

# 太陽型恒星の内部構造・進化入門

---

須田 拓馬 (国立天文台)

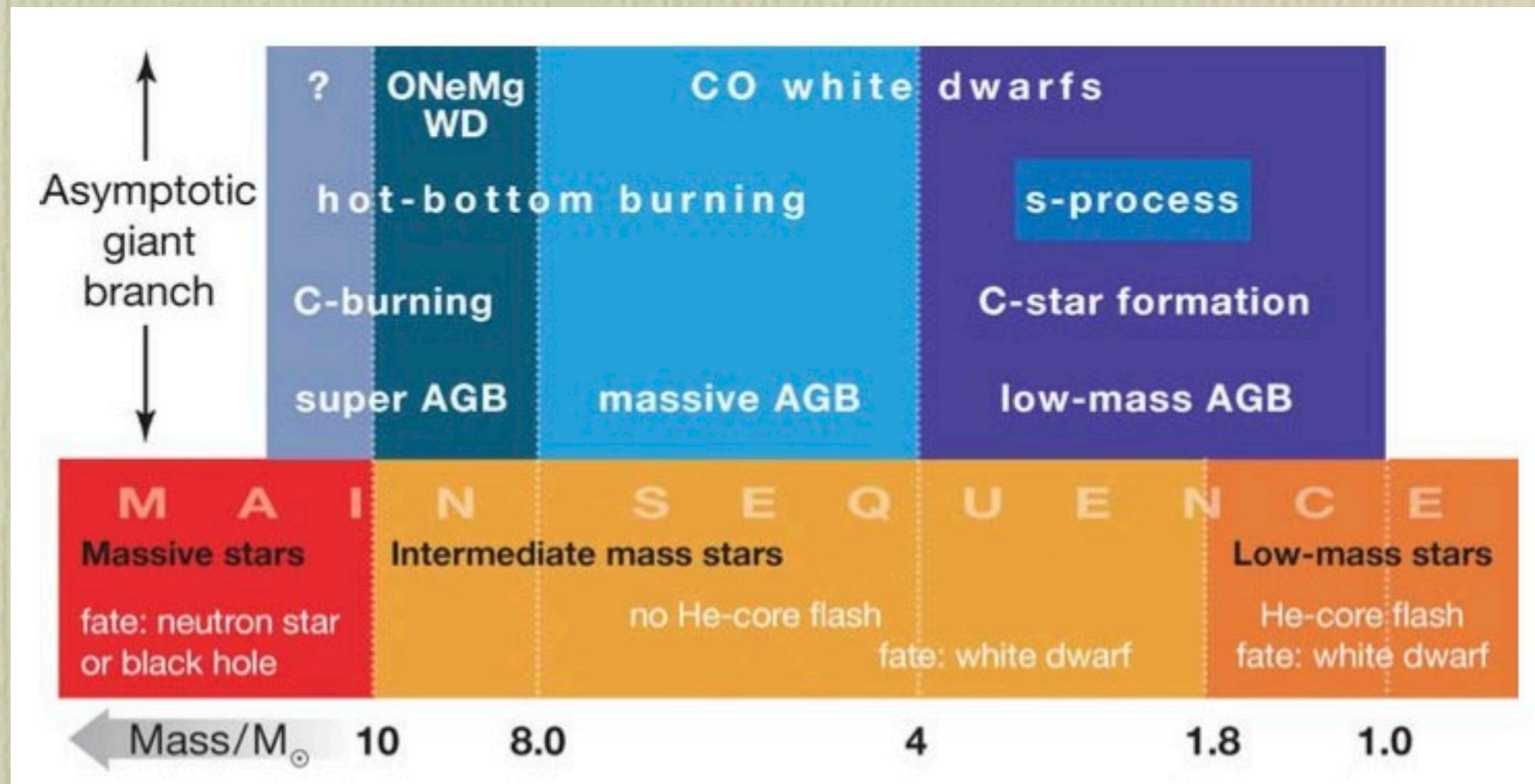
藤本 正行 (北海道大学)

# Contents

1. 恒星進化の基本
2. これまでの進歩と今後の課題
3. 読むべき文献・教科書
4. この分野のKey Person
5. 研究に役立つツール

# 1. 恒星進化の基本

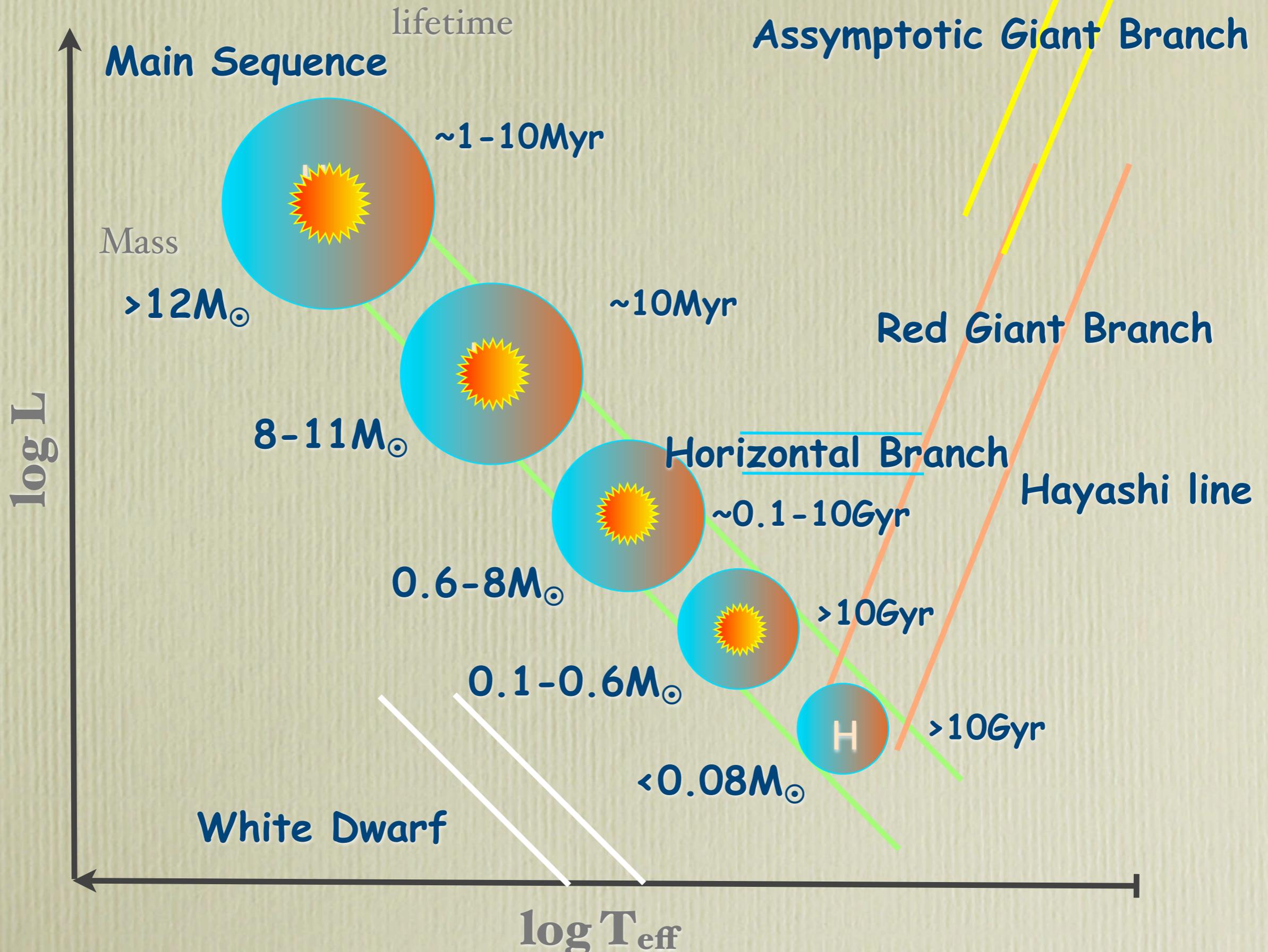
# 太陽型恒星とは？



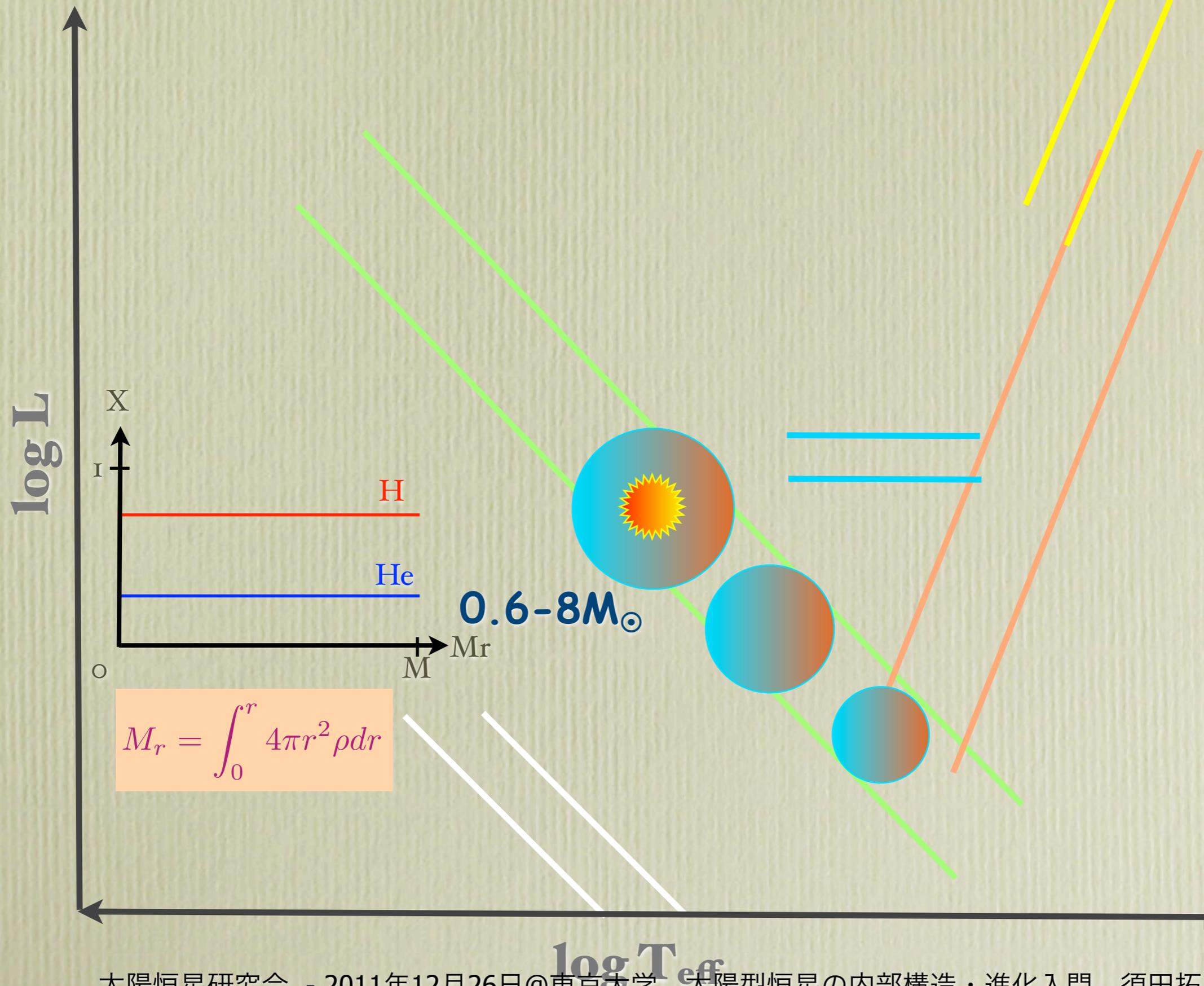
Herwig (2005)

- ★ 内部で水素燃焼・ヘリウム燃焼を経て白色矮星へと進化する恒星。
- ★ 太陽質量の0.8倍から10倍程度までの星に相当する。

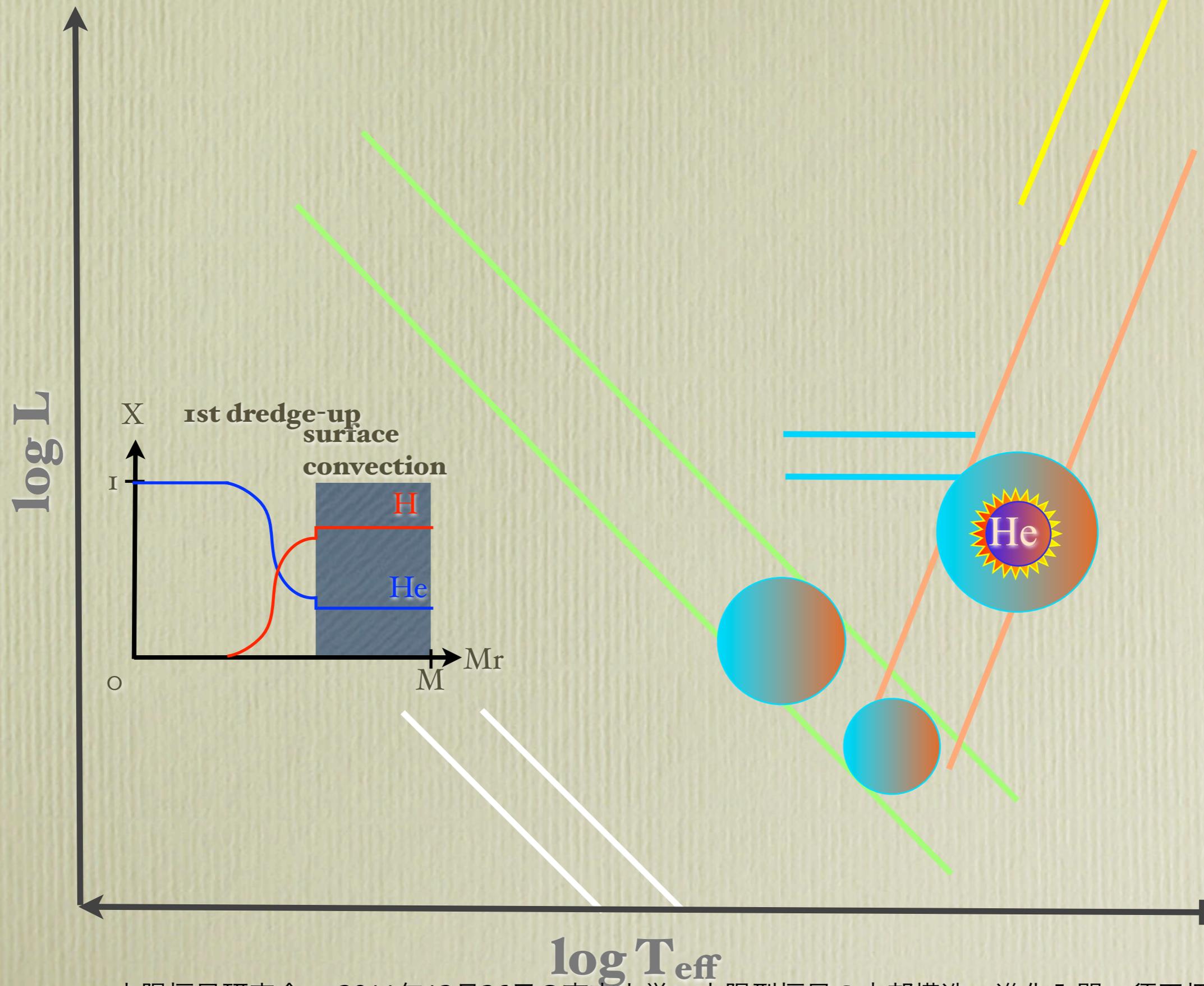
# Stellar Structure and Evolution - H-R Diagram



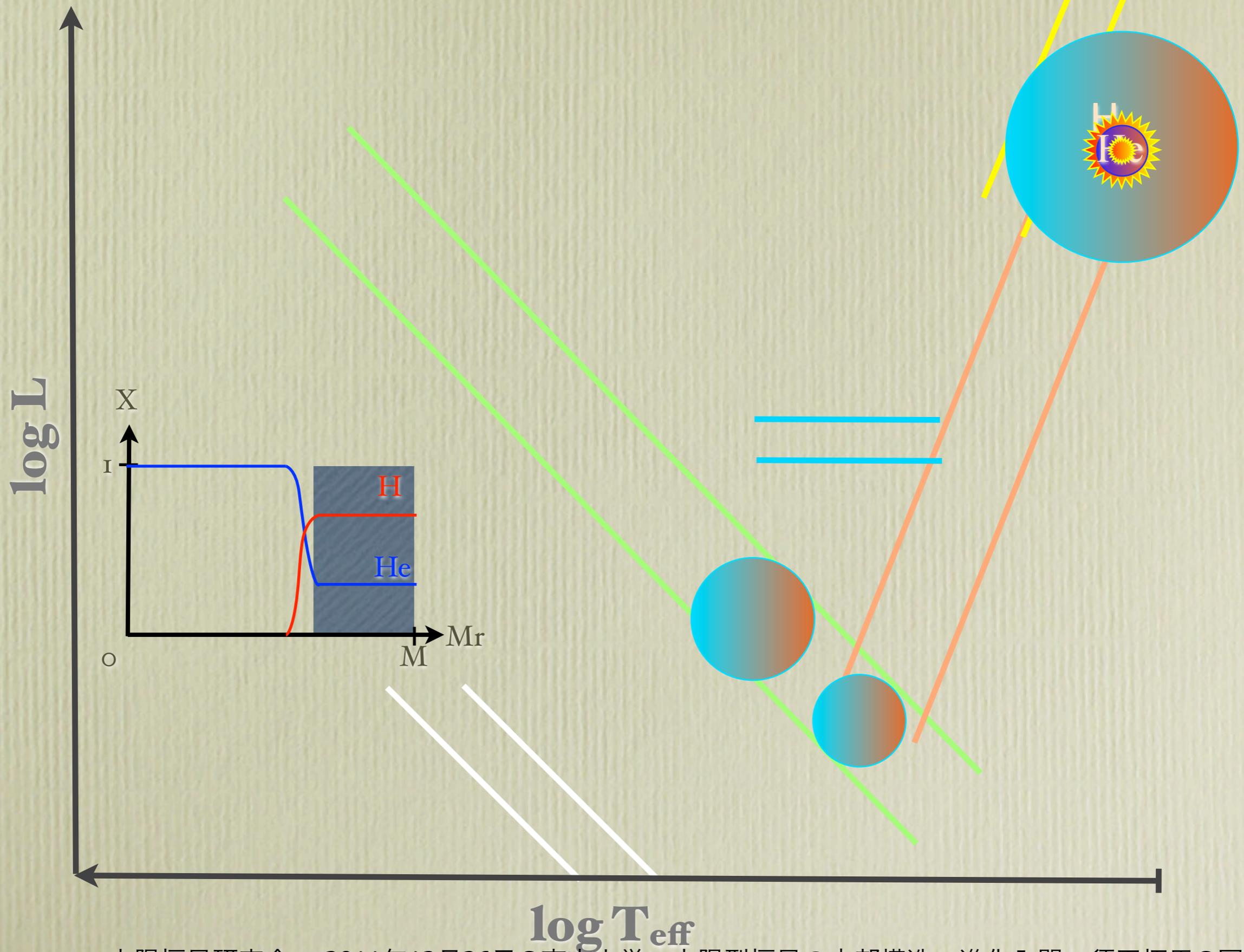
# Evolution of Low- and Intermediate-Mass Stars



