

# 多様な構造を持つ赤色巨星風と コロナ/質量放出境界線

鈴木 建

東大 総合文化

# なぜ恒星風の研究をするのか？

---

## 全ての星は質量放出をしている

- 一生でかなり(例えば~半分)の質量を失う
- 質量放出が、恒星進化をコントロールする場合もある;  
特に巨星段階

## 周囲の環境へ影響を及ぼす

- 太陽風=>地球環境(磁気嵐); 宇宙天気予報の重要性
- 原始星風=>惑星形成 (原始惑星形円盤との相互作用を通して)

## にも関わらず、恒星風の駆動機構はよく分かっていない

- 面白いネタがいっぱい

# なぜ恒星風の研究をするのか？

---

## 全ての星は質量放出をしている

- 一生でかなり(例えば~半分)の質量を失う
- 質量放出が、恒星進化をコントロールする場合もある;  
特に巨星段階

## 周囲の環境へ影響を及ぼす

- 太陽風=>地球環境(磁気嵐); 宇宙天気予報の重要性
- 原始星風=>惑星形成 (原始惑星形円盤との相互作用を通して)

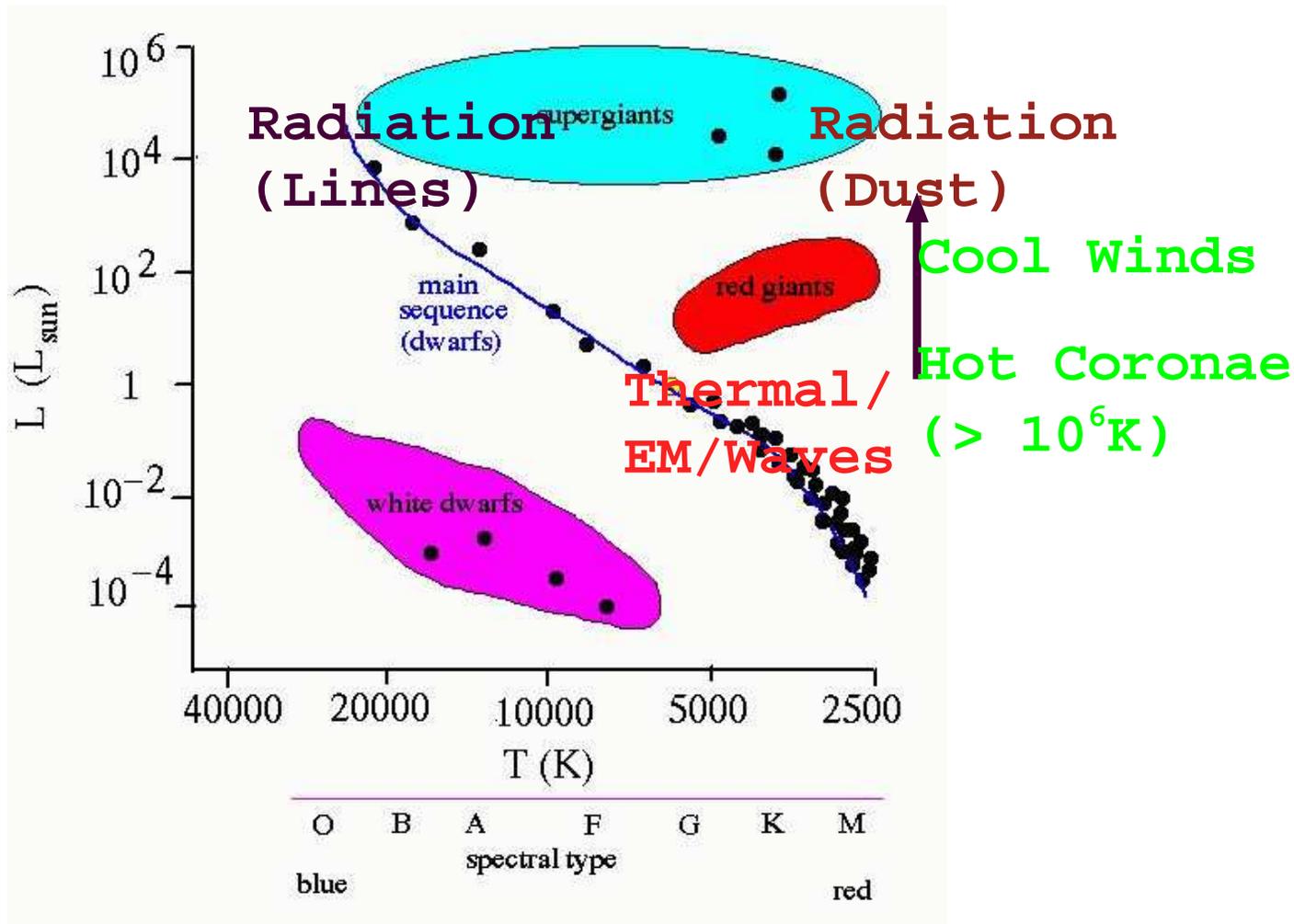
## にも関わらず、恒星風の駆動機構はよく分かっていない

- 面白いネタがいっぱい

でも、あんまり誰もやっていない。

- おそらくコストパフォーマンスが悪い。(重要論文/仕事量)
- 玄人好み = 地味??
- しかし、主流の研究も最初はマイター路線から

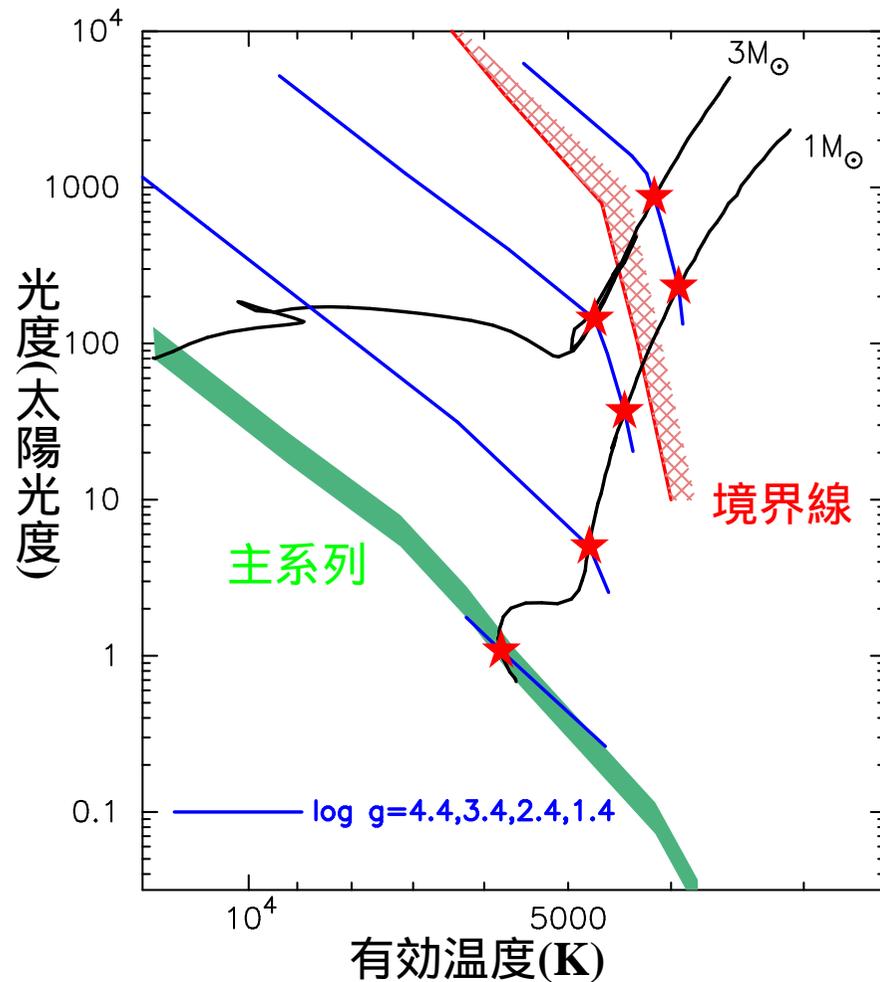
# HR図上での恒星風



今日の話：中小質量の主系列星と赤色巨星(AGBの手前まで)からの恒星風

