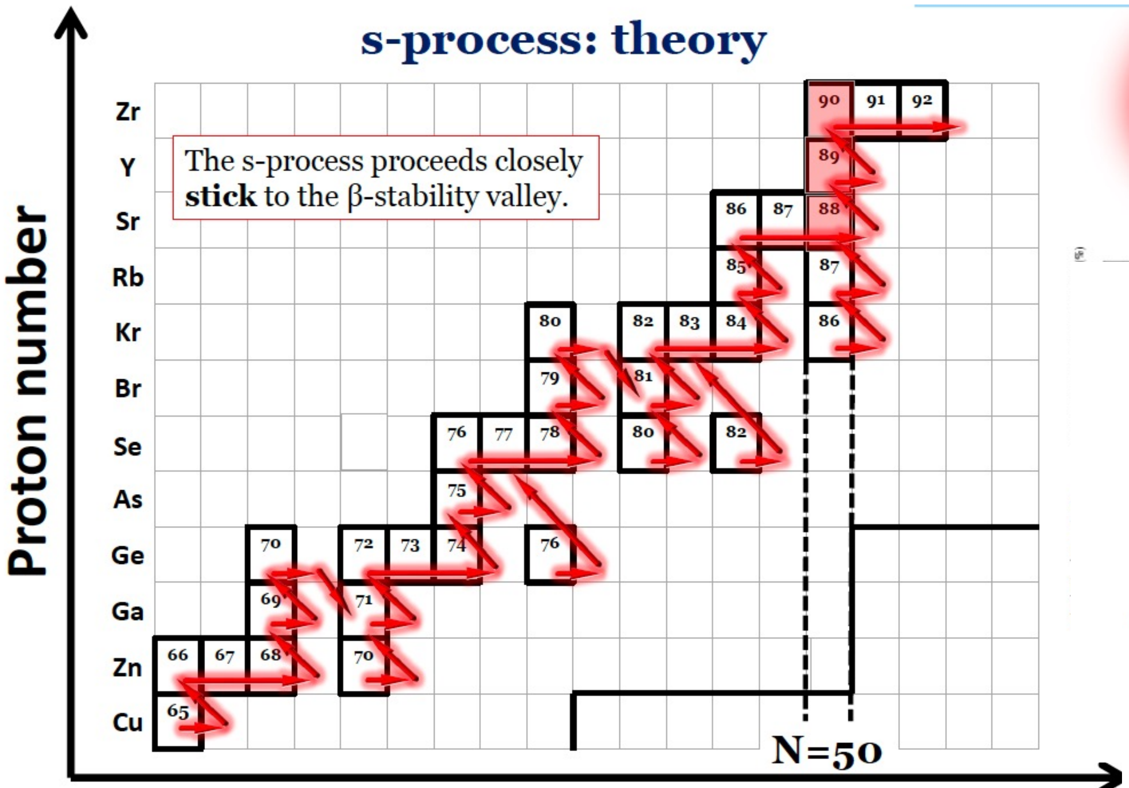
HOW DOES AN AGB STAR WORK?