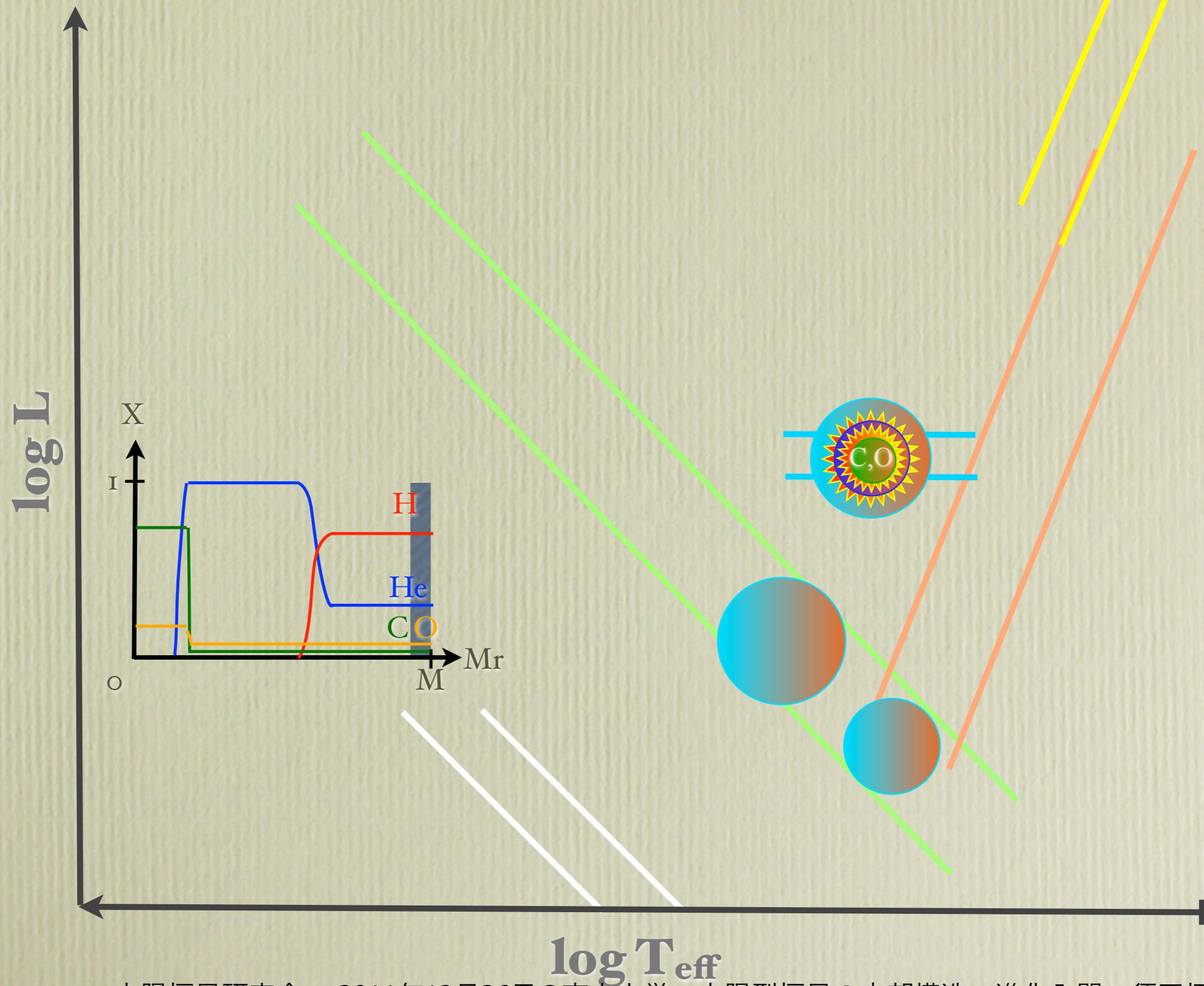
# Evolution of Low- and Intermediate-Mass Stars



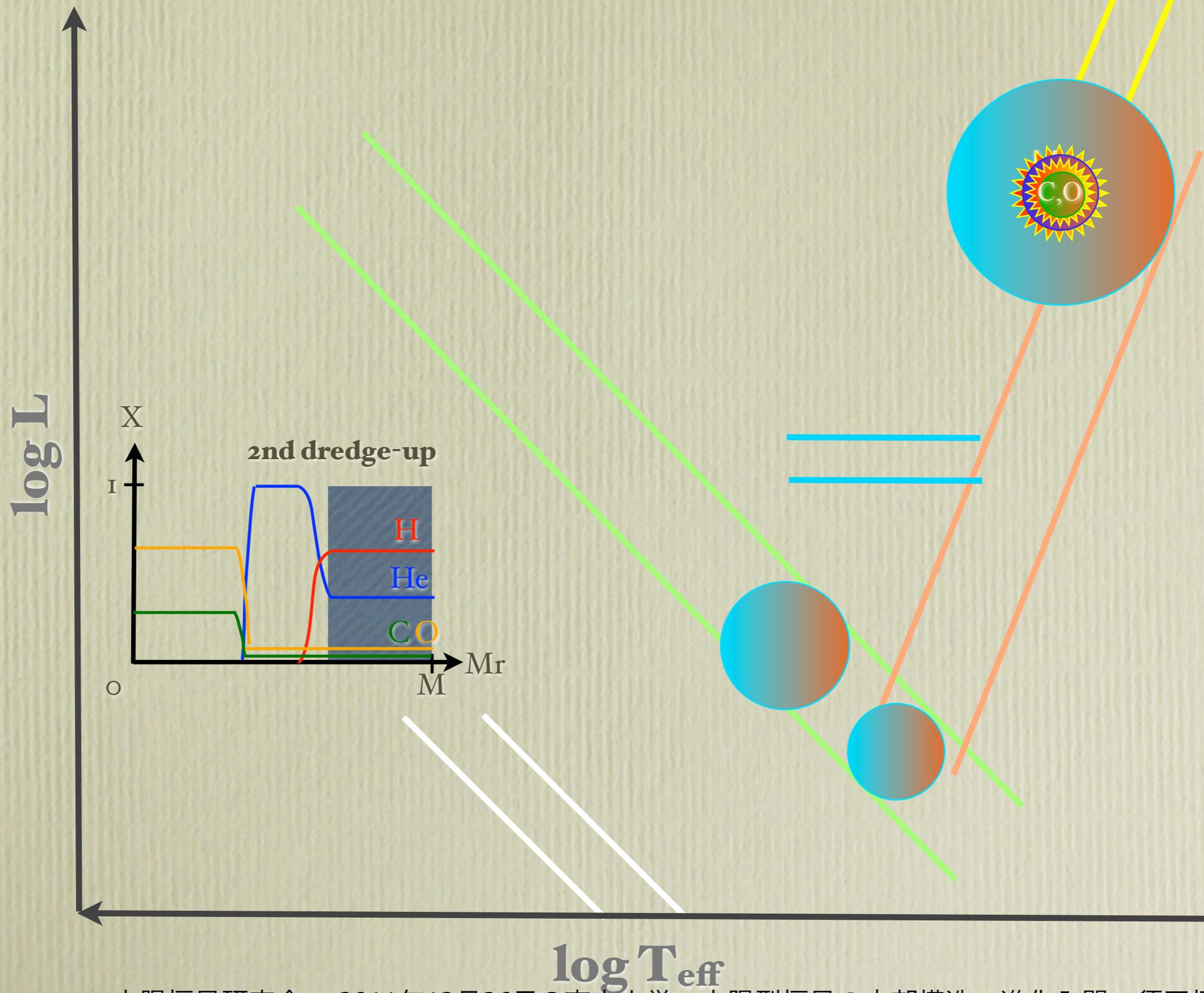
# Evolution of Low- and Intermediate-Mass Stars



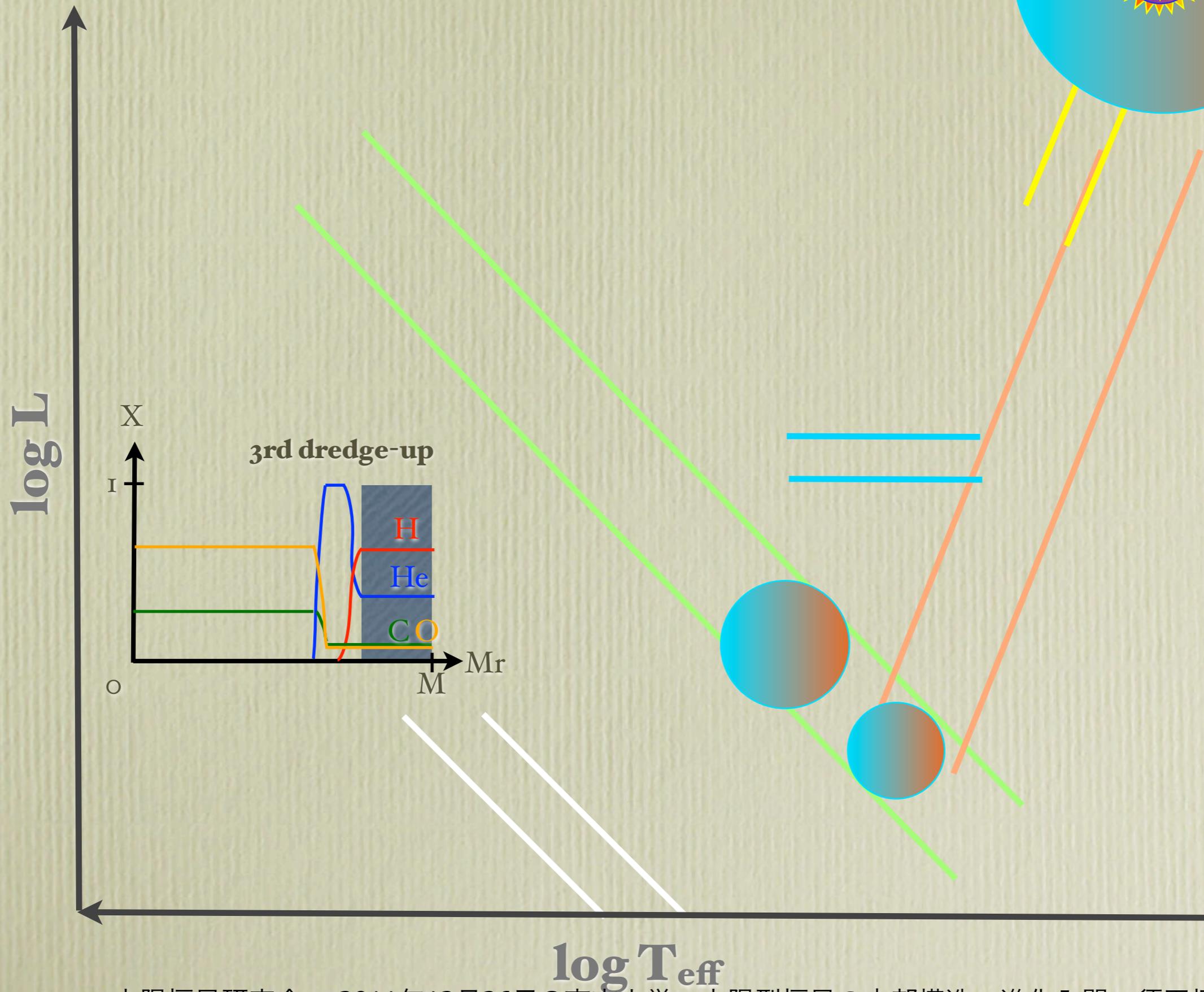
# Evolution of Low- and Intermediate-Mass Stars



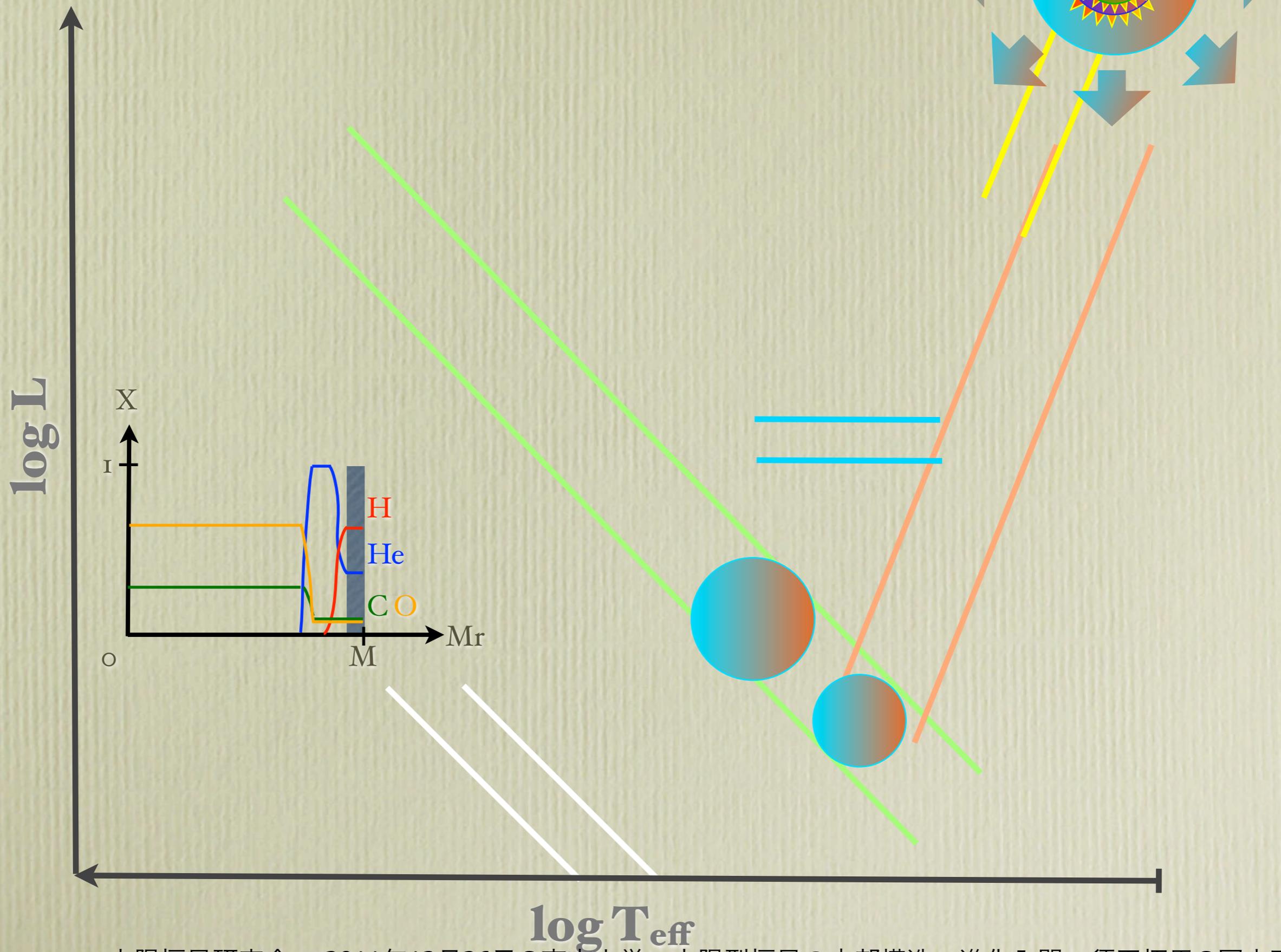
# Evolution of Low- and Intermediate-Mass Stars



