

初代星・初代銀河研究会 2016

降着進化する大質量始原星及び Wolf-Rayet星からの星風について

仲内 大翼
(東北大 天文)

細川 隆史(☼, 京都大), 大向 一行(東北大),
斉尾 英行(東北大), 野本 憲一(IPMU, 浜松)

☼ Tue 25 Oct 2016 in Kanazawa ☼



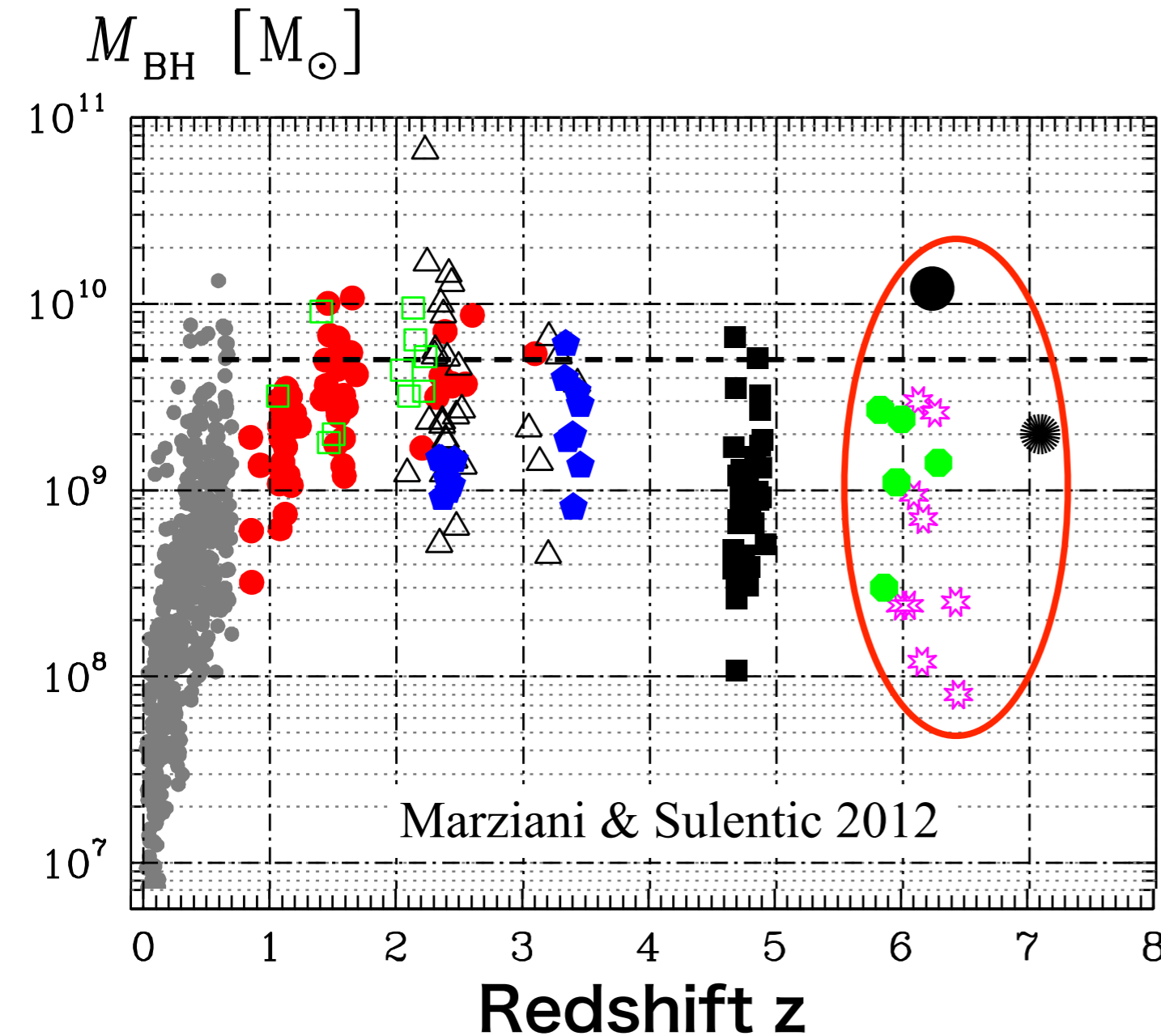
TOHOKU
UNIVERSITY



Theoretical Astrophysics
Tohoku University

1. Introduction

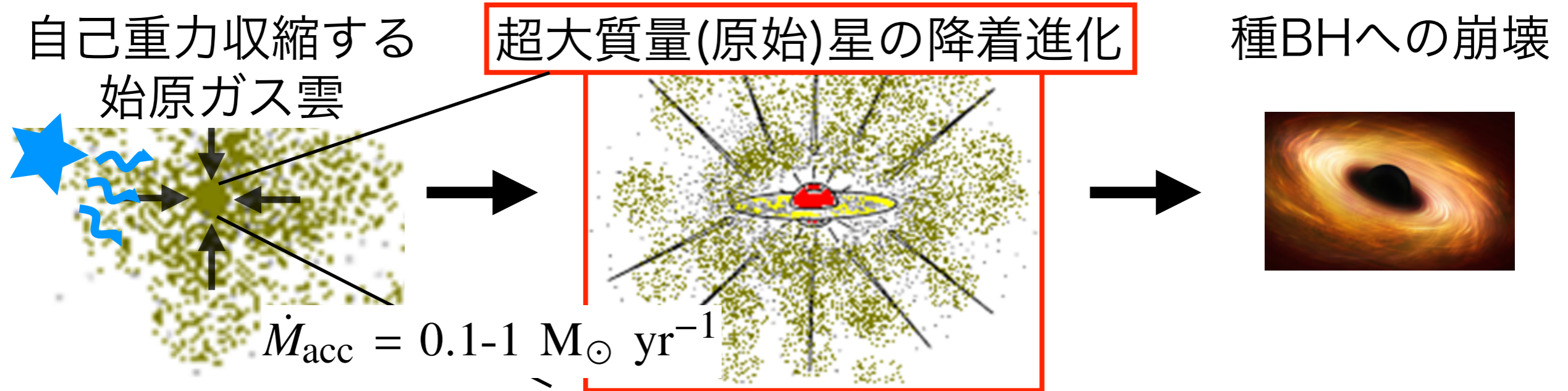
超巨大ブラックホール(SMBH) at $z > 6$



- $z > 6$ のquasarで発見された超巨大ブラックホール(SMBH)
 $M_{\text{BH}} \sim 10^9 - 10^{10} M_{\odot}$ Fan 2006 etc
➡ その起源は何であるか？
- Direct Collapse BH Scenario:
宇宙初期に**超大質量星**($\sim 10^5 M_{\odot}$)
が誕生し、それが重力崩壊した後
に残されたBHを種とする。

短期間の間にSMBHを作るためには
より重い種BHを祖とした方が好都合。

Direct Collapse BH Scenario



巨大な質量降着率 $\dot{M}_{\text{acc}} = 0.1-1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 下で進化する原始星を考える.

巨大な質量降着が星の寿命程度持続 → 超大質量星

$$\dot{M}_{\text{acc}} (\sim 0.1-1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}) \times t_{\text{life}} (\sim 10^6 \text{ yr}) \sim 10^5-10^6 M_{\odot}$$

- ・ 強UV照射下にある始原ガス雲では原始星への質量降着が巨大.

水素原子冷却により等温収縮 @ $T \sim 8000 \text{ K}$

Omukai 2001

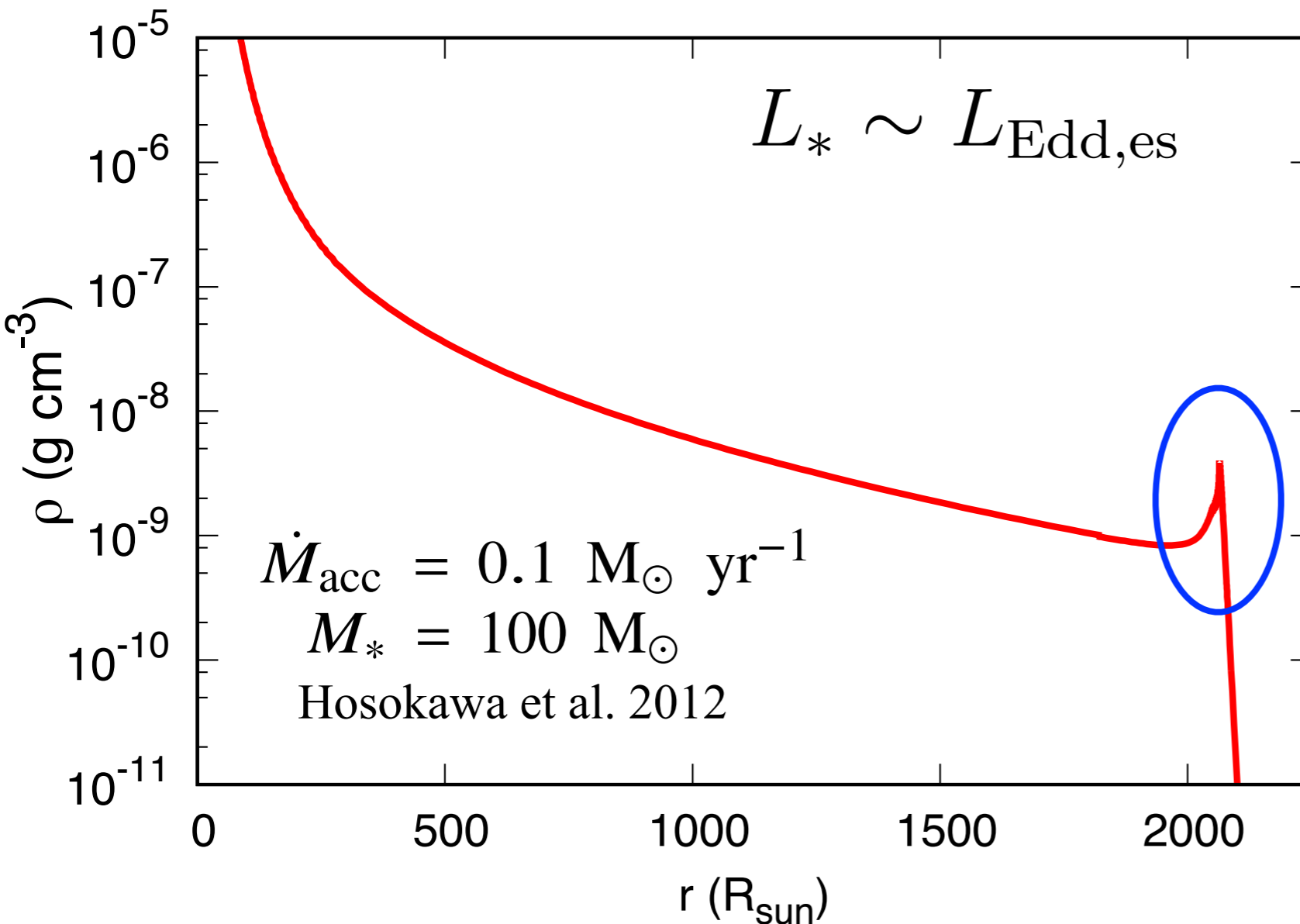
Bromm&Loeb 2003 etc...