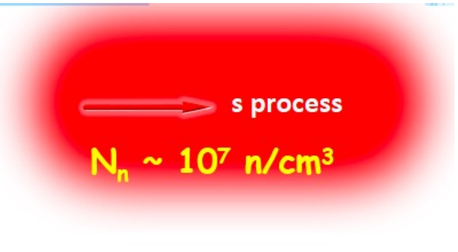


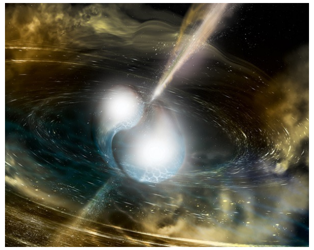


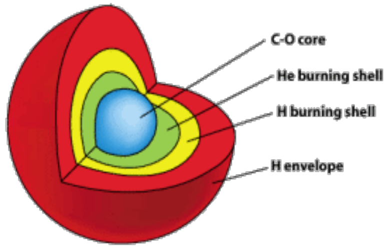


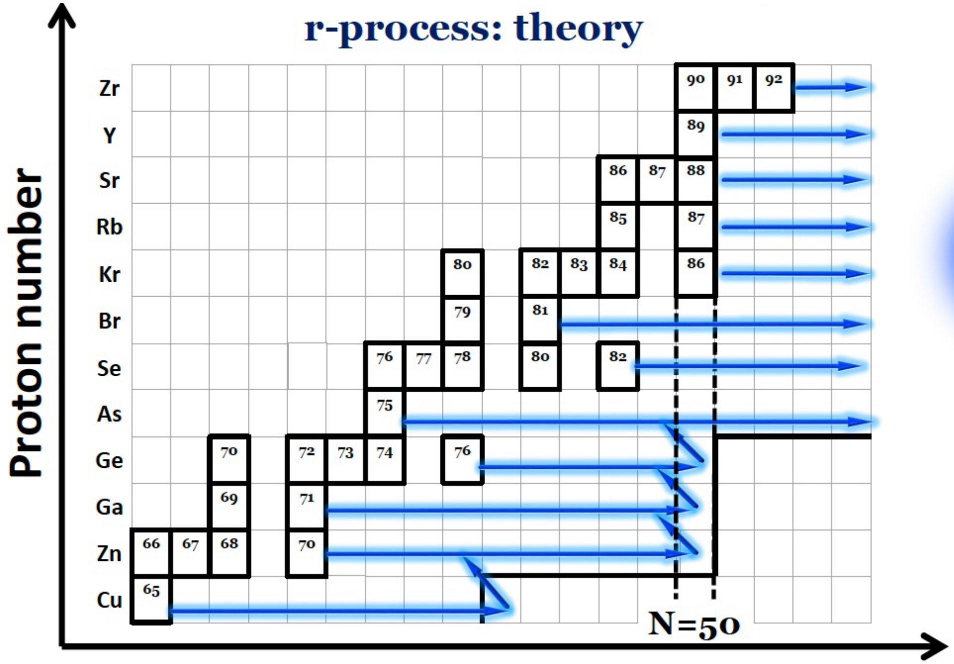
Nucleosintesi da cattura neutronica

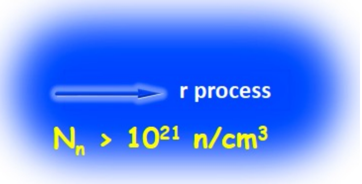












Iter di un lavoro….anche di tesi

1. Osservazione di abbondanze inaspettate sia in stelle che grani

2. Calcoli di evoluzione e nucleosintesi stellare con codici già esistenti o sviluppati ad-hoc

2.5 Ricerca di nuovi input provvisti dalla Fisica Nucleare o ’’segnalazione di nuovi casi di studio’’

3. Nuove previsioni per la nucleosintesi

4. Riproduzione dei vincoli osservativi e comprensione dei meccanismi di nucleosintesi

Iter di un lavoro….anche di tesi

1. Osservazione di abbondanze inaspettate sia in stelle che grani

2. Calcoli di evoluzione e nucleosintesi stellare con codici già esistenti o sviluppati ad-hoc

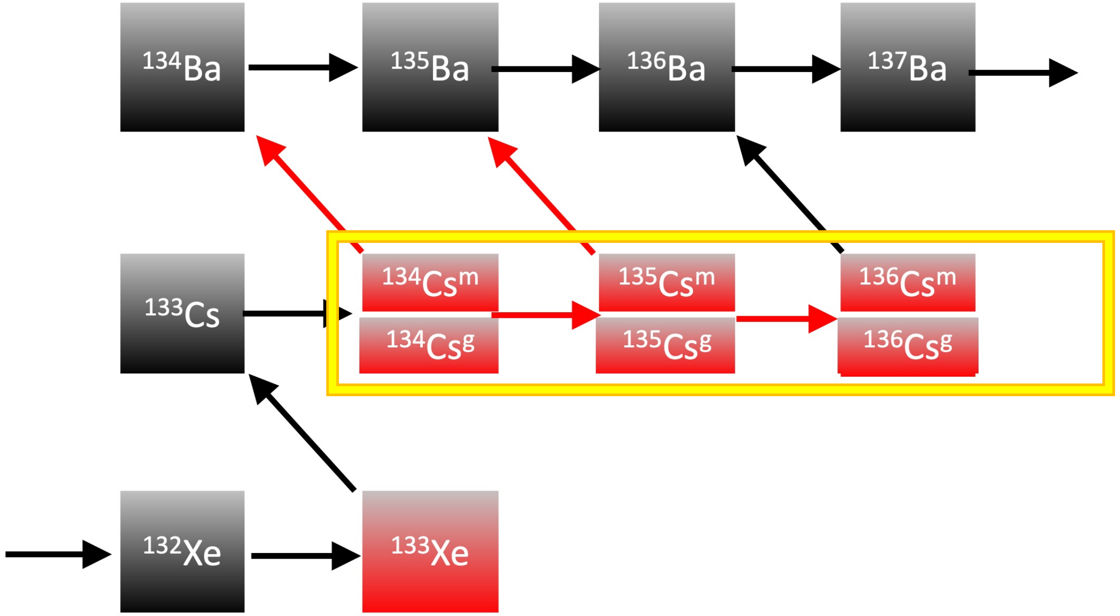
2.5 Ricerca di nuovi input provvisti dalla Fisica Nucleare o ''segnalazione di nuovi casi di studio''

