

# 中小質量星からの擾乱駆動型恒星風

-次の松本さんの発表へのつなぎも含めて-

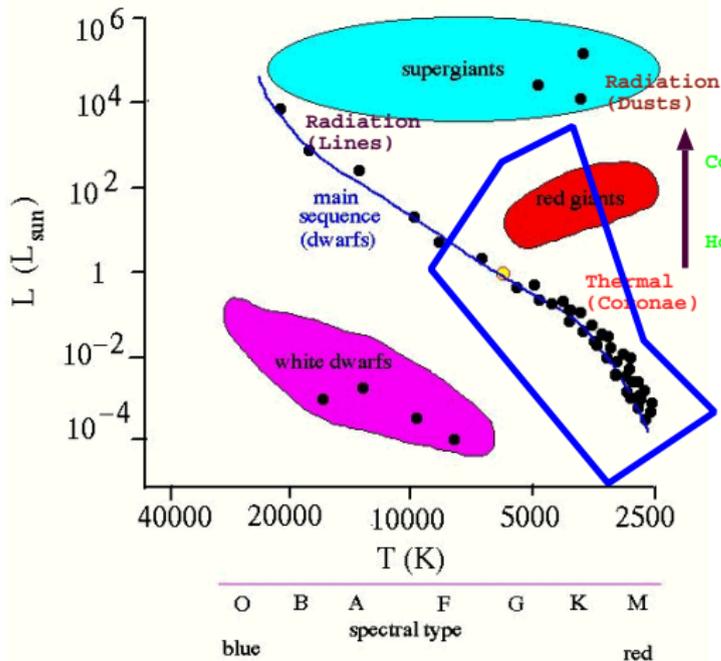
鈴木 建

名古屋大学 大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻

Dec. 27th, 2011

# HR図上での天体風

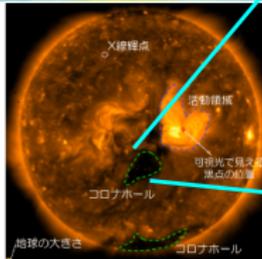
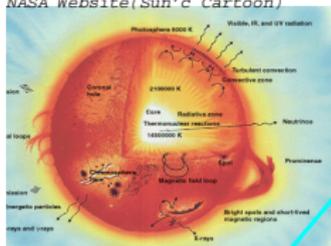
Univ.of California San Diego HP



- $L$  が大きい領域:  
輻射圧駆動
  - $T_{\text{eff}}$  大: metal line
  - $T_{\text{eff}}$  小: 塵
- 上記以外: 擾乱駆動型
- 中小質量の主系列星や進化初期の赤色巨星 (これらの星は系外惑星の中心星としても脚光を浴びる)

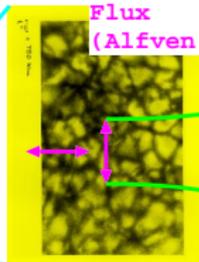
# 太陽型星の恒星風駆動

NASA Website(Sun's Cartoon)



HINODE/XRT

Poynting  
Flux  
(Alfven Wave)



Open Flux Tube → Stellar Wind

Granulation  
(at Photosphere)

