恒星の回転の進化と Be 星の起源

藤本正行(北海学園大、北大), 勝田豊(北大), 岡崎敦男(北海学園大), 須田拓馬(東大ビッグバンセンター)

I. Introduction

全ての恒星は多少とも回転している。 ⇒構造(光度、形状、…)、 進化に影響

I.1 Extra-物質混合機構
表面組成の異常
Ex. 主系列星での Liの欠乏 新星放出物中のCNO元素の増加
回帰周期の短縮と変動
Ex. X-線バースト

⇒ 熱対流以外の外層での核生成 物の組み上げ、降着物質の混合 機構の存在 ⇔ 回転の効果



I.2 高速回転星

- Be 星:赤道からの物質放出による星周円盤の形成
- Be星連星: X線、y 線など高エネルギー現象
 超新星爆発機構



I.3. 内部の回転則(日震学、星震学)

 日震学 500 内部の輻射層は略一様回転 450 $\Delta \Omega / \Omega \lesssim 10 \%$ for $r \gtrsim 0.2 R_{\bullet}^{\mathbb{R}}$ 400 350 Kepler衛星の星震学 太陽内部の回転則 300 0.20.00.40.60.8 巨星、準巨星の内部は微分回転

中心核の回転角速度は表面の10倍以上 (Beck et al. 2012)

 $\Omega_{\text{core}} = 710 \pm 51 \text{ nHz}, \ \Omega_{\text{surface}} < 150 \pm 19 \text{ nHz}$

for 金属欠乏巨星 Otto

(Deheuvels et al. 2012)

1.0

r/R

KIC	ν _{max} (μHz)	R (R $_{\odot}$)	$\Delta P_{\rm obs}$ (s)	Т _{eff} (К)	vsin <i>i</i> (kms ⁻¹)	Asteros. rot. vel. (km s ⁻¹)	/ = 1 min rot. split. (μHz)	Averaged split. ratio for dipole modes
8366239	182 ± 1	5.30 ± 0.08	56 ± 11	4980 ± 120	<1	3.9	0.135 ± 0.008	1.5
5356201 12008916	$\begin{array}{c} 209.7 \pm 0.7 \\ 159.9 \pm 0.6 \end{array}$	$\begin{array}{c} 4.47 \pm 0.03 \\ 5.18 \pm 0.05 \end{array}$	$\begin{array}{c} 50\pm10\\ 52\pm7\end{array}$	$\begin{array}{c} 4840 \pm 90 \\ 4830 \pm 100 \end{array}$	2.4 -	3.8 5.7	$\begin{array}{c} 0.154 \pm 0.003 \\ 0.200 \pm 0.001 \end{array}$	1.7 1.8

I.4 回転星の進化

鍵:角運動量輸送と物質混合の機構とその効率 現行モデル:対流+セミ対流 + 既知の流体力学不安定性(寄せ集め)+ 子午線還流 粘性係数: $\nu = D_{\text{conv}} + D_{\text{sem}} + D_{\text{SSI}} + D_{\text{DSI}} + D_{\text{SHI}} + D_{\text{GSF}} + D_{\text{FS}}$ 物質混合係数: $D = D_{\text{conv}} + D_{\text{sem}} + f_c \times (D_{\text{SSI}} + D_{\text{DSI}} + D_{\text{SHI}} + D_{\text{GSE}} + D_{\text{FS}})$ ここで、 D_{conv} , D_{sem} :対流とセミ対流 **D**_{DSI}, **D**_{SSI}: 動力学的、永年的シア不安定性 **D**_{SHI}: Solberg-Hoiland 不安定性 流体力学的 不安定性 **D**_{GSF}: Golereich-Schubert-Fricke 不安定性 *D*_{Fs}: Eddington-Sweet 子午線還流 $f_c \in [0,1]$: 乱流の物質混合と角運動量輸送係数の比

日震学、星震学の観測結果との比較 ⇒ 他に内部で効く効率の良い角運動量機構が必要 (Eggenberger et al. 2012)