- **sezioni d'urto** (n,γ) soprattutto su nuclei instabili
- **tassi di decadimento β nei plasmi** possono essere molto differenti ai valori in laboratorio
- SOLO ORA FINALMENTE SI INIZIANO A MISURARE CON SUFFICIENTE PRECISIONE

3. Nuove previsioni per la nucleosintesi

4. Riproduzione dei vincoli osservativi e comprensione dei meccanismi di nucleosintesi

Un esempio: abbondanze isotopiche dello Ba (da processo s) nei grani presolari di origine AGB



Siamo vicini ad N=82

$\Rightarrow$Decadimenti

$\Rightarrow$Stati isomerici

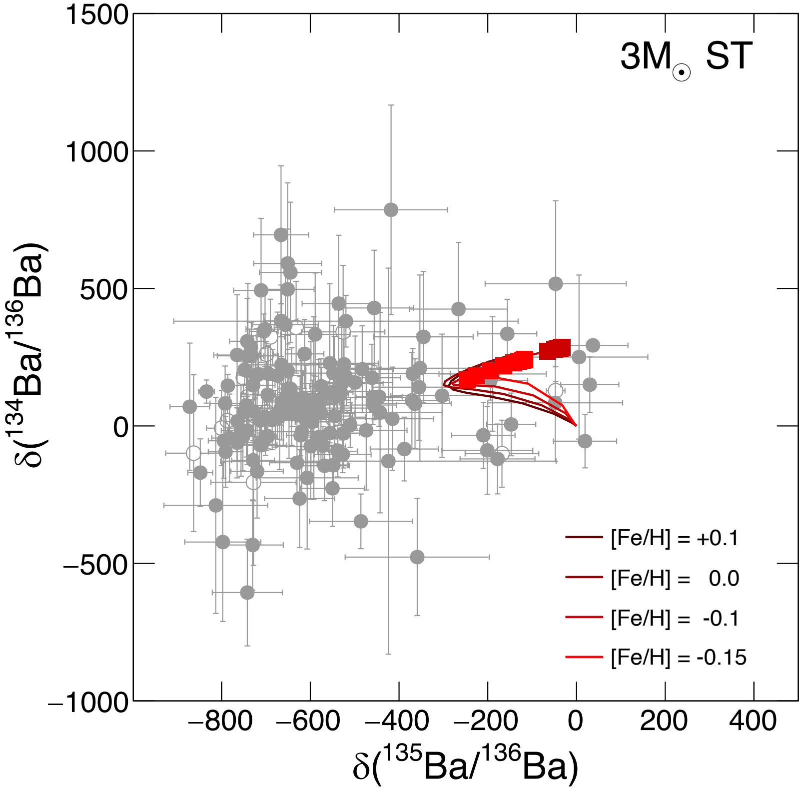
$\Rightarrow$Branching della nucleosintesi

$\Rightarrow$Sezioni d'urto «piccole»