➡ $\dot{M}_{\text{acc}} \sim M_{\text{J}}/t_{\text{ff}} \sim c_{\text{s}}^3/G \sim 0.3 (T/8000 \text{ K})^{3/2} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 大

- ・ 星の寿命の間降着が続き, 星は $\sim 10^5 M_{\odot}$ まで成長できるか?

(原始)星から星風が発生して質量獲得を妨げる可能性を調べる.

Density Inversion @ Stellar Surface



星表面付近ではH, H⁻電離によりopacityが増大.
 ($\kappa_{\text{es}} < \kappa_{\text{H}}, \kappa_{\text{H}^-}$)

⇒ $L_* \sim L_{\text{Edd,es}} > L_{\text{Edd}}$

Locally super-Eddington

静水圧平衡の式:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP_{\text{gas}}}{dr} = \frac{GM_r}{r^2} (\Gamma_r - 1)$$

$$\Gamma_r \equiv L_{\text{rad}} / L_{\text{Edd}}$$

$$\Gamma_r \gtrsim 1 \Rightarrow \frac{dP_{\text{gas}}}{dr} > 0, \frac{d\rho}{dr} > 0$$

Joss et al. 1973

- * 静水圧平衡の仮定を外して外層構造を解き直す.
- * 降着進化する大質量(原始)星の表面から星風が発生する可能性を調べる.

2. Formulation of Optically Thick Wind

Basic Equations:

★ Spherical & Steady Flow

- EoM: $v \frac{dv}{dr} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} + \frac{GM_*}{r^2} = 0,$

- EoC: $\dot{M}_{\text{wind}} \equiv 4\pi r^2 \rho v = \text{const.},$

- Energy: $\Lambda \equiv L_{\text{rad}} + \dot{M}_{\text{wind}} \left(\frac{v^2}{2} + w_{\text{gas}} + w_{\text{rad}} - \frac{GM_*}{r} \right) = \text{const.},$

光球半径よりも内側における
輻射圧による星風加速を考える。

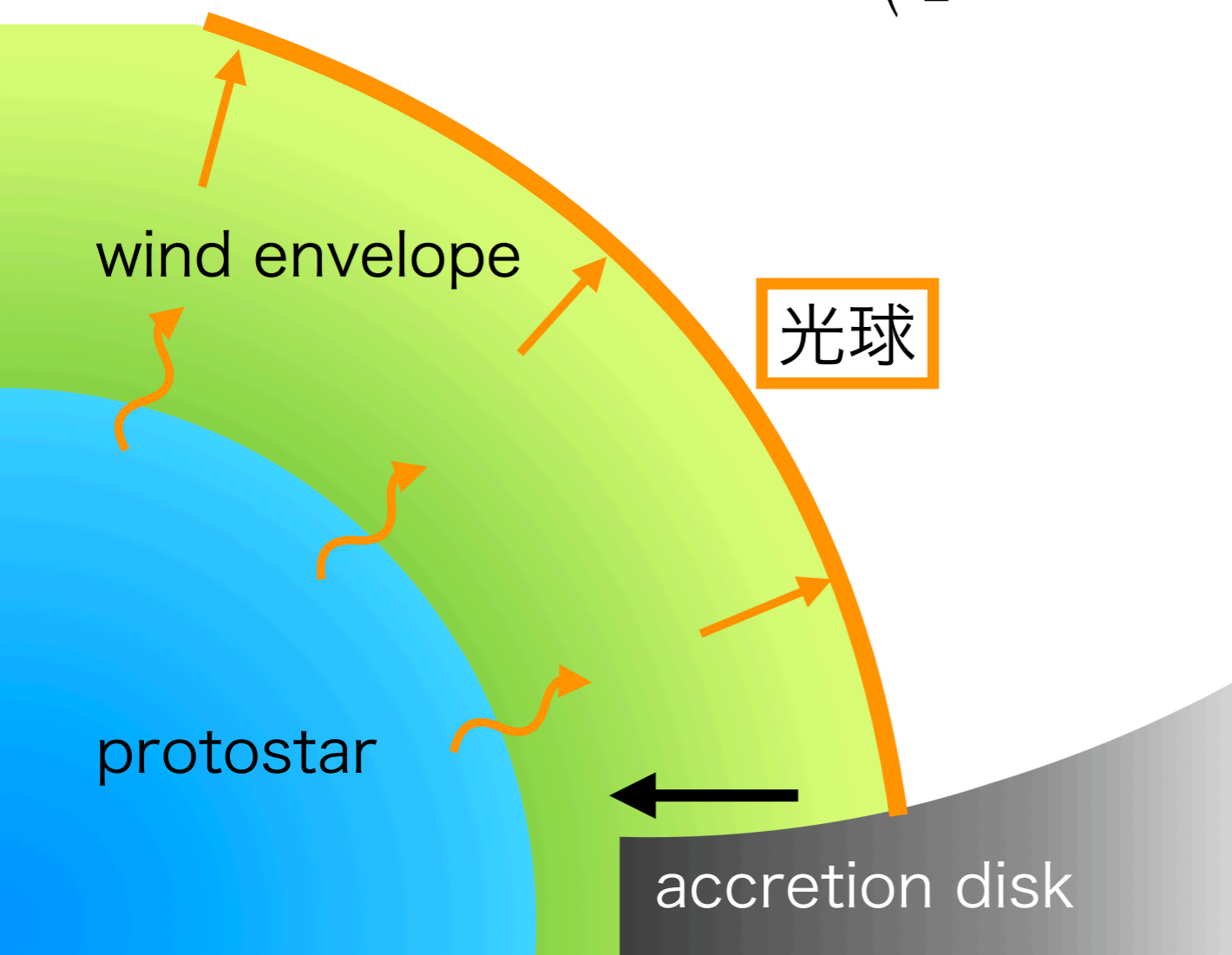
$$w = e + \frac{P}{\rho} : \text{specific enthalpy}$$

- EoS: $P = P_{\text{gas}} + P_{\text{rad}} = \frac{\mathcal{R}}{\mu} \rho T + \frac{1}{3} a T^4,$

- 輻射によるエネルギー一輸送:
拡散近似

$$L_{\text{rad}} = - \frac{16\pi a c r^2 T^3}{3\kappa\rho} \frac{dT}{dr},$$

- 未知関数: $v, \rho, T, L_{\text{rad}}$



Sonic pointを通り且つ静水圧平衡な星外層と連続的につながるような星風解を構成する。

① Sonic point

$$\text{EoM+EoS} \rightarrow \frac{1}{v} \frac{dv}{dr} = \left[\frac{2}{r} c_T^2 - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P_{\text{gas}}}{\partial T} \right)_{\rho} \frac{dT}{dr} + \frac{GM_*}{r^2} (\Gamma_r - 1) \right] / (v^2 - c_T^2),$$

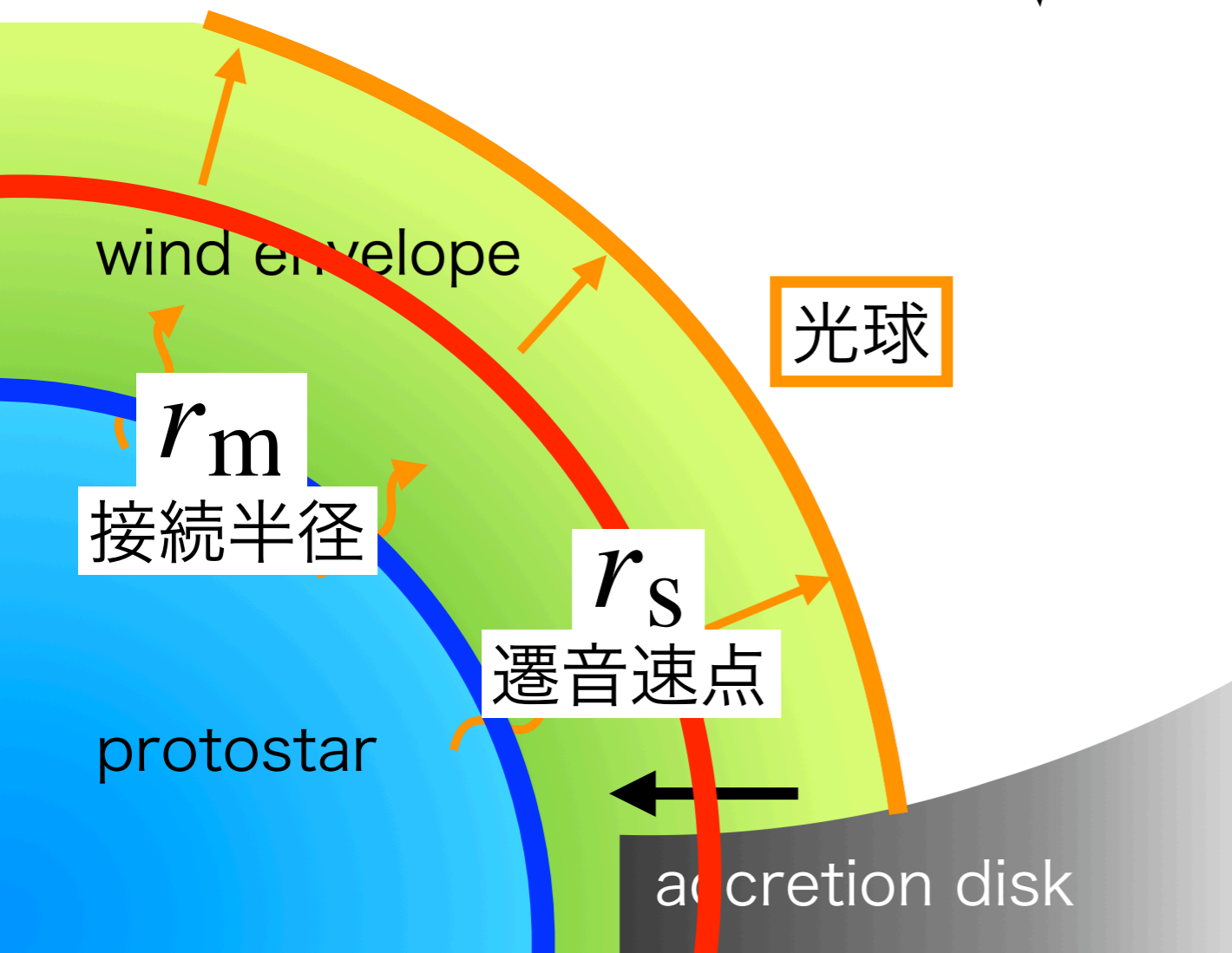
$$c_T = \sqrt{(\partial P / \partial \rho)_T} \quad \Gamma_r \equiv L_{\text{rad}} / L_{\text{Edd}}$$

