

恒星の自転の進化

勝田豊 (北海道大学)

岡崎敦男 (北海学園大学)

須田拓馬 (東京大学)

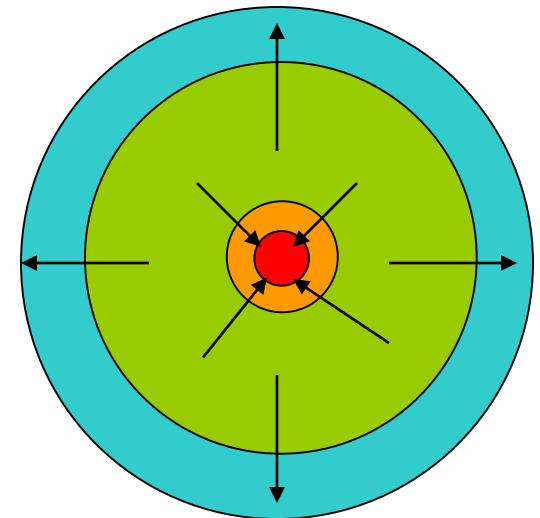
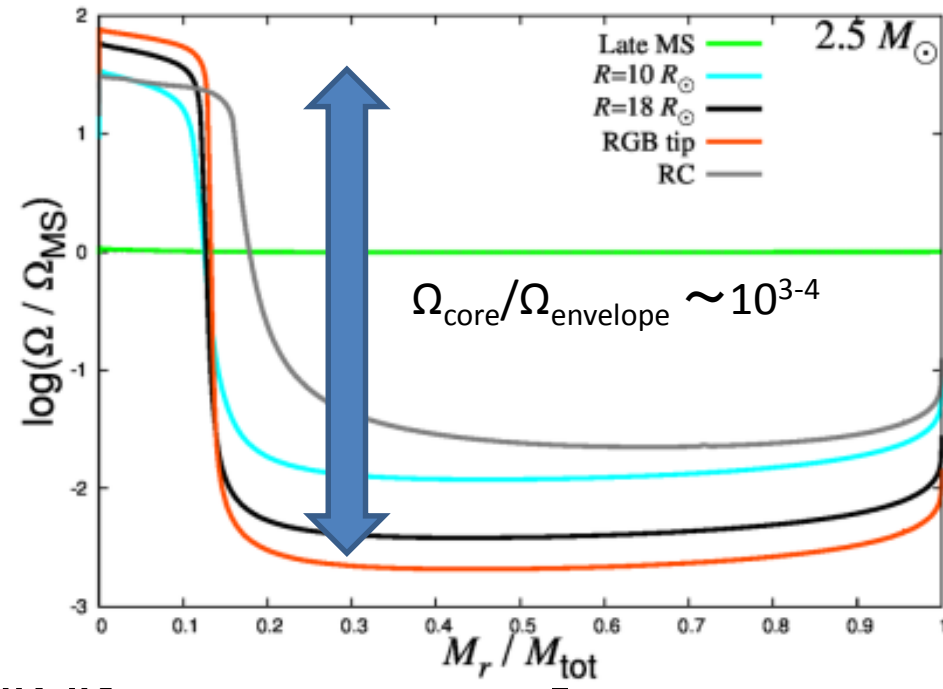
藤本正行 (北海学園大学・北海道大学)

1. Introduction

- 恒星の回転
 - 恒星内部の物質混合や超新星爆発などと関連して注目されている
- 解決すべき問題
 - 恒星の進化の回転への影響
 - 恒星の回転の進化への影響
 - 角運動量輸送の機構と効率

恒星の自転:

- 進化に伴い恒星の質布が変化する
 - 例えば
 - コアの収縮・外層の膨張
 - 角運動量が質量要素ごとに保存されるのであれば
 - 収縮した部分は加速し、
 - 膨張した部分は減速する
 - ⇨ 差動回転が生成される



恒星の自転プロフィール

- 近年の星震学に基づく研究により恒星内部の差動回転の様子が明らかになりつつある。
 - MS段階ではほぼ一様回転 (Kurtz+14, Saio+15等)
大質量星($>8M_{\odot}$)では一様回転からのズレが見られる場合も (Aerts+03 Briquet+07/Dupret+04等)
 - 進化した中低質量星では差動回転が見られる
 - $\Omega_{\text{core}}/\Omega_{\text{envelope}} \sim 10$
(Beck+2012, Deheuvels+2012等)
 - 何らかの角運動量輸送機構の存在

- これまでに様々な角運動量輸送機構とその効率を仮定し恒星の回転の進化の再現が試みられてきた(Ekström+2008, Granada+2013 など)
 - 乱流輸送/対流/子午面還流など
 - 観測された自転プロファイルを再現するには角運動量輸送が不足
- 適当な角運動量輸送を付加して進化した低質量星での差動回転の観測を再現(Eggenberger+2012)
- 我々はこれらの角運動量輸送を仮定することなく、恒星の進化に伴う構造の変化によって生成される差動回転と、それを均す角運動量輸送の効率について議論する