$\Rightarrow$Sezioni d'urto difficilmente misurabili

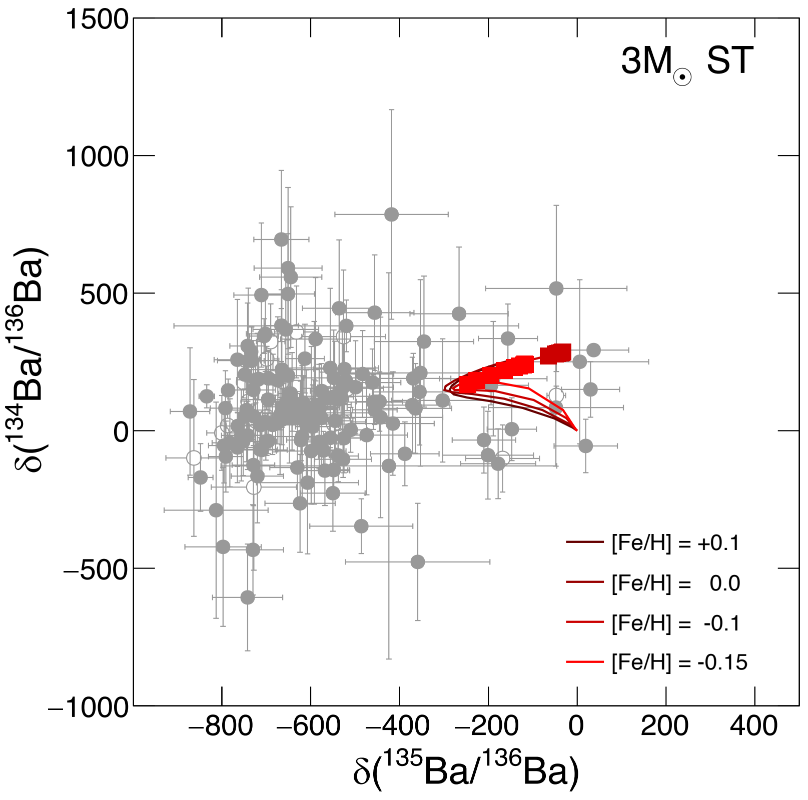
$\Rightarrow$Input nucleari quasi tutti determinati teoricamente

Un esempio: abbondanze isotopiche dello Ba (da processo s) nei grani presolari di origine AGB: STEP 1 aggiorniamo gli input nucleari



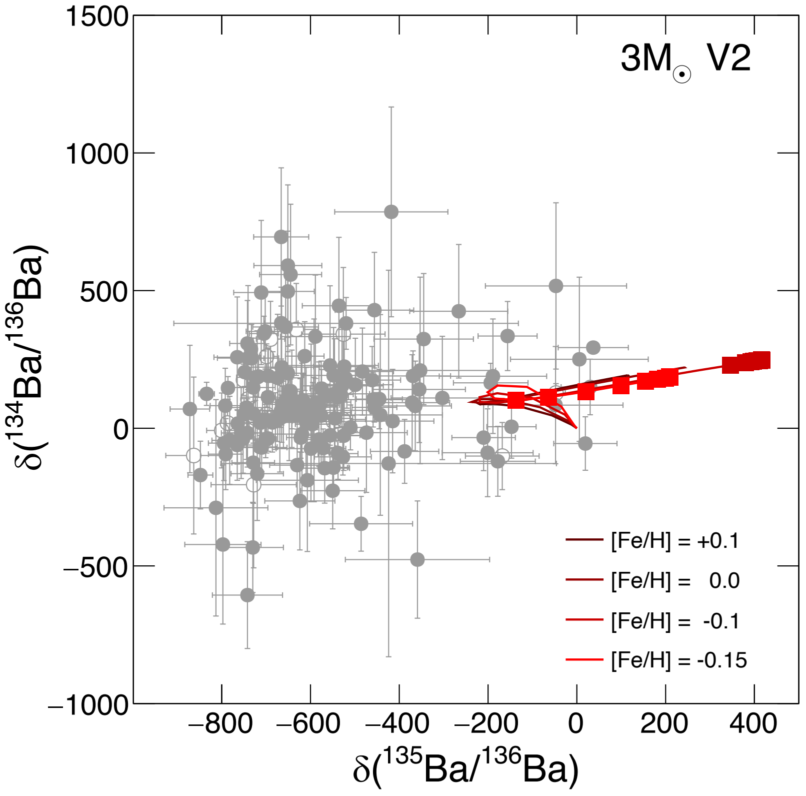
Input nucleari presi dalla letteratura al 2015

Un esempio: abbondanze isotopiche dello Ba (da processo s) nei grani presolari di origine AGB: STEP 1 aggiorniamo gli input nucleari



