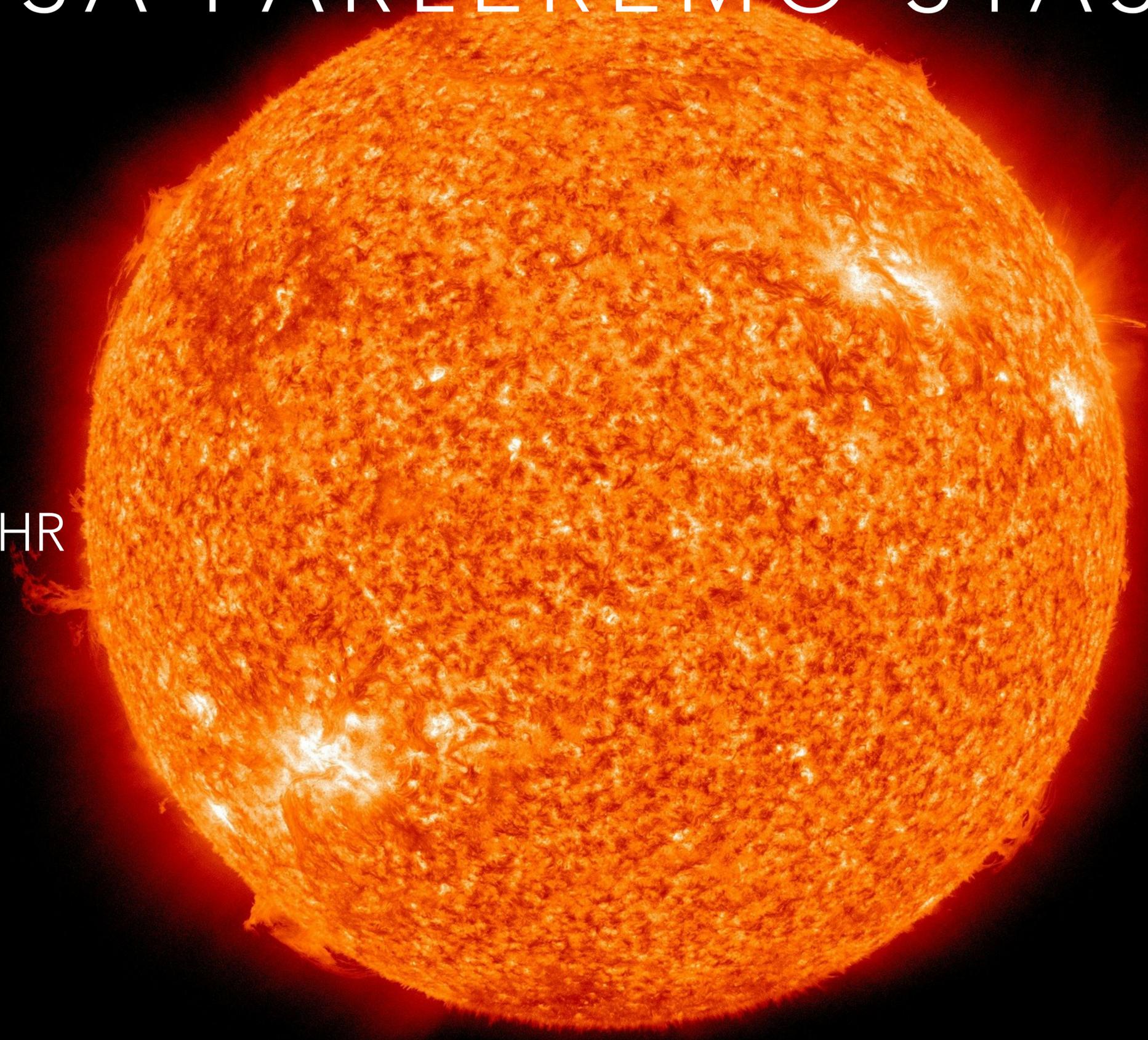


TERZA SERATA CORSO DI ASTROFISICA

LA FISICA DELLE STELLE



DI COSA PARLEREMO STASERA?



- Evoluzione stellare

- Diagramma HR

- Traccia di Hayashi

- Overshooting

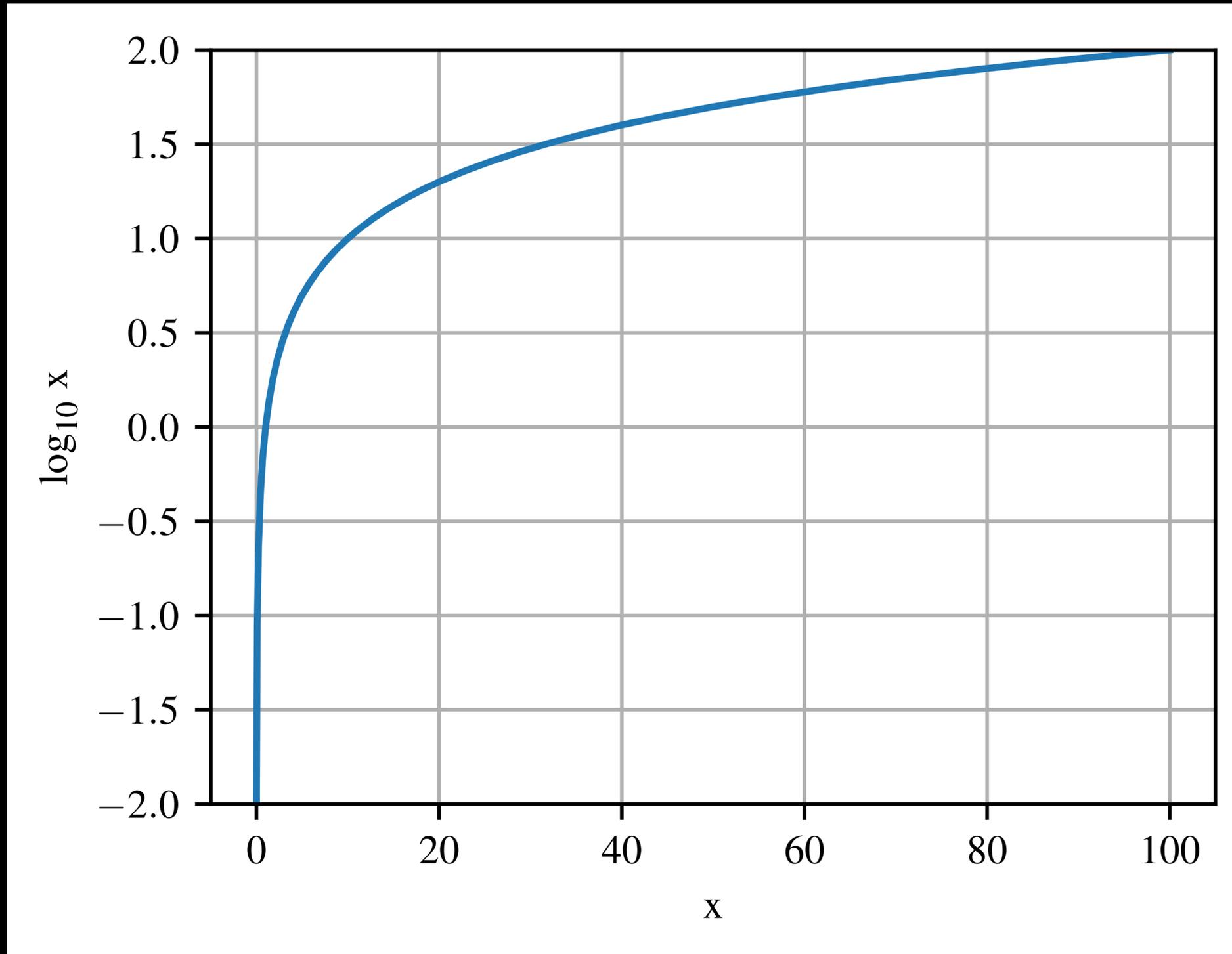
- Perdita di massa

- Mixing length

RIASSUNTO DEGLI INGREDIENTI NECESSARI

- **Simmetria sferica:** alcuni modelli prevedono schiacciamento ai poli
- **Equilibrio quasi-idrostatico:** forza di gravità e pressione interna
- **Sistema autogravitante:** si sostiene grazie alla sua stessa gravità
- **Continuità della massa:** nulla si crea e nulla si distrugge
- **Equazione di stato:** legame tra P, ρ, μ, T del plasma come gas perfetto e gas degenere
- **Flusso di materia e di energia:** opacità e criterio di Schwarzschild (zona radiativa, convettiva e conduttiva)
- **Produzione di energia e bilancio energetico:** teorema del Viriale e reazioni termonucleari

PRIMA DI COMINCIARE: LOGARITMO

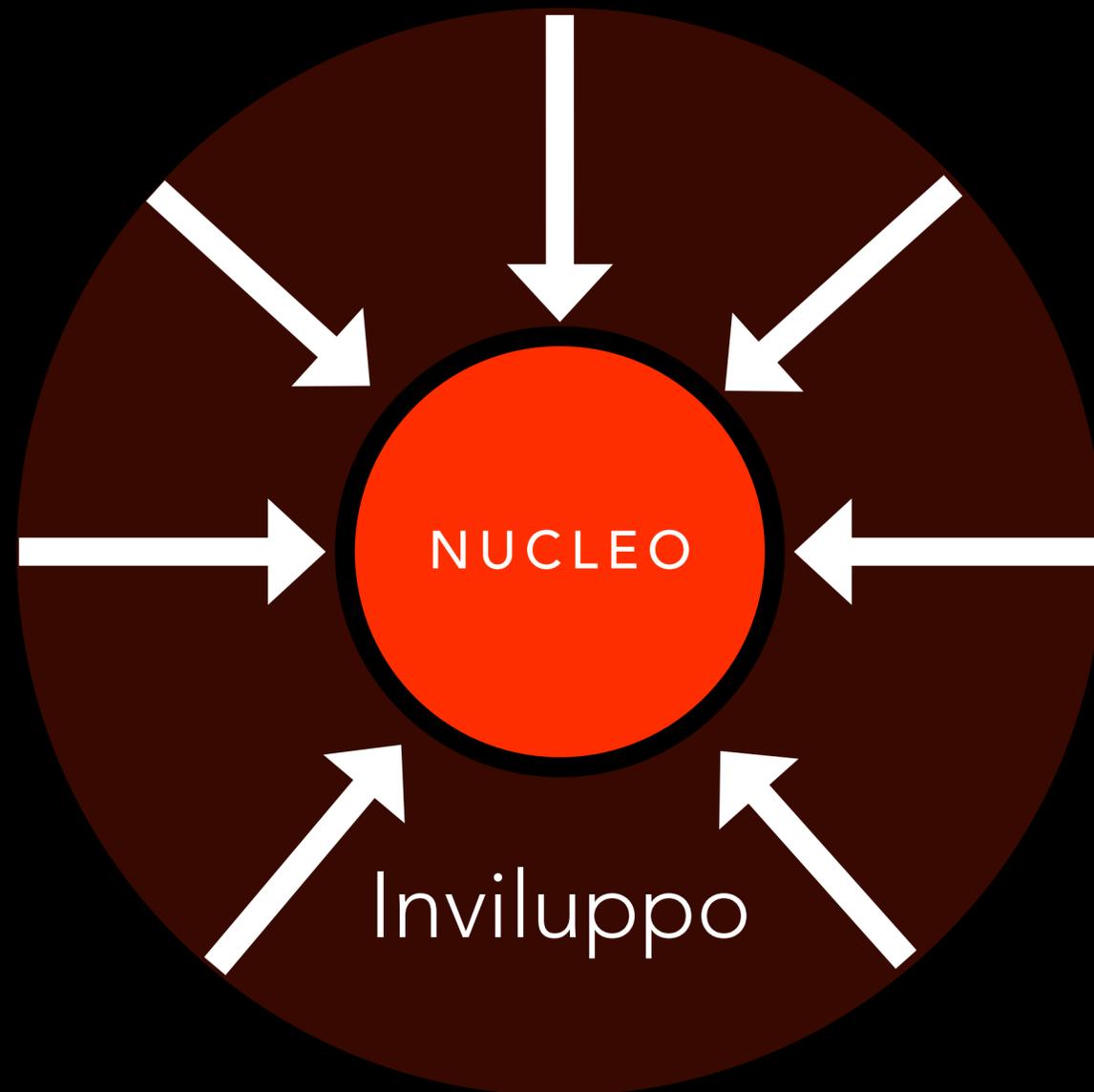


- Fondamentale in Astronomia
- Riesce a condensare in poco spazio valori molto diversi
- Scala dei km e dei milioni di km sullo stesso grafico!

