

第30回 理論懇シンポジウム  
「星の物理の新地平」

Wolf-Rayet星及び星風の構造  
と質量放出率について

仲内 大翼  
齊尾 英行  
(東北大 天文)

 Mon 25 Dec 2017 in Univ. of Tokyo 



TOHOKU  
UNIVERSITY



Theoretical Astrophysics  
Tohoku University

# 目次

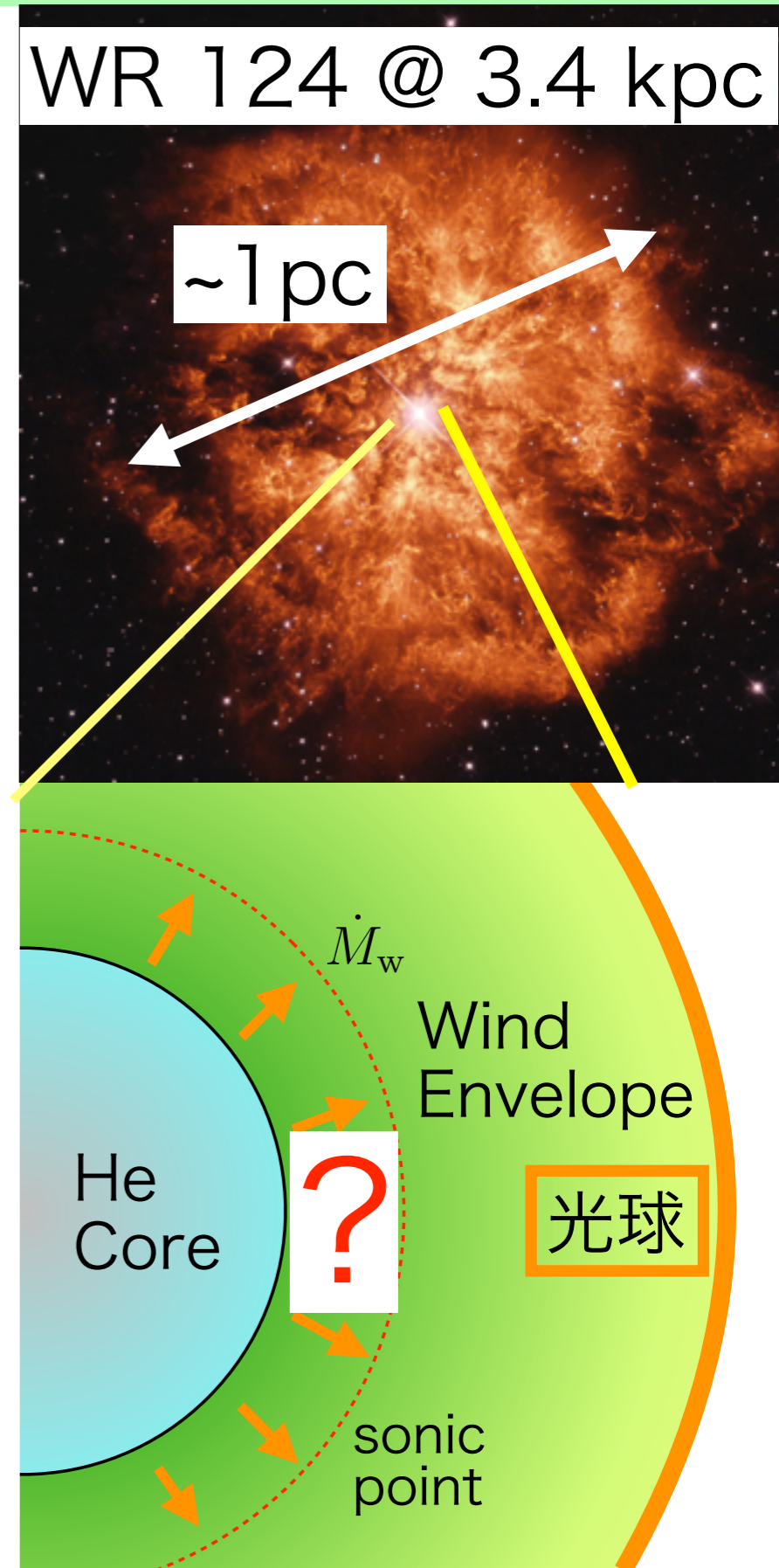
1. Introduction: WR星とは, 研究動機
2. 計算手法について
3. 計算結果及び観測との比較
4. まとめと議論