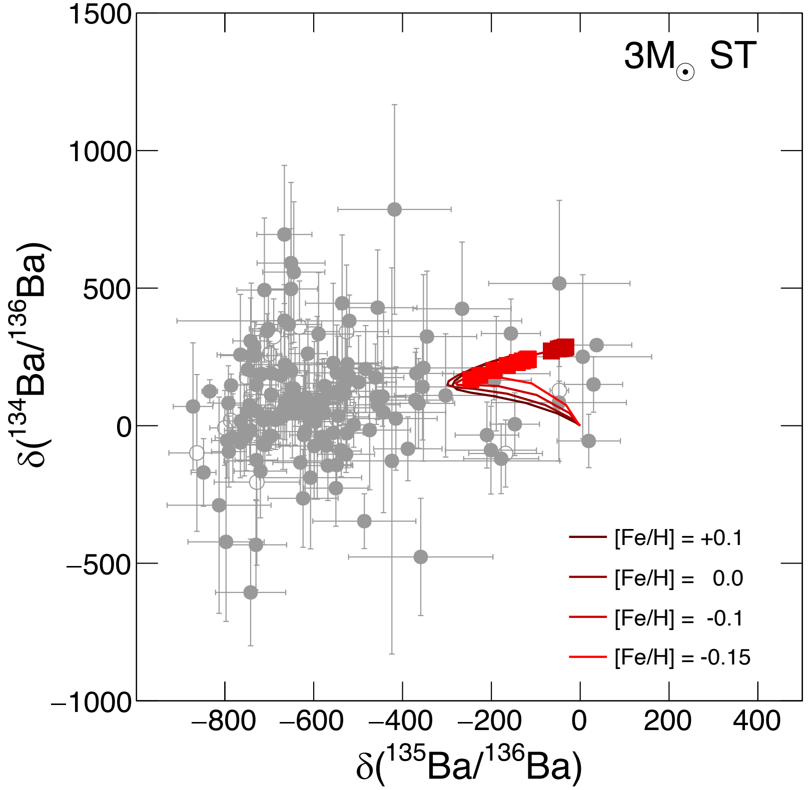
Input nucleari presi dalla letteratura al 2015

- decay rate of ^{134}Cs enhanced by a factor of 8 respect to TY 1987 (see next talk)
- Similar effects would be induced by variations in the ^{135}Cs neutron-capture cross section

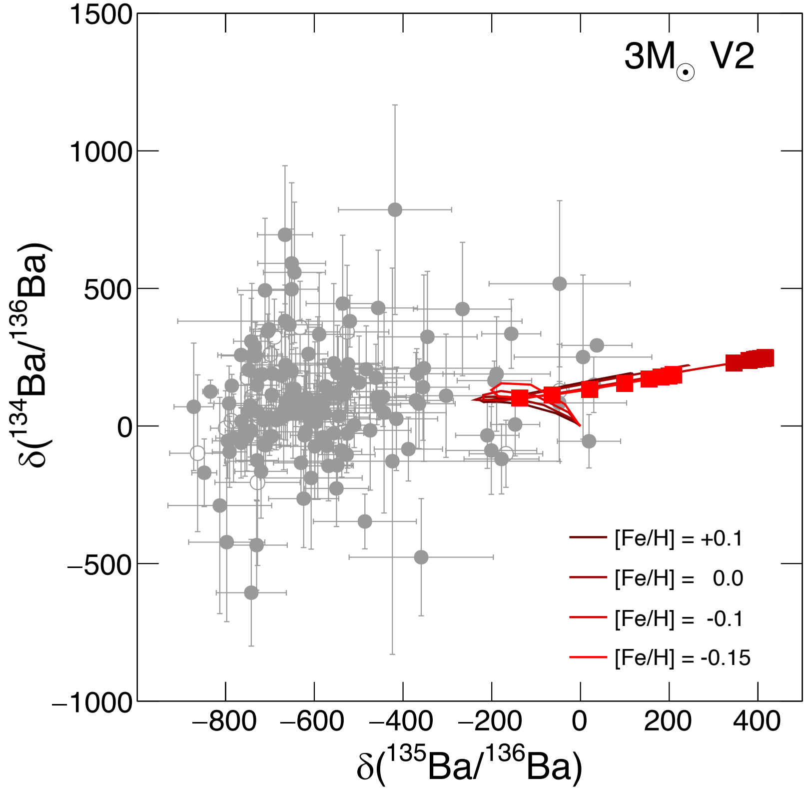


Input nucleari presi dalla letteratura nel 2021

Un esempio: abbondanze isotopiche dello Ba (da processo s) nei grani presolari di origine AGB: STEP 1 aggiorniamo gli input nucleari