Sonic point (分母=0)では分子も同時にゼロになるべきである。

$$\Rightarrow L_{\text{rad},s} = L_{\text{rad}}(r_s, \rho_s, T_s) \\ @ v_s = c_T(\rho_s, T_s)$$

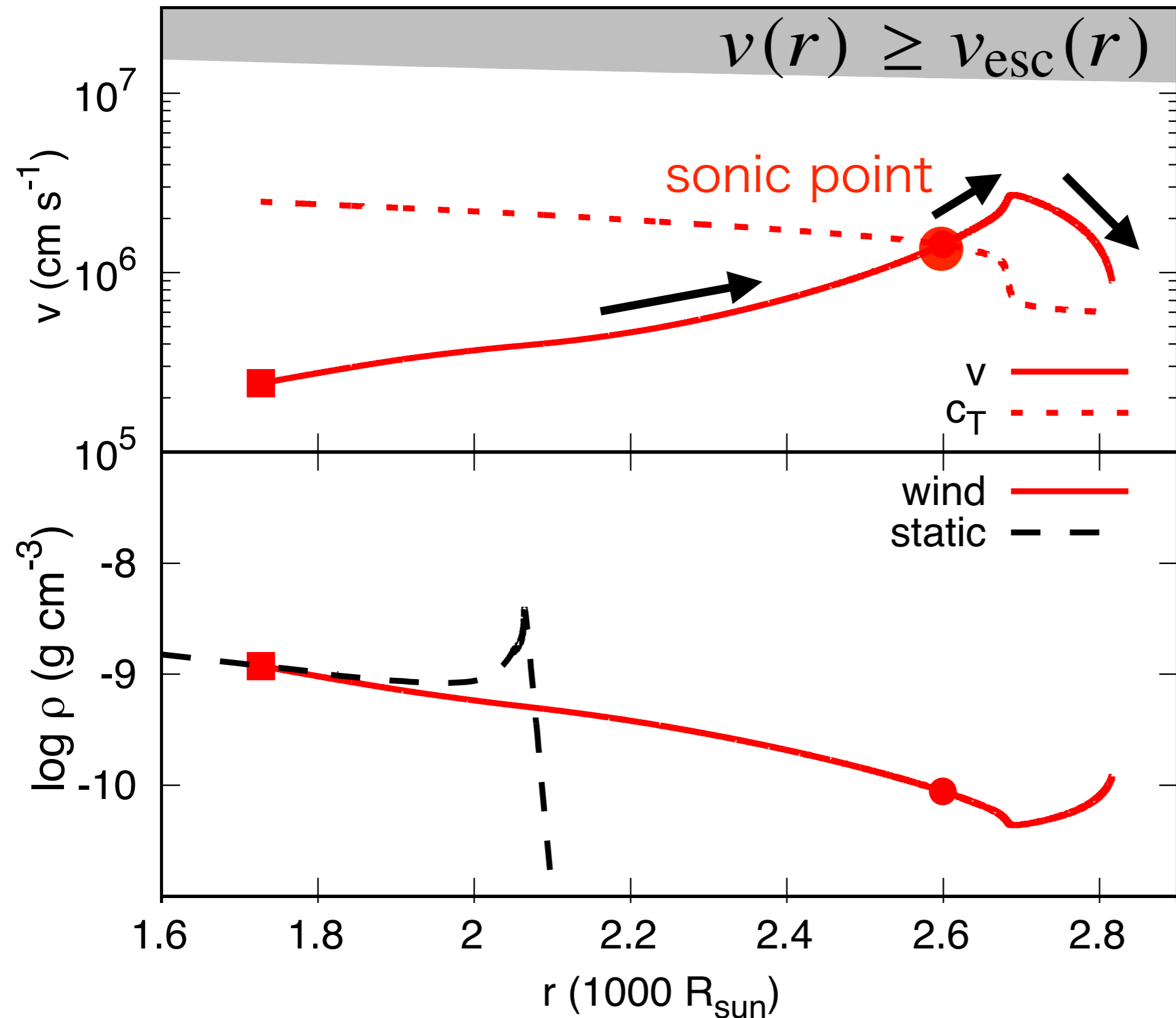
② 接続半径

接続半径をまたいで密度, 温度, 全光度は連続となるべき。



3. Results

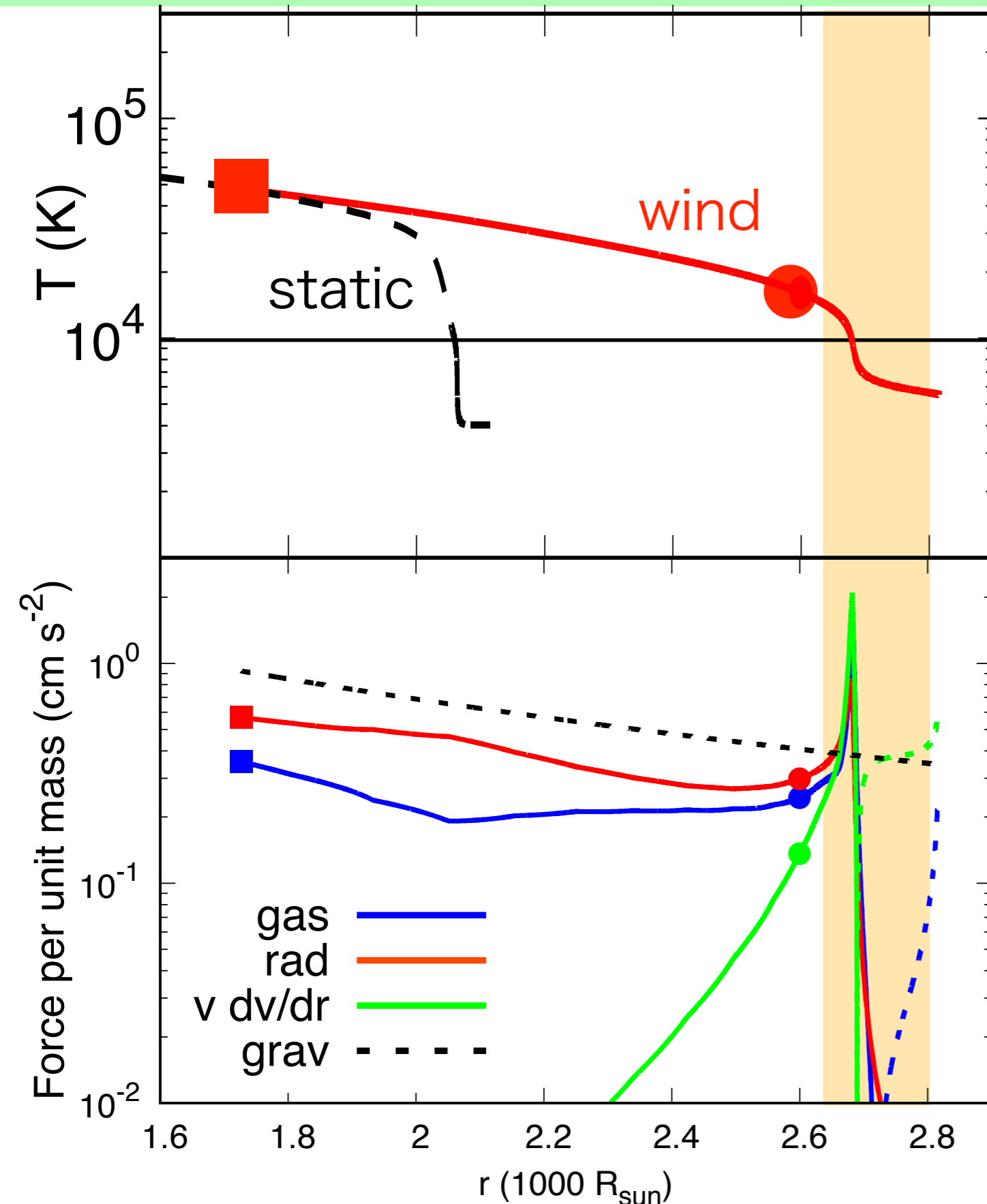
Wind Structure: Velocity & Density



$$\dot{M}_{\text{acc}} = 0.1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$
$$M_* = 100 M_{\odot}$$

星風は脱出速度に達する前に減速されてしまった。

Wind Structure: Temperature & Force



Sonic pointを通過後すぐに
温度が~ 10000 Kを下回る.

➡ 星風中で水素の中性化が進む.

➡ Opacityの急激な低下に伴い
輻射圧勾配力も急激に減衰.

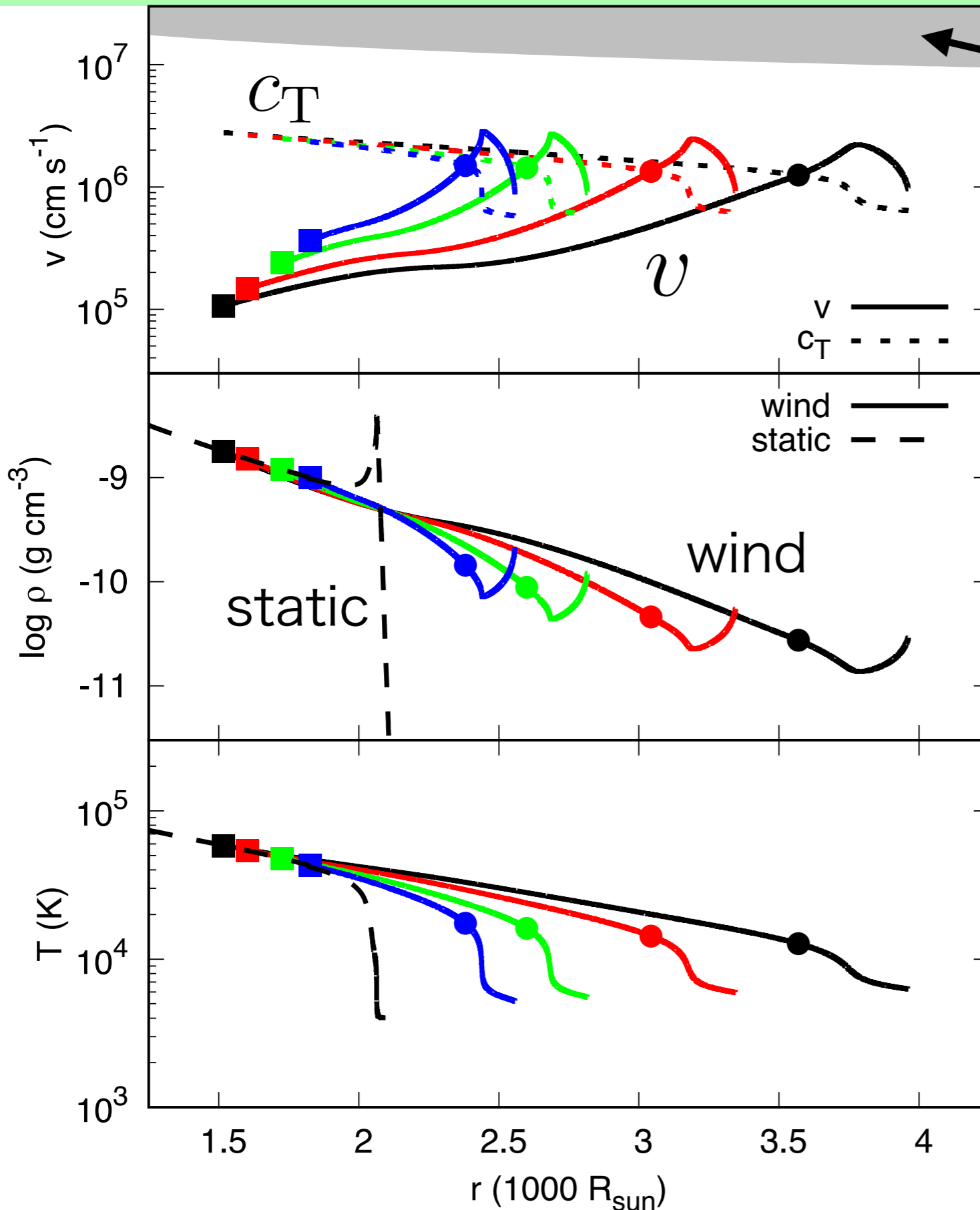
➡ 星風は v_{esc} に達する前に
減速されてしまう.

