

宇宙物理学特論

巨星への進化

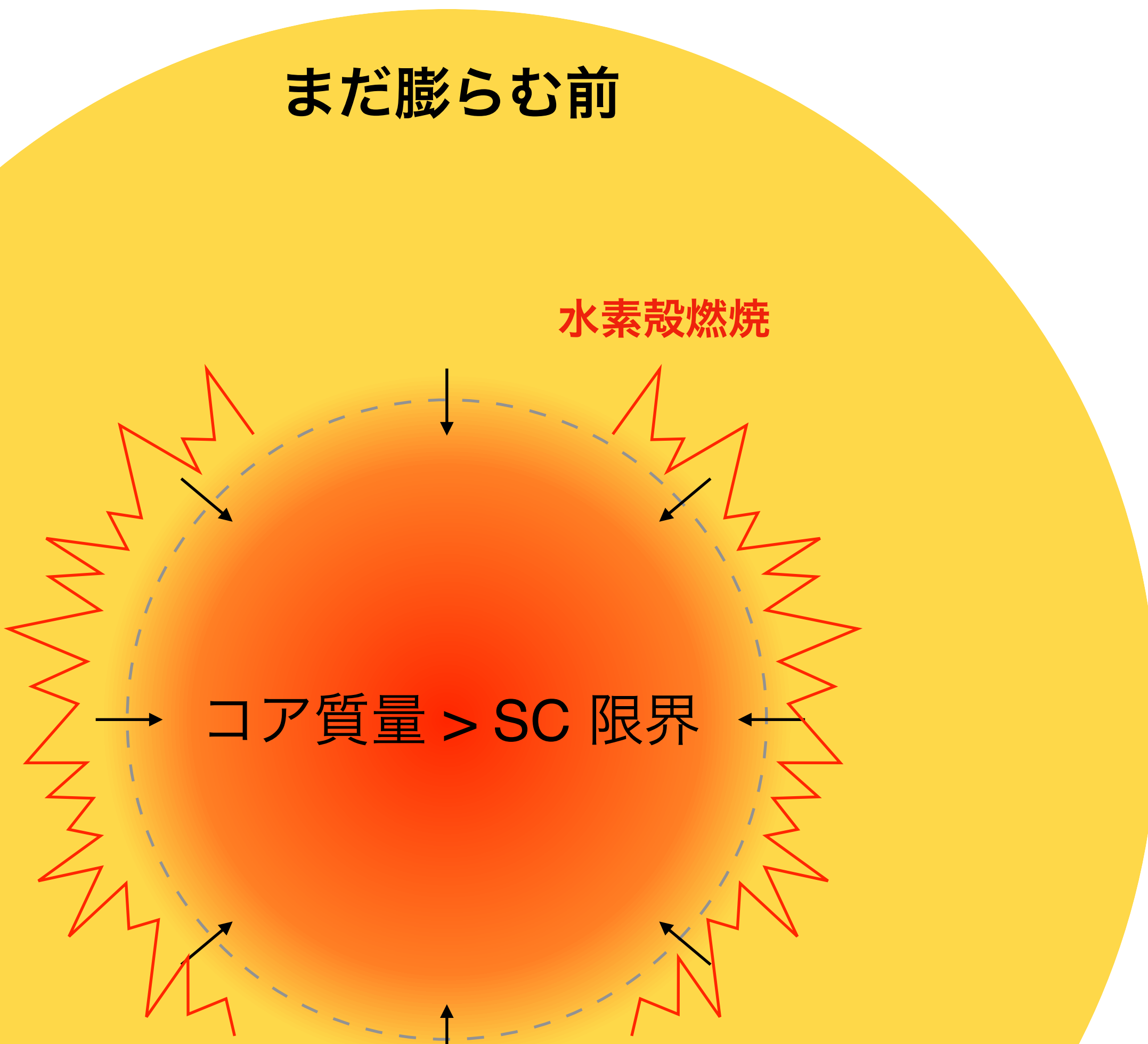
~なぜ、星は膨らむのか？~

中田 好一 氏 「ジャイアントの誕生」を参考にしています

<https://quasar.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/resei2014/20141129nakada.pdf>