- 擾乱/波動駆動型恒星風

# The Dividing Line



- 境界線の左側 : X線観測される
- 境界線の右側 : X線観測まれ

中小質量星 : 準巨星=>赤色巨星への進化で

- コロナが消失

- 質量放出率は増大

- log g=1.4で太陽(log g=4.4)の10万倍以上の質量放出率

# 本研究

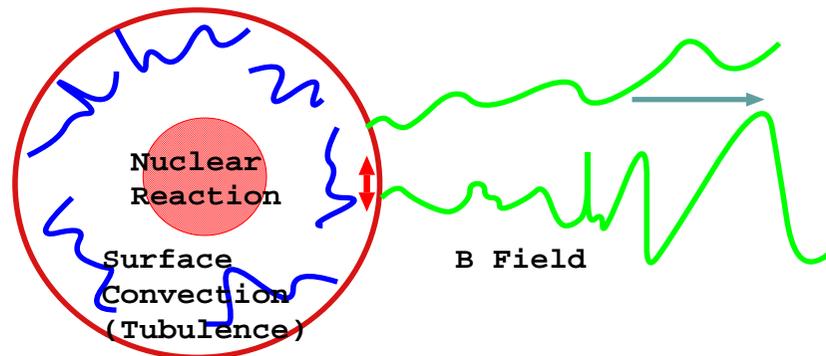
主系列=>準巨星=>赤色巨星の進化に伴う、恒星外層の進化の解明

## ■境界線は一体何か？に焦点を絞る

- 物理的説明
- 観測的にも未知の部分多い：境界線前後でどのようにWindsが変化

これらの星はいずれも表面对流層がある <=> 磁場がある

## ■擾乱、波動駆動型星風が吹いているはず



本質的には太陽風と同じ、擾乱/波動駆動型星風; 違いは

- 中心星の半径(表面重力)
- 表面对流層の状況(乱流速度や周期)

太陽コロナ、太陽風で成功したSimulationをそのまま流用

# Simulation

大局的なエネルギー輸送をできるだけ首尾一貫した方法で解く

■ 計算領域：光球 - 25恒星半径

- 10-15桁の密度差を扱う
- 急激に開く磁束管; 同じ磁場強度と形状を仮定
- 流れ出し境界

■ 光球から1-5km/sの擾乱を注入

- $dv \leq$  対流フラックス( $g$ と負相関; $T_{\text{eff}}$ と正相関)
- Spectrum :  $1/f$ ; 周期は $T_{\text{eff}}/g$ スケール(対流セルの大きさ)