# 1. Introduction

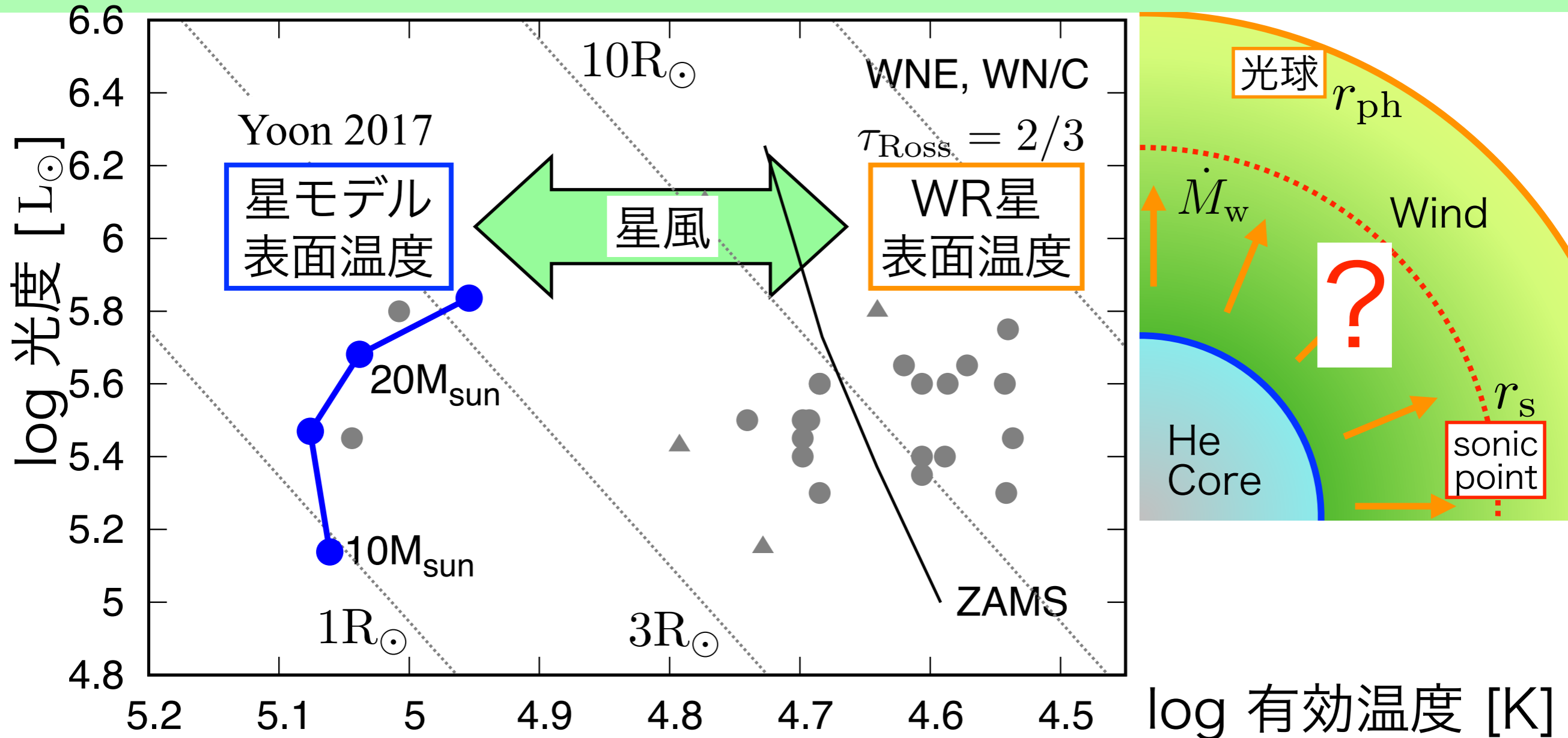
# Wolf-Rayet (WR) Star

1867年発見  
150周年!!

- ・進化の進んだ大質量星:  $M_{WR} \sim 10-40 M_{\odot}$
- ・幅が広く, 明るい輝線放射
- ➡ **強い星風**の存在を示唆
  - 大きな速度:  $v_{\infty} \sim 1000-3000 \text{ km s}^{-1}$
  - 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.
- ➡ 質量放出により水素層を失った,  
**Heを主成分とする星**としてモデル化される.  
Langer 1989a
- ・**星風自体が光学的に厚い.**
- ➡ 星表面及び星風加速領域の構造は見えない.  
星だけでなく星風も同時に扱ったモデル化が必要.



