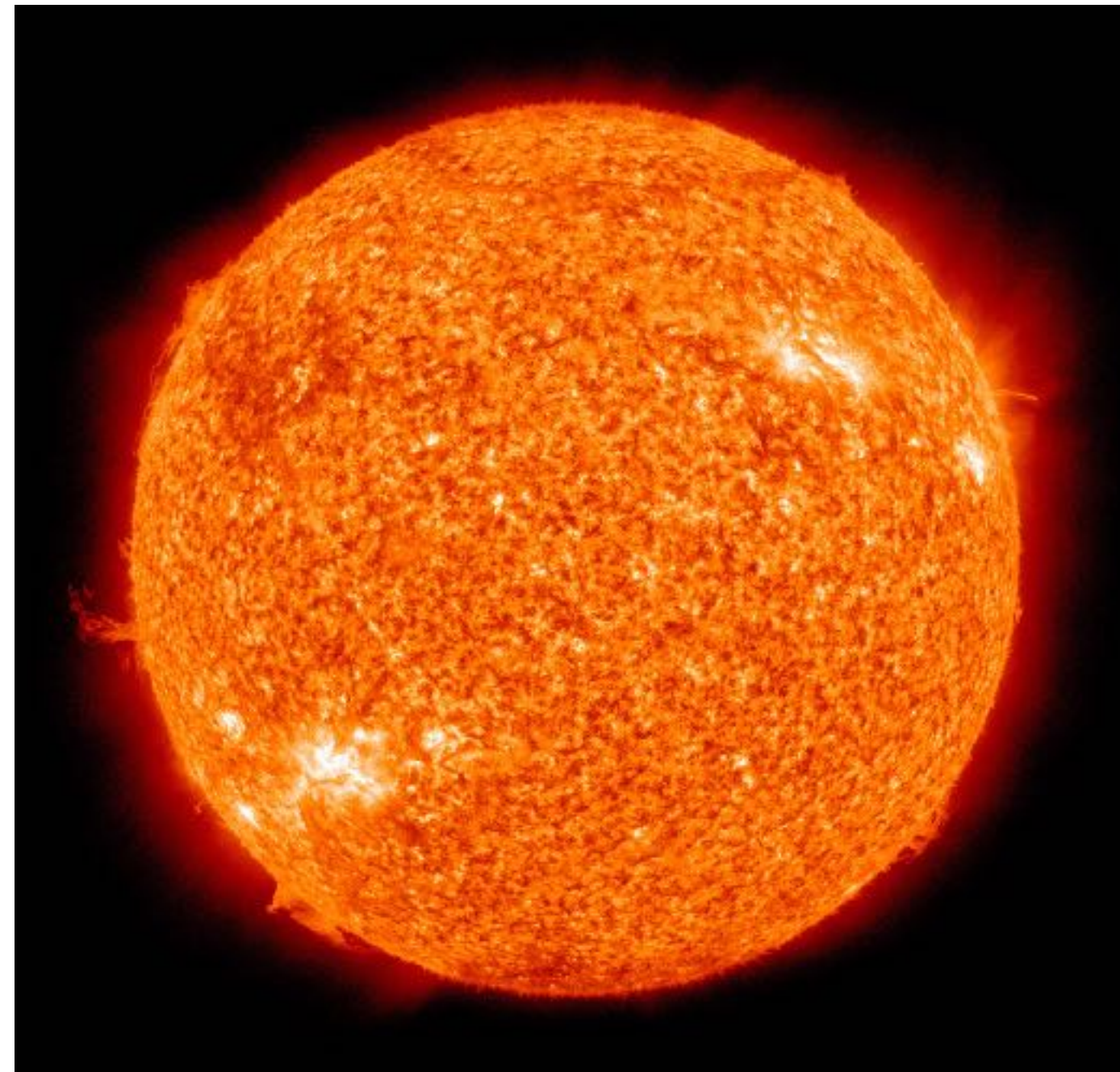


地球惑星圏物理学

第9回：恒星の形成と進化



黒川 宏之

東京工業大学 地球生命研究所

hiro.kurokawa@elsi.jp

レポート課題 (6/10 17時締切)

1. 地球からの水素原子の大気散逸率はコールドトラップにおける水素を含む分子の混合比に比例し、次式で与えられる。

$$F_{\text{esc}}^{\text{H}} = 2.5 \times 10^{17} f_{\text{T}}(\text{H}) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad \text{— (1)}$$

総水素混合比 f_{T} は水素を含む分子の混合比から以下のように定義される。

$$f_{\text{T}}(\text{H}) = f_{\text{H}} + 2f_{\text{H}_2} + 2f_{\text{H}_2\text{O}} + 4f_{\text{CH}_4} \quad \text{— (2)}$$

この時、45億年間で失われる海水の質量割合(%)を求めよ。ただし、残った酸素は地殻を酸化して失われるとする。(有効数字1桁)

2. 地球がより太陽に近い軌道を回っていた場合、コールドトラップが機能せず、大気が水蒸気で満たされる ($f_{\text{T}}(\text{H}) \simeq 1$)。この時、地球海水相当の水が失われる時間(年)を見積もれ。(有効数字1桁)

以下の値を用いること。水素原子質量 $1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 、地球半径 = $6.4 \times 10^6 \text{ m}$ 、海水質量 = $1.4 \times 10^{21} \text{ kg}$

レポート課題 (6/10 17時締切)

1. 地球半径, 地球の年齢, 海水質量, 水素原子質量をそれぞれ R_E , $t_{4.5 \text{ Gyrs}}$, M_{ocean} , m_H とおく.

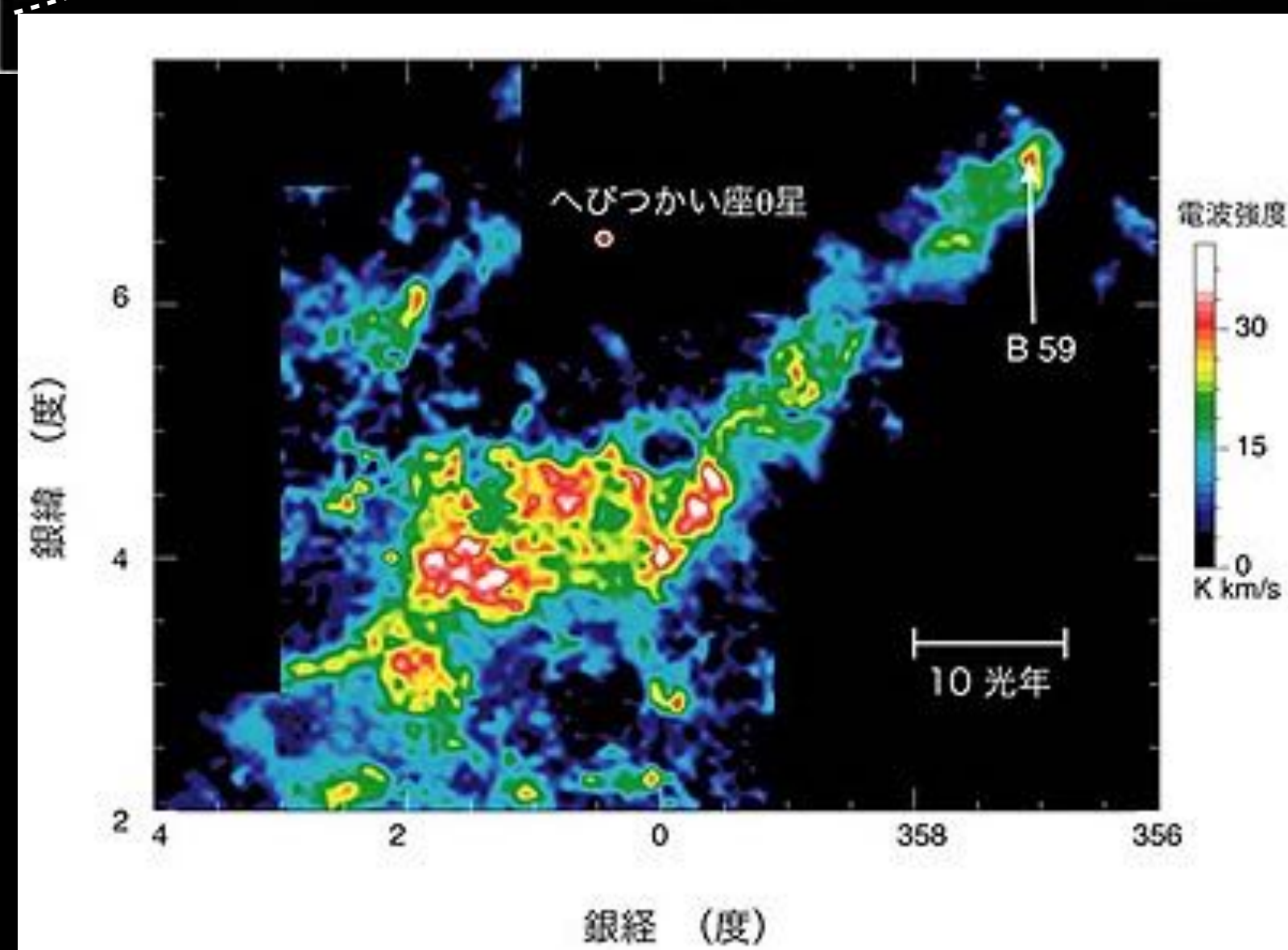
$$f_T(\text{H}) = 0.5 \text{ ppmv} \times 2 + 3 \text{ ppmv} \times 2 + 1.8 \text{ ppmv} \times 4 = 14.2 \text{ ppmv} \text{ --- (1) より}$$

$$f_{4.5 \text{ Gyrs}} = \frac{F_{\text{esc}} \times 4\pi R_E^2 \times t_{4.5 \text{ Gyrs}}}{M_{\text{ocean}} \times 2/18/m_H} \simeq 0.3 \% \text{ --- (2)}$$

2. 海水が失われる時間を t_{complete} , $f_T(\text{H}) = 1$ とすると,

$$t_{\text{complete}} = \frac{M_{\text{ocean}} \times 2/18/m_H}{F_{\text{esc}} \times 4\pi R_E^2} \simeq 2000 \text{ 万年}$$

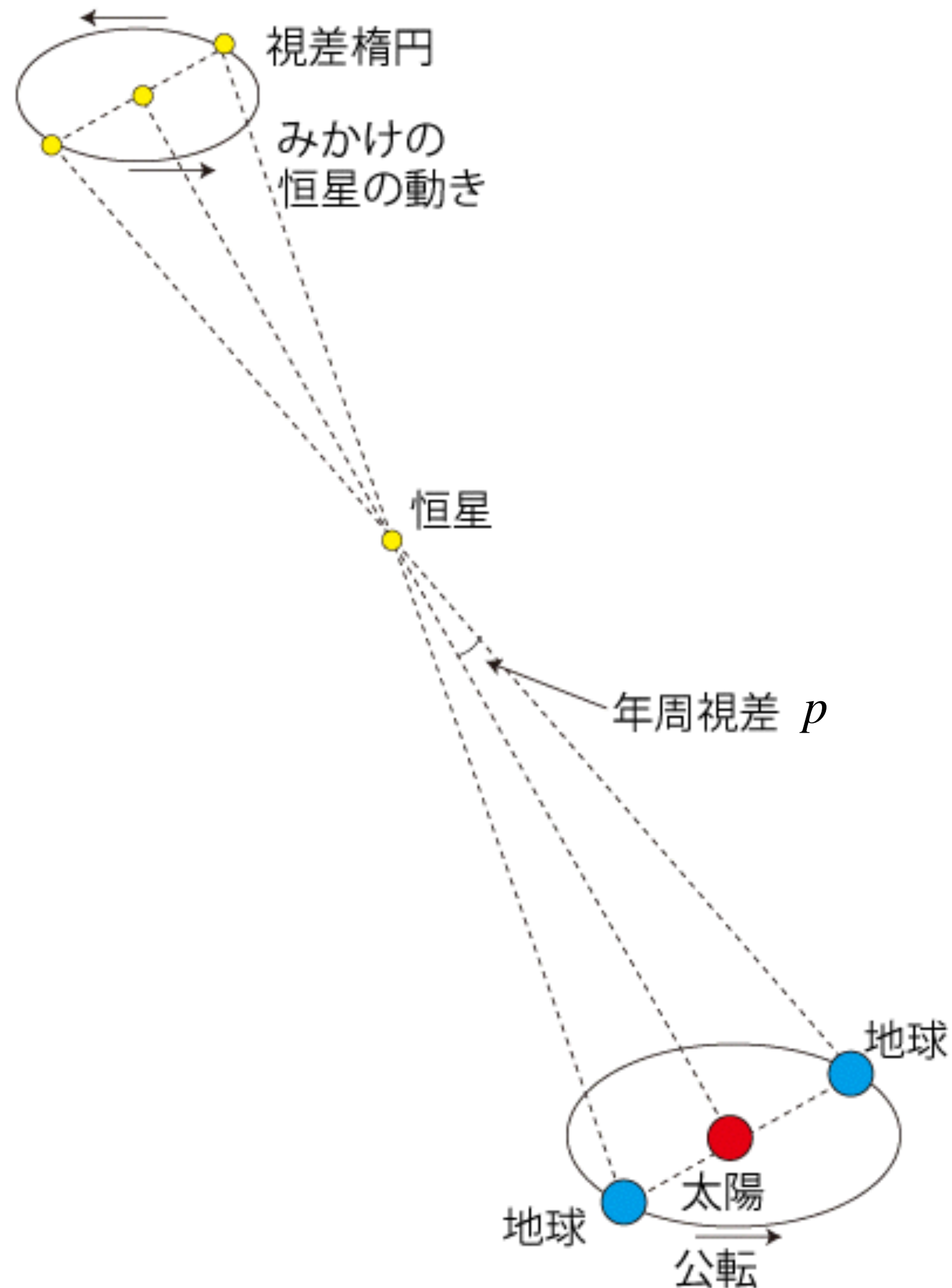
星間分子雲



- 星間物質の中でも密度が高い (10^{2-3} 個/cc)
- 低温 (10 K) でガスは分子として存在
- サイズ 10-100 pc

$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ 光年} = 2.06 \times 10^5 \text{ au}$$