この星モデルから定常的な星風
は発生しないと考えられる.

$$\underbrace{v \frac{dv}{dr}}_{\text{green}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{dP_{\text{gas}}}{dr}}_{\text{blue}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{dP_{\text{rad}}}{dr}}_{\text{orange}} + \underbrace{\frac{GM_*}{r^2}}_{\text{black}} = 0$$

$\propto \kappa L_{\text{rad}}$

Dependence on the Matching Radius



$$v(r) \geq v_{\text{esc}}(r)$$

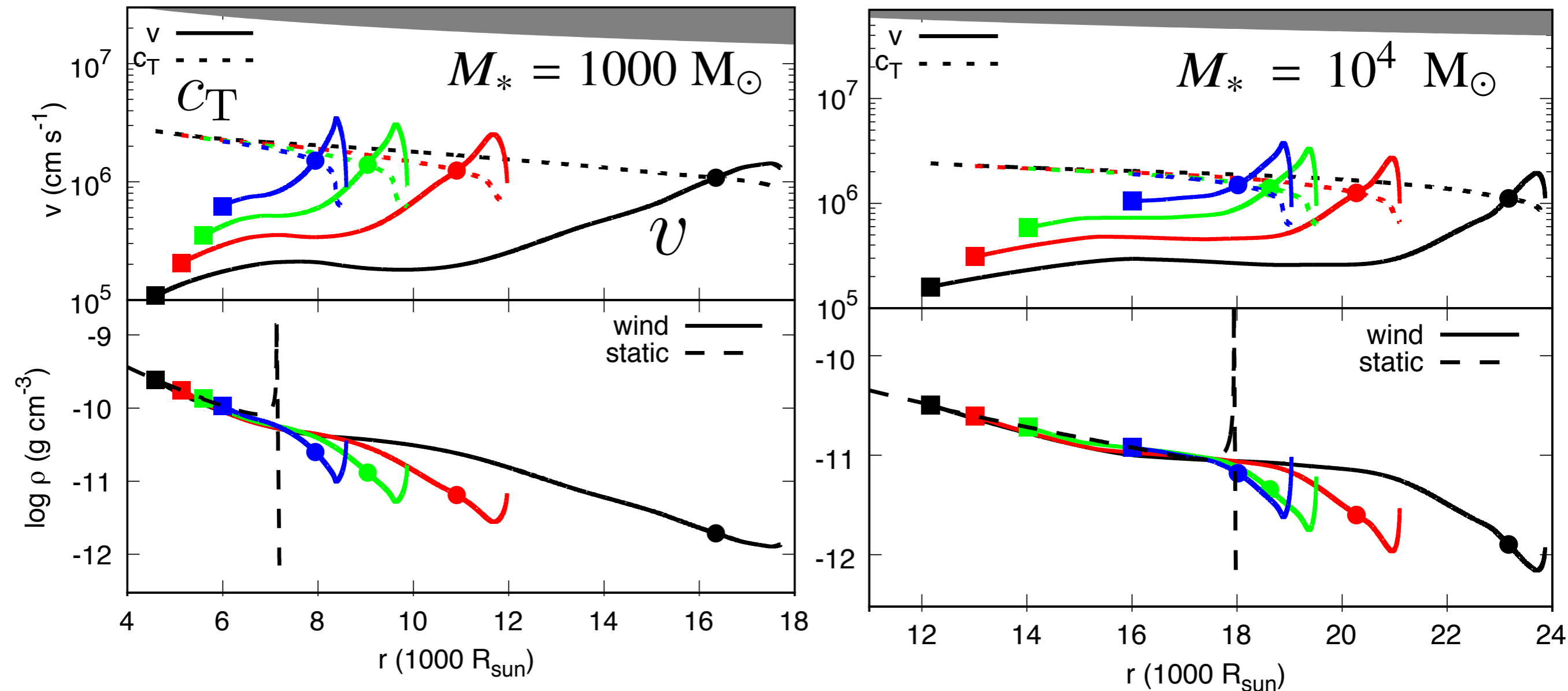
$$\dot{M}_{\text{acc}} = 0.1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

$$M_* = 100 M_{\odot}$$

- * ここでは星風の駆動機構を特定しない。
- * 接続半径を第一原理的に決めることはできない。
- * 接続半径の選びかたは任意とする。

接続半径を変えても星風解の性質は定性的に同じ。

より大質量の場合: $\dot{M}_{\text{acc}} = 0.1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$

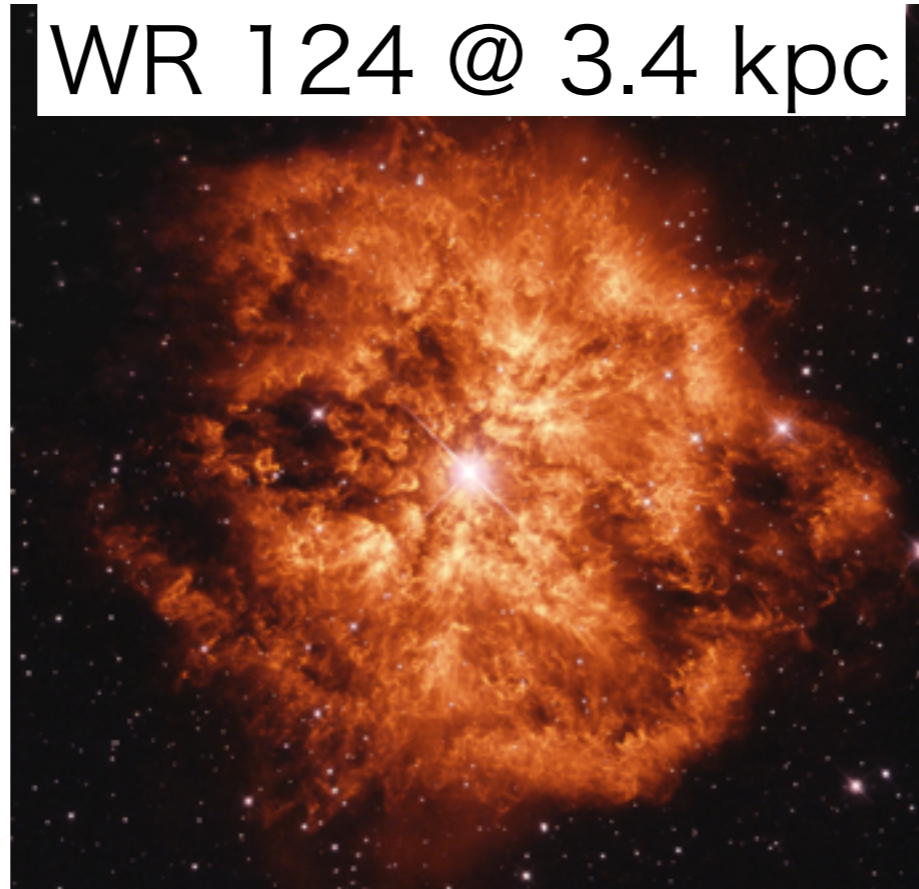


得られた星風解は全て脱出速度に達することなく減速される解だった。

➡ 超大質量星の成長を妨げるような定常的な星風は期待できない。
 $\sim 10^5 M_{\odot}$ に至るまで星は無事に成長できると考えられる。

4. Application to WR Stars

WR 124 @ 3.4 kpc



Wolf-Rayet (WR) Stars

Hamann et al. 2006

Sander et al. 2012

★ WR星: 終末期にある大質量星

・幅の広がった明るい輝線放射

➡ 高速度の星風: $v_{\infty} \sim 1000-3000 \text{ km s}^{-1}$
大きな質量放出率: $\dot{M}_w \sim 10^{-5}-10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$

・スペクトルに水素の吸収, 輝線がない.