# 星モデルと観測されたWR星の比較



\* 既存のHe星モデル: 星風がない境界条件の下構成される。

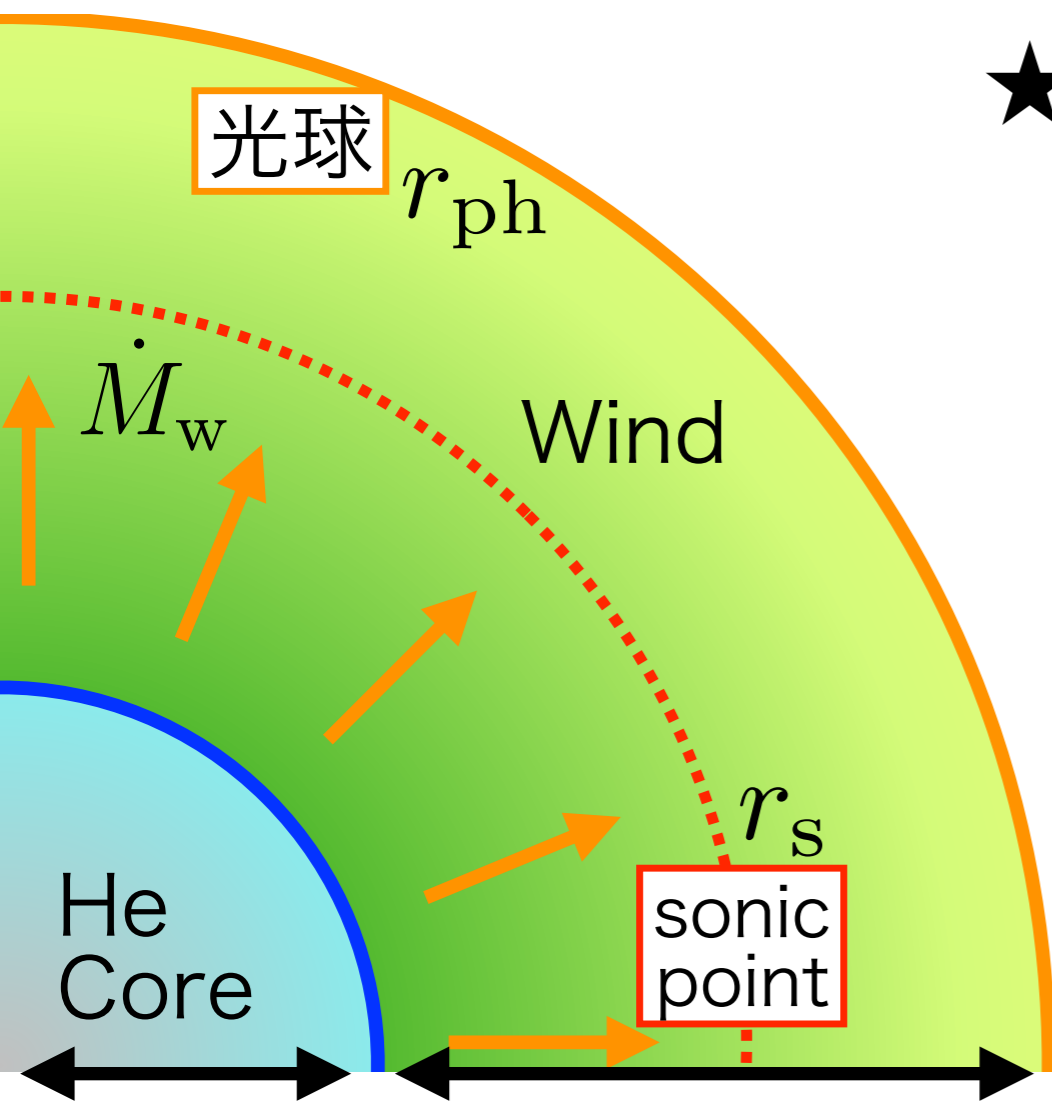
➡ He星モデルの表面温度 >> 観測されたWR星の表面温度。

星風と滑らかに繋がったHe星モデルを構成する。  
星風付きHe星モデルの表面温度はどの程度か。

## 2. 計算手法について

# Basic Equations

Kato & Iben 1992 Kippenhahn et al. 2012  
DN, Hosokawa, Omukai, Saio, Nomoto 2017



## ★星風領域: 球対称・定常と仮定

- EoM:  $v \frac{dv}{dr} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP_{\text{gas}}}{dr} - \frac{GM_r}{r^2} - \kappa \frac{L_r}{4\pi r^2 c}$   $\kappa$ : opacity
- EoC:  $\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho$ ,  $\dot{M}_w \equiv 4\pi r^2 \rho v = \text{const.}$ ,
- Energy:  $\Lambda \equiv L_r + \dot{M}_w \left( \frac{v^2}{2} + \frac{5RT}{2\mu} + \frac{4a_{\text{rad}}T^4}{3\rho} + \int_{r_s}^r \frac{GM_r}{r^2} dr \right) = \text{const.}$ ,
- Luminosity:  $L_r = L_{\text{rad}} + L_{\text{conv}}$ , 輻射+対流輸送
- EoS:  $P = P_{\text{gas}} + P_{\text{rad}}$
- 未知関数:  $v(r), \rho(r), T(r), L_r, M_r$

★He core: windの式で  $v \rightarrow 0$

★超音速領域:  $\beta$ 型速度則に従う単純な星風モデル.  $v(r) = v_\infty \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^\beta$