TEMPI SCALA DELLA FISICA STELLARE

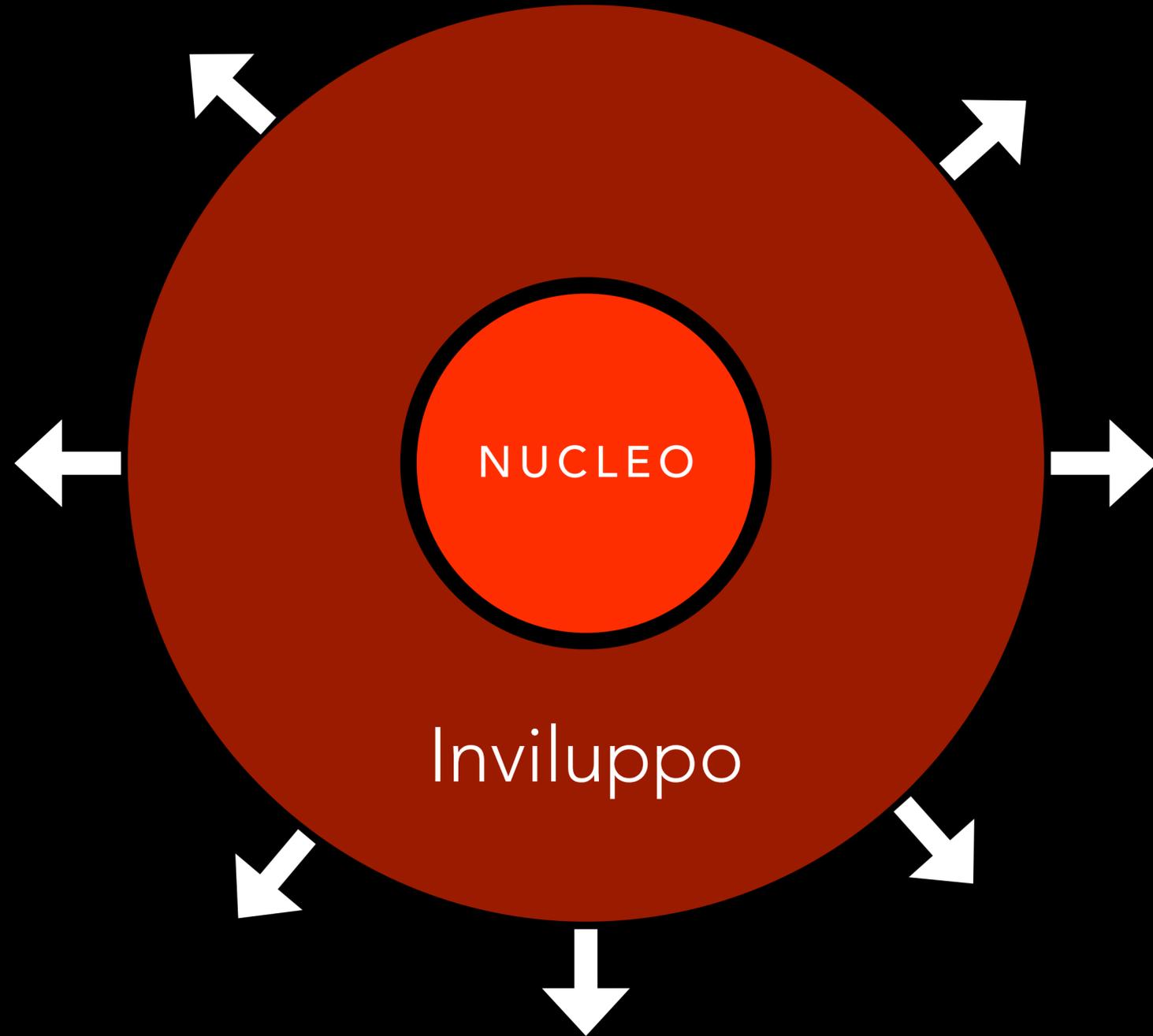
- **Dinamico, cioè ≈ 100 yr** (nube Proto-solare):
collasso della struttura stellare comporta $T \nearrow$ e $P \nearrow$. Dipende dalla ρ .
- **Termodinamico, cioè ≈ 30 Myr per il Sole:**
contrazione comporta metà dell'energia irradiata e metà che rende $T \nearrow$
- **Tempo termonucleare, cioè ≈ 10 Gyr per il Sole:**
reazioni nucleari portano a termoregolazione ed equilibrio idrostatico

FASE DI PRE-SEQUENZA: PRIMA FASE



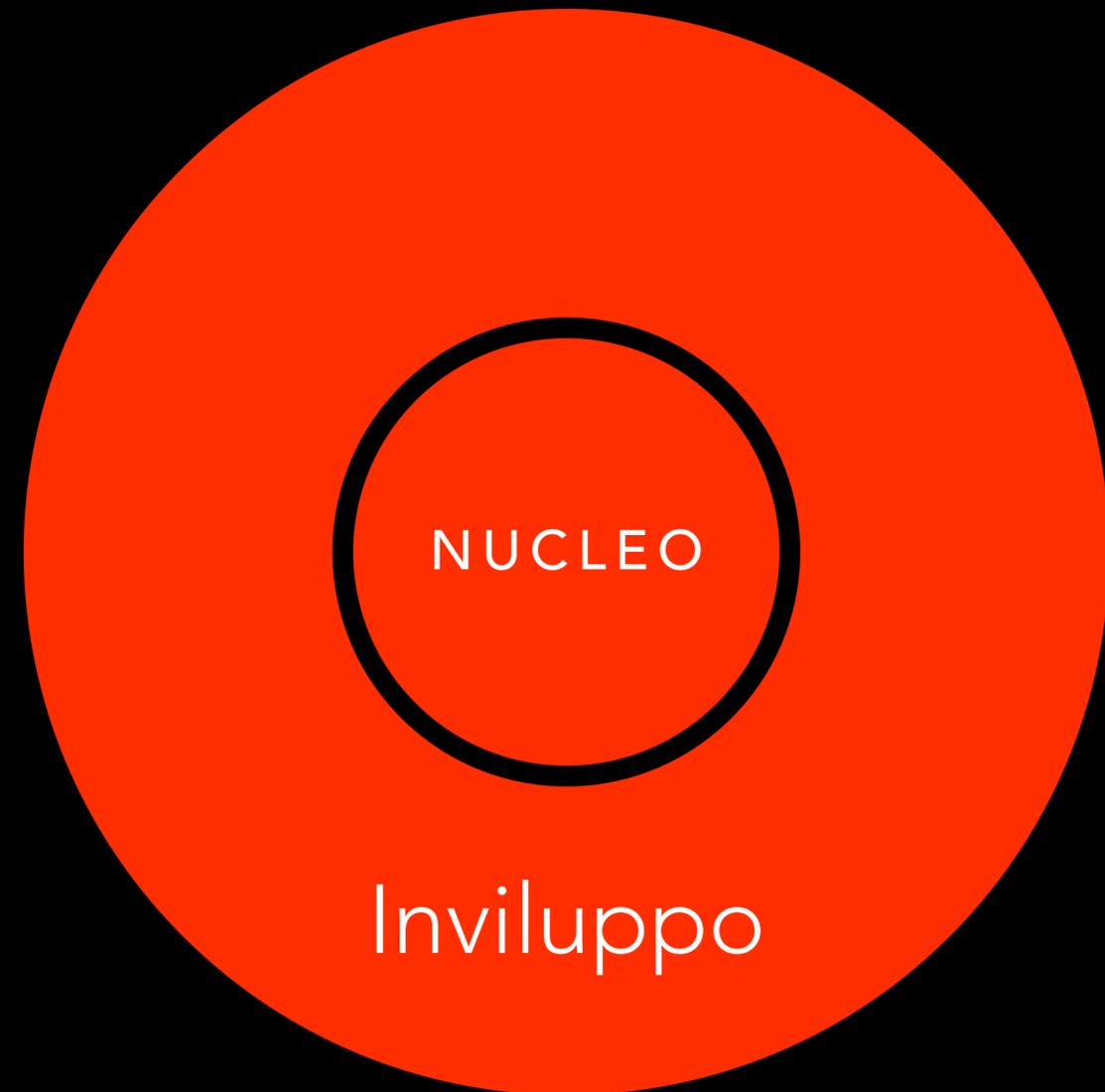
- Tempo **dinamico** di circa **100 yr**
- Il **nucleo** si porta **all'equilibrio** prima dell'involuppo
- Abbiamo **alta opacità**, perciò $L \searrow$

