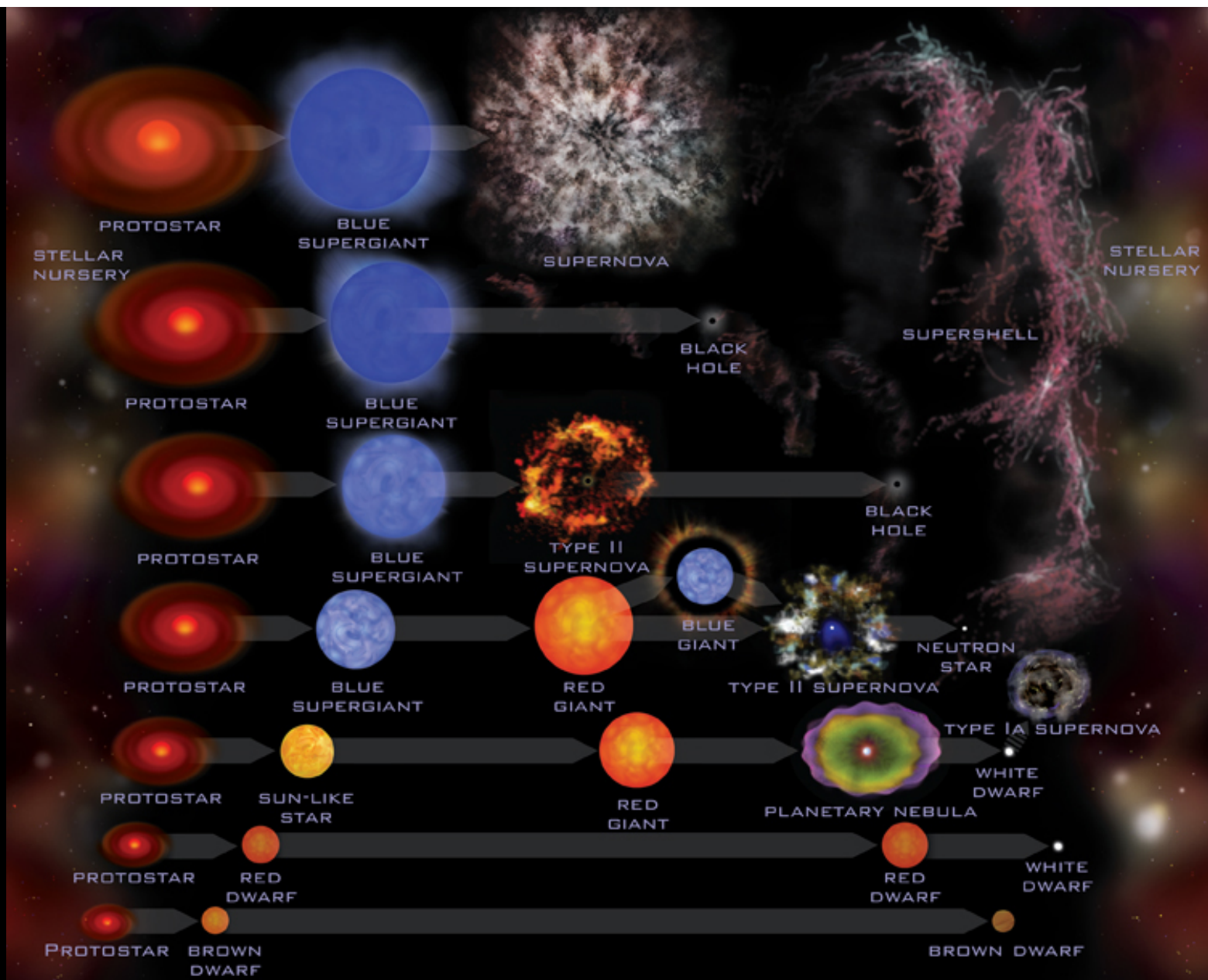
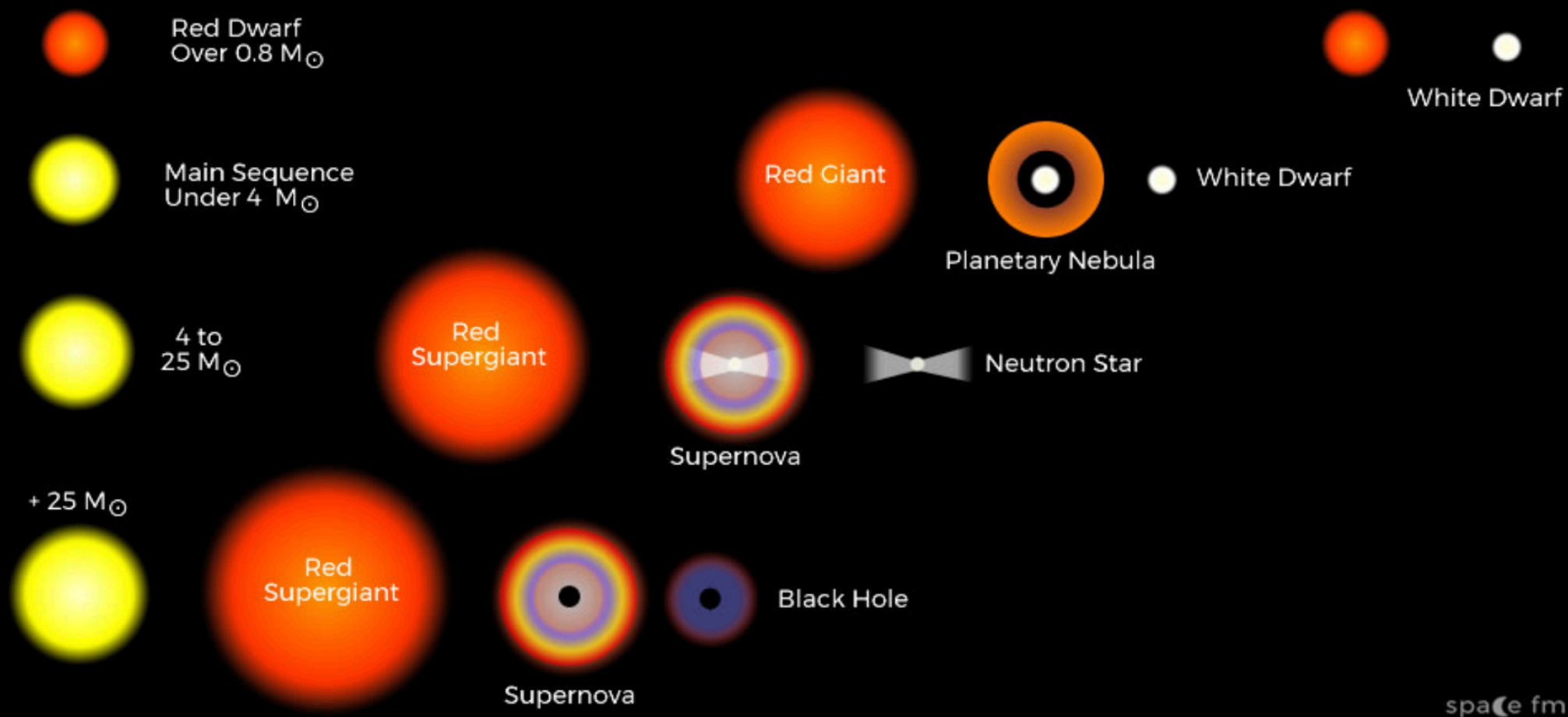
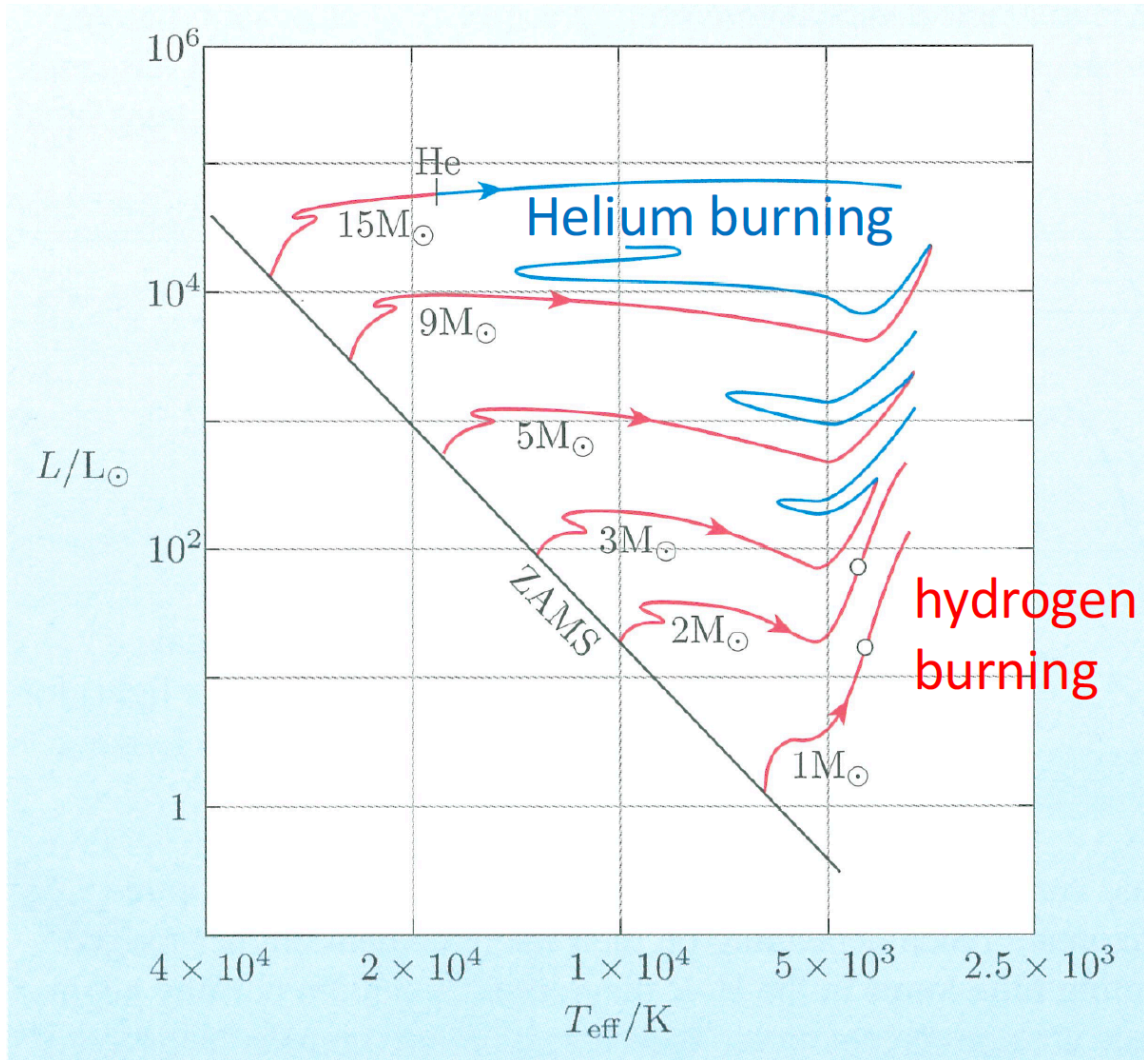






