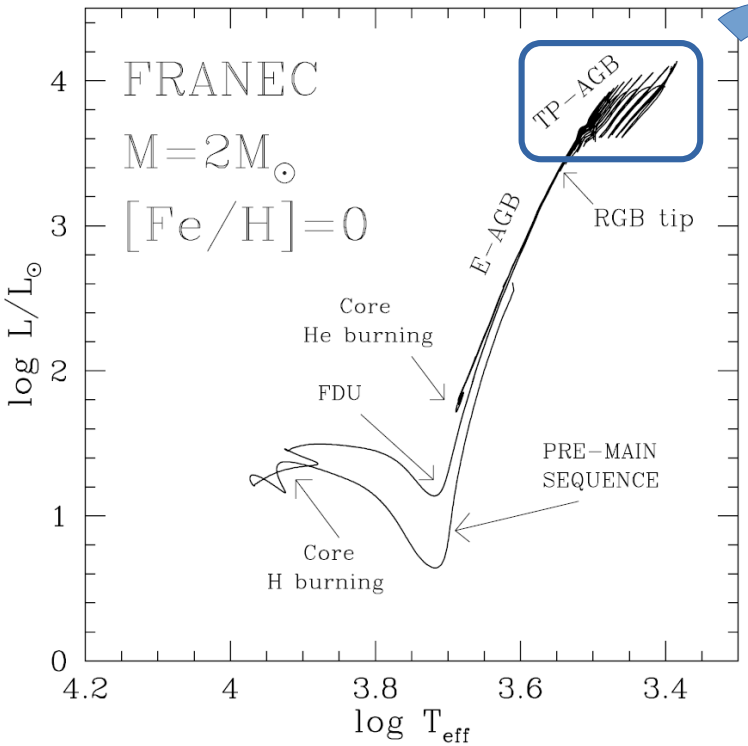
Mescolamento magnetico in stelle AGB e grani presolari

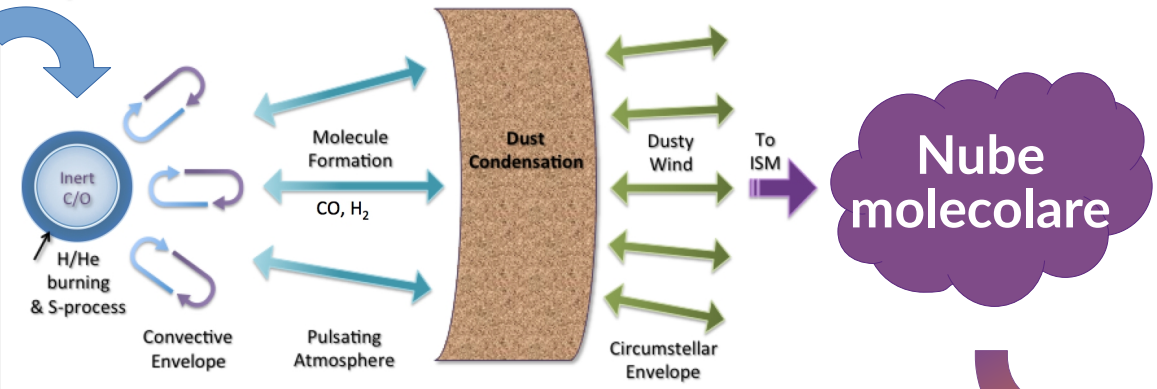
Diego Vescovi[1,2,3]