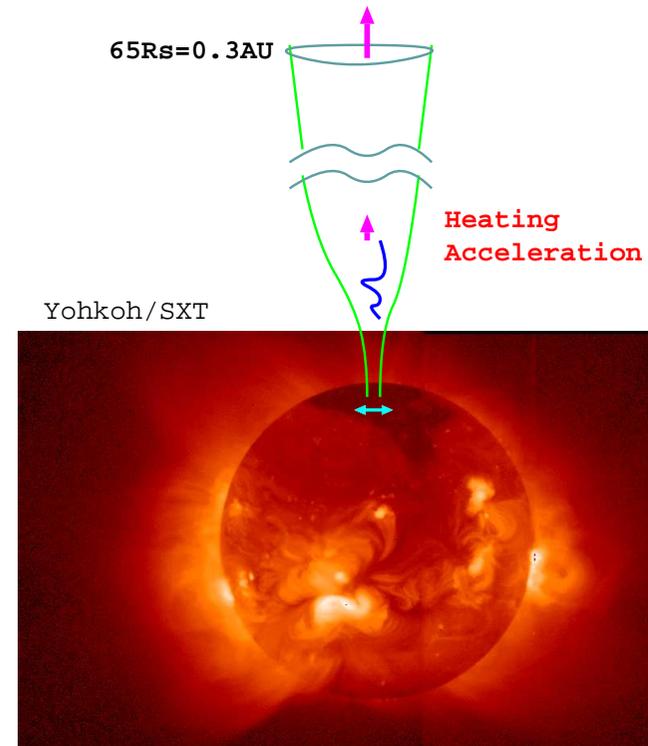
■ 輻射冷却と熱伝導を考慮した磁気流体力学方程式

- 彩層/遷移層/コロナをちゃんと解く
- 非線形波動も自動的に解ける

しかし、妥協点もあり

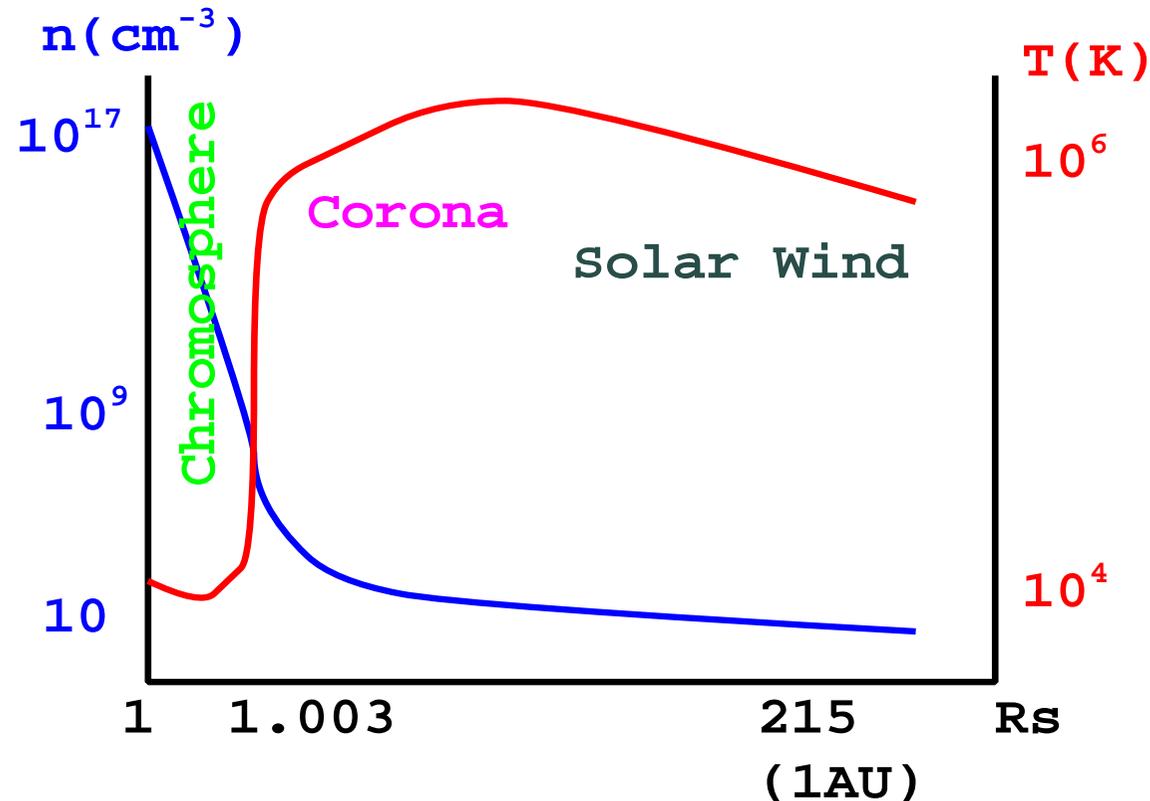
■ 1次元 (1.5次元) & 1 流体

- 横方向への波のカスケード無視
- 運動論効果も無視
- (計算機パワーの制約からこのような効果を取り入れるのは不可能)
- 低周波(太陽なら5分振動)アルフベン波のみ



# 大きな密度差

例えば太陽



重力(“成層化”した大気)が重要な役割

■ 低周波アルフベン波：非線形 & 長波長

● 波の振幅 (If  $\rho \delta v^2 v_A$  conserves  $\Rightarrow \delta v \uparrow$  for  $\rho \downarrow$ )

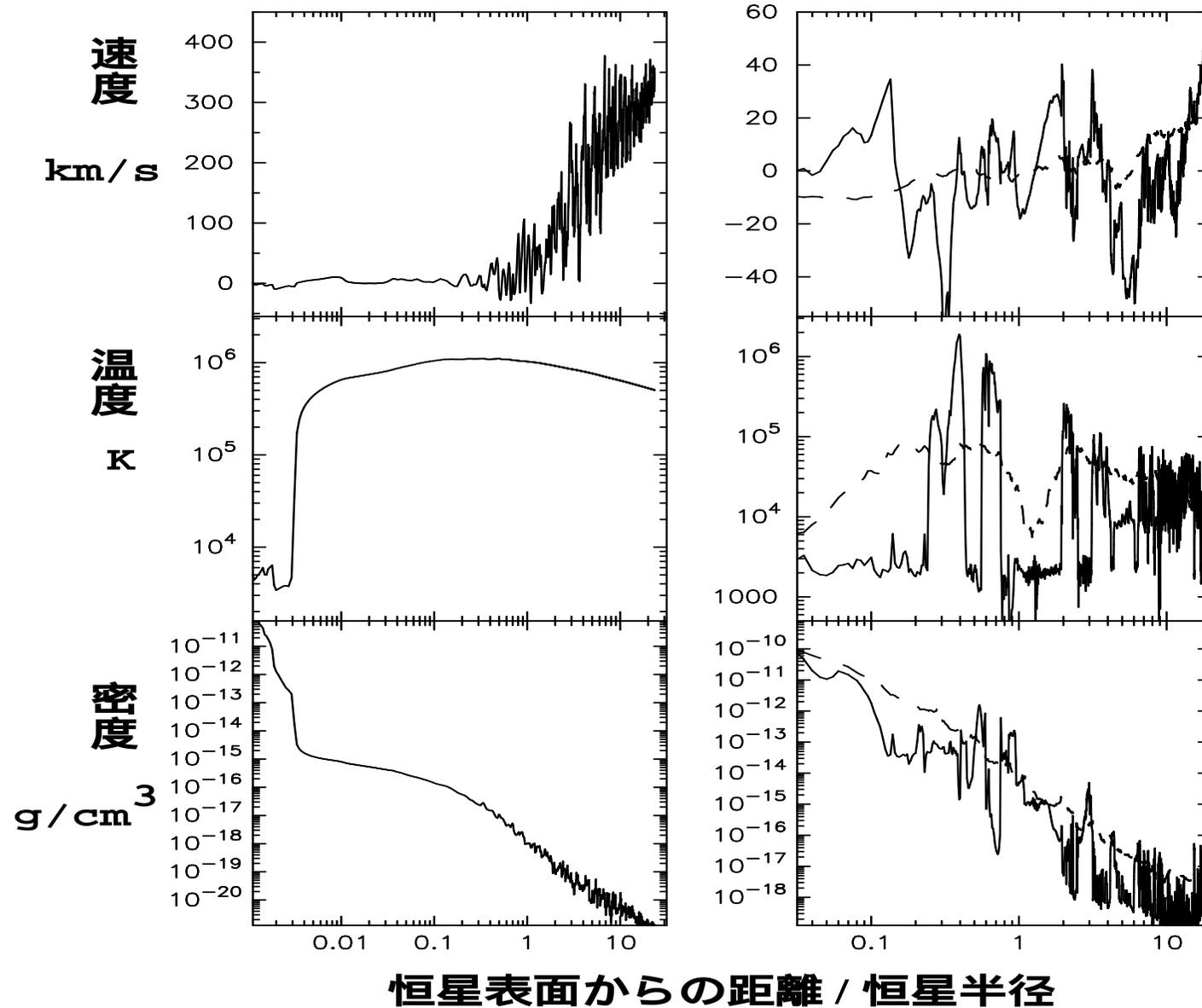
● 波形の変形 (Velli 1993) ( $\lambda > v_A (dv_A/dr)^{-1}$ )

1次元でさえ全領域のシミュレーション無い(太陽/赤色巨星ともに)