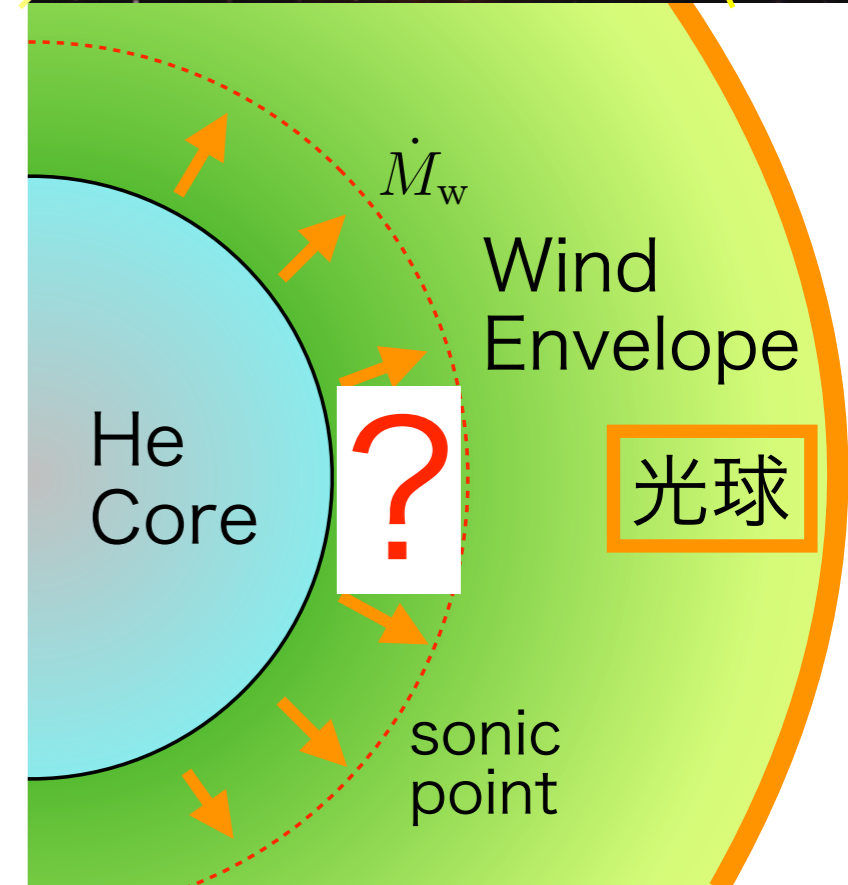
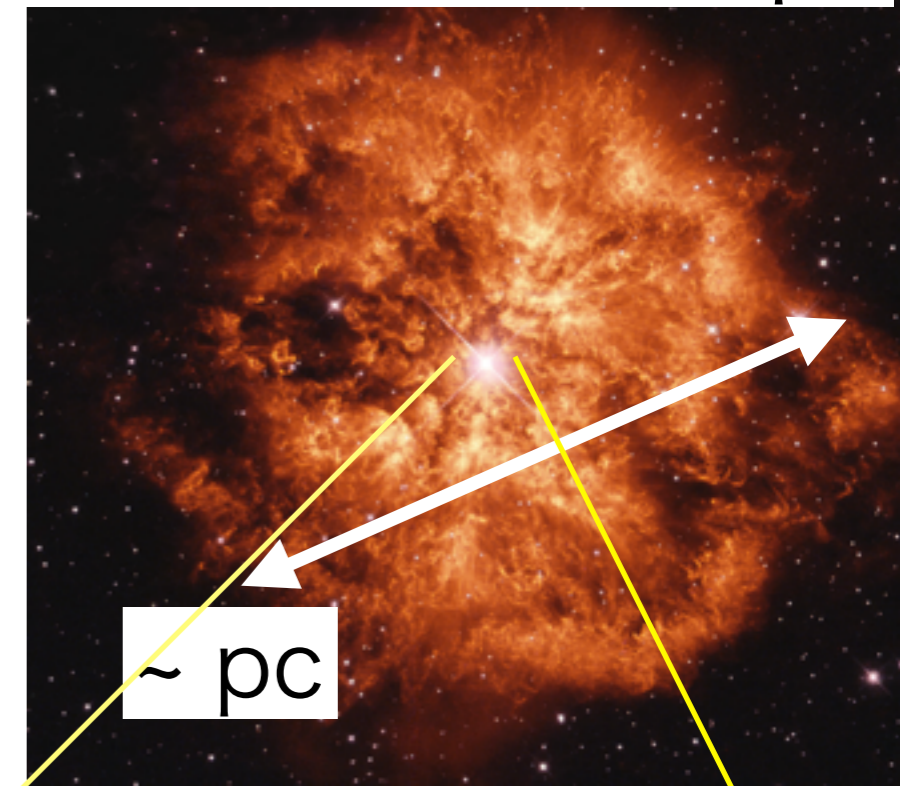
➡ 質量放出のためHeコアがむき出し.

WR星 ~ He星でモデル化される. Langer 1989

・WR星の構造は十分に理解されていない.

➡ 質量放出の機構とも関連.