主系列星から巨星へなぜ膨らむの？

コア質量がシェーンベルグ=チャンドラセカール質量を超えると、
コアは重力的に不安定になり潰れ始める事を学んだ



疑問点 「コアの外側も一緒に潰れる？」

実際は、コアだけが縮み、外層だけ
大きく膨らみ(超)巨星になる

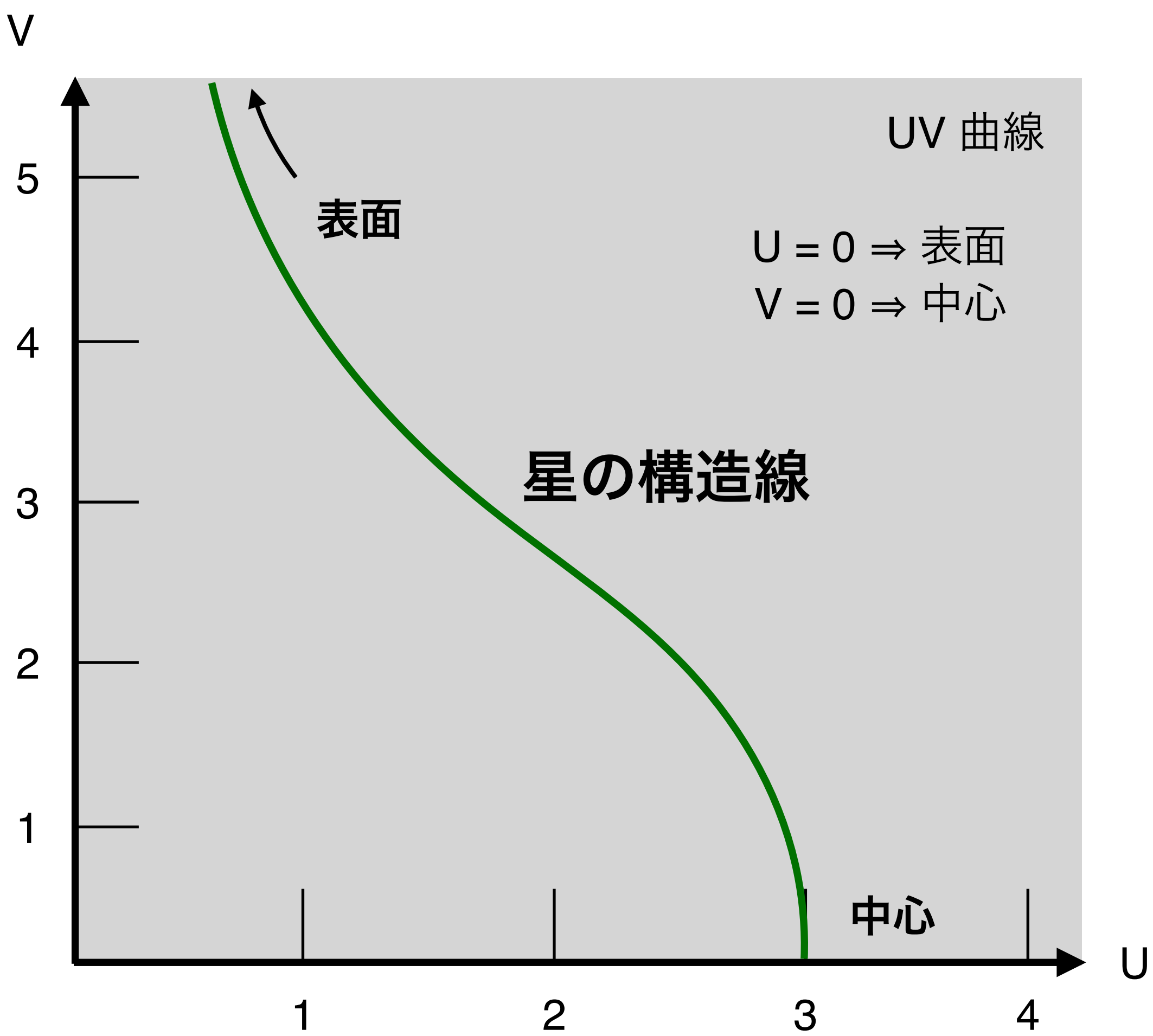
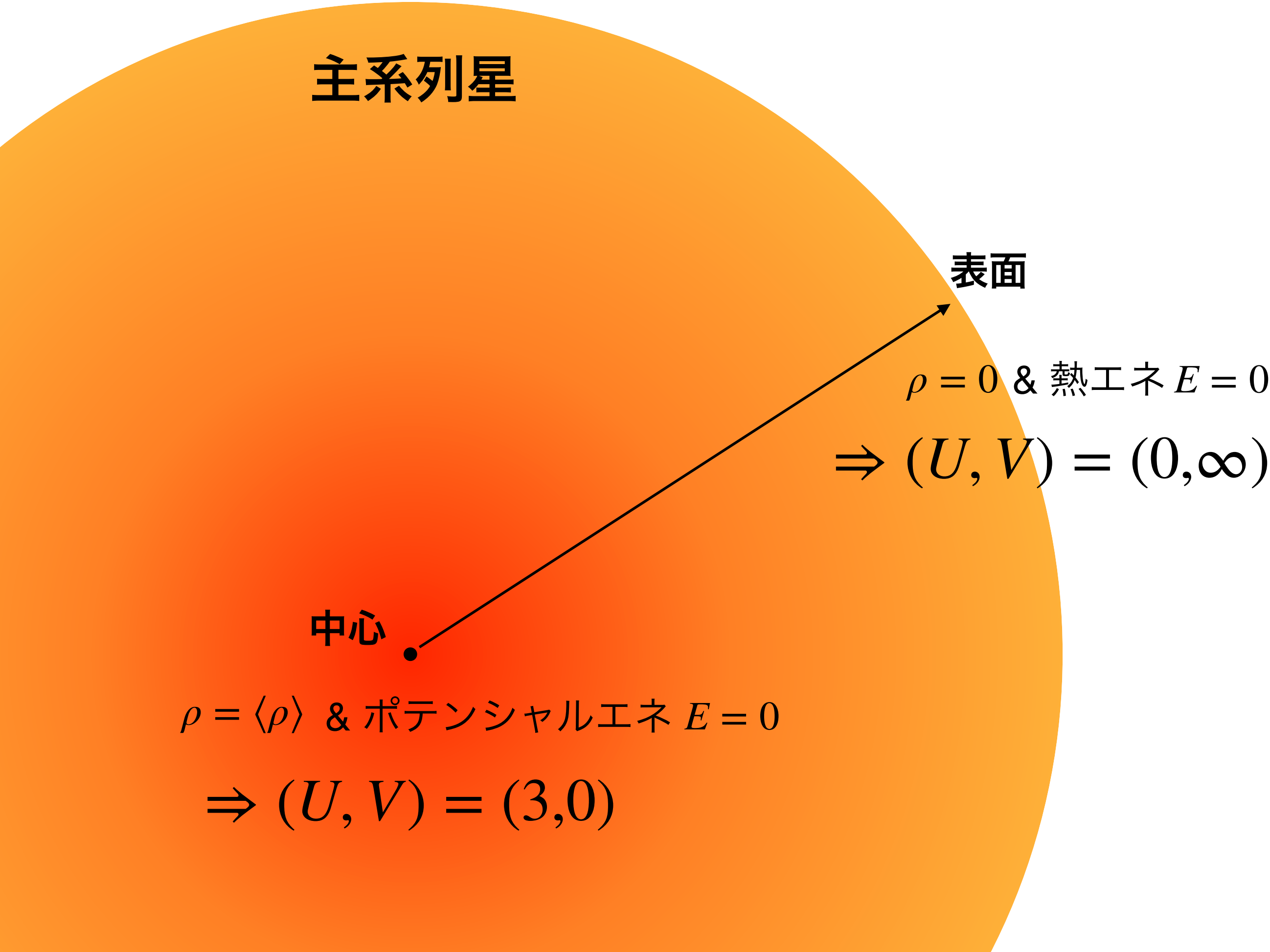
なぜ、巨星へと膨らむか考えてみましょう

(私自身も、巨星が膨らむ理由を考えるとよく分からなくて、旧 Twitter
で見かけたある議論を元に考えてみた内容を自分なりにまとめます)

巨星を UV 曲線で考えてみる

$$U \equiv \frac{4\pi r^3 \rho}{M_r} = \frac{3\rho}{3M_r/4\pi r^3} = 3\frac{\rho}{\langle \rho \rangle} = 3 \frac{\text{半径 } r \text{ での密度}}{\text{半径 } r \text{ の内側の平均密度}}$$

$$V \equiv \frac{GM_r \rho}{rP} = \frac{GM_r/r}{P/\rho} = \frac{3}{2} \frac{\text{半径 } r \text{ 内のポテンシャルエネルギー}}{\text{半径 } r \text{ での熱エネルギー}}$$