FASE DI PRE-SEQUENZA: SECONDA FASE



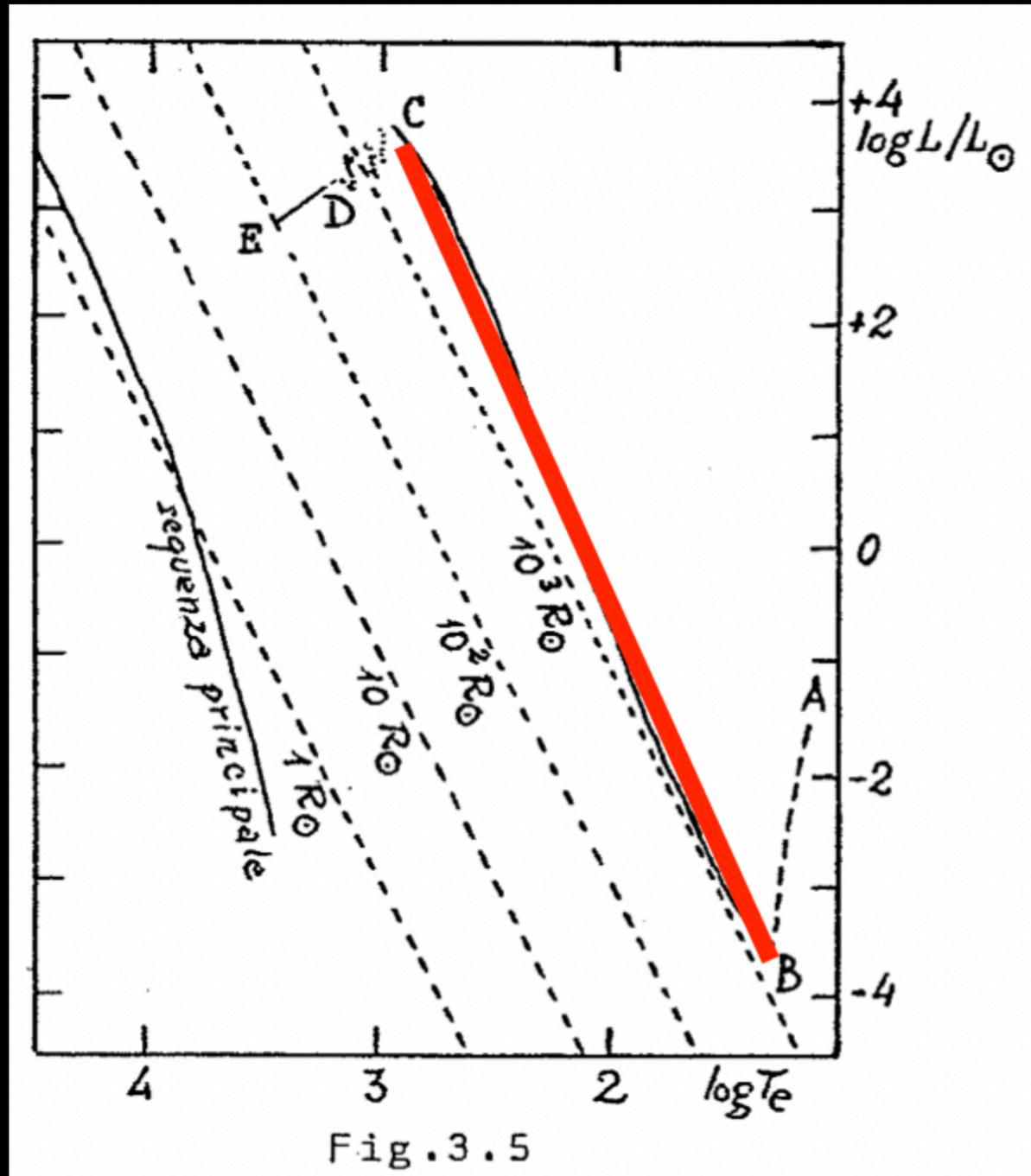
- Tempo **dinamico** di circa **10 giorni**
- **Onda d'urto** fa espandere l'inviluppo
- **Opacità diminuisce**, perciò $L \nearrow$

FASE DI PRE-SEQUENZA: TERZA FASE



- Tempo **dinamico** di circa **10 anni**
- Anche **l'inviluppo** va all'**equilibrio**
- Una massa solare avrà $10^3 L_{\odot}$, $10^2 R_{\odot}$ e 2500 K
- Terminiamo sulla **traccia di Hayashi**

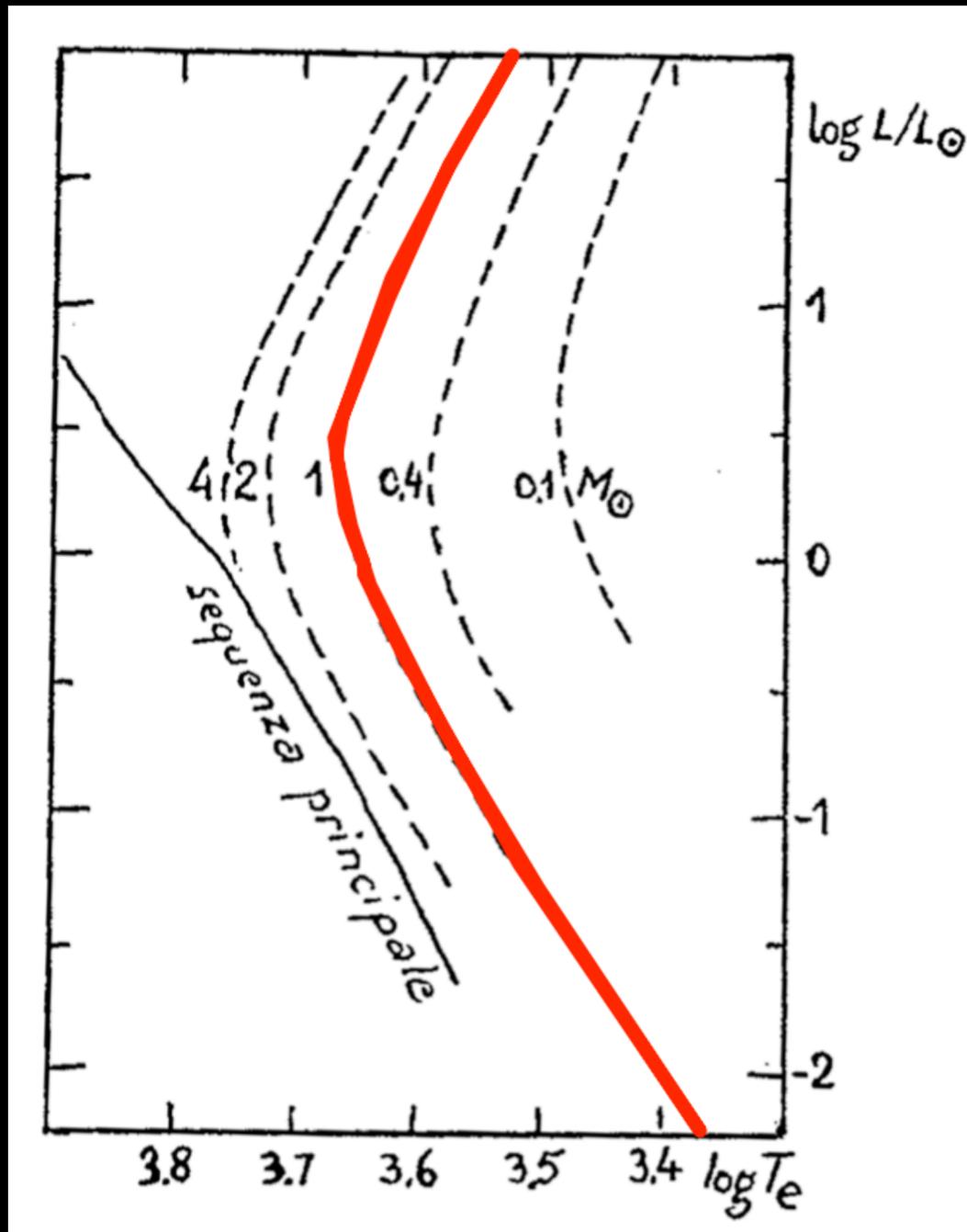
FASE DI PRE-SEQUENZA: DIAGRAMMA HR



Credit: Francesco Ferraro

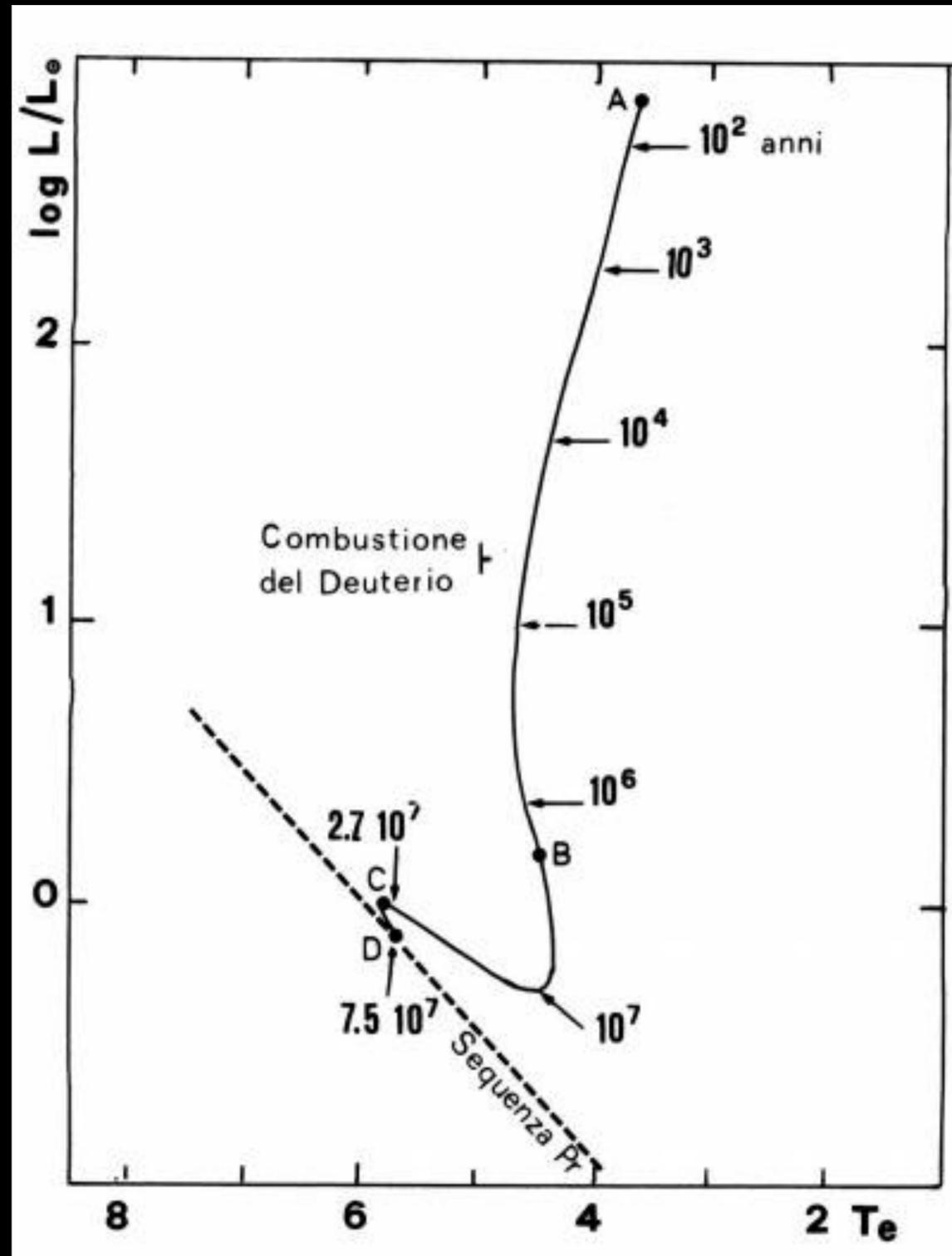
- Riassunto grafico di quanto visto
- Luminosità superficiale in funzione della Temperatura superficiale di corpo nero
- Grafico logaritmico con asse x invertito