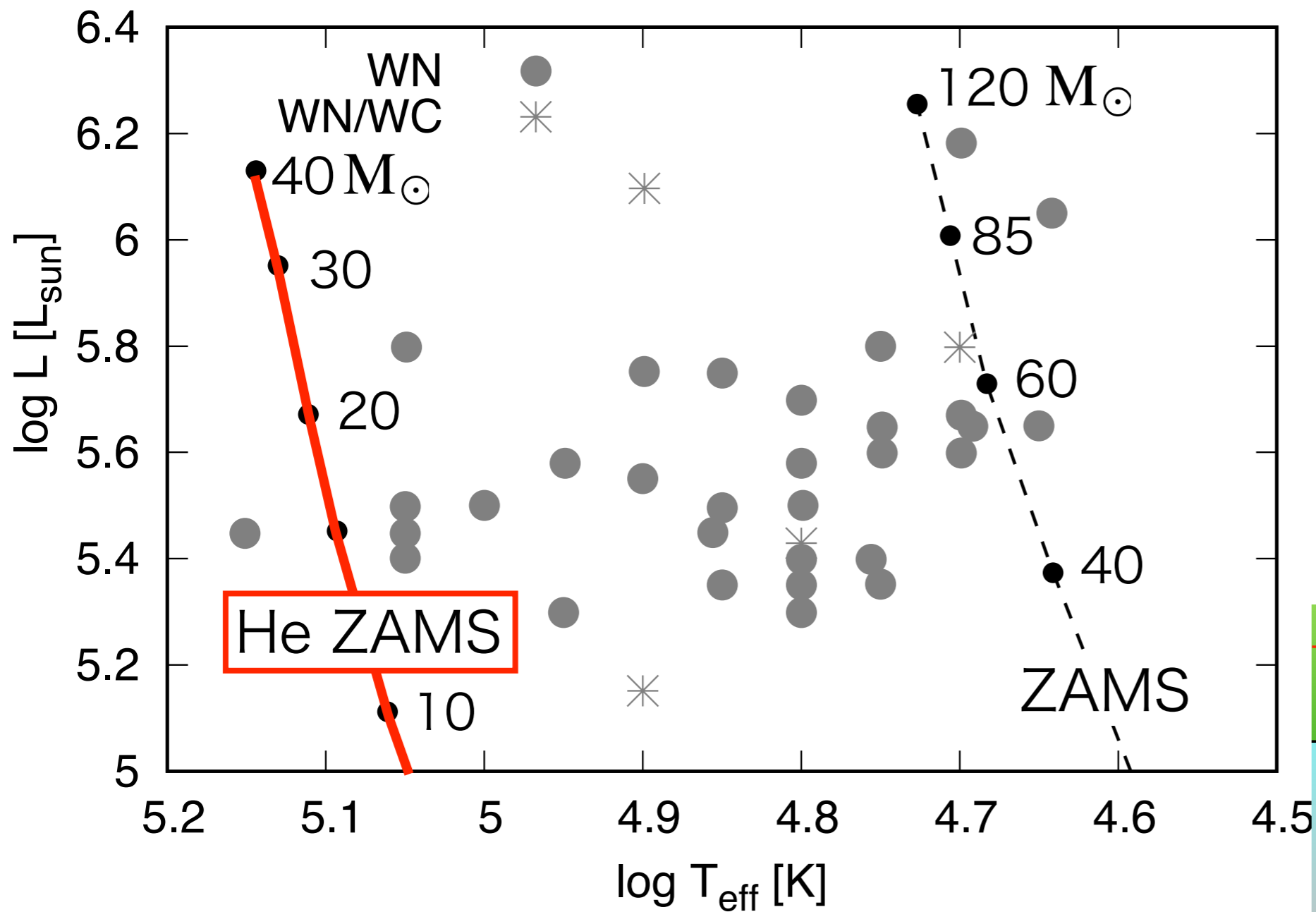
WR 124 @ 3.4 kpc



WR星の半径問題

Hamann et al. 2006

Grafener et al. 2012



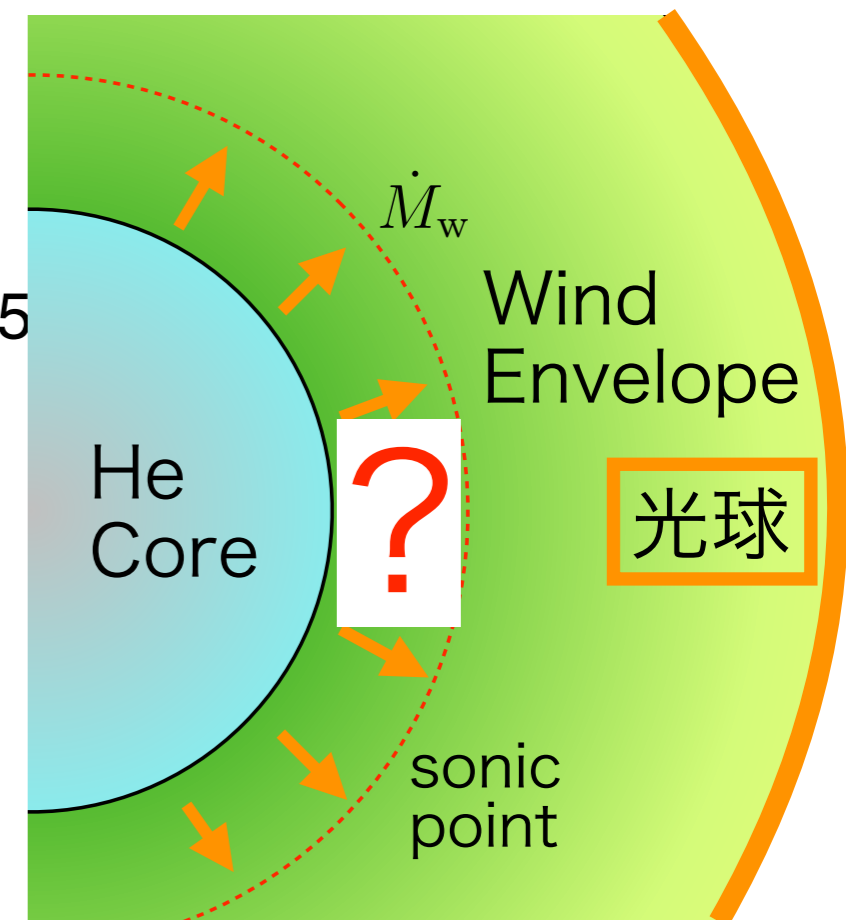
He星モデルで予測される表面温度 T_{eff}



観測的に決定された T_{eff}



光学的に厚い星風でWR星は覆われている。



WR星 ~ Heコア + 光学的に厚い星風外層でモデル化するべき。

本研究の目的

WR星 ~ Heコア + 光学的に厚い星風外層でモデル化したい。

先行研究: Kato & Iben 1992

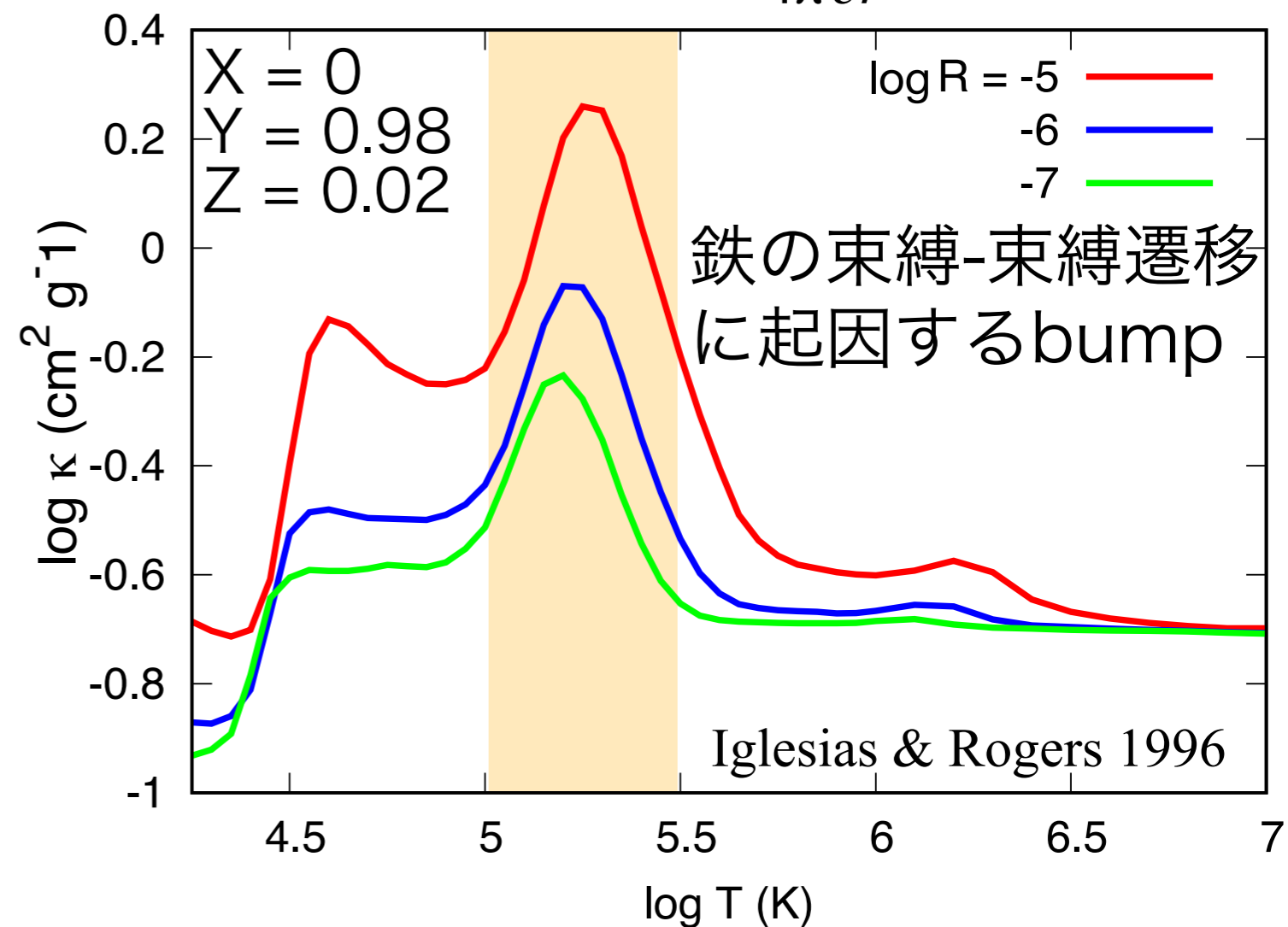
良い点: $\dot{M}_W L_*$ を質量, 金属量をパラメタとしてuniqueに決定できる。

問題点: 人為的なopacity lawを使用していた。 $v \frac{dv}{dr} \sim \frac{\kappa L_{\text{rad}}}{4\pi cr^2}$

本研究:

新しいopacity lawを用いてWR星モデルを再計算。

- ➔ $\dot{M}_W - L_*$ 関係.
- \dot{M}_W の金属量依存性.
- 最近の観測値との比較.

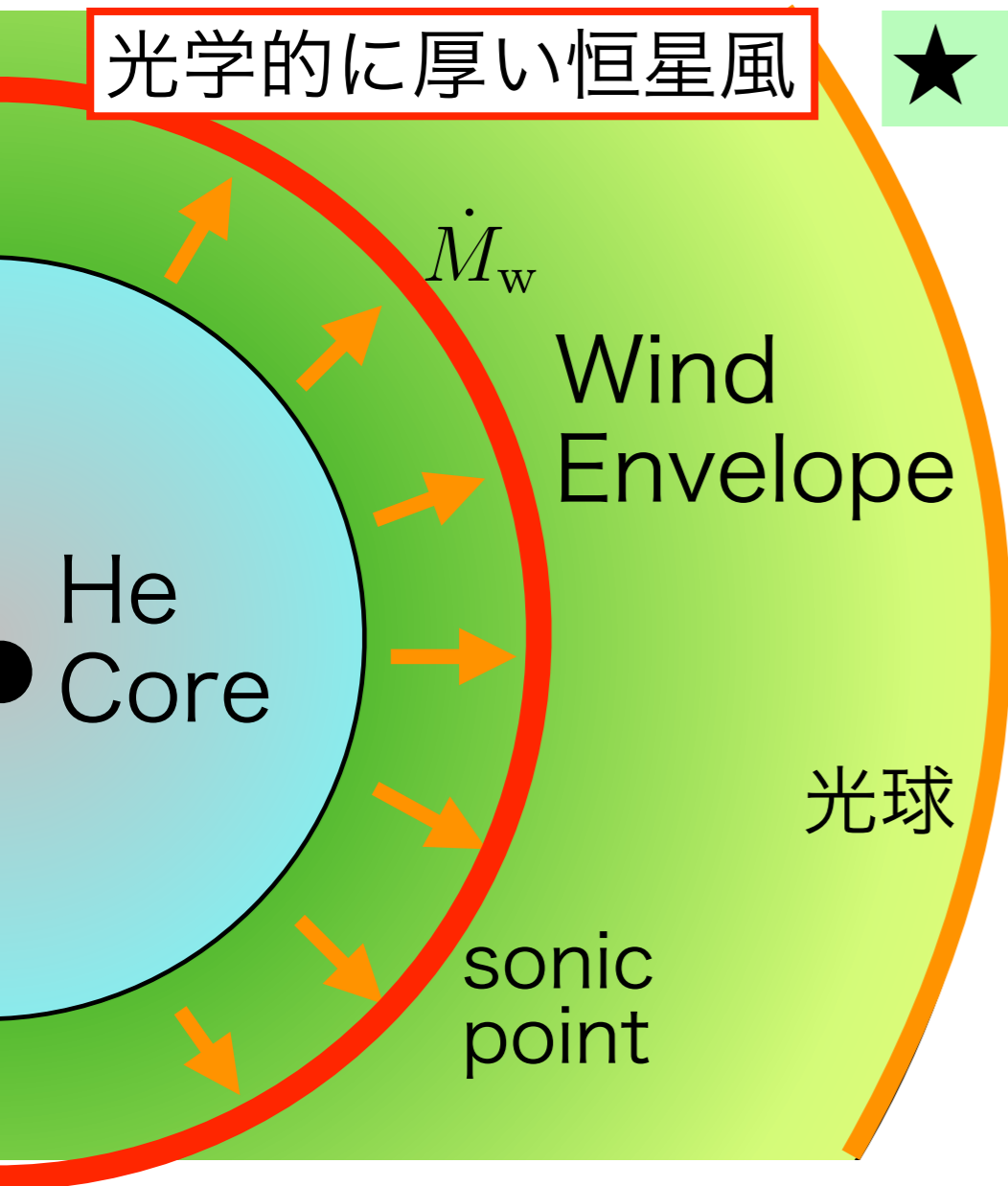


5. Modeling WR Stars

Basic Equations

Zytkow 1972 Kippenhahn et al. 2012
Kato & Iben 1992

光学的に厚い恒星風



★ Wind Envelope: **spherical & steady flow**

• EoM: $v \frac{dv}{dr} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} + \frac{GM_r}{r^2} = 0,$

• EoC: $\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho, \quad \dot{M}_w \equiv 4\pi r^2 \rho v = \text{const.},$

• Energy:
 $\Lambda \equiv L_r + \dot{M}_w \left(\frac{v^2}{2} + \frac{5RT}{2\mu} + \frac{4a_{\text{rad}}T^4}{3\rho} + \int_{r_s}^r \frac{GM_r}{r^2} dr \right) = \text{const.},$

• Energy transport: $L_r = L_{\text{rad}} + L_{\text{conv}},$
 L_{rad} : 輻射光度, 拡散近似
 L_{conv} : 対流光度 (亜音速領域のみ)

• EoS: $P = P_{\text{gas}} + P_{\text{rad}} = \frac{\mathcal{R}}{\mu} \rho T + \frac{1}{3} a_{\text{rad}} T^4,$

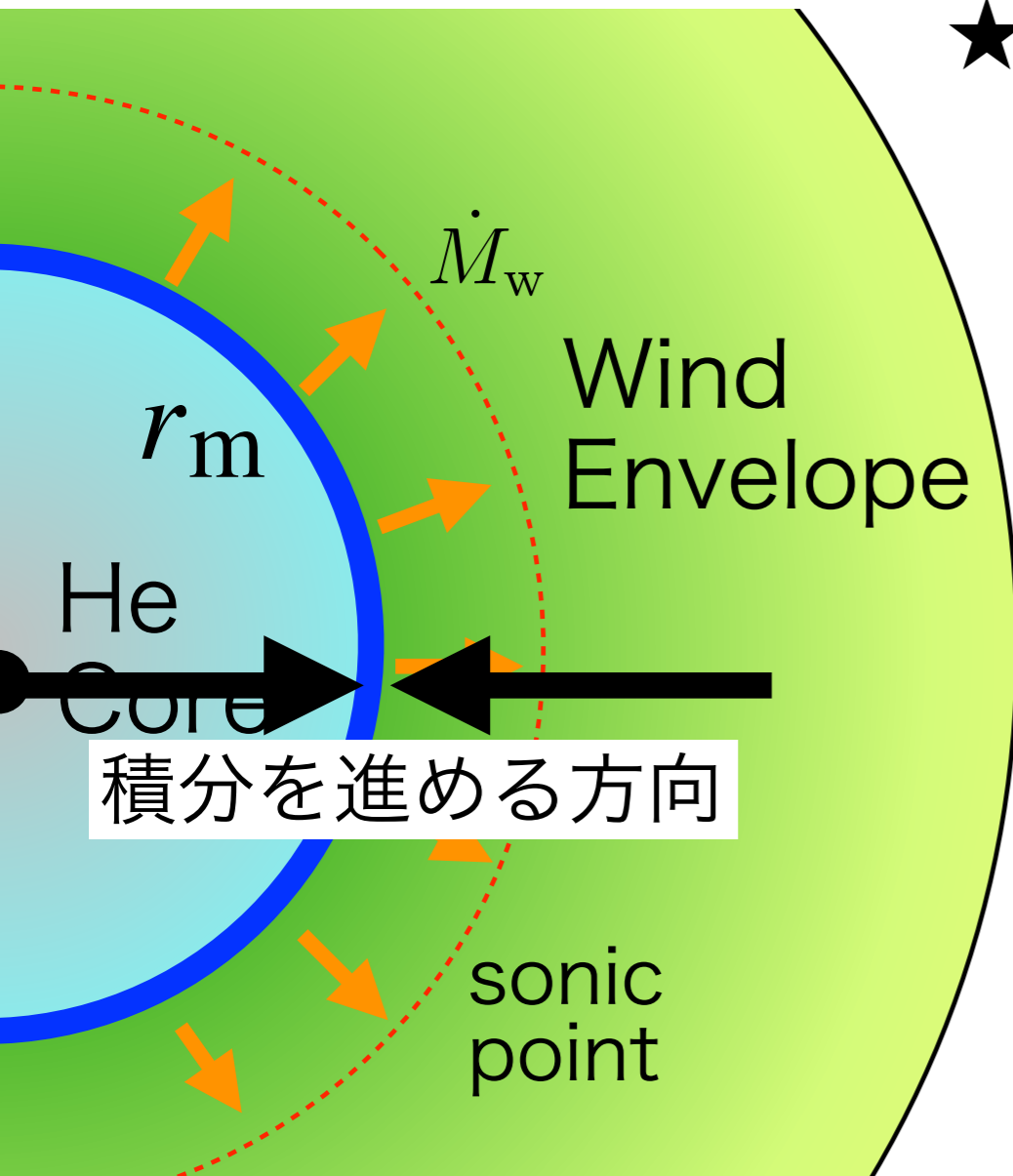
• 未知関数: $v(r), \rho(r), T(r), L_r, M_r$

★ He-burning Core: windの式で $\dot{M}_w \rightarrow 0 \quad v dv/dr \rightarrow 0$

• Energy: $\frac{dL_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \epsilon_{\text{nuc}}, \quad \epsilon_{\text{nuc}}: \text{triple-}\alpha \text{ 反応エネルギー生成率}$