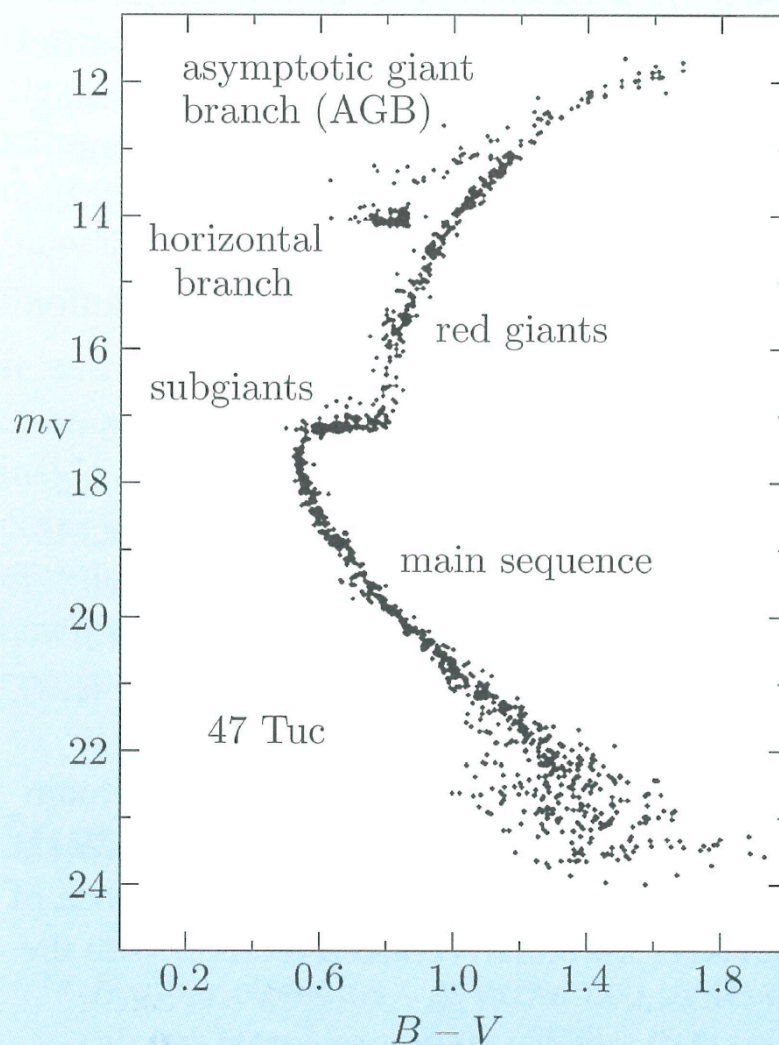
## 主要なエネルギー生成が水素燃焼からヘリウム燃焼へ



星は一生のほとんどを水素燃焼を起こして主系列にとどまったあと、中心部での燃料（水素）が枯渇すると、燃焼プロセスが変わるとともに内部構造も変化し、HR図上を右側へ移動するようになる。



## 球状星団 NGC104の星々の進化（の結果）



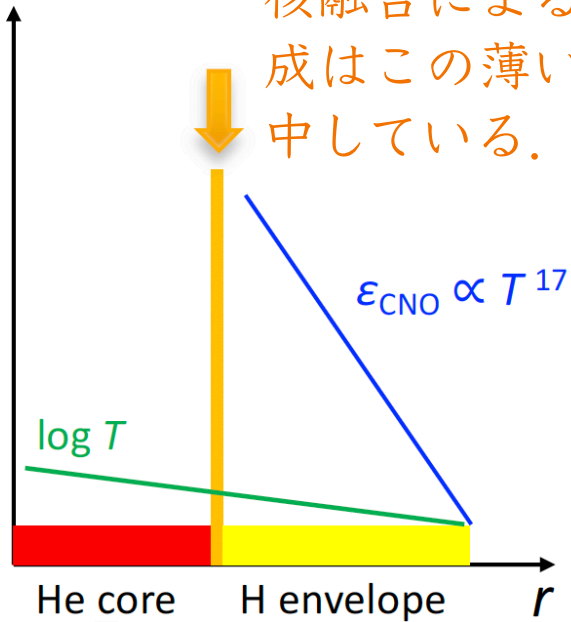
球状星団の星々はほぼ同じ時期に生まれたと考えられる。しかし個々の星の進化の早さと進化経路は星の質量によって決まる。

$L \propto M^3$  なら、燃料消費の時間は  $M/L \propto M^{-2}$  と急激に短くなる。100太陽質量の星の寿命はたったの300万年ほど！



## Shell-burning (殻燃焼)

核融合によるエネルギー生成はこの薄い球面の層に集中している。

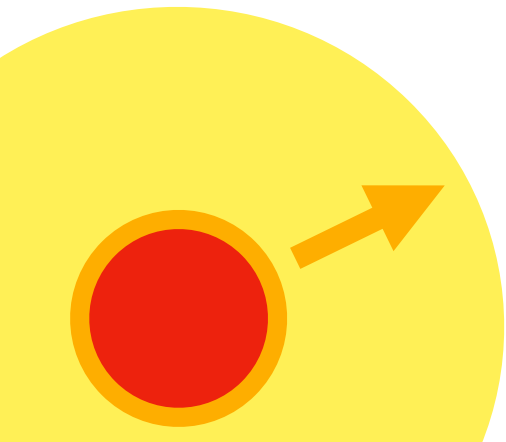


“The core shrinks, but the envelop expands.”