# Wind構造の進化

## 太陽

## 赤色巨星

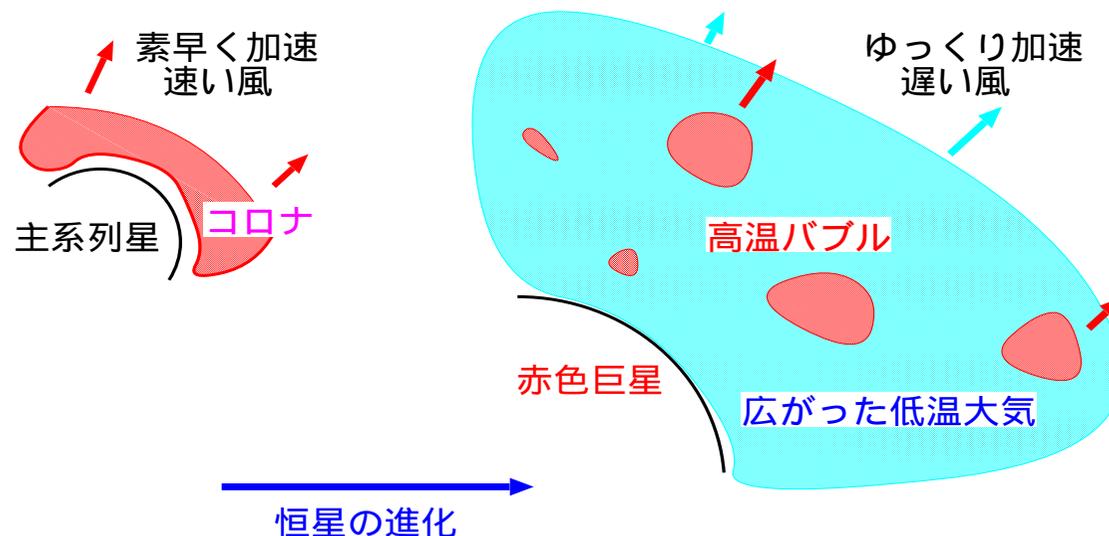


# 主要な結果

どのモデル(主系列=>赤色巨星)でもアルフベン波の減衰により、遷音速に加速される恒星風が駆動される。

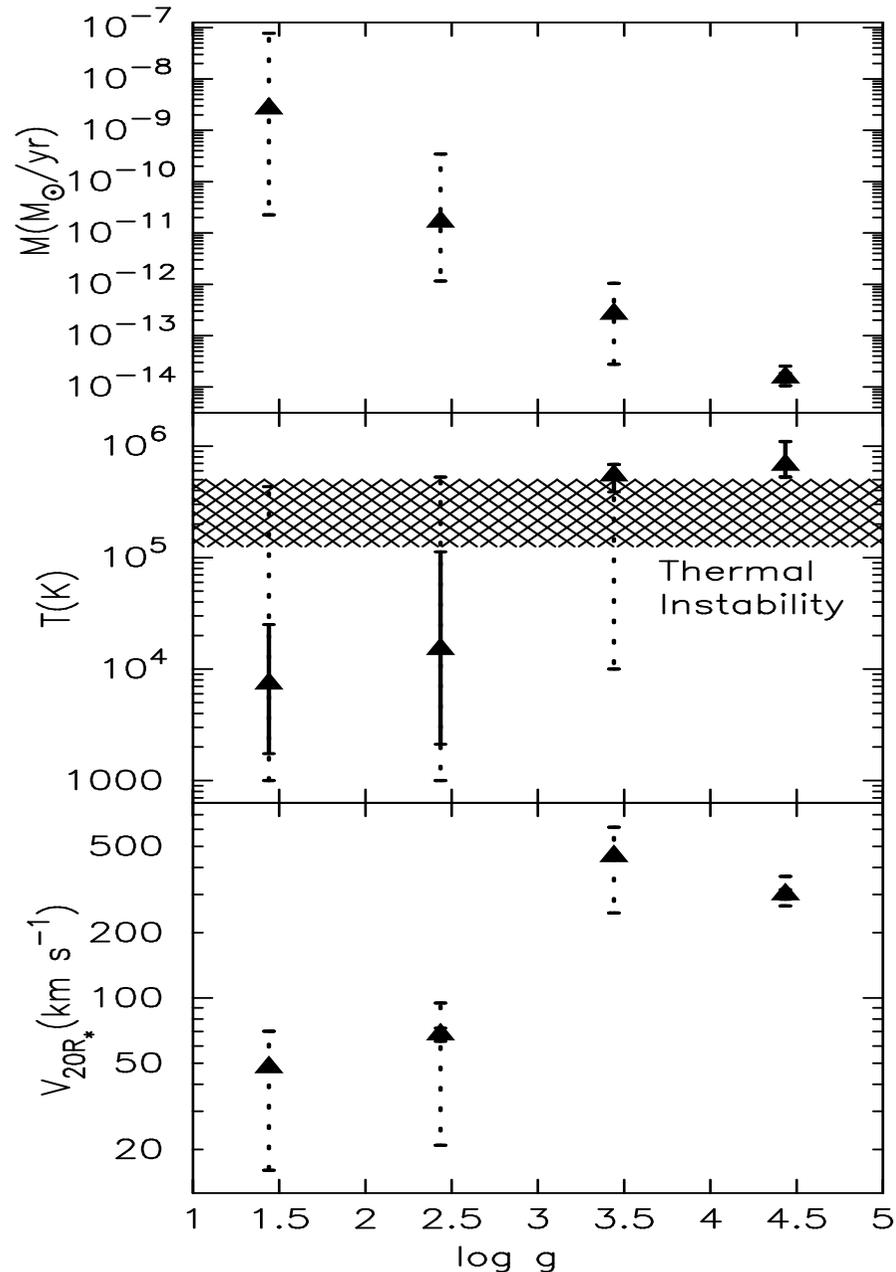
- 非線形減衰 (詳細は省略)
- 但し、磁気乱流の3次元効果は今後考慮すべき(Goldreich & Sridhar 1995)

- 主系列=>赤色巨星でコロナが消失
- 非定常な赤色巨星風



いずれも観測の傾向と一致

# Windパラメタの進化



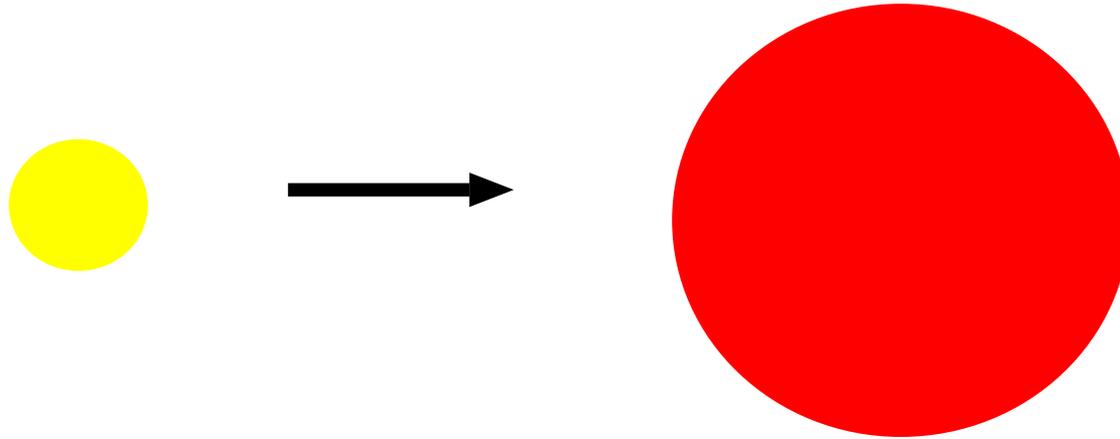
(横軸:  $\log g$ ; 左が半径大)