境界条件及びコア-星風の接続

Lamers & Cassineli 1999
Kato & Iben 1992
Kippenhahn et al. 2012



★ 5つの境界条件:

① 星中心 @ $M_r = 0$ $r = 0$ & $L_r = 0$

② 遷音速点 @ $M(r_s) = M_*$

EoM+EoS

$\Rightarrow \frac{1}{v} \frac{dv}{dr} = \left[\frac{2}{r} c_T^2 - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho \frac{dT}{dr} - \frac{GM_r}{r^2} \right] / (v^2 - c_T^2),$ c_T :音速

遷音速点(分母=0)では分子もゼロになるべき.

$\Rightarrow v(r_s) = c_T(\rho_s, T_s) \quad L_{\text{rad}}(r_s) = L_{\text{rad}}(r_s, \rho_s, T_s)$

③ Photosphere $T_{\text{eff}} = T(r_{\text{ph}})$ & $\tau(r_{\text{ph}}) = 3$

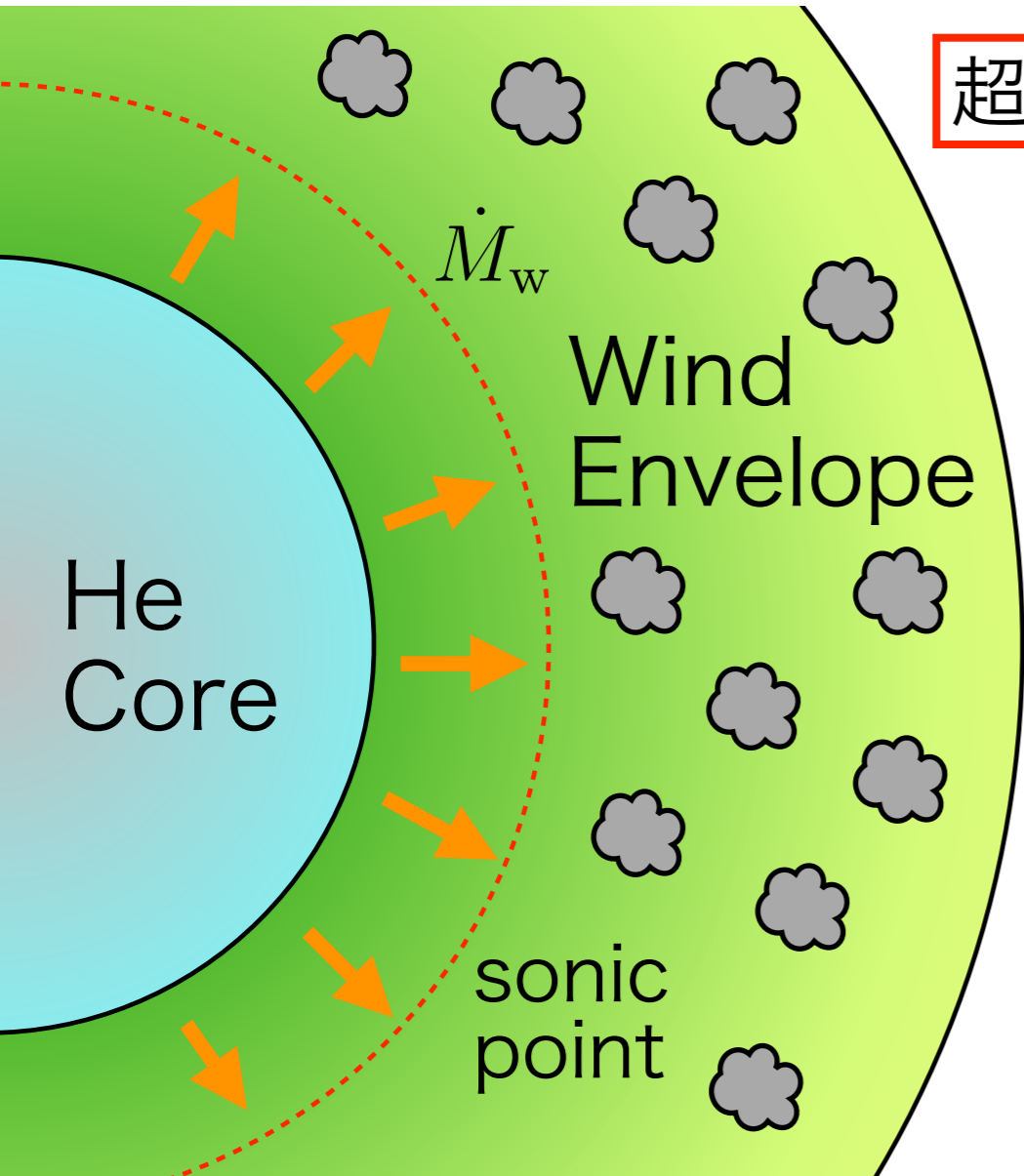
$\tau \equiv \kappa \rho r$

★ 接続条件: Heコアと星風領域を連続的につなぐ. Ro & Matzner 2016

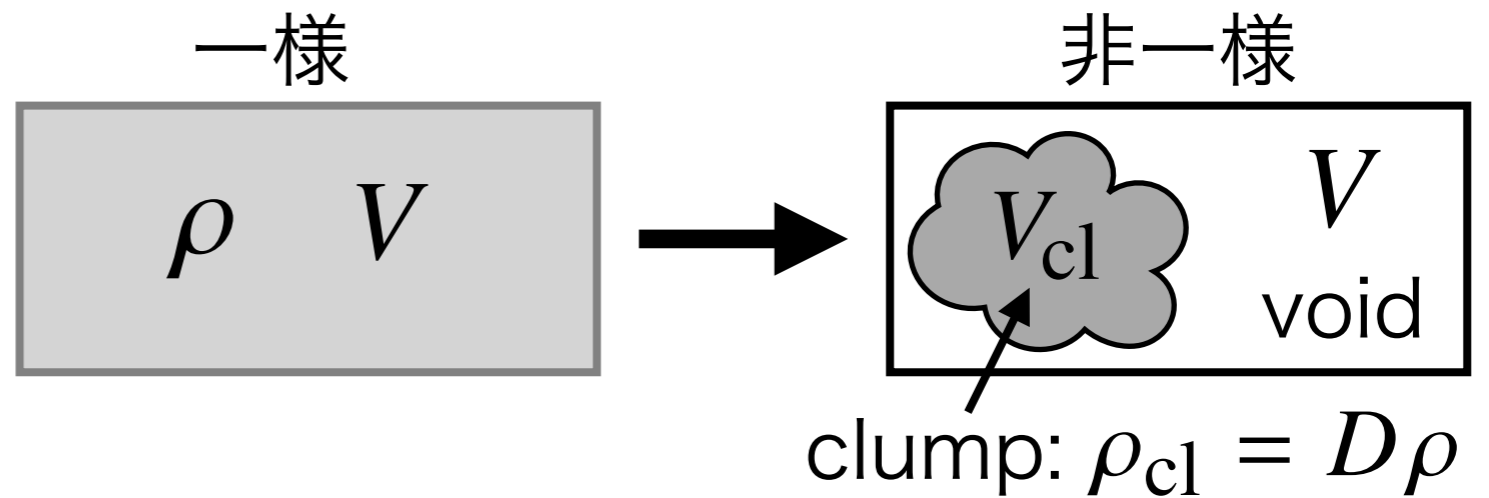
質量座標, 密度, 温度, 全光度(エネルギー保存より)が連続.

質量, 金属量をパラメタとして $\dot{M}_w L_*$ をuniqueに決定できる.

非一様なWindとClumping Factor Hamann & Koesterke 1998



超音速領域で星風は非一様な構造を持つと仮定.



