

白色矮星における炭素核反応

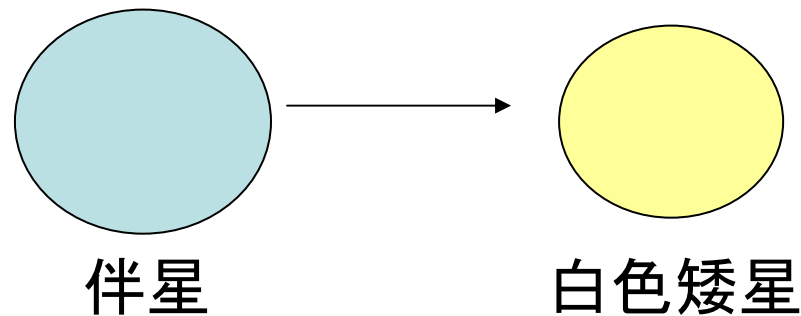
宇宙物理学研究室

安穂大輔

白色矮星

- 星はその質量によって、進化の仕方が異なる
水素燃焼→巨星化→ヘリウム燃焼→収縮
8 $M_{\odot}$ 以下の場合、外層部が静かな質量放出で
はがされ、残った中心部分が白色矮星となる。
- 白色矮星は、縮退した電子による縮退圧によって、支えられている星。

- 白色矮星自身は、エネルギー源がないため、熱放射によって、時間がたつにつれ温度が下がっていく。
- 連星中では、白色矮星に伴星からの質量降着があるために、白色矮星の質量が増えることがある。



- 質量が増えていくと、やがて炭素燃焼(カーボンバーニング)が起こる。
- 不安定な核反応な場合、I a 型超新星爆発とよばれる爆発を起こす。

目的

I a型超新星爆発の要因となる炭素燃焼(カーボンバーニング)について調べる。

イグニッションラインとなる中心密度を求めることにより、そのときの半径と質量を求める。

1、温度OKを仮定し、白色矮星内部の中心密度から、その半径と質量を求める。

2、CO白色矮星内での $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ の核反応率を調べる。

1、白色矮星の半径と質量

- 電子が完全縮退しているとき、フェルミ運動量 p_f を用いて 物質密度と圧力は次のようになる。

$$\rho = \mu n H \frac{8\pi}{3} \left(\frac{mc}{h} \right)^3 x^3 = \rho_c x^3$$

H: 水素原子質量

μ : 電子の平均分子量

m: 電子の質量

n: 粒子数

$$P = \frac{\pi}{3} \left(\frac{mc}{h} \right)^3 mc^2 f(x) = P_c f(x)$$

ここで

$$f(x) = x(2x^2 - 3)(x^2 + 1)^{1/2} + 3 \sinh^{-1} x$$

$$x = \frac{p_f}{mc}$$

星の内部構造方程式 (T=0K)

- 状態方程式

$$P = P(\rho) \quad \cdots \textcircled{1}$$

- 連続の式

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \quad \cdots \textcircled{2}$$

- 静水圧平衡

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r \rho}{r^2} \quad \cdots \textcircled{3}$$

- 式②, ③から

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(\frac{r^2}{\rho} \frac{dP}{dr} \right) = -4\pi G \rho$$