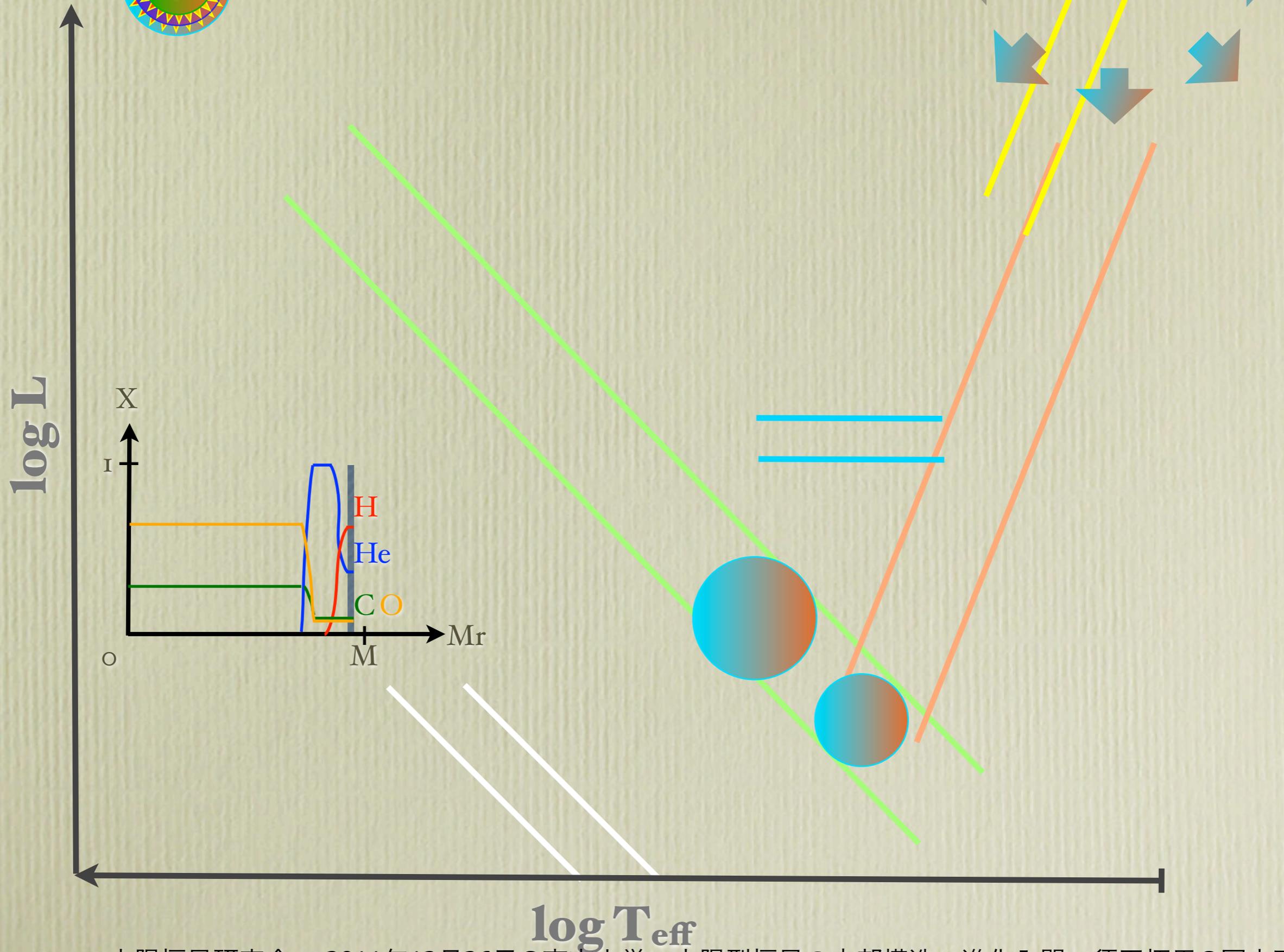
# Evolution of Low- and Intermediate-Mass



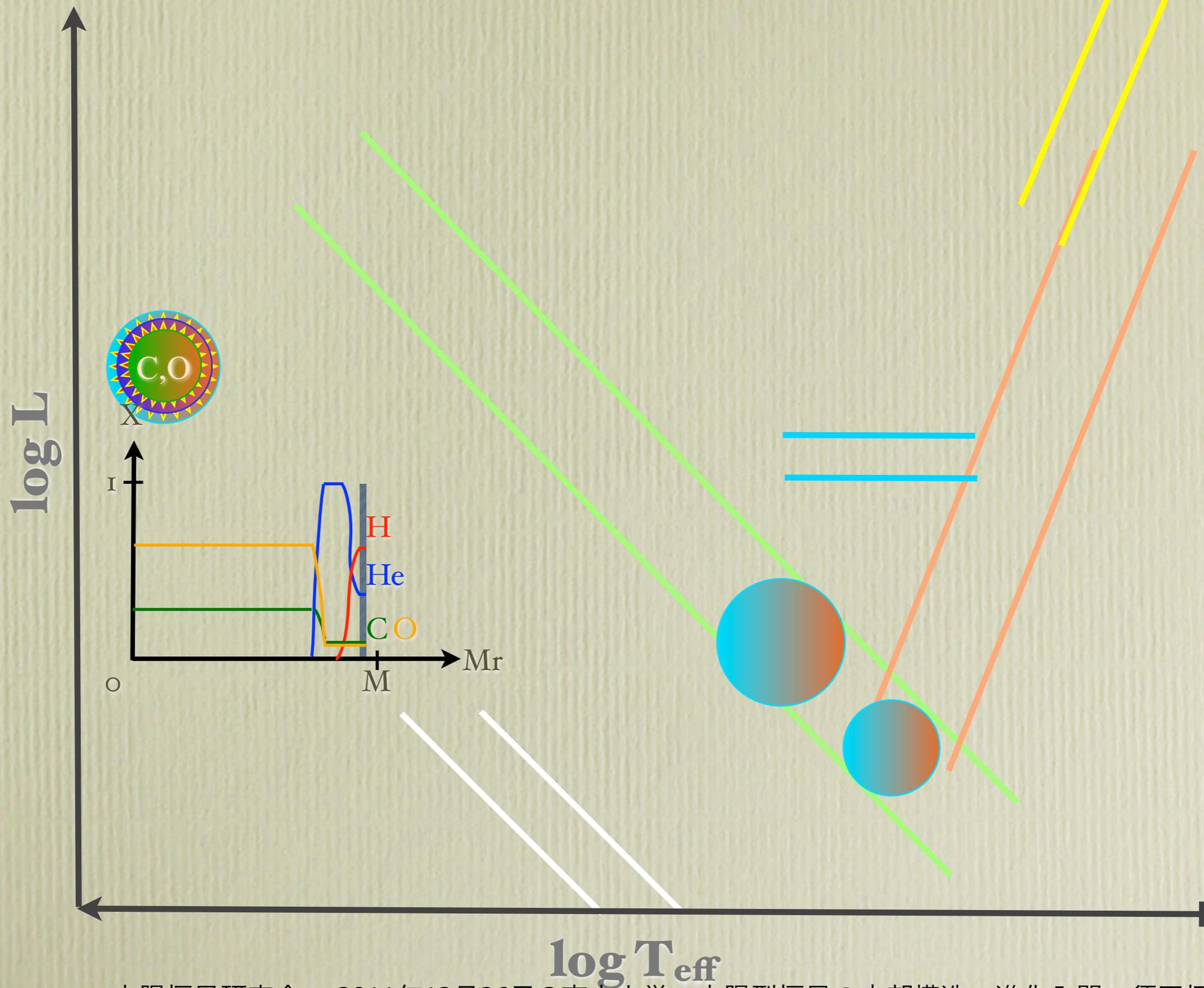
# Evolution of Low- and Intermediate-Mass Stars



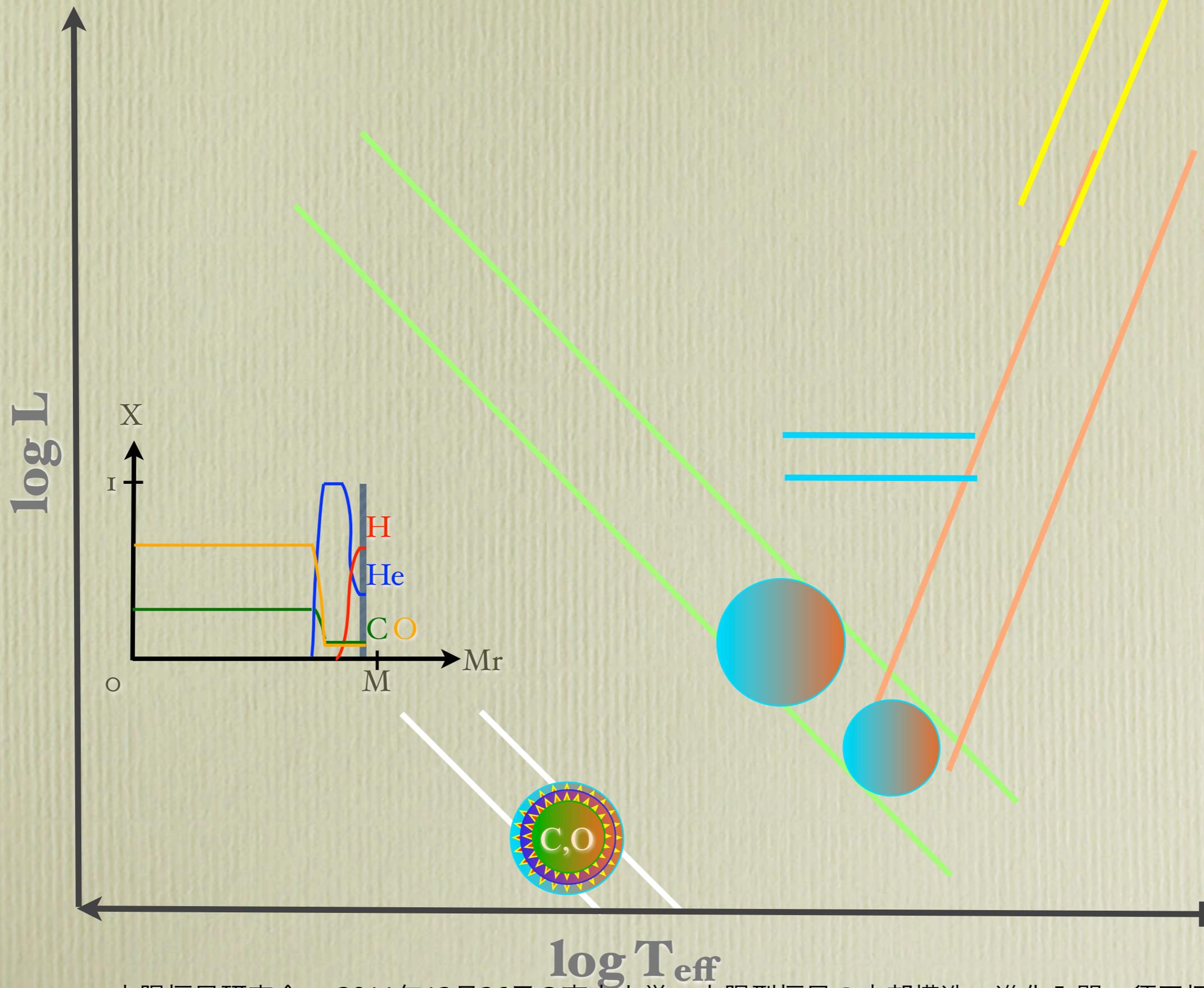
# Evolution of Low- and Intermediate-Mass Stars



# Evolution of Low- and Intermediate-Mass Stars



# Evolution of Low- and Intermediate-Mass Stars



# 恒星進化の基礎方程式

- Mass conservation (Eq. of continuity)

$$\frac{dr}{dM_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$$

- Pressure balance

$$\frac{dP}{dM_r} = -\frac{GM_r}{4\pi r^4}$$

- Radiative transfer

$$\frac{dT}{dM_r} = \frac{3\kappa L}{64\pi^2 a c r^4 T^3}$$

- Energy conservation

$$\frac{dL}{dM_r} = \epsilon_n + \epsilon_g - \epsilon_\nu$$

- Rate equations

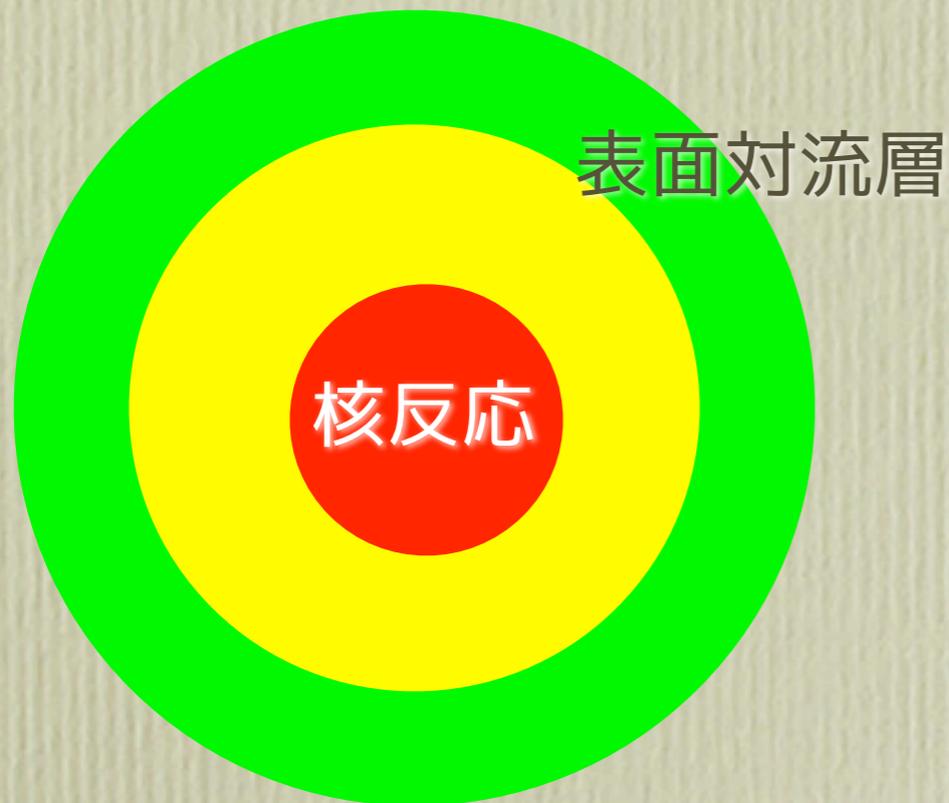
$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{\rho}{\mu_e} N_A \langle \sigma v \rangle_{ji} - \frac{\rho}{\mu_e} N_A \langle \sigma v \rangle_{ik}$$

## 太陽型星にまつわるQ&A (1)

- Q1. なぜ主系列では光度と温度がほぼ一定で安定なのか？  
(温度と光度は何で決まるのか？)
- Q2. 主系列における長い時間の経過につれての光度と温度の変化はどのように起こり、なぜそうなるのか？
- A. 主系列星の構造をポリトロープガス球で近似した場合、表面温度は  $T_{\text{eff}} \propto T_c^{1/2} M^{1/4}$  の依存性を持つが、中心温度  $T_c$  は核反応率の強い温度依存性によって大きく変化できないため。光度も中心の核反応率に依存しており、結果としてそれほど大きく変化しない。

# なぜ太陽は爆発しないか？

太陽の内部構造  
=点火した爆弾



核燃料は太陽を吹き  
飛ばすのに十分

## 爆発の機構

燃焼で熱（エネルギー）が発生して

熱（エネルギー）がたまる

⇒ 温度が上昇

⇒ さらに燃焼率が上がり、

さらに熱がたまる

⇒ さらに温度が上がる

（温度とともに圧力も上がる）

⇒ さらに燃焼率が上がり、

さらに熱がたまる

⇒ さらに温度が上がる

・・・

この過程が増加した圧力で系が吹き飛んでしまう＝爆発するまで続く

# Virial定理

理想気体の熱エネルギー

$$u = \frac{3}{2}nkT \quad n: \text{個数密度}$$

ガス球の全熱エネルギー

$$\begin{aligned} U &= \int_0^R u 4\pi r^2 dr = \frac{3}{2} \int_0^R P 4\pi r^2 dr \\ &= \left[ \frac{1}{2} 4\pi r^3 P \right]_0^R - \frac{1}{2} \int_0^R \frac{dP}{dr} 4\pi r^3 dr \quad \left( \frac{dP}{dr} = -\rho \frac{GM_r}{r^2}, \quad \frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \right) \\ &= \frac{1}{2} \int_0^R 4\pi r^2 \rho dr = -\frac{1}{2} \Omega \quad \Omega: \text{重力エネルギー} \end{aligned}$$

$\left( -\frac{GM_r}{r} : \text{質量 } M_r, \text{ 半径 } r \text{ のガス球表面の重力ポテンシャル} \right)$

ガス球の全エネルギー:  $E = U + \Omega = -U = \frac{1}{2} \Omega$

エネルギー収支:  $\delta Q = \delta E = -\delta U = \frac{1}{2} \delta \Omega$

負の比熱

$$\begin{aligned} \delta Q < 0 &\Rightarrow \delta U > 0 \\ \delta Q > 0 &\Rightarrow \delta U < 0 \end{aligned}$$

# 星の熱力学的安定性

## 「負の比熱」

恒星の場合:

加熱(冷却) ⇒ 温度上昇(下

降) = 圧力上昇(下降)

⇒ 重力より大きくなり膨張(小さくなり収縮)

⇒ 温度・圧力とも降下(上昇)

元の圧力まで降下(上昇)したとき

重力は小さく(大きく)なっているのでさらに膨張(収縮)

⇒ 膨張のため最初の温度より低く(高く)なる。

加熱 → 温度上昇

増圧 → 膨張

→ 重力の減少

→ さらに膨張

温度降下

## 太陽型星にまつわるQ&A (2)

- Q3. 中心の水素が燃え尽きるとなぜ外層が膨らむのか？
- A3. ヘリウム中心核の質量がSchönberg-Chandrasekhar質量限界を超えると中心部が重力収縮を始めるが、水素燃焼殻は温度依存性の強さによって高温になれない。従って水素燃焼殻は密度と圧力が下がり、それを補うために重力を減らすように外層が膨張するため。