流体力学的な不安定性

Modes	動力学的(断熱)不安定性	熱的不安定性		
	2次元平行平板流			
シア不安定性	DSI	SSI		
	Richardson判定条件 Miles(1961),Howard(1961)	Townsend (1958), Zahn (1972)		
	回転星			
軸対称モード	Rayleigh不安定性 SHI	GSF (1967)		
<u>非軸対称モー</u> ド	Richardson 判定条件 + Barotropic and baroclinic 不 安定性	?		
現行のモデルでは、非軸対称モードの動力学的(断熱) 不安定性が全く考慮されていない。				

非軸対称モードの不安定性

1000%,	1970's: Geophysics	Baroclinic 不安定性 Baroclinity ~回転軸方向の微分回転 $\Omega_{\varpi}(\partial \Omega / \partial z) = (P/\rho) \nabla \ln P \times \nabla \ln \rho _{\varphi} \neq 0$ (ϖ, φ, z) 円筒座標
Astrophysics Astrophysics Kelvin-Helmholtz 不安定性 → 磁場:Balbus-Hawley instability (1991) X-線バースト 平行平板流のMiles-Howard定理 → 回転流体への拡張 Fujimoto (1987), Hanawa (1987; without the Boussinesq approximation), Nakayama (1991; Ke metric), Nakayama & Hanawa (1991; axisymmetric)	1980's: Astrophysics	降着円盤: Kelvin-Helmholtz 不安定性 → 磁場:Balbus-Hawley instability (1991) X-線バースト 平行平板流のMiles-Howard定理 → 回転流体への拡張 Fujimoto (1987), Hanawa (1987; without the Boussinesq approximation), Nakayama (1991; Ker metric), Nakayama & Hanawa (1991; axisymmetric

非軸対称モードの安定性の条件

(1) Richardson 判定条件

 $Ri = h \cdot C / |D|^2 \ge 1/4$

(2) Barotropic (順圧), Baroclinic (傾圧) 不安定性に 対する判定条件

 $-(\boldsymbol{D}\times\boldsymbol{h})(\boldsymbol{D}\times\boldsymbol{C})\geq(\boldsymbol{h}\times\boldsymbol{C})^2$

2条件を同時に満すのは一様回転 (D = 0)のみ ⇒ 微分回転 (D ≠ 0)は不安定性の必要条件 (Fujimoto1987)

Baroclinic 不安定性について線形解析

 \rightarrow 不安定性の十分条件の証明 ($Ri \gg 1$)

Kitchatinov (2014, ApJ, 784, 81)

Our Approach

非軸対称モードの不安定性

- ⇒回転星内部での乱流の遍在を示唆。
- ⇒ 微分回転を均して一様回転に近づけるであろう。
- しかしながら、発達した乱流の信頼できる理論はない。
 - ⇒ 角運動量輸送、物質混合の機構と効率が決まらない。
 - ⇒ 現行のモデルでは信頼できる結果は得られない。

恒星の回転の状態は、角運動量の分布によるが、それとともに、恒星の 慣性能率(moment of inertia: MoI)の分布にも依存する。

$$I = \iiint r^2 \sin^2 \theta \, dm, \qquad dm = \rho \, r^2 \sin \theta \, dr \, d\theta \, d\varphi$$

むしろ、MoIの変動が、恒星の回転の進化の主動因である。 内部構造の変化による各質量要素膨張/収縮

- ⇒慣性能率の変動
- ⇒回転速度の変化/微分回転の生成・成長
- ⇒角運動量の輸送 ⇔乱流による輸送係数の評価

本研究の目的と方法

- 目的:進化による構造変化とそれに伴う慣性能率の 変動を基に恒星の回転の進化の描像を構築する。
- (1) 進化に伴う慣性能率の変動の解析 Mol の変動の特性と内部構造との関連
- (2) 慣性能率の変動から導かれる回転の進化の描像 初期質量、初期角運動量依存性、輸送過程との相関
- (3) 亜臨界回転から臨界回転へ