2. 角運動量輸送

- 一様回転を維持するために必要な角運動量輸送効率(それをもたらす粘性係数)を見積もる。
- 角運動量輸送の式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho a) + \nabla \cdot (\rho a v) = -\nabla \cdot f$$

- a : 単位質量あたりの角運動量
- f : 角運動量流束

- 動径成分 f_r は、
 - 構造は球対称を仮定: $r\Omega^2/(GM_r/r^2) \ll 1$ では良い近似

$$f_r = \frac{1}{4\pi r^2} \cdot \frac{2}{3} \int_0^{M_r} \frac{d(r^2\Omega)}{dt} dM_r$$

と得られる。

一様回転に必要な粘性係数

- 角運動量輸送は粘性係数を ν とすると、

$$f_r = \nu \rho r^2 \frac{\partial \Omega}{\partial r}$$

- 一様回転を維持するために必要な粘性係数 ν_{UR} は、

$$\begin{aligned} \nu_{UR} &= \frac{1}{6\pi r^4 \rho} \frac{\partial \Omega}{\partial r} \int_0^{M_r} \frac{d(r^2 \Omega)}{dt} dM_r \\ &= \frac{H_p}{6\pi r^4 \rho \Omega} \int_0^{M_r} \frac{d(r^2 \Omega)}{dt} dM_r \\ &= \frac{H_p}{6\pi r^4 \rho J/I} \int_0^{M_r} \frac{d(r^2 J/I)}{dt} dM_r \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial r} = \frac{\Omega}{H_p} \text{ と仮定}$$