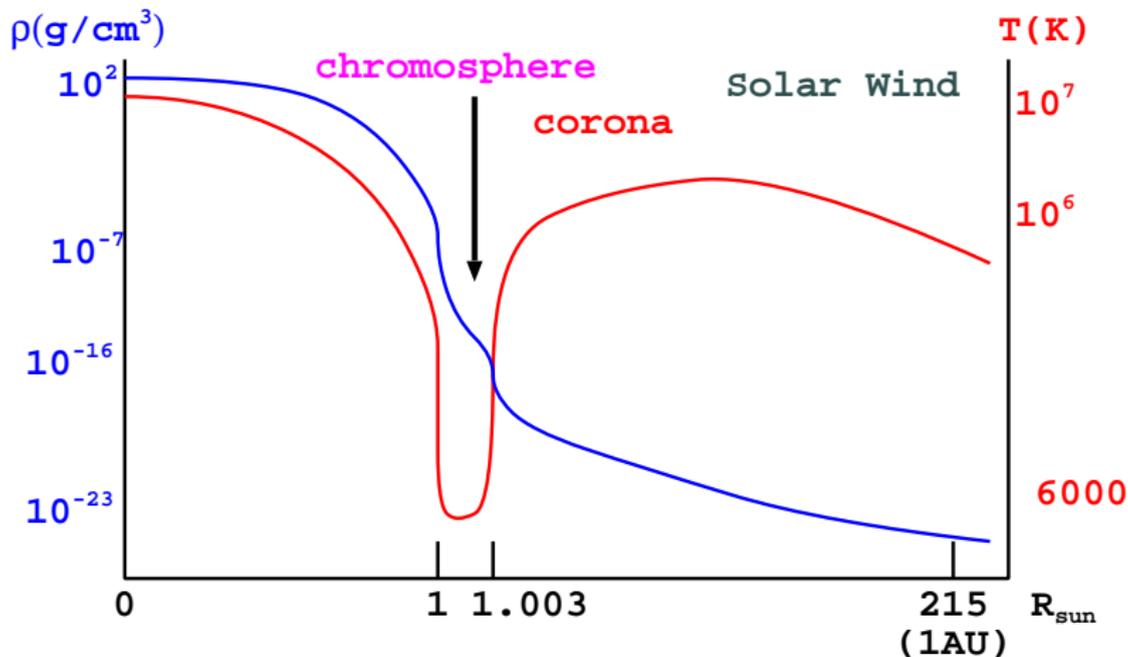
おおもとのエネルギー:中心核での核融合

- 輻射(大部分)+ニュートリノ(一部)
- コロナと太陽風(エネルギーで100万分の1)

恒星風: 表面对流層があることが鍵

# 密度温度構造 (数値は太陽)

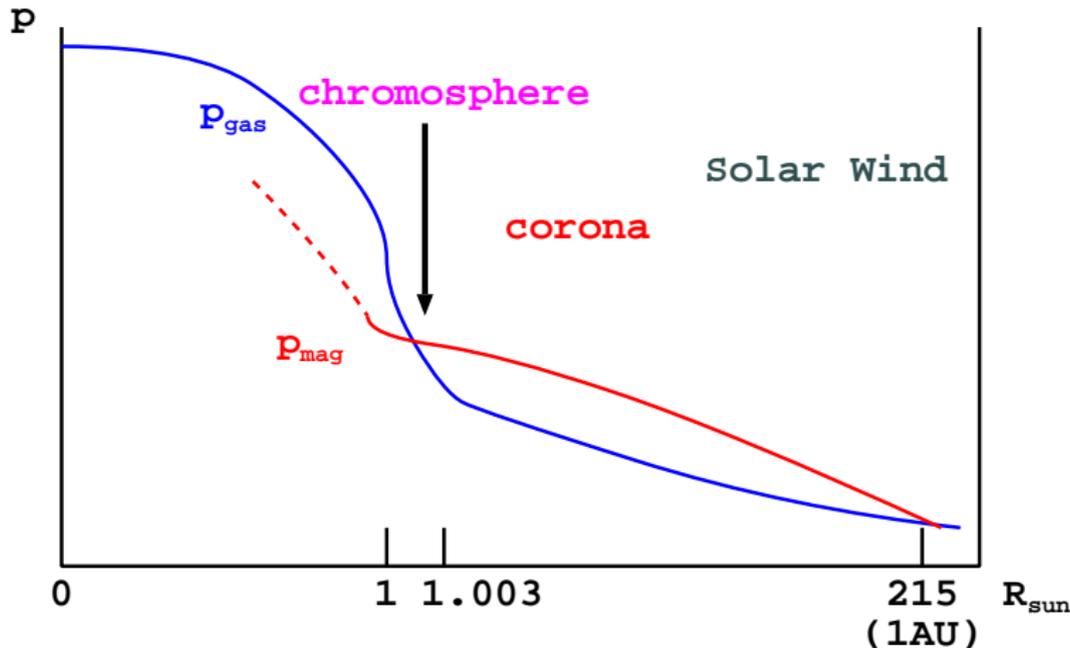
(スケールは厳密ではない)



低温の光球の上に高温コロナ，恒星風

# ガス圧と磁気圧 (数値は太陽)

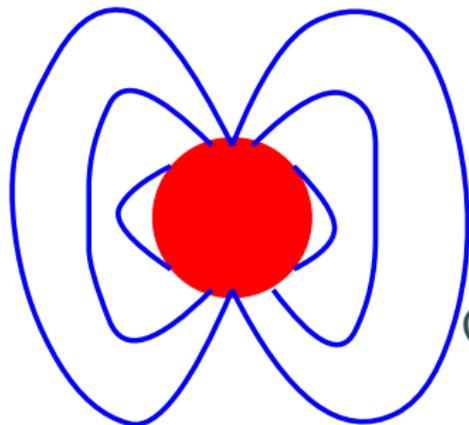
(スケールは厳密ではない)



光球の少し上で，磁場とガスが逆転

# 磁場と密度の勾配

Star



$$B \sim (r/r_0)^{-3} \text{ (dipole)}$$

$$\rho = \rho_0 \exp[-(r-r_0)/H * (r_0/r)] \\ \sim \rho_0 \exp[-(r-r_0)/H]$$

(in general,  $H = C_s^2 / (GM/r_0^2) \ll r_0$ )