補足：au と pc



年周視差 (annual parallax) p ,

恒星までの距離 d , 太陽と地球の距離 $d_{1 \text{ au}}$ とすると,

$$p \simeq \tan p = \frac{d_{1 \text{ au}}}{d} \quad \text{--- (1)}$$

ここで $p = 1'' = \left(\frac{2\pi}{360 \cdot 60 \cdot 60} \right) \text{ rad}$ に対応する距離を

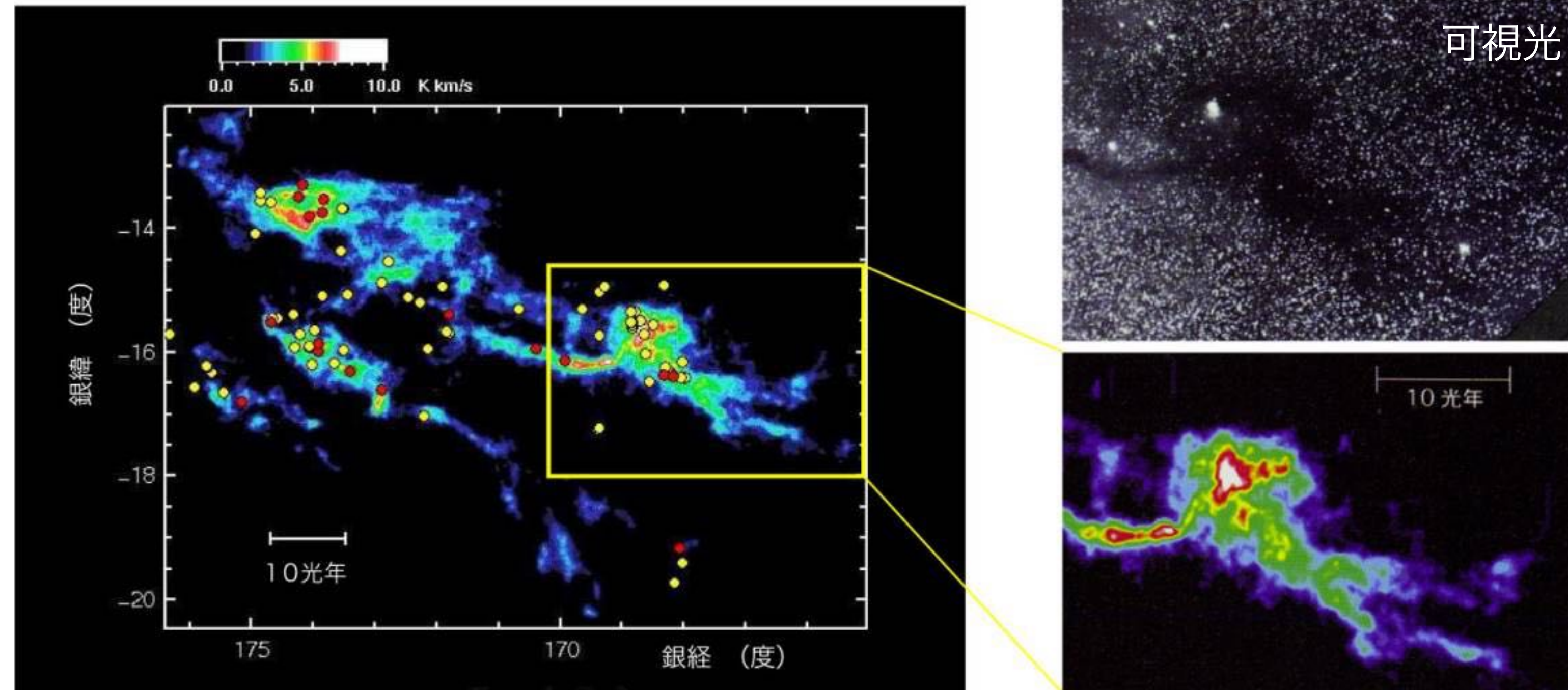
$d \equiv 1 \text{ pc}$ (parsec) と定義する.

$$\therefore 1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ au}}{1''} \simeq 2.06 \times 10^5 \text{ au}$$

天文観測において便利な単位！

原始星の誕生

おうし座分子雲



電波放射マップ+

理科年表オフィシャルサイト

原始星・前主系列星の位置

- 高密度の分子雲コア (~0.1 pc) が自己重力で収縮し、原始星が誕生
- 1つの分子雲から多くの原始星が誕生

原始惑星系円盤の形成

分子雲コアから恒星が形成

・ **重力** $F_G \sim \frac{GM}{R^2}$ — (1)

・ **遠心力** $F_{\text{centr}} \sim R\Omega^2 \sim \frac{L^2}{R^3}$ — (2)

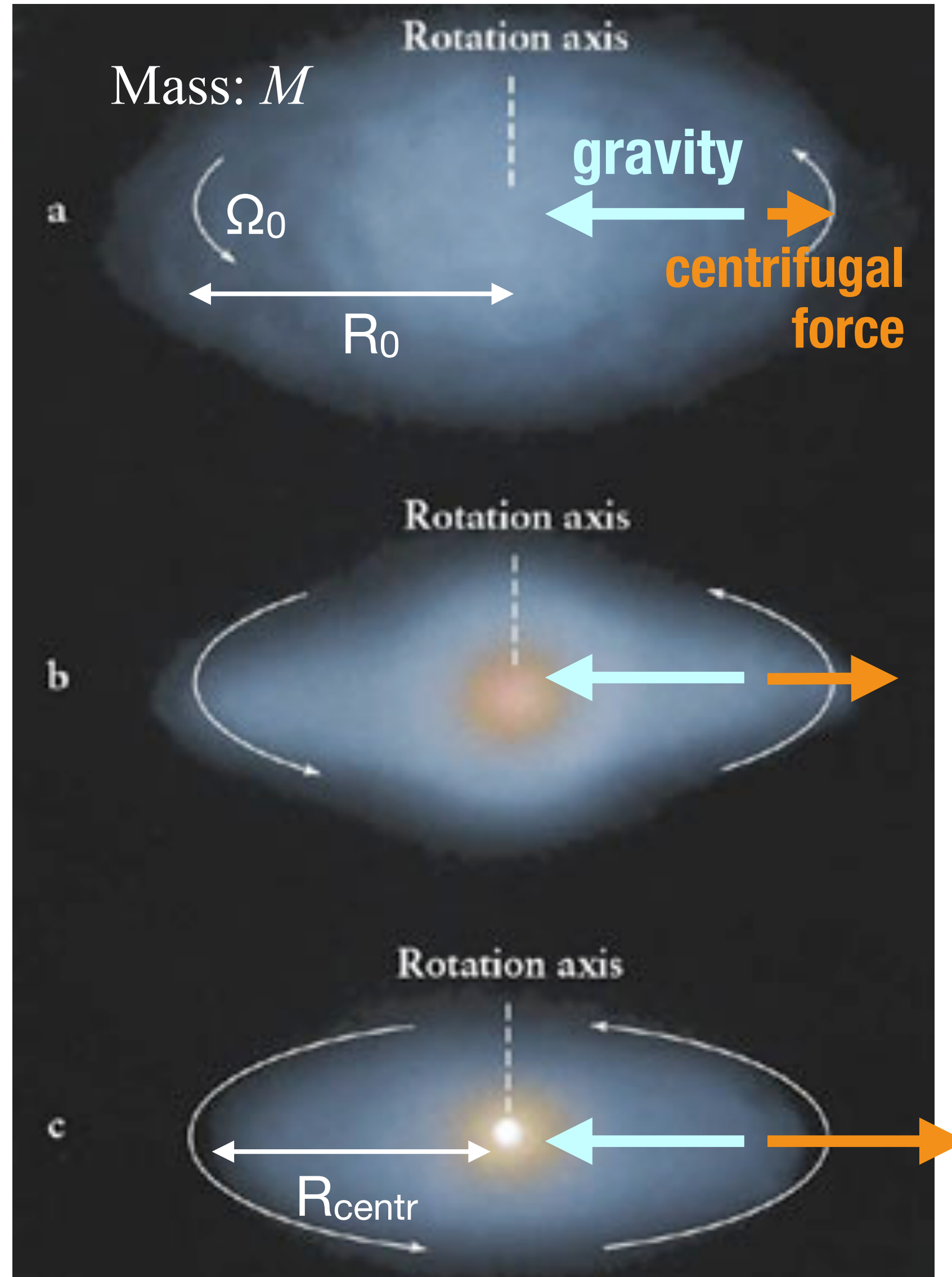
角運動量 : $L \sim R^2\Omega = R_0^2\Omega_0$ — (3)

角運動量の保存から、

ある半径 R_{centr} で力が釣り合う

$$R_{\text{centr}} \sim \frac{L^2}{GM} \sim \frac{(R_0^2\Omega_0)^2}{GM} \quad \text{— (4)}$$

典型的には $R_{\text{centr}} \sim 100 \text{ au}$



原始星から前主系列星へ

原始星

前主系列星

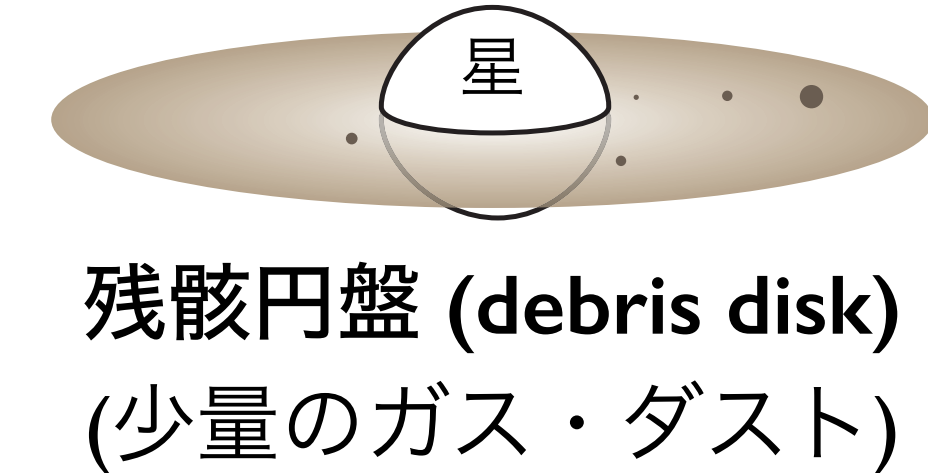
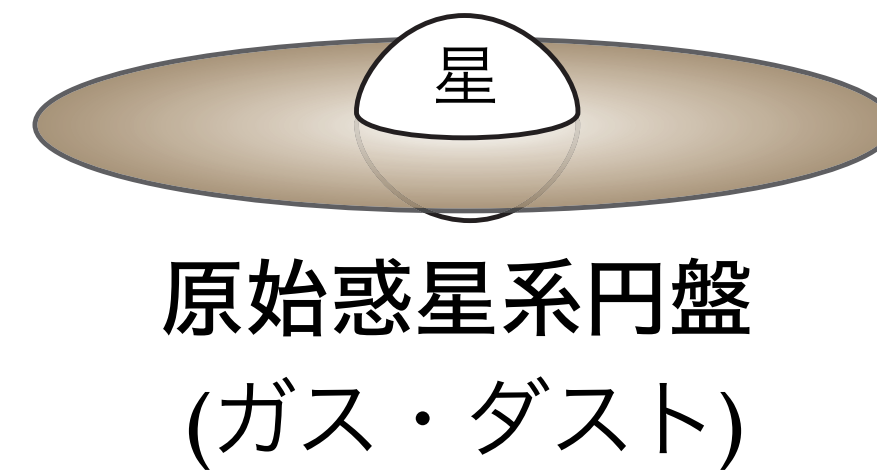
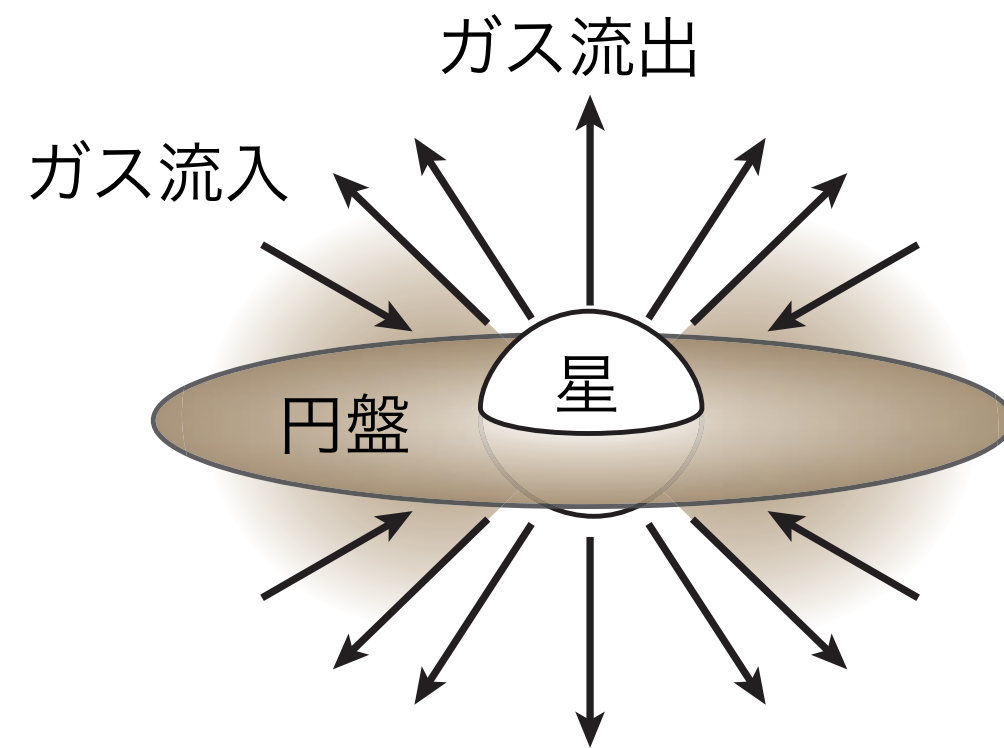
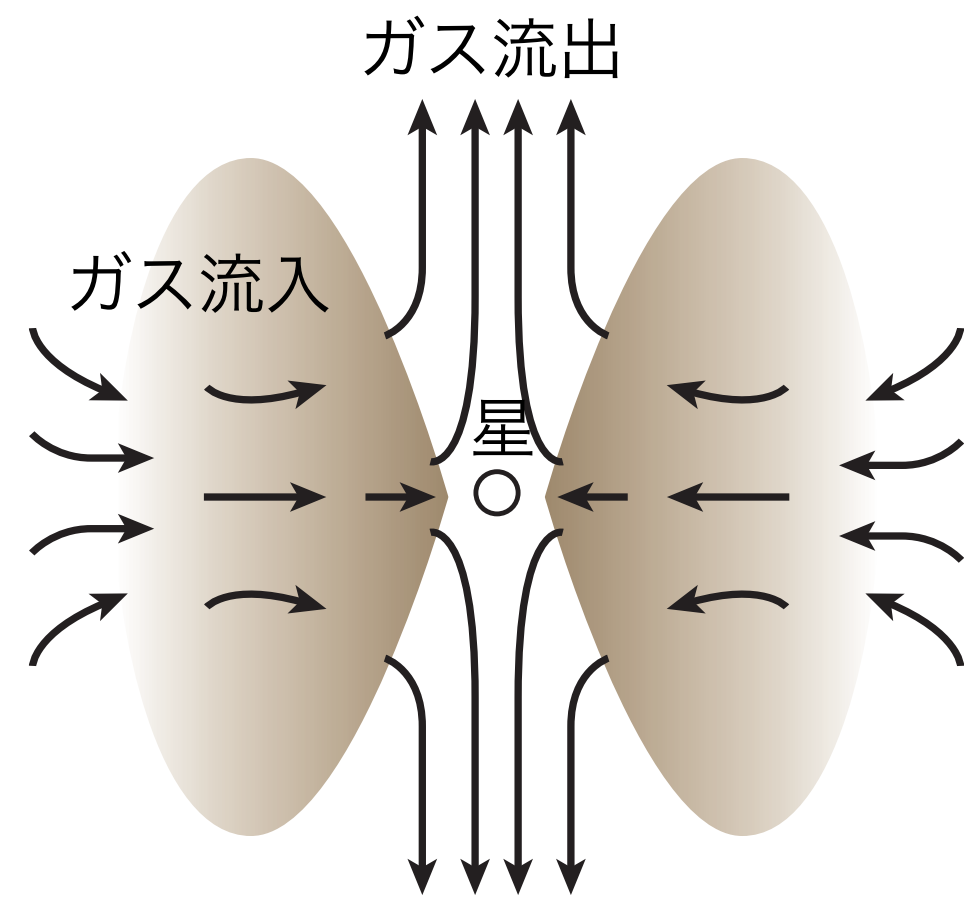