### Schönberg-Chandrasekhar質量限界

$$q_{SC} \simeq \frac{M_1}{M} \simeq 0.37 \left( \frac{\mu_{1,e}}{\mu_c} \right)^2$$

$M_1$ : ヘリウム中心核の質量  
 $\mu_{1,e} [c]$ : 外層[中心]の平均分子量

水素燃焼殻の場合は $q_{SC} \approx 0.08$

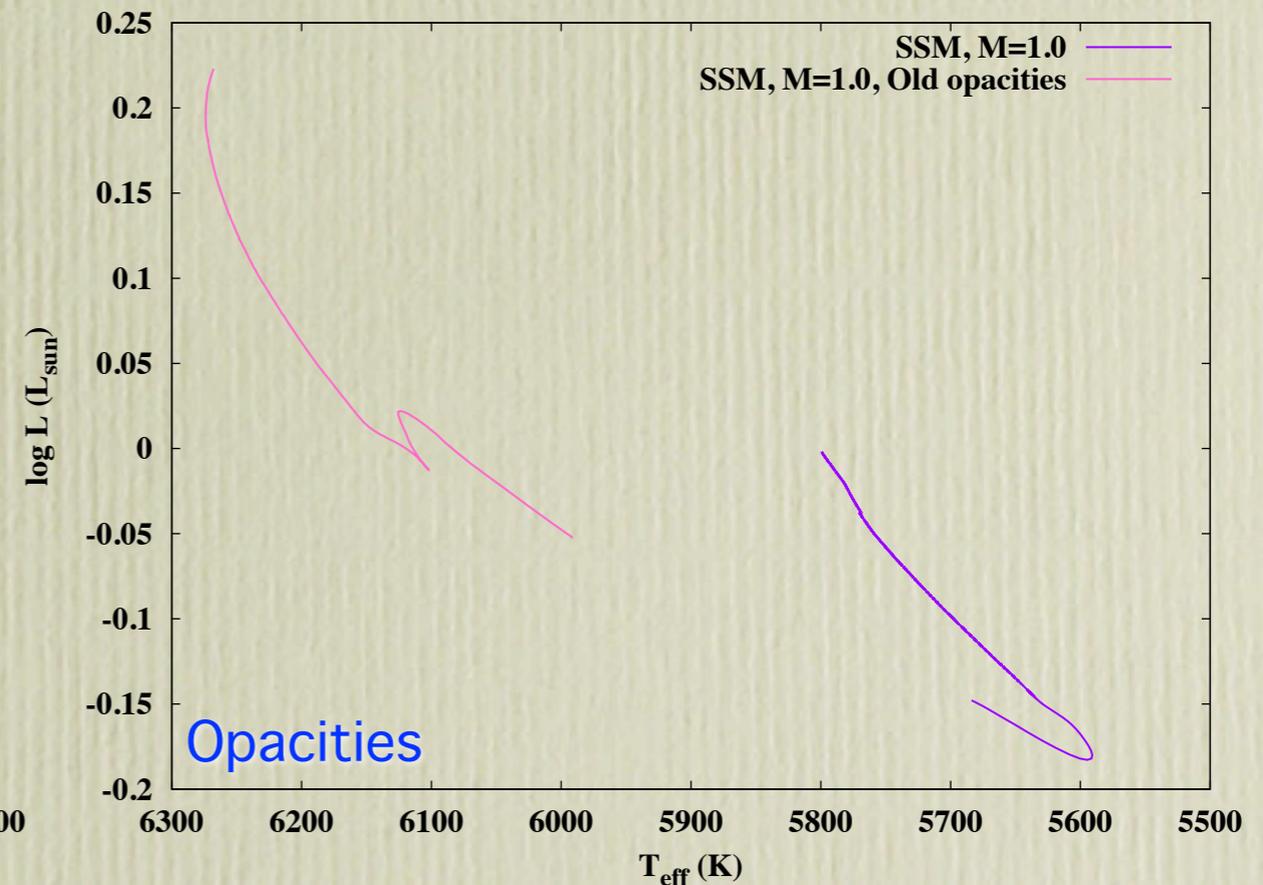
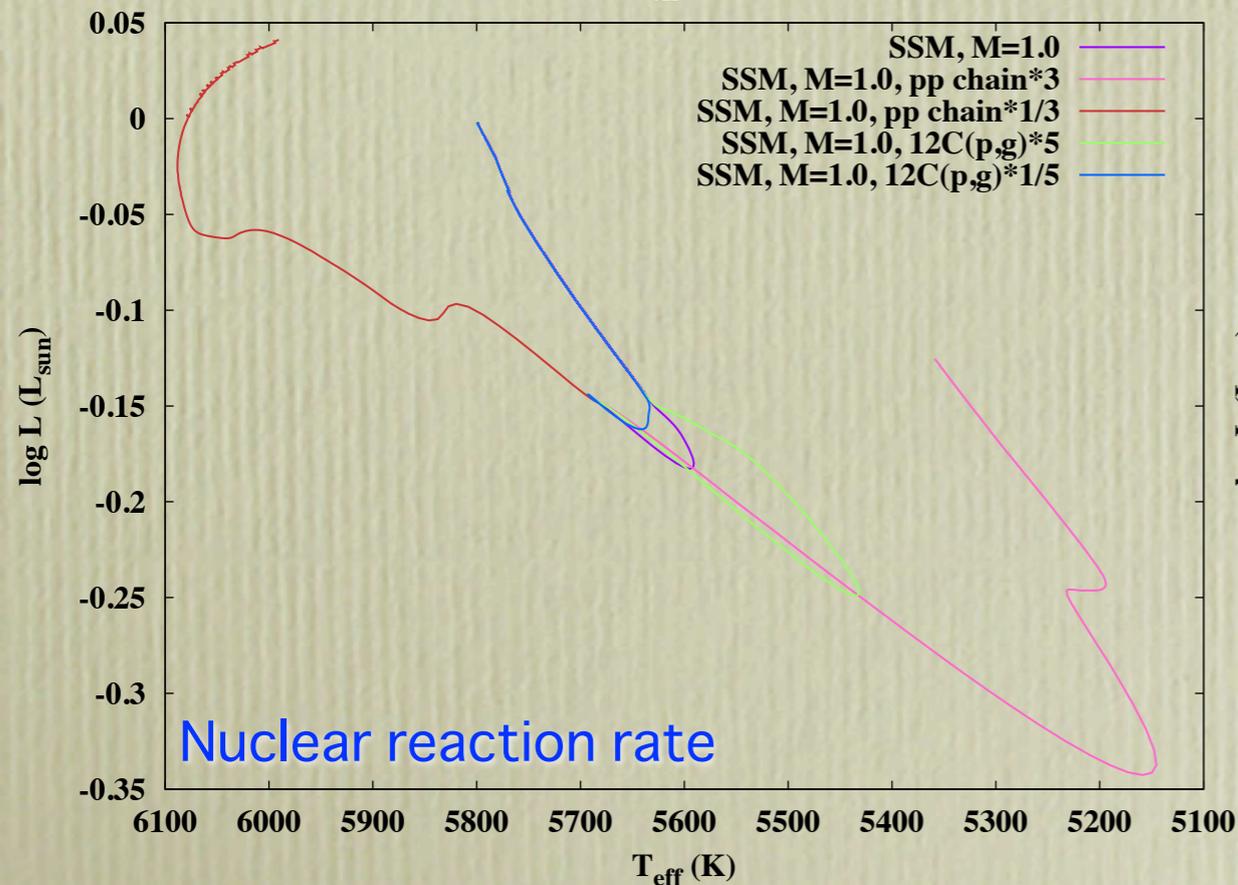
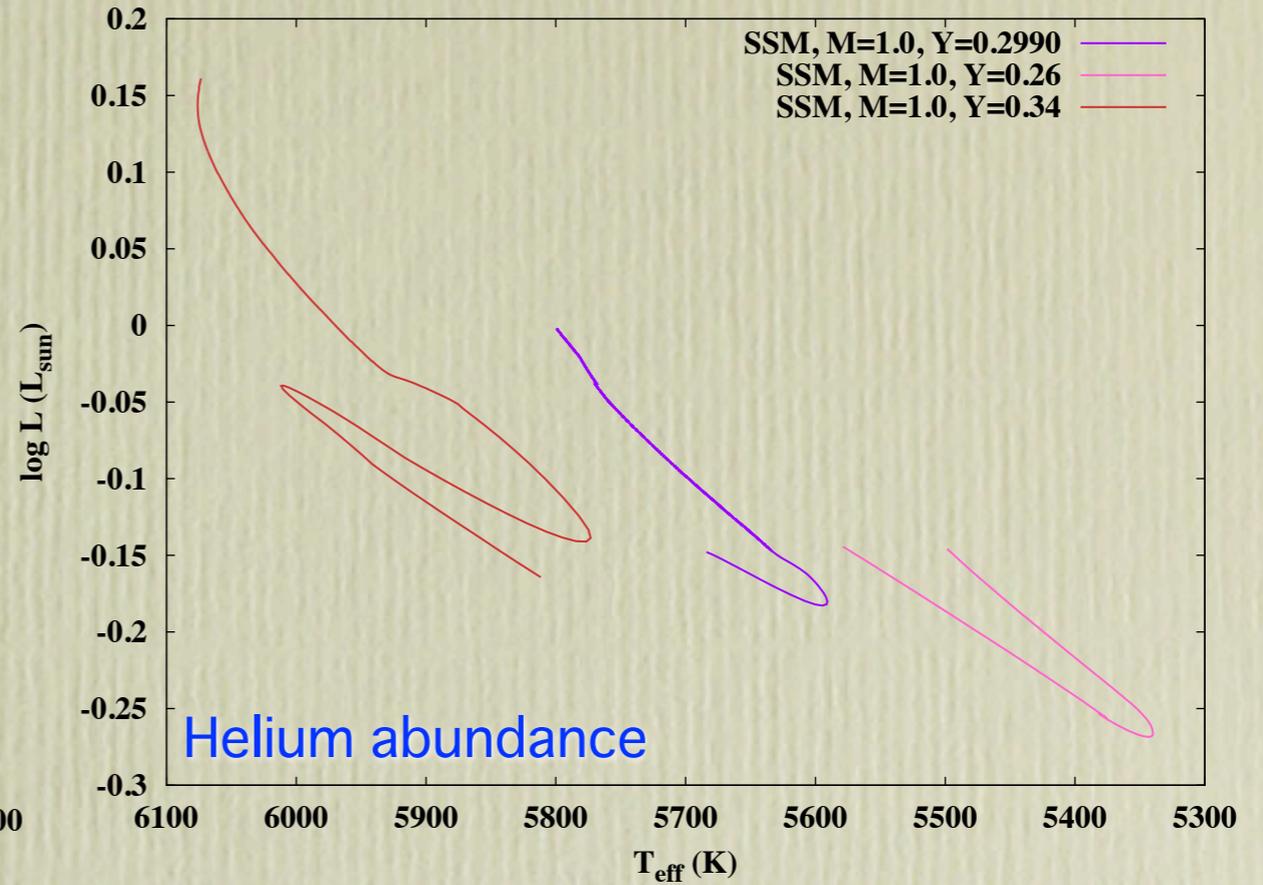
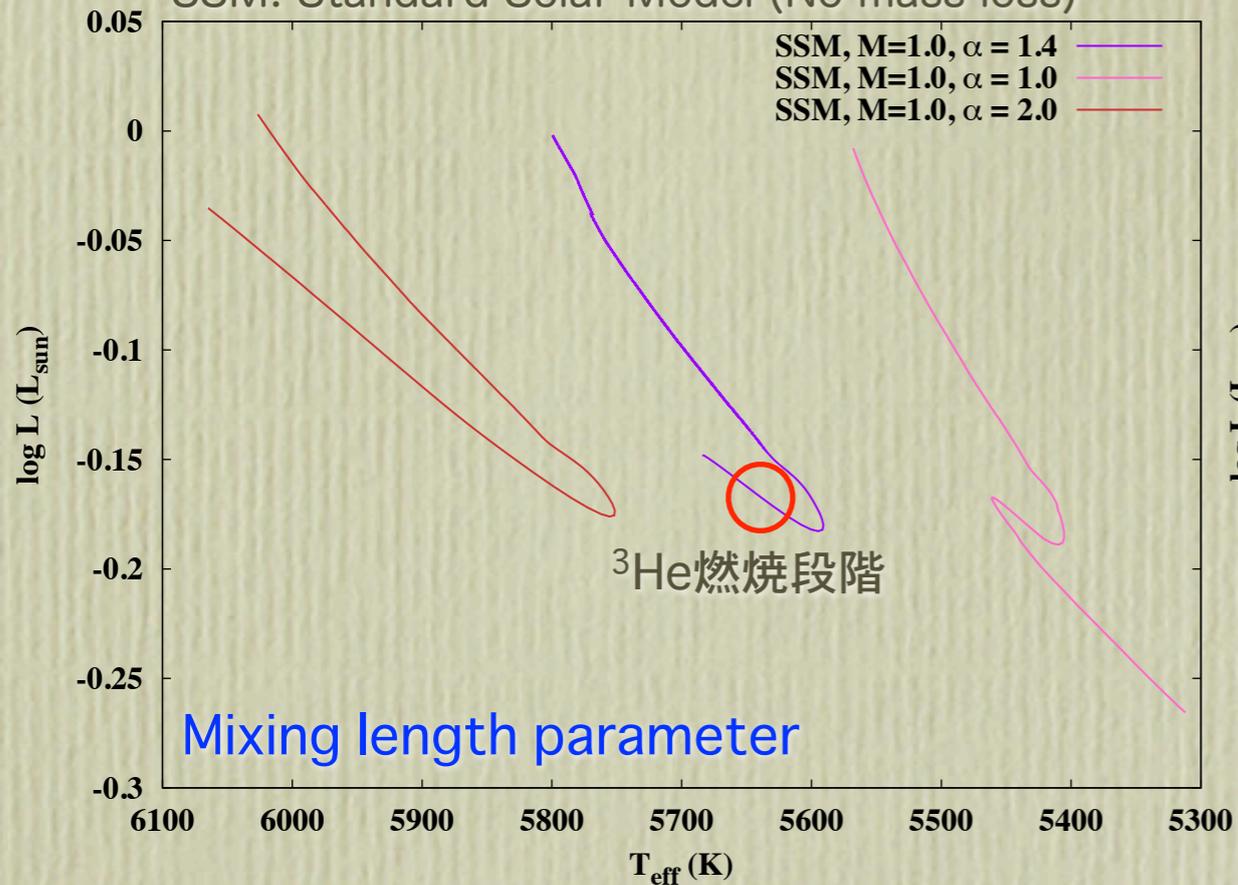
## 太陽型星にまつわるQ&A (3)

- Q4. 質量・化学組成・年齢で星の構造は一意的に決まるのか？
- A4. 現在の恒星進化の標準理論ではそのとおりであるが、回転や磁場などの要素の影響は未知である。それ以外にも、現在の標準的な一次元の恒星モデルにおいては入力物理にいくつかの不定性がある。代表的なものは、対流層の効率を決める混合距離 (Mixing Length Parameter) である。また、opacityや核反応率など、恒星物理の観点から物理量の更新・変更がありうる。

# Dependence on Input Physics

zero-age main sequenceから $t=4.65$  Gyrまで計算

SSM: Standard Solar Model (No mass loss)



## 2. これまでの進歩と今後の 課題

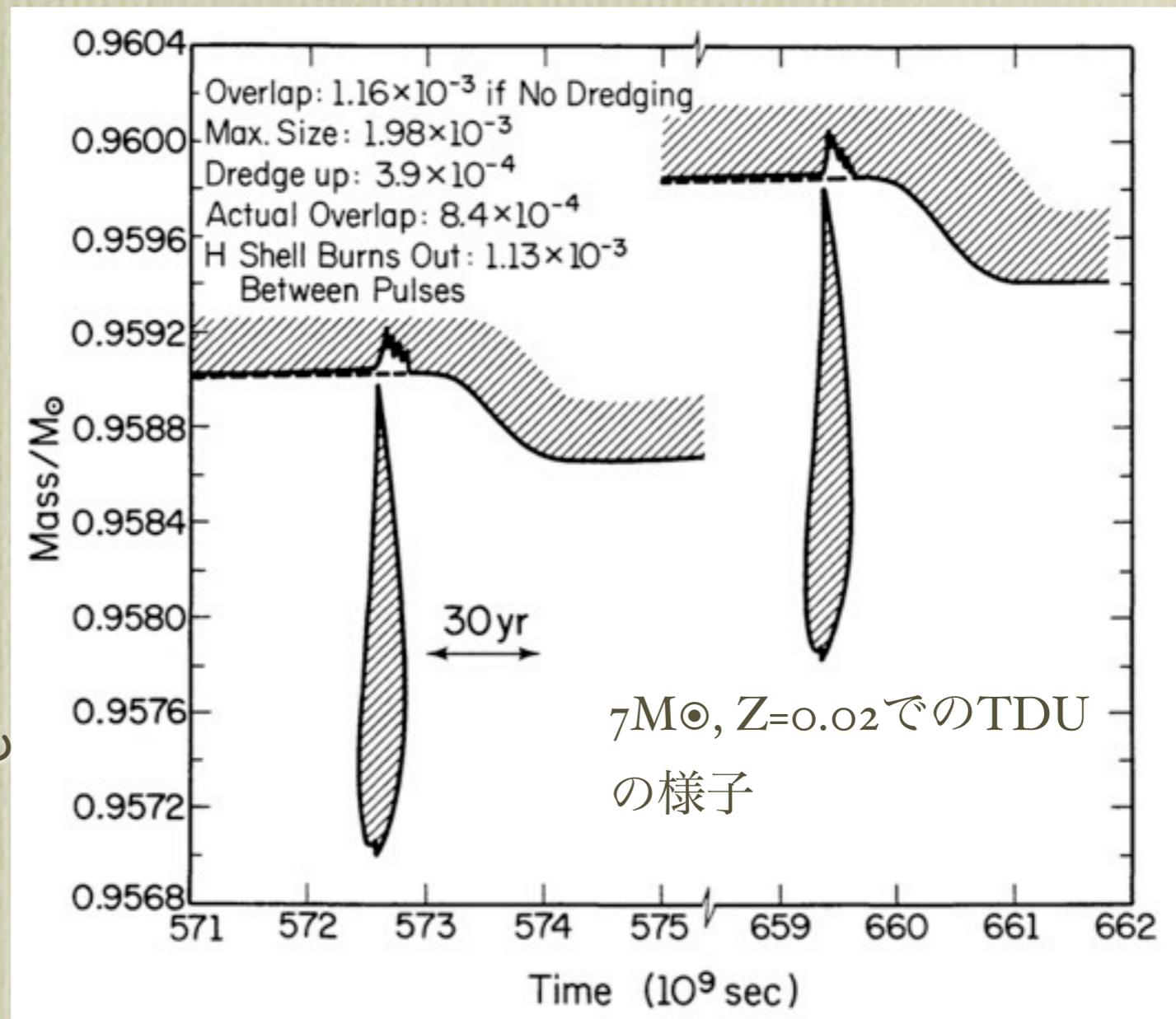
# 恒星進化の標準理論

- 一次元球対称＋熱対流による物質混合
- 重力熱力学系としての星の構造と進化
  - Hayashi, Hoshi, and Sugimoto (1962, HHS)
- 恒星内部の元素合成
  - Cameron (1955)
  - Burbidge, Burbidge, Fowler, and Hoyle (1957, B2FH)
- 恒星進化の数値シミュレーション
  - Schwarzschild & Harm (1962,1965)
  - Iben (1965)
  - Paczynski (1970)
  - Sugimoto (1970)
  - Eggleton (1971)
- 低・中質量の恒星進化の基本的枠組み
  - Iben & Renzini (1983, ARA&A)
- AGB星の重要な特性
  - Third dredge-up: Iben (1975)
  - Hot bottom burning: Sugimoto (1971), Uus (1973), Iben (1973)