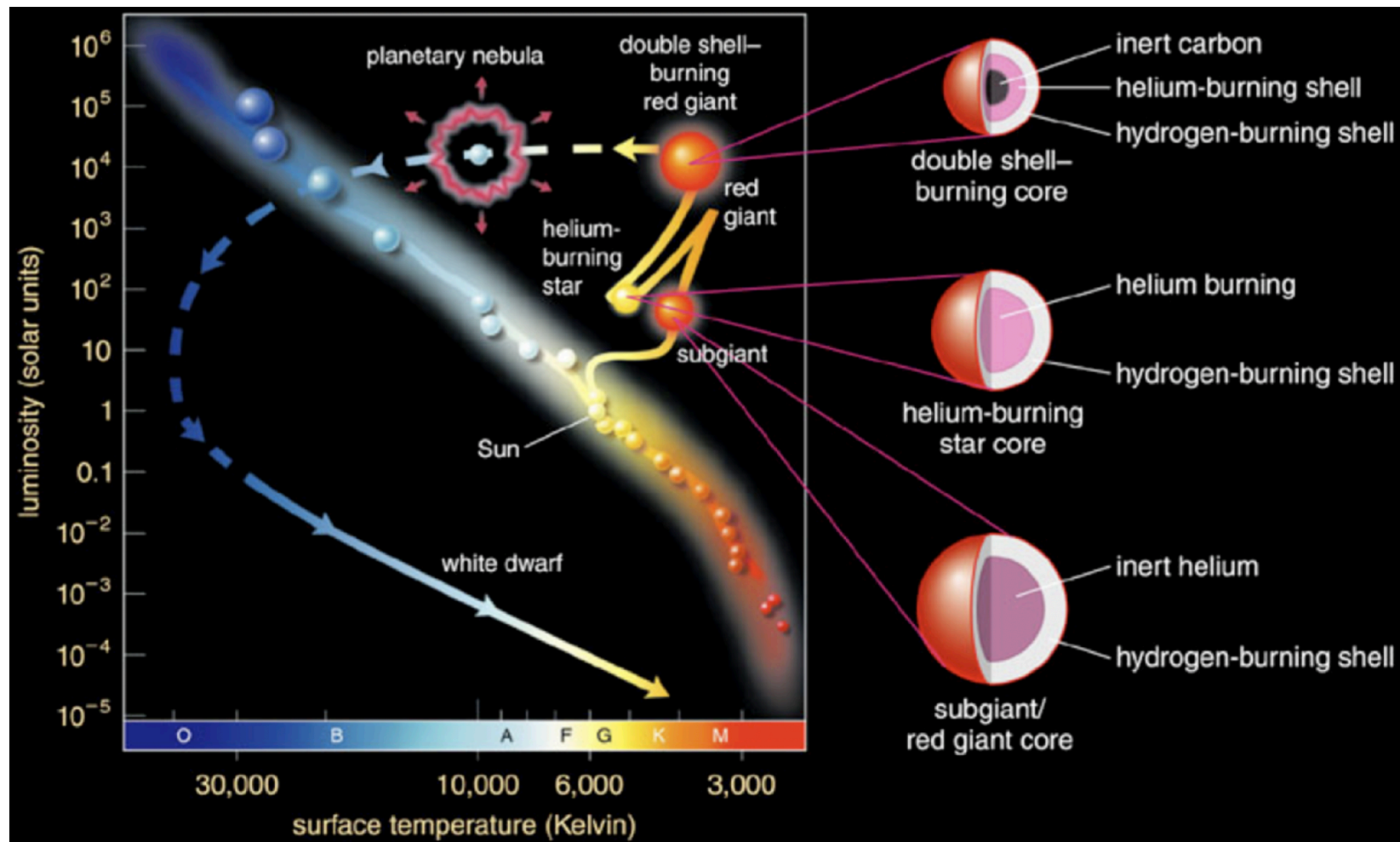
多くの物理プロセスが絡みあってこのような結果になる。

1. 水素燃焼の後、これくらいの温度ではまだ燃えないヘリウムコアは収縮
2. 核融合&エネルギー生成はCNOサイクルがメインで、図のように薄い球殻で起こる - shell burning
3. 熱い殻と熱いコアが中にあり、それよりも外側（外層、大気）は膨らむ

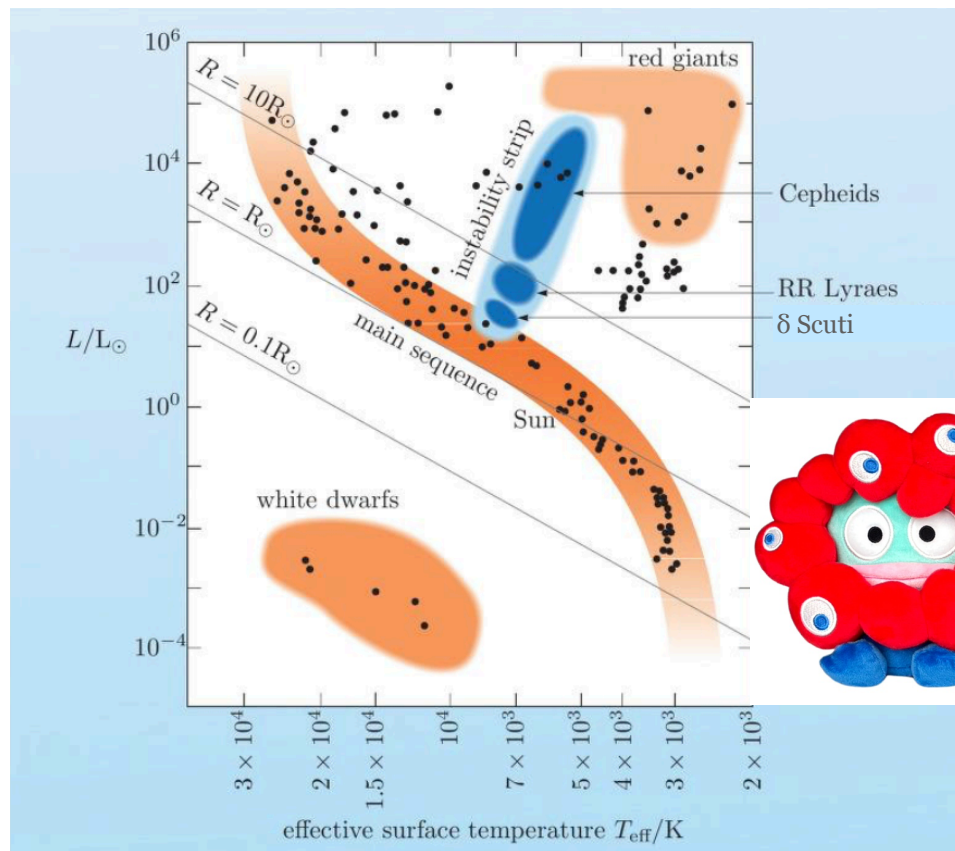
時系列のように書いているが、実際には上記のような構造となる「解」が存在する、と理解しよう。



## HR図でみる太陽のような星の一生



## Hertzsprung gap と instability strip



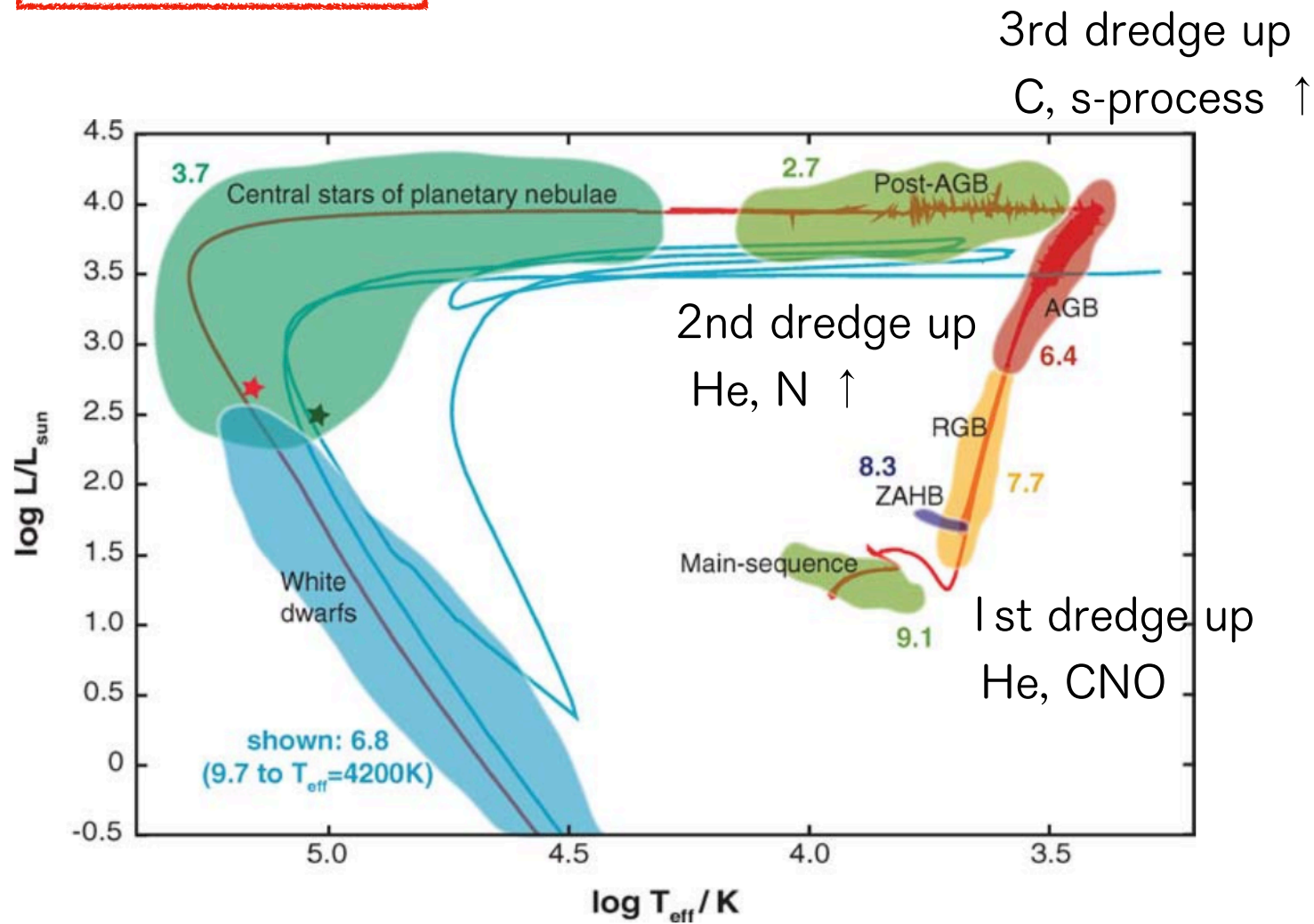
一般に、shell-burning がはじまって外層が膨らむ時間は十分短いので、この間にいる星を見つける確率は少ない。HR図ではYの字的に、あるいは右側に塊があるように見える。