半径大きくなると

- 質量放出率: 急激に増大
- 温度: 相転移的に減少
- 速度: (相転移的に)減少

# 脱出速度との関係

---



主系列星

小

大

$R_*$

$$v_{\text{esc}} (= \sqrt{2GM_*/R_*})$$

赤色巨星

大

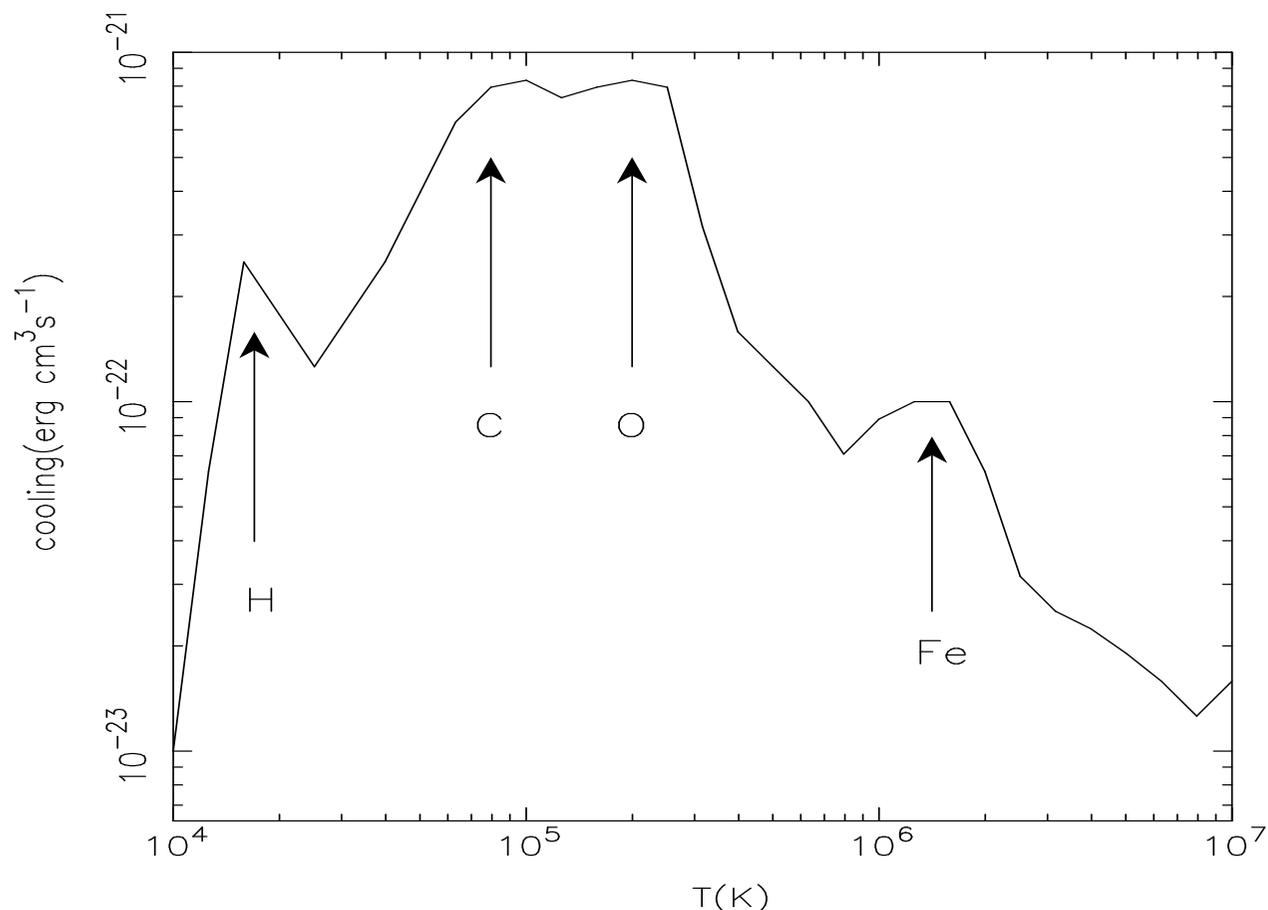
小

$R_* \gtrsim 10R_\odot$  で  $v_{\text{esc}} \lesssim c_S (T = 10^6 \text{K})$

外層は熱くなる前に飛んでいく。

# 熱的不安定

## 放射冷却関数



■ 10万度~> に熱不安定領域

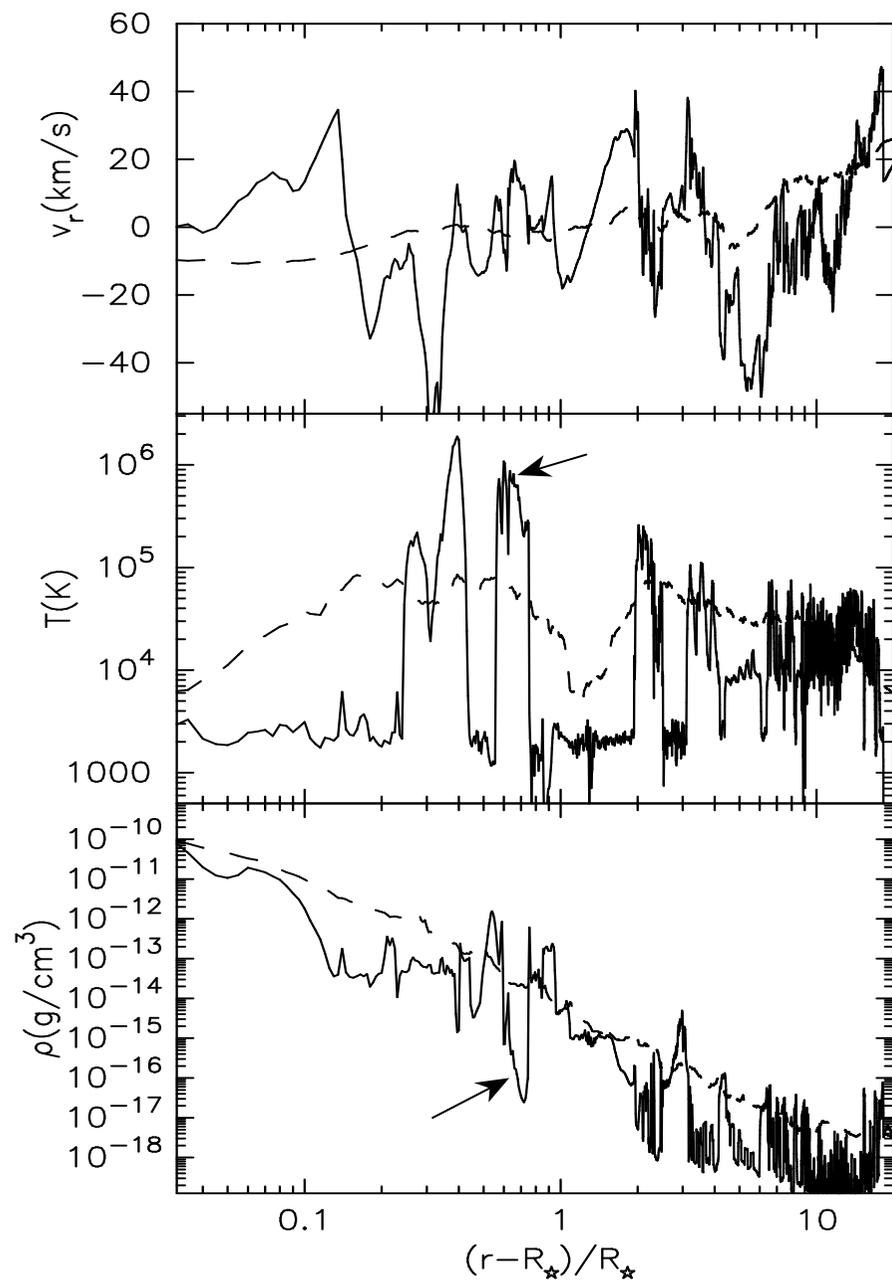
■ 100万度以上では熱伝導により安定化

=> 外層の温度は数万度が100万度のどちらか

=> 恒星進化に伴なう急激な温度の落下、バタつく赤色巨星風

● 実は、分子冷却でも不安定領域あり(2000 - 3500 K; 後述)