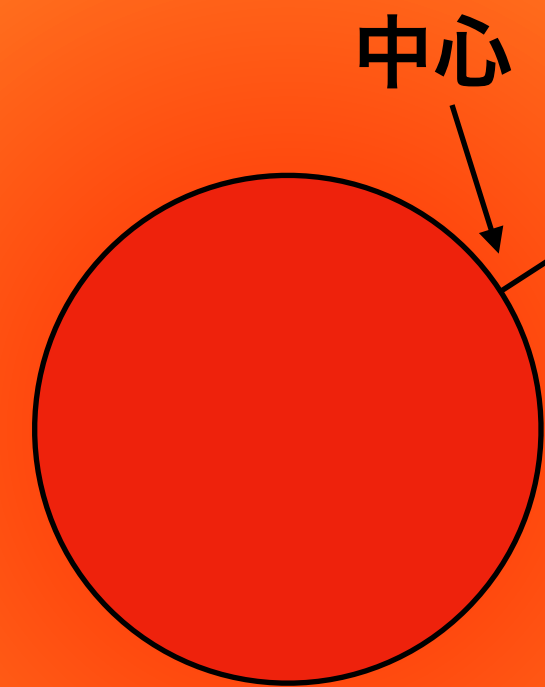


巨星を UV 曲線で考えてみる

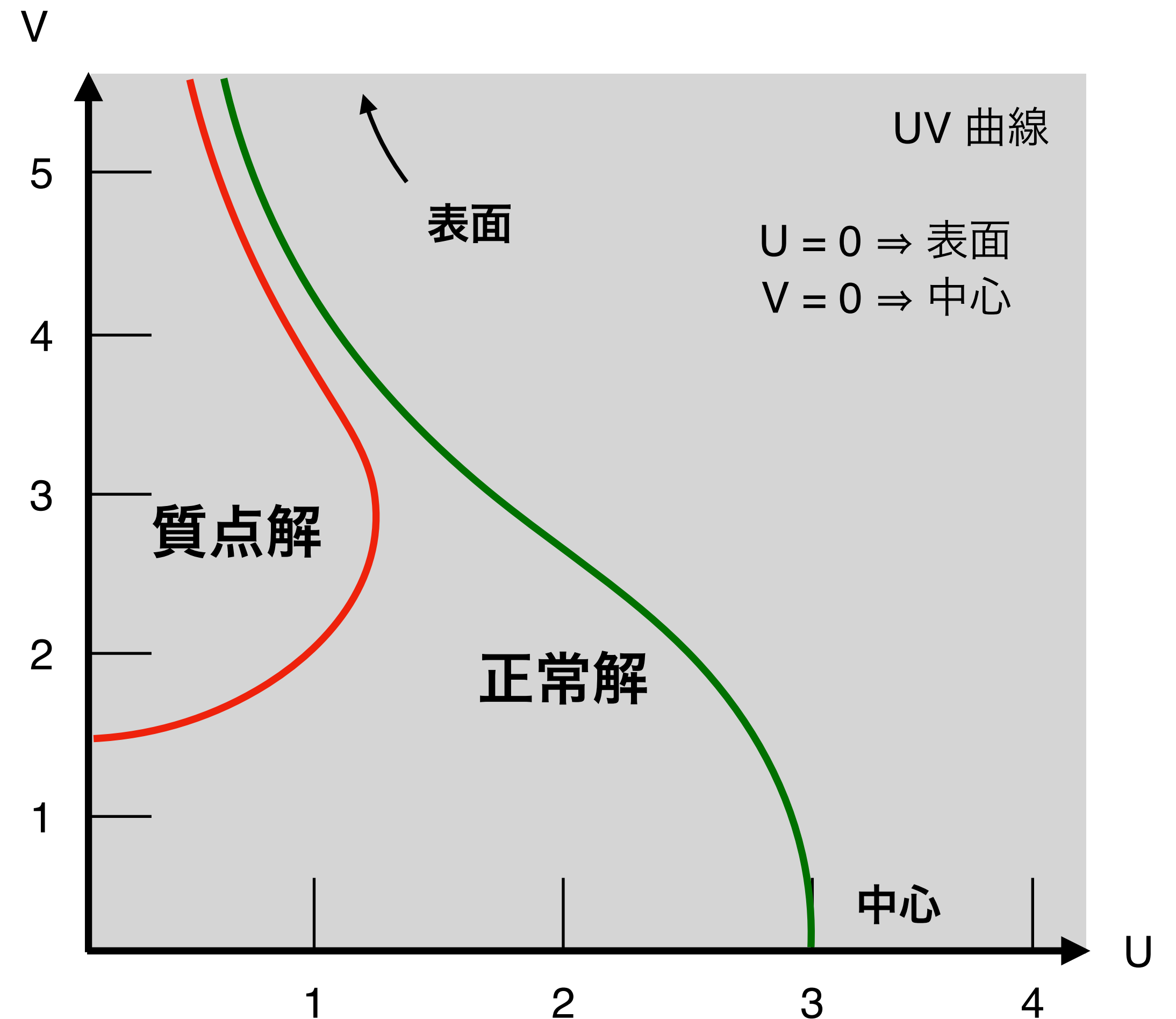
$$U \equiv \frac{4\pi r^3 \rho}{M_r} = \frac{3\rho}{3M_r/4\pi r^3} = 3 \frac{\rho}{\langle \rho \rangle} = 3 \frac{\text{半径 } r \text{ での密度}}{\text{半径 } r \text{ の内側の平均密度}}$$

$$V \equiv \frac{GM_r \rho}{rP} = \frac{GM_r/r}{P/\rho} = \frac{3}{2} \frac{\text{半径 } r \text{ 内のポテンシャルエネルギー}}{\text{半径 } r \text{ での熱エネルギー}}$$

質点解 (変な例①)