また、外層が「脈動」する星もあり、青の領域を左右にいったりきたりする。  
 $2 M_{\text{sun}}$  ほどの星は脈動しながらこの領域を通過し、 $\delta$ -Scuti 星と呼ばれる。





## 2Msun の星の進化



汲み上げ過程 (dredge up)  
はそれぞれ

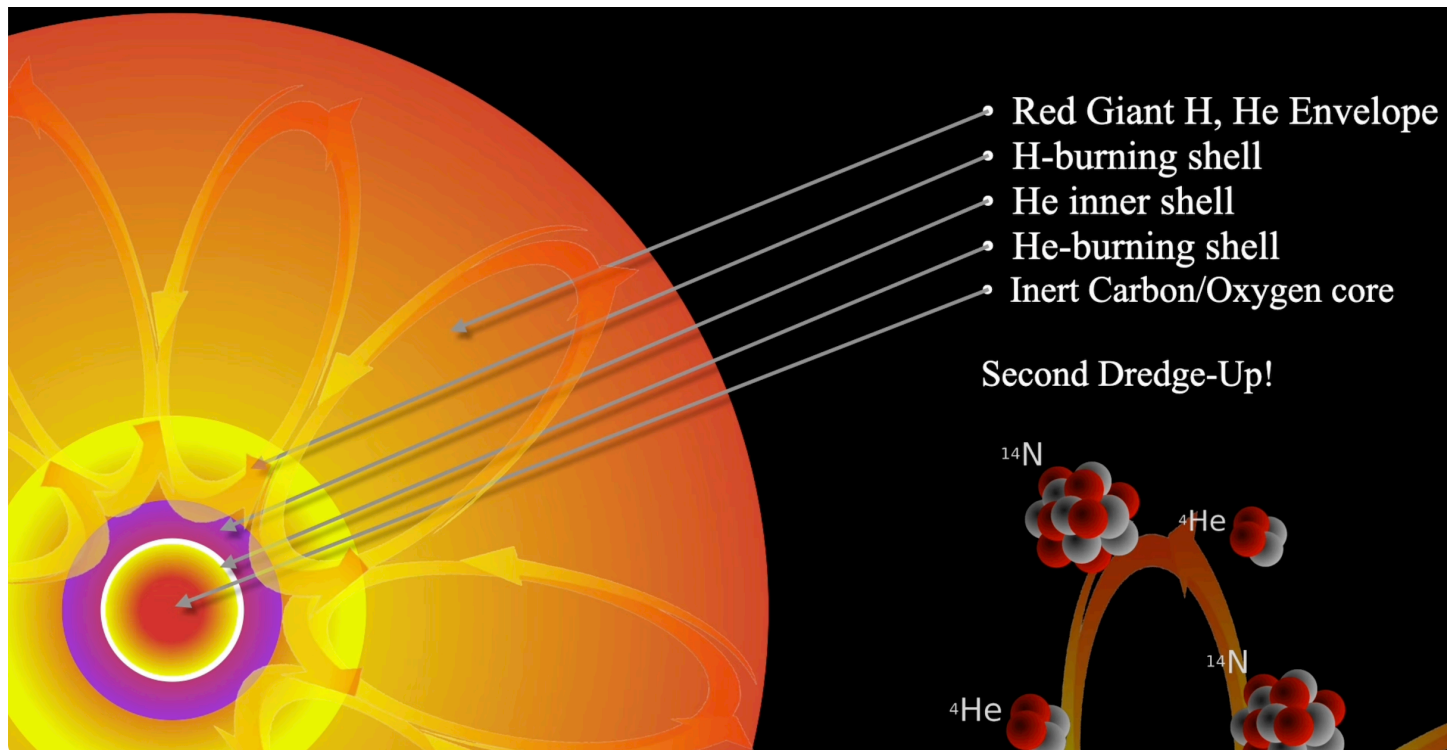
1st H core to H shell

2nd He core to He shell

3rd He shell to H shell

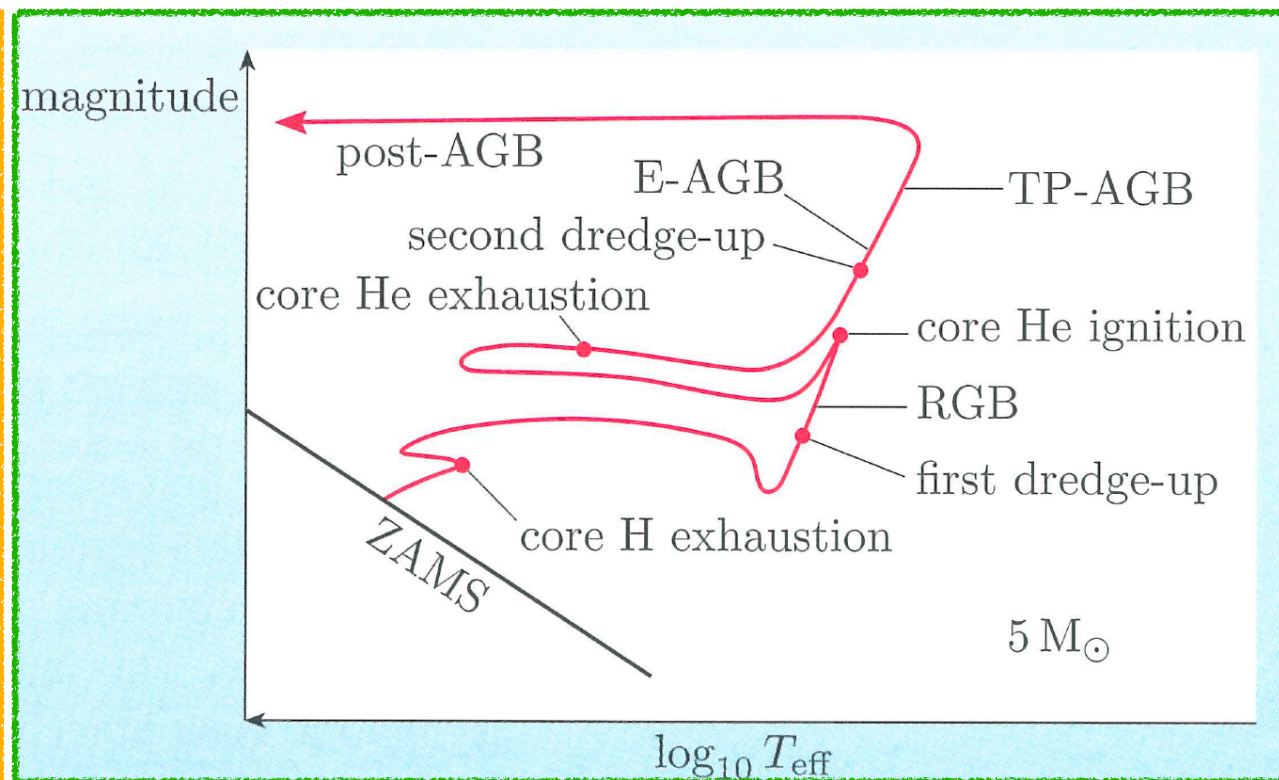
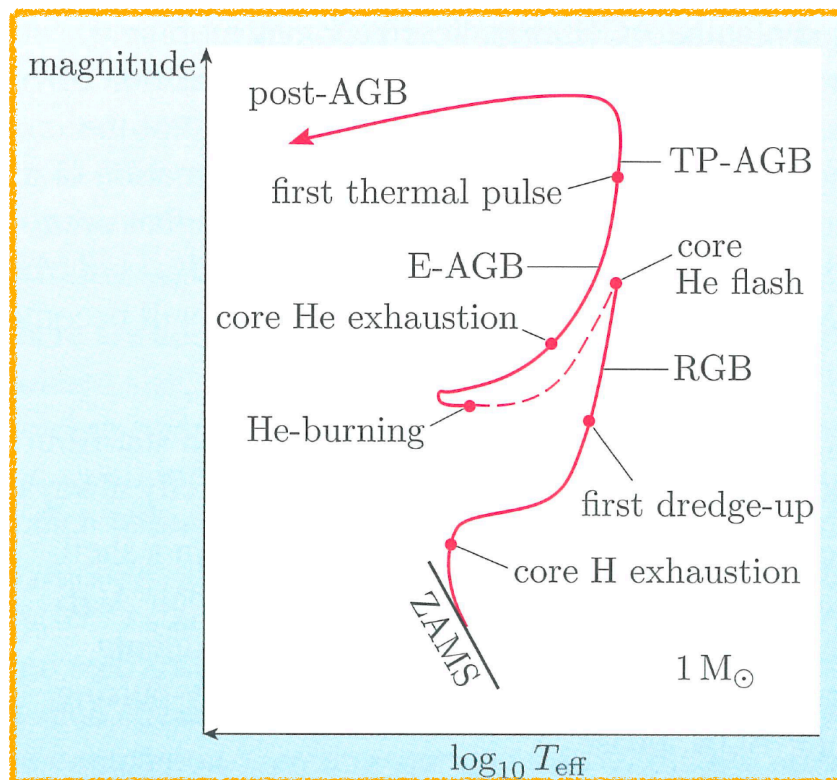
と対応する。