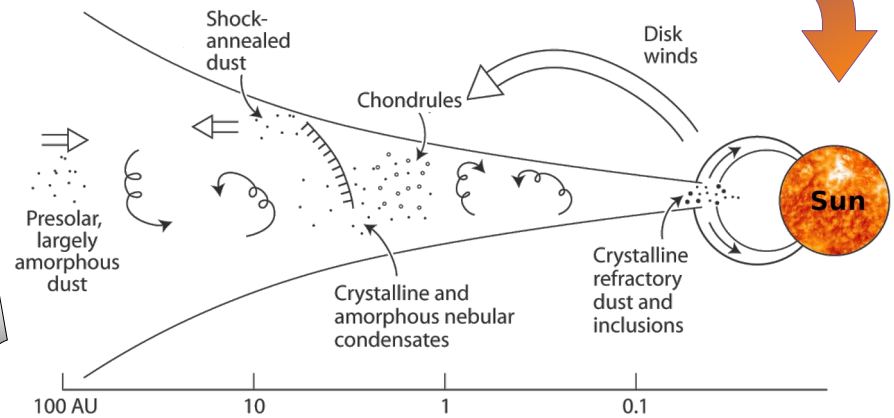
1. Gran Sasso Science Institute (GSSI), L'Aquila, Italia
2. INFN – Sezione di Perugia, Perugia, Italia
3. INAF – Osservatorio Astronomico d'Abruzzo, Teramo, Italia

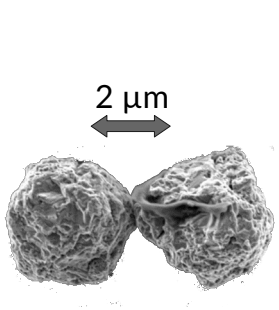
106° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica
Italia, 14-18 Settembre 2020

Stelle AGB e grani presolari





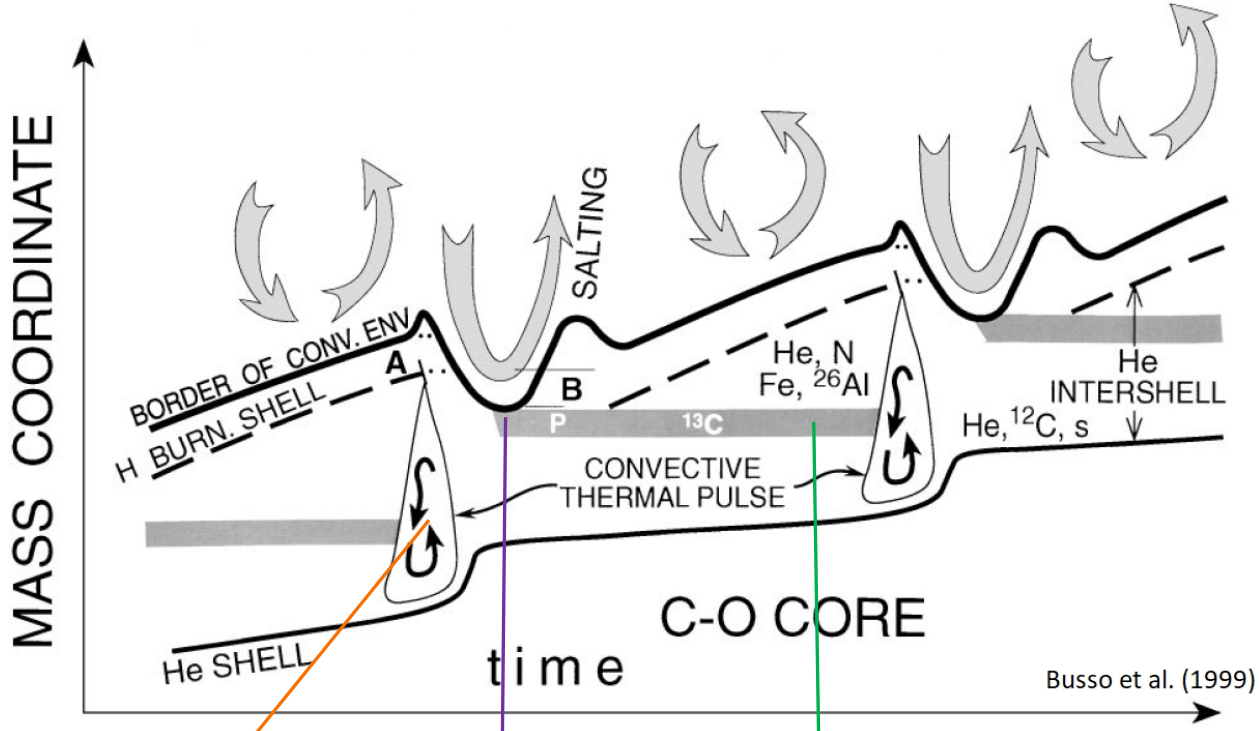




Grani presolari

Meteoriti e asteroidi

Combustione di H e He in stelle TP-AGB



- Cosa?
  Stelle di piccola massa
- Quando?
  Ramo Asintotico delle Giganti (AGB)
- Come?
  Pulsi Termici (TP)

