

大阪大学 宇宙進化グループ 高倉 理(M1)

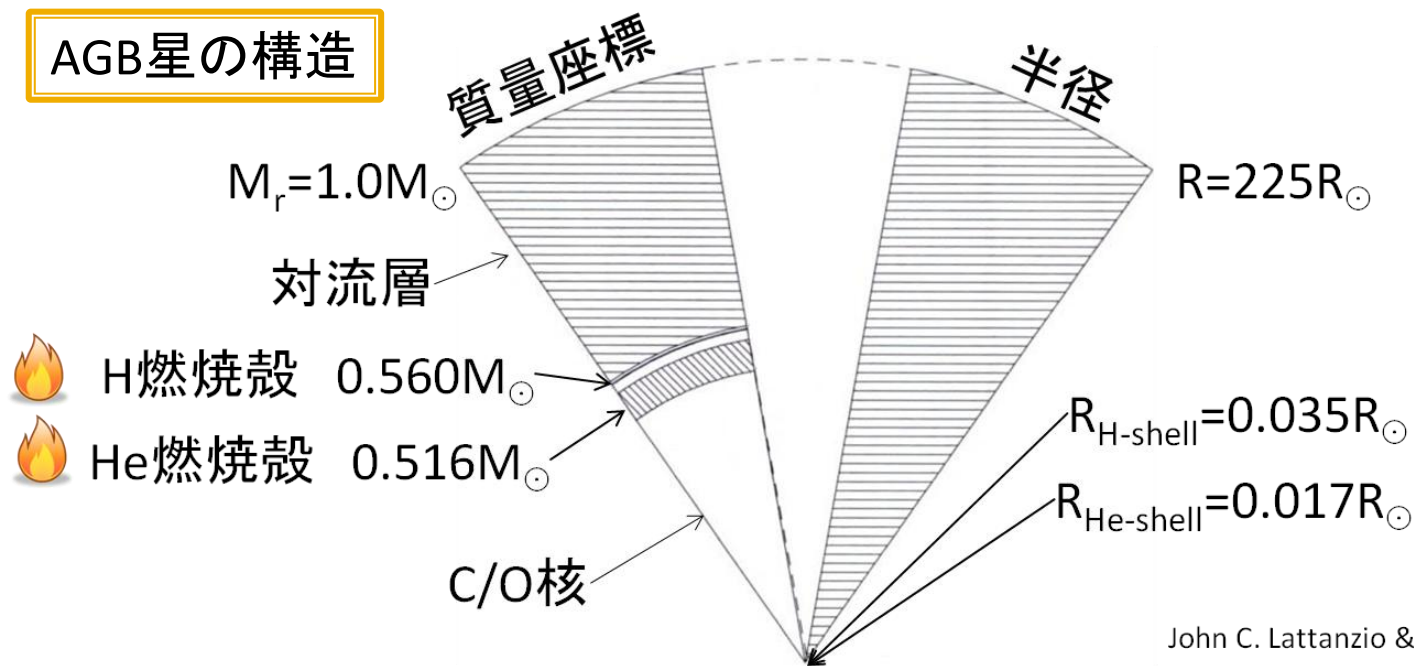
ヘリウム燃焼殻の熱的不安定性

Schwarzschild, M., Härm, R. 1965, ApJ, 142, 855

背景

- 質量が $1M_{\odot}$ の星の進化を数値計算したとき、漸近巨星枝(AGB)の段階で不安定が起こる。

AGB星の構造