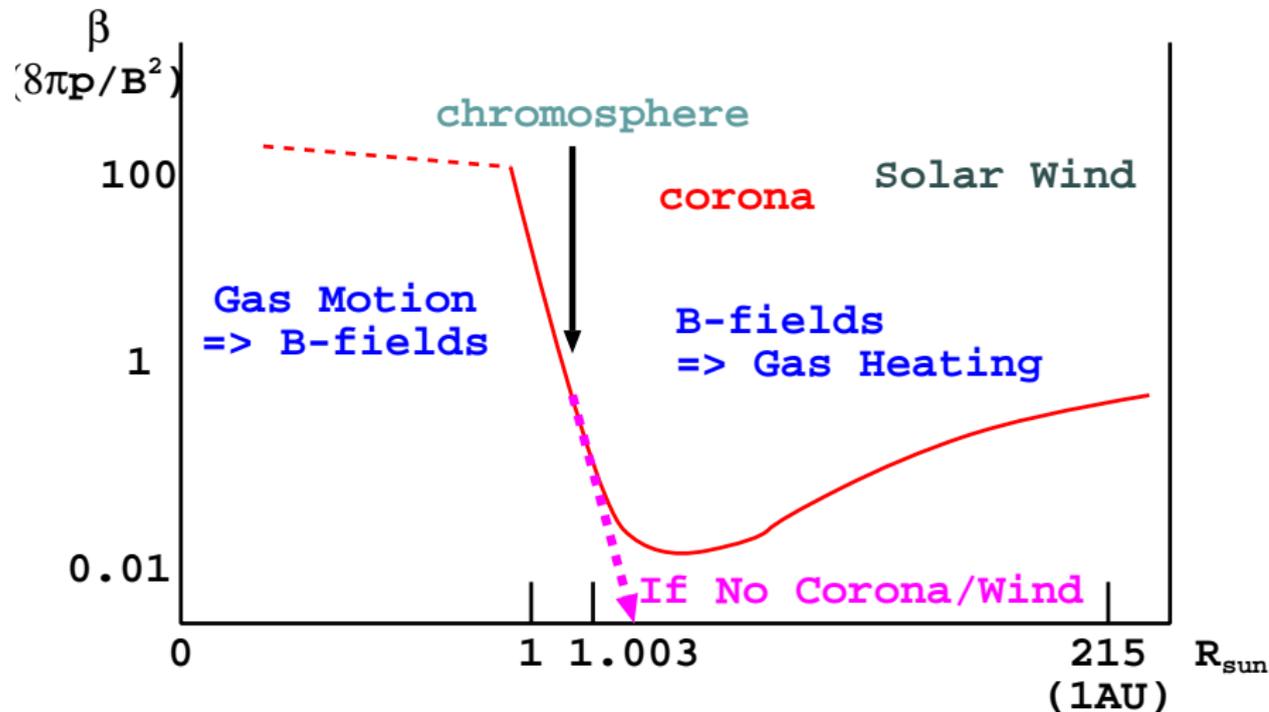
(assuming hydrostatic eq.:  
 $dp/dr + \rho GM/r^2 = 0$ )

- 密度は exponential で落ちる .
- 磁場は巾で減少 .

⇒ 外側では磁場が卓越せざるを得ない .

# Plasma $\beta$ 値

(スケールは厳密ではない)



# エネルギー再分配

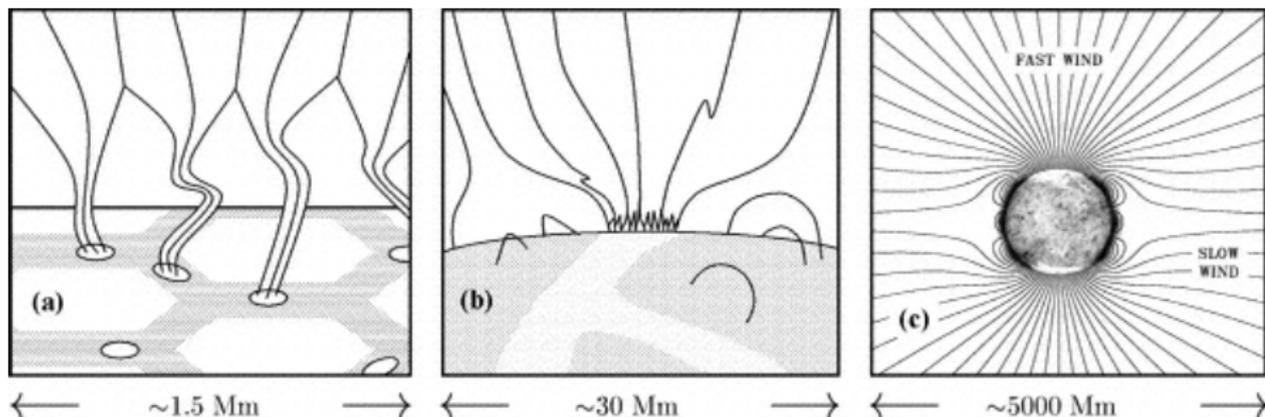
$\beta \rightarrow 1$  に近付くように自己調整される .