## 2Msun の星の進化

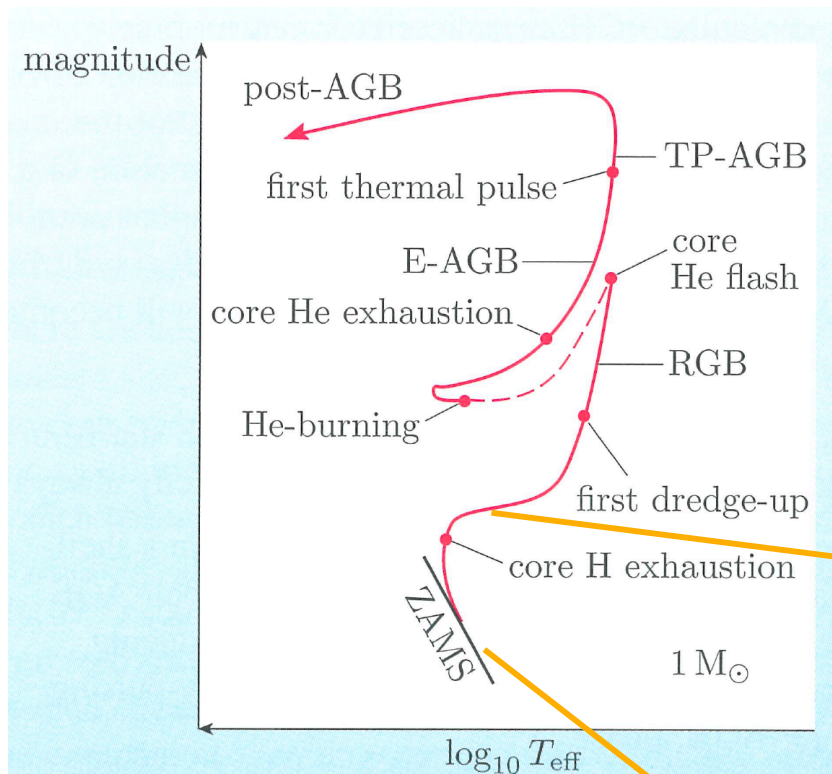


2nd dredge up ではコアでできた $^{14}\text{N}$  をヘリウム燃焼殻付近まで汲み上げてくる。

## 小質量(1Msun)と中間質量(5Msun)の場合の進化



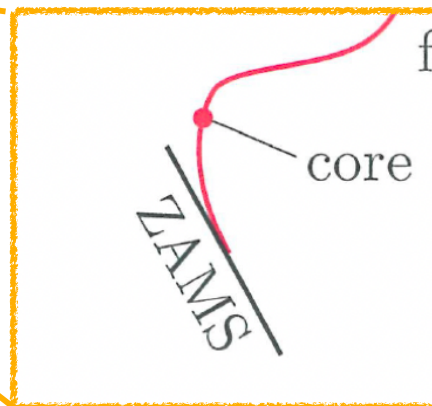
## 小質量星(1Msun)の進化



主系列の間は（比較的効率の低い）p-p chain でエネルギー生成をし、コアでは対流は起こらない。輻射により十分エネルギーを流せる。そのためフレッシュな燃料（水素）と燃えかす（ヘリウム）はよく混ざっていない。

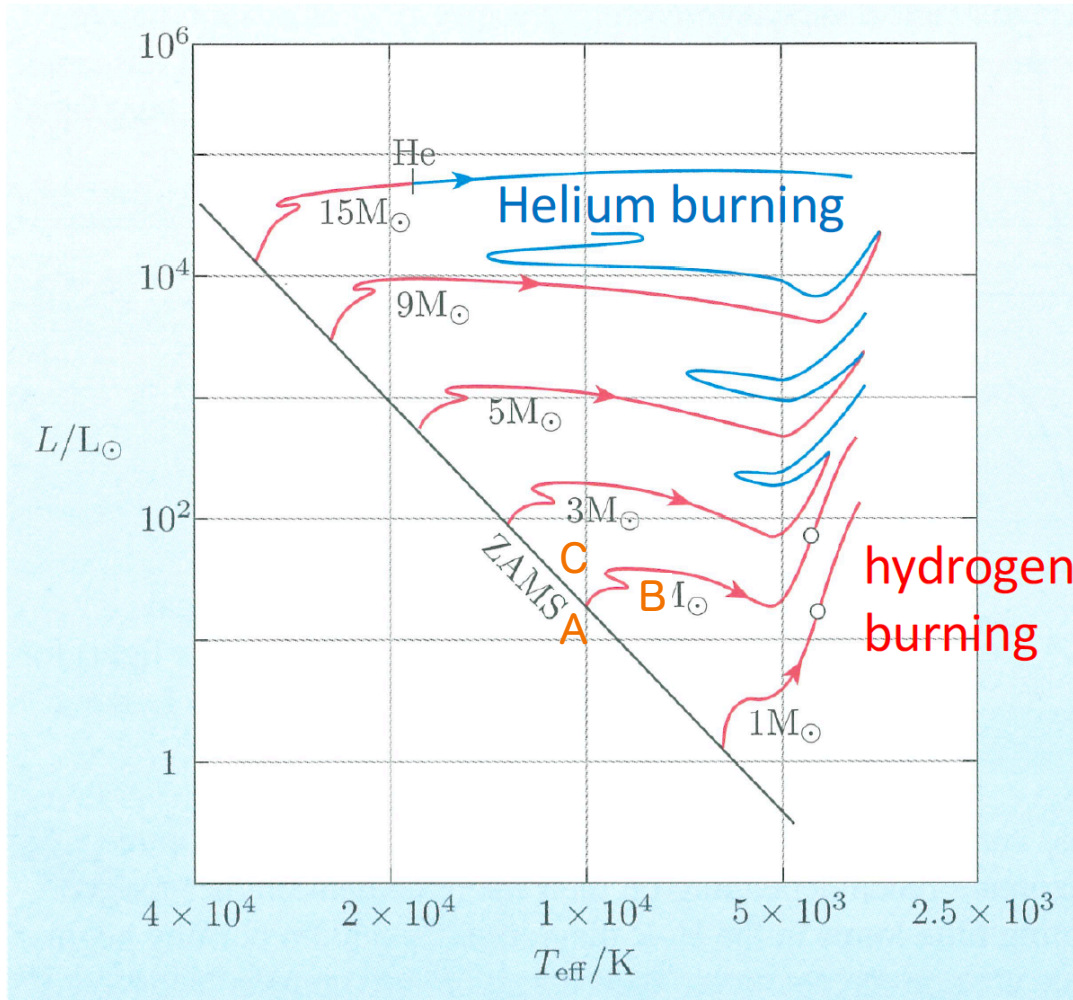
この場合、中心部の水素は尽きても、そのすぐ周りにはまだ燃やせる水素が存在する。そのため **core-burning** から **shell-burning** へは滑らかに移行する。