TRACCIA DI HAYASHI



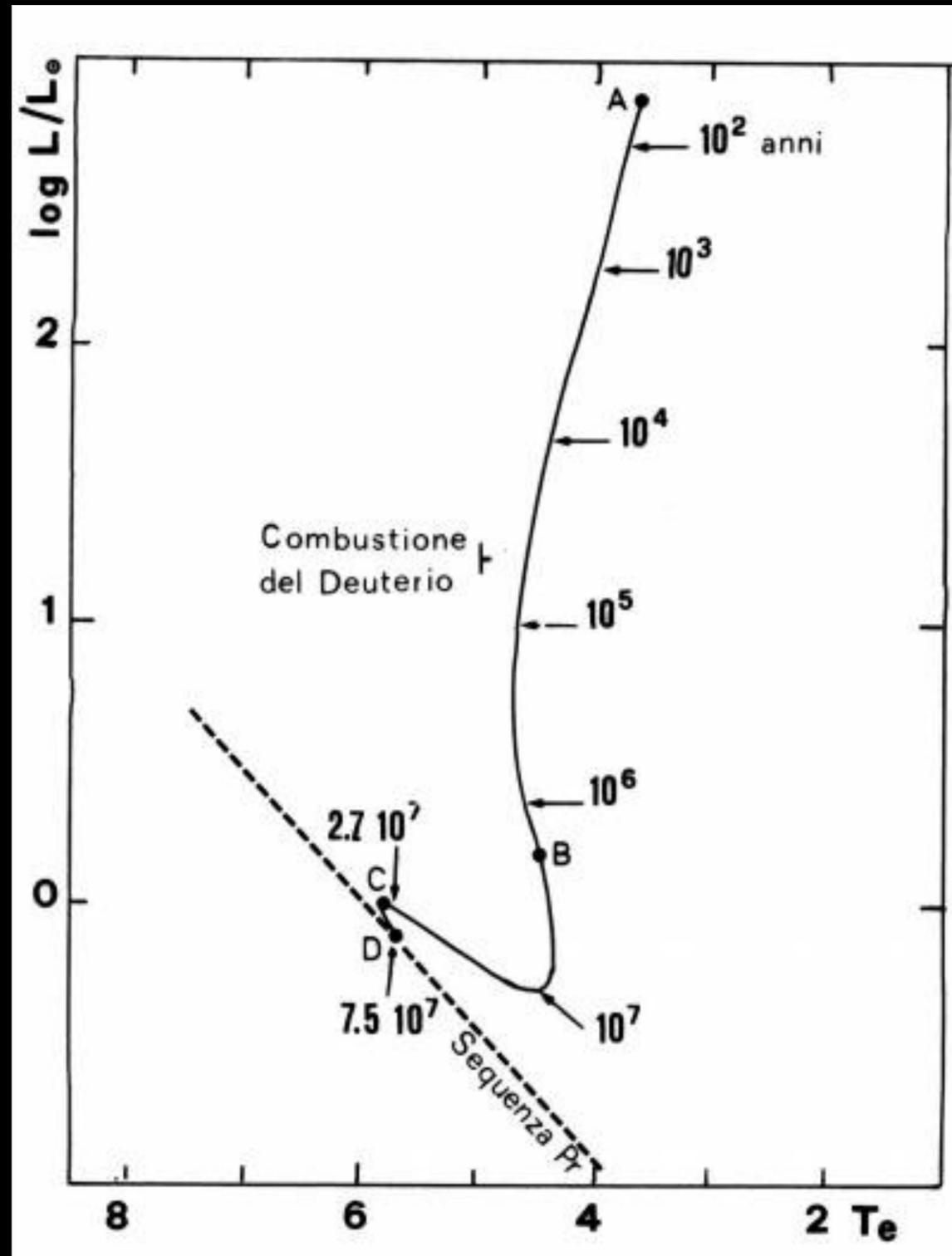
- Conseguenza del **Teorema di Hayashi**: **fissati M e μ , \exists regione non all'equilibrio statico**
- **Sulla traccia** si trovano **modelli all'equilibrio completamente convettivo**
- Più mi allontano dalla traccia, più la stella è radiativa
- Teorema valido in generale

FASE DI PRE-SEQUENZA: QUARTA FASE



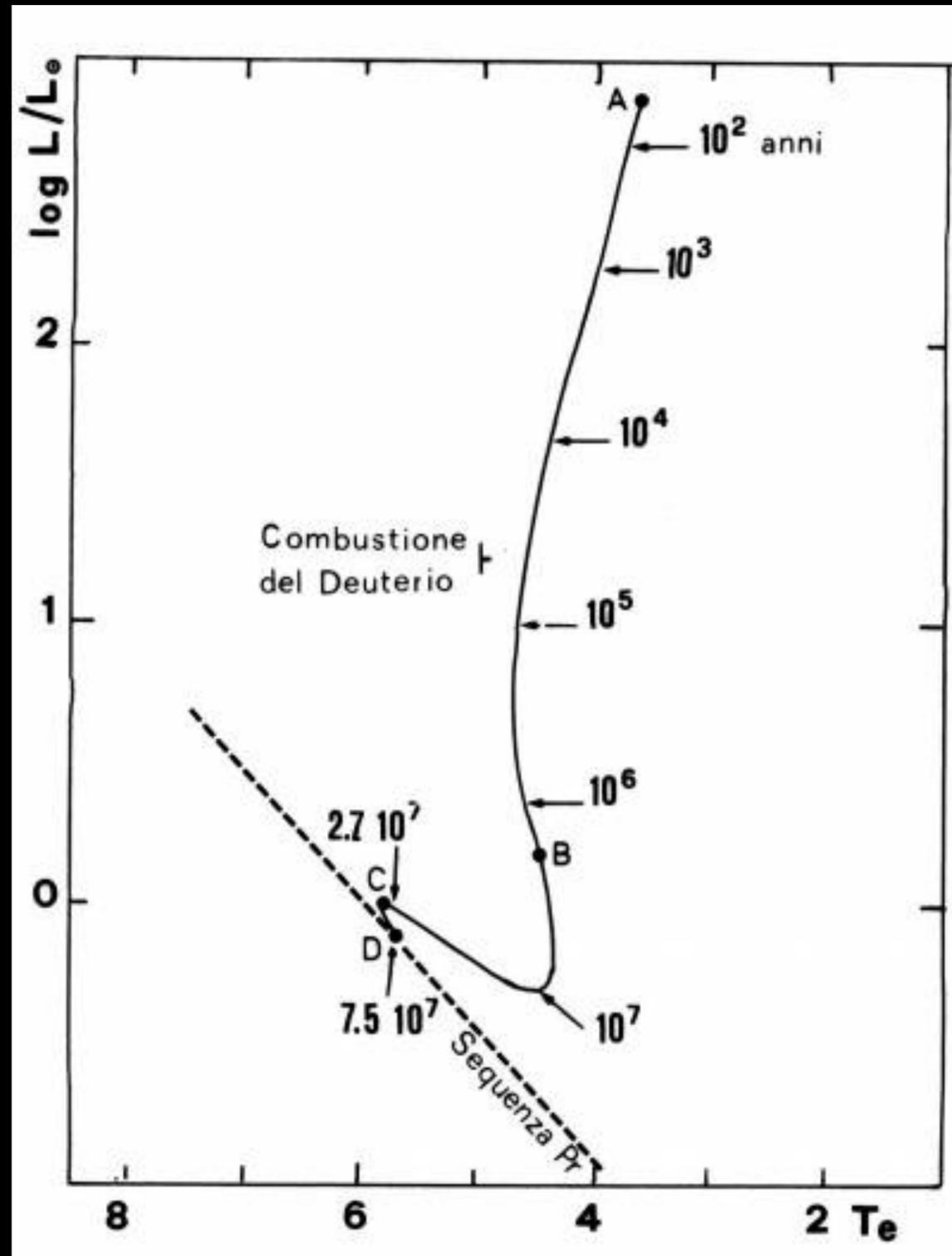
- **Tempi termodinamici:** dura circa 1 Myr
- Protostella all'equilibrio: **segue la sua traccia di Hayashi**
- **Stella si contrae per il viriale:** $T \nearrow$, ma $L \searrow$
- La materia si dissocia e ionizza (**combustione di H-2 in He-3**)

FASE DI PRE-SEQUENZA: QUINTA FASE



- **Tempi termodinamici:** dura circa 26 Myr
- Si sviluppa **nucleo radiativo:** $\Delta_{\text{rad}} < \Delta_{\text{ad}}$
- T sale: ciclo CNO e catena pp si innescano parzialmente ($L \nearrow$, $\epsilon \nearrow$)
- Produzione di He-3 e N-14