He-flash

Penetrazione di protoni

^{13}C-pocket

$^{12}C(p,\gamma)^{13}N(\beta^{+}\nu)^{13}C$

$^{22}Ne(\alpha,n)$ ——— $^{13}C(\alpha,n)$ ⟶ elementi pesanti!!

La “tasca” di ^{13}C: formazione

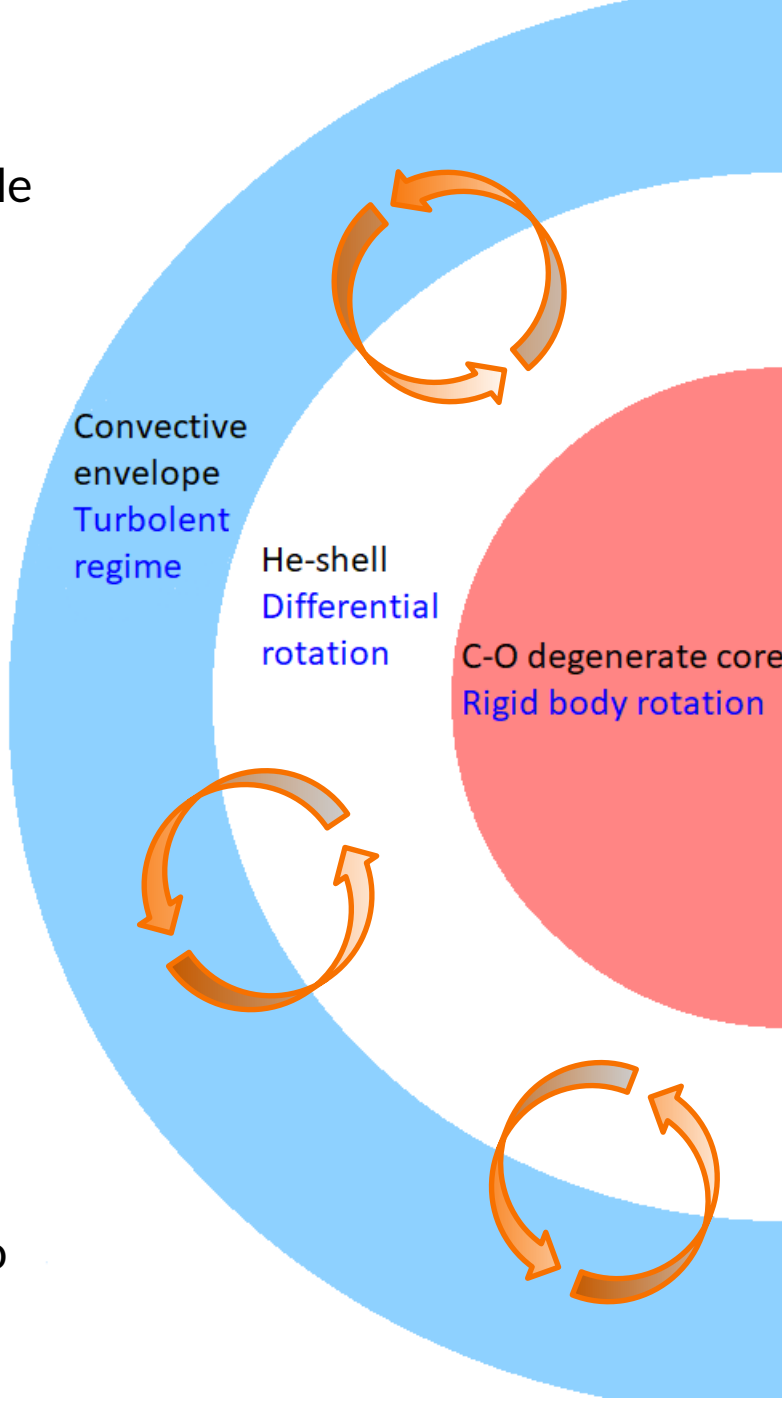
- **I protoni possono penetrare** nella regione ricca di He ad ogni fenomeno **di Terzo Dredge-Up (TDU)**