Image credit: 奥住聡

10^4 年

10^5 年

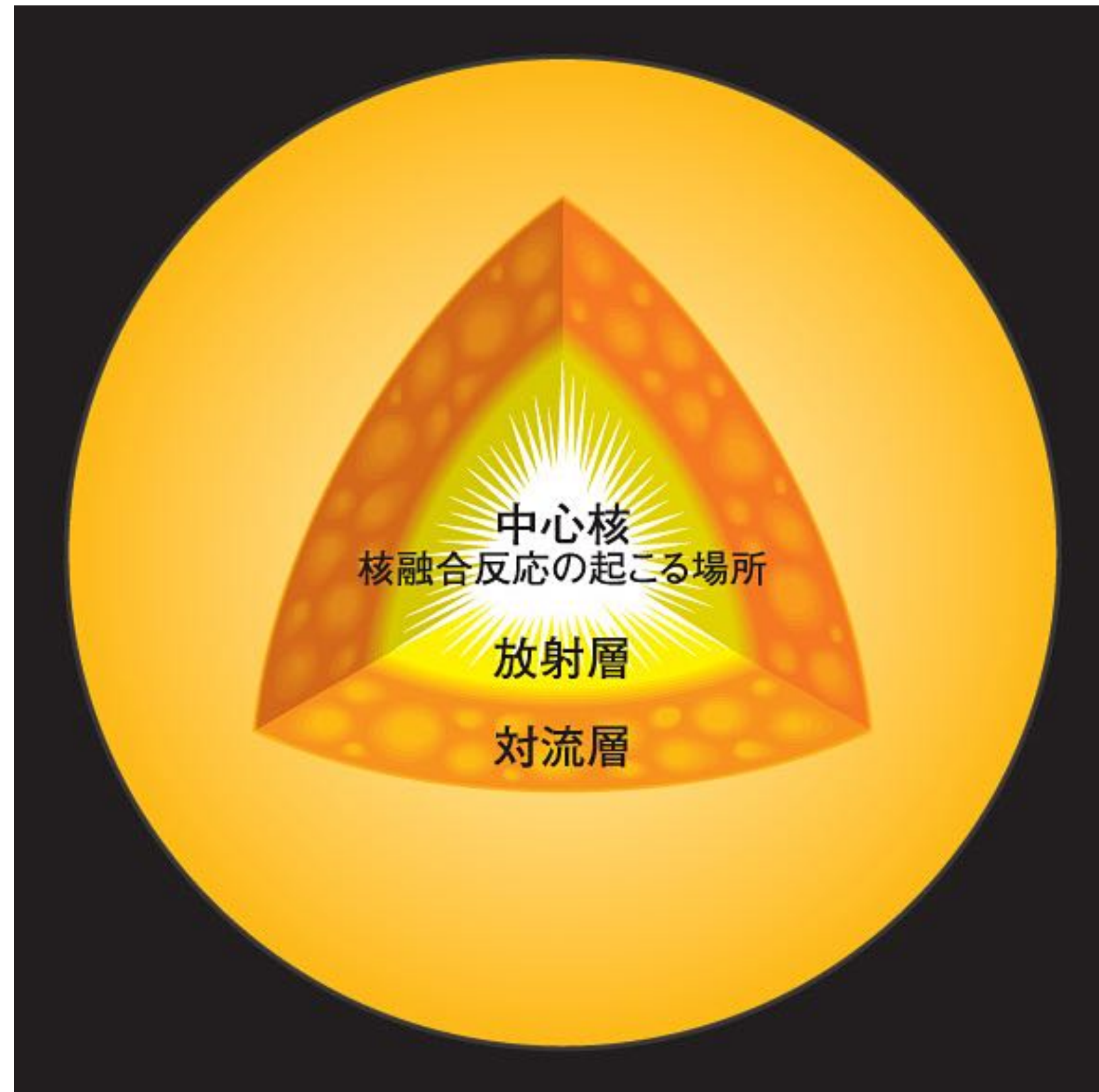
10^6 年

10^7 年

年齢 →

水素核融合をする
主系列星へ →

太陽の内部構造



太陽の内部構造 (理科年表サイトより)

r : 中心からの距離

R_{\odot} : 太陽の半径

中心核 ($0 < r < 0.2 R_{\odot}$)

- 温度 10^7 K, 密度 10^2 g cm^{-3} の高温・高密度
- 水素核融合反応 (陽子 $\times 4 \rightarrow$ He原子核)

放射層 ($0.2 R_{\odot} < r < 0.7 R_{\odot}$)

- 放射によってエネルギー輸送

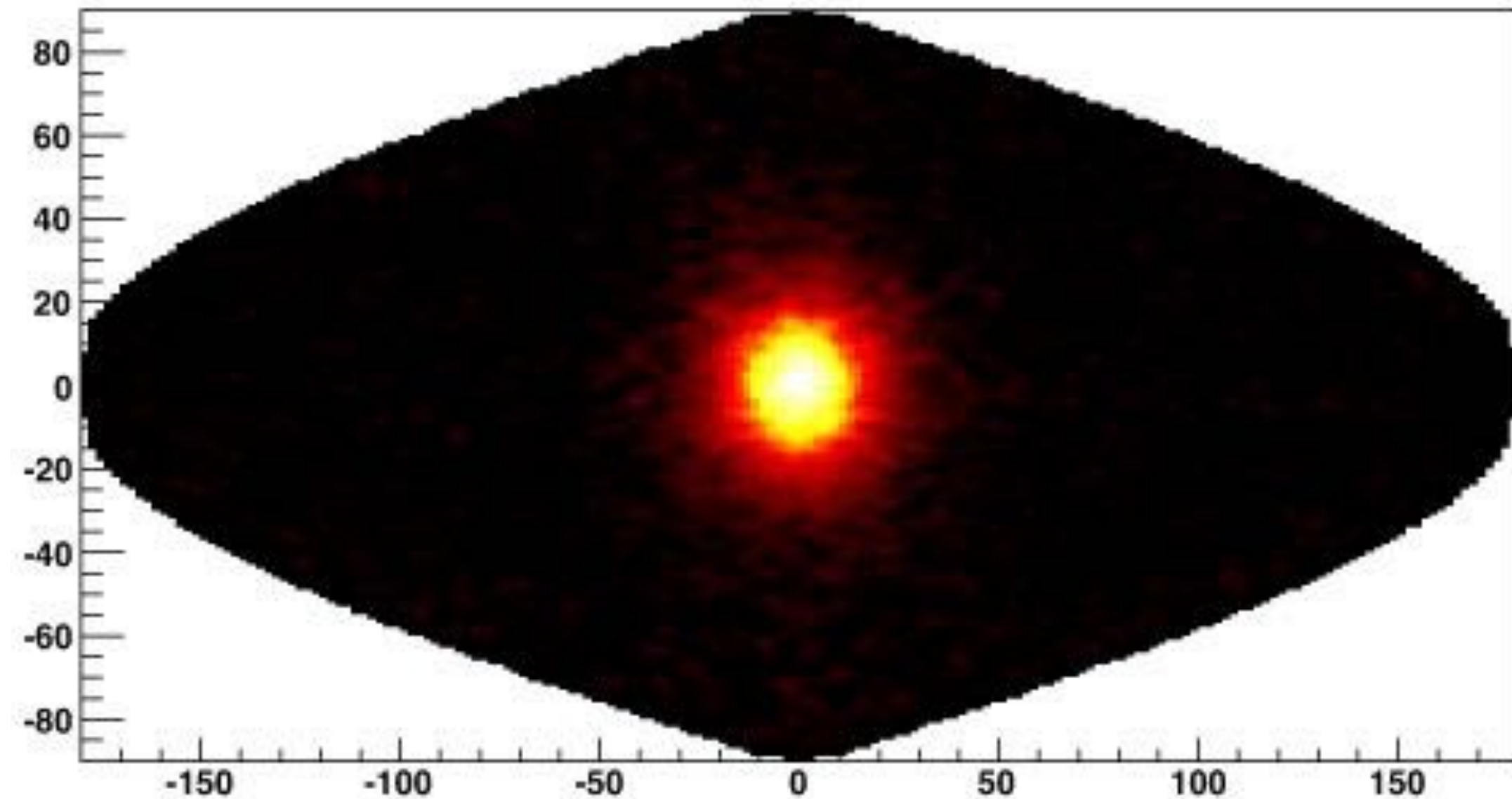
対流層 ($0.7 R_{\odot} < r < 1 R_{\odot}$)

- 対流によってエネルギー輸送

ニュートリノで視る太陽中心核

- 水素核融合反応によってニュートリノ生成
- ニュートリノは物質とほとんど反応せず、
太陽中心核の今(8分前)の姿を捉えることができる
(\leftrightarrow 光子が太陽の外に出るまでは約10万年)