# Dredge-up of Carbon

- AGB段階での表面对流層の侵入(Iben75)
- 炭素星との比較
  - AGB段階で炭素のくみ上げが起こる条件
    - Luminosity
    - Helium core mass
  - Magellanic Cloudsとの観測とは合わない。
    - Core massが閾値( $\sim 0.6M_{\odot}$ )よりも大きくなるとTDUが起こらない(Iben+Renzini83)。
    - Carbon star mystery (Iben81)
- 最近の計算では $M_c < 0.6M_{\odot}$ でもTDUが起こっている。
  - Weiss+Ferguson09:  $M_c = 0.508M_{\odot}$  for  $1.0M_{\odot}$

Iben83



## CNO Cycle at the Base of Convective Envelope

- core massの大きいAGB modelでは、表面对流層の底が高温になり ( $T_{\text{BCE}} > 50 \text{ MK}$ )、CN cycleによってNが増大する(Iben75,76)。
  - 十分高温では $T_{\text{BCE}} \sim 80 \text{ MK}$ )、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ は平衡値(3.4; Truran72)に近づく。
- $7M_{\odot}$ モデルの計算で発見(Iben75)。
  - AGB表面の元素組成変化を計算する化学進化モデル(Iben+Truran78)によってHBBの起こるmass rangeが求められた(Renzini+Voli81)。
    - HBBが起こるか否かはmixing length parameter ( $\alpha = l_{\text{mix}}/H_{\text{P}}$ )に強く依存する(Iben76)。
    - $(\alpha, M_{\text{HBB}}) = (2, 3.3M_{\odot}), (1.5, 4M_{\odot}), (1, 6.8M_{\odot})$  (Renzini+Voli81)
- 外層の質量が小さくなるとHBBが起こらなくなる。(Frost+98, Karakas+Lattanzio07)
  - $M_{\text{crit}} = 1.5 M_{\odot}$  (Karakas+Lattanzio07)
- AGBの直接観測による証拠は無い?
  - Smith+Lambert83,85の観測では $N > C$
  - 超金属欠乏星ではCS30322-023はAGB star?(Masseron+06)

## Dependence on Models

- $M_{\text{HBB}}$ の値は金属量に依存する。
  - 太陽組成では $5M_{\odot}$ くらいだが (Forestini+Charbonnel97)、 $Z=0$ では、 $M_{\text{HBB}} = 3M_{\odot}$ まで下がる (Siess+02)。
- $M_{\text{HBB}}$ は、星のコードにも依存する (表面对流層の数値的な取り扱いの違い) 。
  - $M_{\text{HBB}} = 2 M_{\odot}$  at  $Z=0$  (Campbell+08)
  - $M_{\text{HBB}} \sim 5 M_{\odot}$  at  $Z=Z_{\odot}$  (Weiss+Ferguson09)
  - $M_{\text{HBB}} = 4 M_{\odot}$  at  $Z=0.004$  (Ventura+D'Antona08)

## s-process Elements

- 中性子捕獲によって合成される元素のうち、中性子捕獲よりも $\beta$ 崩壊の方が素早く起こるような環境で作られる元素。
- 観測的証拠はAGB星での $^{99}\text{Tc}$ の検出。
  - 半減期 $2.13 \times 10^5$  yrでAGB thermal pulseの周期と同程度
    - 表面で観測されれば、s-processによる合成と表面への輸送の証拠となる。
  - AGB星での検出はMerrill52が最初。
  - 定量的な観測は、Smith+Wallerstein83, Dominy+Wallerstein86など。

## Two Key Reactions for s-process

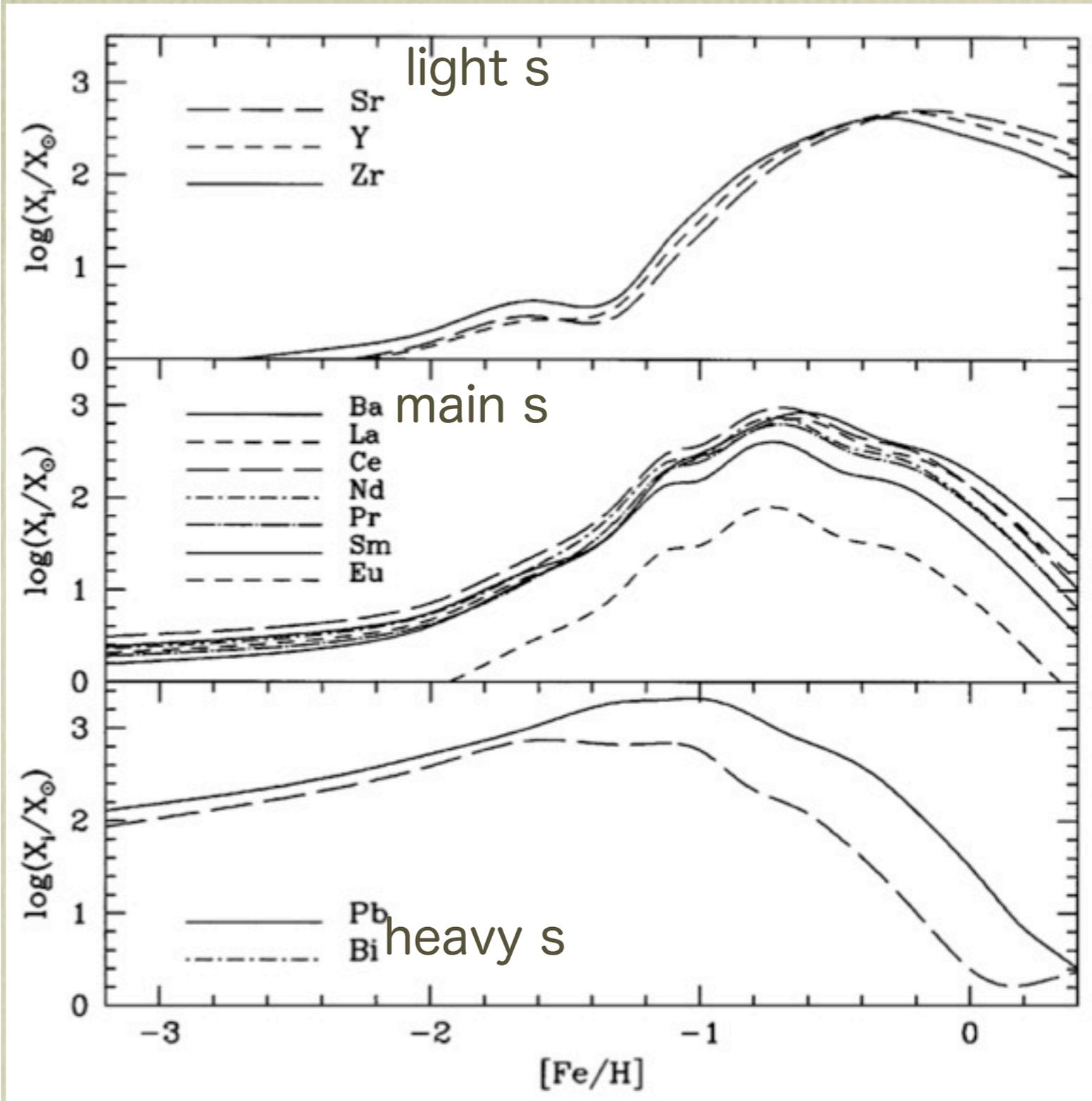
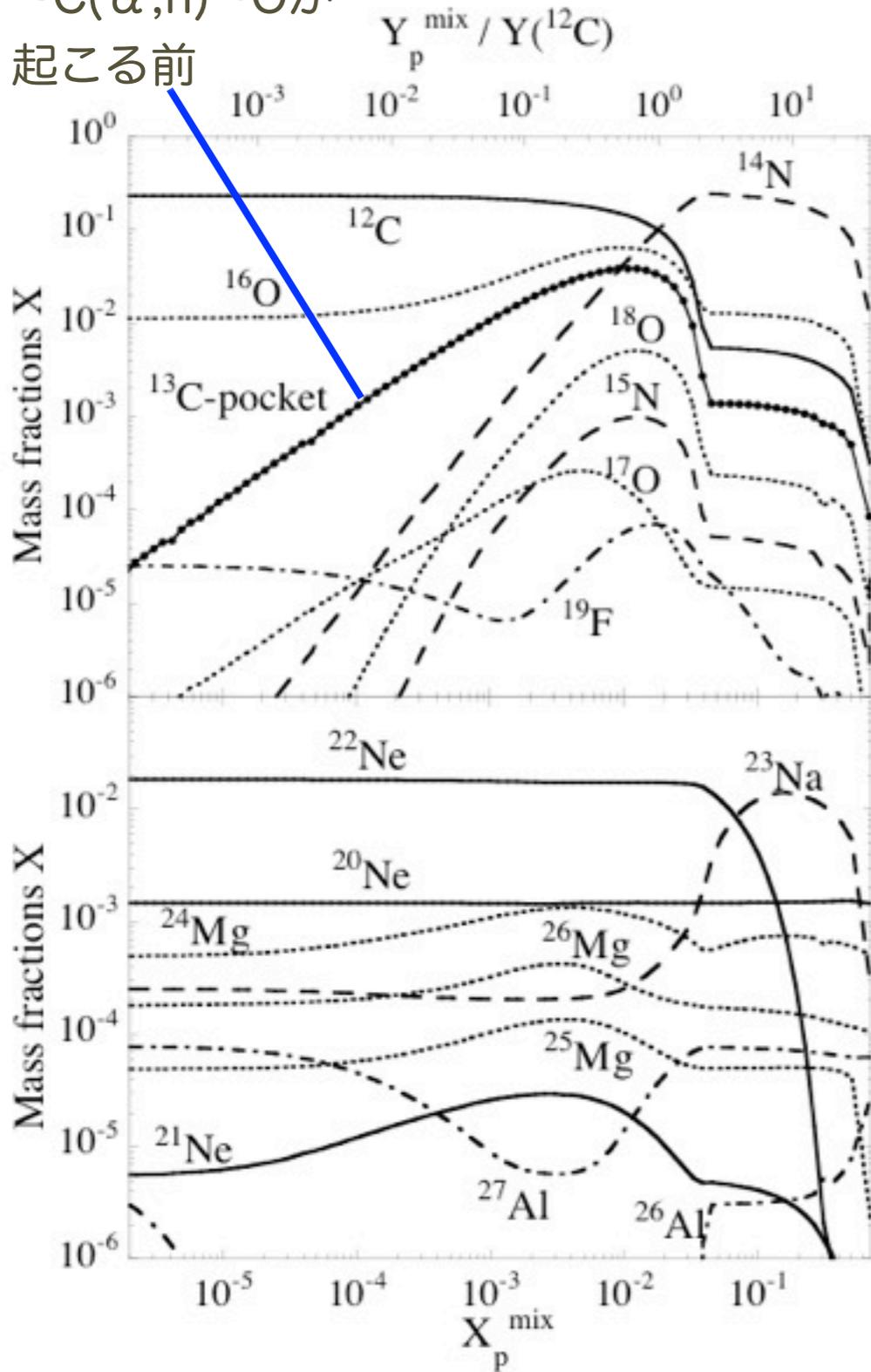
- AGB星で作られると考えられており、中性子源は以下の2つの反応によって放出される(Cameron55).
  - $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 
    - $^{13}\text{C}$  pocket: TDUの後に表面对流層の底に水素が混入⇒炭素の水素捕獲
  - $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 
    - Massive AGB stars ( $M_c > \sim 1 M_{\odot}$ )のHe対流層で $^{14}\text{N}$ から $^{22}\text{Ne}$ が作られる。
    - $^{22}\text{Ne}$ ソースの方が $^{13}\text{C}$ ソースよりも高温の環境で機能する。
- $^{13}\text{C}$  pocketの効率はfree parameter
  - opacity? shear mixing? overshooting?

# s-process by $^{13}\text{C}$ Pocket

$^{13}\text{C}$  pocket内での組成分布

s-processの金属量依存性

$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ が  
起こる前

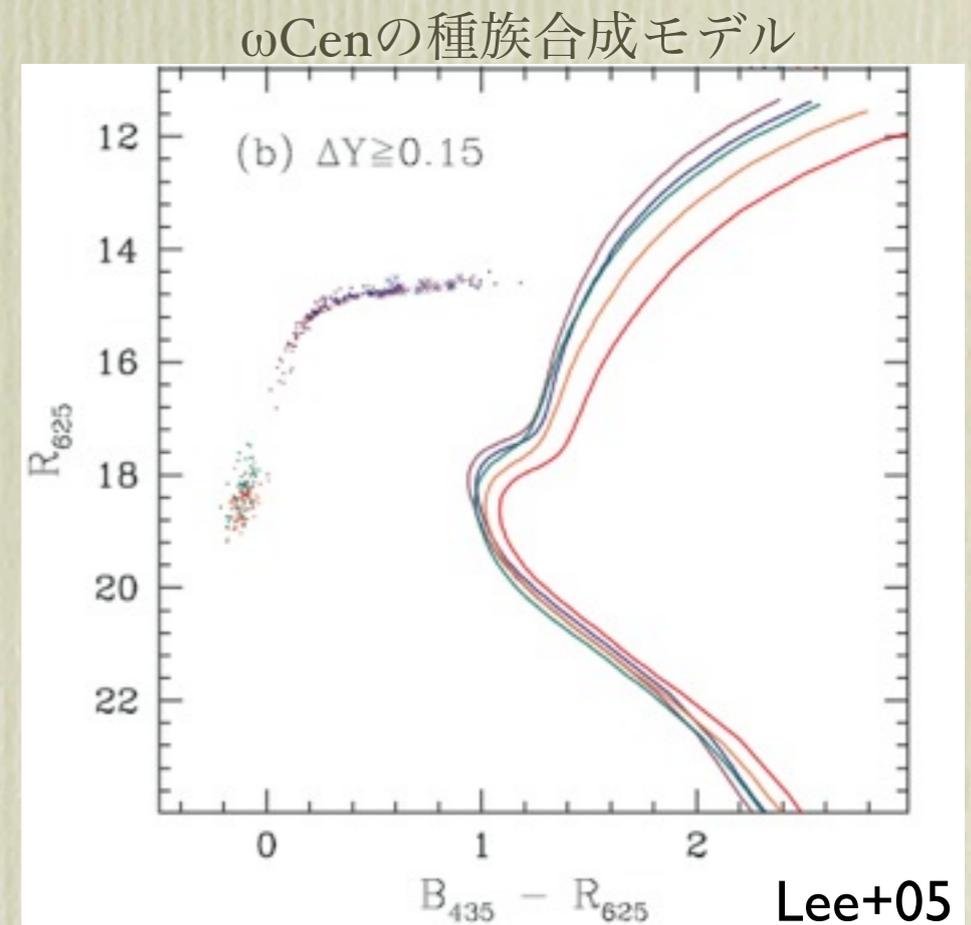


# Mass Loss

- Mass lossの機構はまだ解明されていない。
- RGBではReimers75がよく使われる。
  - free parameter  $\eta_R = 0.3-1.0$
  - low-mass( $\sim 0.8M_\odot$ ) RGB以外ではほとんど効かない。

$$\dot{M}_R = -4 \times 10^{-13} \frac{(L/L_\odot)(R/R_\odot)}{(M/M_\odot)} \eta_R \quad [M_\odot \text{yr}^{-1}]$$