# 多様な構造を持つ赤色巨星風(激しい時間依存)



Suzuki 2006, ApJ, submitted (astro-ph/0608195)

3Msun,  $\log g=1.4$

実線:Snapshot

破線:time-averaged

- 磁化した高温( $\sim 100$ 万度)バブルが

- 低温(彩層程度の温度 $\sim 1$ 万度)の星風の中に

熱的不安定が多相星風の原因

# 他の結果(今日は省略)

---

(詳細はSuzuki 2007, astro-ph/0608195)

## ■ 脱出速度よりもだいぶ遅い星風

- 光球の上に準静的領域; 恒星風に対する“表面” $\neq$ 光球

## ■ 質量放出率の急激な時間依存

- 5000倍程度

## ■ 間欠的なX線放射

- 時間依存して存在する高温バブルから

## ■ 恒星風のEnergeticsから質量放出率のスケーリング則も導出した。

- 波動駆動型恒星風では初めて

最初を除き、いずれも理論的な予言;  
今後の観測で、これらが正しいか確認したい。

# まとめ

---

主系列星から赤色巨星への恒星風の進化を、動的な磁気流体力学シミュレーションにより調べた。

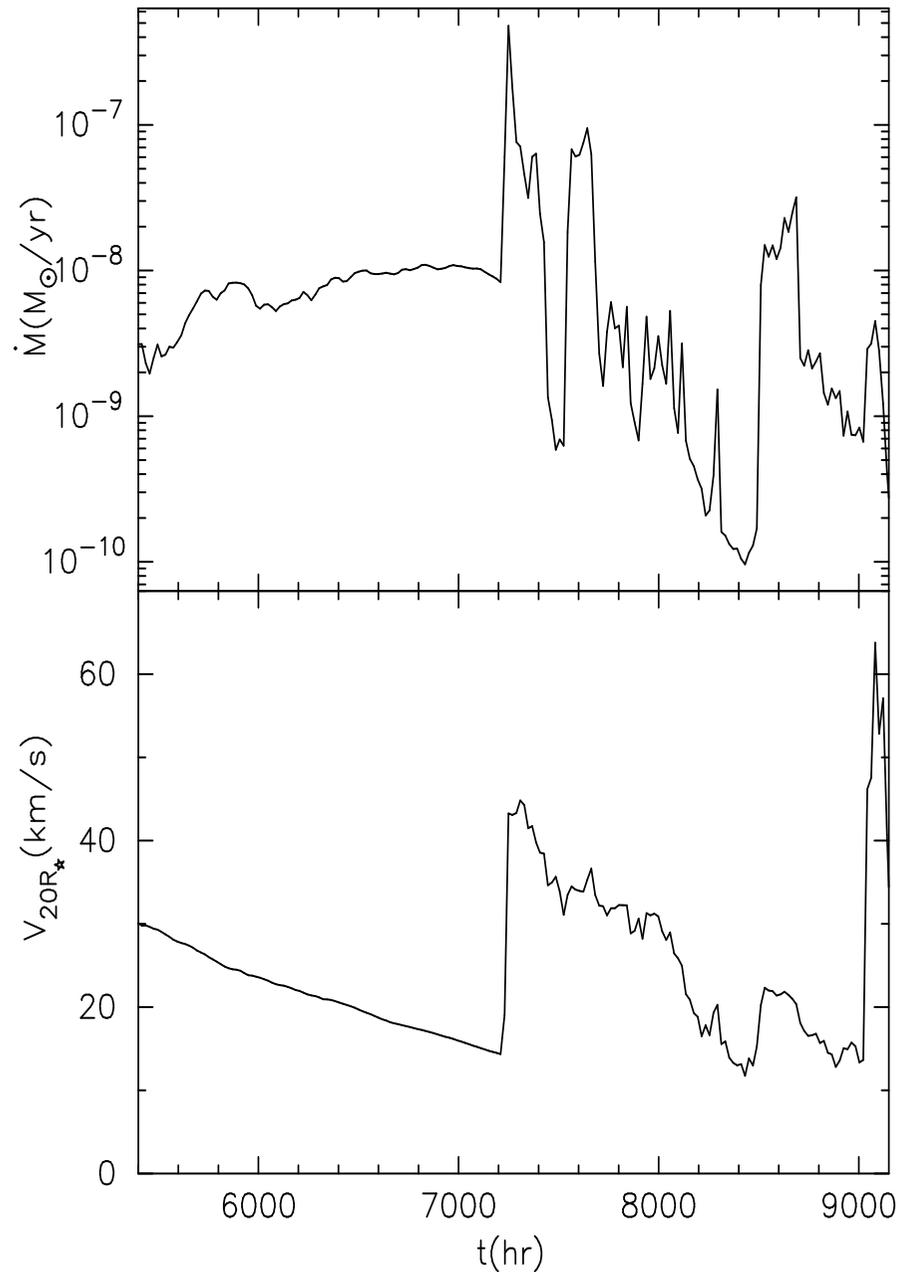
恒星風駆動機構はいずれの恒星でも

- 表面对流層=>アルフベン波=>非線形効果減衰=>遷音速恒星風

恒星進化に伴う恒星風の進化

- 定常コロナの消失
  - 重力効果+熱的不安定性
- 激しく時間依存する恒星風; 高温バブル + 低温恒星風
  - 熱的不安定性
- 遅い星風
  - 光球上に静的な領域; 重過ぎて加速できず
  - 加速は数倍の恒星半径から
  - 恒星風速度は加速開始点の脱出速度程度

