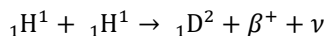


## § 8. 陽子-陽子反応

次に炭素循環と同じくらい重要なもう1つの核反応を考えよう。まず、前述の炭素循環が太陽以上の高温星のエネルギー源として十分であり、それが温度の高次 ( $T^{18} \sim T^{20}$ ) に比例するという事実は、逆に考えると  $2 \times 10^7$  K 程度よりずっと低温では余り有効ではないだろうということを示している。  $2 \times 10^7$  K から  $1.5 \times 10^7$  K まで低くなれば、 $\epsilon$  は  $1/100$  以下に小さくなってしまう。

例えば、Krueger 60 のような赤色矮星 (M dwarf) では  $M/R$  値が太陽の約  $(1/2)$  である。従って (第7表の欄外)、 $T_c$  が矢張り太陽の約  $(1/2)$  でなければならず、このため生成されるエネルギーは太陽の  $0.000\ 001$  倍程度でなければならないことになる。ところがこの恒星の観測光度はそれ程小さくはなく、太陽の  $0.0015$  倍である。このことから赤色矮星の光度は炭素循環が唯一のエネルギー源であるとした場合に期待される程低くはないと言える。

勿論この恒星が比較的大きい平均分子量を持つために温度が予想以上に高いこともあり得るが、とにかく、かなり低温でも有効に働いて炭素循環を補うような核反応が別にあるかどうかを調べることは有意義である。Bethe と Critchfield が示したように、このような過程は

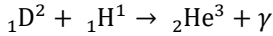


という反応で存在する。この反応では  $Z_1 = Z_2 = 1$  のため貫入確率は炭素循環の場合より遥かに大きく (§7.3)、従って  $Q^2$  の値 (§7.8) は、 ${}_7\text{N}^{14} + {}_1\text{H}^1$  反応では  $5070/T^{1/3}$  であったのに、この反応では  $1126/T^{1/3}$  である。しかし反応全体の確率は、これが  $\beta$  崩壊であるために著しく小さい。Bethe と Critchfield はこの反応の確率を計算したが、彼らの公式中の物理定数を最近の推定値で修正すれば、炭素循環の (§7.15) 式に対応する 1 gr 当たり毎秒起こる反応数は

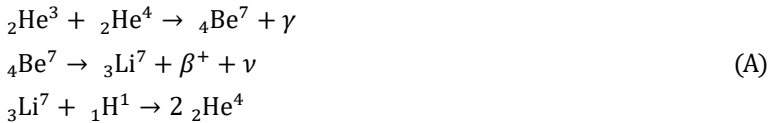
$$P = 2.3 \times 10^7 \rho X^2 (3380/T^{1/3}) \cdot \exp(-3380/T^{1/3}) \quad (1)$$

となる。この式によれば第10表の条件で H の平均寿命は、それぞれ  $4.8 \times 10^{10}$  年、 $2.4 \times 10^{10}$  年である。従ってこの過程では水素の燃焼は急速ではない。

この陽子-陽子反応で生じた重水素核 deutron  ${}_1\text{D}^2$ は殆ど即刻、



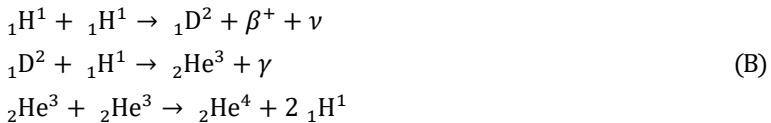
の反応で破壊してしまう。それは第 10 表に見られるように恒星の内部では、この反応は僅か数秒ほどの平均寿命しかないからである。生じた  ${}_2\text{He}^3$ 核は  ${}_3\text{Li}^4$ という安定核が存在しないために、陽子との反応が起こらずに安定である。この  ${}_2\text{He}^3$ の形成に続く反応として 2 つの可能な反応がある



の反応と



の反応とである。系列(A)は最初 Bethe が得たが、その後、Fowler&Lauritsen によって両者の中(B)の方がずっと起こり易いことが指摘された。その理由は、後者が複合核の分裂に依存しているのに反して、前者は確率の小さい輻射捕獲を含んでいるからである。系列(B)の連鎖反応をまとめて書けば



Fowler&Lauritsen によれば、 ${}_2\text{He}^3 + {}_2\text{He}^3$  (B)反応の確率は  ${}_2\text{He}^3 + {}_2\text{He}^4$  (A) 反応の確率の約  $5 \times 10^5$  倍も大きいと推定される。ここで、 ${}_2\text{He}^3$ と  ${}_2\text{He}^4$ との粒子密度の比が問題になってくる。反応確率が大きくてもその粒子が著しく少なくてはいけない。恒星中の、 ${}_2\text{He}^3$ の相対量は、諸反応の永年平衡から決ま

ってくる。例えば  $T = 1.6 \times 10^7$  K,  $\rho X = 120$  gr/cc に対して  ${}_2\text{He}^3$  の相対量は陽子の約  $10^{-5}$  倍である。従って仮に  ${}_2\text{He}^4$  が (数で) 水素の (1/10) もあるとしても  ${}_2\text{He}^3 + {}_2\text{He}^3$  の反応は  ${}_2\text{He}^3 + {}_2\text{He}^4$  反応に比べて 400 倍も起こり易いことになる。他方(B)反応では 2 回の  ${}_1\text{H}^1 + {}_1\text{H}^1$  反応ごとにただ 1 回の割合で 4 個の水素原子が 1 個のヘリウム原子に変換される。従って  ${}_1\text{H}^1 + {}_1\text{H}^1$ ,  ${}_1\text{H}^1 + {}_1\text{D}^2$ ,  ${}_2\text{He}^3 + {}_2\text{He}^3$  の反応で遊離されるエネルギーを  $E_1, E_2, E_3$  とすれば 1 陽子-陽子反応当たり遊離されるエネルギーは  $E_1 + E_2 + (1/2)E_3$  となるだろう。反応に含まれる核の質量の表から 1 陽子-陽子反応当たり遊離されるエネルギーが 14.01 mmu あるいは  $2.09 \times 10^{-5}$  erg であることが判る。従って陽子-陽子反応によるエネルギー生成法則の式は(1)から

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 2.09 \times 10^{-5} P(2) \\ &= 481 \rho X^2 (3380/T^{1/3})^2 \cdot \exp(-3380/T^{1/3}) \text{ erg/gr} \cdot \text{sec} \quad (2) \end{aligned}$$

$T = 1.6 \times 10^7$  K,  $\rho X = 120$  gr/cc に対して, この式は

$$\varepsilon = 12.1 \text{ erg/gr} \cdot \text{sec} \quad (2)$$

となる。このように恒星のエネルギー源として陽子-陽子反応は  $1.6 \times 10^7$  K で既に炭素循環と同程度 (§ 7.18) 有効である。

巨星の問題を考えると, 今までと非常に異なる条件下にある。例えば Capella ( $\alpha$  Aur) を考えると, この恒星の  $M/R$  は太陽の 0.27 倍であるのに, この星は  $\varepsilon = 60$  erg/gr  $\cdot$  sec を生成している。超巨星となると条件はもっと悪い。従って巨星に対してはエネルギー生成の機構か, あるいは恒星の構造の何れかが主系列星と著しく異なっているに違いないと結論せざるを得ない。現在の一般的な傾向としては 2 つの中後者, 即ち恒星の構造が異なっているという可能性が考えられているが, 未解決の問題の 1 つである。