- 半径

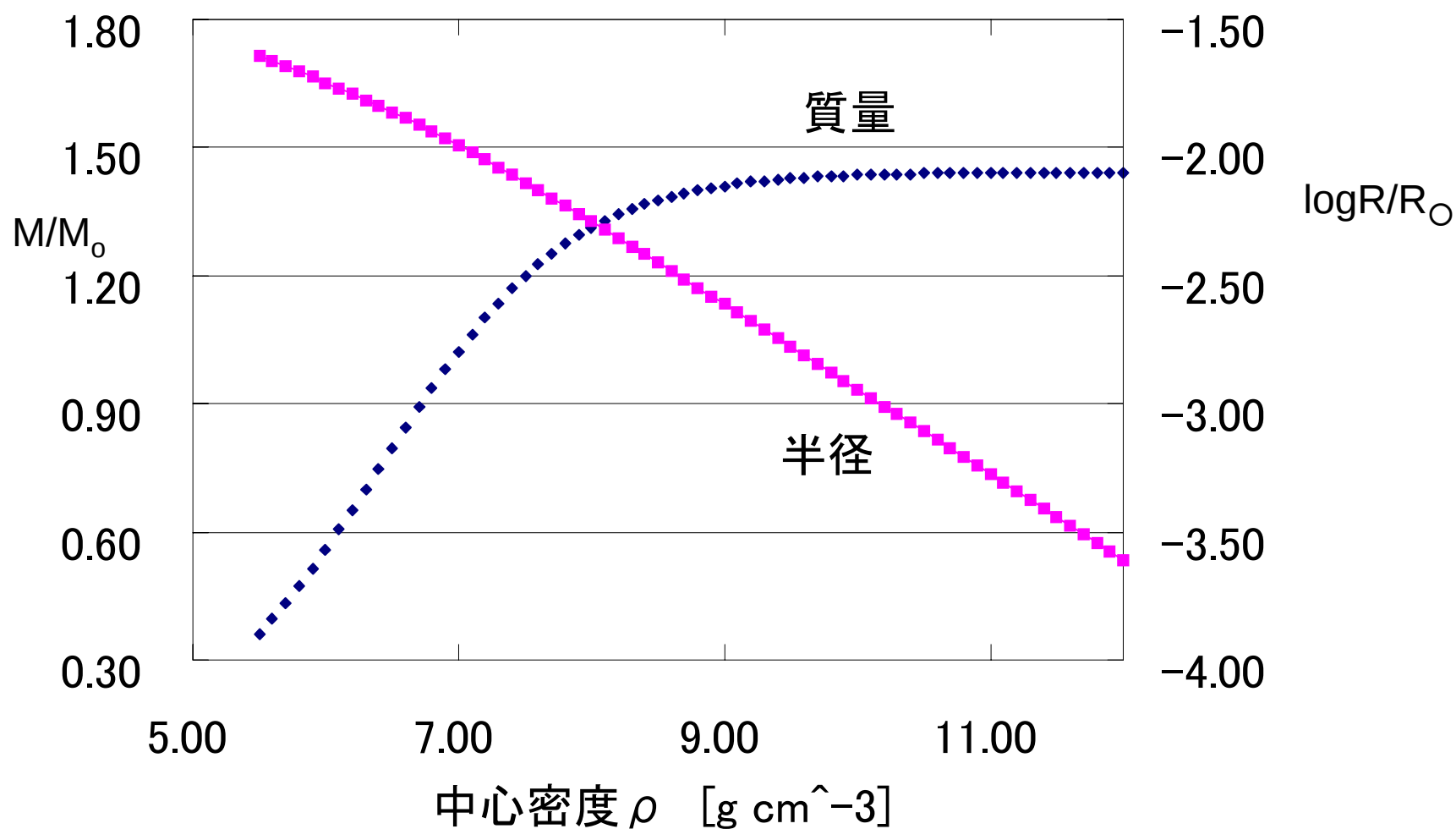
$$R = r(\rho = 0)$$

- 質量

$$M = \int 4\pi r^2 \rho dr$$

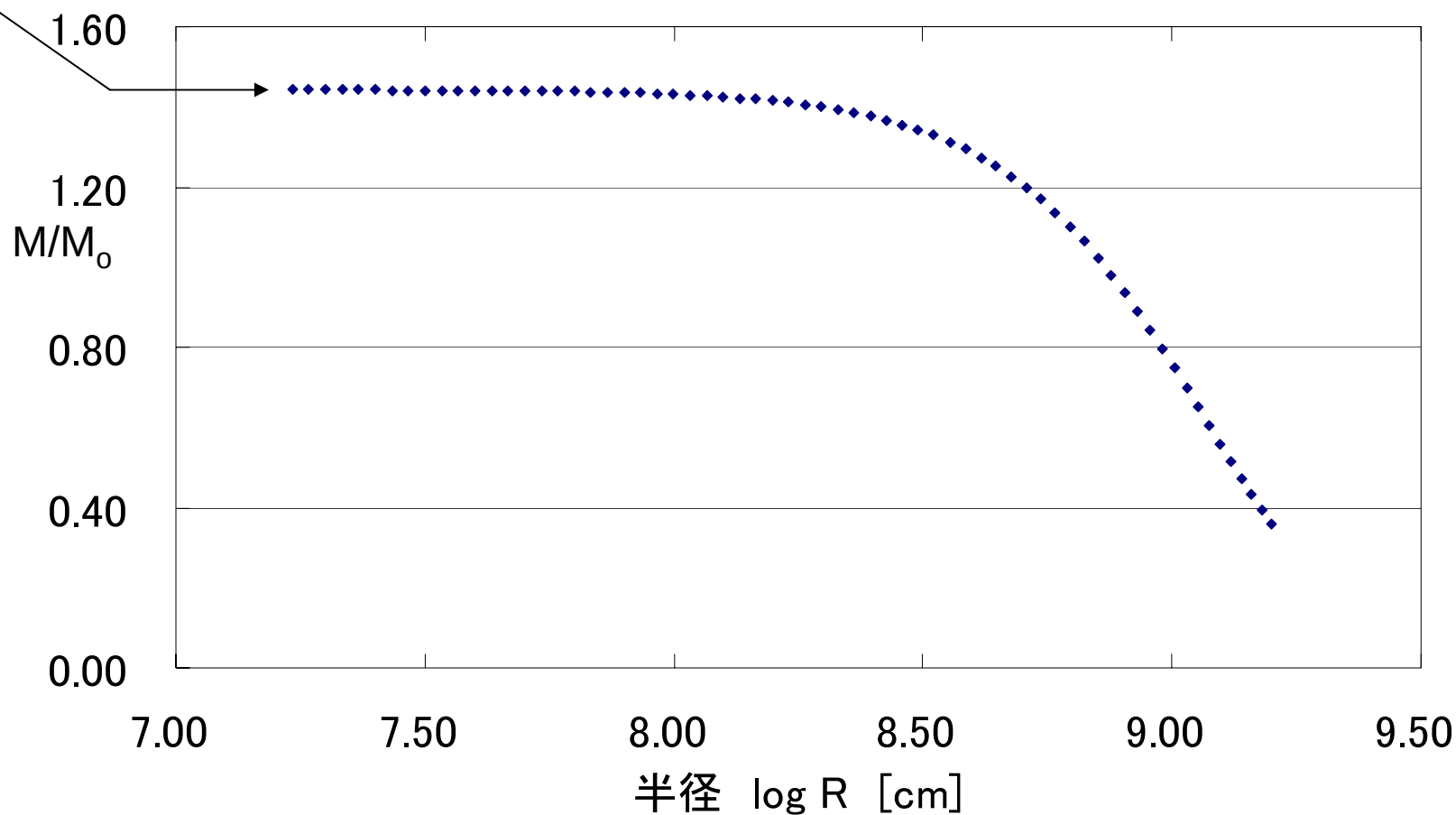
白色矮星 (T=0K) における 中心密度と質量の関係

白色矮星の半径と質量



白色矮星 ($T=0K$) における 中心密度と半径

上限質量 $1.44M_{\odot}$
チャンドラセカル限界



2、CO白色矮星内で炭素の核反応率

- イオン化された炭素のみで構成されているとする。
- 電子は完全縮退しているが、イオンは自由粒子のように振る舞い、三態をとりうる。
- イオンの状態は クーロン結合パラメーター Γ で表される。

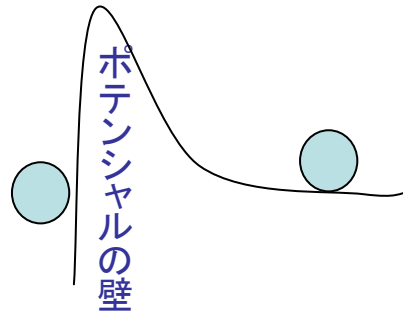
$$\Gamma = \frac{Z^2 e^2}{a} / k_B T \quad a = \left(\frac{3}{4\pi n_i} \right)^{1/3}$$