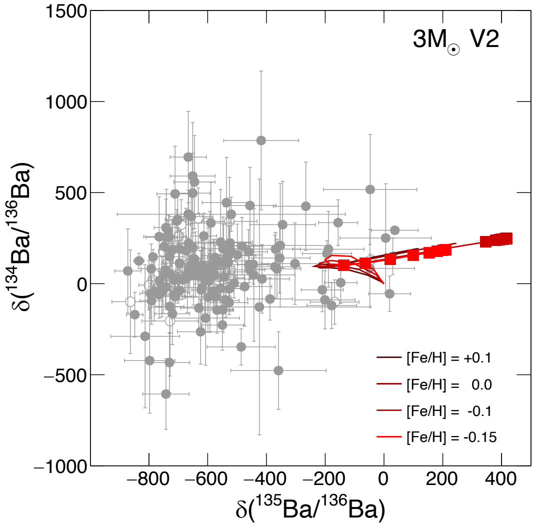


Input nucleari presi dalla letteratura al 2015



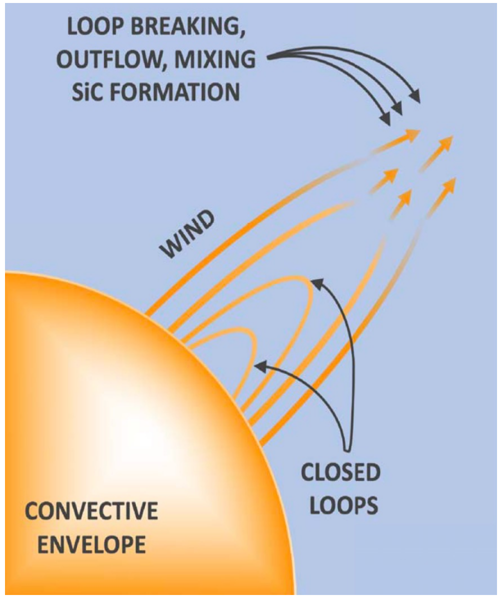
Input nucleari presi dalla letteratura nel 2021

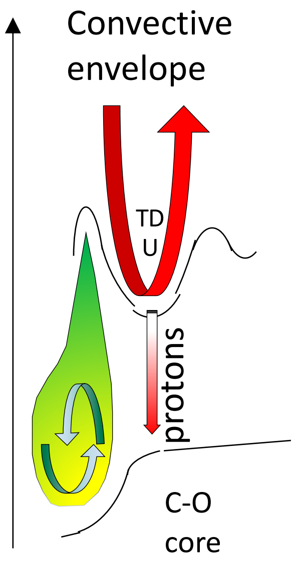
Un esempio: abbondanze isotopiche dello Ba (da processo s) nei grani presolari di origine AGB: STEP 2 cerchiamo la soluzione nella fisica stellare e non nella nucleare



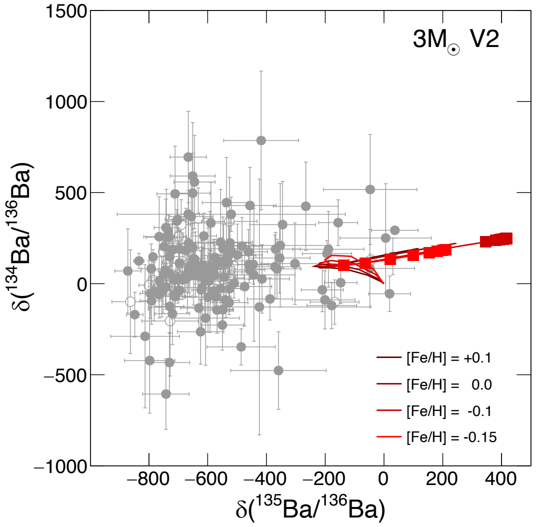
Nuovo fenomeno: mixing e vento magnetico