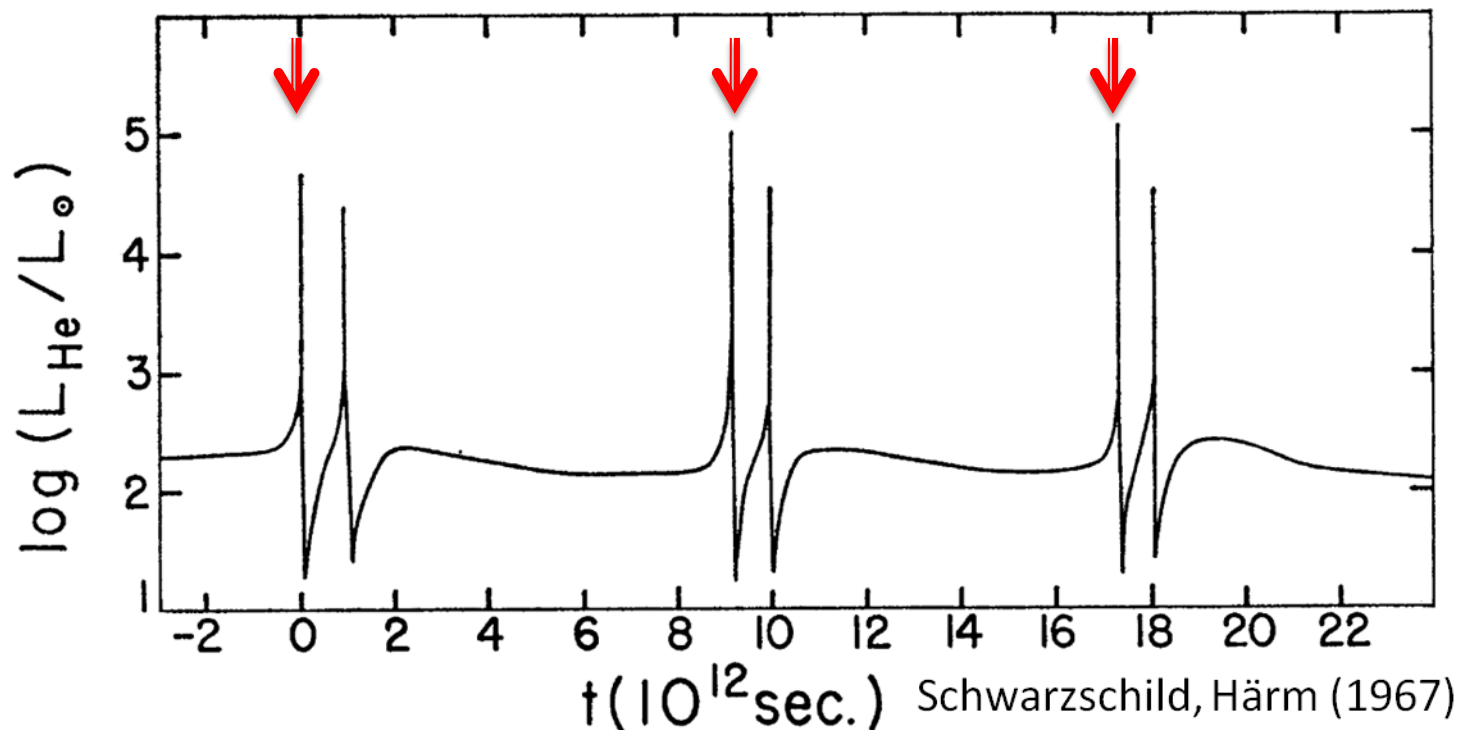


- AGB星は燃烧していないC/O核の周りでHeとHが**薄い殻**の形態で燃烧している段階。

背景

- 数値計算の例

He 燃焼殻の光度が急激に増加している



この不安定性の物理的な原因を知りたい

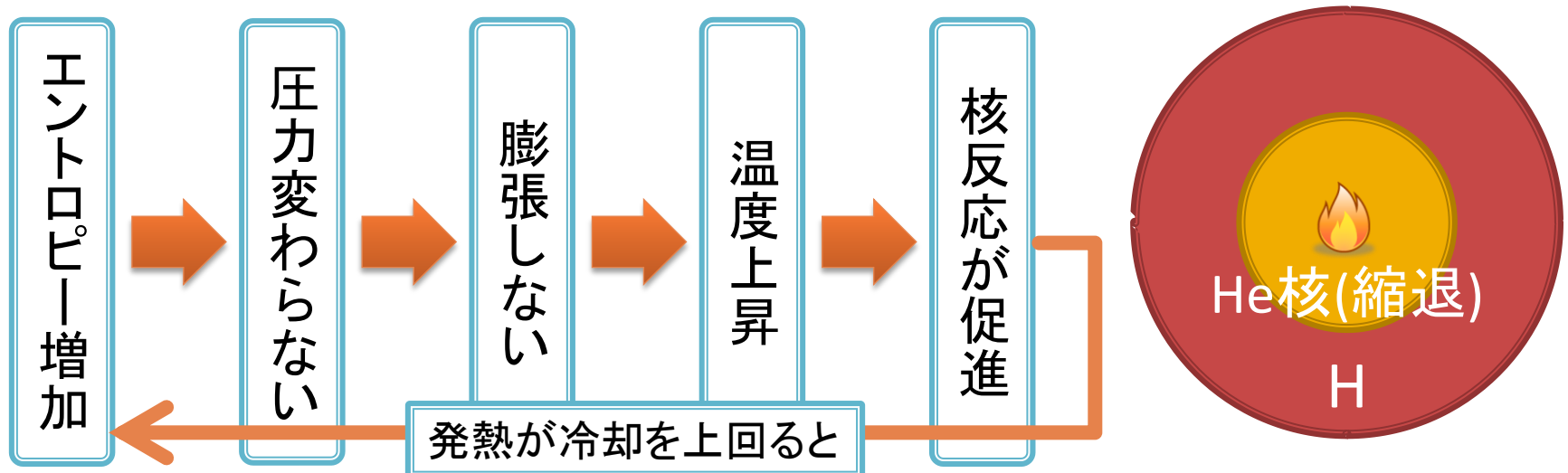
熱的不安定性とは

- エントロピーが増加したときに温度が上昇し、さらにエントロピーの増加が促進される状態。