Qual è il meccanismo fisico?
I modelli classici **assumono** la formazione di una tasca di ^{13}C

Alcuni approcci fisici recenti:
- Opacity induced overshoot (Cristallo+ 2009, 2011, 2015)
- Convective Boundary Mixing (Battino+ 2016)
- Campi magnetici (Trippella+ 2016; Palmerini+ 2018)

➡ meccanismo di tipo bottom-up attraverso la **galleggiamento magnetico**

1) Campi generati da una dinamo stellare
2) Le strutture magnetiche raggiungono l’inviluppo
3) I protoni vengono iniettati nella regione ricca di elio



Galleggiamento magnetico

- Soluzioni alle equazioni **MHD** (Nucci & Busso 2014):
  - No approssimazioni numeriche (soluzione analitica esatta)
  - Geometria semplificata: campo magnetico toroidale

Equazioni:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \nu_m \Delta \mathbf{B} = 0$$

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} - c_d \mathbf{v} + \nabla \Psi \right] - \mu \Delta \mathbf{v} + \nabla P + \frac{1}{4\pi} \mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{B}) = 0$$

$$\rho \left[\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\epsilon \right] + P \nabla \cdot \mathbf{v} - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \frac{\nu_m}{4\pi} (\nabla \times \mathbf{B})^2 = 0$$

Soluzioni:

$$v_r = v_p \left(\frac{r_p}{r} \right)^{k+1}$$

$$B_\varphi = B_{\varphi,p} \left(\frac{r}{r_p} \right)^{k+1}$$

dove *k* è l'esponente del profilo di densità: $\rho(r) = \frac{\rho_p}{r_p^k} r^k$

Mixing indotto dalla galleggiabilità magnetica

- Contributo **magnetico** (Vescovi+ 2020) alla velocità di discesa $\boldsymbol{v_d}$, agente quando il profilo di densità è $\rho \propto r^k$:

$$v_d(r) = u_\mathrm{p} \left(\frac{r_\mathrm{p}}{r}\right)^{k+2}$$

Parametri:

- Strato "**p**" corrispondente alla regione più profonda da cui parte il galleggiamento

  (può essere identificato dal corrispondente valore del **campo toroidale critico** $\boldsymbol{B_\varphi}$)

$$B_\varphi \gtrsim \left(4\pi\rho r N^2 H_\mathrm{p} \frac{\eta}{K}\right)^{1/2}$$