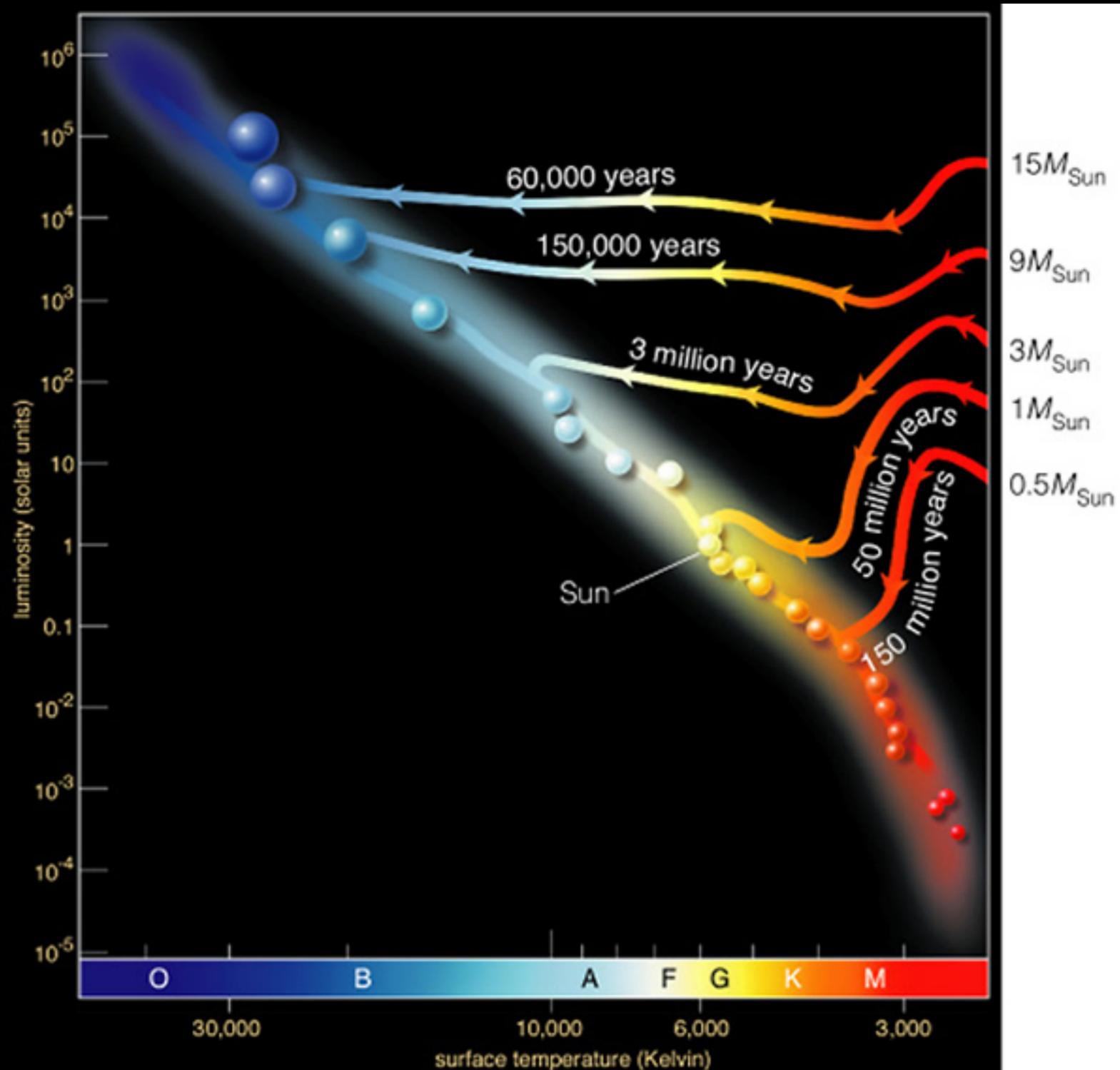
FASE DI PRE-SEQUENZA: SESTA FASE



Credit: Vittorio Castellani

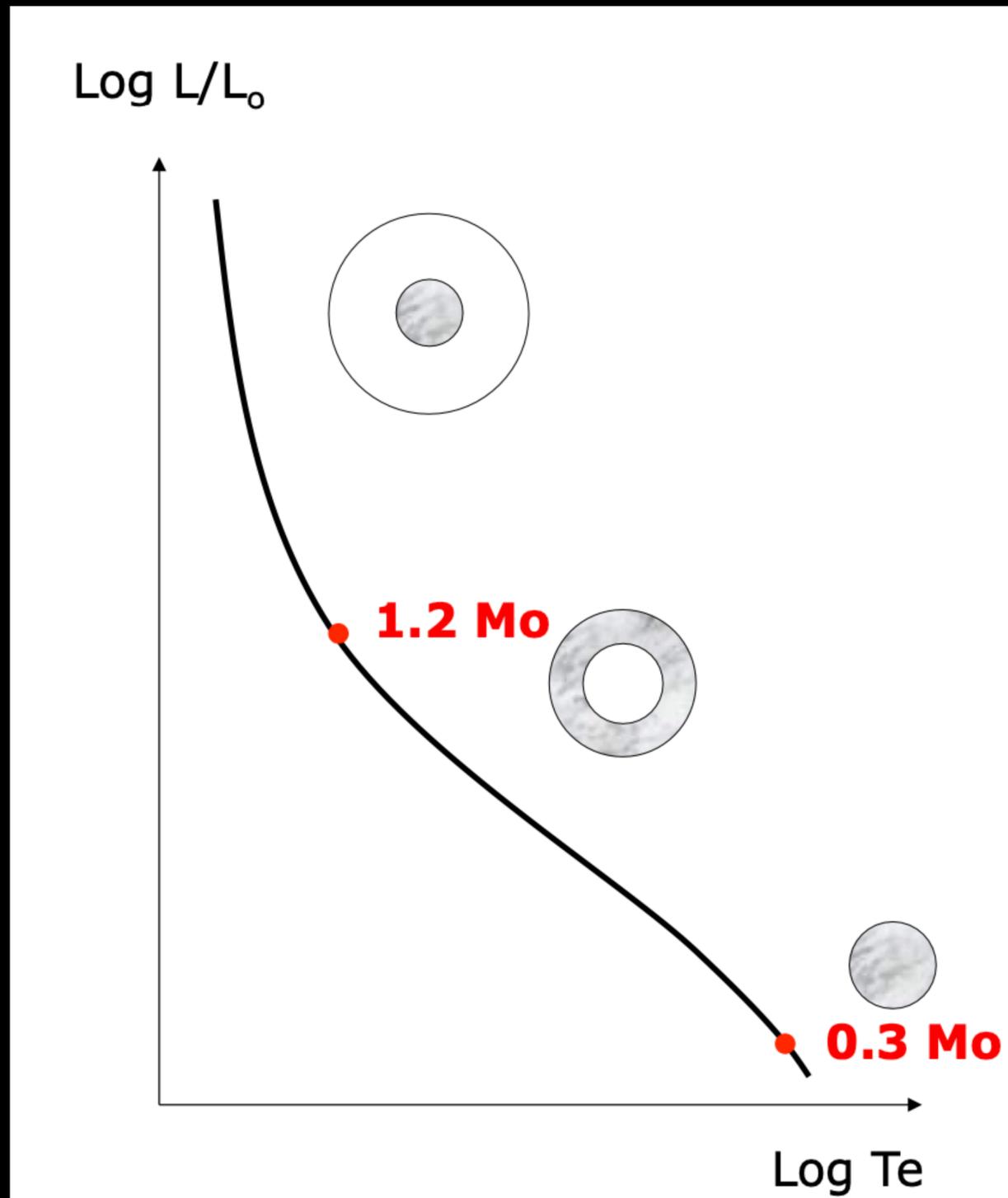
- **Tempi termodinamici:** dura circa 48 Myr
- Aumentano le reazioni:
nucleo si espande ($L \searrow$ e $T \searrow$)
- Transizione a tempi termonucleari
- Infine avremo la stella con reazioni autoregolate ed all'equilibrio

FASE DI PRE-SEQUENZA: MASSE DIVERSE



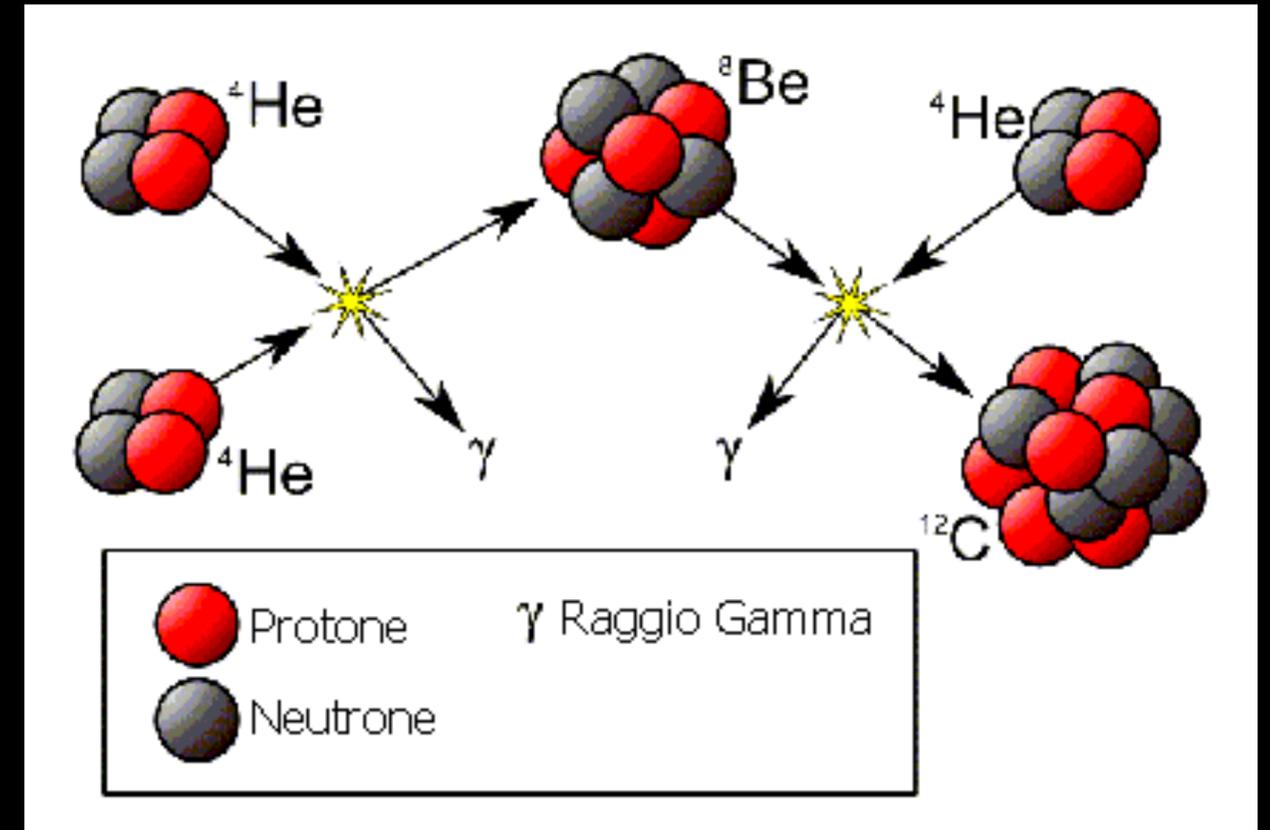
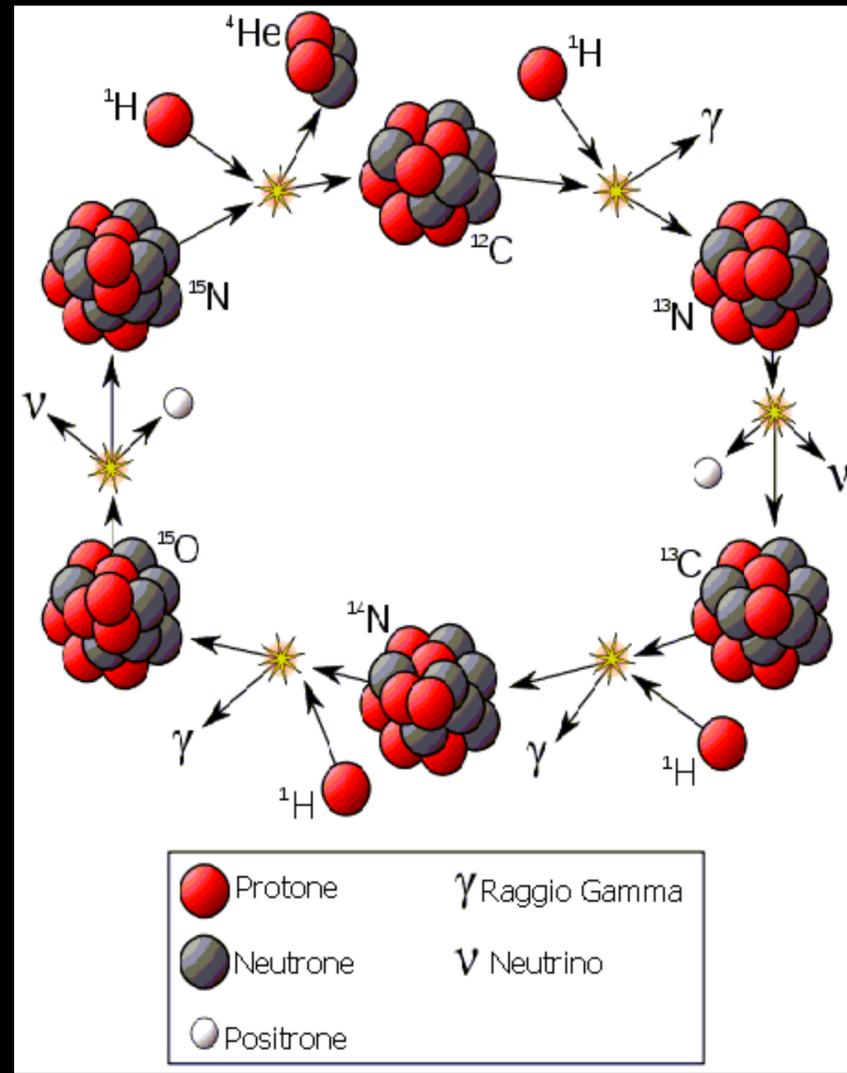
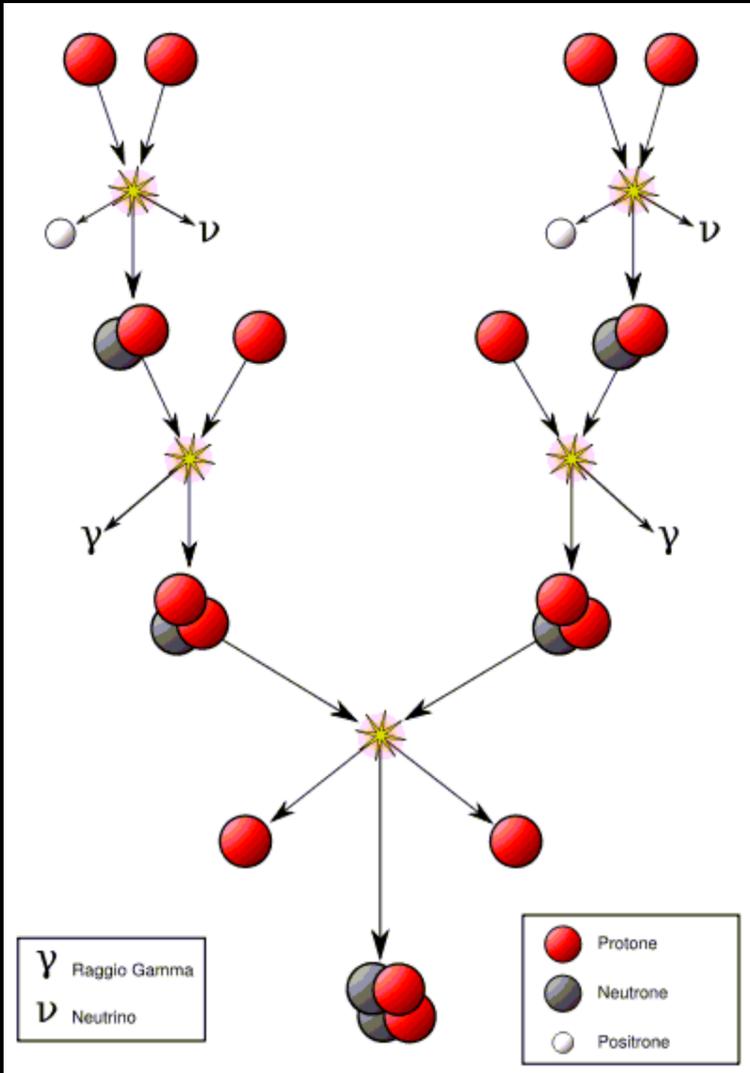
- La durata totale dipende dalla massa
- Si passa da circa 10^4 yr a 10^8 yr
- Non tutte deviano dalla traccia di Hayashi