- 温度が $T \geq T_l = \frac{Z^2 e^2}{a} \frac{1}{k_B} (\Gamma \leq 1)$ のとき

古典的熱核反応の領域、イオンは気体。

古典的熱核反応

- 核反応はクーロンバリアを貫通して、粒子同士がぶつかることによって起こる。



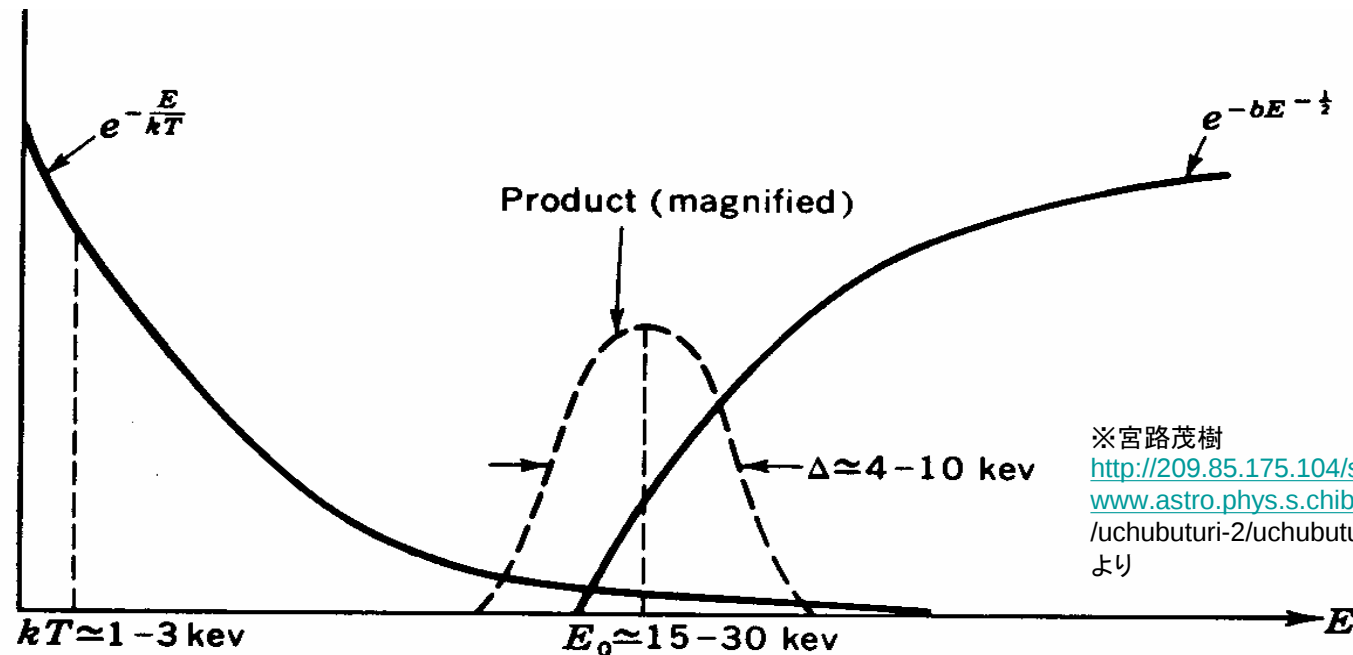
- 反応は主にガモフピーク付近で起こる。

ガモフピーク

イオンの速度の分配関数は $\exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$

クーロンバリアを貫通する確率は $\exp\left(-bE^{-1/2}\right)$

この二つの掛け算が最大になるエネルギーで反応が主に起こる。



※宮路茂樹

<http://209.85.175.104/search?q=cache:BJ58Nnid9J4J:www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/~miyaji/class/daigakuin/uchubuturi-2/uchubuturi2-6.pdf>
より