スーパーカミオカンデで観測された太陽中心核



スーパーカミオカンデウェブページより

恒星内部での元素合成

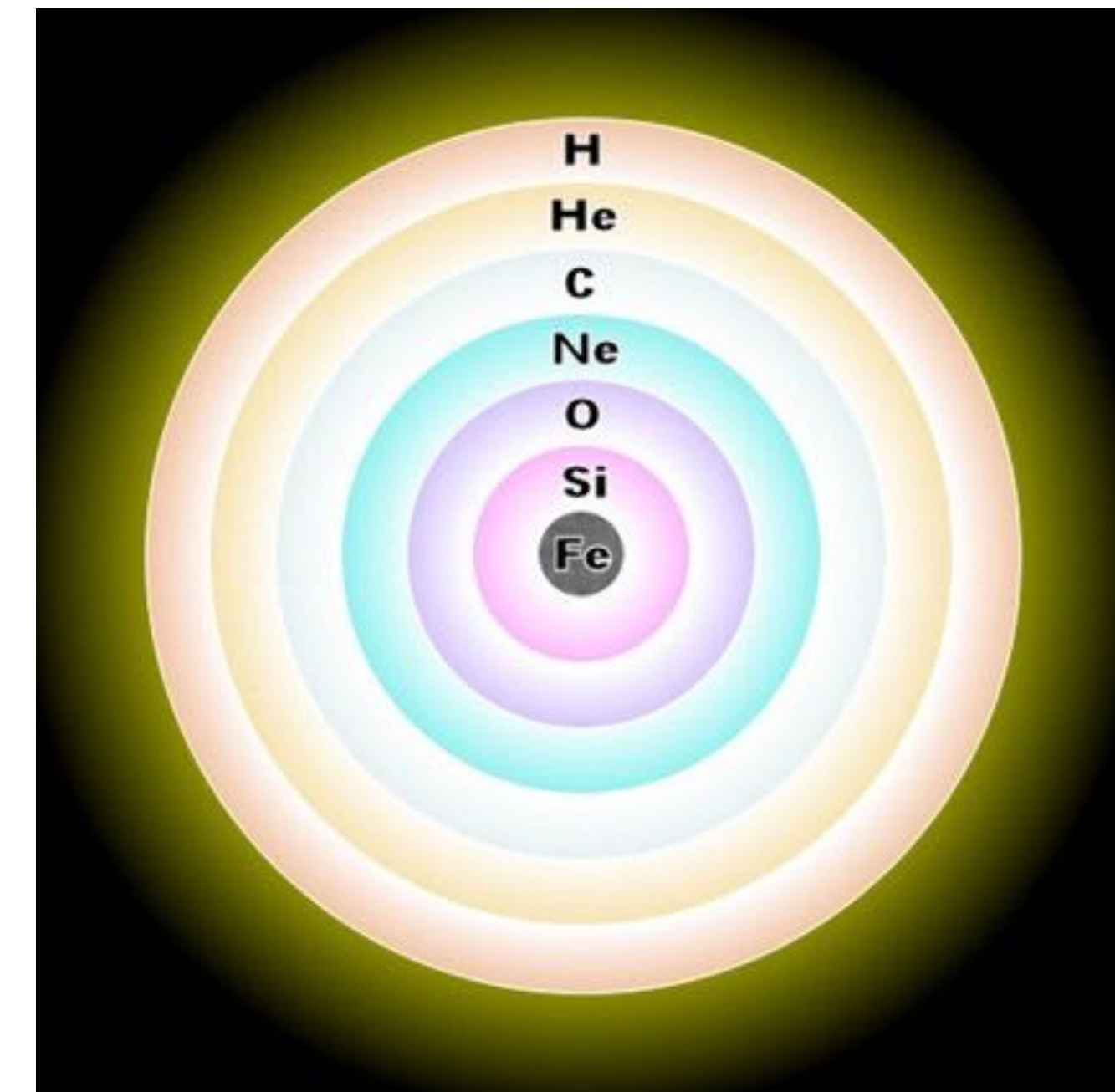
- 水素がなくなると、恒星内部は収縮して高圧に ⇒ ヘリウムより重い元素の核融合
 - どの元素まで燃焼が進むかは恒星の質量に依存
 - 鉄より原子番号の大きい元素はより不安定(吸熱反応), 合成されない

ヘリウム燃焼

- ヘリウム原子核3個から炭素を生成
($> 1 \times 10^8$ K)

炭素燃焼・酸素燃焼

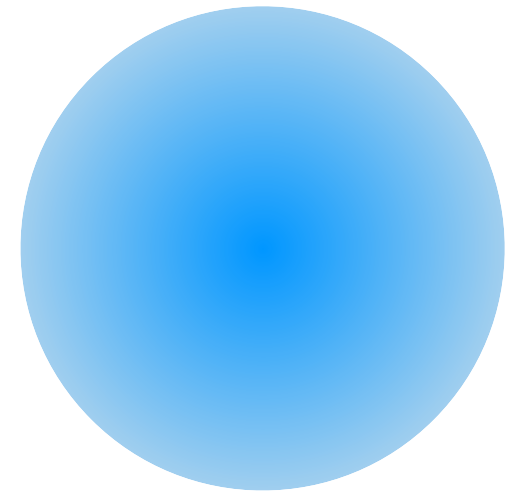
- 太陽の約8倍以上の質量の恒星内部で進行
($> 5-8 \times 10^8$ K)



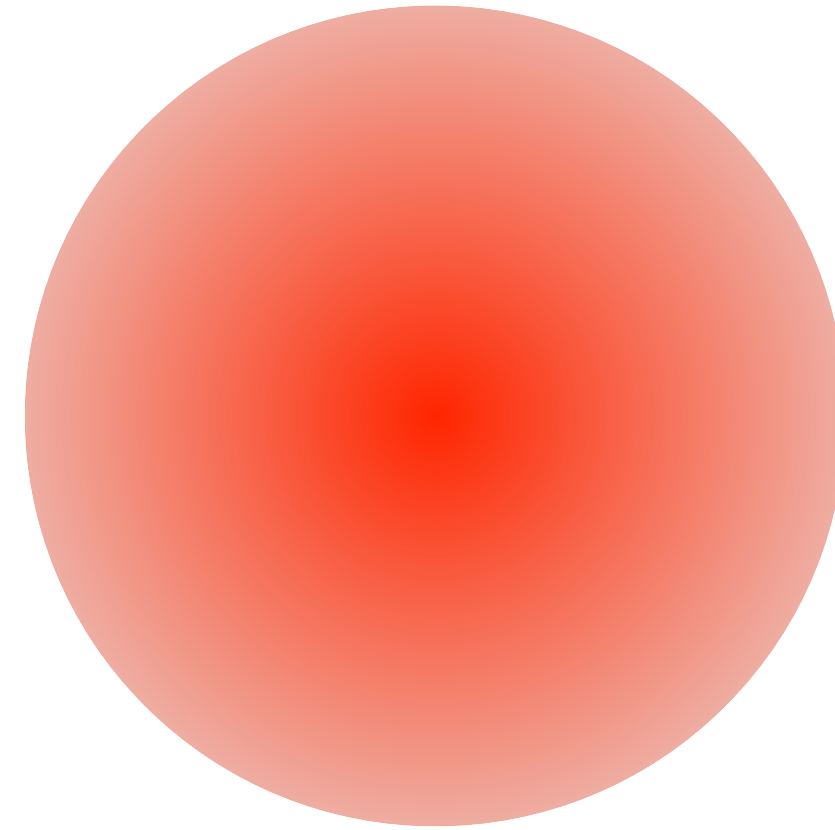
赤色超巨星内部の元素分布

恒星の進化

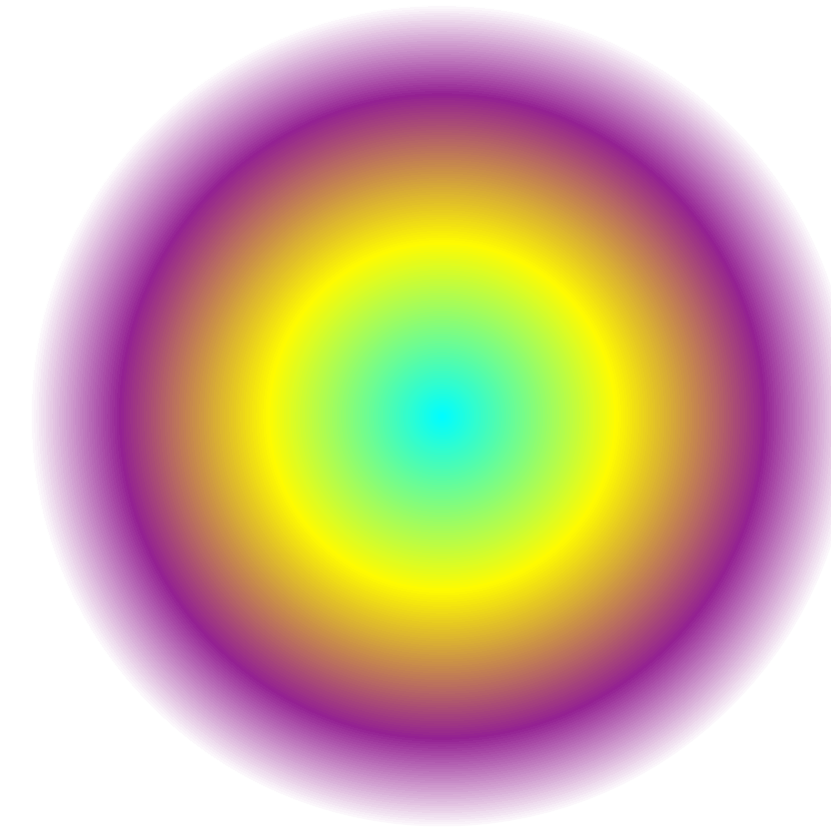
大質量星 ($> 10 M_{\odot}$)



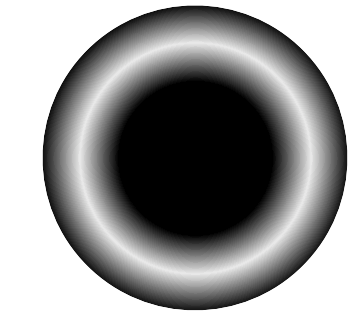
赤色超巨星



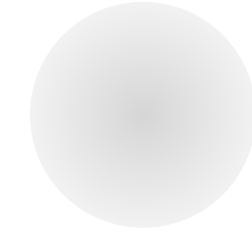
超新星爆発



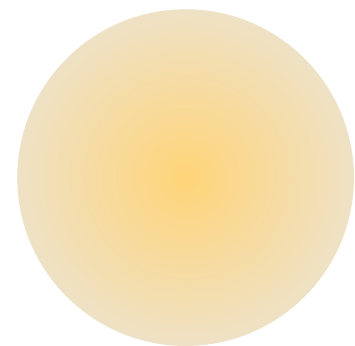
ブラックホール



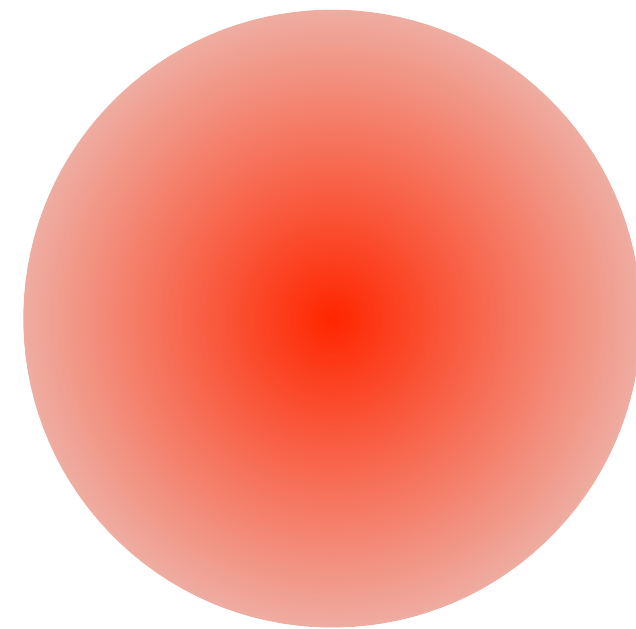
中性子星



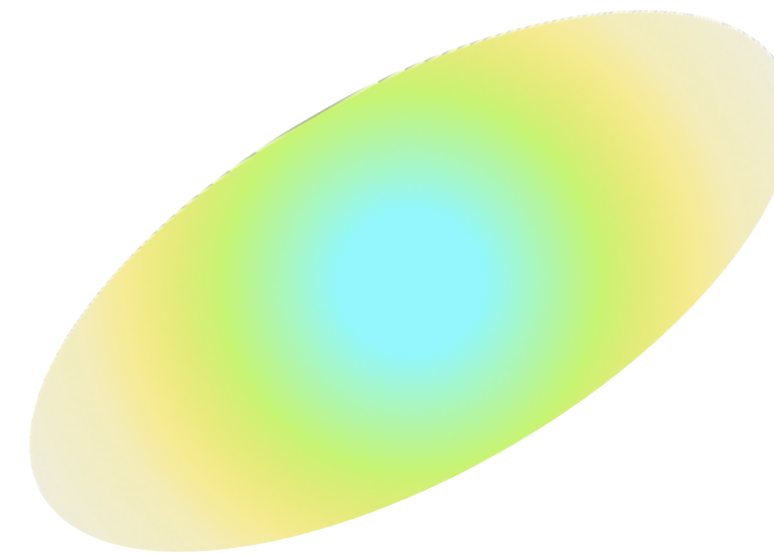
小質量星 ($< 10 M_{\odot}$)