$r = 0$ なのにまだ
 M_r が残っている



巨星を UV 曲線で考えてみる

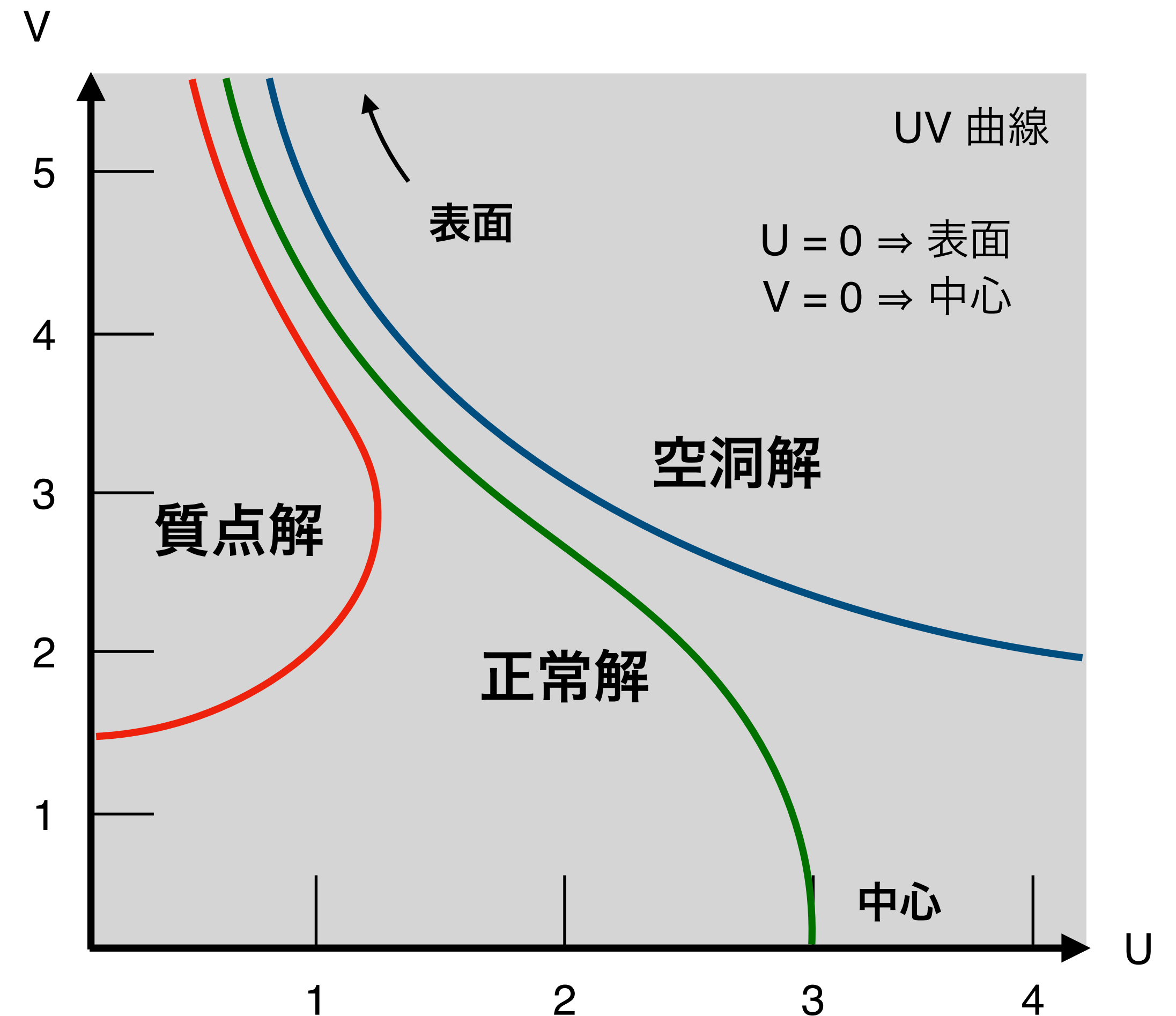
$$U \equiv \frac{4\pi r^3 \rho}{M_r} = \frac{3\rho}{3M_r/4\pi r^3} = 3 \frac{\rho}{\langle \rho \rangle} = 3 \frac{\text{半径 } r \text{ での密度}}{\text{半径 } r \text{ の内側の平均密度}}$$

$$V \equiv \frac{GM_r \rho}{rP} = \frac{GM_r/r}{P/\rho} = \frac{3}{2} \frac{\text{半径 } r \text{ 内のポテンシャルエネルギー}}{\text{半径 } r \text{ での熱エネルギー}}$$

空洞解 (変な例②)

中心

$r = 0$ になる前に
 M_r がゼロになる
(星に空洞がある)