SEQUENZA PRINCIPALE



- **Tempi termonucleari** ($10^4 < t/\text{yr} < 10^{13}$): le stelle si posizionano nella ZAMS
- Unica fase in cui L e M correlano
- $0.08 < M/M_{\odot} < 90$ è il range in massa
- $M \leq 0.3 M_{\odot}$: completamente convettive
- $1.2 < M/M_{\odot} < 0.3$: convezione solo fuori
- $M \geq 1.2 M_{\odot}$: convezione solo nel nucleo

RIASSUNTO REAZIONI NUCLEARI

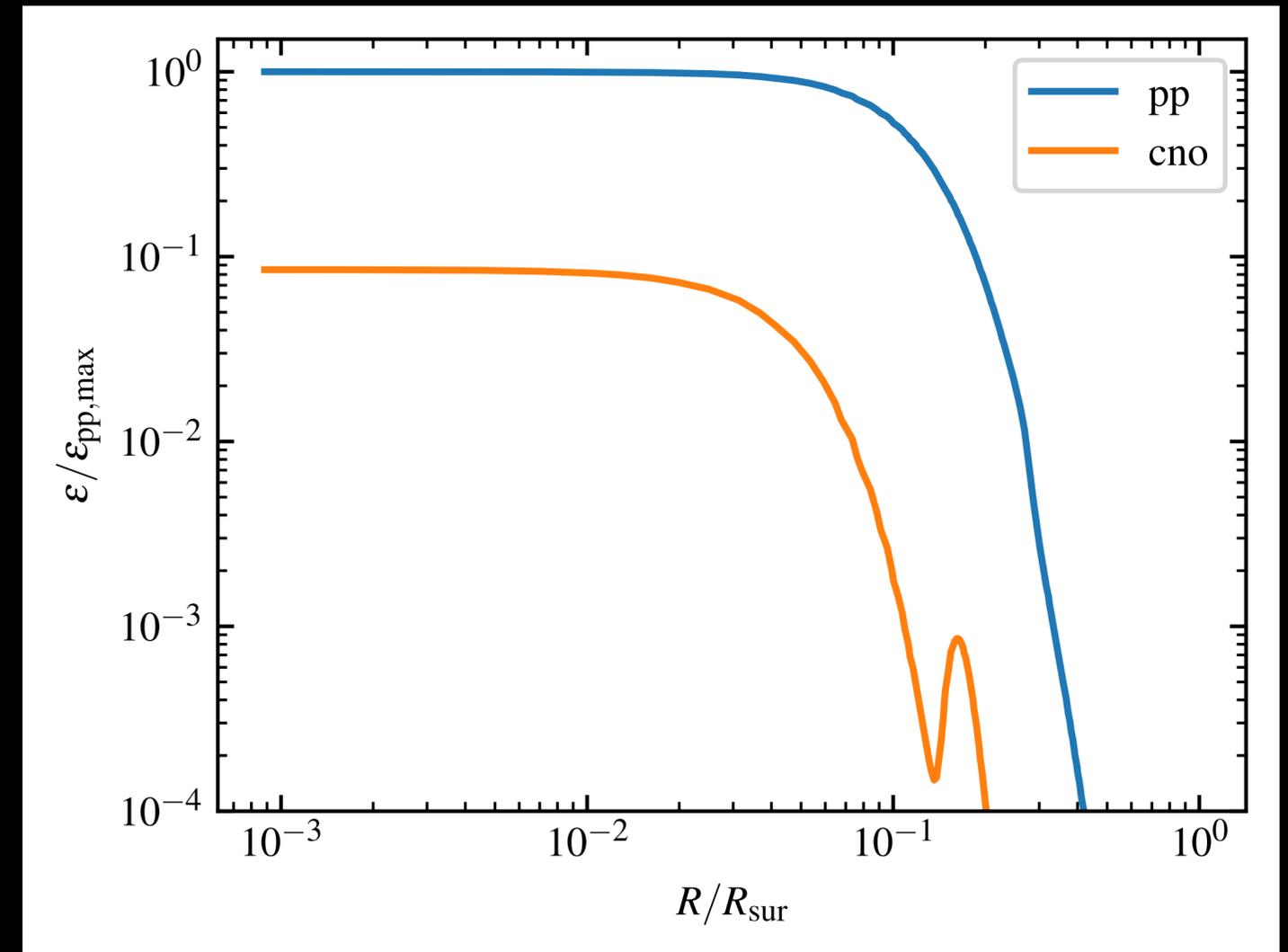
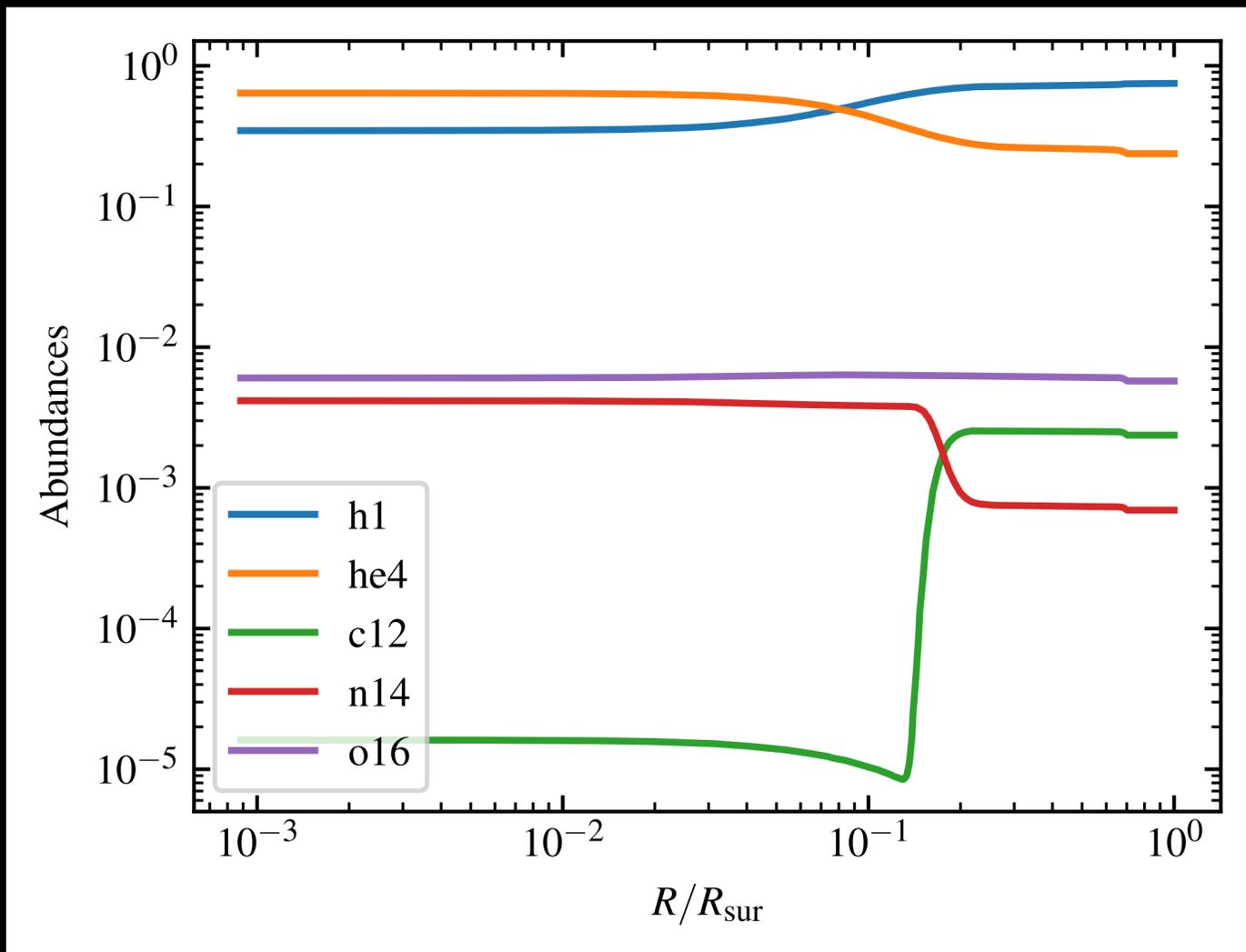


- Per T del nucleo "basse" (transizione a $1.2 M_{\odot}$)
- Nessuna convezione indotta

- Per T del nucleo "alte" (transizione a $1.2 M_{\odot}$)
- Convezione indotta, ma non crescente
- Accumulo di N-14 a scapito di C-12
- Accumulo di Na-23 a scapito di O-16, ecc..