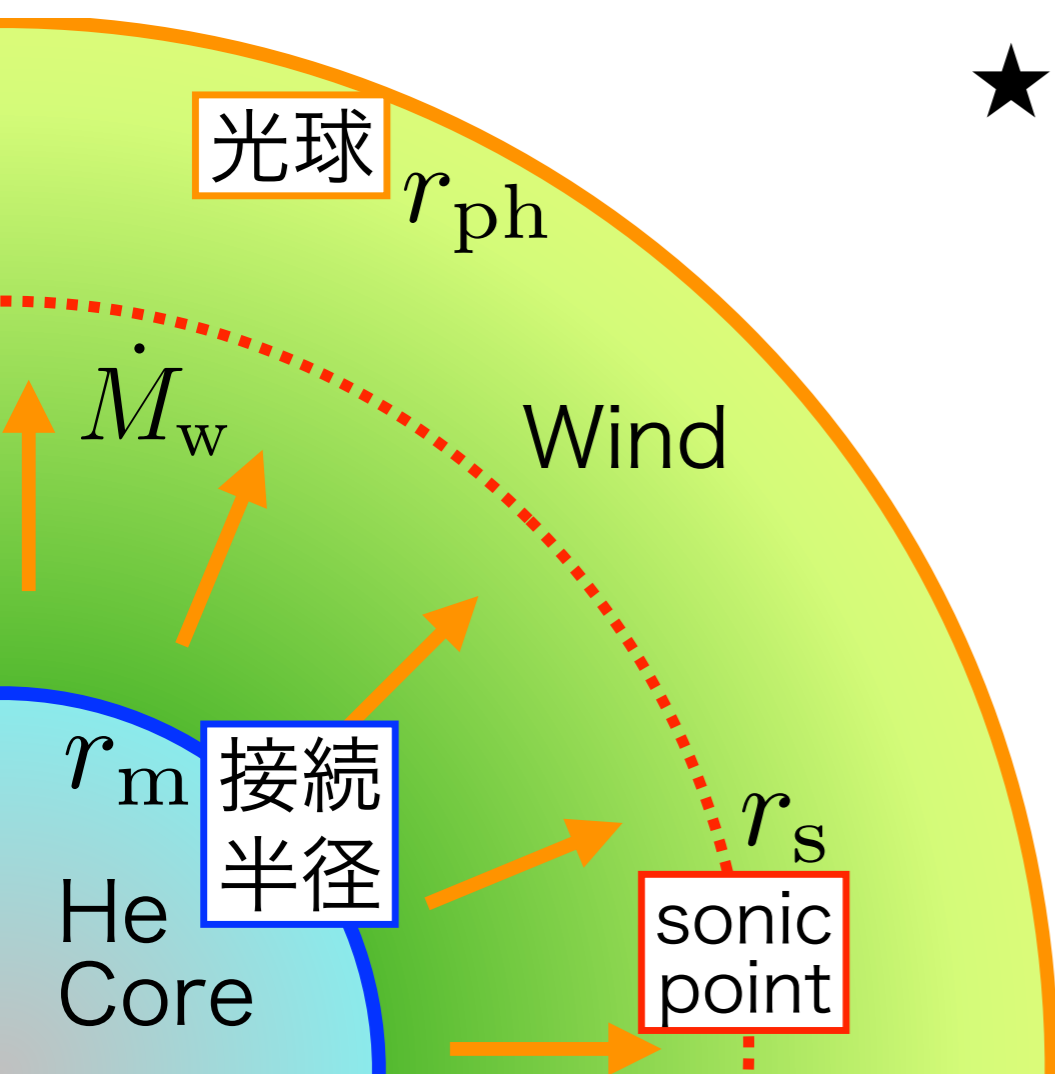
opacity構造を  
仮定して計算

$$\kappa_{\text{eff}}(r) = \kappa_{\text{R}}(\rho_s, T_s) \left[ 1 + 2\beta \left( \frac{v_\infty}{v_{\text{esc}}(r_s)} \right)^2 \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{2\beta-1} \right]$$

$v_\infty/v_{\text{esc}}(r_s), \beta$ : パラメタ,  $v_\infty/v_{\text{esc}}(r_s) \approx 1-2$   $\beta = 0.75$  and  $1$

# 境界条件及び星-星風の接続

Lamers & Cassineli 1999  
 Kato & Iben 1992  
 Kippenhahn et al. 2012  
 Ro & Matzner 2016



★ 5つの境界条件:

① 星中心  $L_r = 0$  &  $M_r = 0$

② 遷音速点 @  $r_s$

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)で分子もゼロ.

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

③ 光球 @  $r_{ph}$   $T_{\text{eff}}(r_{ph}) = T(r_{ph})$  &  $\tau(r_{ph}) = 2.7$   
 $\tau(r) \equiv \kappa_{\text{eff}}(r) \rho(r) r$

★ 接続条件: 質量, 密度, 温度, 全光度が連続.

質量, 化学組成,  
 $v_\infty/v_{\text{esc}}(r_s), \beta$  を与える.