Input nucleari presi dalla letteratura nel 2021



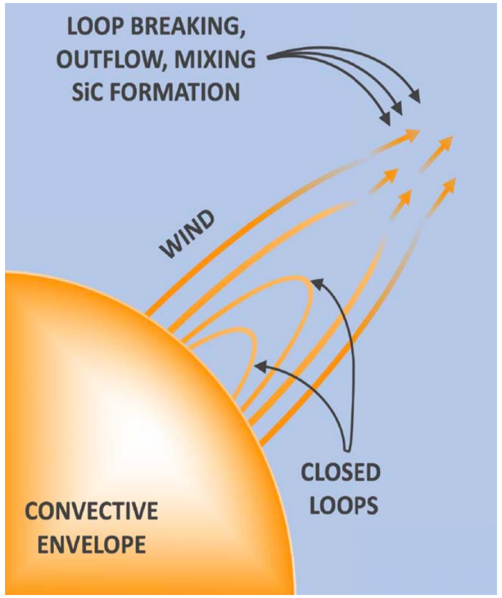


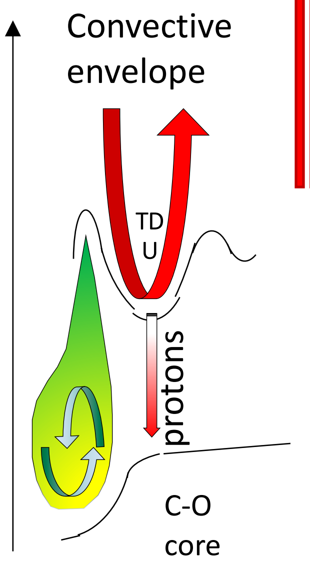
Un esempio: abbondanze isotopiche dello Ba (da processo s) nei grani presolari di origine AGB: STEP 2 cerchiamo la soluzione nella fisica stellare e non nella nucleare

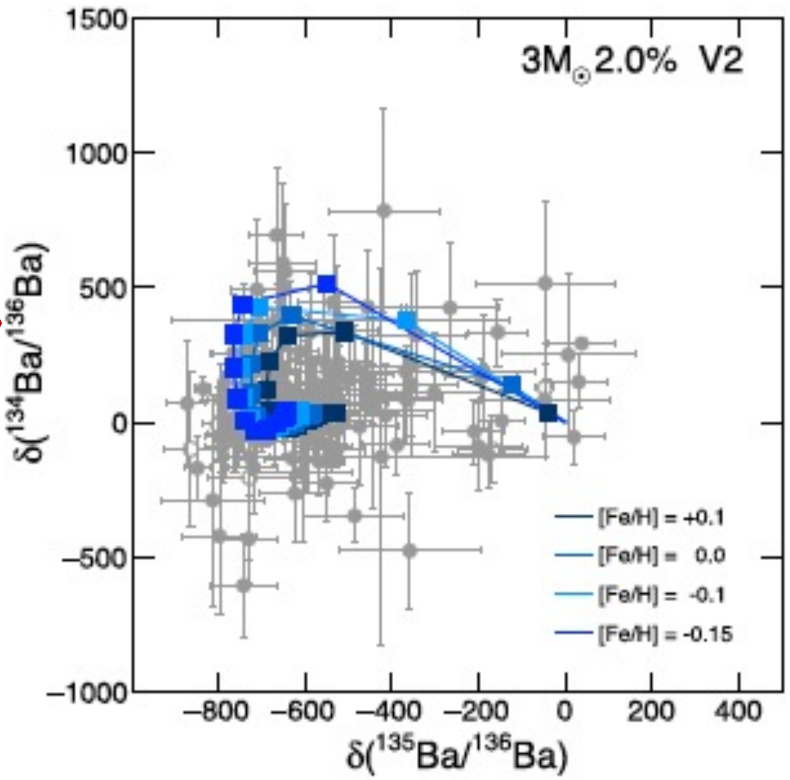


Input nucleari presi dalla letteratura nel 2021

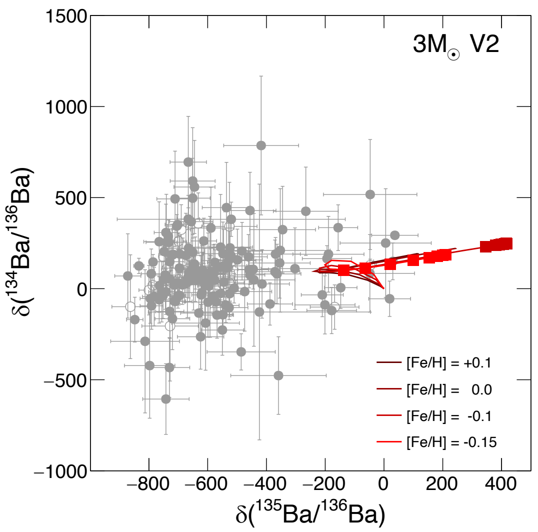
Nuovo fenomeno: mixing e vento magnetico