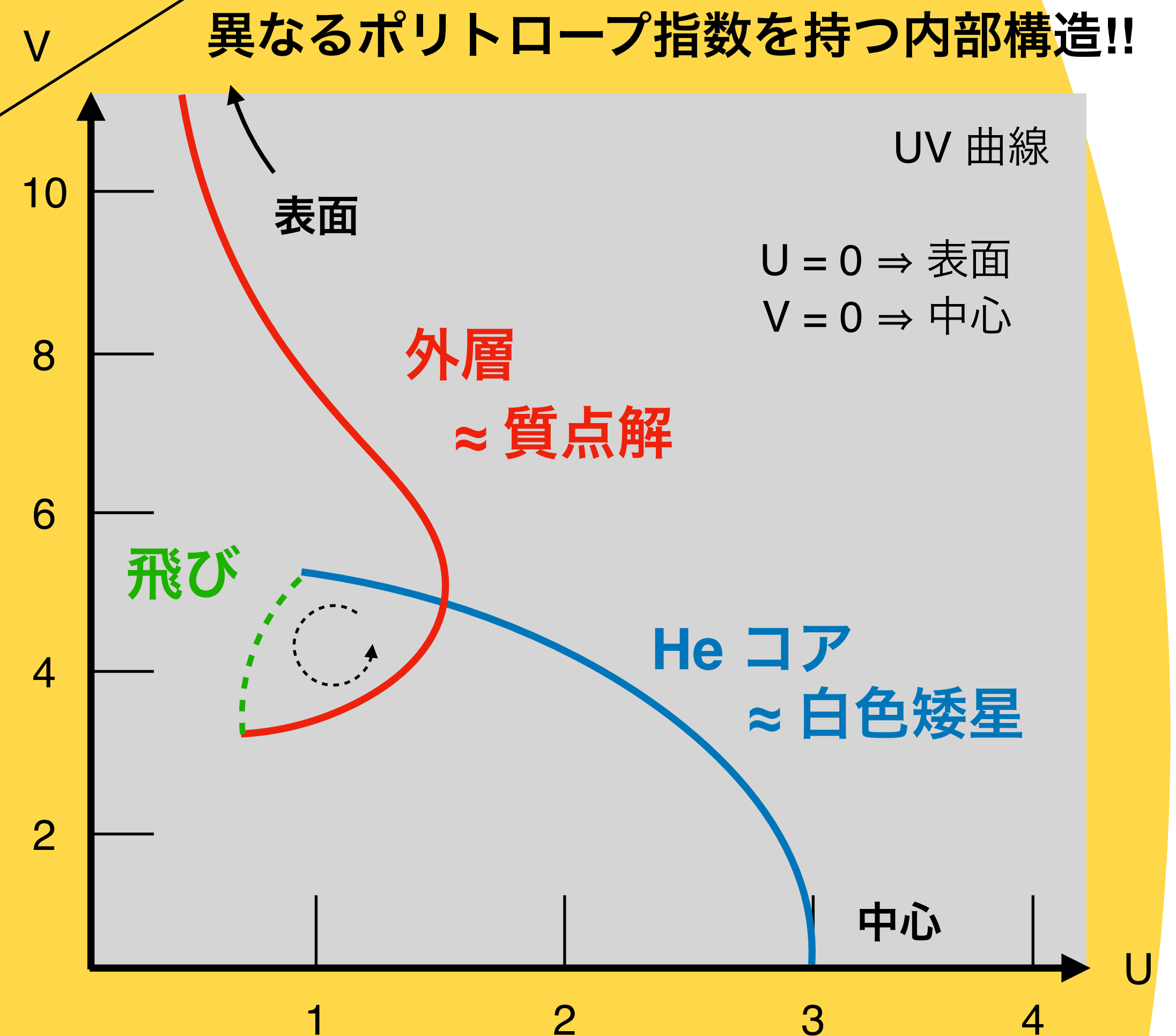
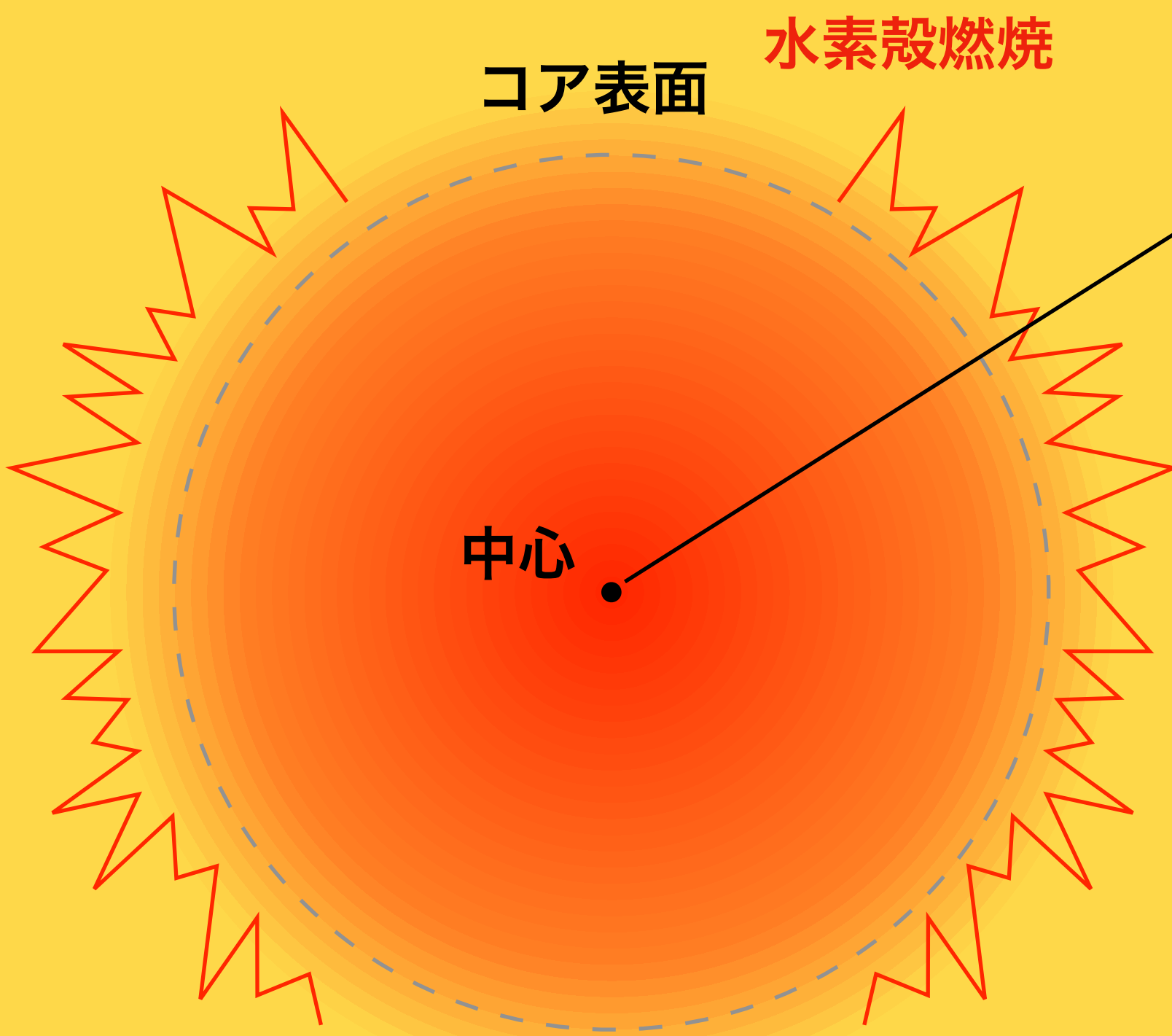