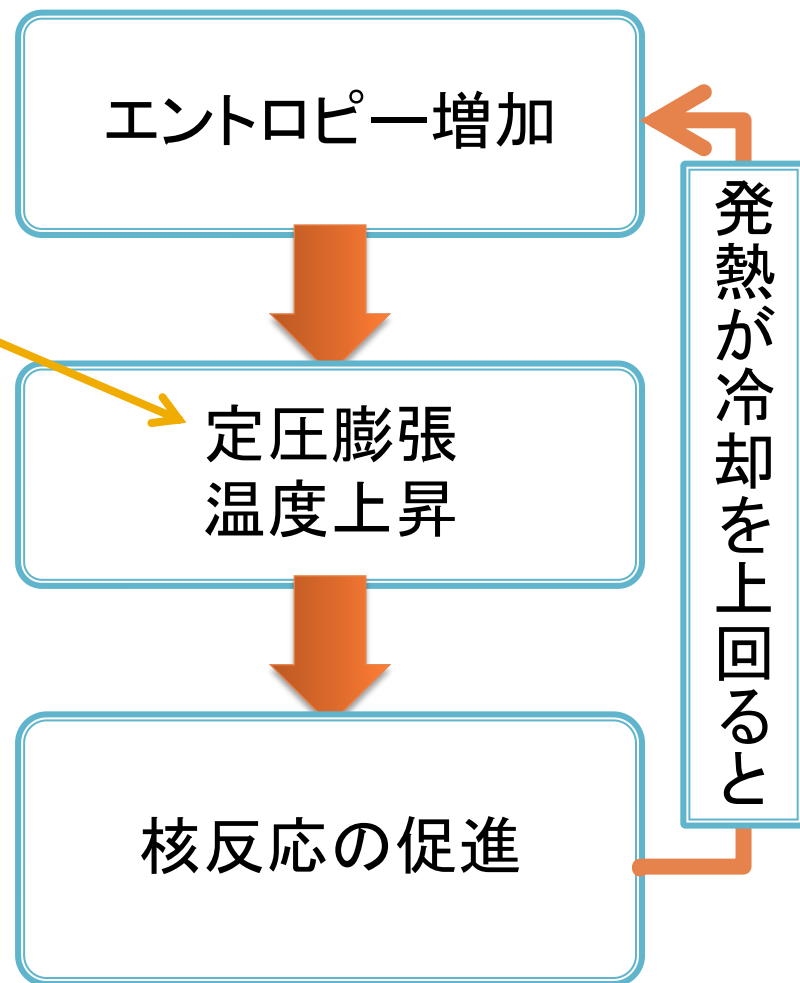
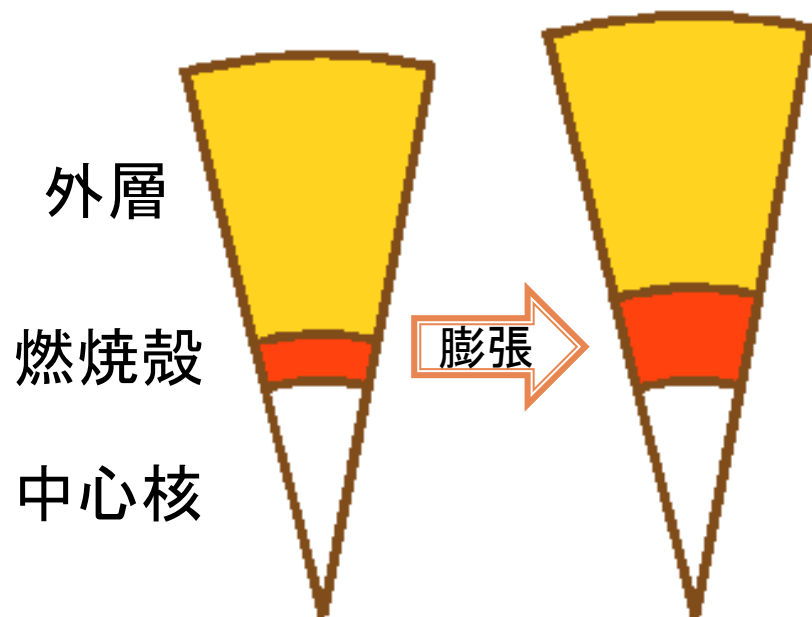
- 例:ヘリウムフラッシュ

縮退したHe核で燃焼が始まったときに起こる熱的不安定性



燃焼殻の熱的不安定性のメカニズム

- 本論文は**殻**の燃焼に注目
- 燃焼殻が**薄い**と膨張しても外層の中心からの距離はあまり変わらず、圧力不変



基礎方程式

球対称、力学平衡を仮定

■ EOC $\frac{dr}{dM_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$ ■ EOM $\frac{dP}{dM_r} = -\frac{GM_r}{4\pi r^4}$

■ エネルギー $\epsilon - \frac{dL_r}{dM_r} = + \frac{3}{2} \frac{P}{\rho} \frac{dS}{dt}$