構造の大きな変化は伴わない





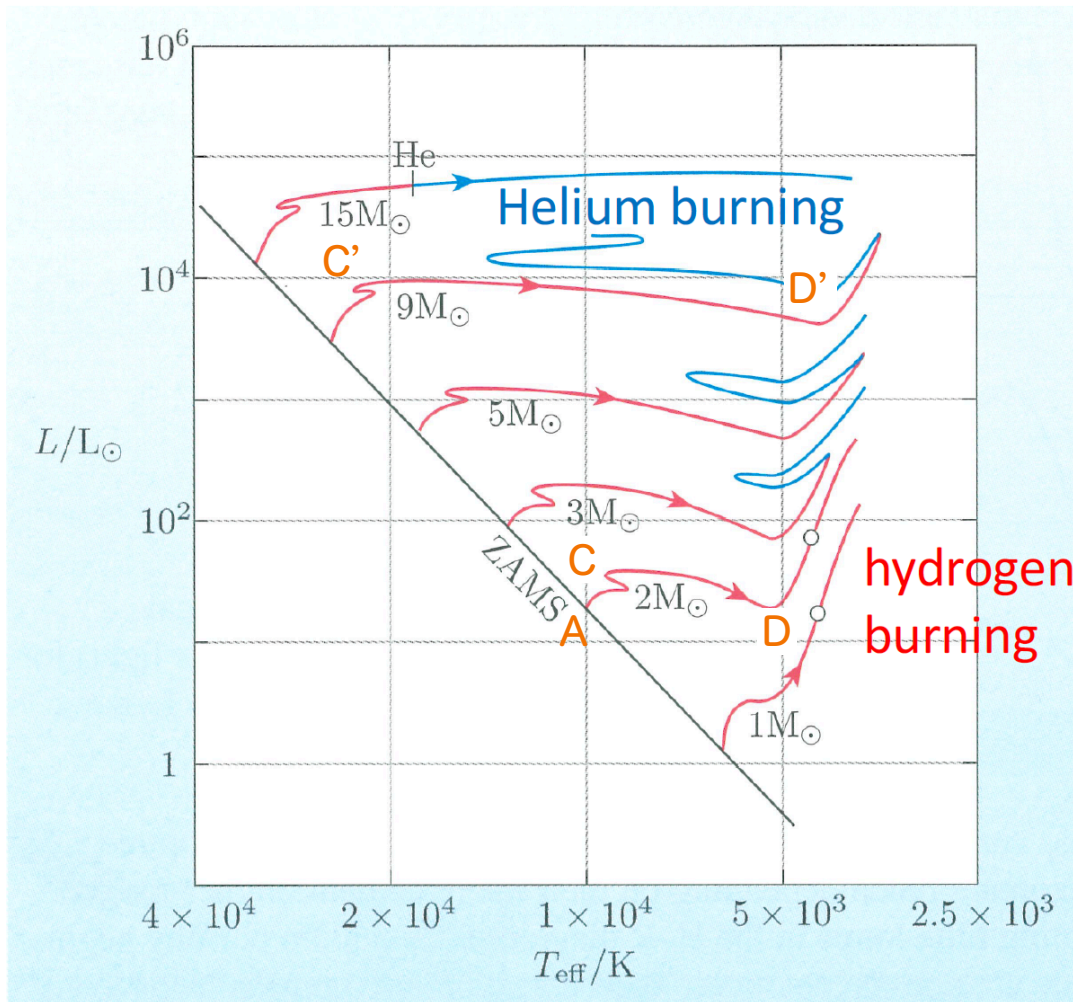
## 2Msunの星の進化



中心コアで水素燃焼が終わると，内部でエネルギーは生成されないので，密度勾配に比例する圧力勾配のみによって重力に対抗するしかない．しかしコアが十分重いと，この圧力勾配だけでは支えきれずにコアは収縮をはじめ．（図の B から C）

収縮して温度上昇すると，温度勾配も圧力勾配に寄与できるようになる．コアのすぐ外側の水素燃焼殻も温度上昇し，エネルギー生成率(=光度)も上昇．B から C へと，左上に動く．

## 2Msunの星の進化

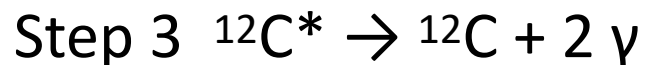
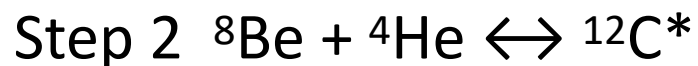
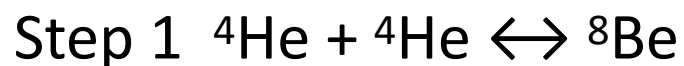


中心でのエネルギー生成率が増える  
と、外層にはそれまで内から外へと受け流していただけたよりも多くのエネルギーが流れ込むことになり、その一部を吸収して膨張するようになる。CからDへの移動。

この際、opacity が  $-3.5$  乗の Kramers 則で表されるなら  $L \propto M^{5.5} R^{-0.5}$  の関係があるので光度は半径の  $1/2$  乗でゆるやかに減少する。(質量の大きな星の場合はこの過程で opacity が温度によらず、光度をあまり変えることなく右にほぼ水平に移動する [C' から D'] )

## ヘリウム燃焼

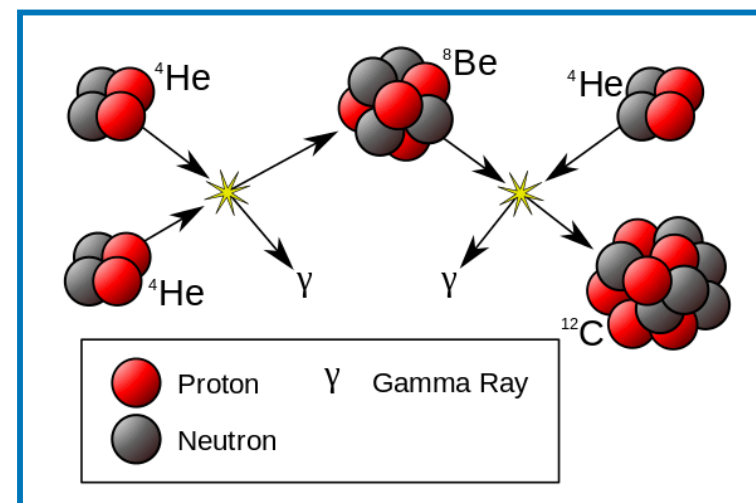
ヘリウム原子核3つをくっつけて炭素原子核にするには長い（長くはないが困難な）道のりがある。どんな場合でも3つの原子核が同時にくっつくなどということは起こらないので、反応は次の3段階を経てすすむ：



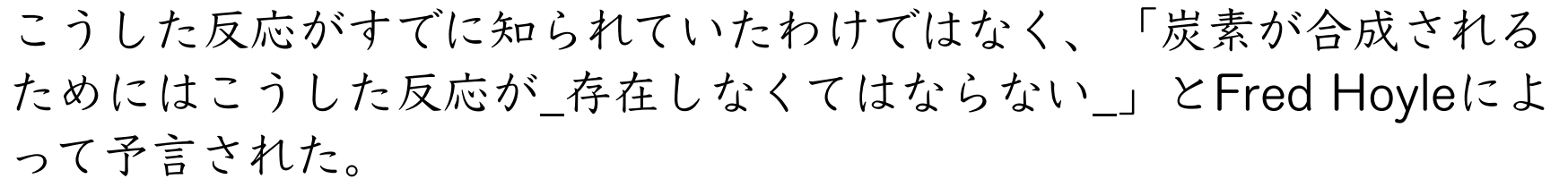
第一の関門は、 ${}^8\text{Be}$  が極めて不安定な核子で、

$t_{\text{decay}} = 2.6 \times 10^{-16} \text{ sec}$  ほどでばらばらになってしまうことである。（初期宇宙にも同じ問題があった。）

${}^8\text{Be}$  と二つの ${}^4\text{He}$ の質量差は  
 $(2m_4 - m_8)c^2 = -91.8 \text{ keV}$



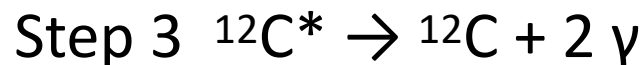
稀に正しいエネルギー状態の  
 ${}^8\text{Be}$  ができて、 $t_{\text{decay}}$  という  
短い時間の間にもう一つ  ${}^4\text{He}$   
がぶつからなくてはならない。

A color portrait photograph of Dr. Robert A. Schmitt. He is an older man with white hair, wearing glasses, a light blue shirt, a dark tie with small red and yellow dots, and a light-colored suit jacket with a subtle pattern. He is smiling slightly and looking towards the camera. The background is a blurred green, suggesting foliage.[illegible]