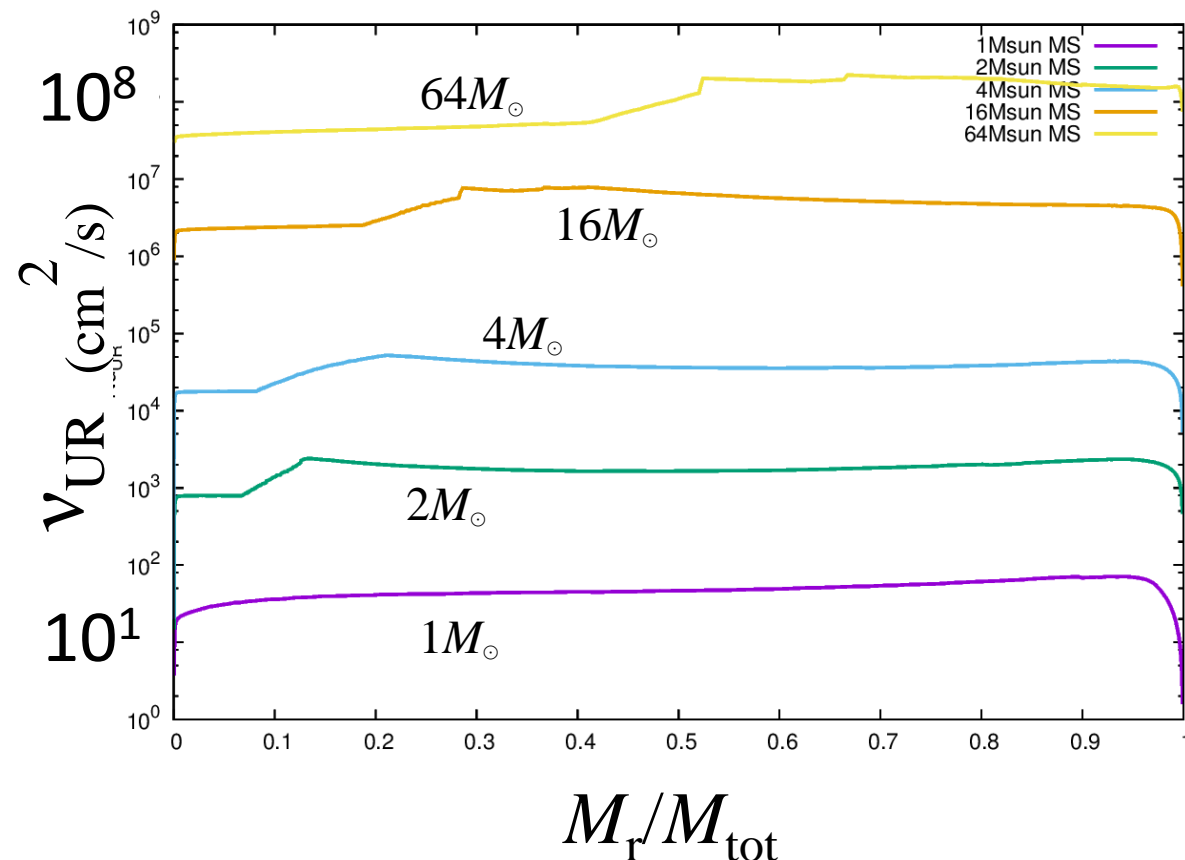
H_p : Pressure scale height

$$\Omega = \frac{J}{I}$$

総角運動量
= 総慣性モーメント
と置き換えた

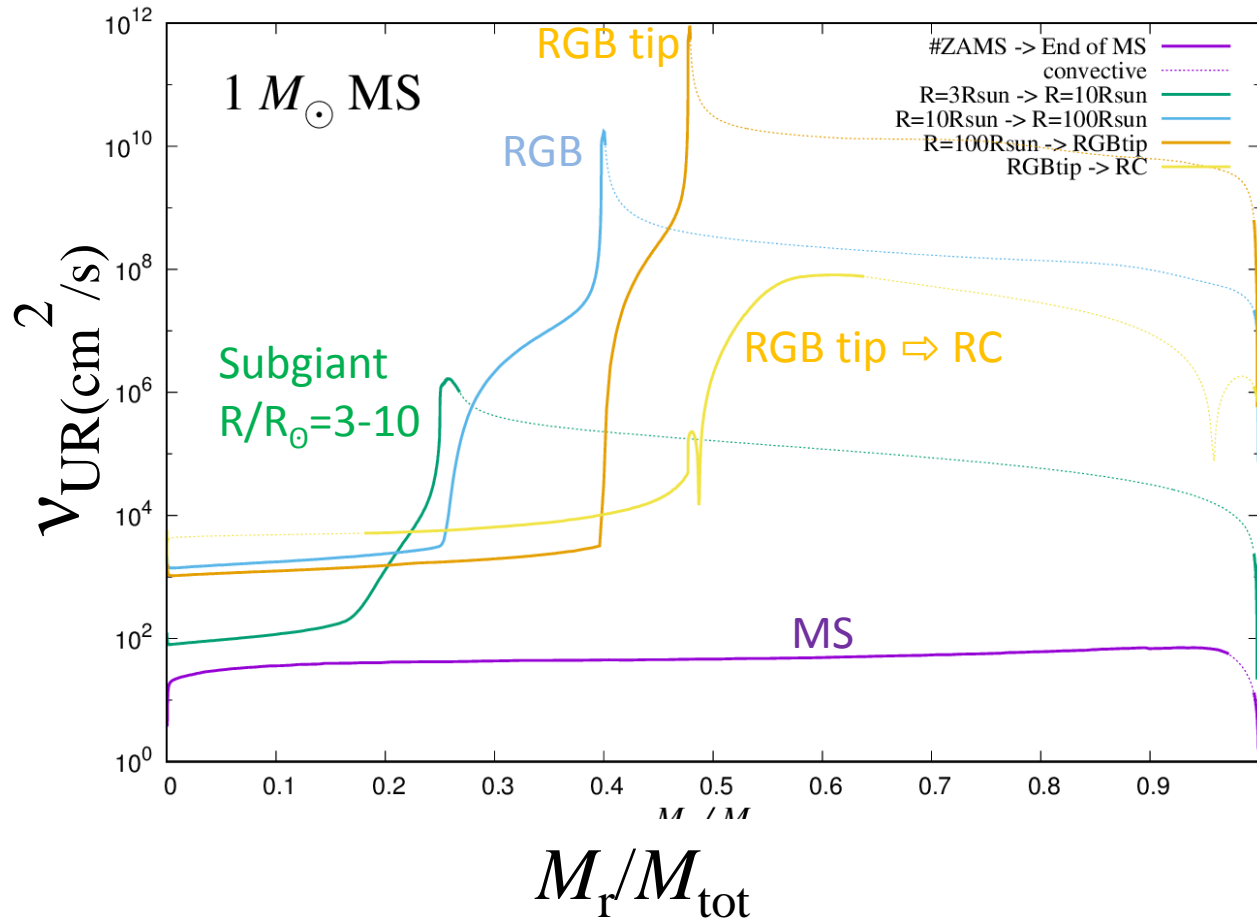
一様回転を維持するために必要な粘性係数は
総角運動量に依らない

v_{UR} の見積もり(MS)



- 低中質量星では小さい v_{UR}
 - 一様回転が維持されやすい
- 大質量星では大きい v_{UR}
 - 一様回転が破られやすい

Post-MS の v_{UR} ($1M_{\odot}$)