巨星を UV 曲線で考えてみる

$(U, V) = (3, 0)$ から $(U, V) = (0, \infty)$ へと伸びていくものの

コアと外層の境界で**不連続な“飛び”**(ループ)が生じる

⇒ では、なぜこんな構造になるのか？



巨星を UV 曲線で考えてみる

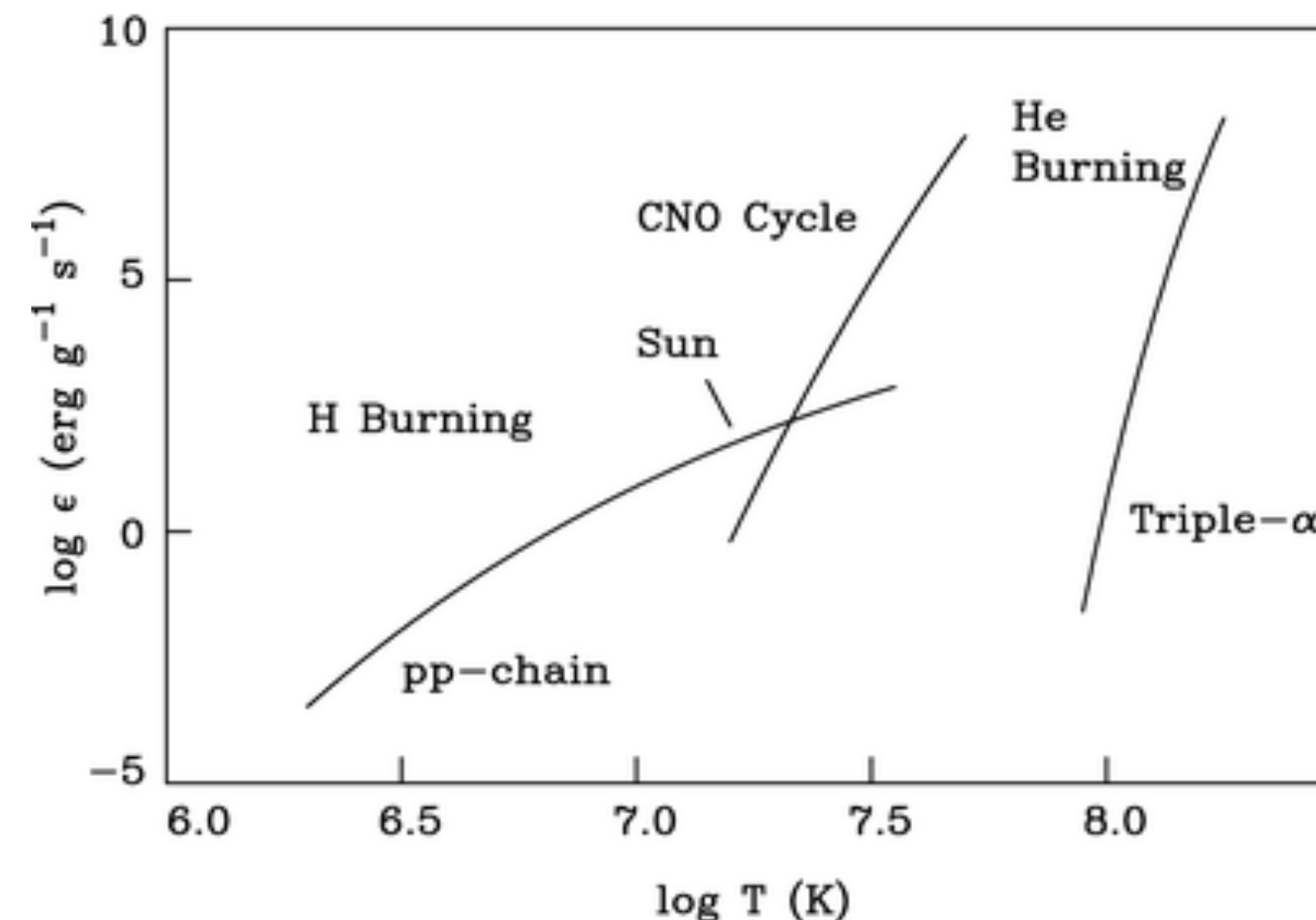
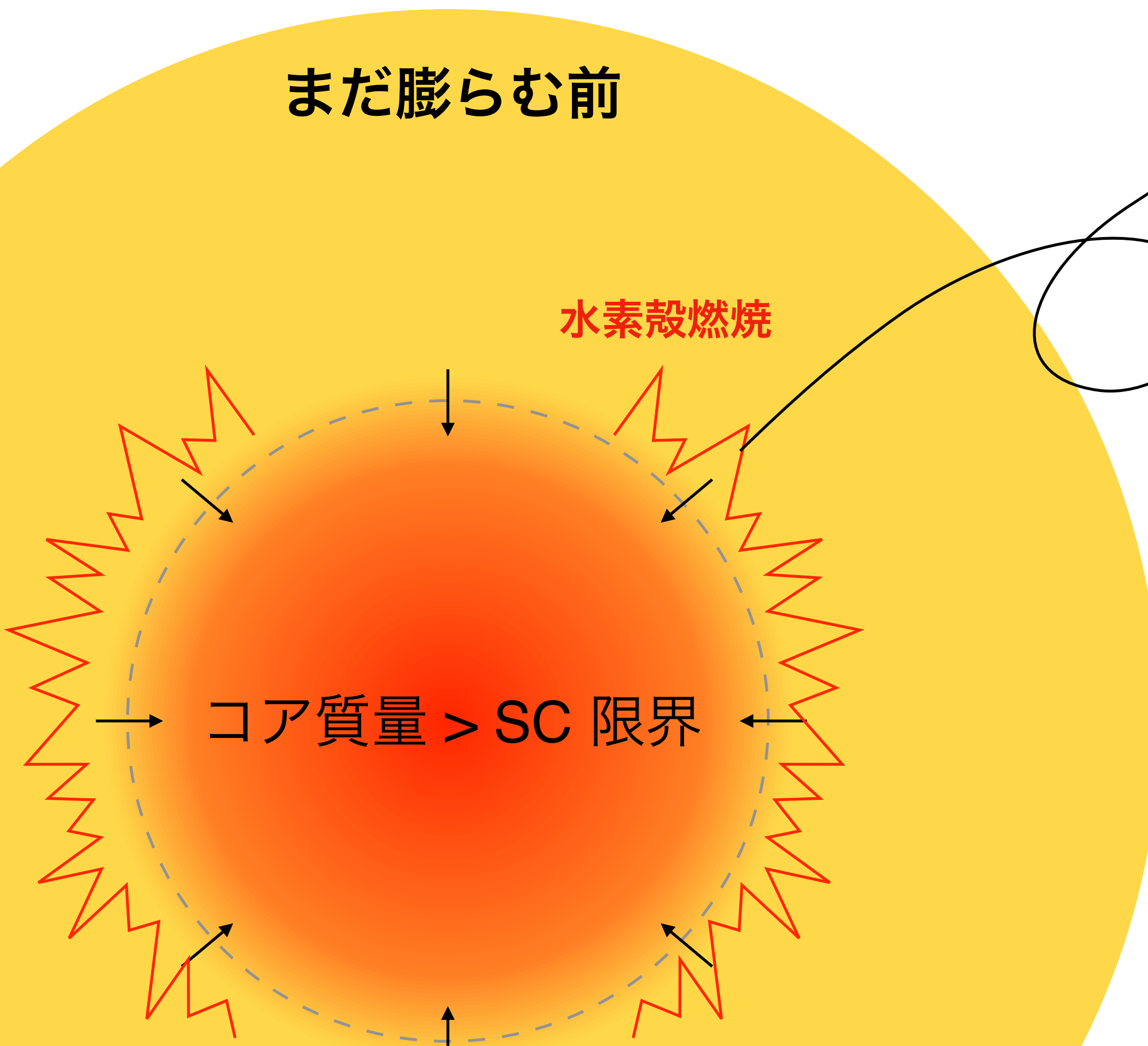
CNO cycle がメイン!!

