

M 1 理論演習 『恒星』

第九回まとめ

2011/06/23

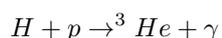
岡アキラ

概要

第九回は、3章の後半と4章の前半を読む。3章2節では星内部で起こる核融合反応について学ぶ。3章3節では、主系列星がどのように誕生するのかを調べ、3章4節では、主系列星の寿命について学ぶ。4章の前半では、主系列星から赤色巨星への進化を学ぶ。

pp チェイン

pp チェインは、温度が 10^7K 程度の主系列星の中心で起こる反応である。はじめに律速段階である pp 反応



が起こり、続いてヘリウム3が二つ融合してヘリウム4を生み出す pp1 反応、一度ベリリウム7を作り、電子捕獲反応を通じてリチウム7となり陽子と反応してヘリウム4を生み出す pp2 反応、ベリリウム7が陽子と反応してホウ素8となり、ベータ崩壊を通じてベリリウム8を作り、それがヘリウム4を生み出す pp3 反応の3つの過程がそれぞれ起こる。

pp チェインによるエネルギー発生率は温度の4乗程度に比例する。

CNO サイクル

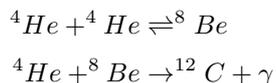
CNO サイクルは、温度が 10^7K 程度の主系列星の中心で起こる、炭素、窒素、酸素が触媒のような働きをすることで、陽子がヘリウム原子核に変わる反応である。

CNO サイクルによるエネルギー発生率は温度の20乗程度に比例する。

したがって、比較的中心温度の高い大中質量星では CNO サイクル、比較的中心温度の低い小質量星では pp チェインによる反応がおもに起きていることがわかる。

ヘリウム燃焼反応以後の燃焼反応

温度が 10^8K 程度になると、ヘリウム原子核三つが融合して炭素原子核を作る、トリプルアルファ反応がおこる。トリプルアルファ反応は、



と言う二段階の反応である。トリプルアルファ反応で 1g のヘリウムが炭素に変わる際に発生するエネルギーは $6 \times 10^{17}\text{erg}$ である。これは、水素燃焼反応 (pp チェイン、CNO サイクル) の約 $1/10$ 程度である。

さらに温度が上昇すると、以下の表のような反応が起こる。生み出されるエネルギーはいずれも、 1g の燃料から 10^{17}erg 程度である。

温度 (10^8K)	燃料	生成物
6-7	C	O,Ne,Mg
15	Ne	Mg
20	O	Si,S,Ca
30	Si	Fe

炭素燃焼以後の燃焼反応では、温度が非常に高いので、ニュートリノが多く発生し、エネルギーを星の外へ持ち出してしまう。

前主系列星

恒星はいかにして生まれるのか、と一言を簡単に調べる。

宇宙でガスが集まり星ができてはじめるとき、密度が高い部分を中心として、重力崩壊が起こる。重力崩壊が進み、静水圧平衡となったとき、高温の原始星が誕生する。周りのガスが原始星に降り積もることで、原始星はさらに質量を獲得する。このとき、質量の降着によって重力エネルギーが解放され一部は星の熱エネルギーに変わり、残りは、

$$L \sim \frac{GM\dot{M}}{R} \sim 3 \times 10^2 \frac{M}{M_{\odot}} \frac{\dot{M}}{10^{-5}M_{\odot}\text{year}^{-1}} \frac{R_{\odot}}{R} L_{\odot}$$

だけ星の外部へ放出される。ある時点で、強い質量放出が起こり、星の周りのガスが吹き飛ばされ、質量降着が終わる。この瞬間から重力収縮によって主系列星へ進化するまでの間の星を前主系列星と呼ぶ。前主系列星と主系列星は、星の中心部で水素燃焼反応が起こっているかどうかで判断する。前主系列星は中心温度が高くなく、水素燃焼反応が起こらない。また、 $M \sim 8M_{\odot}$ 以上では、急速な質量降着によって、原始星の段階で中心温度が 10^7K 以上となっており、質量降着が終了した時点で、すでに主系列星となっている。そのため、この場合、前主系列星段階は存在しない。

主系列星の寿命

主系列星では、星中心で核融合によって発生するエネルギーと星表面から放出されるエネルギーが釣り合っている。核融合により、発生するエネルギーは $\epsilon \propto \rho T^\nu$ なので、エネルギーの収支は、

$$L \sim \bar{\epsilon}_n M \propto M \frac{M}{R^3} \frac{M^\nu}{R^\nu}$$

となる。 $\nu = 16$ という値がよく用いられ、このとき、

$$L \sim \frac{M^{18}}{R^{19}}$$

が得られる。さらに、大質量星では $L_B \propto M^3$ なので、 $R \propto M^{0.8}$ 、中小質量星では、 $L_s \propto M^{5.5}/R^{0.5}$ なので、 $R \propto M^{0.7}$ となる。これから、 $\bar{\rho} = M/R^3$ はおよそ M^{-1} に比例することがわかる。さらに、 $T_c \propto M/R \propto M^{0.2 \sim 0.3}$ より、質量の大きな星ほど中心温度が高いことがわかる。このこととエネルギー発生率の温度依存性から、質量の大きな星では CNO サイクルが、中小質量星では pp チェインが主たるエネルギー供給源となっていることがわかる。

主系列星の段階は、中心付近のおよそ 10% の質量の水素が全てヘリウムに変わるまで続く。したがって、主系列星の寿命 τ は、

$$\tau \sim \frac{0.1 \times 0.007 M c^2}{L} \sim 10^{10} \frac{M/M_\odot}{L/L_\odot}$$

程度である。ここで、0.007 は水素が燃焼してヘリウムに変わるときのエネルギー変換効率を表している。

$L \propto M^a$, ($a = 1 \sim 5$) 程度なので、結局、主系列星は質量の大きな星ほど寿命が短いことがわかる。このことから星団の年齢を決定することができる。

主系列星から赤色巨星への進化

主系列星は中心で水素が燃焼しているが、その燃料である水素がなくなってしまうと、それまで重力と釣り合っていた圧力がなくなってしまうので、星全体が重力収縮を起こす。ある程度、重力収縮すると、ヘリウム中心核の周りにはある水素が燃焼を始め、この水素燃焼核より外側では再び静水圧平衡を取戻し、収縮が止まる。一方、ヘリウム中心核はその後重力収縮を続け、それに伴う発熱で水素燃焼核が加熱される。したがって、水素燃焼核より外側は膨張し、ヘリウム中心核は収縮する。このとき、温度が下がり、光度が上がるため HR 図上では主系列の右上に位置する。この状態を赤色巨星と言う。