第二の関門は、ヘリウム4とベリリウム8の質量換算エネルギーのちょうど 287 keV だけ大きなところに、炭素12の励起状態が存在することである。



### Triple- $\alpha$ プロセスによるエネルギー生成



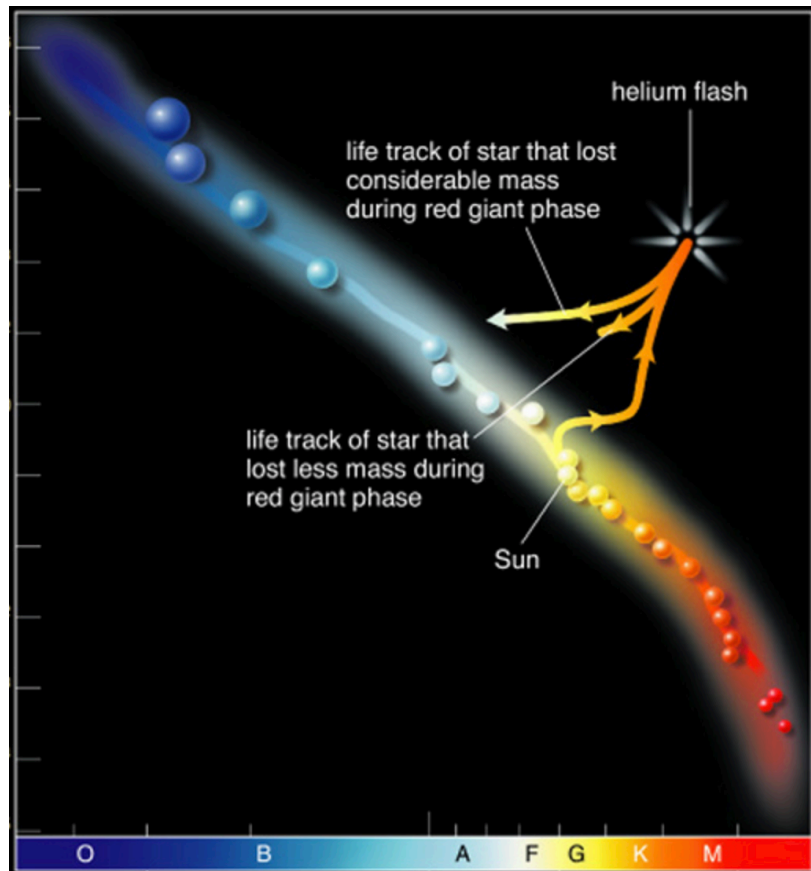
この反応は  $t_{\text{decay}} = 1.8 \times 10^{-16}$  sec ほどで起こる。ヘリウム燃焼が起こる温度 2 億度、密度  $10^8 \text{ kg/m}^3$  では、励起状態の  $^{12}\text{C}^*$  の数密度は  $3 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$  ほどなので、 $^{12}\text{C}$  の

生成率は 
$$\frac{dn_{^{12}\text{C}}}{dt} = \frac{3 \times 10^{14}}{1.8 \times 10^{-16}} \sim 1.7 \times 10^{30} \text{ m}^{-3} \text{ sec}^{-1}$$

励起状態から基底状態へのエネルギー差は 7.65 MeV なので、エネルギー生成率は  $1.23 \times 10^{-12} \text{ J} \times 1.7 \times 10^{30} \text{ m}^{-3} \text{ sec}^{-1} \sim 2.1 \times 10^{18} \text{ W m}^{-3}$  で、でかい！

主系列の間、太陽中心でのエネルギー生成は  $300 \text{ W m}^{-3}$  であることを思い出そう。

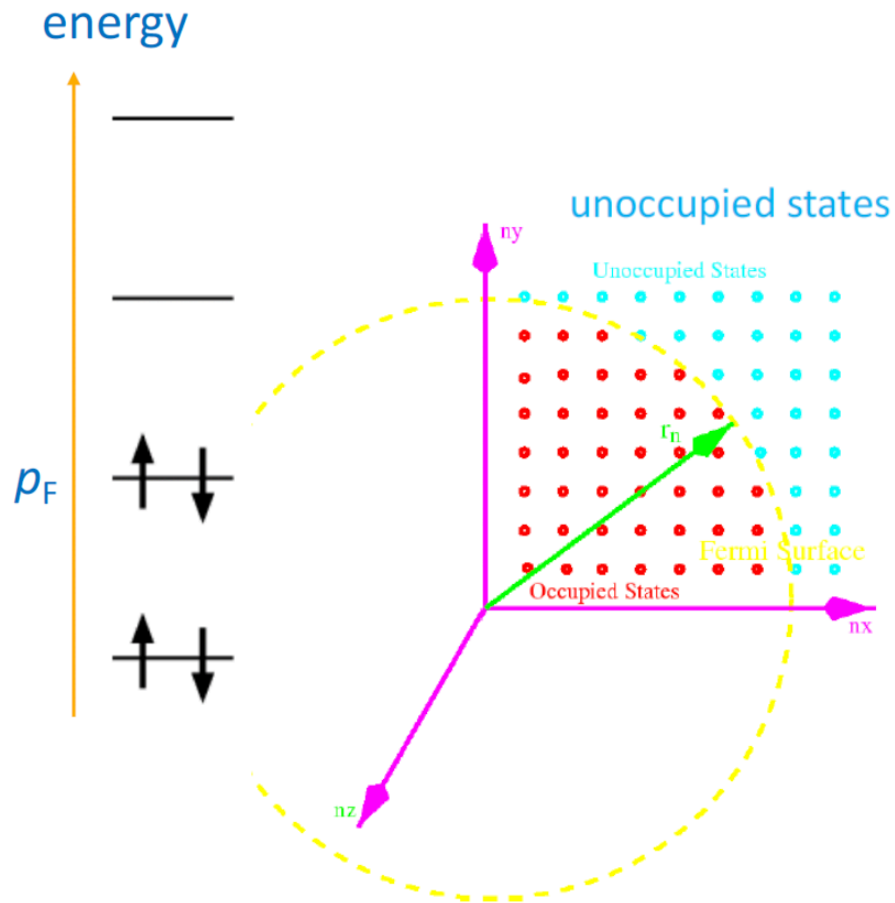
## ヘリウムフラッシュ



ヘリウム燃焼が始まると、中心コアでとてつもないエネルギーが急に生成される。もしもコアが普通のガスで構成されているなら、エネルギー注入により膨張するだけだろう。ところが縮退した電子で構成されていると、圧力は温度とは関係なくなる。このためエネルギー生成による温度上昇は反応率の急激な上昇を起こす。反応率の上昇はさらなるエネルギー生成を誘起し、この一連のプロセスが暴走的に起こる。

一瞬ではあるが水素燃焼時の100万倍(!)も明るくなる

## フェルミエネルギー



冷たい電子はエネルギーの低い準位（座席）から埋めていき、 $p_F$  にいたるまで一杯になる：  
普通のガスなどとは全く異なるエネルギー分布

運動量空間も 3 次元なので「座席」の数は

$$N = \int_0^{p_F} g \frac{V}{h^3} 4\pi p^2 dp = \frac{8\pi V}{3h^3} p_F^3$$

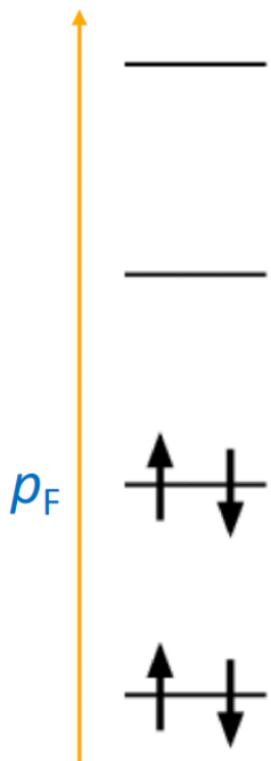
電子の場合に spin 自由度  $g = 2$  とした。

これをもちいてフェルミエネルギーは

$$p_F = \left( \frac{3n_e}{8\pi} \right)^{1/3} h \quad \text{と書ける。}$$

## 縮退した電子ガス

energy



個々の電子のエネルギーは  $\epsilon = mc^2 + \frac{p^2}{2m}$  なので、  
ガスの内部エネルギーは

$$E = \int_0^{p_F} g\epsilon \frac{V}{h^3} 4\pi p^2 dp = N \left[ mc^2 + \frac{3p_F^2}{10m} \right]$$

非相対論的な縮退した電子ガスの圧力は  $2/3 \times \text{kinetic energy}$  :

