

M 1 理論演習 『恒星』

第十回まとめ

2011/06/30

岡アキラ

概要

第十回は、4章の後半を読む。4章の後半では、赤色巨星枝から白色矮星への進化を学ぶ。

セファイドループ

主系列段階を終えた時点で $M > 2M_{\odot}$ を満たす場合、星は HR 図上でループを描きながら進化する。はじめに、ヘリウム中心核が重力収縮をすることで中心温度が上がり、水素燃焼殻からのエネルギー発生率が上がることで、有効温度、光度がともに上昇し、HR 図上を左上へのぼる。やがて、中心でヘリウムが燃焼し始めると、中心核が膨張し、したがって、水素燃焼殻が膨張することで水素燃焼殻の温度が下がるため、エネルギー発生率、すなわち、有効温度が下がり、HR 図上を右へ移動する。この過程全体を終えると、再び赤色巨星枝に戻り、その進化の軌跡はループを描く。このループのことをセファイドループと呼ぶ。

ヘリウム燃焼が起こる際、エネルギー発生率の温度依存性が大きいので、中心では対流が起こる。対流核の質量が大きいほど、対流核の半径は大きくなる。対流核が大きいほど燃焼が長く続くため、ループは長くなる。つまり、質量の大きな星ほど、長いループを描く。

ループが十分に長いと、軌跡はセファイド不安定帯を横切る。そのため、ループはセファイドループと呼ばれる。

ヘリウムフラッシュ

主系列段階を終えた時点で $M < 2M_{\odot}$ を満たす場合、ヘリウム中心核の重力収縮によりヘリウムの燃焼がはじまる前に、電子が縮退する。そのため、ヘリウム燃焼がはじまり、温度が上昇しても中心核が膨張せず、核反応が一気に起こる。このことをヘリウムフラッシュと呼ぶ。

ヘリウムフラッシュが起こると、中心温度が上昇し、やがて、電子の縮退が解けて、中心核が膨張し、温度が下がる。そして、安定なヘリウム燃焼をはじめ。この段階以後、ヘリウム燃焼が続く間の星を水平分枝星と呼ぶ。

水平分枝星

ヘリウムフラッシュを起こした後、安定的にヘリウム燃焼を起こす段階では、星は HR 図上で光度一定の線上に分布する。それゆえ、この段階の星を水平分枝星と呼ぶ。

水平分枝星の光度は、中心のヘリウム燃焼、および、水素燃焼殻からのエネルギー発生率によっているが、それらはヘリウム中心核の質量で決まる。ヘリウム中心核の質量はヘリウムフラッシュが起こる時点での質量なので、ほとんどの星で同じである。したがって、水平分枝星は主系列星時代の質量によらず、ほぼ一定の光度を持つ。これが、HR 図上で水平に分布する理由である。

AGB 星

セファイドループを終えた星が、 $M < 8M_{\odot}$ を満たすとき、電子の縮退により燃焼していない炭素・酸素中心核、ヘリウム燃焼殻、ヘリウム層、水素燃焼殻、外層からなる AGB 星になる。

ヘリウム燃焼殻は非常に薄く、そのため、圧力が温度に依存しなくなり、熱的に不安定である。ゆえに、ヘリウム燃焼殻はヘリウムフラッシュを起こす。ヘリウムフラッシュでヘリウム層のヘリウムがほぼ使い果たされるとヘリウムフラッシュは終わる。しかし、水素燃焼により十分なヘリウムが作られると、再び、ヘリウムの燃焼殻の熱的不安定性からヘリウムフラッシュが起こる。この繰り返し起こる反応を熱パルスと呼ぶ。

熱パルスと熱パルスの際に、ヘリウム燃焼や、s 過程中中性子捕獲反応によりできた重元素が対流によって外層まで運ばれるため、AGB 星は重元素の吸収線を示す。

熱パルス

熱パルスが起こると、急激なエネルギー発生にともない、ヘリウム燃焼殻の周りに対流が生じる。対流によって、ヘリウム燃焼による生成物や、s 過程中中性子捕獲反応の生成物が外層へと運ばれて、フラッシュが終わったあとも残る。したがって、AGB 星は炭素やそれ以上の重元素の吸収線を示す。