赤色巨星



惑星状星雲

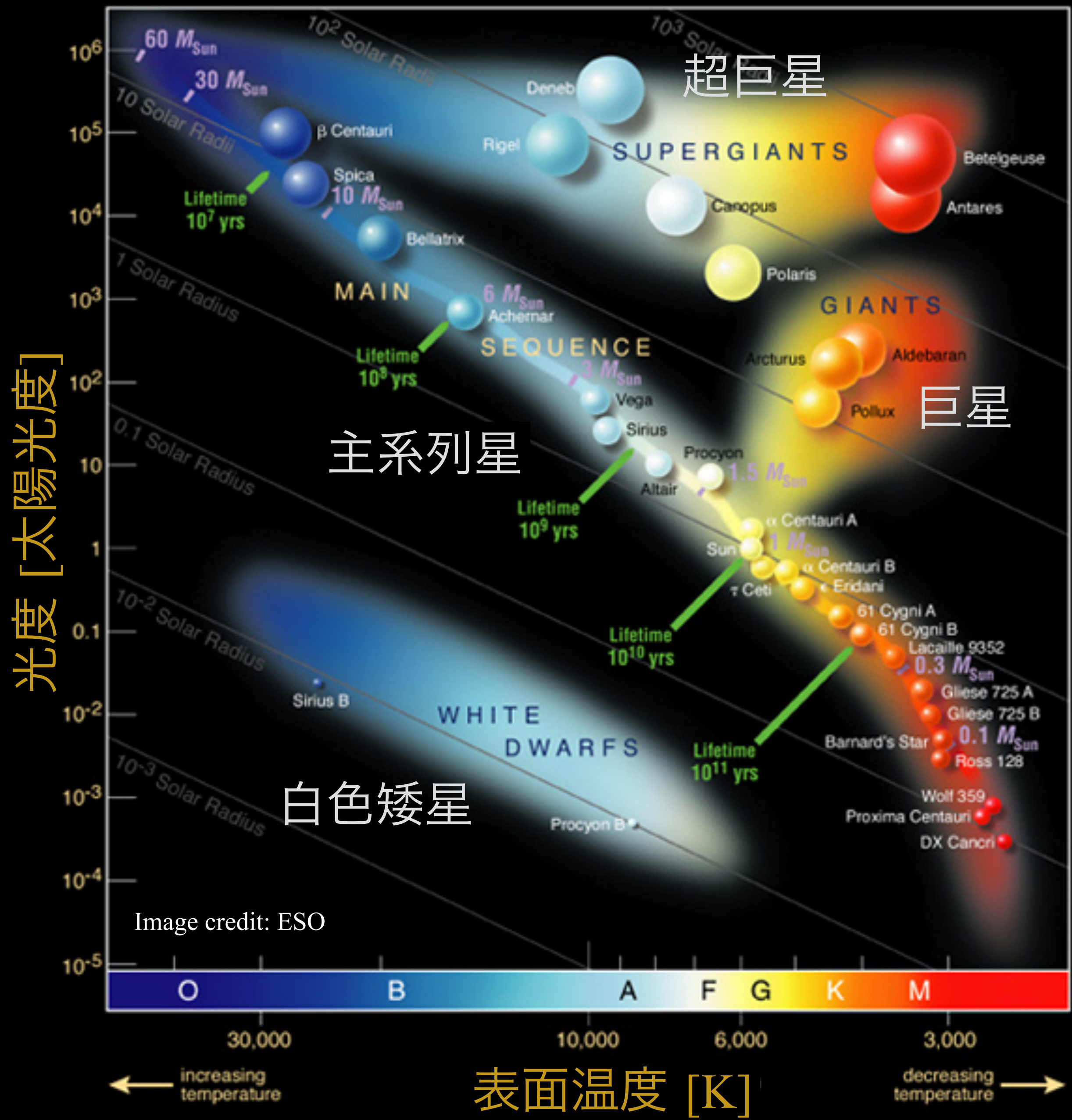


白色矮星



時間

ヘルツシュプルング-ラッセル図 (HR図)



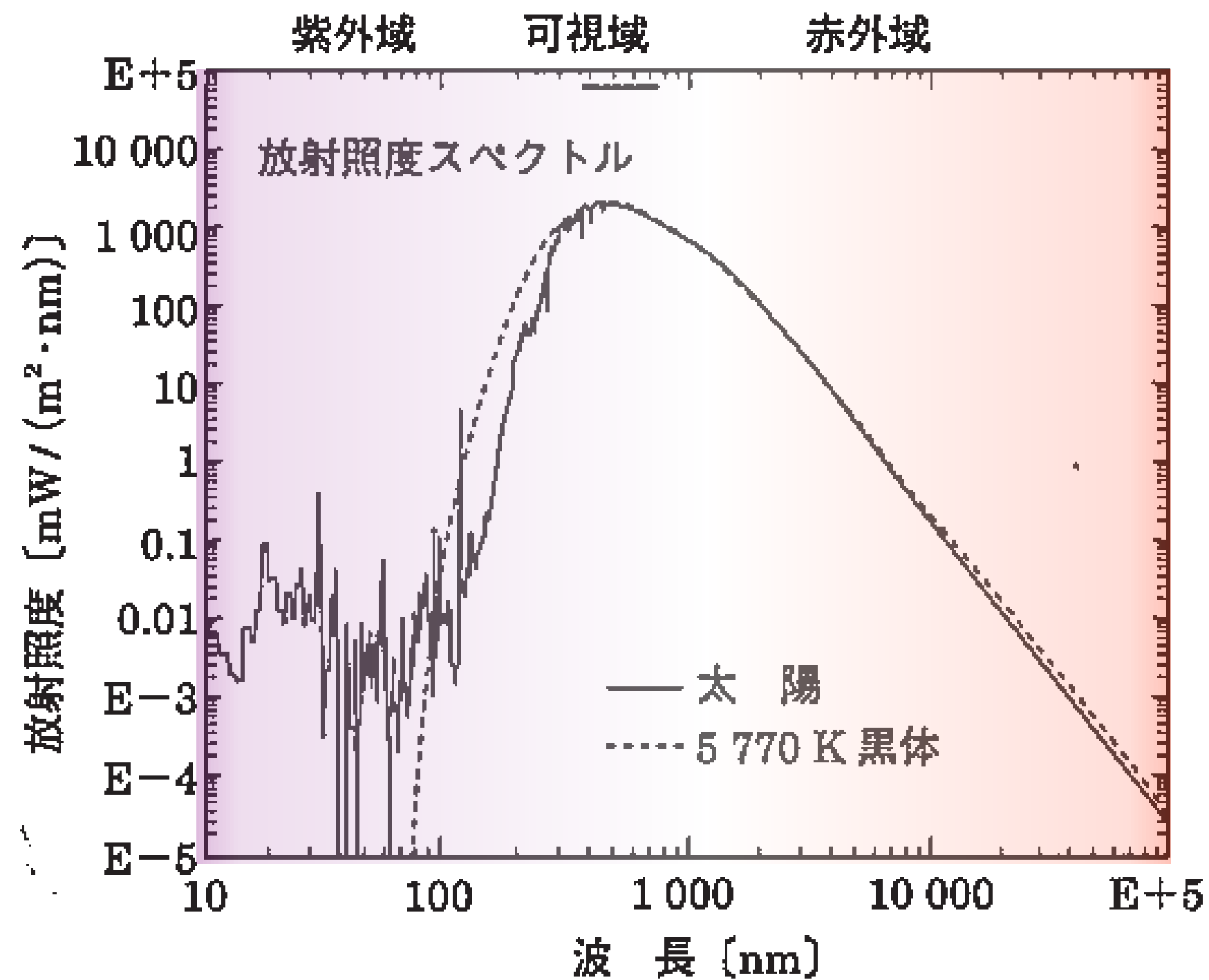
HR図

- 縦軸：星の絶対等級
- 横軸：スペクトル型 (温度)

主系列星

- 中心温度 $\geq 10^7$ K \rightarrow 水素核融合

恒星の放射



太陽の放射強度スペクトル
(オーム社『宇宙環境科学』より)

プランクの法則

単位時間・単位面積・単位立体角・単位波長あたりの放射エネルギー

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda k_B T) - 1}$$

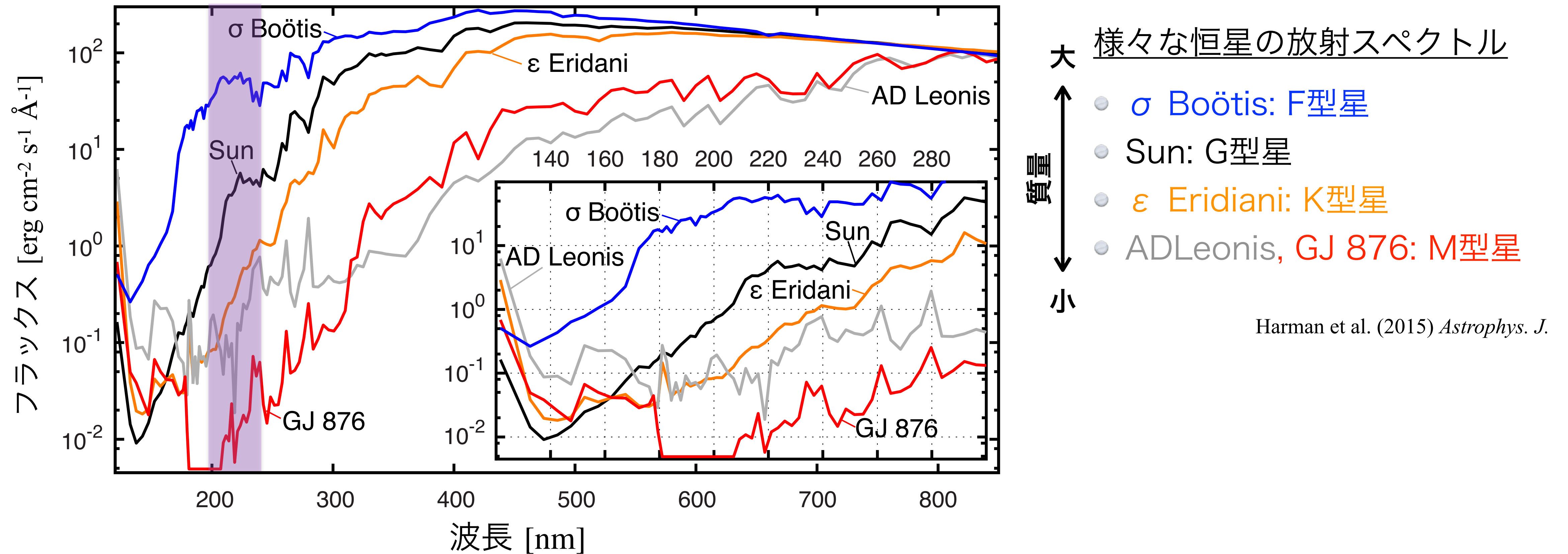
c : 光速, h : プランク定数,
 k_B : ボルツマン定数

ウィーンの変位則 (λ_{\max} : 放射のピーク波長)

$$\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ [m K]}$$

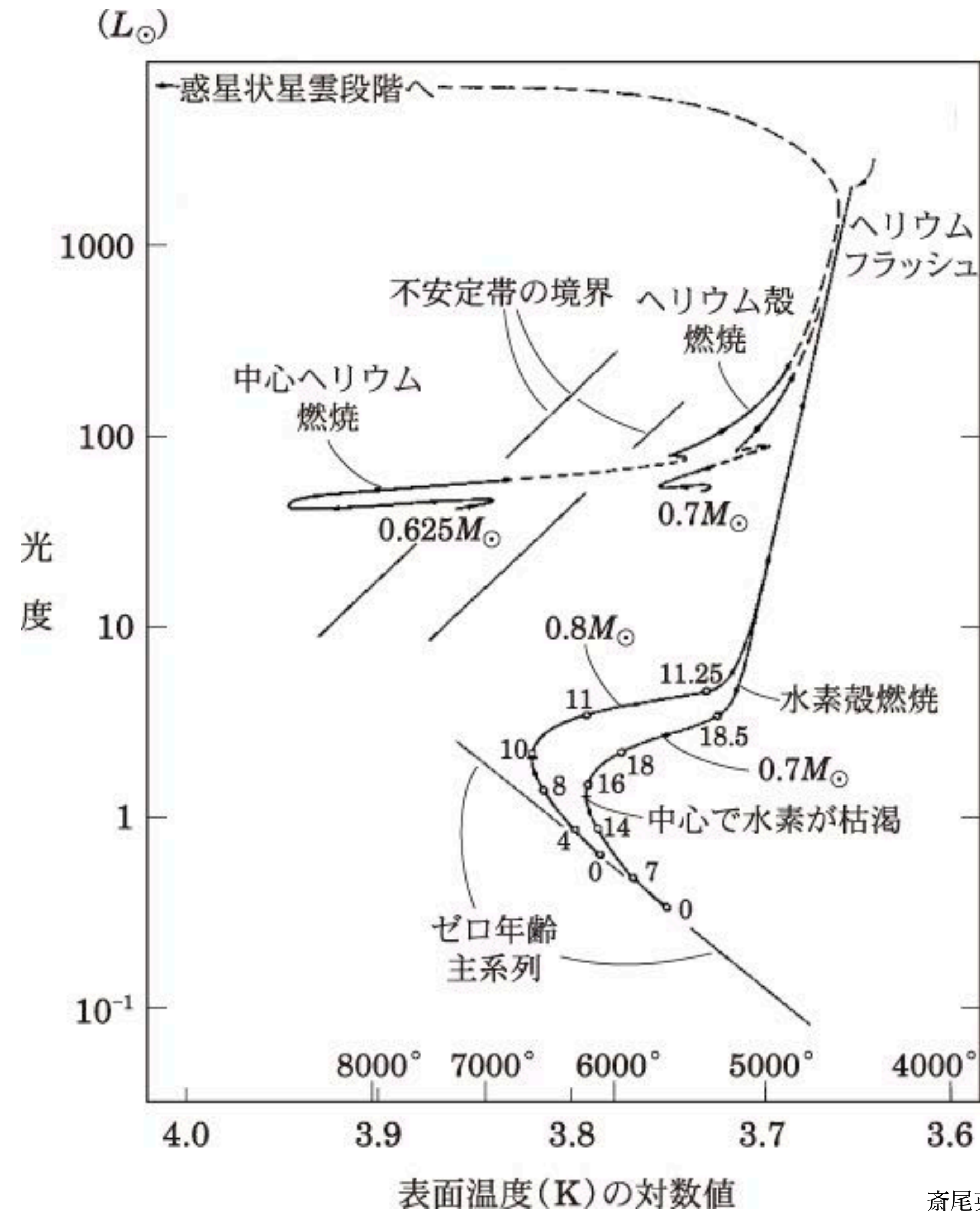
- 可視光, 赤外線がエネルギーの大部分
- 太陽光 \approx 5800 Kの黒体放射 \rightarrow ピークは 0.5 μm の可視光
- 軽い恒星はより低温, ピーク波長が長波長にずれる
- 紫外線: 彩層上部から遷移層, X線: コロナ というより高温領域から放射