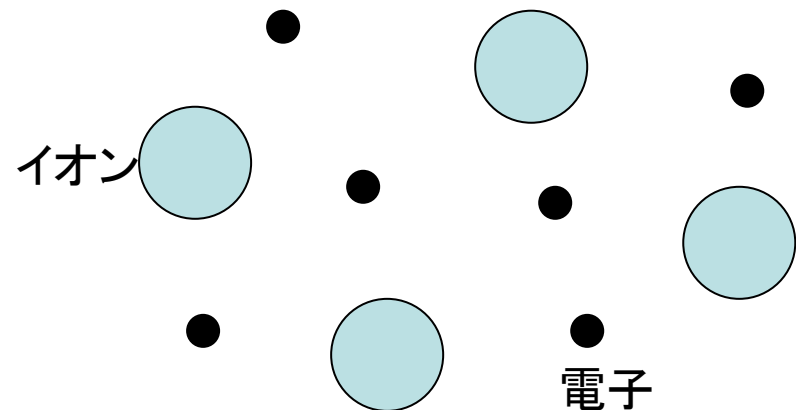
スクリーニング

天体内などの高密度領域において起こる。

- 背景にあるプラズマによりクーロンバリアが弱められ、反応率が上がる。

- $T_p = \hbar\omega_p \quad T_p \leq T \leq T_l$

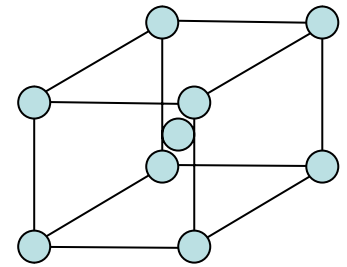
の領域で主に起こる。
イオンは気体と液体が
混じった状態にある。

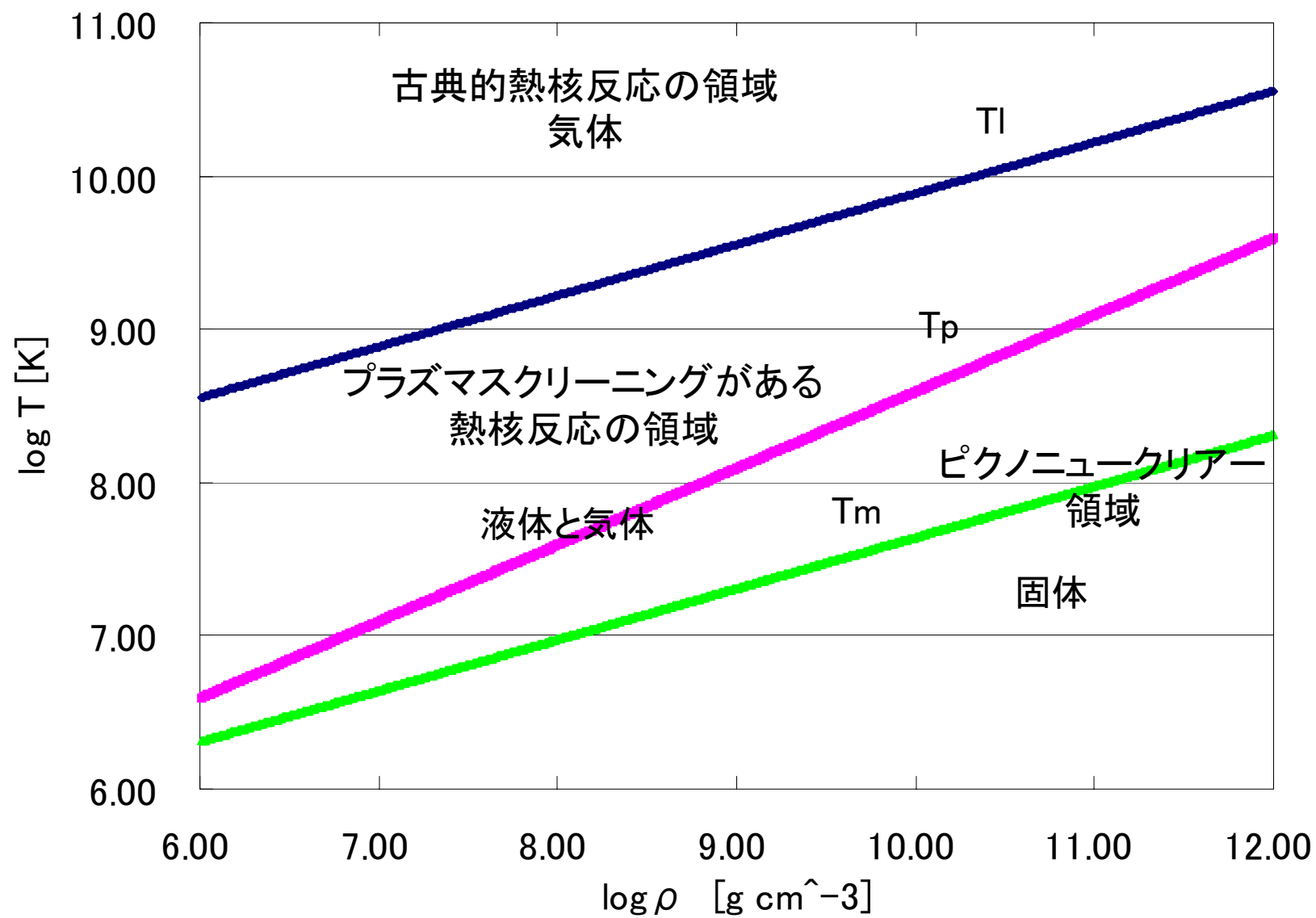


ピクノニュークリア反応

温度が低く、密度が高い領域において起こる。

- 強結合しているので、この領域では体心立方格子(bcc)構造をしていると仮定できる。
- 固体の結晶状態において、ゼロ点振動により隣の粒子と核反応を起こすことがある。