Volume filling factor: $f_V \equiv V_{cl}/V < 1$

$$\Rightarrow \rho_{cl} = f_V^{-1} \rho \equiv D\rho$$

D : clumping factor

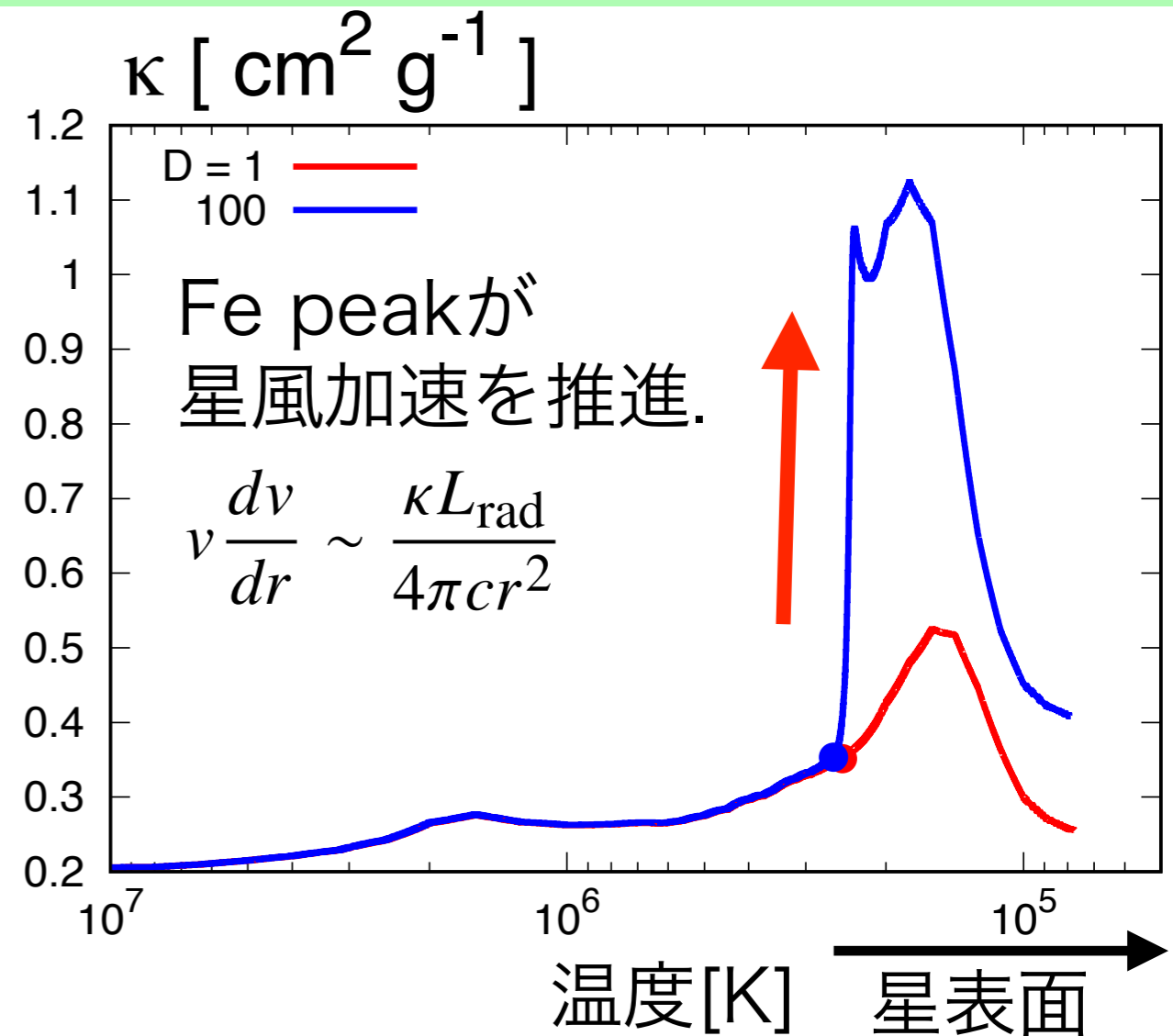
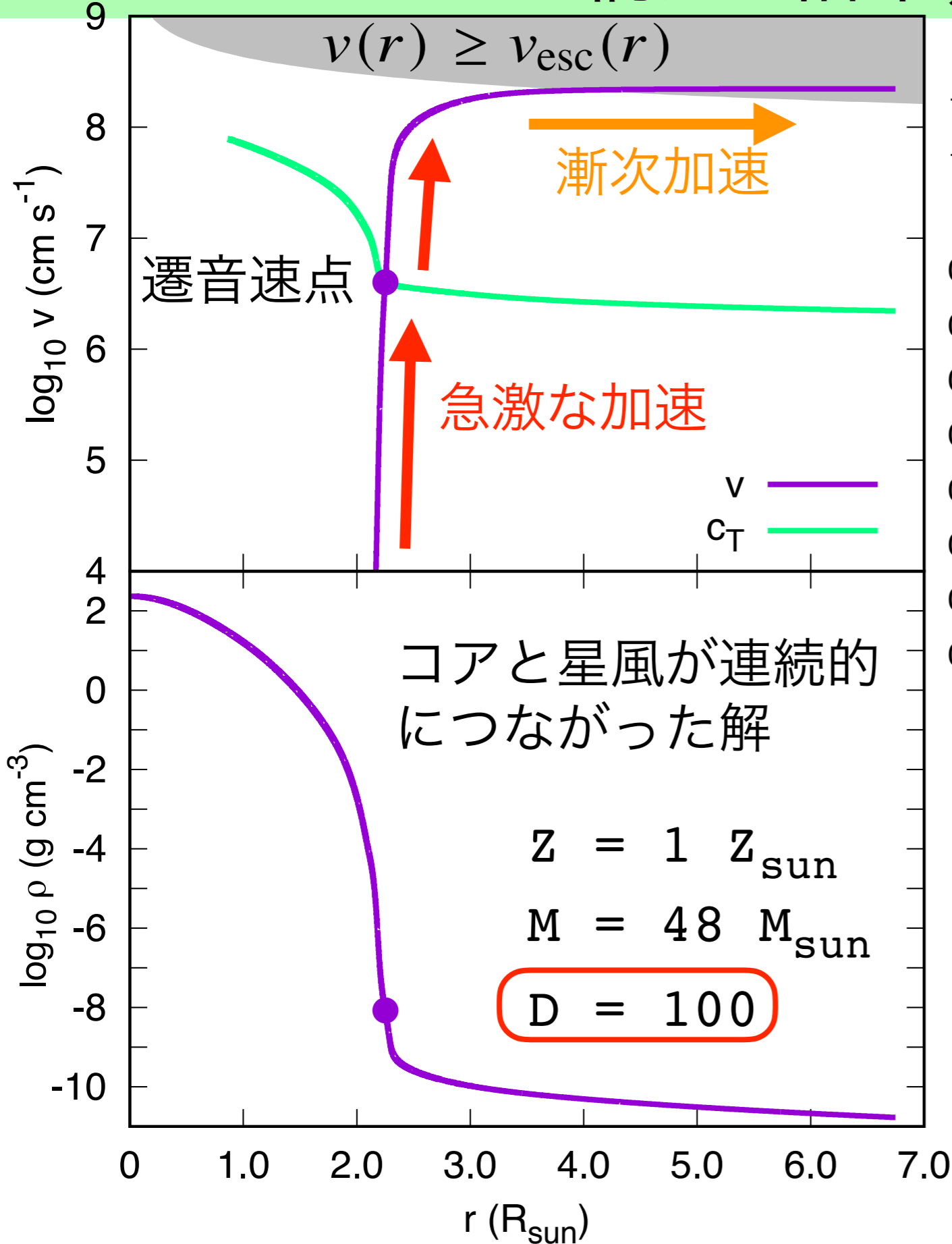
$\kappa(\rho, T) \rightarrow \kappa(D\rho, T)$: 増大しうる.

Hillier & Miller 1999

Grafener et al. 2012

6. Results

WR星モデルの構造: 結果, Clumping有り



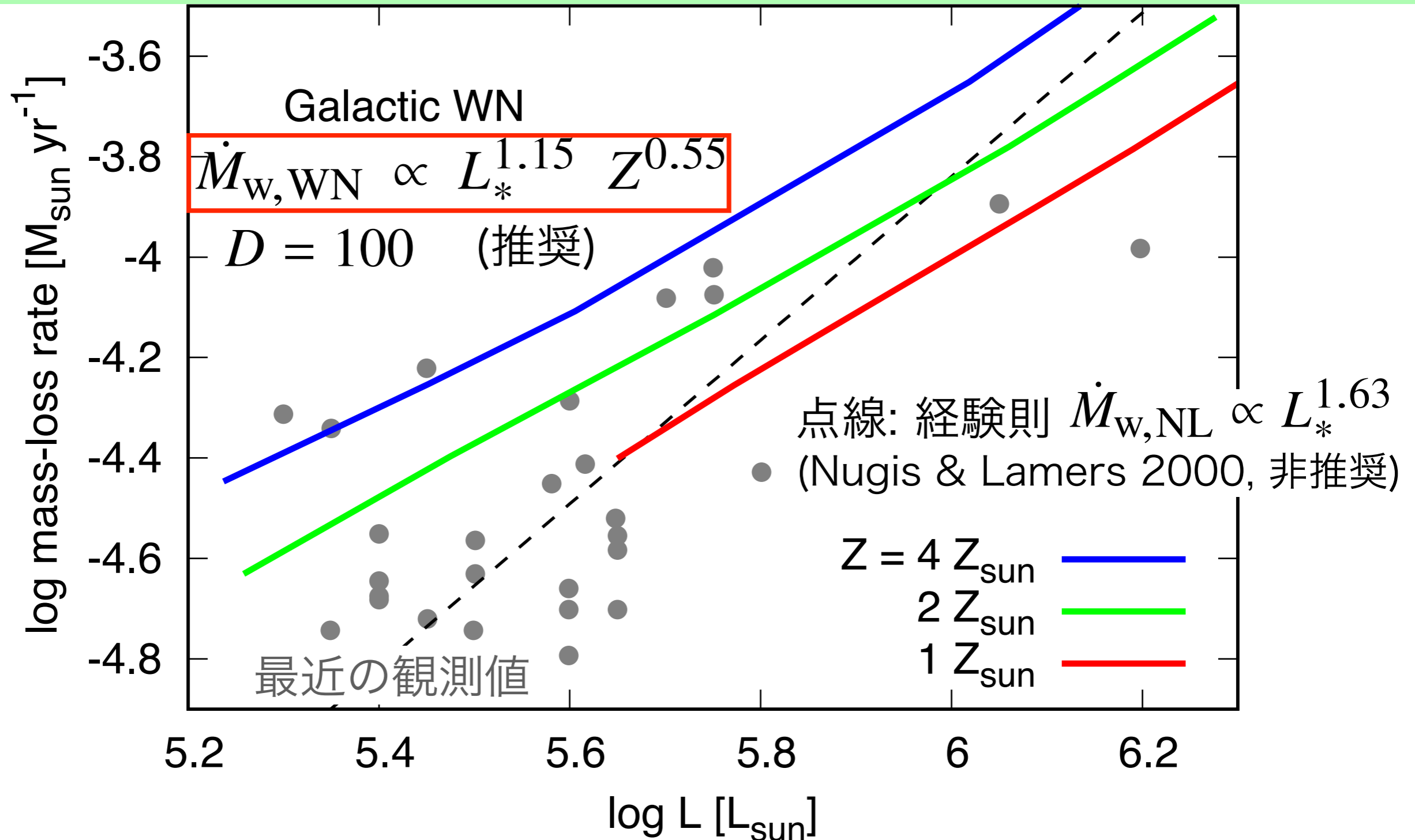
終端速度が脱出速度を上回るまで十分な加速が持続した。

$$\dot{M}_w \approx 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

$$v_{\infty} \approx 2200 \text{ km s}^{-1}$$

観測値に匹敵する。

Mass-Loss-Luminosity Relation for WNs



最近の観測値を再現するようなモデル.

進化計算で用いられる経験則よりは光度のベキが緩やか.

Summary

巨大な質量降着率 $\dot{M}_{\text{acc}} = 0.1-1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 下で進化する原始星を考えた.

星の寿命の間中降着が続き, 星は $\sim 10^5 M_{\odot}$ まで成長できるか?

輻射圧により星風が駆動され質量獲得を妨げる可能性を調べる.

根元で星に接続されるような球対称・定常風解を構成した.

得られた星風解は全て脱出速度に達することなく減速される解だった.

➡ 超大質量星の成長を妨げるような定常的な星風は期待できない.

上記の手法をWR星のモデル化に適用した.

次のようなmass-loss formulaを得た: $\dot{M}_{\text{w,WN}} \propto L_*^{1.15} Z^{0.55}$

進化計算で用いられる経験則よりは光度のベキが緩やか.