恒星進化論
(Stellar Evolution Theory)
梅田　秀之

2024年4月19日 ~ 7月19日
金曜3限（13:00–14:45）

e-mail : umeda@astron.s.u-Tokyo.ac.jp
Home page :
http://tron.astron.s.u-tokyo.ac.jp/~umeda/

講義用 Zoom URL（使うときは）:
https://u-tokyo-ac-jp.zoom.us/j/86808825013?pwd=eOwA1eTsTTdw3quqcrYvUPRen9F6Tb.1

参考図書

*The Physics of Stars,
A.C. Phillips (Wiley)

*Stellar Structure and Evolution
R.Kippenhahn, A.Weigert
(Springer-Verlag)

*星の進化、斉尾英行（培風館）

*Principles of Stellar Evolution
And Nucleosynthesis
D. D. Clayton (Chicago)

*Supernovae and Nucleosynthesis
A. Arnett (Princeton)

*Physics, Formation and Evolution of Rotating Stars, A. Maeder
(Springer)

*Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars, S. Shapiro, S.Teukolsky
(Wiley-Interscience)

*元素はいかにつくられたか
超新星爆発と宇宙の化学進化
野本憲一　編（岩波書店）

*超新星（新天文学ライブラリー4）
山田章一　（日本評論社）

恒星の進化論

- 星は誕生から様々に姿を変え、宇宙に元素をばらまいていく
- この講義では、これら星の進化にまつわる現象を紹介し、それを理解するために基礎となる物理や、実際に計算を行うための手法（数値計算法を含む）を解説する
- また研究の最前線や現在問題となっている事柄も紹介する

前半の重点項目

- 恒星進化の基礎方程式
- 星のポリトロープモデル
- 対流発生の条件
- 恒星はなぜ赤色（超）巨星になるのか
- 混合距離（ミキシング・レングス）理論

星の進化計算

- 基本となる方程式：1次元球対称
  - 連続の式 $\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho$ (1.1) (KH4, 10)
  - 静水圧平衡の式 $\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm\rho}{r^2}$ (1.2)
  - 状態方程式(EOS) P(ρ、T)

    理想気体 $P = \frac{k}{\mu m_u}\rho T$ (1.3)

    完全縮退したガス $P \propto \rho^{5/3}(non-relativistic)$

    $P \propto \rho^{4/3}(relativistic)$
  - 特殊な場合（例、ρ一定、EOSが温度に依存しない場合）は上記の方程式を残りの温度進化の式と独立に解くことができる
  - 特にEOSが $P = K\rho^{1+\frac{1}{n}}$ (1.4) と書ける場合 n をポリトロープ指数と呼び、解は polytropic stellar models と呼ばれる

残りの式
- エネルギー生成と化学進化 （核反応ネットワーク）
- エネルギー伝播の式 （放射、及び対流）
- Opacity
- エネルギー保存の式

静水圧平衡の式とビリアル定理

$$(1.2) \rightarrow \frac{dP}{dr} = -\frac{Gm\rho}{r^2}$$

$$\int_0^R 4\pi r^3 \frac{dP}{dr} dr = -\int_0^R \frac{Gm\rho}{r} 4\pi r^2 dr = -\int_0^M \frac{Gm}{r} dm = E_{GR}$$

$$\text{左辺（部分積分）} = -3\int_0^R P(r) 4\pi r^2 dr = -3 < P > V$$

$$< P > = -\frac{E_{GR}}{3V} \qquad (1.5)$$

気体運動学（理想気体、非相対論的ガス）

$$< P > = \frac{n}{3} < \mathbf{p} \bullet \mathbf{v} > = \frac{2n}{3} < \frac{1}{2} mv^2 > = \frac{2}{3}\frac{E_{KE}}{V}$$

$$(1.5) \rightarrow 2E_{KE} + E_{GR} = 0 \qquad \text{(1.6　ビリアル定理)}$$

nは単位体積当たりの粒子数

(相対論的ガスの場合は $< P > = \frac{n}{3} < pc > = \frac{1}{3}\frac{E_{KE}}{V}$

なので$E_{KE} + E_{GR} = 0$となる)

太陽の平均密度、温度

星の平均密度 $< \rho > \approx \frac{M}{\frac{4\pi}{3}R^3}$ ($= 1.4 g / cm^3$太陽の場合)

$M_{\odot}$ =1.99・10^{33} g, $R_{\odot}$ =6.96・10^{10} cm,
G=6.67・10^{-8} $cm^3/(g\ s^2)$

$$E_{GR} = -\int_0^R \frac{Gm\rho}{r} 4\pi r^2 dr = -\frac{3GM^2}{5R} \qquad (\rho = \text{一定の時})$$

一般に $E_{GR} \approx -\frac{GM^2}{R}$ (1.7)

$(1.5) \rightarrow < P > \approx \frac{GM^2}{4\pi R^4}$

理想気体 EOS を使うと $< T > = \frac{GM}{3R}\frac{\mu m_u}{k}$

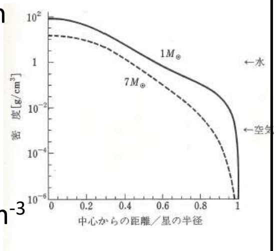
$= 4.7 \cdot 10^6$ K（太陽）

平均分子量 μ = 0.62
(X=0.7, Y=0.28, Z=0.02)

太陽のPolytropicモデル

$P = K\rho^{1+\frac{1}{n}}$ (polytropic relation)

- 理想気体であってもTとPにある関係がある時にはpolytropic となる
  - d ln T/ d ln P =1/(n+1) のとき
- Lane-Emden equation



- n=3 polytrope
  - ρ_c/<ρ> = 54.18
  - ρ_c= 54.18*1.4 g cm^{-3}
    = 76.4 g cm^{-3}
  - T_c= 1.4 x 10^7 K
  - より詳しい計算値
    1.5x 10^7 Kに近い