Be-星の起源 - 初期質量と角運動量の範囲

(4) 内部での微分回転の生成と成長

Kepler の観測のとの比較

⇒ 乱流による実効輸送係数の評価

II. 慣性モーメントの進化特性

恒星進化

- 主系列星 (MS)段階:半径の膨張 水素燃焼による中心部の分子量 の増加
- ⇒ 慣性能率 も増加

主系列の終結 (**TPMS**)段階: = MS からSB への移行の重力収縮 ⇒ 半径は収縮、慣性能率は増加

殻燃焼 (SB)段階: 膨張・収縮の 節 (node)

core の収縮(膨張)
 ⇒ 外層の膨張(収縮)
 ⇒ 慣性能率の増加(減少)は
 外層の膨張(収縮)に従う



慣性能率(MoI) vs. 表面半径(R)

MoI-R 関係は単純ではない。

MS段階: MoIの増加は R の増加に 比して小さい MoI ∝ R^{3/2} より緩やか

> 大質量星: MS 段階の膨張は大きい MoI はそれ程増えない ⇔ Convective core が大きい

SB段階: MoIの増減はsteepに RGBでは、I ∝ R² に収斂





MS段階:

半径の膨張率は外層を通 して徐々に増加、 Molの増加は表面半径の 膨張に比して小さい。

 $d \log r(M_r, t)/dt$: largest at the surface

SB段階:

殻燃焼の直近で膨張、外 層全体が持ち上げられる。

 $d \log r(M_r, t)/dt$: largest just above the burning shell.



膨張の構造特性

ホモロジー不変量 $U \equiv 4\pi r^3 \rho / M_r = 3\rho / \overline{\rho}$ $V \equiv (GM_r / r) / (P / \rho)$ U-V 面上の構造線 主系列(MS)段階: U/Vの単調関数 殻燃焼(SB)段階: $\mu-プ$ を形成



半径と質量分布 $d \log r = \frac{d \log(U/V)}{2U+V-4}$, $d \log M_r = U \frac{d \log(U/V)}{2U+V-4}$ U-V 面上の structure line に沿っての積分 (Sugimoto & Nomoto 1980)

III. 恒星の回転の進化 慣性モーメントに基づく

角運動量輸送なしの場合

回転角速度:

 $\Omega_r / \Omega_{\rm MS} = (r/r_{\rm MS})^{-2}$

外層では減少、中心核では増加。 MS段階:殆ど微分回転を生成しない SB段階:燃焼設及びその上で急勾配

臨界回転率: $W_r \equiv \Omega_r / \Omega_K(r)$ $= \Omega_r / (GMr/r^3)^{1/2}$ 外層では減少,中心核では増加, 内部で局所的に臨界回転を超える



III. 恒星の回転の進化 慣性モーメントに基づく



- 初期(ZAMS) に亜臨界回転 ($W_1 < 1 \text{ or } \Omega < \Omega_K$) でも膨張 の過程で臨界回転 ($W = 1 \text{ or } \Omega = \Omega_K$) に達することができる。
- Wのpeak: Sb初期($M \leq 8M_{\circ}$), He 燃焼後($M \geq 16M_{\circ}$)

IV. Origin of Be Stars





回転の構造への効果

0.001

4M, ZAMS 4M, ω_{pr}

Moment of inertiaの増加は小さい。 大きくても 10 % 程度 臨界角速度の減少の効果の方が大きい。 最大で $\Omega_K(R_e) = 0.5443 \Omega_K(R_p)$

Wは角運動量(J)に比して臨界回転 に近づくと急激に増加する。

 \Rightarrow



Observation との比較

HR図上のBe星の存在領域(Levenhagen & Leister 2006)形成領域: W(t) > 1 & W(t) > W(t') for $\forall t' < t$ 継続可能領域,もLAMを失わなければ



(1) Mass range of Be stars

Mass loss for massive end AM loss during the Protostars for lowmass end More massive stars form Be-stars s

(2) More massive stars form Be-stars s during earlier MS stages.