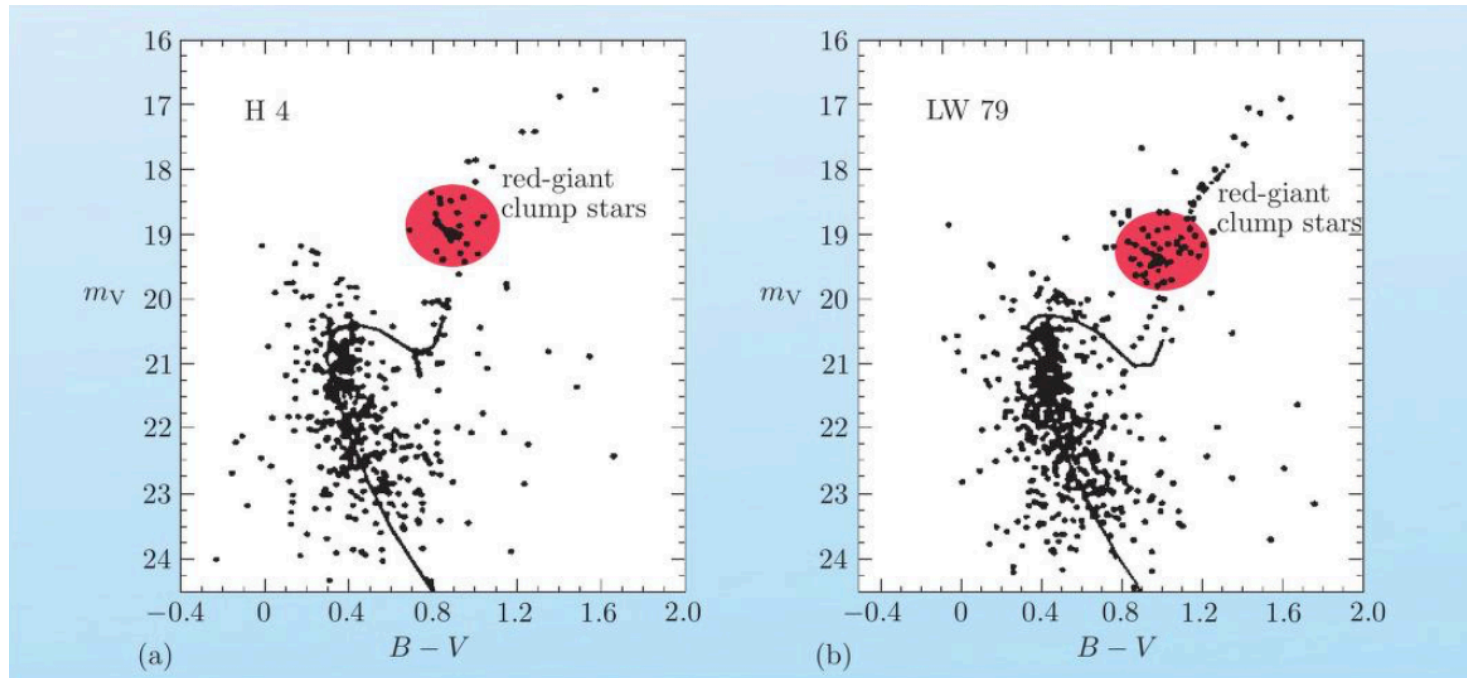
$$P = n \frac{p_F^2}{5m} = \frac{h^2}{5m} \left( \frac{3}{8\pi} \right)^{2/3} n^{5/3} \quad n = \frac{N}{V}$$

一方、熱い（相対論的な）電子ガスの場合には

$$E = \frac{4\pi g c V}{h^3} \frac{p_F^4}{4} \quad P = \frac{hc}{4} \left( \frac{3}{8\pi} \right)^{1/3} n^{4/3}$$

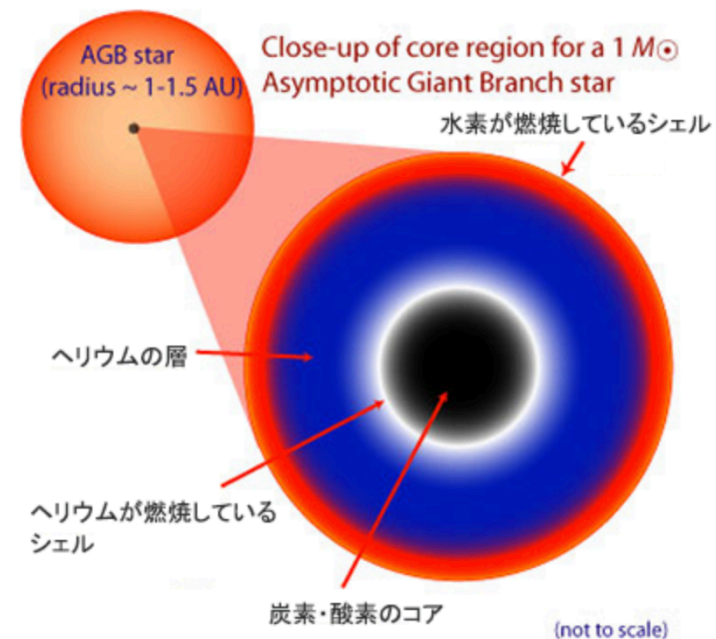
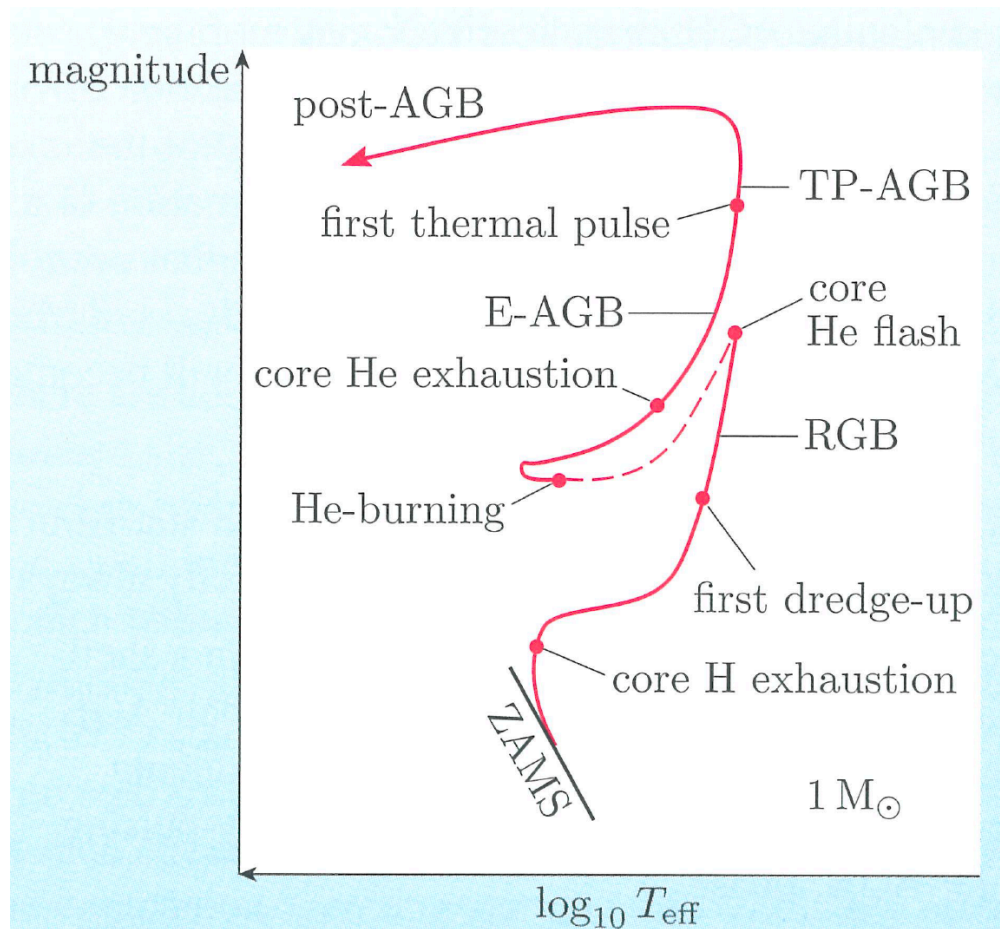


## Core Helium burning



ヘリウムフラッシュの後、コアでヘリウム燃焼を継続する。核融合エネルギーの解放によりコアは加熱され、電子の縮退が解ける。普通のカスのように振る舞える。コアは膨らみ、水素燃焼殻は外側に移動して光度は減少。じわじわと温度を高めながら安定的にヘリウムを消費し、ゆっくりと進化するためHR図では”赤色巨星(周辺)の塊”として観測される。

## 漸近巨星の進化



Triple- $\alpha$  プロセスの反応率は温度の40乗! に比例するので、中心でヘリウムがすぐに燃焼してしまい、燃えかすの炭素や酸素がコアを作り、すぐ外側にヘリウム燃焼殻、さらにその外側に水素燃焼殻が存在。構造的に不安定で脈動を起こす。