- 球状星団の水平分枝を説明するのに有効
- 球状星団 $\omega$ CenのRGBからのMass loss
  - McDonald+09



## Mass Loss on the AGB

- Dust-driven mass loss(Bowen+Willson91,Wachter+08)
  - Carbon-dust (SiC)がmass lossに効くと考えられている。
- AGBではVassiliadis+Wood93が有名。
  - Mira型変光星のmass loss rateと周期の関係を利用。
  - あるLuminosityを超えると一気に質量放出する (superwind)。

$$\log \dot{M}_{WR} = -11.4 + 0.0125 \left[ P - 100 \max \left( \frac{M}{M_{\odot}} - 2.5 \right) \right] \quad [M_{\odot} \text{yr}^{-1}] \quad (P[\text{days}])$$

$$\log P = -2.07 + 1.94 \log \frac{R}{R_{\odot}} - 0.9 \log \frac{M}{M_{\odot}} \quad [\text{days}]$$

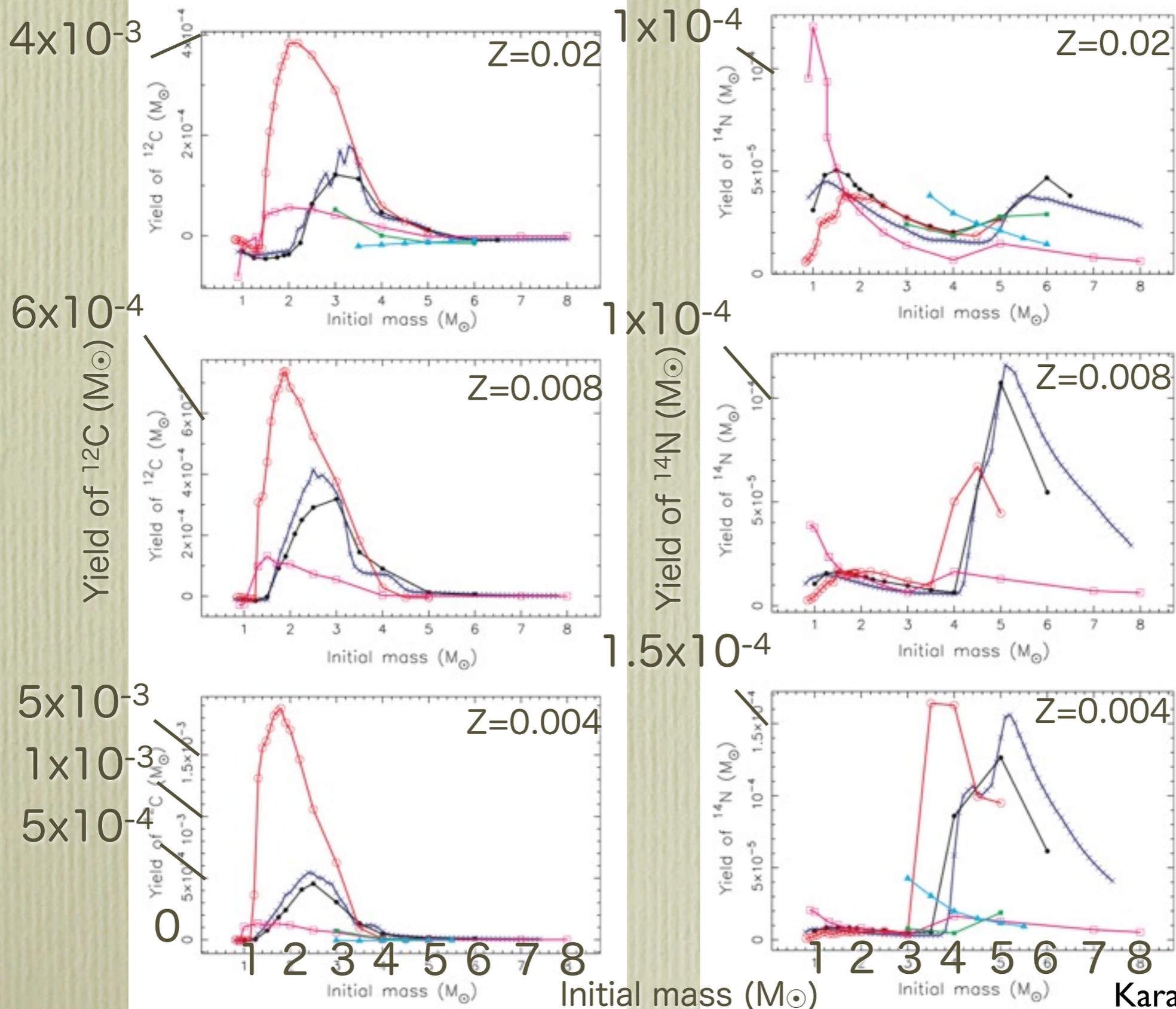
- superwind( $dM/dt \sim 10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}$ )の結果がPlanetary Nebulae?

$$\log \dot{M} = -5.65 + 1.05 \log \left( \frac{L}{10^5 L_{\odot}} \right) - 6.3 \log \left( \frac{T_{\text{eff}}}{3500\text{K}} \right) \quad [M_{\odot} \text{yr}^{-1}]$$

- O-rich AGBからのmass loss (van Loon+05)

# Chemical Yield from AGB Stars

Mass Loss Historyで足し合わせたAGB yield

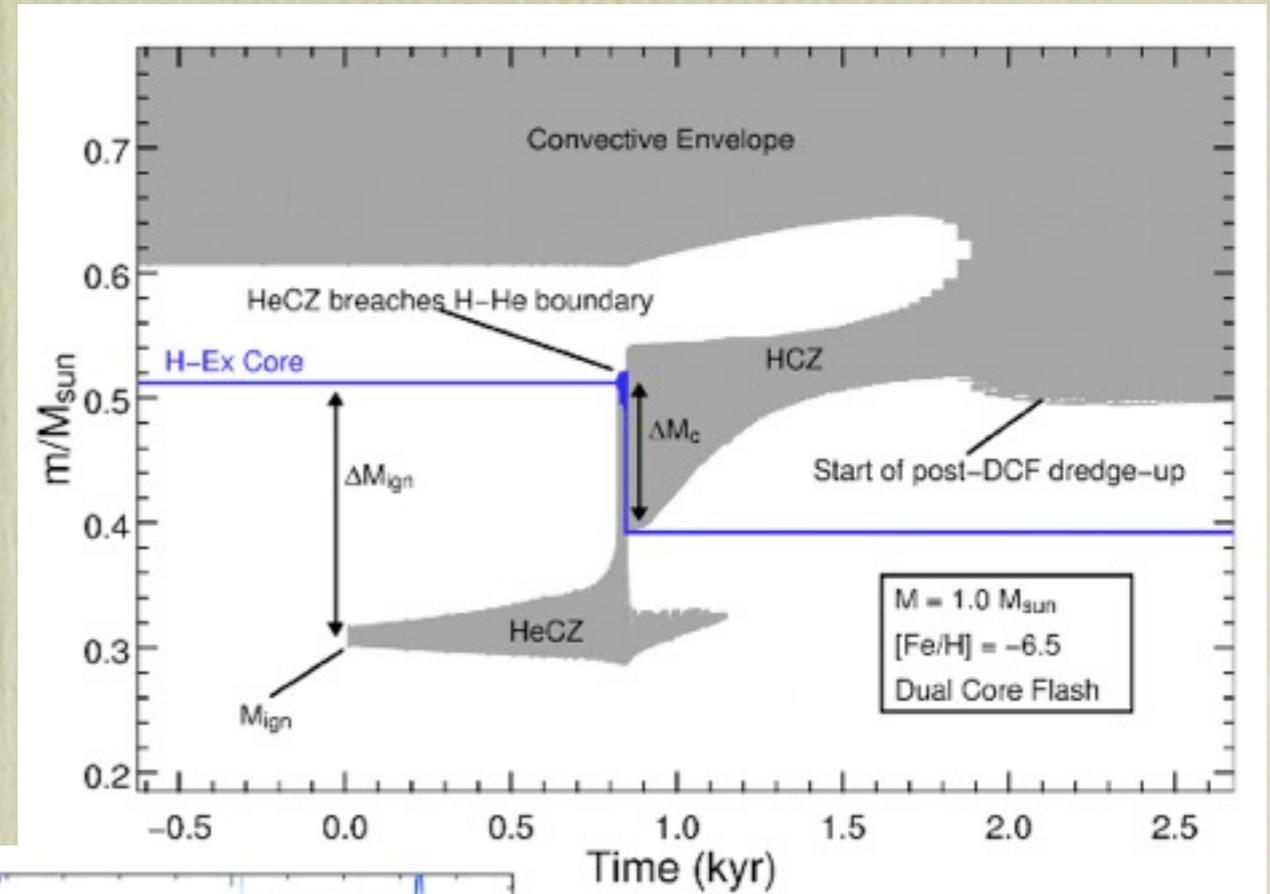
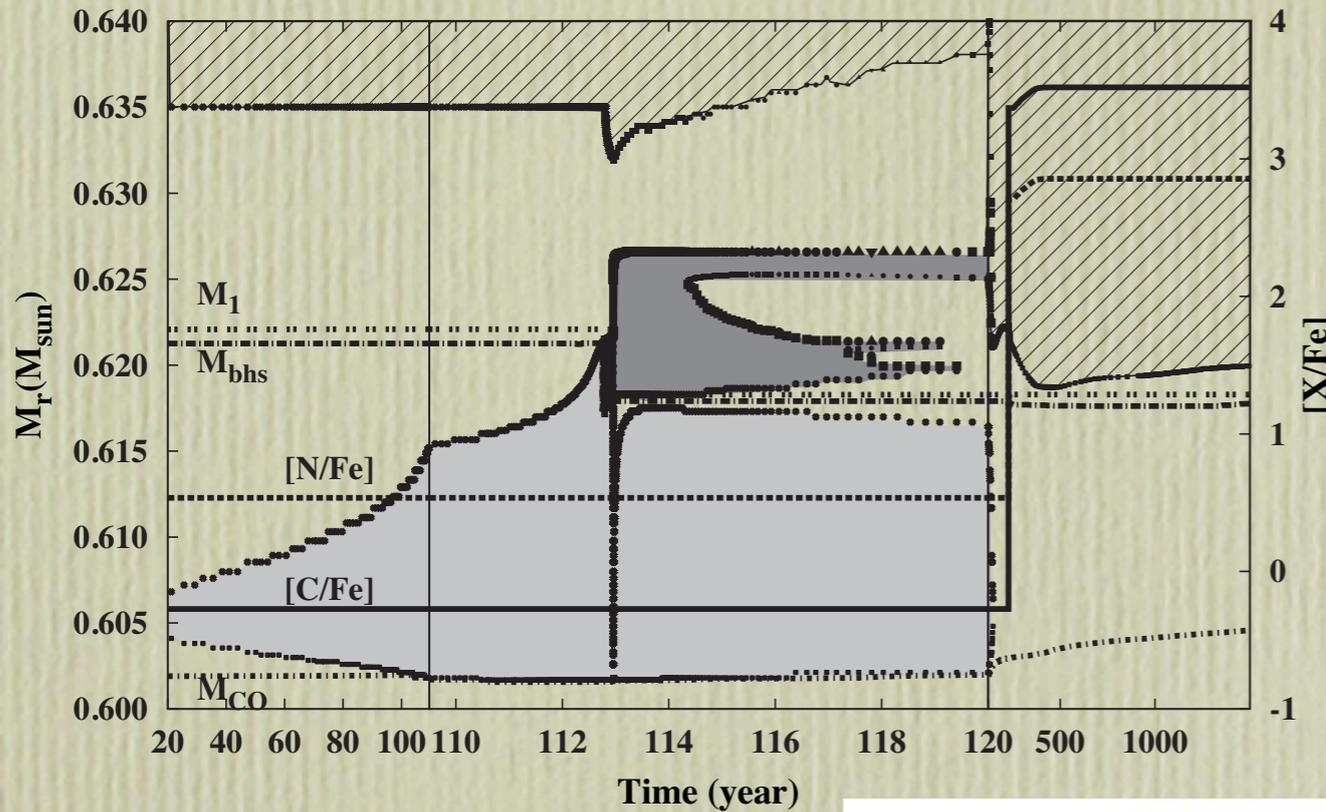


# Stellar Evolution at Low-Mass and Low-Metallicity

- No important phenomena was found in the earlier computation on the evolution of  $Z=0$  and low-mass stars.
  - computations of  $\sim 0.8 M_{\text{sun}}$ : Wagner 74, D'Antona 82, Guenther+83
- **Hydrogen mixing into helium convective layer for low-mass  $Z_{\text{CNO}} < 10^{-7}$  models** (Hollowell+90, Fujimoto+90)
- As a consequence of hydrogen mixing, nuclear flash causes the dredge-up of nuclear products and **drastic changes of surface composition** (Helium-Flash Driven Deep Mixing, **He-FDDM**).
  - 0.8-1.0  $M_{\text{sun}}$  models: Hollowell+90, Fujimoto+90, Cassisi+96, Fujimoto+00, Schlattl+00, Weiss+04, Straniero+04, Iwamoto+04, Picardi+04, Campbell+08, Lau+09
  - 2-8  $M_{\text{sun}}$  models: Fujimoto+00, Chieffi+01, Herwig+03, Iwamoto+04, Campbell+08, Lau+09
  - models with hydrogen mixing: Schlattl+01, Suda+04, Suda+07
  - No or undetectable hydrogen mixing: Weiss+00, Marigo+01, Siess+02, Gil-Pons+05, Gil-Pons+07

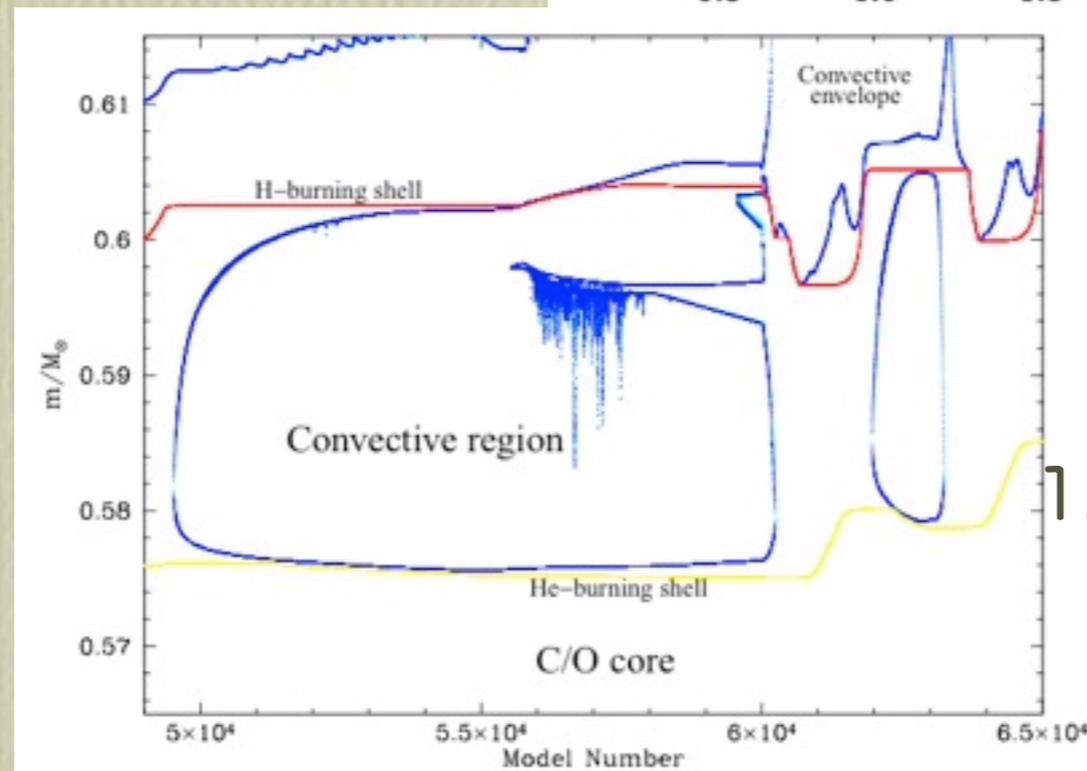
# Hydrogen Ingestion Into the Helium Flash Convective Zone