- 天体内部: ガス圧卓越  
運動エネルギーの一部  $\Rightarrow$  磁場 (ダイナモ)
  - 荷電粒子の運動 (電流)  $\Rightarrow$  磁場
- 天体外層: 磁気圧卓越  
磁場のエネルギーの一部  $\Rightarrow$  ガス (コロナ加熱, 天体風加速)  
風を吹かせて密度分布を調整し, 等分配に近付ける .

エネルギーの受け渡し: 対流, 乱流, 波動

# 概念図

Cranmer & van Ballegooijen 2005



磁力線が刺さった恒星表面がフラフラ  
→ Alfvén 波 (磁力線を伝わる横波) など

# 非線形性

密度の減少  $\Rightarrow$  擾乱の増幅

- 波動や波束:

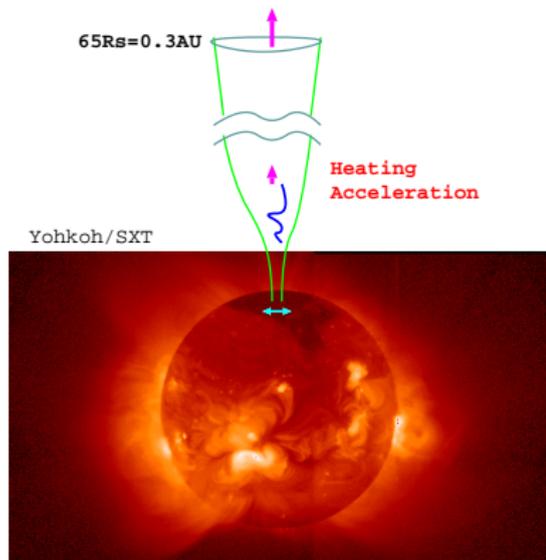
$$\text{Energy Flux} \sim \rho \delta v^2 v_{\text{ph}}$$

を保存するよう，上空 ( $\rho \downarrow$ ) へ伝搬

- 上空では  $\delta v \uparrow$

$v_{\text{ph}}$  の変化が緩やかだとすると，いずれは  $\delta v \gtrsim v_{\text{ph}}$   
(非線形) になる．

# シミュレーション



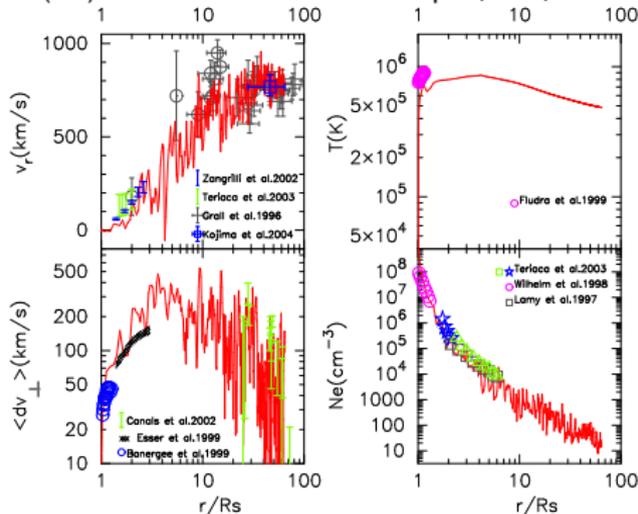
まず太陽で“規格化”して他の恒星へ応用

表面 (光球) からの擾乱注入に上空はどう応答?

- Super-radial に開く磁束管内で，輻射冷却，熱伝導入りの磁気流体方程式を解く．
- “1.5D” 近似 ( $\frac{\partial}{\partial r} \neq 0$ ;  $\frac{\partial}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \phi} = 0$ ): (“2.5D” $\Rightarrow$  松本さん)