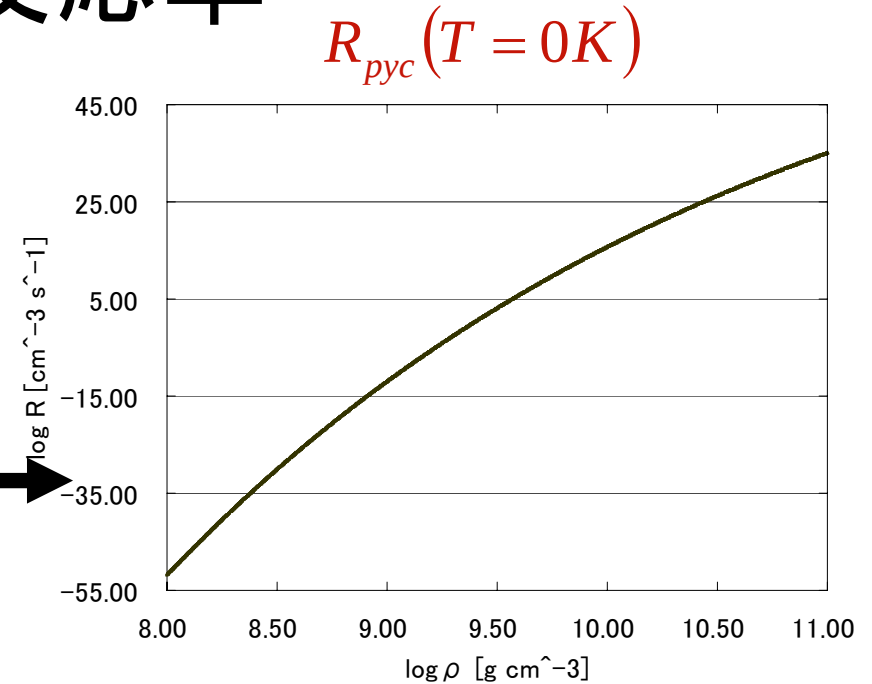
^{12}C の核反応率

$$R = \frac{n_i^2}{2} S(E_{pk}) \frac{h}{mZ^2 e^2} PF$$

※Nuclear fusion in dense matter
:Reaction rate and carbon burning
L.R.Gasques ら より

- ピクノニュークリア反応率
(ゼロ点振動の反応率)

