

Rapidly rotating star vs Non-rotating star

漆畑貴樹 (東京大学理学系研究科)

Abstract

現在では高速回転している金属欠乏の Wolf-Rayet star が「長い」ガンマ線バースト (LGRB) を伴う重力崩壊型超新星爆発 (CCSN) の progenitor として考えられている。その為、この種の CCSN の数値シミュレーションを行う際の初期値設定には回転を考慮した大質量星の進化を追い、その終状態を求める必要がある。しかし、恒星進化コードの中には回転の効果を考えていないものも存在する。よって、回転の考慮の有無により、恒星の内部構造・進化にどのような違いが出てくるかをみていく。主に [1] の論文を基にする。

1 Introduction

回転を考慮した恒星進化、と言われると不思議に思われるかもしれない。なぜならば、惑星でも恒星でも、星は回転しているからだ。ここで回転を強調する意味とは何か。教科書に載っている恒星の性質を特徴づける基礎方程式を思い出して頂きたい。多くの教科書には球対称を仮定している。それら基礎方程式を基に恒星進化コードが作られ、恒星の内部構造や進化経路を調べられてきたのが過去約 50 年間行われてきた恒星の研究である。回転を考えると遠心力が星の内部で効いてくる。その為、星の形状は歪み球対称は破られる。つまり、今までの恒星進化の研究とは 1 次元的であり、回転の効果は取り入れられていない。

自転が遅い星であれば近似的に問題ないように思われるが、高速回転しており遠心力が強いような星では問題が出てくると考えるのは自然である。ここで回転を考えた時、どのような影響が出てくるのかをまとめておこう。

(1) The equilibrium configuration of rotating stars : 今さっき述べたように、回転を考慮すると遠心力により形状が歪む。遠心力の性質を考えると、形状の観点では、赤道面方向に最も影響が出ており、極方向へ影響は出ない。

(2) The effects of rotation on mass loss or accretion : 等方性の mass loss (or accretion) ではなく異方性になる。

(3) The rotational mixing : 内部の歪みにより循環

流が発生する。これにより元素や角運動量が輸送される。

(4) The interactions with magnetic field : 回転と磁場の相互作用により種々の不安定性が生じる。例えば、magnetic braking や、まだ理論上のものであるが、Tayler-Spruit dynamo などがある。

今までの恒星の内部構造・進化の研究は 1 次元であった。回転の考慮した恒星の内部構造・進化は本質的に多次元である。以上に述べた影響を調べる為にも、多次元的なアプローチが必要であり始まったばかりの分野である。当然の事ながら、重力崩壊型超新星爆発 (CCSN) の progenitor の研究という観点からも重要な分野である。

2 基礎方程式

for Non-rotating star

$$\begin{aligned}\frac{dP}{dM_r} &= -\frac{GM_r}{4\pi r^4} \\ \frac{dr}{dM_r} &= \frac{1}{4\pi r^2 \rho} \\ \frac{dT}{dM_r} &= -\frac{GM_r T}{4\pi r^4 P} \nabla_T \\ \frac{dL_r}{dM_r} &= \epsilon_n - \epsilon_\nu + \epsilon_g\end{aligned}$$

上から、静水圧平衡の式 (力のつりあい)、連続の式、エネルギー輸送の式、エネルギー保存式である。

for Rotating star

言うまでもなく、どのように定式化するのが極めて重要である。今回採用する方法は、物理量の角度方向 (θ 方向) を摂動的に取り入れる方法である。このように考えると角度方向の微分が消え、基礎方程式を球対称星の場合と似た形式に書くことが出来る。つまり、形状は解いていない形式ではあるが回転の効果を取り入れた、言わば 1.5 次元的に恒星の性質を記述する形式になる。

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dM_P} &= -\frac{GM_P}{4\pi r_P^4} f_P \\ \frac{dr_P}{dM_P} &= \frac{1}{4\pi r_P^2 \bar{\rho}} \\ \frac{d \ln T}{dM_P} &= -\frac{GM_P}{4\pi r_P^4} f_P \min(\nabla_{ad}, \nabla_{rad} \frac{f_T}{f_P}) \\ \frac{dL_P}{dM_P} &= \epsilon_n - \epsilon_\nu + \epsilon_g \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} f_P &= \frac{4\pi r_P^4}{GM_P S_P} \frac{1}{< g_{eff}^{-1} >} \\ f_T &= \left(\frac{4\pi r_P^2}{S_P} \right)^2 \frac{1}{< g_{eff} > < g_{eff}^{-1} >} \end{aligned}$$