この機構によって炭素の吸収線を示す AGB 星には、光度に上限と下限が存在する。炭素・酸素中心核の質量が小さすぎると、熱パルスによって十分な対流が起こらず、逆に、炭素・酸素中心核の質量が大きすぎると、外層下部で CNO サイクルが生じ、炭素が窒素に変えられてしまうからである。

s 過过程中性子捕獲反応

s 過过程中性子捕獲反応とは、原子核が中性子を捕獲し、一度不安定な原子核になり、 β 崩壊によって安定な原子核となることを繰り返して、より重い原子核を生成する反応のことである。

中性子フラックスが十分大きい、例えば超新星爆発ような、シチュエーションでは、不安定な原子核が崩壊する前に、中性子を捕獲することでより重い原子核を生成する r 過过程中性子捕獲反応が起こる。

AGB 星では、s 過过程中性子捕獲反応により重元素が合成されている。AGB 星に、寿命が $2 \times 10^5 \text{yr}$ のテクネチウムが観測されていることがその証拠である。

白色矮星

AGB 星の大部分は質量放出を行っており、そのため、外層の質量はしだいに小さくなる。外層の質量が $10^{-3} M_{\odot}$ 程度になると、外層が収縮し表面温度が上昇する。このため、星は AGB 段階を抜け出し、HR 図上を高温側へ水平に動く。やがて、水素燃焼殻での燃焼が終わると、星は冷えていき、電子の縮退圧によって支えられる白色矮星となる。

白色矮星のスペクトル分類

白色矮星のスペクトル分類は以下の通りである。

- DA : 水素のバルマー線のみが観測される場合。白色矮星の 8 割はこのスペクトル型である。
- DB : 中性ヘリウムのスペクトル線が強く、水素、金属のスペクトルがない場合。白色矮星の 2 割はこのスペクトル型である。
- DC : 連続スペクトルを持ち、目立った吸収線がない場合。
- DZ : 金属線だけが観測される場合。
- DQ : 炭素原子、炭化物のスペクトル線が観測される場合。

質量と半径の関係

白色矮星を支える電子の縮退圧について、密度との間にポリトロープ関係、

$$P \propto K \rho^{1+1/n}$$

が成り立っていると仮定すると、質量と半径の間には、

$$R \propto M^{-\frac{n-1}{3-1}}$$

の関係がある。電子が相対論的に縮退しているとき、 $n = 3$ なので、この極限では、半径は0に近づく。しかし、以下に述べるように、実際は半径が0となる前に、白色矮星として存在することができなくなる。電子が相対論的に縮退するとき、質量は星の密度によらず、

$$M_{\text{Ch}} = 1.46 \left(\frac{2}{\mu_e} \right)^2 M_{\odot}$$

となる。これをチャンドラセカール限界質量と呼ぶ。白色矮星はこれ以上の質量を持つことができない。質量が増加して、限界質量に近づくと、炭素を中心付近に含む星は超新星爆発をし、そうでない星は中性子星に進化する。

白色矮星の冷却進化

白色矮星は内部でエネルギーを生み出す機構を持っておらず、光とニュートリノの放射によって、しだいに冷えていく。また、同時に、暗くなる。

中心核が一様な温度分布を持っているとし、外層は非常に薄く、放射平行が成り立っており、理想気体からなるものとする、

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM}{r^2} \rho$$

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3\kappa\rho}{4acT^3} L 4\pi r^2$$

が成り立つ。不透明度をクラマース型だとし、理想気体の状態方程式を用いると、外層での圧力、密度が求まる。さらに、中心核と外層の境界において、圧力の表式（理想気体の状態方程式、および、非相対論的縮退圧）が等しくなるべきである。これらの条件から、光度と内部温度の関係式、

$$\frac{L}{L_{\odot}} \sim 6.6 \times 10^{-29} \mu^4 \frac{M}{M_{\odot}} T^{7/2}$$

が成立する。白色矮星の表面から光として放出されるエネルギーは、原子核の熱運動に由来するエネルギーのみであるから、

$$L = -\frac{dE}{dt} = -\frac{3}{2} N_A \frac{k_B M}{A} \frac{dT}{dt}$$

が成り立つ。ここで、 A は白色矮星を構成する原子核の質量数である。光度と内部温度の関係式と、光度と原子核の熱エネルギーの関係式を用いると、星が白色矮星になってから現在の温度に冷えるまでにかかった時間（冷却時間） τ が、

$$\tau = 1.2 \times 10^{28} \frac{1}{A\mu} T^{-5/2}$$

と求められる。最も暗い白色矮星に対して、この関係式を用いると、銀河の年齢にたいして下限を与えることができる。