\uparrow 核反応のエネルギー発生率 $\epsilon \propto T^\nu$

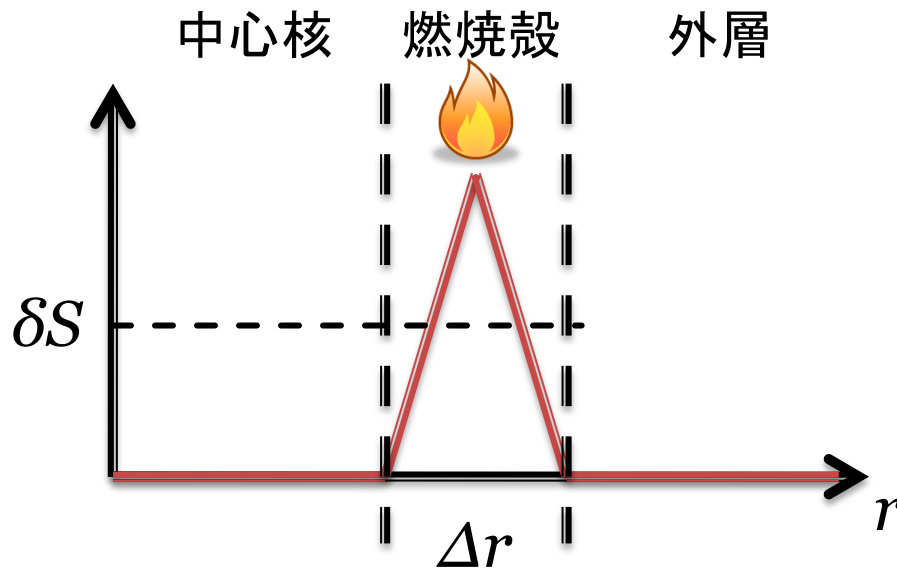
$S = \ln \frac{P}{\rho^{5/3}}$
 エントロピー $\times 2/3k$

■ エネルギー輸送 $L_r = - (4\pi r^2)^2 \frac{4ac}{3} \frac{T^3}{\kappa} \frac{dT}{dM_r}$

\downarrow Stefan-Boltzmann 定数
 \uparrow mean opacity

■ EOS (理想気体) $P \propto \rho T$

燃焼殻の静水圧平衡の変化



- 燃焼殻にエントロピーの摂動を加えたときの力学的変化を調べる。

- EOCとEOMより

$$\frac{\delta P}{P} = \frac{3}{5} Q \frac{\Delta r}{r} \delta S$$

Q は星の構造から決まるパラメータ
 $Q \sim -4$

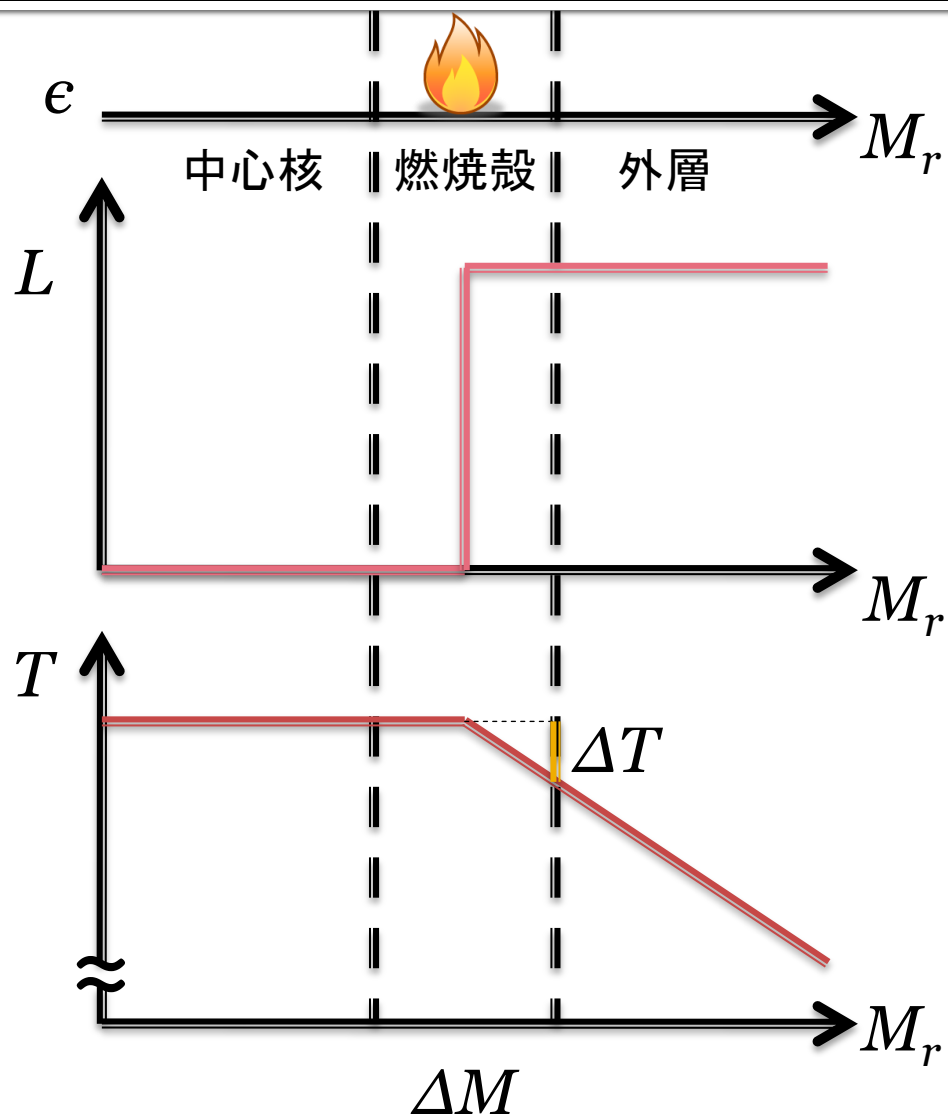
$\Delta r \ll r$ ならば $\delta P \ll P$ となり圧力変化小