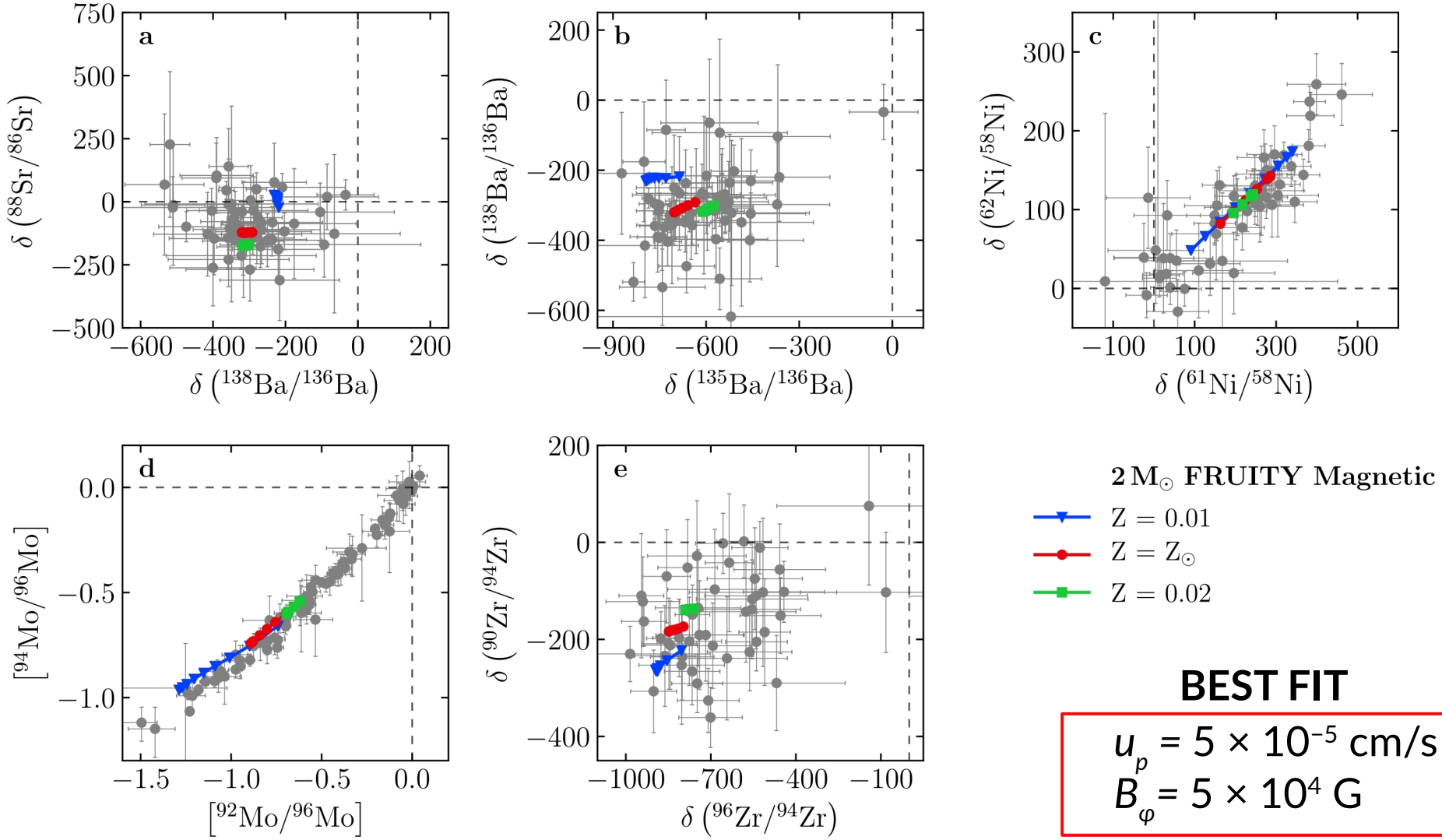
- Velocità iniziale $\boldsymbol{u_p}$ del materiale che galleggia

- <u>Calibrazione</u> necessaria!

- Vari test con una differente scelta per la coppia di variabili:
  - u_p = 1, 3, 5, 8, 12 × 10^{-5} cm/s
  - B_φ = 2, 5, 10, 15 × 10^4 G

Grani SiC presolari

- **Rapporti isotopici** misurati per Ni, Sr, Zr, Mo e Ba in **grani SiC presolari**
- Modelli stellari con **stessa massa iniziale** (2 $M_\odot$) and **metallicità simil-solare**



BEST FIT

$u_p = 5 \times 10^{-5}$ cm/s
$B_\varphi = 5 \times 10^4$ G

Sommario

- **Prima simulazione numerica** della formazione di una tasca ^{13}C indotta da un processo di mixing magnetico in un codice evolutivo stellare con nucleosintesi completamente accoppiata (FUNS)

- **Campi magnetici dell'ordine di 10^5 G** possono indurre la formazione ed il galleggiamento di tubi di flusso magnetici nella regione al di sotto dell'inviluppo convettivo di stelle AGB.

- Tali tubi sono abbastanza veloci da garantire, attraverso la conservazione della massa, la penetrazione di numero sufficiente di protoni da formare una considerevole tasca a ^{13}C

- **Unica** coppia di valori per l'intensità di campo e della velocità di galleggiamento iniziale

- **I** nuovi modelli magnetici forniscono una spiegazione <u>consistente</u> alla maggior parte dei rapporti isotopici di elementi pesanti rilevati in grani presolari provenienti da stelle AGB.