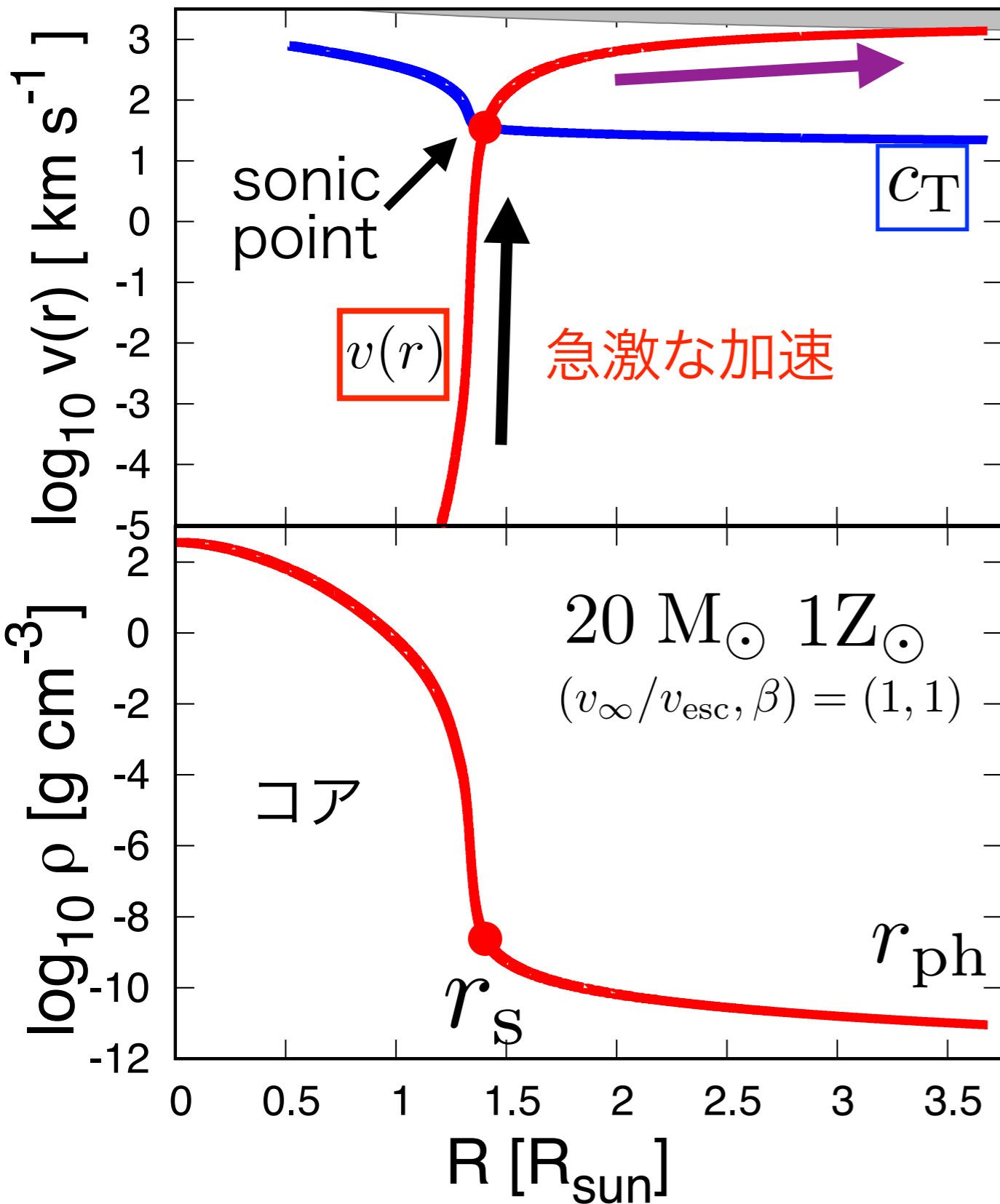
星風と滑らかに繋がったHe星の構造,  
 $L_{ph}, \dot{M}_w$  が唯一に決まる.

\* 先行研究: 遷音速点の扱いが不適切,  $\dot{M}_w$  を経験則から与える.