- $T \approx 10^8$ K per avvenire
- Altissima ρ di He
- Produzione di neutrini non trascurabile
- Convezione del nucleo autoindotta e crescente

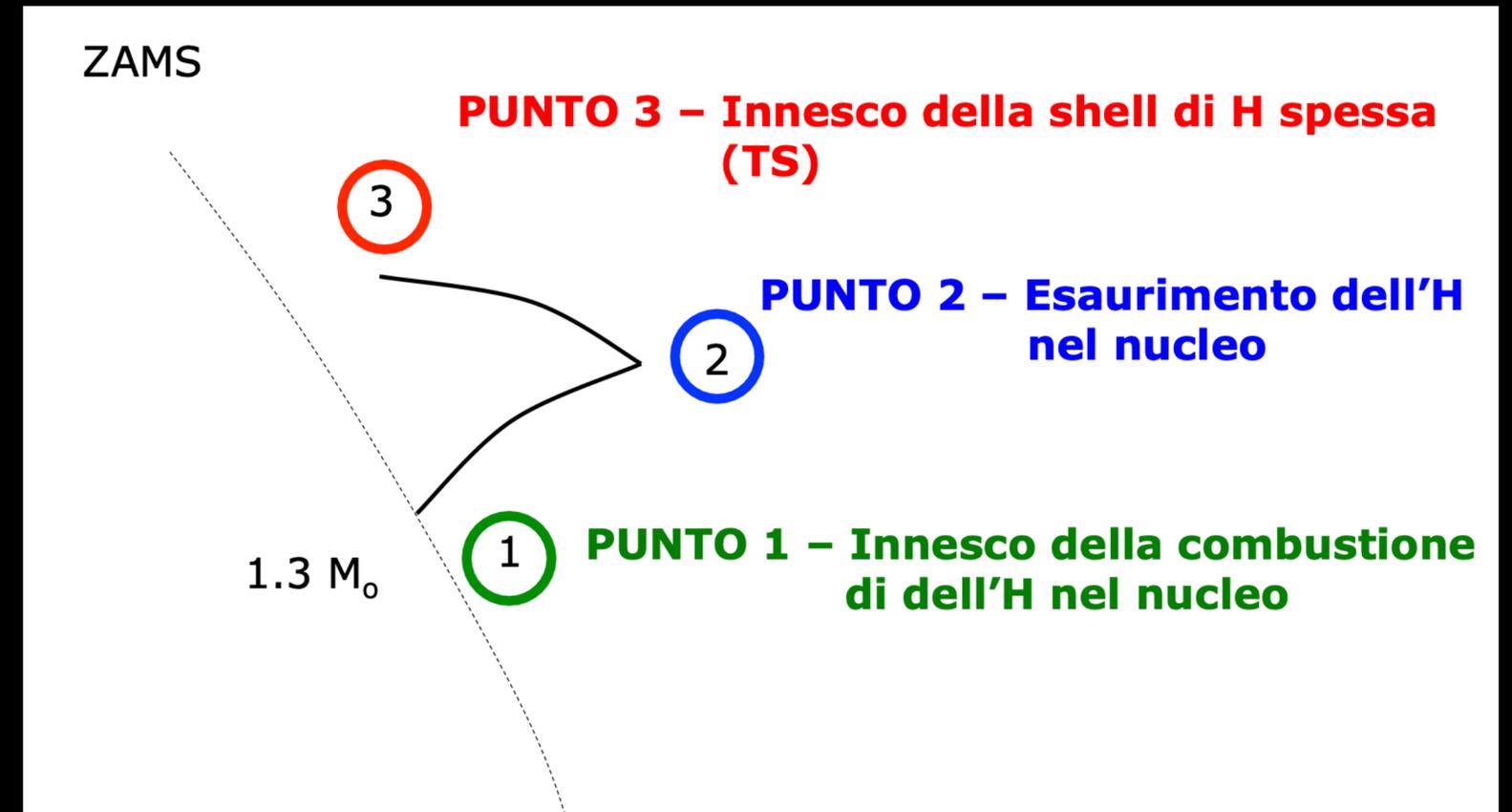
SEQUENZA PRINCIPALE: ESEMPIO DEL SOLE



MS: PRIMA FASE

- $P = nK_B T$ per gas perfetto: $n = \rho/\bar{m}$ e $\bar{m} = \mu m_p$
- $X_{\text{nuc}} \searrow \longrightarrow n \searrow \longrightarrow P \searrow \longrightarrow \rho_{\text{nuc}}$ e $T_{\text{nuc}} \nearrow \longrightarrow \epsilon \nearrow \longrightarrow L$ e $R \nearrow$
- $M < 1.2 M_{\odot}$:
 $R \approx$ costante, perché contrazione ed espansione si bilanciano $\longrightarrow T_{\text{sup}} \nearrow$ poco
- $M > 1.2 M_{\odot}$:
espansione incontrastata $\longrightarrow R \nearrow$ e $T_{\text{sup}} \searrow$
- Quando $X_{\text{nuc}} \approx 0.05$ si passa alla **seconda fase: nucleo inerte si contrae**

MS: SECONDA FASE



Credit: Francesco Ferraro

- Si forma un nucleo inerte isotermo di He-4 sempre più grande

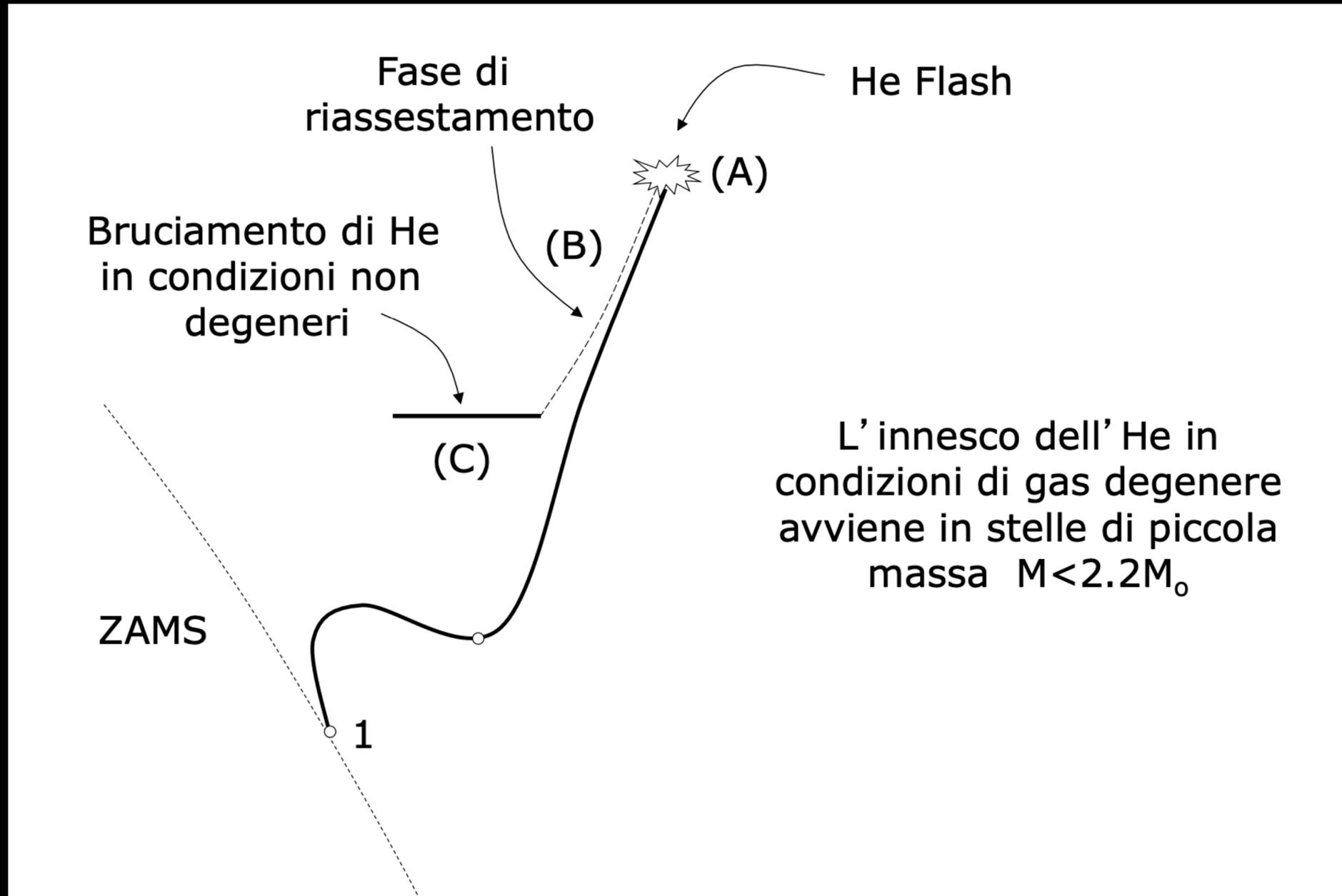
LIMITE DI SCHÖNBERG-CHANDRASEKHAR

- Limite applicabile a gas perfetto del nucleo
- Se $M_{\text{nuc}} > 0.1M_{\text{stella}}$: Forza gravitazionale prevale $\rightarrow \rho_{\text{nuc}}$ e T_{nuc} 
- Se $M_{\text{nuc}} \leq 0.1M_{\text{stella}}$: Nucleo rimane all'equilibrio idrostatico isoterma
- Conseguenza: fase di subgigante e gigante rossa