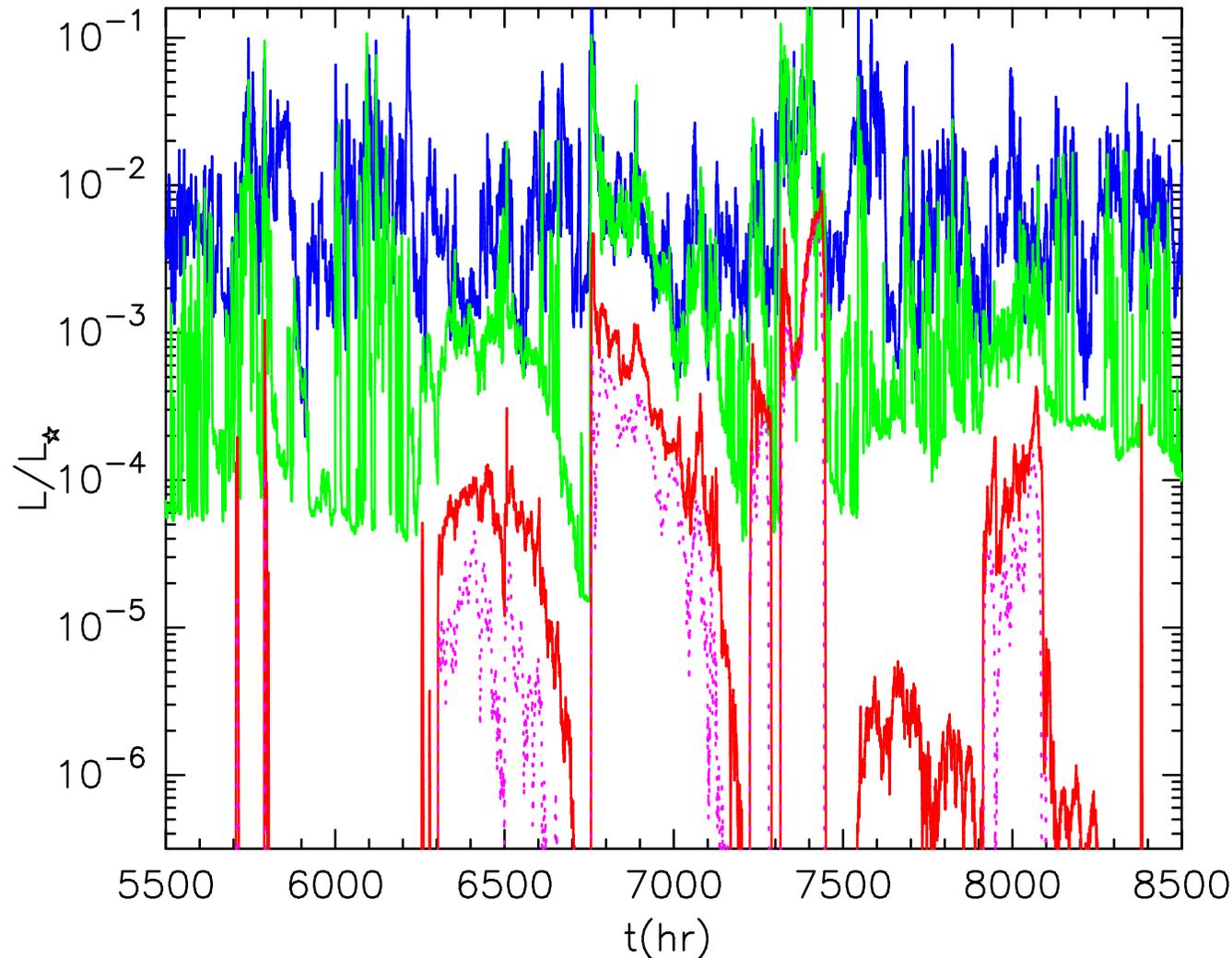
# 速度、質量放出率の時間変化



質量放出率は~5000倍変わる

- 定常の計算は良くない
- (時間平均した値を求めるのはOKだろうが)

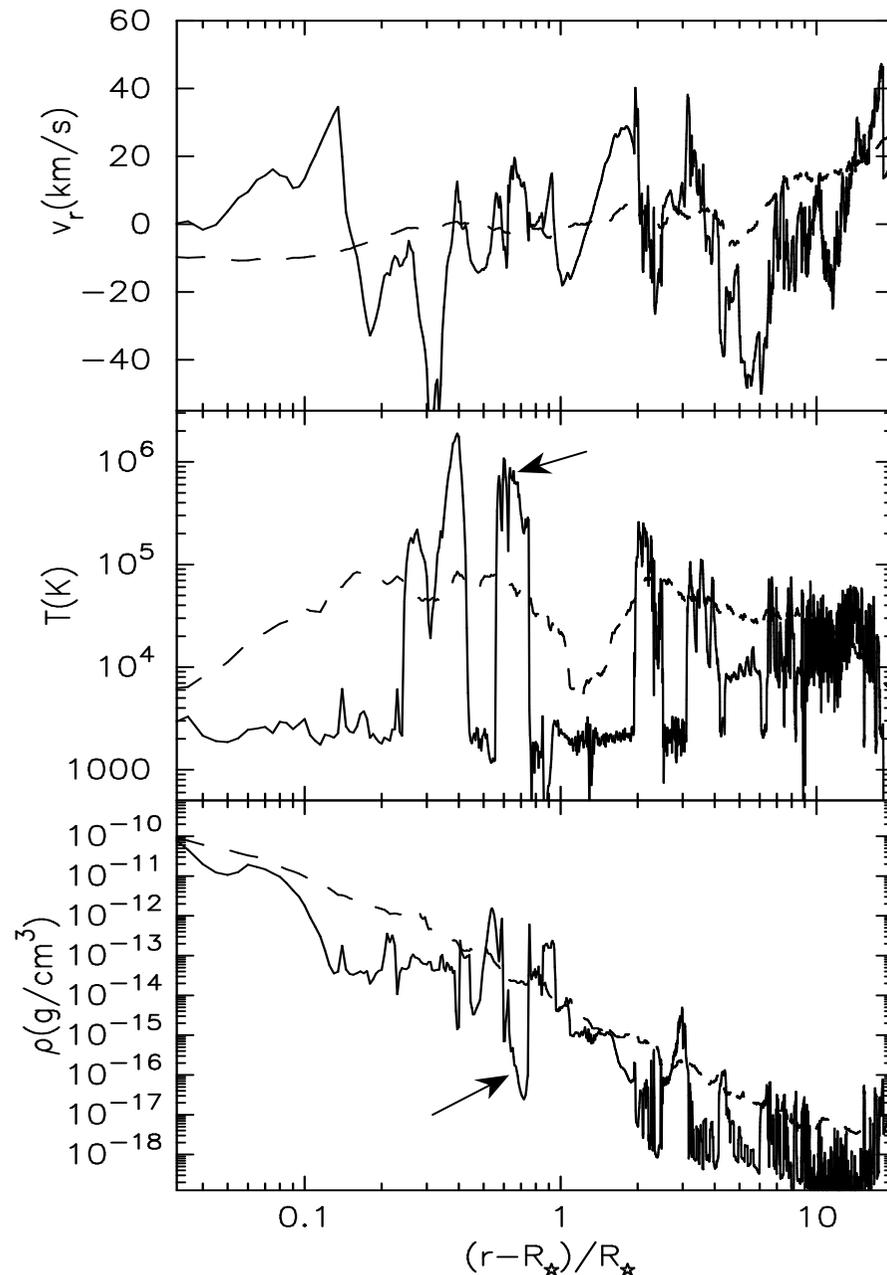
# 間欠的なX線放射



$T < 2 \times 10^4 \text{ K}$ ;  $2 \times 10^4 \text{ K} < T < 5 \times 10^5 \text{ K}$ ;  $5 \times 10^5 \text{ K} < T$  ( $10^6 \text{ K} < T$ )