$2M_{\odot}$ ,  $[Fe/H]=-4$



Suda+Fujimoto10

He対流層への水素の混入。水素層とのentropy barrierが少ないために起こる。水素flashを伴い、その後の表面对流層の侵入によってCNが増大。



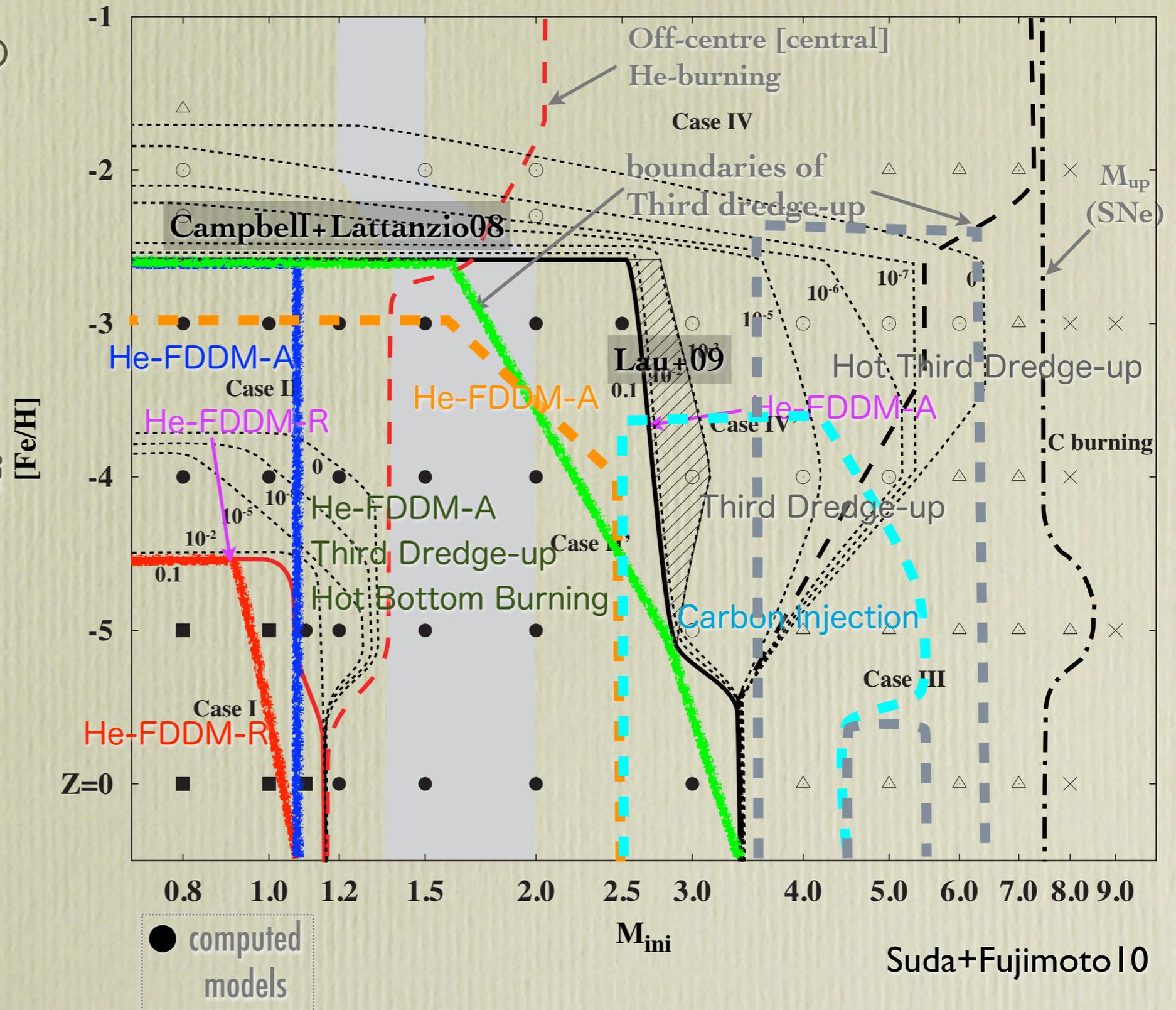
Campbell+Lattanzio08

$1.5M_{\odot}$ ,  $[Fe/H]=-3.3$

Lau+09

# Final Fate of Stellar Evolution

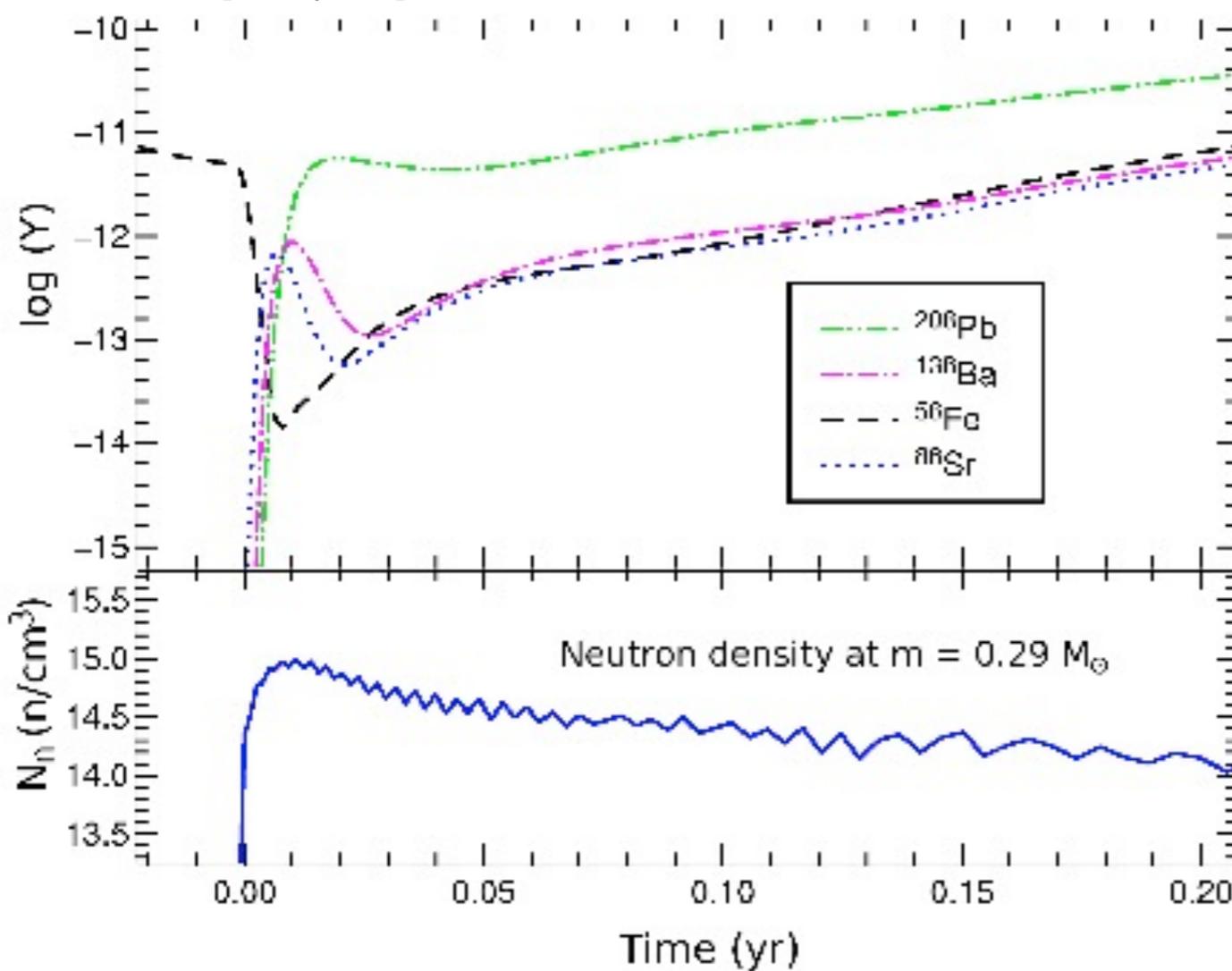
- SF10, CL08, L09のどの計算でも水素混合が起こる境界は似ている。
- 水素混合が起こる  $[Fe/H]$  は  $-2.5$  --  $-3$
- Carbon Injection: He層の炭素が水素層に混入。
- Hot third dredge-up: TDUよりも深い dredge-up。Herwig03でも報告されている。



# Convective s-process in Extremely Metal-Poor Stars

- He対流層への水素混合によって $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ が起こり中性子捕獲反応が進行する(Fujimoto+00, Suda+04)
- He core flashの場合のpost-processing (Campbell+10)

$1 M_{\odot}$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}] = -6.5$



Element	Stellar surface [model]	$f_{DIL} \approx 3 \times 10^{-4}$ [model]	HE 1327-2326 [observations]
$\log \epsilon(\text{Li})$	1.63	1.87	< 0.62
C	5.08	3.78	3.78
N	4.98	3.68	4.28
O	5.18	3.88	3.42
F	4.19	2.90	
Na	2.77	1.47	2.73
Mg	2.17	0.87	1.97
Al	1.48	0.18	1.46
Ca	1.31	0.36 (0.03)	0.44 - 0.91
Ti	2.83	1.59 (0.57)	0.91
Ni	1.04	-0.04 (0.01)	0.18
Rb	4.29	3.05 (1.88)	
Sr	4.19	2.94 (1.79)	1.17
Y	4.32	3.07 (1.91)	
Zr	4.48	3.23 (2.06)	
Ba	5.07	3.82 (2.65)	< 1.40
La	5.11	3.86 (2.69)	
Ce	5.26	4.01 (2.84)	
Nd	5.03	3.79 (2.62)	
Eu	4.26	3.01 (1.90)	< 4.64
Pb	6.25	5.00 (3.82)	

Campbell+10

$[\text{X}/\text{Fe}]_{\text{conv}}$

$[\text{X}/\text{Fe}]_{\text{surf}}$

# 3D Hydrodynamical Simulation of Convective Zone

He対流層への水素混合

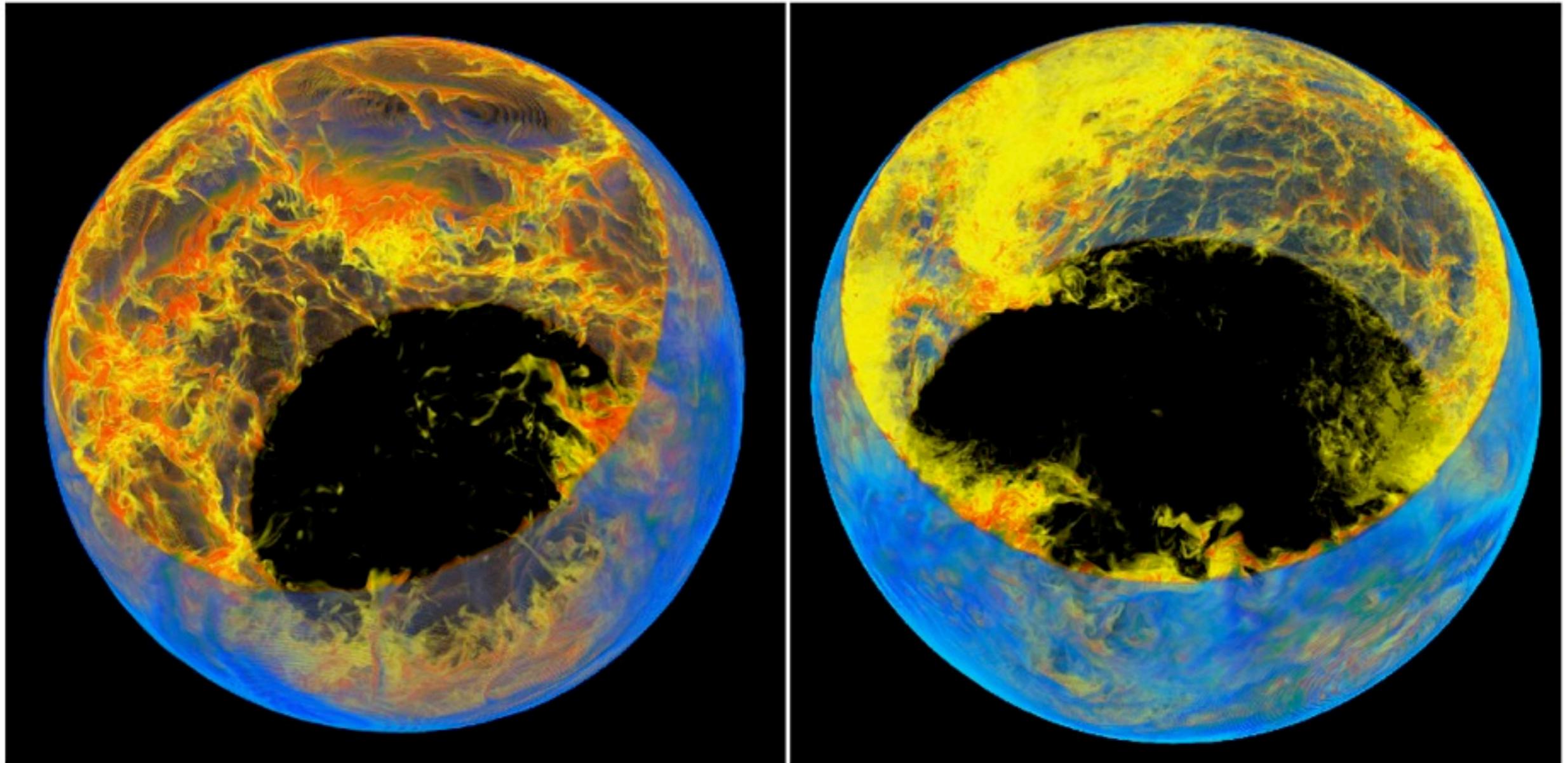
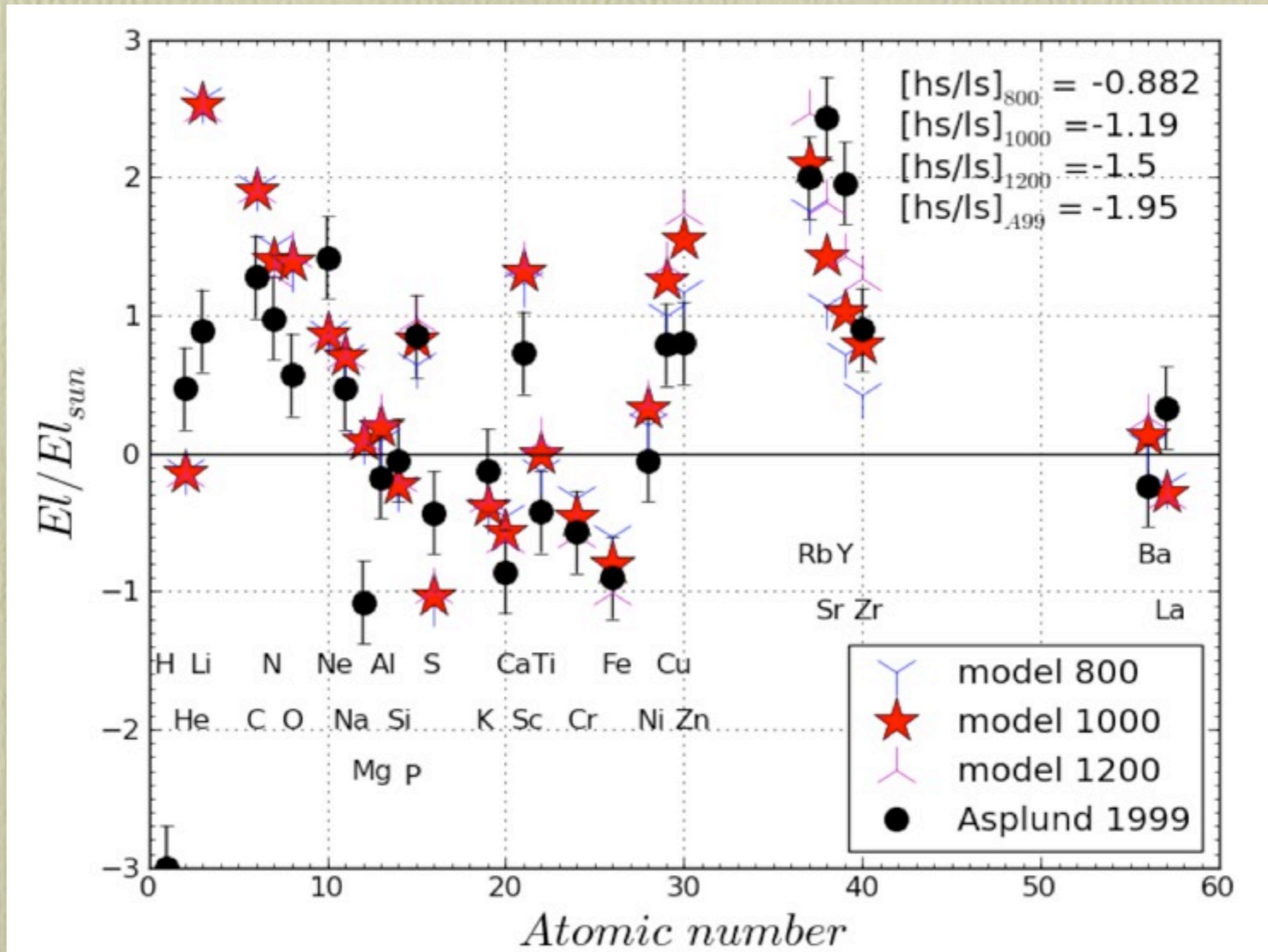


FIG. 3.— Hydrodynamic picture of H-entrainment into He-shell flash convection near the luminosity peak of the flash. The setup is based on a stellar evolution model corresponding to the situation shortly after time  $t_0$  shown in Fig. 2, when the top of the convection zone is just making contact with the H-rich stable layer. Colors indicate abundance of proton-rich material that is originally only in the stable layer above the convection zone that is entrained into the convection zone. Volume fractions of about  $\sim 1\%$  are shown as blue, while concentrations that are close to one are transparent. The lowest concentration yellow blobs that are mixed deep into the convection zone correspond to  $\sim 0.01\%$ . Abundance levels below approximately  $5 \times 10^{-5}$  have been made transparent as well. The left panel shows a snapshot from a  $384^3$  grid while the right panel image is from a run on a  $576^3$  grid. Slightly different times are shown and similar but not identical color maps have been used. The PPM simulation is described in more detail in Sect. 4.1, and the simulation code is described in Sect. A.2.