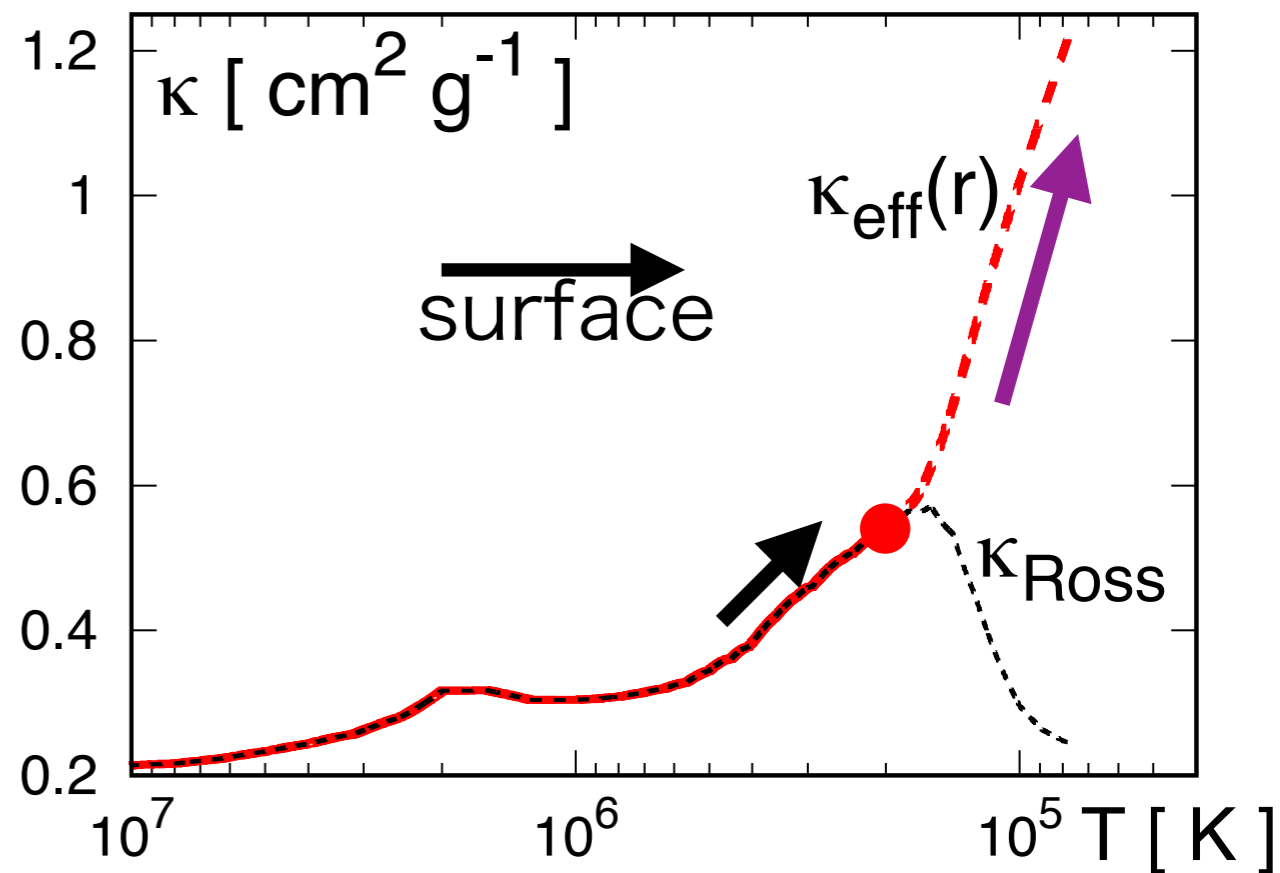
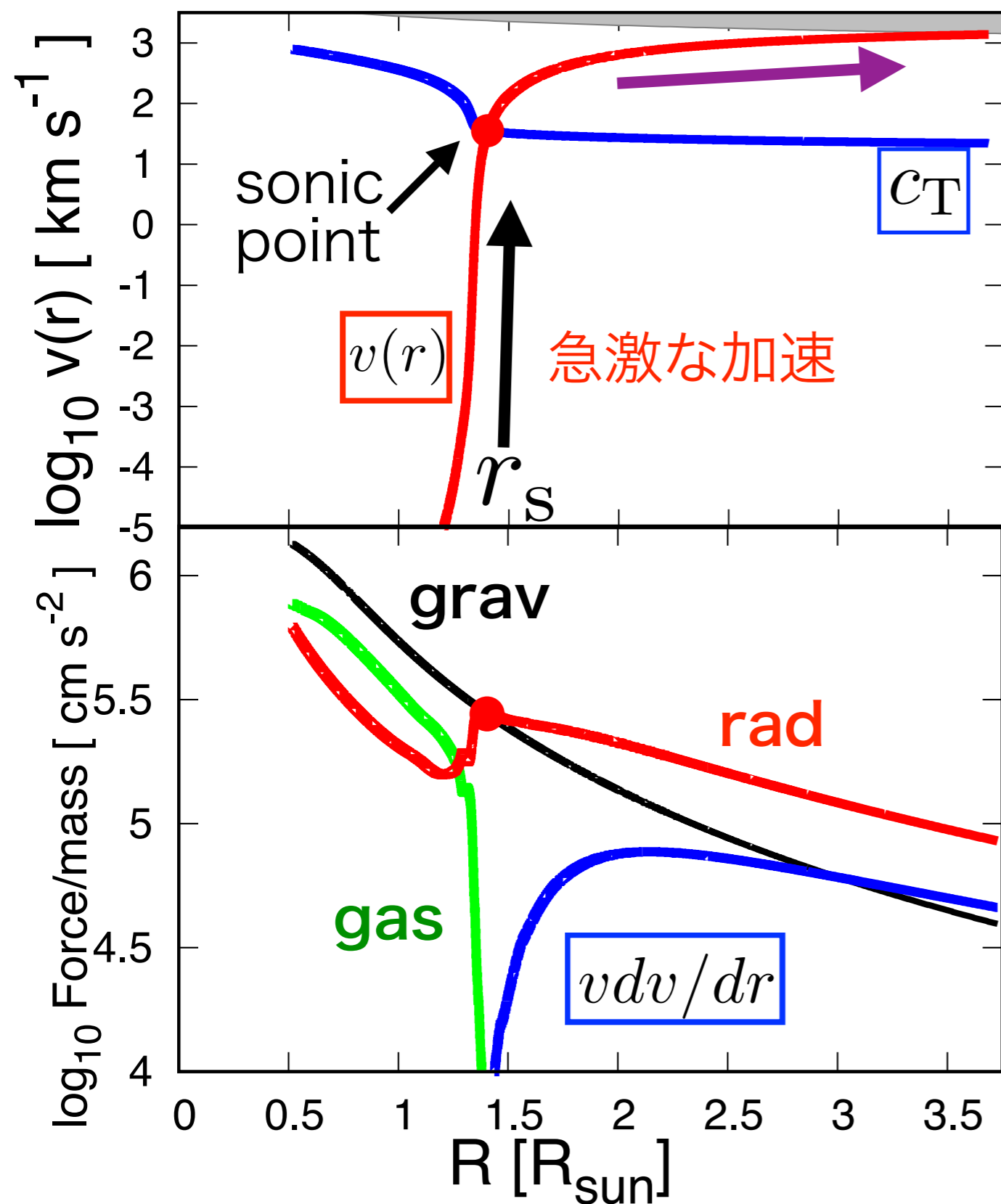
### 3. 計算結果及び観測との比較

# 星風付きHe星モデルの構造



- \* 滑らかに繋がった星風-星構造.
- \* コア表面で速度が急激に増大し、遷音速点  $r_s$  に達する.
- \* 光球の位置:  $r_{\text{ph}} \approx 2.7 r_s$
- \* 質量放出率及び終端速度:  
 $\dot{M}_w \approx 1.6 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$   
 $v_{\infty} \approx 1400 \text{ km s}^{-1}$
- ➡ WR星の観測値に匹敵.