# 結果(動画)

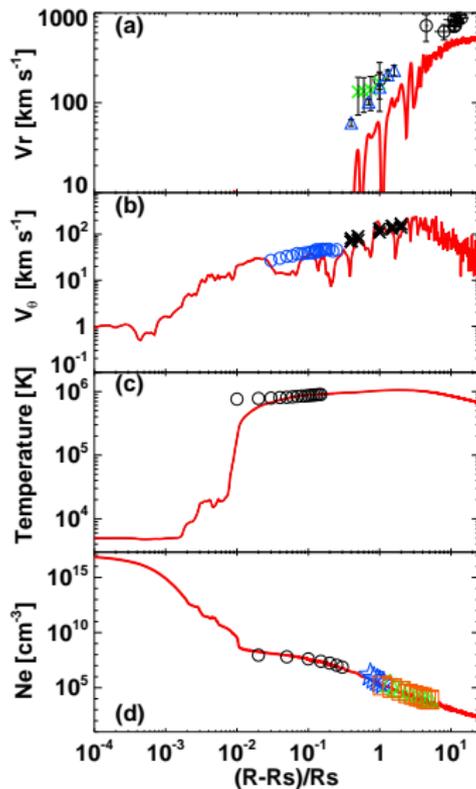
(1D) Suzuki & Inutsuka 2005 ApJL, 632, L49



▶ Solar Wind Simulation (1D)

- 数千度の彩層の上に 100 万度のコロナ; 両者はシャープな境界 (遷移層) で分離される .
- 数百 km の太陽風が吹き出す .  
(参考) 太陽から脱出速度 ~ 600km/s

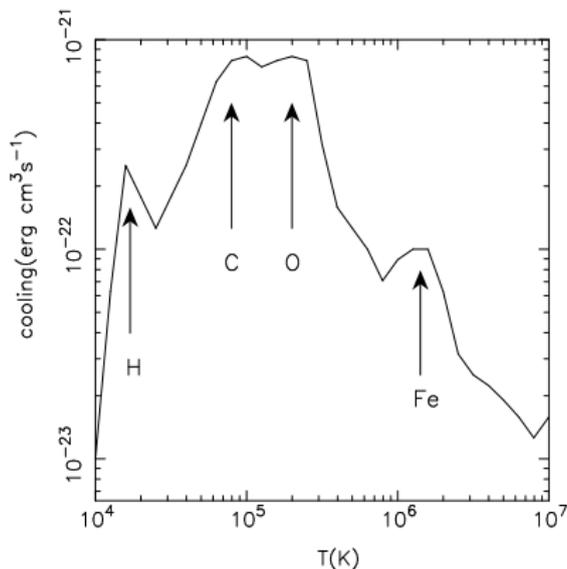
(2D) Matsumoto & Suzuki 2011 ApJ, submitted



# 100万度の理由

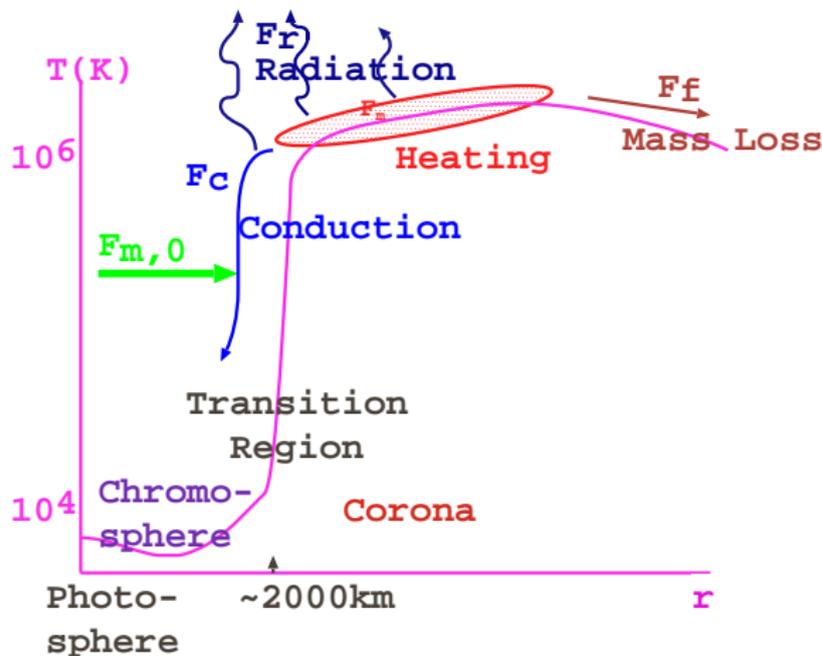
## 輻射冷却関数

Landini & Monsignori-Fossi 1999



- 10<sup>5</sup>K 付近に熱不安定領域  
⇒ 数万度を超えると 100 万度まで一気に上昇 .