- EOSより

$$\frac{\delta T}{T} = \frac{\delta P}{P} - \frac{\delta \rho}{\rho} = \frac{3}{5} \left(1 + \frac{2}{5} Q \frac{\Delta r}{r} \right) \delta S$$

よって $\frac{\Delta r}{r} < \frac{5}{2} \frac{1}{|Q|}$ のとき温度が上昇する。

燃烧殻の輻射モデル(定常解)



- 殻の中央だけで燃烧
- 光度 L_r と温度 T の分布は左のようになる。

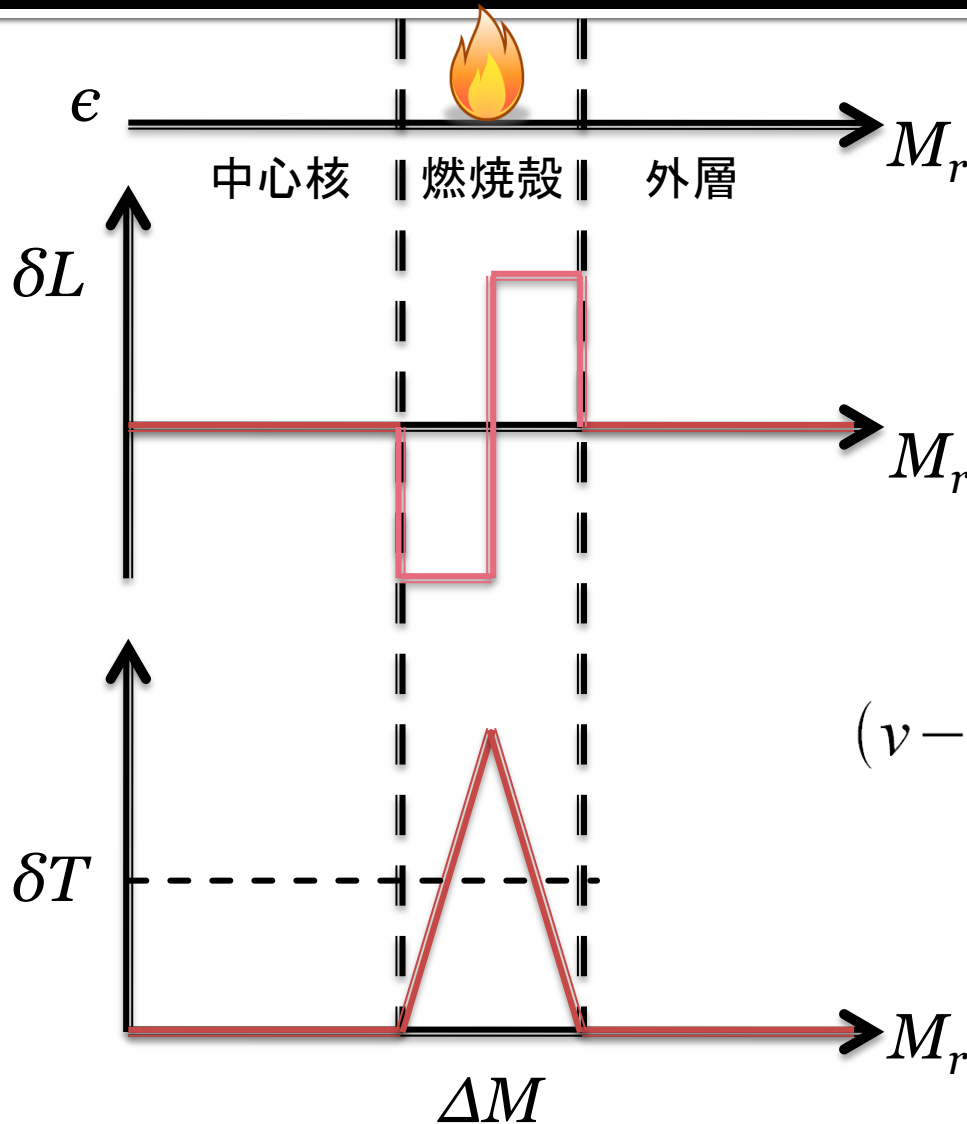
- エネルギー輸送の式より

$$L = (4\pi r^2)^2 \frac{4ac}{3} \frac{T^3}{\kappa} \frac{\Delta T}{\Delta M / 2}$$

- エネルギー式より

$$\epsilon = \frac{dL_r}{dM_r} \approx \frac{L}{\Delta M}$$

燃烧殻の輻射の変化



- 温度摂動を加えると
- 殻から流出する輻射が増え、冷却率が上がる。
- 核反応のエネルギー発生率が増加する。 $(\epsilon \propto T^\nu)$

■ すると、エネルギー式より