Be stars ~ uniform rotation Mass decretion is rather effective

V. 微分回転

微分回転

 $\boldsymbol{D} = r \sin \theta \nabla \Omega = (r \sin \theta \Omega / \partial r, \sin \theta \partial \Omega / \partial \theta, 0)$ 時間変化:

球対称で近似

 $\Leftrightarrow (r\Omega^2)/(GM_r/r^2) \ll 1$

これは、臨界回転の場合も極表面層を除くと成り立つ。 $D_r = r\partial\Omega/\partial r$:動径方向の微分回転 $\partial\Omega/\partial\theta$ を無視し、 θ 方向を平均をとると、

$$\frac{d(r^2 D_r)}{dt} = \frac{d \ln U}{dt} r^2 (D_r - 2\Omega) + r^2 \frac{\partial}{\partial \ln r} \left(\frac{1}{r^2} \frac{dr^2 \Omega}{dt} \right)$$

growth and source term diffusion of AM

V.1. 微分回転の生成と成長

角運動量輸送を無視すると $\frac{d(r^2 D_r)}{d \ln U} = r^2 (D_r - 2\Omega)$ ホモロジー不変量

の変動によって決まる。 〇 相似変換の時 $(dU/dt = d 4\pi r^3 \rho/dt = 0)$ $D_r \propto 1/r^2$ (但し $\Omega \propto 1/r^2$) 一様回転は一様回転のまま留まる ○一般の場合 $D_r/\Omega = (U/U_0 - 1) + (r_0/r)^2 D_{r,0}/\Omega$

微分回転の生成の時間尺度位置



V.2 角運動量輸送

角運動量保存の式

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

a(= r²Ω):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 $f_r = \frac{1}{4\pi r^2} \cdot \frac{2}{3} \int_0^{M_r} \frac{d(r^2\Omega)}{dt} dM_r$

ここで $\Omega = J/I$ とおくと一様回転を維持するために必要な角運動量流速 f_r を評価できる。

角運動量流速の分布と進化



1*M*MS段階: 恒星全体で外に運ばれる。
(*f_r* > 0)
SF段階: 中心核からの flux は必ずしも大きくはならない(保持する AM 自体が小さくなる)。外層では膨張に伴いAM flux が負になる。しかし、縮退coreが形成されると燃焼殻の上部で大きな極大値も持つようになる。(この付近で半径の時間変化率が最も大きくなる)

 $2.5M_{\odot}$

MS段階: 1M₀と同じであるが、慣性能率が大きい分大きくなる。

SF段階: 1M₀と同じであるが、慣性能 率が大きい分大きくなる。RGB でも、縮 退しない(core mass が増加しない)ので、 大きくはならない。

乱流による角運動量輸送は乱流粘性係数 $\nu_{\rm UR}$ とすると、 $f_r = \nu_{\rm UR} \rho r^2 \frac{\partial \Omega}{\partial r}$

ここで、 $d \ln U/dt$ が最大値 or 最小値をとると、一様回転を維持するために必要な粘性係数 v_{UR} を評価できる。 $v_{UR} \approx \frac{H_p}{\rho r^2 \Omega} f_{r, \max}$

微分回転の特徴的な長さとして pressure scale height (H_p) を採用



3.5. 各進化段階での v_{um,max}

	MS	He ignition 📥	He burning
$1 M_{\odot}$	$10^{1} \sim 10^{2}$	~ 10 ⁹	~ 10 ⁵
$2.5 M_{\odot}$	10 ² ~10 ³	~ 10 ⁷	~ 10 ⁵
$16 M_{\odot}$	$10^{5} \sim 10^{7}$	~ 10 ⁹	$\sim 10^{10}$



summary

- 1. 回転の効果は球対称モデルの Moment of inertia から議論できる(球対称恒星進化はfine science である)。
- 2. Be 星の起源について、観測と consistent な解釈。
 - mass とangular momentum 依存性についての包括的描
 - 一様回転でよい:少なくてもMS段階では、効率の 良いAM輸送過程が存在する。
 - 臨界回転に達したあと、赤道面からの mass decretion は、角運動量放出の効率の良い機構がなければなら ない。
- 3. Helioseismology, asteroseisemologyの観測との比較
 - Shell burning の外側で differential rotation
 - 内部での乱流粘性の効率知見が得られた。