FASE DI GIGANTE

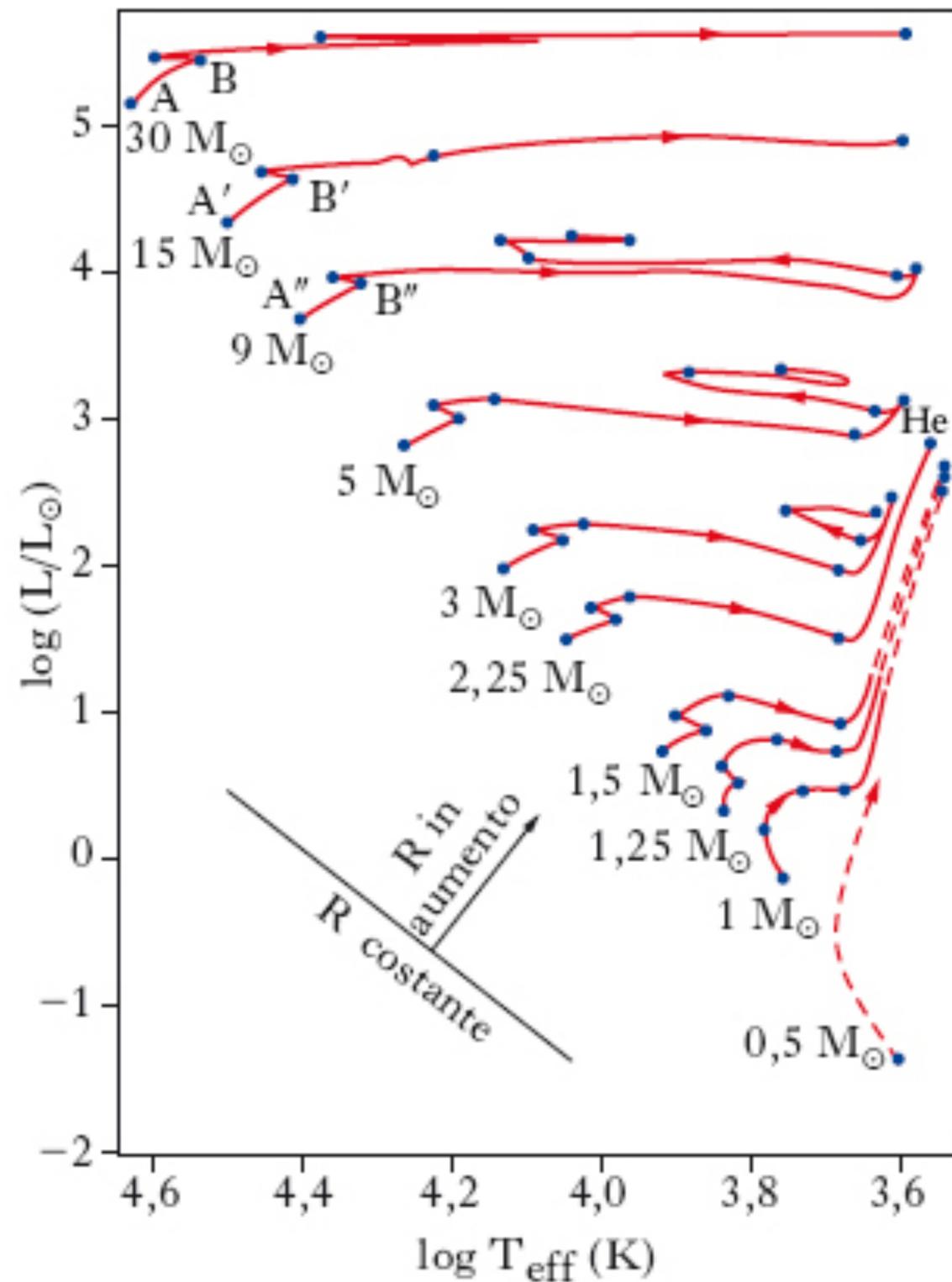
- \exists per Stelle che mantengono un nucleo isoterma: **non esiste per $M > 10 M_{\odot}$**
- Fase di **bruciamento dell'H in Shell con ciclo CNO** $\longrightarrow L$ e $R \nearrow \longrightarrow T \searrow$
- Minore è la massa, più a lungo la stella starà in questa fase
- La stella **si avvicina alla sua traccia di Hayashi:**
He-4 viene portato in superficie (**primo dredge-up**)
- $M < 2.2 M_{\odot}$, allora **il nucleo è degenere:**
RGB \longrightarrow servono dei flash dell'He per uscire

HE FLASH



- Avvengono una serie di flash nelle zone centrali
- Flash che producono C-12
- Espandono il nucleo e rimuovono la degenerazione
- Dura circa 1 Myr
- Conseguenza: RGB tip

RGB TIP



- Solo per stelle con $M < 2.2 M_{\odot}$
- Fase finale della fase RGB
- Tutte hanno **L uguale**: candela standard
- Conseguenza della degenerazione:
solo quando $M_{\text{nuc}} = 0.45 M_{\odot}$ si ha He flash

RAMO ORIZZONTALE

- **Sequenza evolutiva:** posizione dipende dalla massa stellare (Z , M loss e Y)
- Zona di innesco del **processo 3α nel nucleo**.
In più si **brucia anche H nella shell** adiacente con ciclo CNO
- T esterna dipende prevalentemente da quanto grande è l'involuppo:
stelle di piccola massa ne hanno poco, perciò **hanno T più alte**
- Non esiste per stelle con $M < 0.5 M_{\odot}$: **AGB manquè**
- Prima fase domina la shell, nella seconda il nucleo

RAMO ASINTOTICO DELLE GIGANTI: EAGB

- Esiste per le stelle con $M < 8 M_{\odot}$
- Finito il combustibile:
Nucleo di C-12 e O-16 inerte, shell che brucia He-4, altra shell che brucia H
- All'inizio brucia solo la shell di He-4: **fase di Early AGB**
- Seguono la traccia di Hayashi: **secondo dredge-up per $M > 4.6 M_{\odot}$**

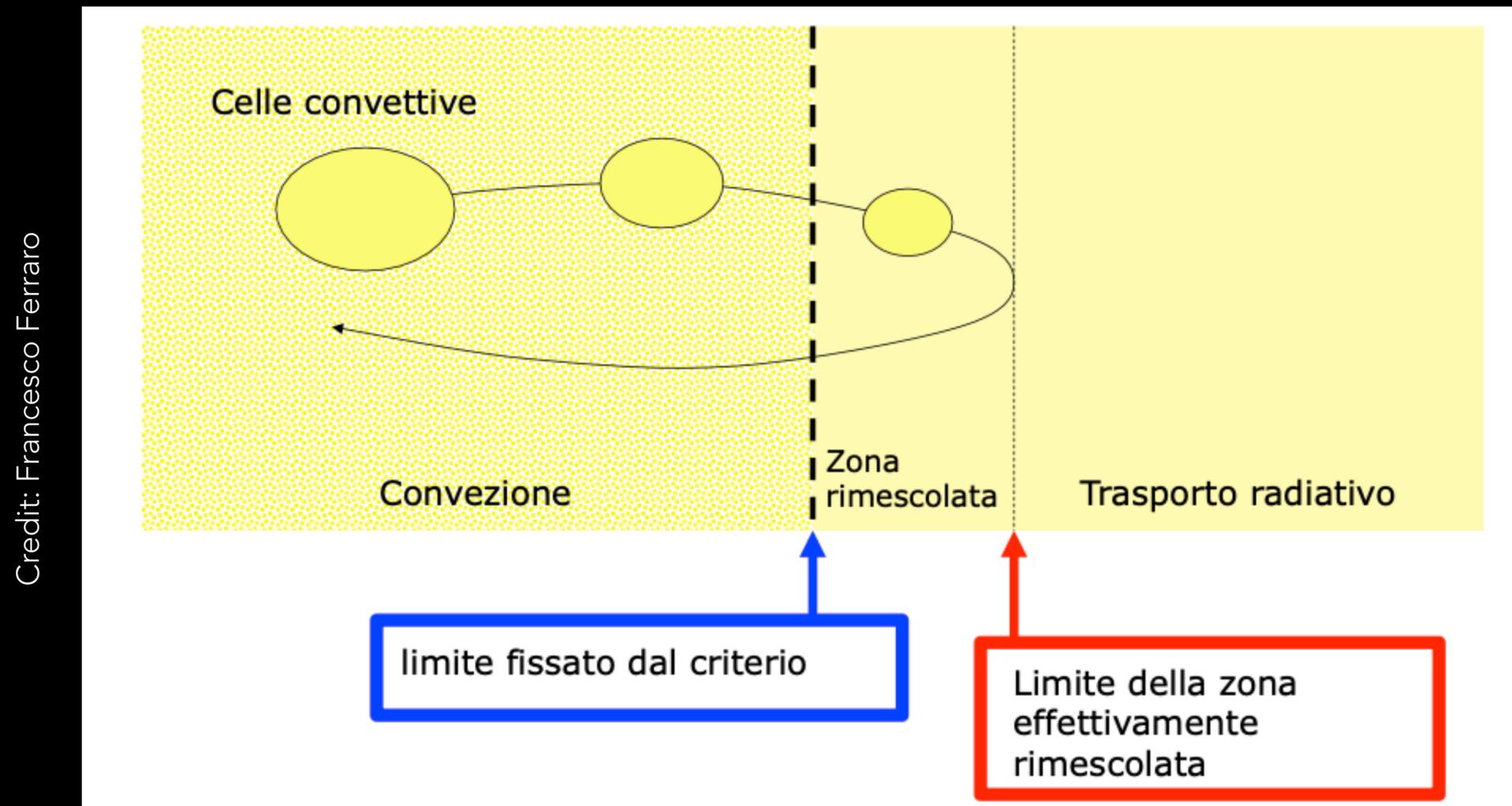
RAMO ASINTOTICO DELLE GIGANTI: TPAGB

- Le due shell si accendono alternandosi con flash: **fase dei Pulsi Termici**
- Prevalle la fase di bruciamento della shell di H
- Seguono la traccia di Hayashi:
terzo dredge-up per $M > 1.5 M_{\odot}$ (stelle al Carbonio)
- Stelle con $M > 3 M_{\odot}$ hanno processi di cattura neutroni lenta:
formano elementi più pesanti del Fe-56 nella zona di inter-shell

PROBLEMI DEI MODELLI: MIXING LENGTH THEORY

- Non esiste una trattazione completa ed autoconsistente della convezione (Moto turbolento non ha soluzioni analitiche note)
- Si utilizza un parametro "ad hoc": la **mixing length**, ovvero il **percorso fatto dalla cella convettiva** prima di mescolarsi
- Parametro calcolato calibrando i modelli solari con le osservazioni

PROBLEMI DEI MODELLI: OVERSHOOTING



- Diffusione ulteriore rispetto a criterio di Schwarzschild
- Servono parametri "ad hoc" per descriverlo

PROBLEMI DEI MODELLI: LA PERDITA DI MASSA

- Tra la fase di RGB e di HB vi è una perdita di massa
- Non si conosce esattamente il principio fisico alla base (alcune non perdono nulla, altre perdono molta massa)
- Fondamentale per capire dove si posiziona la stella nella HB
- Si usano parametri "ad hoc" per adattare i modelli alle osservazioni