

Stellar Structure and Evolution[2]

東北大学 4 年 辻 勇吹樹

2024 年 4 月 20 日

Chapter 9: Mass Loss

質量損失は、星の種類によっては無視できない。太陽は $10^{-8} M_{\odot}/\text{year}$ という十分に無視できる割合で太陽風を通して失っているが、 $5M_{\odot}$ ほどの質量を持つ星や $50M_{\odot}$ 以上の質量を持つ星の進化の終盤や、連星系では質量損失が大きくなる。

星中心では質量をエネルギーに変換する核融合反応が起きている。しかし、その質量損失割合はどの種類の星においても恒星風に比べて十分に無視できるものである。

恒星風は光球から放たれる光子と大気中の原子や分子、塵粒子との相互作用によって引き起こされる。低温星では塵粒子との相互作用によって恒星風を出す、大気中の温度や密度によって複雑な化学変化によって恒星風が形成される。この温度や密度は外層の脈動の影響を受けることがあり、脈動によって大きな質量損失をもたらしている。炭素が豊富な輻射駆動型の高温星や塵駆動型の低温星では恒星風を記述する固体物理モデルが存在する。というように、恒星風には多くの「型」があり、統一的なモデルがなくそれぞれで観測と整合する理論モデルが作られている。ここではいくつか広く用いられているモデルを紹介する。

- Reimers(1975)

論文は見つからなかったが、太陽と同程度の金属量を持つ赤色巨星のデータから得たという質量損失の式。

$$\dot{M}_R = -4 \times 10^{-13} \eta \frac{L}{gR} \cdot \frac{g_{\odot} R_{\odot}}{L_{\odot}} \quad (1)$$

質量損失率は光度に比例し（明るいほど外に放出している）、重力ポテンシャルの大きさに反比例する（質量が大きいほど外に出ていけなくなる）という、直感にわ

かりやすい式となっている。重元素が少ない星では光子とガスの相互作用が弱くなるので (スペクトル線の位置や数?) η は金属量の少ない星では小さな値を取るパラメータとなっている。

- Schröder and Curz(2005)[4]

Reimers の式を、最新のデータとより適合するように修正された式。恒星風が非常に乱流が起きている、延長された彩層からの Alfvén 波によって引き起こされると単純化している。彩層の半径を R_{chr} とすると時刻 dt の間に星の重力ポテンシャルを超えて流れ出るときのエネルギー dE_{wind} は

$$dE_{wind} \simeq \frac{GM_{\odot}\dot{M}dt}{R_{chr}} \propto L_M dt \quad (2)$$

という関係式が導かれる。 L_M は表面での力学エネルギー流束の積分値であり、Alfvén 波の特徴から $L_M \propto L_{\odot}T_{eff}^{3.5}$ という関係をおいている。このとき彩層の半径の見積もりも考慮すると

$$\dot{M}_{SC} = -\eta \frac{L_M R_{chr}}{M_{\odot}} = -\eta \frac{L_{\odot} R_{\odot}}{M_{\odot}} \left(\frac{T_{eff}}{4000K} \right)^{3.5} \left(1 + \frac{g}{4,300g_{\odot}} \right) \quad (3)$$

という式が与えられる。 η は定数で $8(\pm 1) \times 10^{-14} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ と見積もられる。

- Bloeker(1995)[1]

質量損失の割合が $10^{-4} M_{\odot}/\text{year}$ まで上昇する AGB(漸近巨星分枝) 星についての質量損失率の式。より理論的なモデルは 34.6 節で与えられている。

$$\dot{M}_B = -4.83 \times 10^{-9} \dot{M}_R (M_*/M_{\odot})^{-2.1} (L/L_{\odot})^{2.7} \quad (4)$$

Reimers の式 \dot{M}_R にさらに質量と光度の依存性を加えることで AGB 期における光子とダストの相互作用による恒星風形成によりフィットするようになっている。

- Lamers(1981)[3]

O3 から B9 までの 53 個の星について電波のフラックスや赤外超過 (黒体放射のスペクトルと比べたときの赤外領域の超過分) などを測定し、フィットする式を与えた。

$$\dot{M}_L = -1.48 \times 10^{-5} \left(\frac{L}{1,000L_{\odot}} \right)^{1.42} \left(\frac{R}{30R_{\odot}} \right)^{0.61} \left(\frac{30M_{\odot}}{M} \right)^{0.99} \quad (5)$$

また重元素の割合によっても質量損失が変化すると考えられており、水素とヘリウムを除く元素の割合を X_{res} として $\dot{M} \sim X_{res}^{1/2}$ という関係が一般に仮定されている。

参考文献

- [1] T Blöcker. Stellar evolution of low-and intermediate-mass stars. ii. post-agb evolution. *Astronomy and Astrophysics*, v. 299, p. 755, 299:755, 1995.
- [2] Rudolf Kippenhahn, Alfred Weigert, and Achim Weiss. *Stellar Structure and Evolution*. 2013.
- [3] HJGLM Lamers. Mass loss from o and b stars. *Astrophysical Journal, Part 1*, vol. 245, Apr. 15, 1981, p. 593-608., 245:593–608, 1981.
- [4] K-P Schröder and M Cuntz. A new version of reimers ' law of mass loss based on a physical approach. *The Astrophysical Journal*, 630(1):L73, 2005.