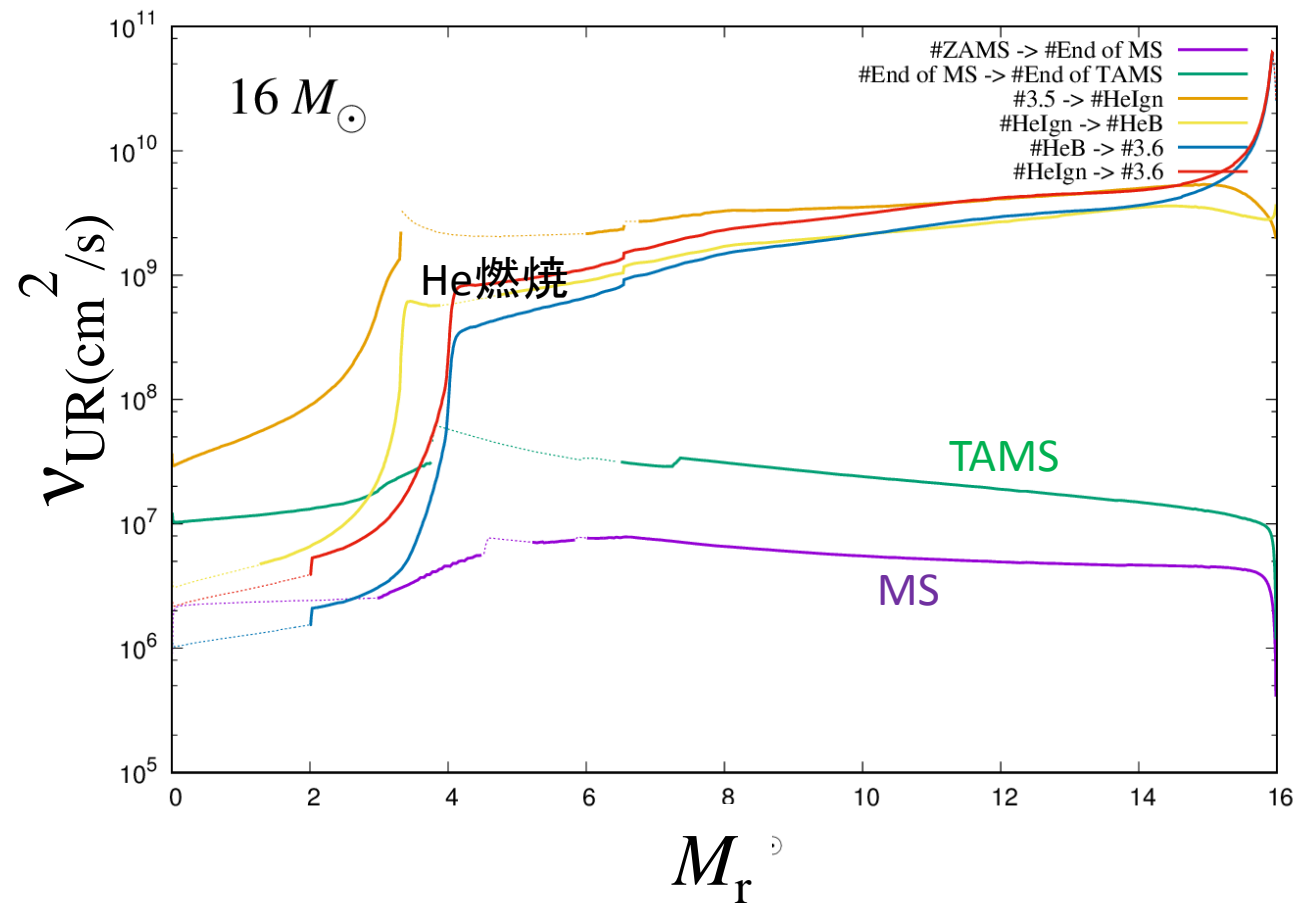


殻燃焼が始まると燃焼殻の上の輻射層で大きな v_{UR} が必要となる

RGB への進化とともに v_{UR} が大きく成長

RGB以降のHe燃焼段階では再び減少する

