

電波天文学特論 II 2008-6

8 AGB 星

8.1 AGB 星の特徴

AGB 星 (Asymptotic Giant Branch Star) は進化の進んだ中質量星 ($1 \sim 8M_{\odot}$) で、中心部に C/O のコアを持ち、その外側に He シェル、さらにその外側に H シェルという玉ねぎ上の構造をしている。C/O コアのすぐ外側ではヘリウムシェル燃焼が、ヘリウムシェルのすぐ外側では水素燃焼が起こっている。恒星進化のフェーズとしては、主系列を離れて巨星分枝を経た後のフェーズであり、AGB の後は徐々に星の外層を吹き飛ばしながら温度を上げて PPN (Proto Planetary Nebula) から PN (Planetary Nebula = 惑星状星雲) へと進化し、最後は中心星が冷えて白色矮星となる。AGB 星の特徴として以下のようなものがあげられる。

- 低温度で高度が大きい (対流平衡で HR 図上ではほぼ林トラック上に位置する)
- 質量放出を起こす
- 脈動変光をする (ミラ型変光星など)

8.2 AGB 星の物理量

AGB 星の物理量は質量や進化段階によっても異なるが、 $1M_{\odot}$ 程度の質量を考えた場合、典型的な高度はとしては $L \sim 10^4 L_{\odot}$ 程度である。また、温度はどのような星でもおよそ $T \sim 3000$ K 程度である。このような光度と温度を持つ星の大きさは、シュテファン・ボルツマンの法則

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4, \quad (1)$$

を用いて

$$R = \left(\frac{L}{4\pi\sigma T^4} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

と書ける。また、太陽の物理量を用いて規格化して

$$\left(\frac{R}{R_{\odot}} \right) = \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{T}{T_{\odot}} \right)^{-2}, \quad (3)$$

とも書ける。ここで、定数はそれぞれ

$$R_{\odot} = 7 \times 10^5 \text{ km},$$

$$T_{\odot} = 5800 \text{ K},$$

$$L_{\odot} = 3.9 \times 10^{26} \text{ W},$$

であり、これらから $M = 1M_{\odot}$ 、 $L = 10^4 L_{\odot}$ の AGB 星の半径は $R = 400R_{\odot} = 2.8 \times 10^8 \text{ km} \approx 2 \text{ AU}$ となる。すなわち太陽 - 地球間よりも大きな半径をもっていて、太陽のような恒星に比べて密度が低い、ぶよぶよした星になることがわかる。

9 質量放出

AGB 星の大きな特徴である質量放出は、輻射圧が星周領域のダストに働くことでガスを加速させているために起こる。以下に、詳しくそれを見る。

9.1 輻射圧と重力

明るさ L で輝く星の表面 (半径 r) を通過する単位面積あたりのエネルギーフラックス F は

$$F = \frac{L}{4\pi r^2}, \quad (4)$$

である。一方、エネルギー ϵ の光子は運動量 $p = \epsilon/c$ を持つから、式 (4) の輻射によって発生する圧力 P は、

$$P = F/c = \frac{L}{4\pi cr^2}. \quad (5)$$

ここで、ガスの密度を ρ 、単位質量あたりの吸収断面積を κ とする (粒子一つ当たりの質量を m 、断面積を σ とすると $\kappa = \sigma/m$)。このとき、恒星の表面上にあるガスが輻射によって受ける力 f_{rad} は単位体積あたり、

$$f_{\text{rad}} = P\kappa\rho dV = \frac{L}{4\pi cr^2}\kappa\rho dV. \quad (6)$$

一方、このガスに働く重力 f_{grav} は

$$f_{\text{grav}} = \frac{GM}{r^2}\rho dV, \quad (7)$$

だから、輻射圧が星の重力に打ち勝ってガスを吹き飛ばすための条件は $f_{\text{rad}} > f_{\text{grav}}$ より、

$$L > \frac{4\pi cGM}{\kappa}, \quad (8)$$

となる。つまり、この光度よりも明るい場合、星の外層が吹き飛ばされてしまうことになる。

9.2 エディントン光度

上記の条件は天体の質量 M の他に、物質の吸収係数 κ に依存している。とくに、物質が完全電離プラズマの場合、電子が光子に衝突し、クーロン力を介して陽子が加速を受ける。すなわち、この場合の吸収係数は、トムソン散乱の断面積と陽子質量で与えられ、

$$\kappa_T = \frac{\sigma_T}{m_H}, \quad (9)$$

と書ける。ここで、

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} a_0^2 = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m c^2} \right)^2 \quad (10)$$