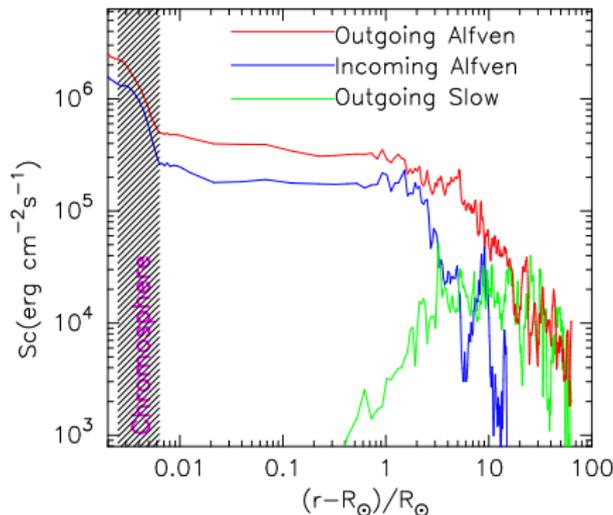
# 熱伝導による安定化



熱伝導フラックス:  $F = \kappa_0 T^{5/2} \frac{dT}{dr}$  ( $\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )  
温度に急激に依存

# 波動の減衰

(1.02 恒星半径で規格化した wave action)



- 外側境界では0.1%しか残っていない。
- 大部分 ( $\approx 85\%$ ) は反射して表面に戻る。
- 残りの部分は天体風加熱，加速に転用される。

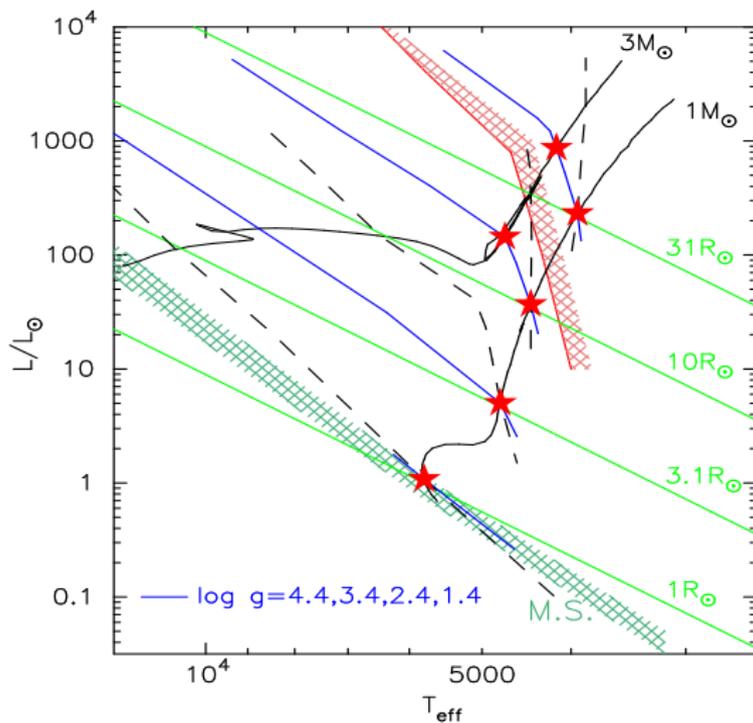
# 波動の減衰機構

詳細は松本さんの講演

- 位相速度の変化に伴う波の反射 ▶ reflection
- 反射波と，もとからある波の相互作用 ▶ collision1
  - ▶ collision2
    - 本質的に3次元性が重要だが
- Alfvén波に伴う磁気圧擾乱 ( $\delta B^2$ ) が縦波 (圧縮性) も励起 ▶ compressive
  - 圧縮性波動が突っ立って衝撃波散逸
- 縦波は横波に対して'鏡'になり，波の反射にも寄与 ▶ mirror

$$\text{Alfvén speed, } v_A = B / \sqrt{4\pi\rho}$$

# 赤色巨星への進化



- 緑の帯: 主系列
- 赤: Dividing Line; 左側はX線で明, 右側は暗.

Linsky & Haisch 1979

# モデル設定

中心天体を太陽から赤色巨星に変更

- 磁場強度 (@表面) と形状は同じと仮定 .
- 表面の擾乱: 恒星進化と共に変化
  - 擾乱の速度振幅 ( $\delta v$ )  $\Leftrightarrow$  表面对流の Flux:  
 $g$ (表面重力) に負相関, かつ,  $T$  に正相関
  - 擾乱周期 (spectrum)  $\Leftrightarrow H_p / \delta v$  ( $H_p = \frac{p}{dp/dr}$ )  
(Lighthill 1952; Stein 1966; ...)