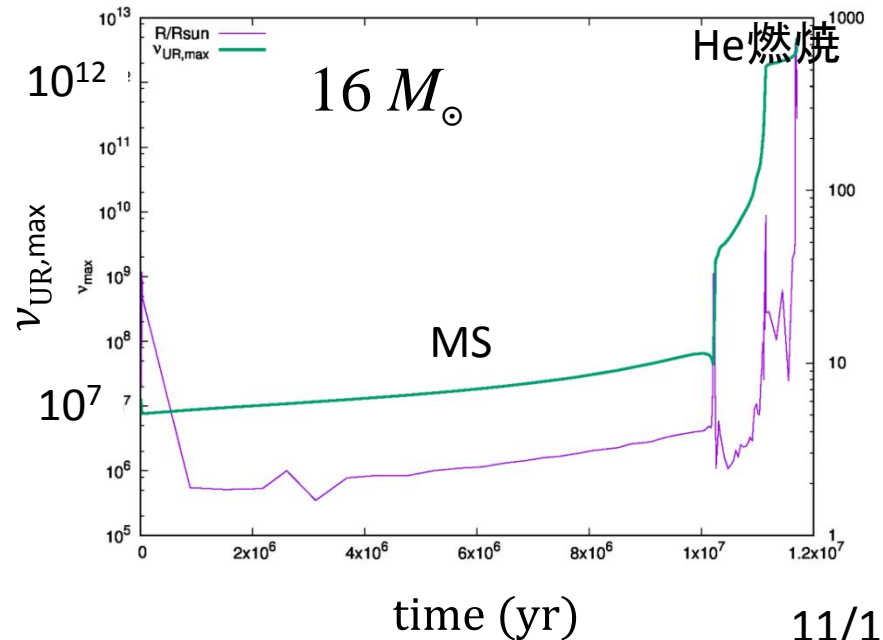
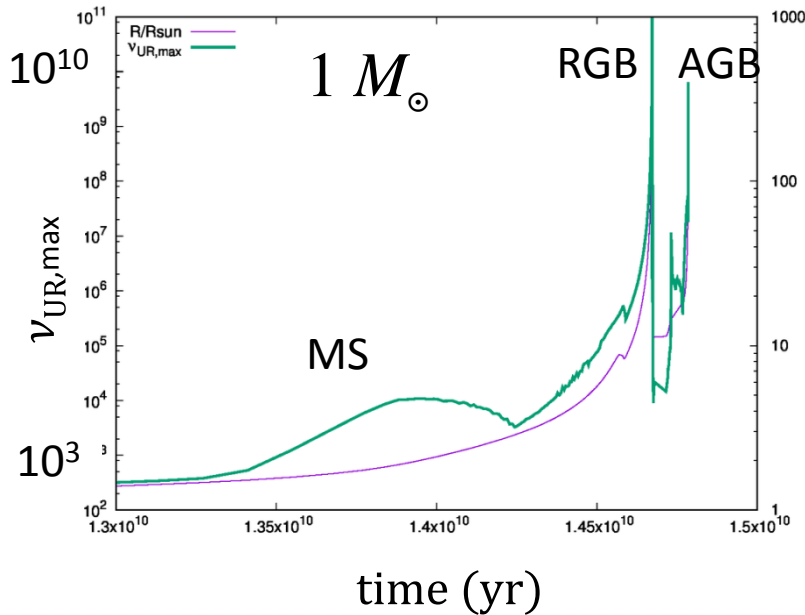
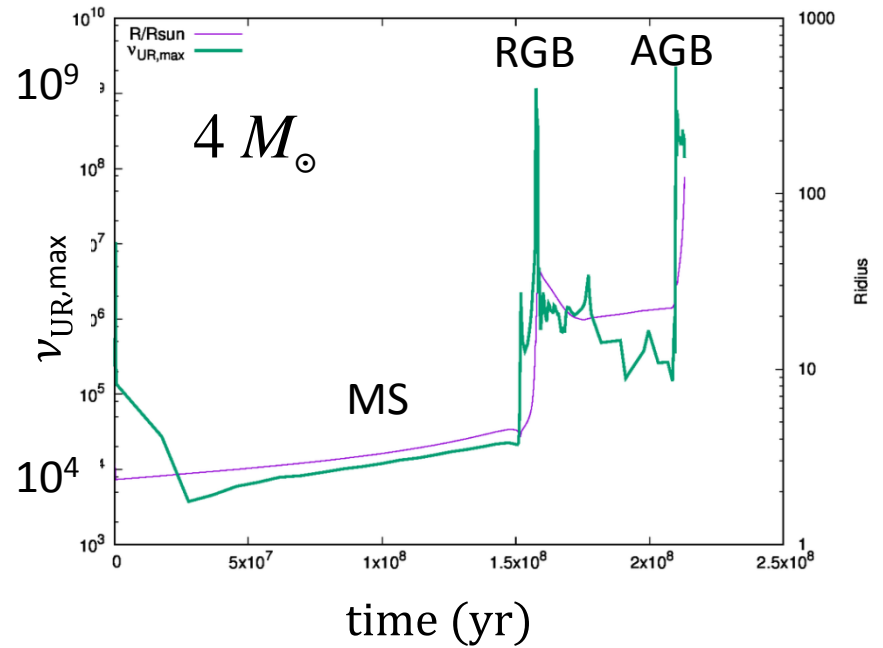
Post-MS の v_{UR} ($16M_{\odot}$)