恒星の紫外線放射



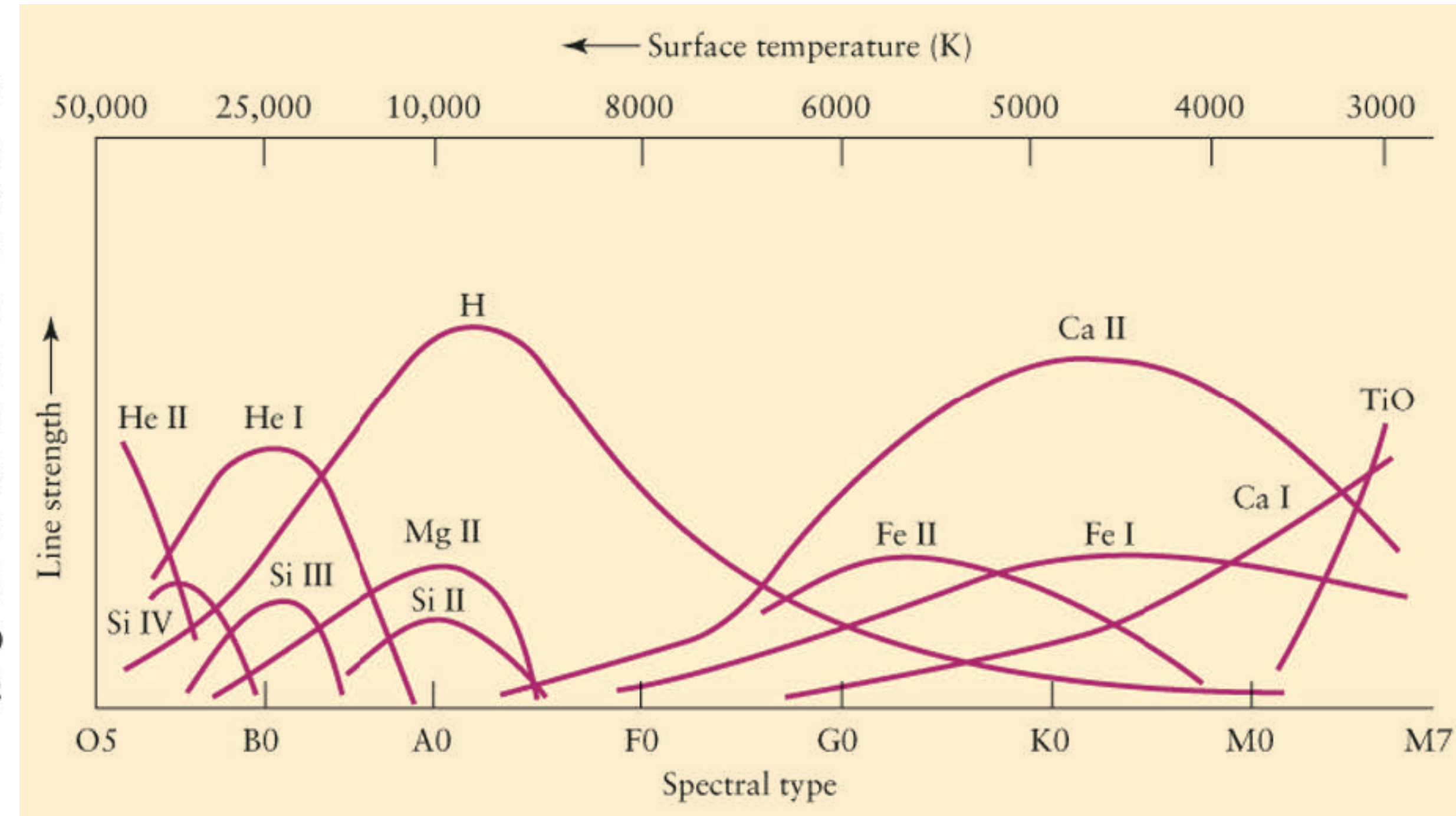
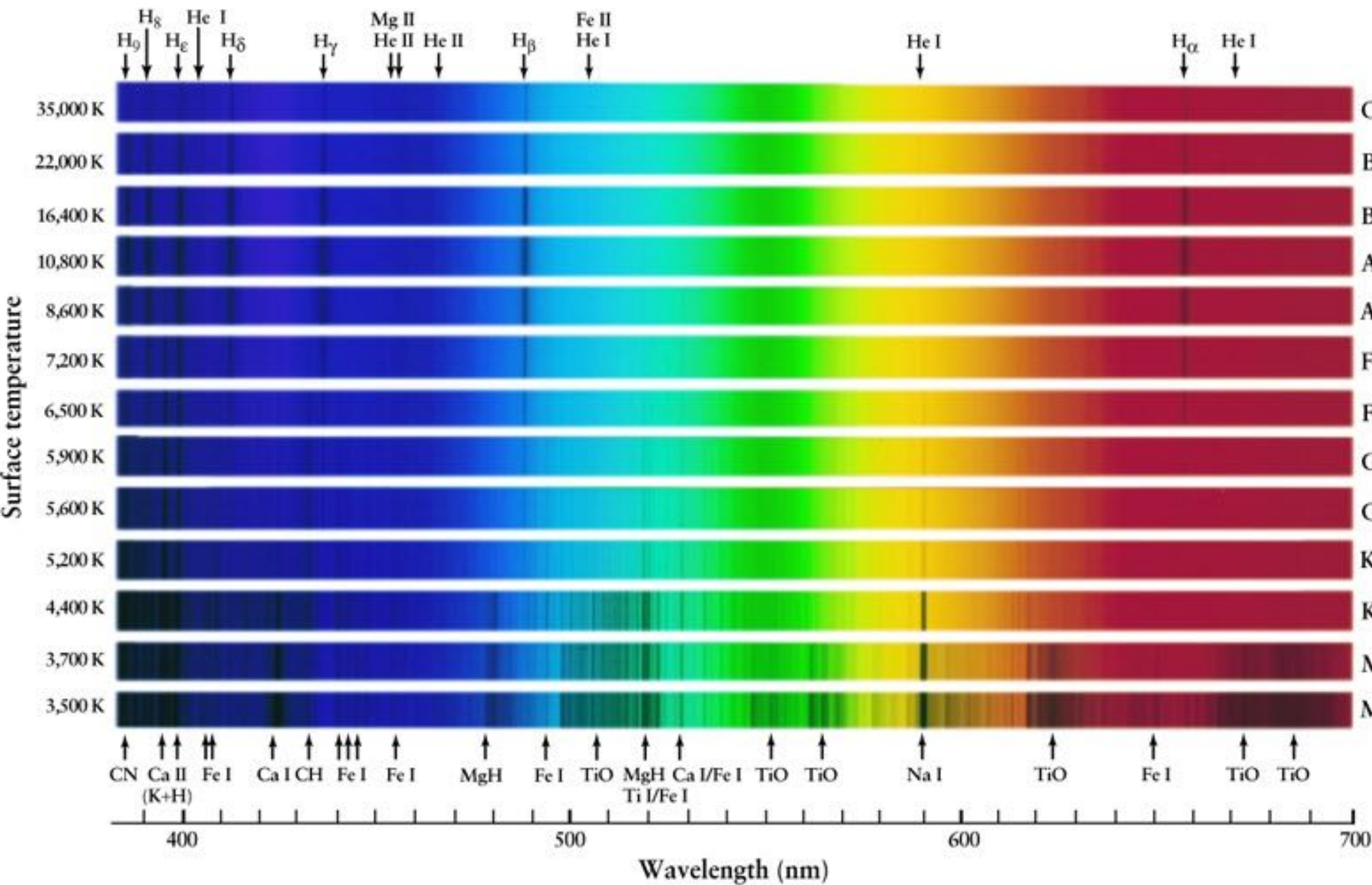
- 恒星のスペクトル型(質量)に応じて異なるUVフラックス → 大気の光化学に影響
- M型星はH₂O解離波長(200 – 240 nm)で暗い → M型星周りの惑星ではCO+O₂大気? (e.g., Tian et al. 2014)

HR図上での小質量星の進化



- 主系列で長期間 (~ 10 Gyr) 安定に存在
 - ヘリウム生成による高密度化 → 光度がゆっくり増加
 - 誕生直後の太陽は現在より30%暗い
- 中心部の水素が枯渇 → 赤色巨星
- 電子縮退したヘリウム中心核の形成
→ ヘリウムフラッシュ(暴走的なヘリウム燃焼)
- 中心部のヘリウムが枯渇
→ 質量放出が活発化.
→ 惑星状星雲 + 白色矮星 (核融合の終了)

恒星のスペクトル分類

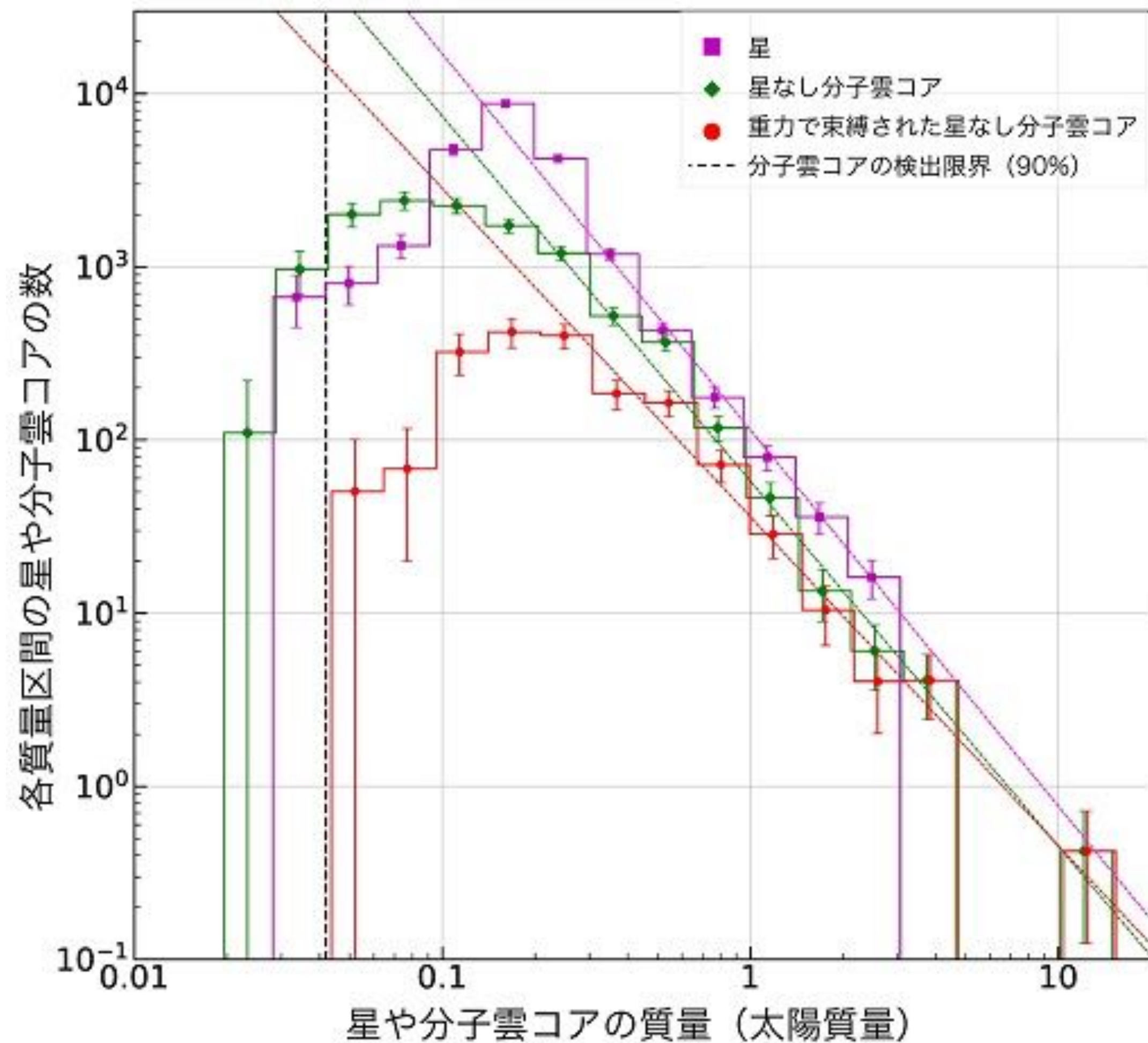


Dmitri Pogossian 氏のレクチャーノートより
https://sites.ualberta.ca/~pogossyan/teaching/ASTRO_122/lect12/lecture12.html

- スペクトルに見られる元素の吸収線に基づく。
 ← 表面温度によって元素の存在形態(イオン化・励起)が変化し、吸収線の有無が変化
- 主系列星では OBAFGKM + 0~9のサブクラス (太陽はG2)

星の質量分布

分子雲コアと星の質量分布関数 (Takemura et al. 2021, *Astrophys. J.*)



- 軽い星ほど数が多い
 - M型星の数 > G型星の数
 - 太陽近傍星はM型星が多い
- 分子雲コアの質量分布を反映

恒星質量と光度の関係

静水圧平衡の式 $\frac{dp}{dr} = -\rho \frac{GM_r}{r^2} \rightarrow \frac{p}{R} \sim \rho \frac{GM}{R^2}$ — (1)

質量保存の式 $\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \rightarrow \rho \sim \frac{M}{R^3}$ — (2)

状態方程式 $p = \frac{\rho k_B T}{\bar{m}}$ — (3)

エネルギー輸送の式(放射拡散近似) $\frac{L}{4\pi r^2} = F_{\text{rad}} = -\frac{16\sigma_{\text{SB}} T^3}{3\rho\kappa} \frac{dT}{dr} \rightarrow L \sim \frac{\sigma_{\text{SB}} R T^4}{\rho\kappa}$ — (4)

\bar{m}, κ を定数だと仮定すると, (※)

(1), (3) より, $T \propto M/R$ — (5).