# 星風付きHe星モデルの構造

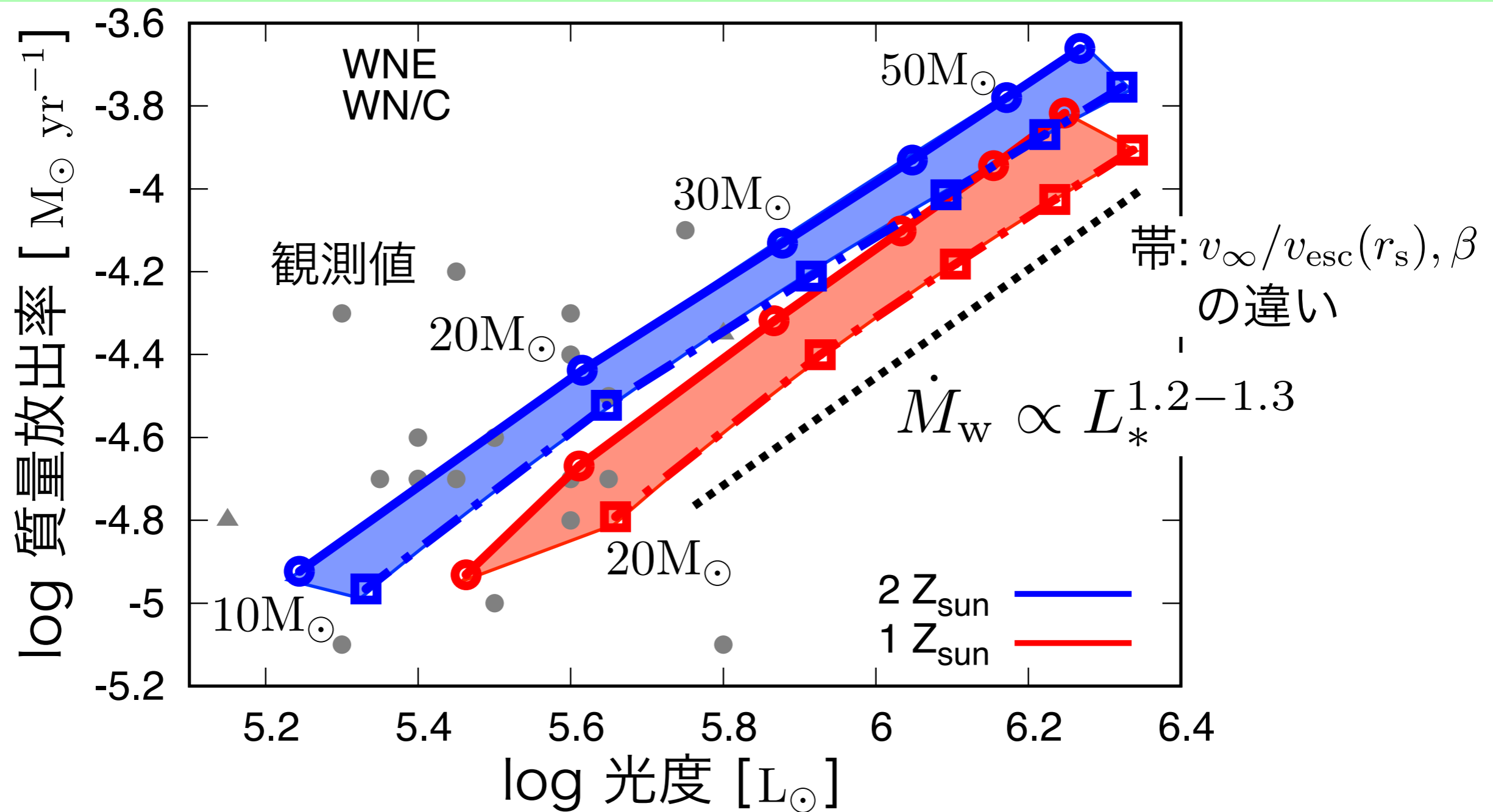


\*  $T \rightarrow 10^{5.2} \text{ K}$  で鉄族元素の束縛-束縛遷移によるopacityが星風加速を誘発.