水素燃焼殻 (H-burning shell)

殻 (= shell) の温度・密度はおおよそ一定に保たれる

これは、**水素燃焼の強い温度依存性**のため

温度が変化すると、核融合からのエネルギー供給は激変して、星が支えられなくなる



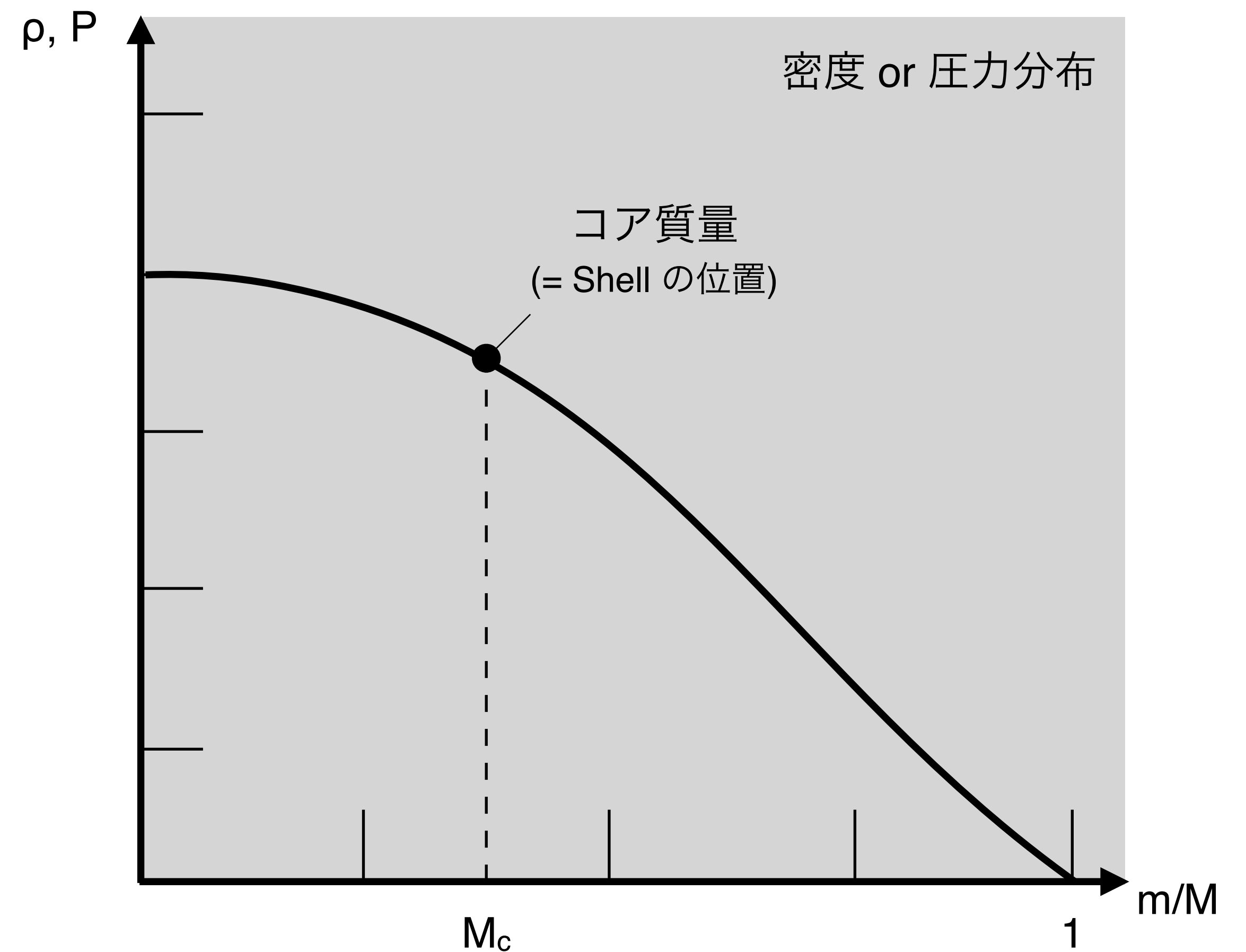
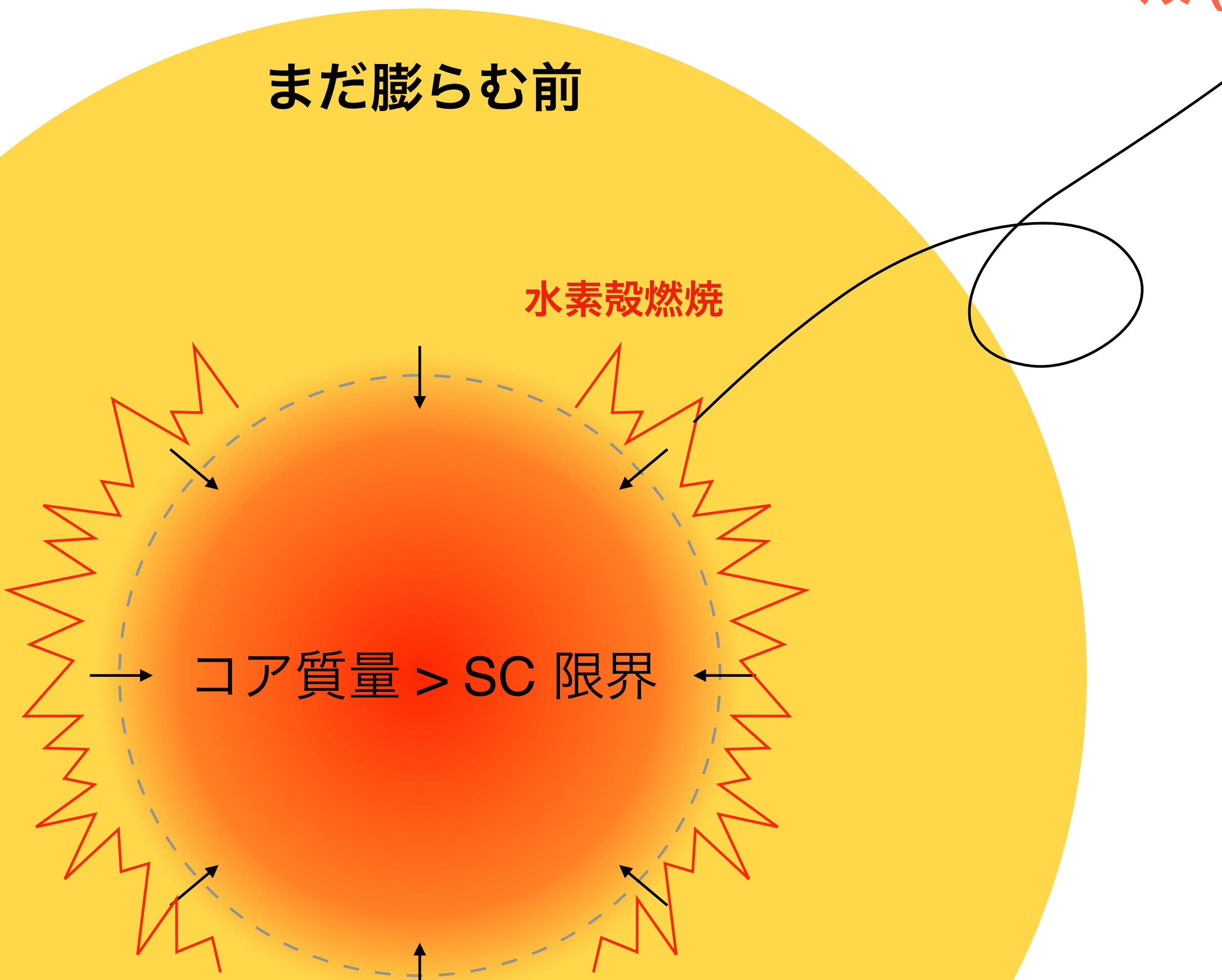
$$\epsilon \propto T^{\sim 15-20}$$