(2), (5) を (4) に代入して, $L \propto M^3$ — (6). \therefore 質量が大きくなるに伴い, 光度が急激に増加.

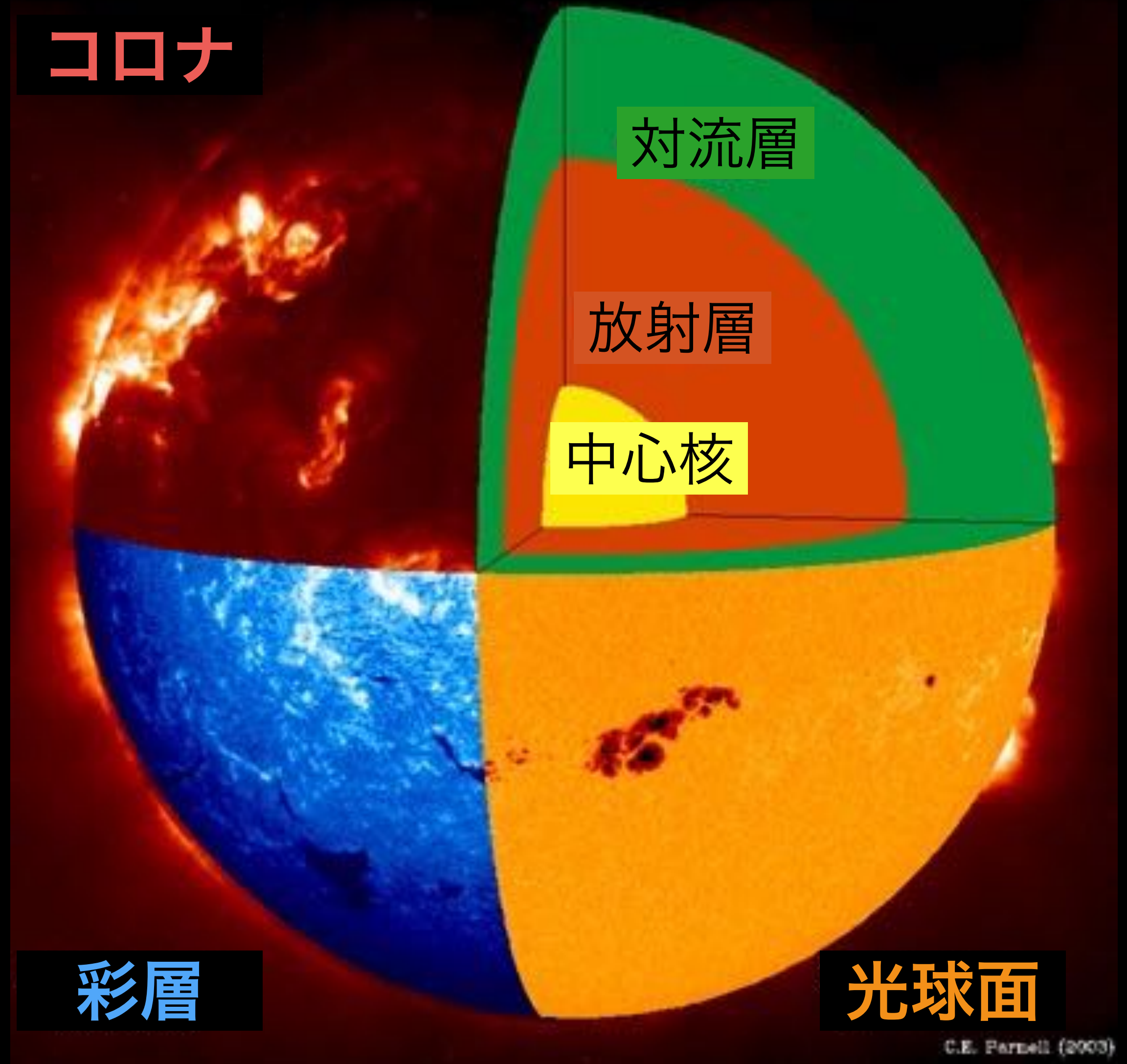
※ κ が一定ではないことを考慮すると, 小質量星では $L \propto M^4$, 大質量星では $L \propto M^3$ となる.

(e.g., Rose 1998, *Advanced Stellar Astrophysics*).

主系列星の寿命

- 核融合に使える水素(質量の $\sim 10\%$)を使い果たすと, 寿命を終える.
- 恒星放射のエネルギー源が核融合であることから,
主系列星の寿命 $\tau \sim \frac{M}{L} \propto M^{-3}$ (小質量星), $\propto M^{-2}$ (大質量星)
- 太陽では100億年程度, 大質量星では1000万年程度となる.

