

Time scales

- Nuclear Timescale $\tau_n = E_n / L$ (KH p.35)
(E_n : nuclear energy)
($\tau_n \sim 10^{11}$ years for the Sun)
- Hydrostatic timescale
 $\tau_{hydr} \approx (R^3 / GM)^{1/2} \approx \frac{1}{2} * (G < \rho >)^{-1/2}$ (KH p.14)
($\tau_{hydr} \sim 27$ min for the Sun,
 ~ 18 days for a Red giant)
- Kelvin-Helmholtz timescale
 $\tau_{KH} = E_g / L \approx (GM^2 / 2RL)$ (KH p.22)
(E_g : gravitational energy)
($\tau_{KH} \sim 10^7$ years for the Sun)

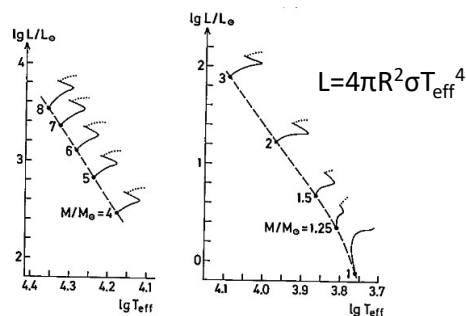
通常 $\tau_n \gg \tau_{KH} \gg \tau_{hydr}$

Mass, Radius of main-sequence star and HR diagram

- Larger L is required for a larger M to sustain the star. However, T_c is almost unchanged because $\epsilon_{CNO} \propto T^{16}$.

(1.9) $\rightarrow R \propto M / T_c \propto M$

- Hertzsprung-Russell diagram



Mass-luminosity relation

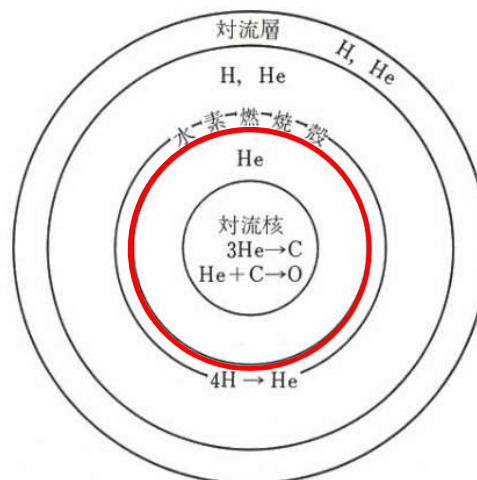
$L \propto M^3$ ($M \geq 1 M_\odot$) $\rightarrow T_{\text{eff}} \propto M^{1/4}$

lifetime $\propto M/L \sim M^{-2}$ (more massive stars have shorter lifetime)

(More precise) Observational fit (主系列星)

- $R \propto M^{0.6}$ くらい
- Mass-luminosity relation
 $L \propto M^\alpha$
 $\alpha = 2.3$ ($M < 0.43 M_\odot$)
 $= 4$ ($0.43 M_\odot < M < 2 M_\odot$)
 $= 3.5$ ($2 M_\odot < M < 20 M_\odot$)
 $= 1$ ($20 M_\odot < M$)

Stellar interior at the He-burning stage



水素が燃え尽きた後の進化

- 水素が燃え尽きると中心核が重力収縮、温度上昇
- 外側に残っている水素が燃える(殻燃焼)
- $1 M_{\odot} < M < \sim 3 M_{\odot}$ の星では
 - まず、重力収縮によって作られた圧力勾配で支えられる
 - センペルグ--- チャンドラセカール限界
 - ヘリウム中心核が星全体の約10%よりも小さい
 - 殻燃焼によってヘリウム核が成長してから中心核が収縮する。
- $M > \sim 3 M_{\odot}$ の星
 - ヘリウム中心核が星全体の約10%よりも大きい。中心核はヘリウム燃焼が始まるまで収縮を継続するが、水素燃焼殻は温度が上がりすぎると膨張するため収縮できない

小質量星 $M < \sim 1 M_{\odot}$ のヘリウム燃焼

- 水素燃焼がppチェイン(中心対流なし)
- 殻燃焼へスムーズに移行
- 小質量星、中心密度大きい
 - ヘリウム核で電子縮退
 - 圧力が温度に依存しない、ほぼ等温になる
 - $n=1.5$ のポリトロープ
- ヘリウム核は質量が変わらなければ重力収縮しない、が、殻燃焼で質量が増えるため収縮する。

From Schaller + 1992, A&AS,96,269

$3M_{\odot}$	@ p_{ms} (MS)	@ $p_{ms} \times 2$	@ $X_c=0$	*1	He点火	最終	@ p_{ms} (MS) : 主系列
Age	0.123	0.3517	0.3525	0.3534	0.3573		Age (in 10^7 yr)
Log T_{eff}	4.07	3.98	4.02	3.91	3.62		Log T_{eff} (in K)
Log ρ_c	1.54	1.88	2.39	3.04	4.45		Log ρ_c (in g/cm^3)
X_c	0.54	0.0041	0	0	0		L: 光度 in L_{\odot}
Log L	1.98	2.22	2.39	2.28	2.73		X_c : 中心での水素の質量比

$2.5M_{\odot}$	@ p_{ms} (MS)	@ $p_{ms} \times 2$	@ $X_c=0$	*1	He点火	最終	@ $X_c=0$: 中心水素枯渇
Age	0.196	0.5836	0.5849	0.5871	0.5955		*1: Log T_{eff} が @ $X_c=0$ から 約0.1下がった時
Log T_{eff}	4.01	3.92	3.96	3.83	3.62		
Log ρ_c	1.65	1.99	2.51	3.24	4.64		
X_c	0.54	0.0039	0	0	0		
Log L	1.66	1.87	1.92	1.91	2.51		

$2M_{\odot}$	@ p_{ms} (MS)	@ $p_{ms} \times 2$	@ $X_c=0$	*1	He点火	最終
Age	0.368	1.1138	1.1159	1.1237	1.1481	
Log T_{eff}	3.94	3.85	3.88	3.77	3.63	
Log ρ_c	1.78	2.15	2.66	3.53	5.13	
X_c	0.54	0.0029	0	0	0	
Log L	1.27	1.46	1.51	1.51	2.32	

$1.7M_{\odot}$	@ p_{ms} (MS)	@ $p_{ms} \times 2$	@ $X_c=0$	*1	He点火	最終
Age	0.013	1.821	1.827	1.867	なし	1.936
Log T_{eff}	3.90	3.81	3.83	3.70	3.57	
Log ρ_c	1.85	2.22	2.79	4.37	5.67	
X_c	0.68	0.0050	0	0	0	
Log L	0.92	1.14	1.20	1.11	2.86	

$1M_{\odot}$	@ p_{ms} (MS)	@ $p_{ms} \times 2$	@ $X_c=0$	*1	He点火	最終
Age	0.023	4.958	9.845	12.157	なし	12.270
Log T_{eff}	3.75	3.77	3.76	3.66	3.52	
Log ρ_c	1.89	2.20	2.85	5.11	5.79	
X_c	0.68	0.30	0	0	0	
Log L	-0.16	-0.003	0.22	1.30	3.10	

主系列後

- 赤色巨星になる理由
 - 水素が燃え尽きると中心核で
 - 外側に残っている水素が
 - ヘリウム中心核が収縮は温度が上がり余分な
 - 外層が膨張、温度が下がる
(なぜ膨張するのか説明し)
 - ヘリウム核が大きくなる
- Hayashi (林) line
 - Fully convective star
 - HR図の禁止領域
 - 数値計算例