- Hybrid星からのX線放射は磁化した高温バブルで説明可能?
- しかし外側の低温物質による吸収も考慮必要

# 遅い星風



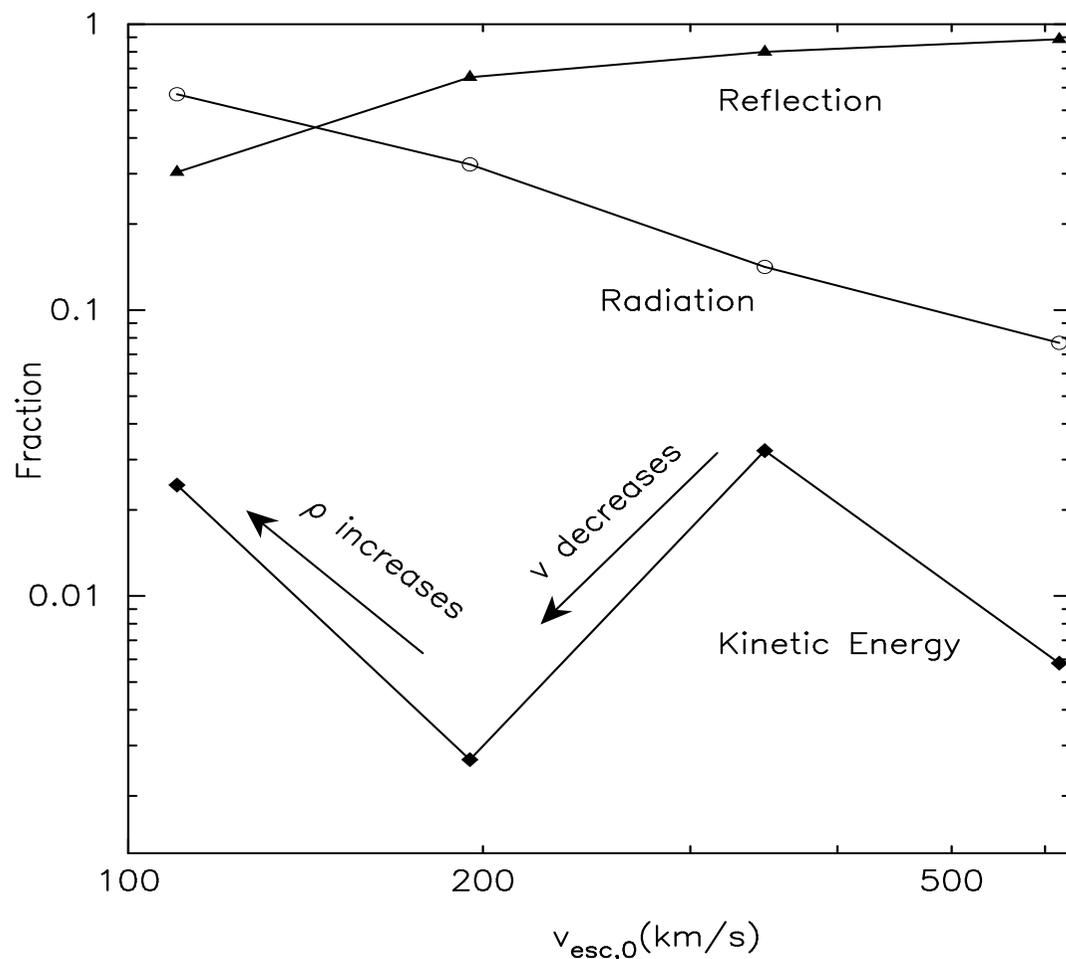
数倍の恒星半径以下では、大気は吹き出していない

- 放出/降着/波動が混沌
- おおざっぱ(時間平均)には準静的

恒星風の加速は数倍-10倍の恒星半径から

- 恒星風速度は加速の開始点の脱出速度程度でO.K.(表面での脱出速度より遅い)
- 重過ぎて表面付近から加速できず

# エネルギー収支

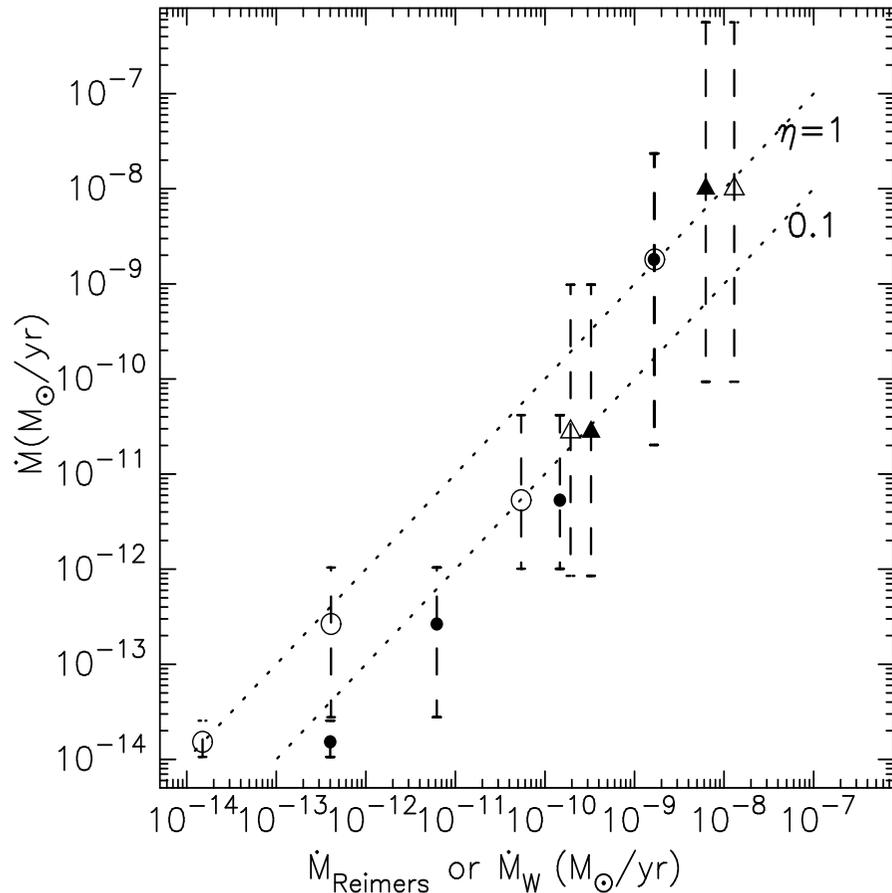


**恒星風<=表面での波動のエネルギーの~1%**

**卓越的なエネルギー損失**

- 進化していない星：反射により波が表面へ戻る
- 進化した星：輻射冷却

# 質量放出率



Suzuki 2006, ApJ, submitted (astro-ph/0608195)

我々のシミュレーション:表面のdvにより質量放出率が自動的に決定

## ■ Reimers' Relation

(filled symbols)

$$\dot{M}_{\text{Reimers}} = 4 \times 10^{-13} \eta_{\text{R}} \frac{L_{\star} R_{\star}}{M_{\star}} M_{\odot}/\text{yr}$$

(太陽の値で規格化)

## ■ Alfvén波駆動風の Energetics から (open symbols)

$$\begin{aligned} \dot{M}_{\text{w}} &= 1.7 \times 10^{-14} \eta_{\text{w}} \frac{L_{\star} R_{\star} T_{\text{eff}}^9}{M_{\star} g} \\ &= 1.7 \times 10^{-14} \eta_{\text{w}} \frac{L_{\star} R_{\star}^3 T_{\text{eff}}^9}{M_{\star}^2} M_{\odot}/\text{yr} \end{aligned}$$

# 質量放出率 -続-

---

$$L_{\text{wind}} = \dot{M} v_{\infty}^2$$

- **Reimer's Relation**

$$\Leftarrow L_{\text{wind}} \propto L_{\text{rad}}, v_{\infty}^2 \approx v_{\text{esc}}^2 \propto M/R$$

- **This Work**

$$\Leftarrow L_{\text{wind}} \propto 4\pi\rho_0\delta v_0^2 v_A \text{ (“Wave Luminosity”)}$$

$$\delta v_0 \Leftarrow \text{Convective Flux} \Leftrightarrow g \ \& \ T_{\text{eff}}$$

*c.f.* Schröder & Cuntz (2005)