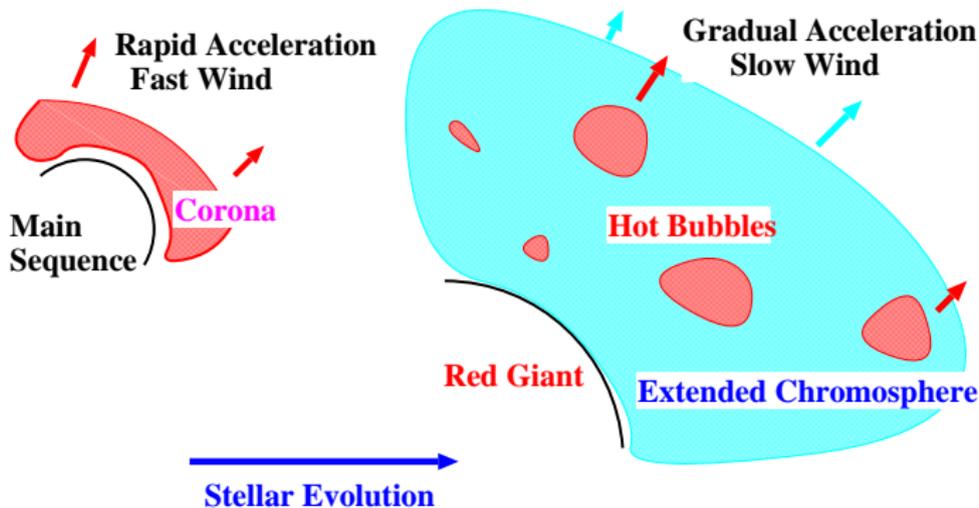
# シミュレーション

▶ Main Sequence

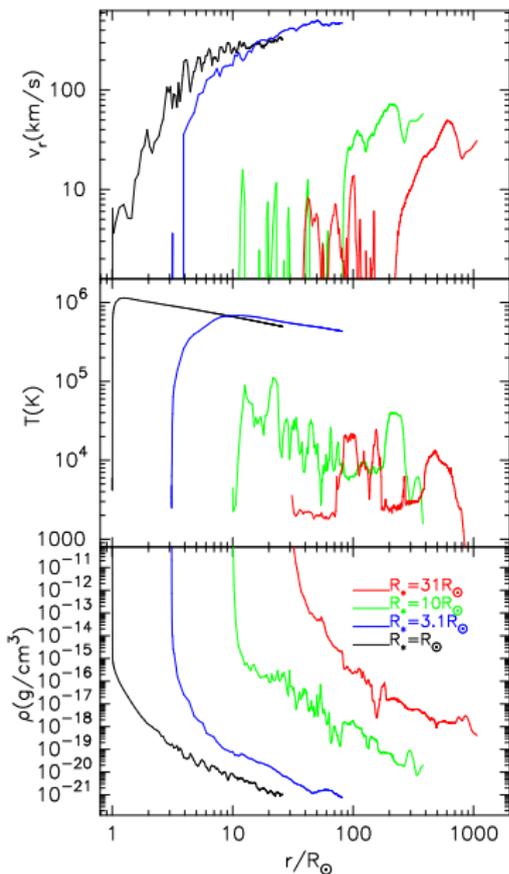
▶ Red Giant

恒星の進化 (半径の増大 =  $\log g$  の減少) と共に

- 定常的な高温コロナの消失  $\Rightarrow$  間欠的な中高温バブルが彩層に浮かぶ.
- 密度は増大 ( $\Leftarrow$  表面重力の減少)
- 速度は減少 ( $\Leftarrow$  脱出速度の減少)



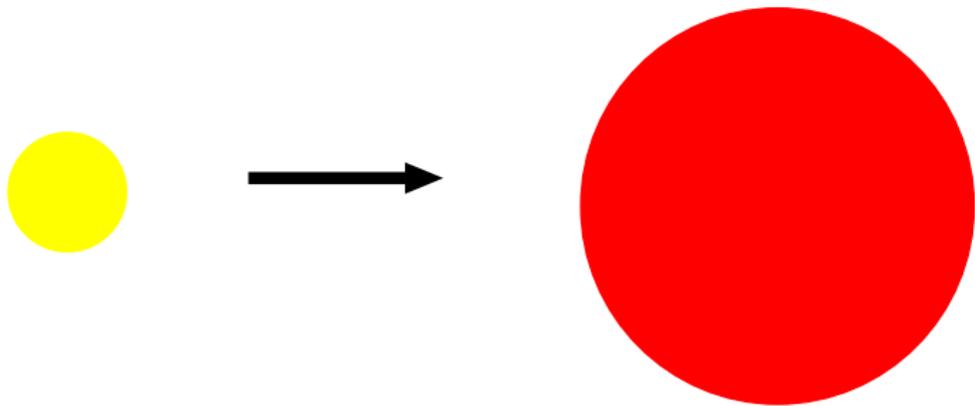
# 恒星風の進化 ( $1M_{\odot}$ )



恒星進化 (半径の増大) と共に

- 速度減少
  - おおざっぱに脱出速度でスケール
  - しかし, 赤色巨星ではもっと遅い
- 温度: 急激に減少
  - 脱出速度
  - 熱不安定性
- 密度: 増大
  - 重力で外層を束縛できず.