\*  $L_r \approx L_{\text{Edd}}$  で遷音速点の実現.

$$\underbrace{v \frac{dv}{dr}}_{\text{blue}} = - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{dP_{\text{gas}}}{dr}}_{\text{green}} - \underbrace{\frac{GM_r}{r^2}}_{\text{black}} + \underbrace{\kappa \frac{L_r}{4\pi r^2 c}}_{\text{red}}$$

# 観測との比較: 質量放出率と光度の関係

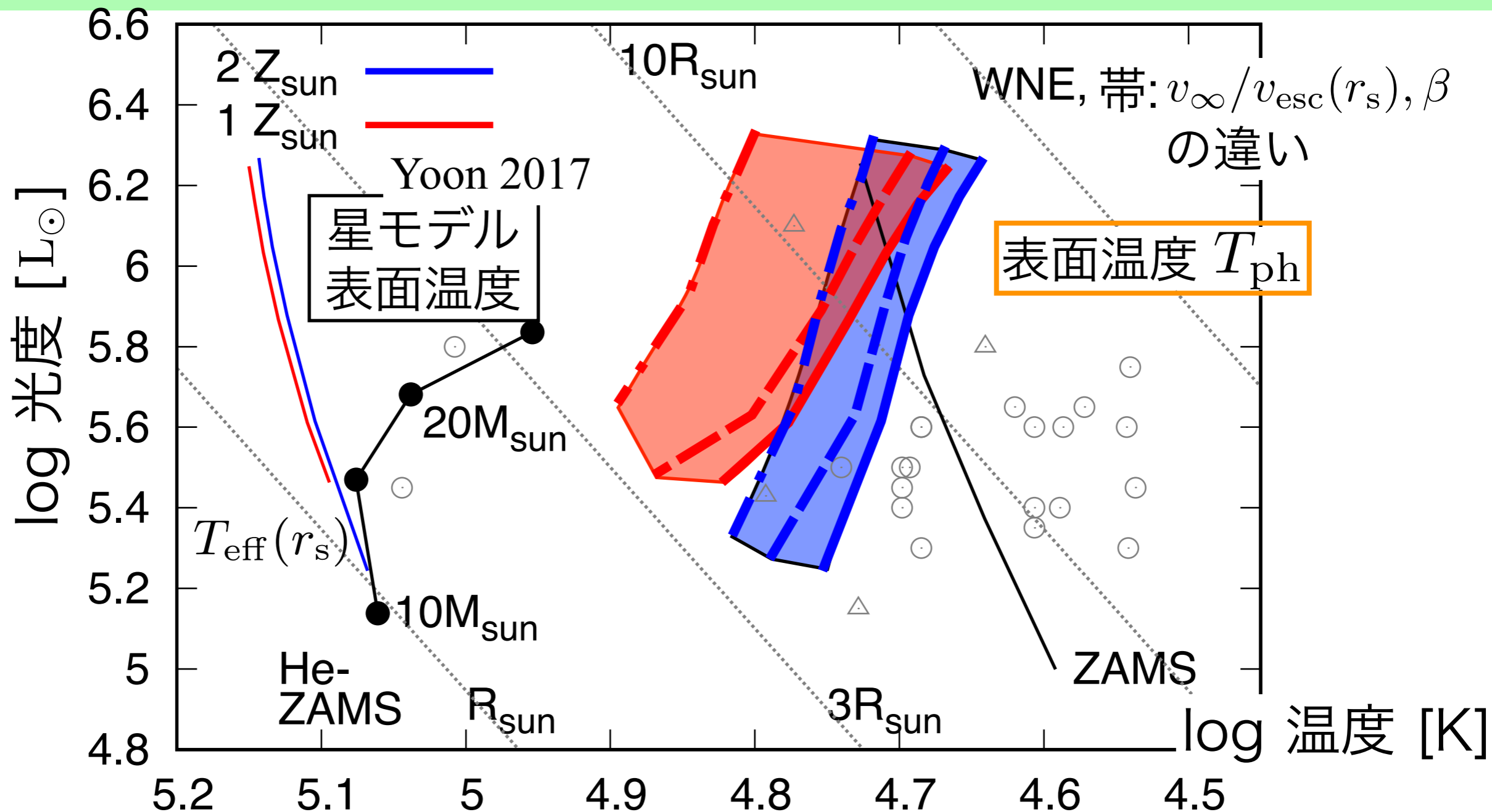


\*本モデルの質量放出率はWR星の観測値と同程度の値.

\*質量放出率はパラメタ ( $v_\infty/v_{\text{esc}}(r_s), \beta$ ) にあまり依存しない.

\*スケーリング則:  $\dot{M}_w \propto L_*^{1.2-1.3}$ , 観測に近い  $\dot{M}_w \propto L_*^{1.18}$  Hainich et al. 2014

# 観測との比較: HR図上の位置



\*本モデルの表面温度  $\ll$  星風無し星モデルの表面温度.

\*しかし, WR星の表面温度は本モデルよりもさらに小さい.

➡ WR星風(の超音速領域)の構造は, 単純な星風モデルでは不十分.

# Summary & Discussion

- ・星風と滑らかに繋がったHe星モデルを構成した.
- ・星風の加速は鉄族元素のopacityにより開始される.
- ・本モデルの質量放出率 ~ WR星の観測値.
- ・スケーリング則:  $\dot{M}_w \propto L_*^{1.2-1.3}$
- ・本モデルの表面温度  $\ll$  星風無し星モデルの表面温度.
- ・しかし, WR星の表面温度は本モデルよりもさらに小さい.  
➡ WR星風(の超音速領域)の構造は, 単純な星風モデルでは不十分.
- ・Wind大気モデルを用いるなどして, line opacityの効果を取り入れたモデル化が必要.