$$R_{pyc}(T = 0K)$$

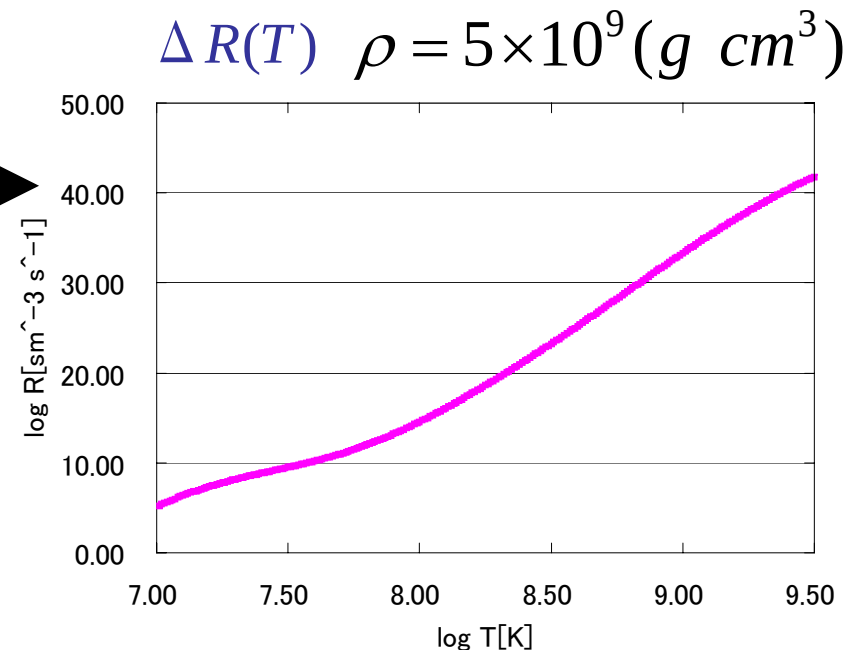


- 励起状態部分による反応率

$$\Delta R(T)$$

- 全体の反応率

$$R_{total} = R_{pyc}(T = 0K) + \Delta R(T)$$



反応時間

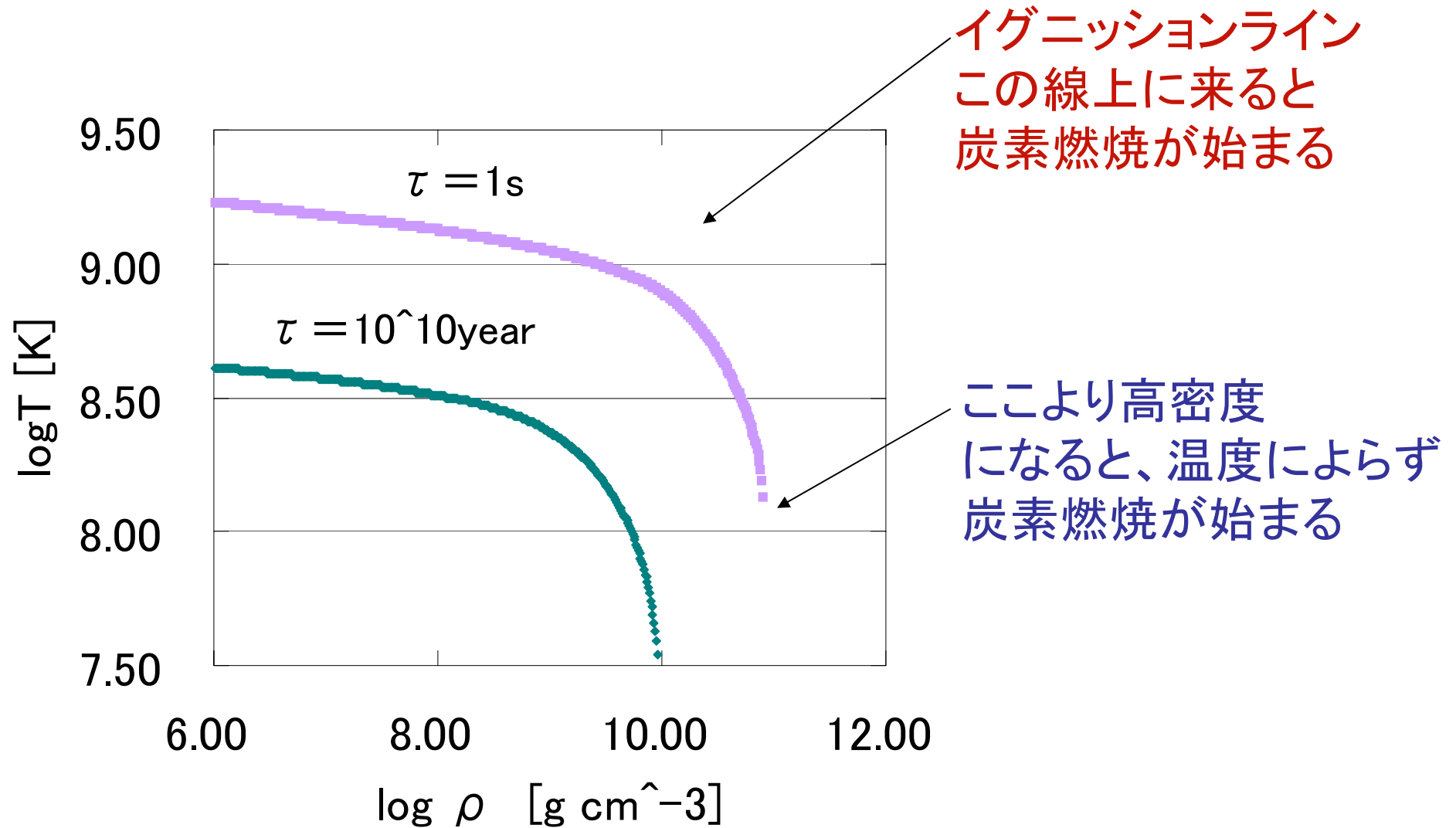
- この反応の特徴的なタイムスケールは

$$\tau_{burn} = \frac{n_i}{R_{total}}$$

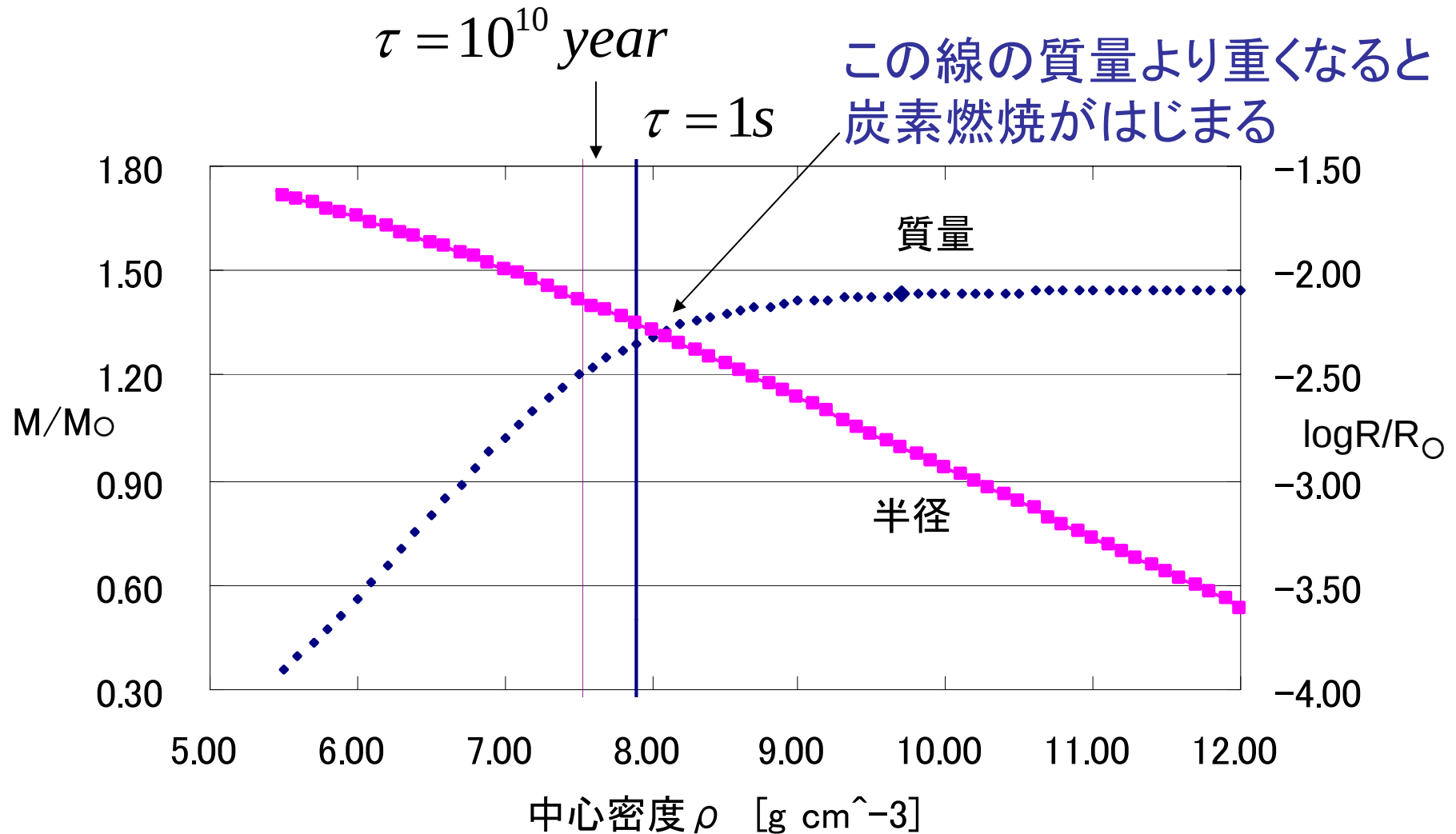
とあらわせる。

- $\tau_{burn} = 1$ [s]をイグニッションライン(炭素燃焼が始まる)と仮定する。

$\tau = 1\text{s}$ となる密度



イグニッションラインの質量



まとめ

- $T=0\text{K}$ の白色矮星の場合、質量が約 $1.29M_{\odot}$ 以上になると爆発を起こす。

考察

- 実際のカーボンイグニッションラインは核反応のエネルギー発生率がニュートリノ放射と等しくなるところである。
- $\tau = 1\text{s}$ より長いところにあるので、より少ない質量で爆発を起こすと考えられる。