である。先ほどと同じように、上から、静水圧平衡の式、連続の式、エネルギー輸送の式、エネルギー保存式である。

3 構造の簡単な議論

3.1 力学平衡

まず力学的平衡についてみていこう。議論を簡単にする為、星は剛体回転していると仮定する。すなわち、角速度 $\Omega = const$ とする。この時、力のつりあいは

$$\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P = -\vec{\nabla} \Phi + \frac{1}{2} \Omega^2 \vec{\nabla} (r \sin \theta)^2 \quad (1)$$

となる。ここで、 ρ, P, Φ は密度、圧力、重力ポテンシャルである。剛体回転を仮定するとき、遠心力

をポテンシャルから得る事が出来る。遠心力ポテンシャル V を次のように定義する。

$$-\vec{\nabla} V = \Omega^2 \vec{\omega} \quad (2)$$

ここで、 $\omega = r \sin \theta$ であり回転軸からの距離を表している。したがって、全ポテンシャルを Ψ とすると

$$\Psi = \Phi + V \quad (3)$$

と表す事ができる。全ポテンシャルを用いて静水圧平衡の式は

$$\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} = -\vec{\nabla} \Psi = \vec{g}_{eff} \quad (4)$$

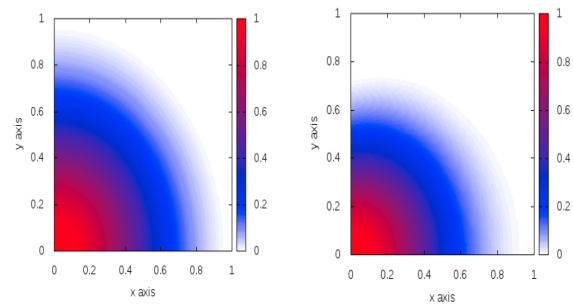
となる。 \vec{g}_{eff} は重力加速度と遠心力加速度を考慮した有効重力である。式 (4) から圧力、密度は Ψ のみの関数と言えて、さらに状態方程式を考えると温度 T も Ψ の関数と言える。すなわち、等ポテンシャル上で P, ρ, T は一定である。等ポテンシャル面と等圧面が一致しているときにバロトロピックと言い、一致していないときはバロクリニックと言う。

具体的に全ポテンシャル Ψ と有効重力 \vec{g}_{eff} を表すと

$$\Psi(r, \theta) = -\frac{GM_r}{r} - \frac{1}{2} \Omega^2 r^2 \sin^2 \theta \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \vec{g}_{eff} &= \left[-\frac{GM}{R^2(\theta)} + \Omega^2 R(\theta) \sin^2 \theta \right] \vec{e}_r \\ &+ [\Omega^2 R(\theta) \sin \theta \cos \theta] \vec{e}_\theta \quad (6) \end{aligned}$$