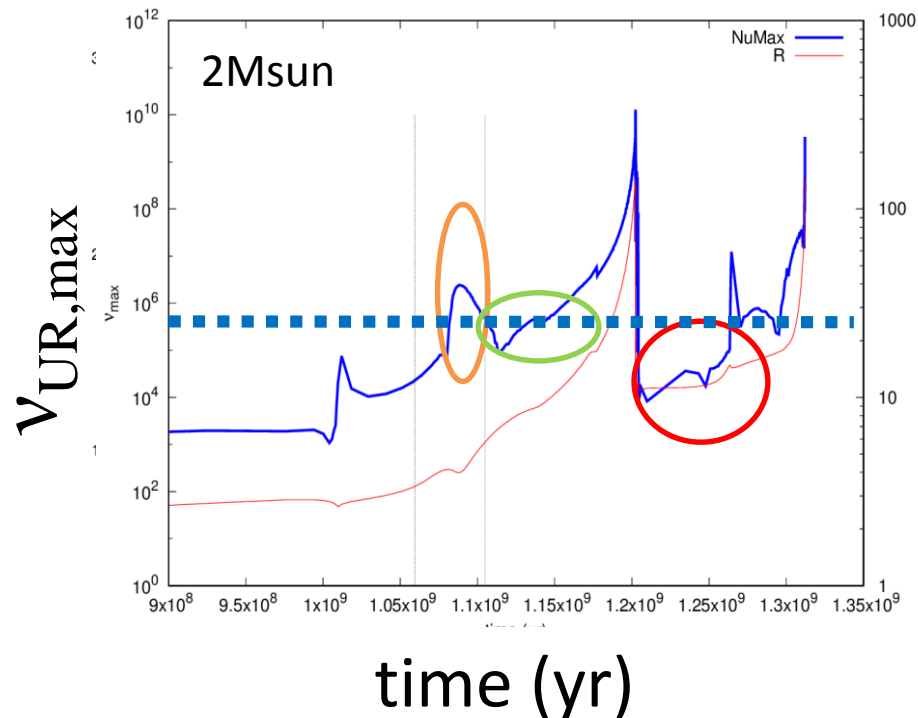
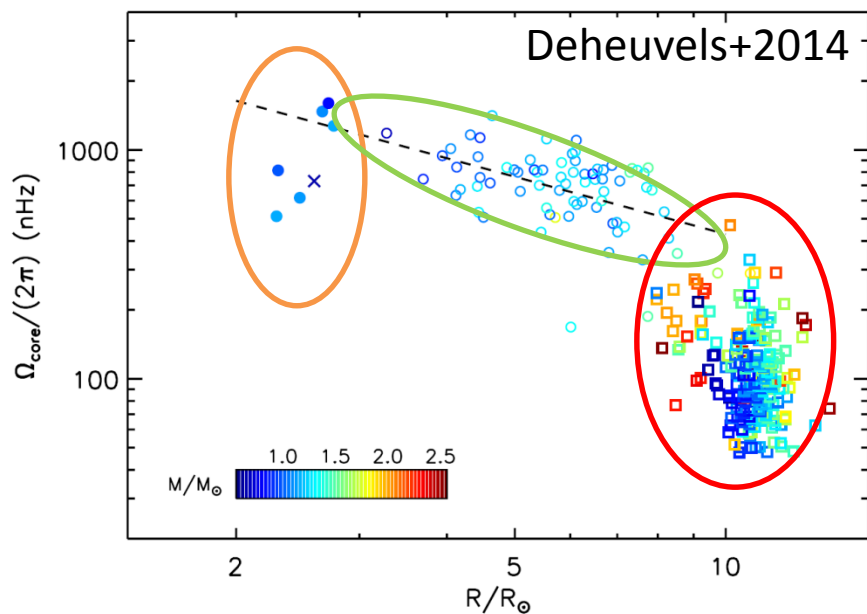
- MS段階から大きな v_{UR}
- 進化に伴い更に増大

3. 観測との比較

- 観測との比較を行うために、各時点での輻射層での ν_{UR} の最大値 $\nu_{UR, \max}$ を求めた



低質量星のコアの回転進化



- コア回転速度が増加／減少している段階で $v_{UR,max}$ が大きな／小さな値を持つ
- $\nu \sim 10^5$ 程度の粘性係数に対応した角運動量輸送が働いていると見積もられる