太陽の大気構造



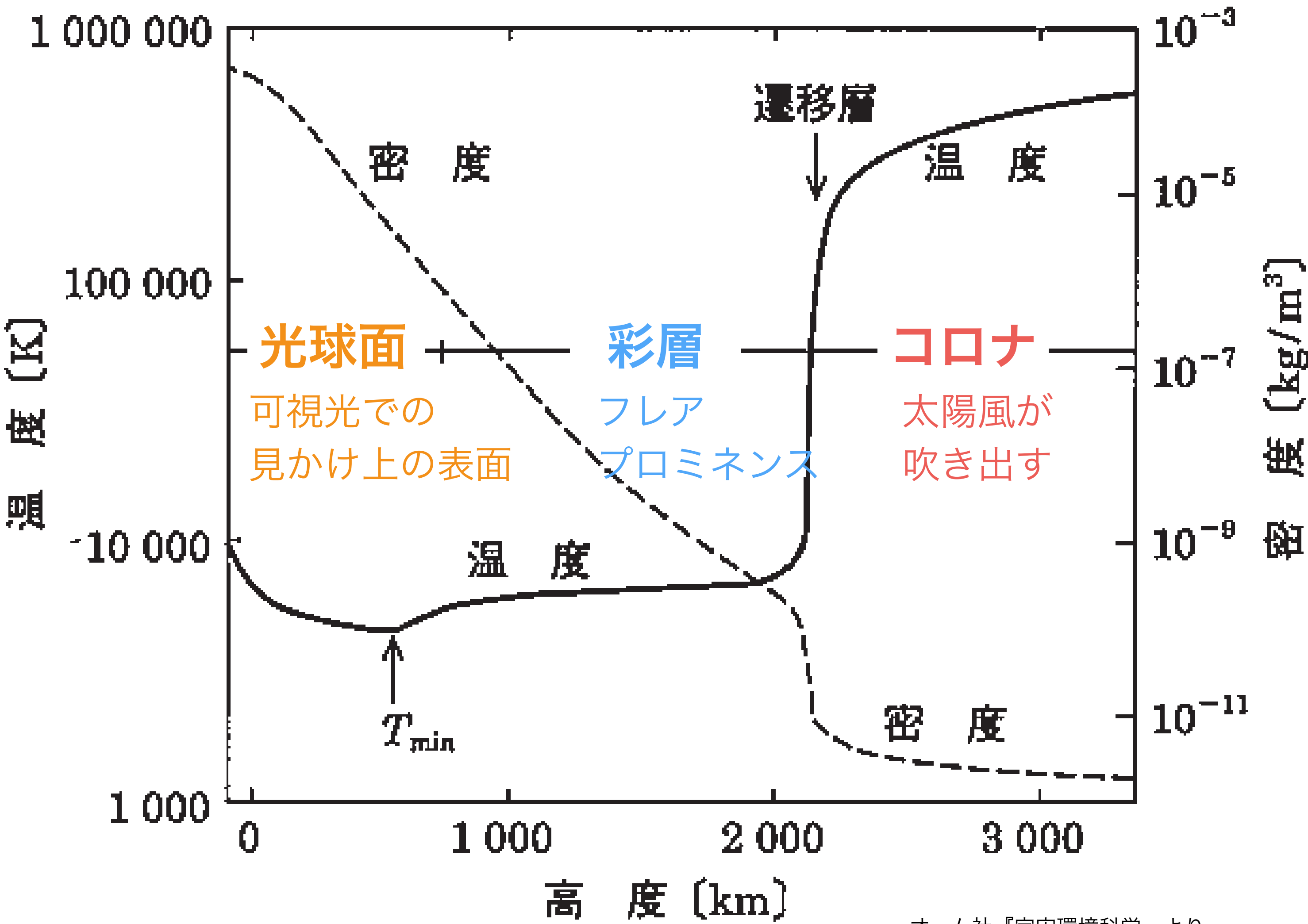
太陽コロナ



プロミネンス

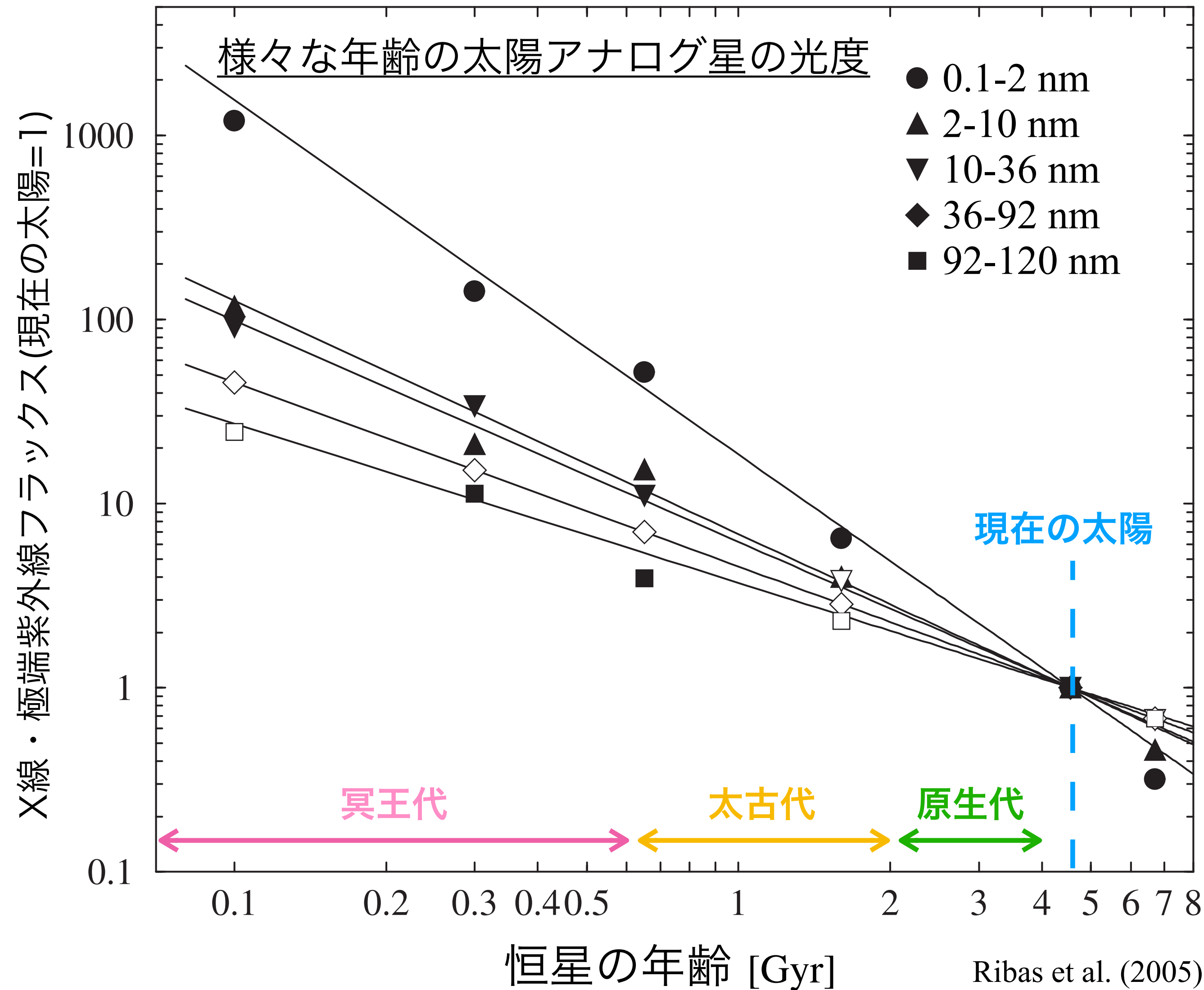


太陽の大気構造



オーム社『宇宙環境科学』より

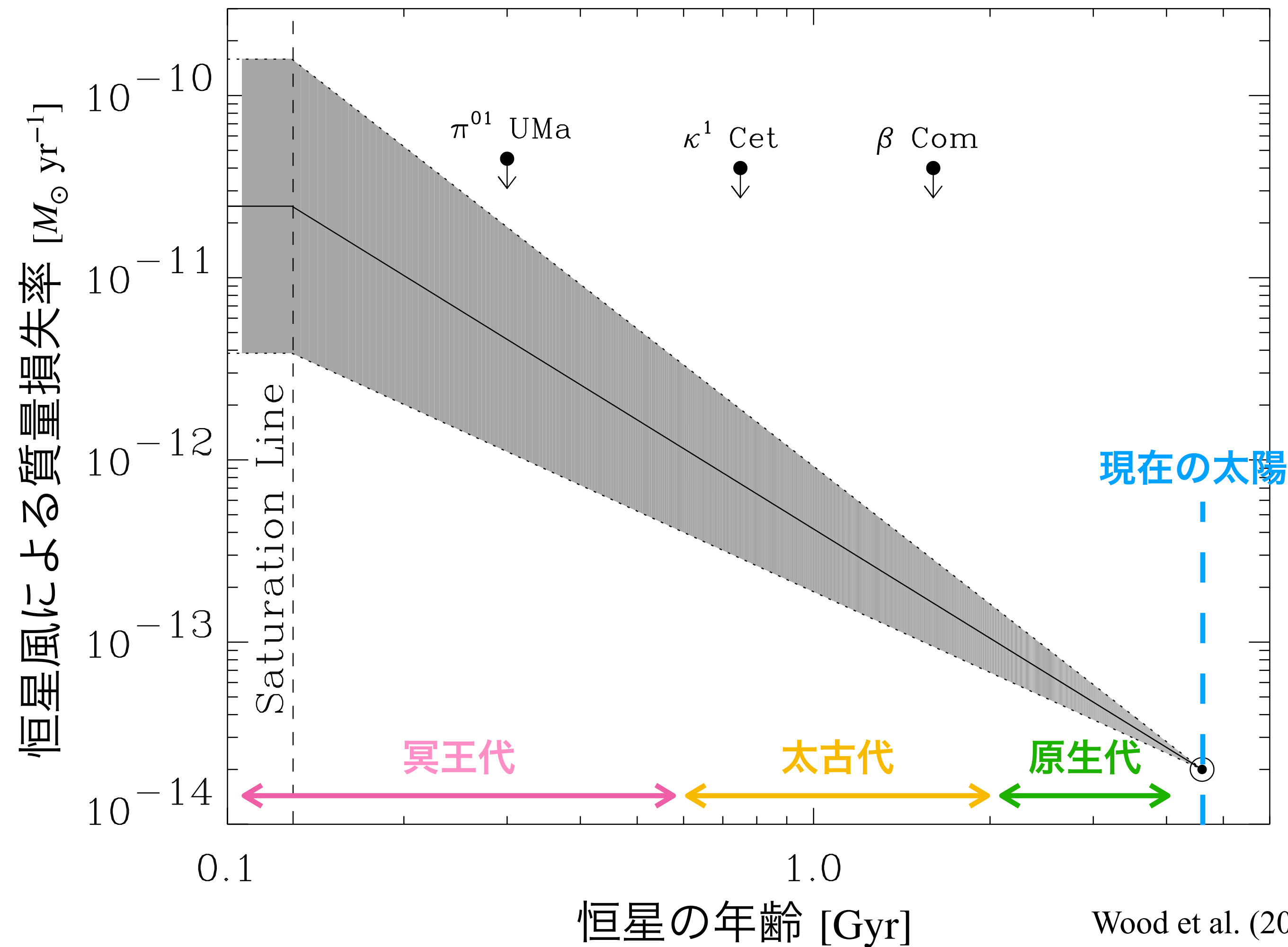
活発な若い恒星：極端紫外線



- 若い恒星は自転が速い → 活発な磁気活動
- 強い極端紫外線 (< 100 nm)
- 強い恒星風 (電離したプラズマ)
- 惑星大気の散逸
- 恒星風で角運動量を失い, 自転速度が低下

活発な若い恒星：恒星風

太陽型星の観測にもとづく恒星風フラックスの時間進化



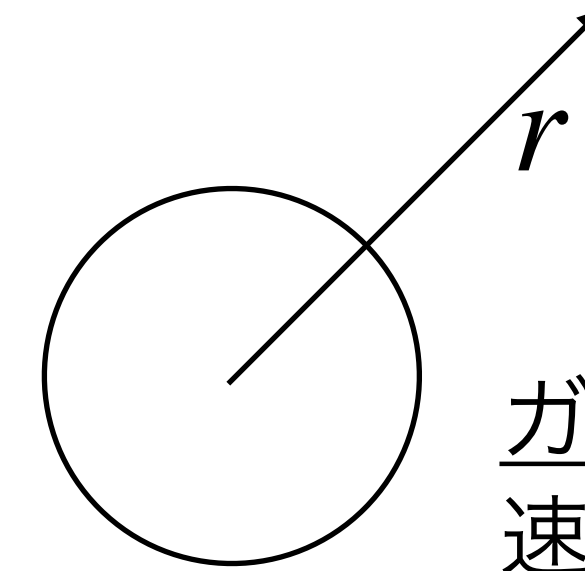
- 若い恒星は自転が速い → 活発な磁気活動
 - 強い極端紫外線 (< 100 nm)
 - 強い恒星風 (電離したプラズマ)
- 惑星大気の散逸
- 恒星風で角運動量を失い、自転速度が低下

Wood et al. (2002) *Astrophys. J.*

太陽風の1次元モデル (Parker, 1958)

太陽コロナのガス圧 > 星間物質のガス圧
⇒ コロナガスの流出が起こる (太陽風)

太陽
質量 M_{\odot}
半径 R_{\odot}



ガス
速度 v
圧力 p
密度 ρ
数密度 $n = \rho/m$
温度 T

流体力学の基礎方程式

- 質量保存の式 $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$ — (1)

- 運動量保存の式 $\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \frac{1}{\rho} \nabla p - \frac{GM_{\odot}}{r^3} \mathbf{r}$ — (2)

(1), (2) に定常 $\left(\frac{\partial}{\partial t} = 0\right)$, 球対称 $\left(\frac{\partial}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \phi} = 0\right)$, 理想気体(等温)を仮定すると

- 運動量保存の式 $v \frac{dv}{dr} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} - \frac{GM_{\odot}}{r^2}$ — (3)

- 質量保存の式 $\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr}(r^2 \rho v) = 0$ — (4)

(3), (4) と理想気体の状態方程式 $p = nk_B T$ — (5) を連立

太陽風の1次元モデル

(3)-(5)より p, n を消去し,

$$\text{音速 } c_s = \left(\frac{k_B T}{m} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ 脱出速度 } v_{\text{esc}} = \left(\frac{2GM_{\odot}}{R_{\odot}} \right)^{\frac{1}{2}},$$

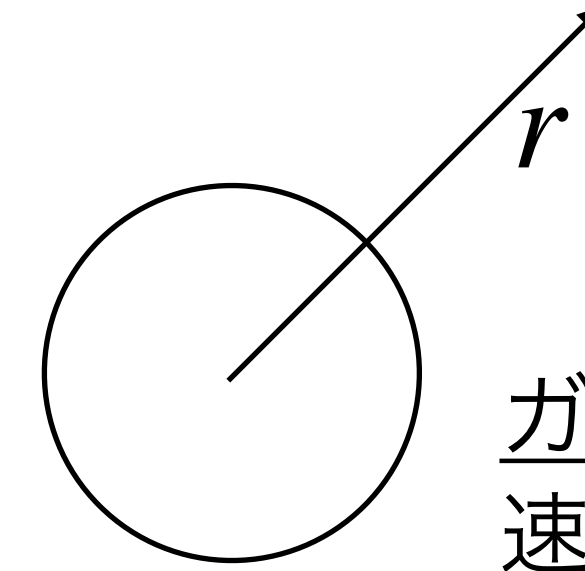
変換座標 $R \equiv \frac{r}{R_{\odot}}$ で書き換えると

$$\text{最終的に } v \frac{dv}{dR} \left(1 - \frac{c_s^2}{v^2} \right) = \frac{2c_s^2}{R} - \frac{v_{\text{esc}}^2}{2R^2} \quad \text{--- (6) を得る}$$

(導出は小レポート課題②)

(6)は太陽風の速度分布を記述する式である

太陽
質量 M_{\odot}
半径 R_{\odot}



ガス
速度 v
圧力 p
密度 ρ
数密度 $n = \rho/m$
温度 T

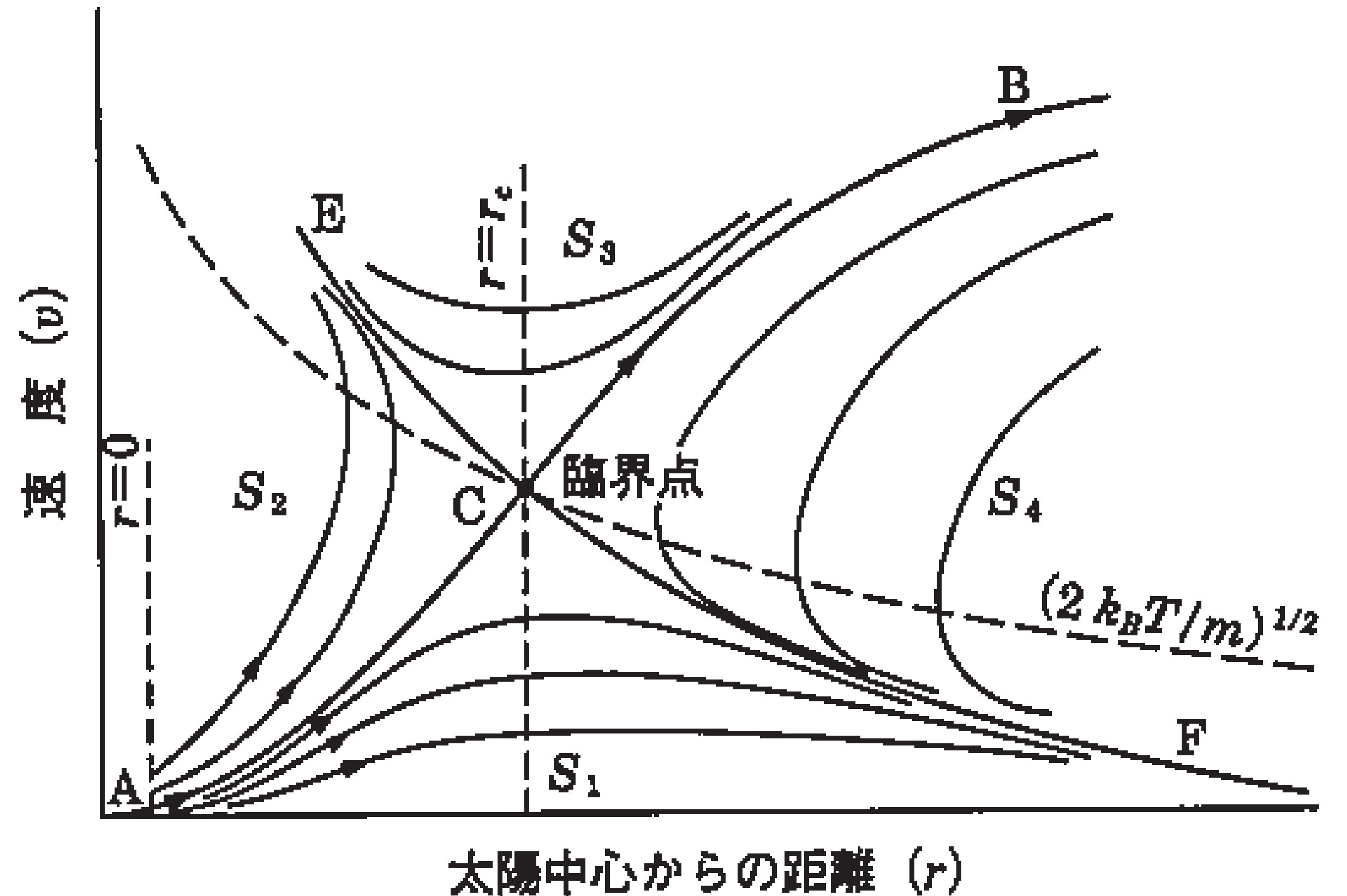
太陽風の1次元モデル

$$v \frac{dv}{dR} \left(1 - \frac{c_s^2}{v^2} \right) = \frac{2c_s^2}{R} - \frac{v_{\text{esc}}^2}{2R^2} \quad (6)$$

- コロナの典型的な物理量では
 $c_s = 130 \text{ km/s}$, $v_{\text{esc}} = 620 \text{ km/s}$
- $R = 1$ において(6)右辺 < 0
 一方、 $R \rightarrow \infty$ では(6)右辺は > 0
- (6)右辺 = 0 となる**臨界点** R_c において
 $v = c_s$ すなわち速度が音速となる

臨界点は太陽半径の約 倍
 太陽中心から約 au である
 (小レポート課題①)

- 太陽風は臨界点で音速となり、加速し続ける (右図)



太陽風を表す解(曲線ACB)
 (恩藤 & 丸橋, 2000, 宇宙環境科学, オーム社)

まとめ

恒星の形成と進化

- 分子雲コア (in 星間分子雲) → 原始星 → 前主系列星 → 主系列星
- 軽い恒星ほど数が多く, 光度が小さく ($L \propto M^4$), 寿命が長い
- 若い主系列星ほど暗いが, 極端紫外線・X線・恒星風フラックスは大きい
- 恒星内部では核融合反応が進む. 重い恒星ほど重い元素を合成

レポート課題 (6/17締切)

1. 太陽風が音速に達する臨界点の位置を太陽半径・天文単位 (au) の2つの単位でそれぞれ求めよ(有効数字1桁).
2. (余裕のある人は) 太陽風の世界速度分布を記述する(6)式を導出せよ.
(2は成績評価には含まない)