## 脱出速度との関係



主系列星

赤色巨星

小

大

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

大

小

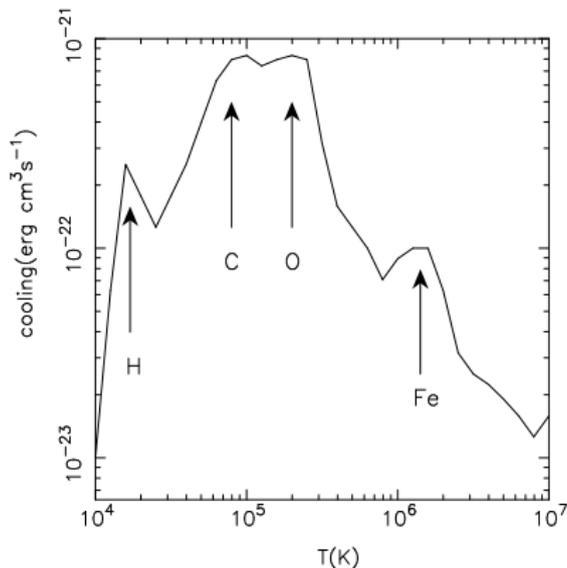
$R_{\star} \gtrsim 10R_{\odot}$  で  $v_{\text{esc}} \lesssim c_{\text{S}} (T = 10^6\text{K})$

外層は熱くなる前に飛んでいく。

# 熱不安定性

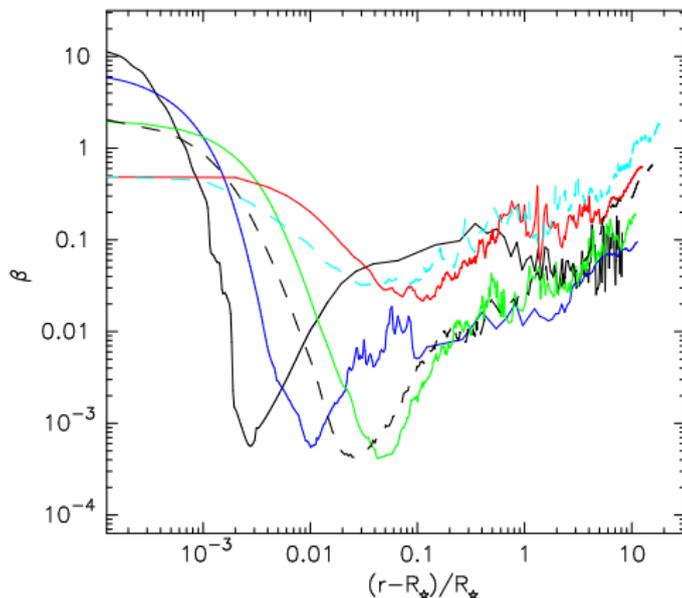
## 輻射冷却関数

Landini & Monsignori-Fossi 1999



- $10^5$  K 付近に熱不安定領域  
⇒ 数万度を超えると 100 万度まで一気に上昇 .

# エネルギー再分配



- 天体表面で一気に磁気圧卓越  
← 密度の急減少
- その後緩やかに上昇し、等分配へ近づく  
← 加熱、天体風...

# 他の恒星からの擾乱駆動型恒星風

- 赤色巨星のさらなる進化
  - より電離度が下がる (やがて分子雲や分子光球 Tsuji 2000)  $\Rightarrow$  Ambipolar Diffusion  $\Rightarrow$  恒星風駆動が弱まる (?)
  - より低温  $\Rightarrow$  塵ができる  $\Rightarrow$  塵への輻射圧で恒星風駆動 (Bowen 1988)

- 低質量星

- 表面重力は少し強く
- 磁場は強く?

この時，恒星風の状況はどう変化するか？

- 金属量依存 (Takeda & Takada-Hidai 2011)
  - 輻射冷却は小さく
  - 表面对流層は浅く
- T-Tauri 星などの若い星
  - 円盤降着もエネルギー源 (e.g. Cranmer 2008)

## まとめ

表面对流層のある天体: 磁場とガスがエネルギー等分配に近づくように調整

- 波動, 乱流などにより ガス  $\leftrightarrow$  磁場でエネルギー輸送

(具体的にどの機構が重要かはまだ不明)

恒星進化と共に

- 定常な高温コロナが消失し, 低温ガスの中に間欠的な高温バブル
- 質量放出率は順調に上昇

他にも擾乱駆動型恒星風が吹いている天体はいろいろあるが, 研究する題材が多く残っている(という個人的印象).