$$\left(\nu - 4 \frac{T}{\Delta T}\right) \frac{\delta T}{T} = \left(\frac{3}{2} \frac{P}{\rho} \frac{\Delta M}{L}\right) \frac{d}{dt} \delta S$$

■ よって

$$\frac{\Delta T}{T} > \frac{4}{\nu} \text{ のとき}$$

エントロピー増加

熱的不安定となる条件

- 膨張したときに温度が上昇するための条件

$$\frac{\Delta r}{r} < \frac{5}{2} \frac{1}{|Q|}$$

- 核反応の発熱が冷却を上回るための条件

$$\frac{\Delta T}{T} > \frac{4}{\nu}$$

p-pチェイン	$\nu \sim 4$
CNOサイクル	$\nu \sim 18$
He燃焼	$\nu \sim 26$

- ヘリウム燃焼殻は条件を満たす可能性あり

数値計算の結果

- より詳細に調べるため、数値計算を行った。
($M=1.0M_{\odot}$)

星の燃焼形式	熱的不安定性
水素殻燃焼	安定 (ν が小さい)
ヘリウム殻燃焼初期	安定 (r が小さい)
ヘリウム殻燃焼	不安定

実際に熱的不安定性が生じることがわかった。

⇒ヘリウム殻フラッシュ

まとめ

- AGB星の不安定性はヘリウム燃焼殻の熱的不安定性により生じる。
- 熱的不安定となるためには、燃焼殻が
 - 膨張したときに温度が上昇するように薄く
 - 核反応の発熱が冷却を上回るように厚くなければならない。