である (a_0 は古典電子半径)。具体的な値を代入すると、

$$\kappa_T = 4.0 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{g},$$

となる。

このような完全電離プラズマを考えた場合に質量放出が起こる臨界光度

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi c G M}{\kappa_T}, \quad (11)$$

はエディントン光度 (エディントン限界) と呼ばれ、

$$L_{\text{Edd}} \approx 3.2 \times 10^4 \left(\frac{M}{M_\odot} \right) L_\odot \quad (12)$$

である。

9.3 ダストによる吸収係数

AGB 星の場合温度が低いので星周領域は電離されず、上記のエディントン光度は AGB 星からの質量放出の議論には適当でない。温度が低い AGB 星の星周領域ではダストが形成され、ダストが光子の運動量を吸収して、さらにダストとガス中の原子・分子が衝突することでガス全体に輻射圧を伝える。そのため、AGB 星の質量放出の議論のために、ダストの吸収係数を考える。ダストによる吸収係数はいくつかのパラメーターを用いて以下のようにあらわすことができる。

$$\kappa_{\text{dust}} = \frac{\pi a^2 Q}{m_d} f_d. \quad (13)$$

ここで、 a はダスト半径 (球状の粒子を仮定)、 Q は光子の吸収効率、 m_d はダスト質量、 f_d はガスダスト比である。典型的なダストの値として

$$a = 0.05 \mu\text{m}, \quad Q = 0.04, \quad f_d = 1/200$$

とし、また、ダストの密度を

$$\rho_d = \frac{3m_d}{4\pi a^3} = 2.0 \text{ g/cm}^3,$$

とすると、ダストの吸収係数は

$$\kappa_{\text{dust}} = \frac{3Qf_d}{4a\rho_d} \approx 15 \text{ cm}^2/\text{g}, \quad (14)$$

となる。この値はトムソン散乱の断面積に比べて約 40 倍大きい。したがって、エディントン光度との比較から、ダストによって質量放出が起こる臨界高度は

$$L_{\text{dust}} \approx 850 \left(\frac{M}{M_\odot} \right) L_\odot, \quad (15)$$

となる。すなわち、太陽の 1000 倍程度以上の明るさを持つ星で質量放出が起きることがわかる。一方、ダストが生成されるためにはガス温度がおよそ 1500K 以下になる必要がある。したがって、星の温度が低くないと星周領域でのダスト生成が効率よく起こらず、質量放出は起こらない。これらの効果により、ダストによる質量放出が起こるのは HR 図上で右上（低温度、高光度）の領域に限られ、それゆえダストによる質量放出が AGB 星の特徴となっている。

9.4 質量放出率の最大値の見積もり

光度 L で輝く星の輻射によってガスが距離無限大での速度 v_∞ まで加速される状況を考える。もし、星から出た光子の運動量がすべてガスにわたったとすると、単位時間あたりに星から出る運動量のつりあいより、

$$\frac{L}{c} \approx \dot{M} v_\infty. \quad (16)$$

これより、

$$\dot{M} \approx \frac{L}{c v_\infty}, \quad (17)$$

具体的な値を代入すると、

$$\dot{M} \approx 1 \times 10^{-5} \left(\frac{L}{10^4 L_\odot} \right) \left(\frac{v_\infty}{20 \text{ km/s}} \right)^{-1} M_\odot/\text{yr},$$

を得る。これは最大値であり、実際は $\dot{M} = 10^{-7} \sim 10^{-6} M_\odot$ 程度であるが、星によっては $\dot{M} = 10^{-5} \sim 10^{-4} M_\odot/\text{yr}$ といった非常に大きな質量放出を持つ天体も存在する。これらの質量放出率が如何に大きいかは、太陽の質量放出率 $\dot{M} \sim 10^{-14} M_\odot/\text{yr}$ と比較すれば明らかであろう。すなわち、太陽の質量放出率では宇宙年齢かかっても自身の質量を失うことはないが、AGB 星は 100 万年程度で質量の大半を失う。