# Abundance Variations to Reproduce Sakurai's Object



## AGB星進化モデルの現状と今後の課題

- AGB星の進化は基本的な枠組みは出来ている。
  - He shell flashes & Thermal pulses
  - Third dredge-upによる炭素の汲み上げ
  - s-process元素の合成
  - 質量放出によって白色矮星へと進化
- しかし、モデルの不定性は少なくない。特に、物質混合と質量放出に関する不定性は大きく、決定打はまだない。
  - TDUの効率
  - $^{13}\text{C}$  pocketの効率
  - HBBの効率
  - Mass loss history
- これらの不定性を理論で決定するのは（一次元球対称の枠内でも）難しい。

### 3. 読むべき文献・教科書

## 重要な文献 ([ ]は12/25時点でのADS被引用数)

- “Synthesis of the Elements in Stars”, Burbidge, Burbidge, Fowler, & Hoyle (B2FH, 1957, RvMP, 29, 547-650) [1179]
  - 恒星内部での元素合成に関する先駆的研究
- “Evolution of the Stars”, Hayashi, Hōshi, & Sugimoto (HHS, 1962, PTP Supplement, 22, 1-183) [153]
  - 恒星進化理論の集大成
- “Asymptotic giant branch evolution and beyond”, Iben & Renzini (1983, ARAA, 21, 271-342) [1327]
  - 恒星進化シミュレーションの集大成
- “On the evolution of close binaries with components of initial mass between 3 solar masses and 12 solar masses”, Iben & Tutukov (1985, ApJS, 58, 661-710) [353]
  - 連星進化の基本的描像

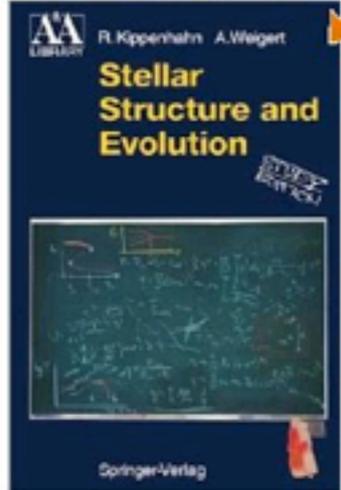
## 重要な文献 ([ ]は12/25時点でのADS被引用数)

- “Presupernova models and supernovae”, Sugimoto & Nomoto (1980, Space Science Reviews, 25, 155-227) [78]
  - 大質量星の進化に焦点を当てた論文
- “Shell flashes on accreting neutron stars and X-ray bursts”, Fujimoto, Hanawa, & Miyaji (1981, The Astrophysical Journal, 246, 267-278) [174]
  - Shell flashの理論
- “Nucleosynthesis in Asymptotic Giant Branch Stars”, Busso, Gallino, & Wasserburg (1999, ARAA, 37, 239-309) [479]
  - AGB星での元素合成に関するレビュー
- “Evolution of Asymptotic Giant Branch Stars”, Herwig (2005, ARAA, 43, 435-479) [194]
  - 最新の恒星進化モデルに関するレビュー

# 参考文献

## Kippenhahn & Weigert: “Stellar Structure and Evolution”

クリック なか見! 検索



自分のイメージを掲載する  
この本の中身を閲覧する

### Stellar Structure and Evolution (Astronomy and Astrophysics Library) [ペーパーバック]

Rudolf Kippenhahn (著), A. Weigert (著)

この商品の最初のレビューを書き込んでください。  いいね (0)

---

参考価格: ¥ 8,126  
価格: **¥ 8,113** 通常配送無料 [詳細](#)  
OFF: ¥ 13

**在庫あり。** [在庫状況について](#)  
この商品は、[Amazon.co.jp](#) が販売、発送します。ギフトラッピングを利用できます。

2011/12/27 火曜日にお届けします! 今から5時間と19分以内に「お急ぎ便」または「当日お急ぎ便」(有料)で確定されたご注文が対象です(Amazonプライム会員は無料)。詳しくは[こちら](#)

[新品の出品](#): ¥ 6,903より [中古品の出品](#): ¥ 5,300より

 **ご注意ください**  
年末・年始の通関業務停止などの事情により、商品のお届けが遅くなる可能性があります。

### 登録情報

ペーパーバック: 488ページ  
出版社: Springer; 3 Stg版 (1994/08)  
言語 英語, 英語, ドイツ語  
ISBN-10: 3540580131  
ISBN-13: 978-3540580133  
発売日: 1994/08  
商品の寸法: 23.4 x 15.6 x 1.6 cm

おすすめ度: [この商品の最初のレビューを書き込んでください。](#)

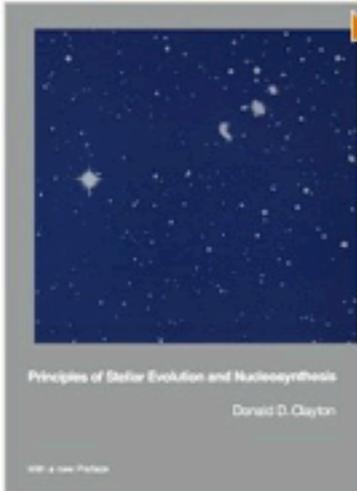
Amazon [ベストセラー商品ランキング](#): 洋書 - 128,747位 ([洋書のベストセラーを見る](#))  
40位 - [洋書](#) > [Science](#) > [Astronomy](#) > [Solar System](#)  
45位 - [洋書](#) > [Outdoors & Nature](#) > [Ecology](#) > [Star Gazing](#)  
69位 - [洋書](#) > [Science](#) > [Astronomy](#) > [Star-Gazing](#)

[カタログ情報を更新する](#), [画像についてフィードバックを提供する](#), または [さらに安い価格について知らせる](#)

# 参考文献

## Clayton: “Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis”

クリック なか見! 検索



Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis  
Donald D. Clayton

[自分のイメージを掲載する](#)  
[この本の中身を閲覧する](#)

### Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis: With a New Preface [ペーパーバック]

[Donald D. Clayton](#) (著)

[この商品の最初のレビューを書き込んでください。](#) いいね (0)

---

価格: **¥4,090** 通常配送無料 [詳細](#)

**在庫あり。** [在庫状況について](#)  
この商品は、[Amazon.co.jp](#) が販売、発送します。ギフトラッピングを利用できます。

1点在庫あり。ご注文はお早めに。

2011/12/27 火曜日 にお届けします! 今から5時間と9分以内に「お急ぎ便」または「当日お急ぎ便」(有料)で確定されたご注文が対象です(Amazonプライム会員は無料)。詳しくは[こちら](#)

[新品の出品: ¥4,090より](#) [中古品の出品: ¥5,376より](#)

**ご注意ください**  
年末・年始の通関業務停止などの事情により、商品のお届けが遅くなる可能性があります。

### 登録情報

ペーパーバック: 634ページ  
出版社: Univ of Chicago Pr (Tx); Reprint版 (1984/1/15)  
言語 英語, 英語, 英語  
ISBN-10: 0226109534  
ISBN-13: 978-0226109534  
発売日: 1984/1/15  
商品の寸法: 22.2 x 16.4 x 3.6 cm  
おすすめ度: [この商品の最初のレビューを書き込んでください。](#)  
Amazon **ベストセラー商品ランキング**: 洋書 - 87,829位 ([洋書のベストセラーを見る](#))  
27位 - [洋書](#) > [Outdoors & Nature](#) > [Ecology](#) > [Star Gazing](#)  
43位 - [洋書](#) > [Science](#) > [Astronomy](#) > [Star-Gazing](#)  
153位 - [洋書](#) > [Science](#) > [Astronomy](#) > [Astrophysics & Space Science](#)

[カタログ情報を更新する](#), [画像についてフィードバックを提供する](#), または [さらに安い価格について知らせる](#)

## 参考文献

### Cox & Giuli, "Principles of Stellar Structure", Vol. 1 & 2



#### Principles of Stellar Structure [ハードカバー]

[John P. Cox](#) (著), [R.T. Giuli](#) (著)

[この商品の最初のレビューを書き込んでください。](#)  いいね (0)

**[出品者](#)からお求めいただけます。**

**中古品の出品: 1¥ 184,644より**

[出版社,著者の方へ:「なか見!検索」で書籍を紹介しませんか?](#)

#### 登録情報

**ハードカバー:** 804ページ

**出版社:** Gordon & Breach Science Publishers (1968/12)

**言語:** 英語, 英語, 英語

**ISBN-10:** 0677019408

**ISBN-13:** 978-0677019406

**発売日:** 1968/12

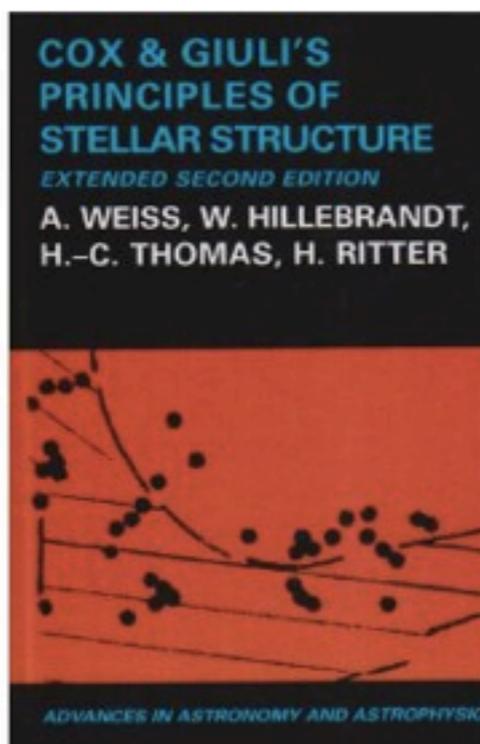
**おすすめ度:** [この商品の最初のレビューを書き込んでください。](#)

**Amazon ベストセラー商品ランキング:** 洋書 - 1,474,255位 ([洋書のベストセラーを見る](#))

[カタログ情報を更新する](#)、[画像についてフィードバックを提供する](#)、または [さらに安い価格について知らせる](#)

## 参考文献

Weiss et al.: “Cox and Giuli’s Principles of Stellar Structure”



[イメージを拡大](#)

[自分のイメージを掲載する](#)

[出版社・著者の方へ:「なか見!検索」で書籍を紹介しませんか?](#)

### Cox and Giuli's Principles of Stellar Structure (Advances in Astronomy & Astrophysics)

[ハードカバー]

[Achim Weiss](#) (著), [Wolfgang Hillebrandt](#) (著), [Hans-Christoph Thomas](#) (著), [Hans Ritter](#) (著)

[この商品の最初のレビューを書き込んでください。](#)  [いいね](#) (0)

価格: **¥ 10,733** [通常配送無料](#) [詳細](#)

**一時的に在庫切れ; 入荷時期は未定です。** [在庫状況](#)について

注文確定後、入荷時期が確定次第、お届け予定日をEメールでお知らせします。万が一、入荷できないことが判明した場合、やむを得ず、ご注文をキャンセルさせていただきますことがあります。商品の代金は発送時に請求いたします。

この商品は、[Amazon.co.jp](#) が販売、発送します。ギフトラッピングを利用できます。

[中古品の出品](#): ~~2¥ 20,041~~より

### 登録情報

**ハードカバー**: 792ページ

**出版社**: Cambridge Scientific Publishers; 2nd Revised版 (2004/3/20)

**言語** 英語, 英語, 英語

**ISBN-10**: 1904868207

**ISBN-13**: 978-1904868200

**発売日**: 2004/3/20

**商品の寸法**: 23.4 x 15.6 x 4.8 cm

**おすすめ度**: [この商品の最初のレビューを書き込んでください。](#)

**Amazon ベストセラー商品ランキング**: 洋書 - 463,429位 ([洋書のベストセラーを見る](#))

1450位 — [洋書](#) > [Science](#) > [Astronomy](#) > [Astronomy](#)

1899位 — [洋書](#) > [Professional & Technical](#) > [Professional Science](#) > [Astronomy](#)

## 参考文献

### “岩波講座現代物理学の基礎<12> 宇宙物理学”

岩波講座現代物理学の基礎 <12> 宇宙物理学 (1973年) [古書] [-]

★★★★★ (1 カスタマーレビュー) いいね (0)

イメージはありません  
自分のカスタマー画像を共有する



出品者からお求めいただけます。

中古品の出品: 3¥ 1,499より



**本冬の大キャンペーン**

Amazonオリジナルブックカバー特典から、合わせ買いでお得、ポイント還元まで、本冬の大キャンペーン 実施中。2012/1/8まで。

[その他の情報を見る](#)

[出版社、著者の方へ:「なか見!検索」で書籍を紹介しませんか?](#)

#### 登録情報

-: 544ページ

出版社: 岩波書店 (1973)

ASIN: B000J9VSUI

発売日: 1973

商品の寸法: 22.2 x 16.4 x 3.8 cm

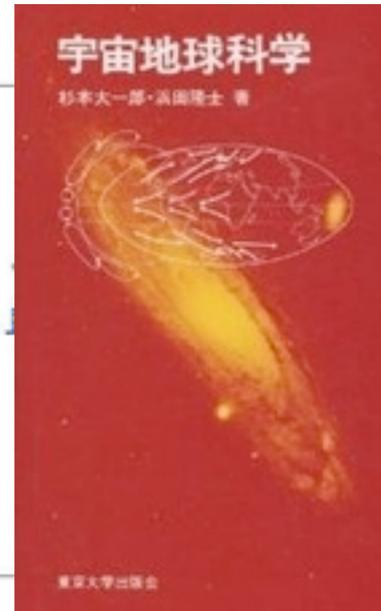
おすすめ度: ★★★★★ (1 カスタマーレビュー)

Amazon ベストセラー商品ランキング: 本 - 614,322位 ([本のベストセラーを見る](#))

[カタログ情報を更新する](#)、[画像についてフィードバックを提供する](#)、または [さらに安い価格について知らせる](#)

## 参考文献

杉本大一郎: “宇宙地球科学”



### 宇宙地球科学 [単行本]

杉本 大一郎 (著), 濱田 隆士 (著)

[この商品の最初のレビューを書き込んでください。](#)  いいね (0)

**[出品者からお求めいただけます。](#)**

中古品の出品: 11 ¥ 44より [コレクター商品の出品: 1 ¥ 18,900より](#)



#### 本冬の大キャンペーン

Amazonオリジナルブックカバー特典から、合わせ買いでお得、ポイント還元まで、[本冬の大キャンペーン](#) 実施中。2012/1/8まで。

[その他の情報を見る](#)

[出版社,著者の方へ:「なか見!検索」で書籍を紹介しませんか?](#)

### 登録情報

単行本: 226ページ

出版社: 東京大学出版会 (1975/01)

ISBN-10: 4130620487

ISBN-13: 978-4130620482

発売日: 1975/01

おすすめ度: [この商品の最初のレビューを書き込んでください。](#)

Amazon ベストセラー商品ランキング: 本 - 1,340,425位 ([本のベストセラーを見る](#))  
102731

位 - [本](#) > [科学・テクノロジー](#)

[カタログ情報を更新する](#)、[画像についてフィードバックを提供する](#)、または [さらに安い価格について知らせる](#)

## 参考文献

藤本正行: “The Structure and Evolution of Stars”

[http://astro3.sci.hokudai.ac.jp/~fujimoto/lecture/stellar\\_evolution.pdf](http://astro3.sci.hokudai.ac.jp/~fujimoto/lecture/stellar_evolution.pdf)

# The Structure and Evolution of Stars

## CONTENTS

1.	はじめに — 恒星の特性と役割	...0
2.	Basic Equations	...2
3.	静水平衡の力学構造	...8
4.	相似不変量による構造解析	...17
5.	自己重力系の熱力学	...28
6.	殻燃焼の物理 I — 等温中心核	...34
7.	準静的進化の限界 = 恒星の終末	...39
8.	殻燃焼の物理 II — Shell Flash	...50
9.	恒星進化の標準理論	...63
10.	恒星進化 = 天体の探査の手段	...70

## 4. この分野のKey Person (というより研究者)

## 低・中質量星の進化について計算している人々

- 大御所な人々（引退済み or ほぼ引退）
  - M. Schwarzschild and R. Härm: 恒星進化シミュレーション、shell flashの発見など
  - I. Iben Jr.: 恒星進化モデル、third dredge-upの発見など
  - C. Hayashi, D. Sugimoto: 恒星進化理論、内部構造と進化の理論体系構築など
  - P. Eggleton: 恒星進化・連星進化モデル、恒星モデルの近似化、種族合成など
  - R. Kippenhahn: 恒星の回転による混合、恒星進化の教科書
  - A. Sweigert:

※大質量星・元素合成の人は除いてあります。

## 低・中質量星の進化について計算している人々

- 割りとシニアな人々 (現役)
  - M. Y. Fujimoto, H. Saio (Japan)
  - P. R. Wood, J. Lattanzio (Australia)
  - O. Straniero, A. Chieffi, I. Dominguez, M. Limongi (Italy)
  - C. Chiosi, A. Bressan (Italy)
  - F. D'Antona, V. Caloi, V. Castellani (Italy)
  - A. Weiss, M. Salaris, S. Cassisi, Baraffe, I. (Germany, Spain)
  - A. Sweigart, M. Catelan, D. Schönberner, T. Blöcker (Germany)
  - C. Tout, O. Pols (UK, Netherland)
  - B. Paxton (USA)
  - I.-J. Sackman, A. I. Boothroyd (USA)
  - M. Pinsonneault, B. Chaboyer (USA)
  - D. A. Vandenberg, P. Demarque, S. K. Yi, L. H. Li (USA, S. Korea)

## 低・中質量星の進化について計算している人々

- 若手研究者
  - TS, Y. Katsuta, K. Kanagawa, N. Iwamoto (Japan)
  - L. Siess, M. Lugaro, A. Karakas, S. Campbell (Australia)
  - S. Cristallo (Italy)
  - P. Gil-Pons (Spain)
  - L. Girardi, P. Marigo (Italy)
  - P. Ventura (Italy)
  - P. A. Denissenkov (Germany)
  - H. Lau, R. J. Stancliffe (UK)
  - F. Herwig (Canada)
  - A. Dotter (USA)

## 5. 研究に役立つツール

# Webでアクセス・ダウンロードできる便利なツール

- BaSTI stellar evolution database
  - <http://193.204.1.62/>
  - 様々な質量（年齢）と組成に対する星の進化モデルと等時曲線の数値データテーブルを提供。
- MESA code
  - <http://mesa.sourceforge.net/>
  - オープンソースの恒星進化コード。
- SAGA database (Suda et al. 2008)
  - <http://saga.sci.hokudai.ac.jp/>
  - 恒星の元素組成データベース

End