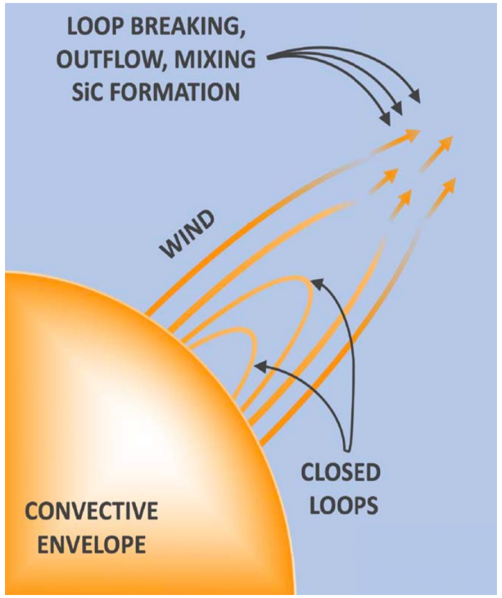


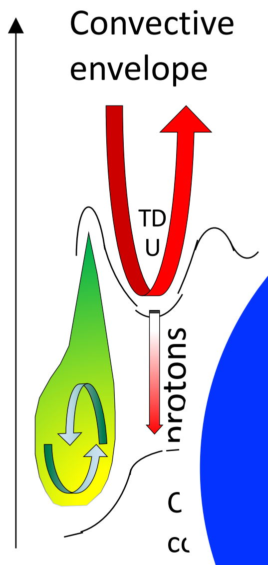
Un esempio: abbondanze isotopiche dello Ba (da processo s) nei grani presolari di origine AGB: STEP 2 cerchiamo la soluzione nella fisica stellare e non nella nucleare

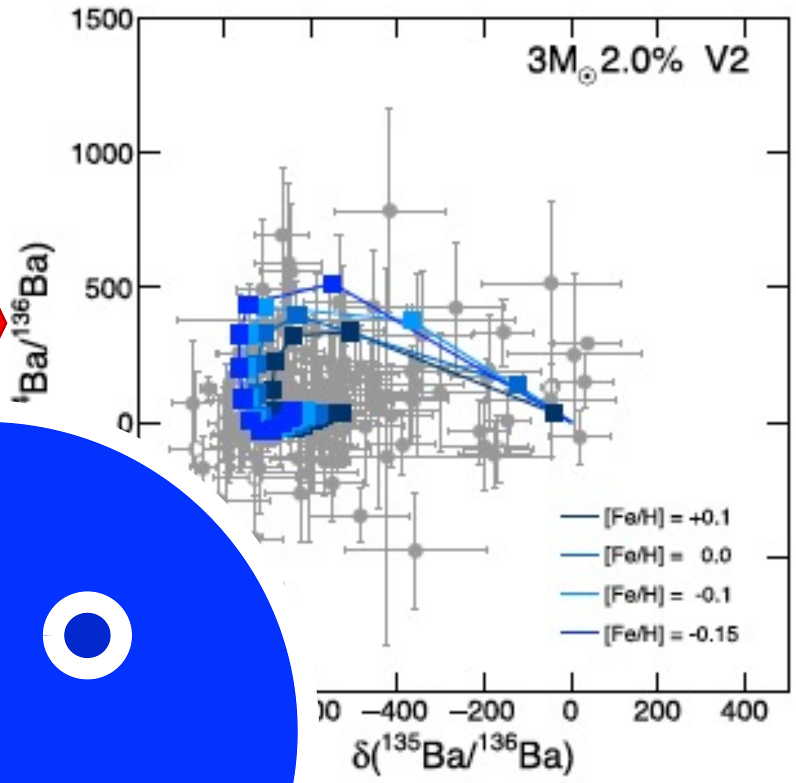


Input nucleari presi dalla letteratura nel 2021

Nuovo fenomeno: mixing e vento magnetico







3 proposte di tesi teoriche

- La nucleosintesi del Ba «spiegata» da nuove stime e misure della vita media del $^{134\text{-}137}Cs$ nei plasmi stellari

- Abbondanze e rapporti isotopici di C e Al nella stelle AGB, la soluzione: nuovi modelli di nucleosintesi o migliori input nucleari?

- Sintesi degli elementi con A>180: competizione e complementarietà del processo s e del processo r

collaborazioni

sara.palmerini@unipg.it

A.D. 1308
unipg