無次元化された v_{UR}

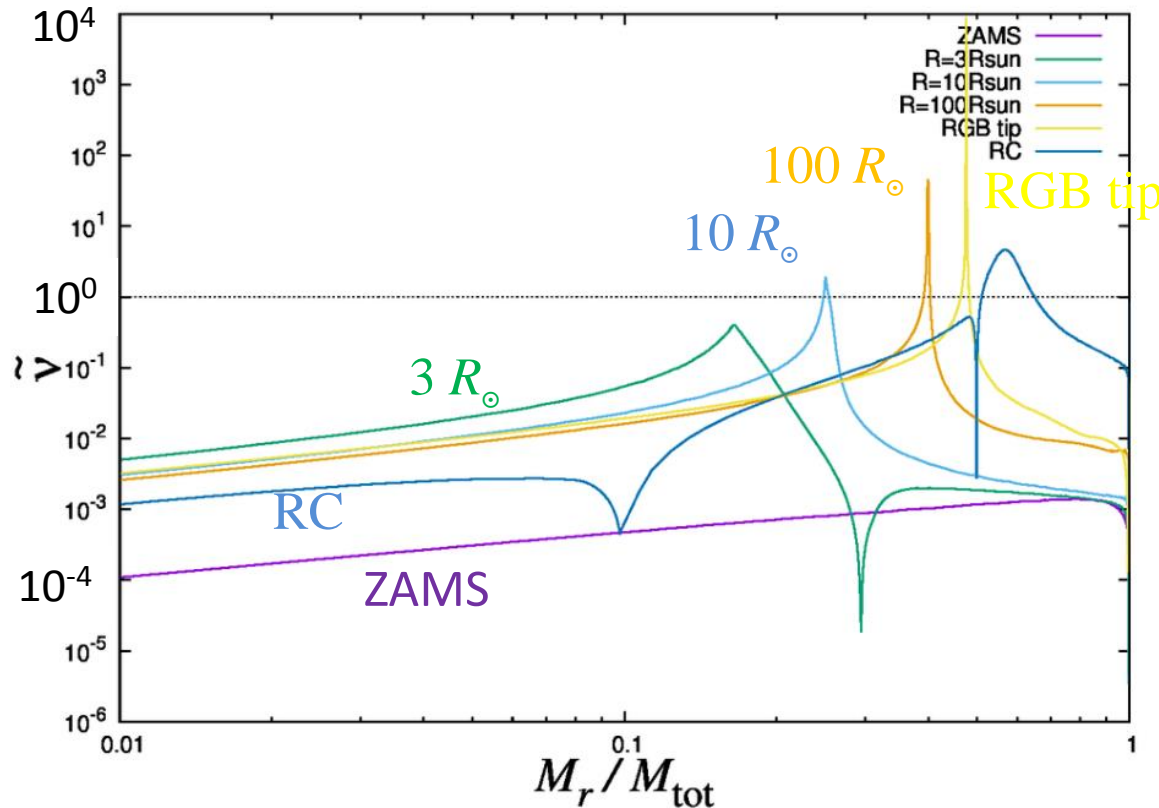
- 次に無次元化された粘性係数 $\tilde{\nu}$ を求め

$$- \tilde{\nu} = v_{UR} / (H_p^2 / \tau_{evo})$$

- τ_{evo} : 進化のタイムスケール
- H_p : Pressure scale height

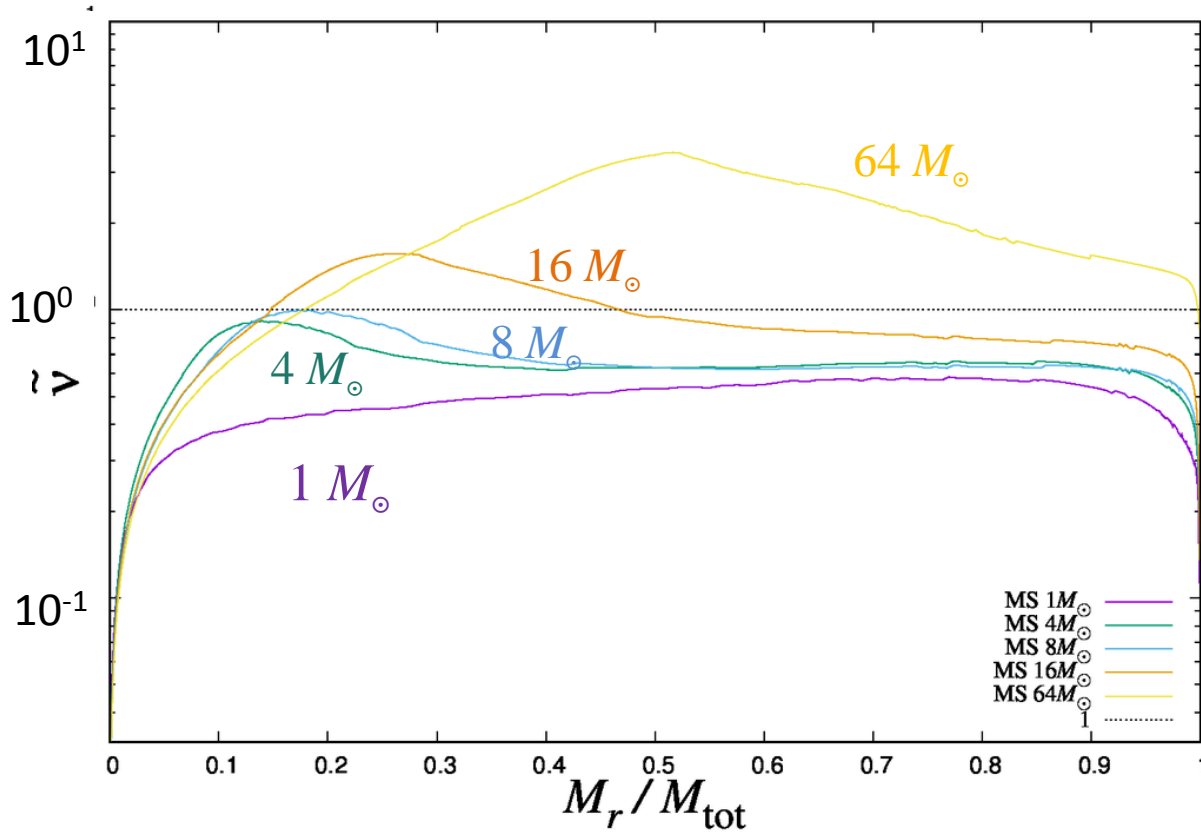
を各進化段階での振る舞いを調べた

低質量星 ($1 M_{\odot}$)



- R =数 R_{\odot} 付近で $\tilde{\omega}$ が1を超える
- 低質量星の観測では、
 - MS段階では剛体回転
 - 数 R_{\odot} 付近で差動回転が生じ始める

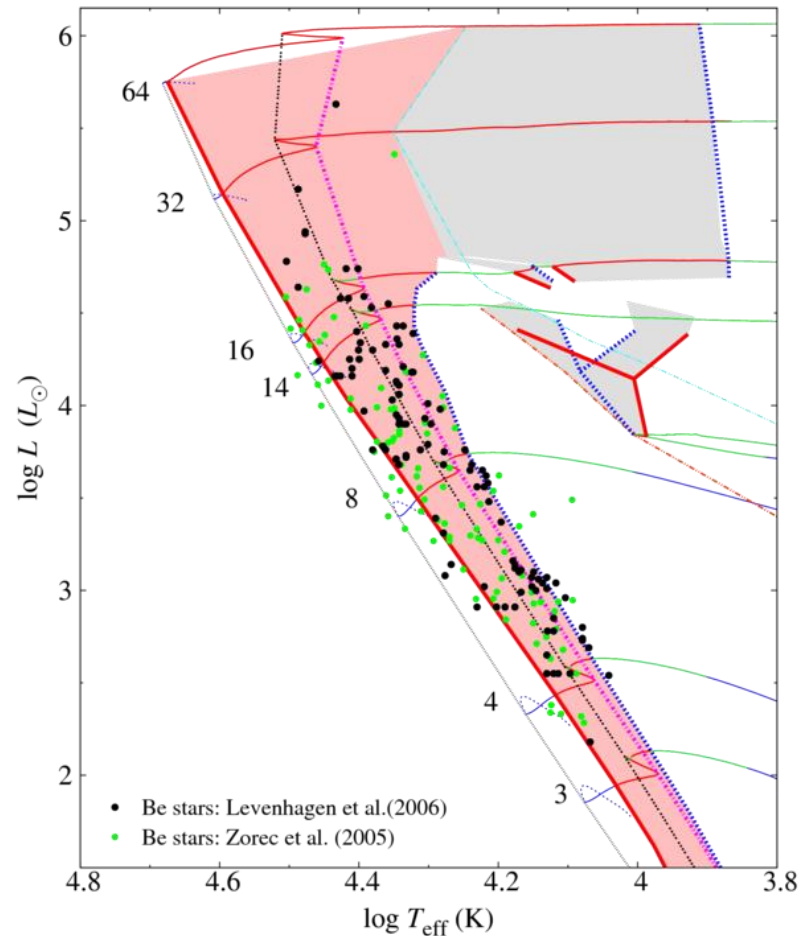
MS段階 (1-64 M_{\odot})



- 中低質量星
(1-8 M_{\odot} では星全体に渡って $\tilde{v} < 1$)
- 大質量星では \tilde{v} が一部で1を超える
- 大質量MS星の観測では、
 - 8.2 M_{\odot} のMS星で
一様回転
(HD 157056;
Briquet 2007)
 - 9-10 M_{\odot} のMS星
で差動回転あり
(HD129929, HD29248;
Aerts+2003,
Dupret+2004,
Pamyatnykh+2004)

Be 星の分布との比較

- Be星：高速回転による遠心力で赤道からの質量放出で円盤を形成している星
- 一様回転モデルによる臨界回転可能領域と観測されたBe星の分布が一致
 - 低質量の星ほどMSの後半に集中
 - 大質量の星ほどMSの初期から出現
 - MSではほぼ一様回転と考えて良い



まとめ

- 角運動量輸送の効率を見積もるため、一様回転を維持するためにはどの程度の粘性が必要であるかを見積もった
 - 必要な粘性係数は星の総角運動量 J に依らない
- 観測される Be 星の分布や、進化した星のコアの回転速度の進化は恒星の構造変化によって説明できる
- 無次元化された粘性係数 $\tilde{\nu}$ が 1 のオーダーを超えた辺りで恒星は一様回転を維持できず差動回転を生成するように見える