となる。ここで、 $R(\theta)$ は角度 θ における星の半径である。有効重力ベクトルと動径ベクトルの向きは必ずしも一致するとは限らない。

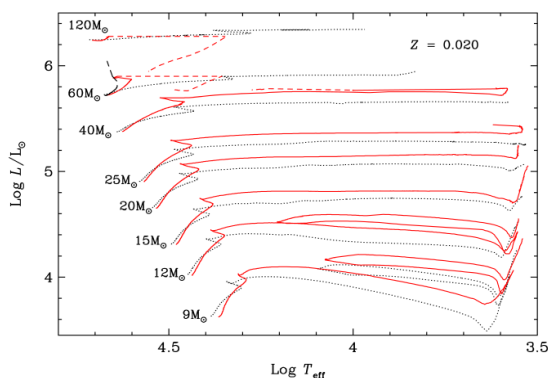


図はバロトロープ数 $N = 1.5$ のバロトロープ星の密度分布である。左が回転していない場合で、右が剛体回転している場合である。

3.2 熱的構造

回転は星内部の熱的平衡にとっても影響を与える。回転星は形状が歪んでいるので、等ポテンシャル面は角度によって変わる。等ポテンシャル面は極方向で短く、赤道面方向に広がっている。放射フラックスはローカルな等ポテンシャル勾配に比例しており、熱源がないならば等ポテンシャル面を通るフラックスは保存するので、極軸に沿って流れる放射フラックスは赤道面方向よりも多い。この熱的なアンバランスさが大域的な子午面循環流を発生させる。子午面循環流は元素のミキシングや角運動量の輸送に影響を与える。

4 進化経路



金属量 $Z = 0.02$ における初期質量 $9M_{\odot}$ から $120M_{\odot}$ までの回転の有無による星の進化経路を表したものである。初期速度は $v_{ini} = 300 \text{ km s}^{-1}$ である。図上の実線が回転を入れた場合で、ドット線が回転を入れていない場合である。この状況における星の進化の段階を見ていこう。

4.1 The main-sequence phase

言うまでもなく、MS(main-sequence) とはコアで水素燃焼をしている段階である。ZAMS(zero-age-

main-sequence:水素燃焼を始めた段階。つまり、恒星が誕生した時)において、回転ありの場合は温度が低く光度も低い。これは大気分布が歪められているのと有効重力が弱くなっている為である。しかし、進化が進んでいくと回転があるモデルの方がより光度を持つ事になる。これは回転によるミキシングが働き、燃料である水素が対流コアの方へ流入していく事により、回転を考えていない場合よりも対流コアの質量が大きくなり、より光を発する事が出来る為である。

$40M_{\odot}$ 以上のモデルを見てみると、回転が入っている方が MS 幅 (ZAMS の位置から折り返しの位置まで) が狭まっている事がわかる。これは大質量星の方が低質量星に比べて回転によるミキシングが効く事に由来する。

4.2 The post-MS evolution

初期回転速度、質量によって、MS の間に星のコアは縮んだり増加したりする。このコアの増減によって、MS を過ぎた後に赤色段階へ進むか青色段階へ進むかが決定される。

$15M_{\odot}$ から $25M_{\odot}$ の恒星は、MS を過ぎた後は赤色超巨星になる。回転は定性的な変化を与えないが、赤色段階への進化を加速させる。初期速度 300 km s^{-1} としたとき、有効温度が 4000 K 以下で、回転ありの場合は全てのヘリウムを燃焼した赤色超巨星になるが、回転なしの場合ではヘリウム燃焼を続けている青色段階である。

4.3 Lifetimes

回転を考慮すると MS の”寿命”は少なくとも3つの影響を受ける。

1. 回転にはコアにおける水素燃焼の量を増加させる。これにより MS の寿命は伸びる。
2. 回転により有効重力は減少するので、同じ質量の星を比べれば回転がある星の方が MS の寿命は伸びる。

3. 回転により外層におけるヘリウムの量は増加する。これにより星は回転を考慮しない場合に比べてより光度を発する事になり、 MS の寿命は減少する。

どの効果が効いてくるかは初期の質量と金属量に依存する。

5 Conclusion

初めのモチベーションとしては $CCSN$ の *progenitor* の理解であったが、重力崩壊するまでも大質量星は宇宙の化学進化に重要な影響を与える。大質量星はその質量故に強力な恒星風を発しており、星間物質に与える影響についても興味深い所である。また、大質量星は高速回転している傾向が観測的にわかっているので、回転を考慮に入れた研究はより重要である事がわかる。

Introduction でも触れたように、今までの恒星進化の研究というのは主に 1 次元的であった。*Sec.2* で採用した形式によって回転を考慮した恒星進化の研究が進められるようになり、今回はその研究成果を紹介するに到った。しかし、疑問に思わなければならない点はこの形式の妥当性である。対する答えは 2 次元で形状まで解いた恒星進化計算の結果を待たなければならないだろう。そして、この 2 次元恒星進化計算という難題に答えを出したいというのが私の野望である。

6 Reference

[1] A.Maeder and G.Meynet , Reviews of modern Physics , vol 84 , January-March 2012