~5% の温度変化
⇒ 2倍以上のエネルギー

シェル付近の力学平衡を考える

水素燃焼殻 (H-burning shell)

殻 (= shell) の温度・密度はおおよそ一定に保たれる



シェル付近の力学平衡を考える

力学平衡

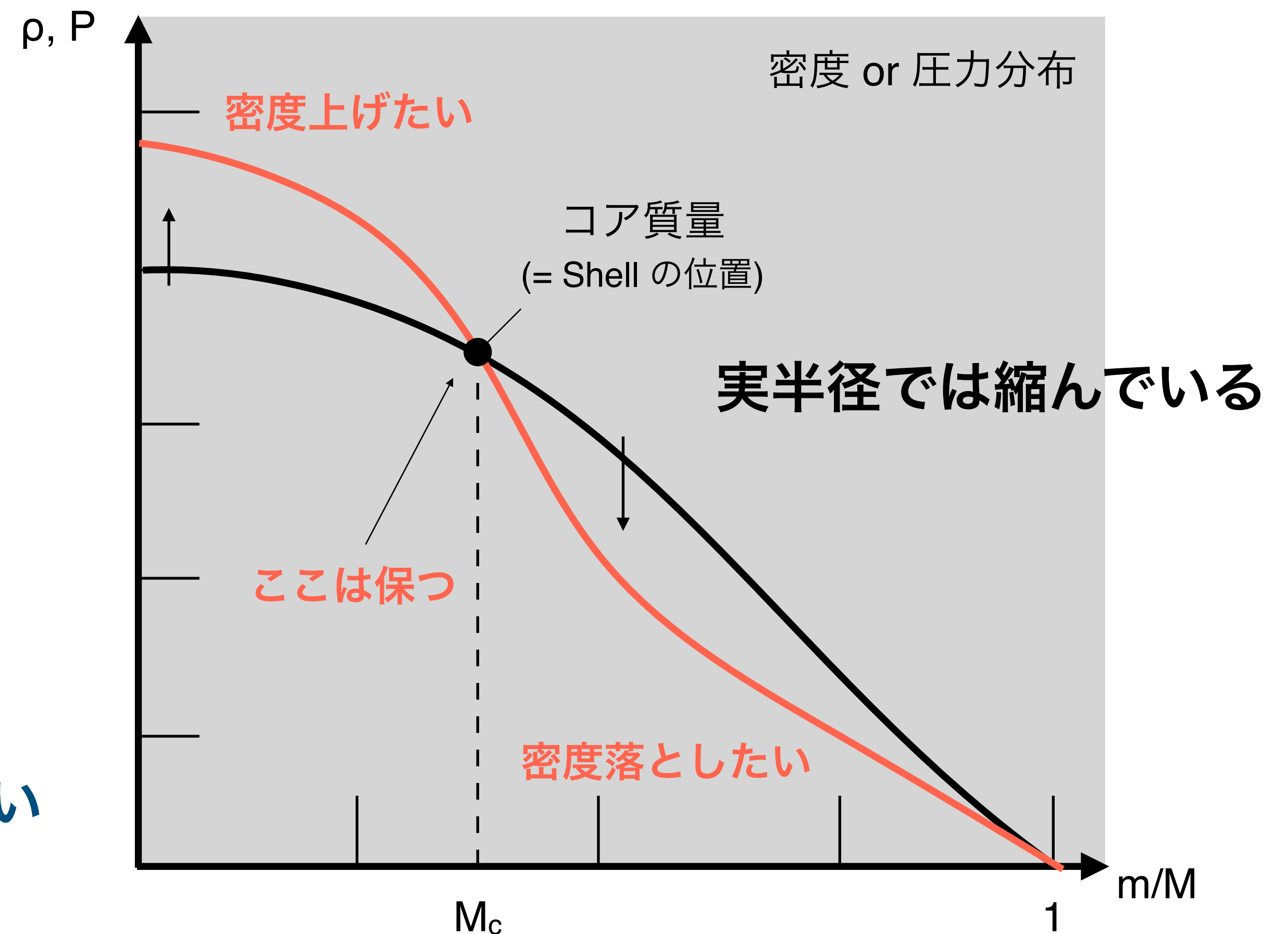
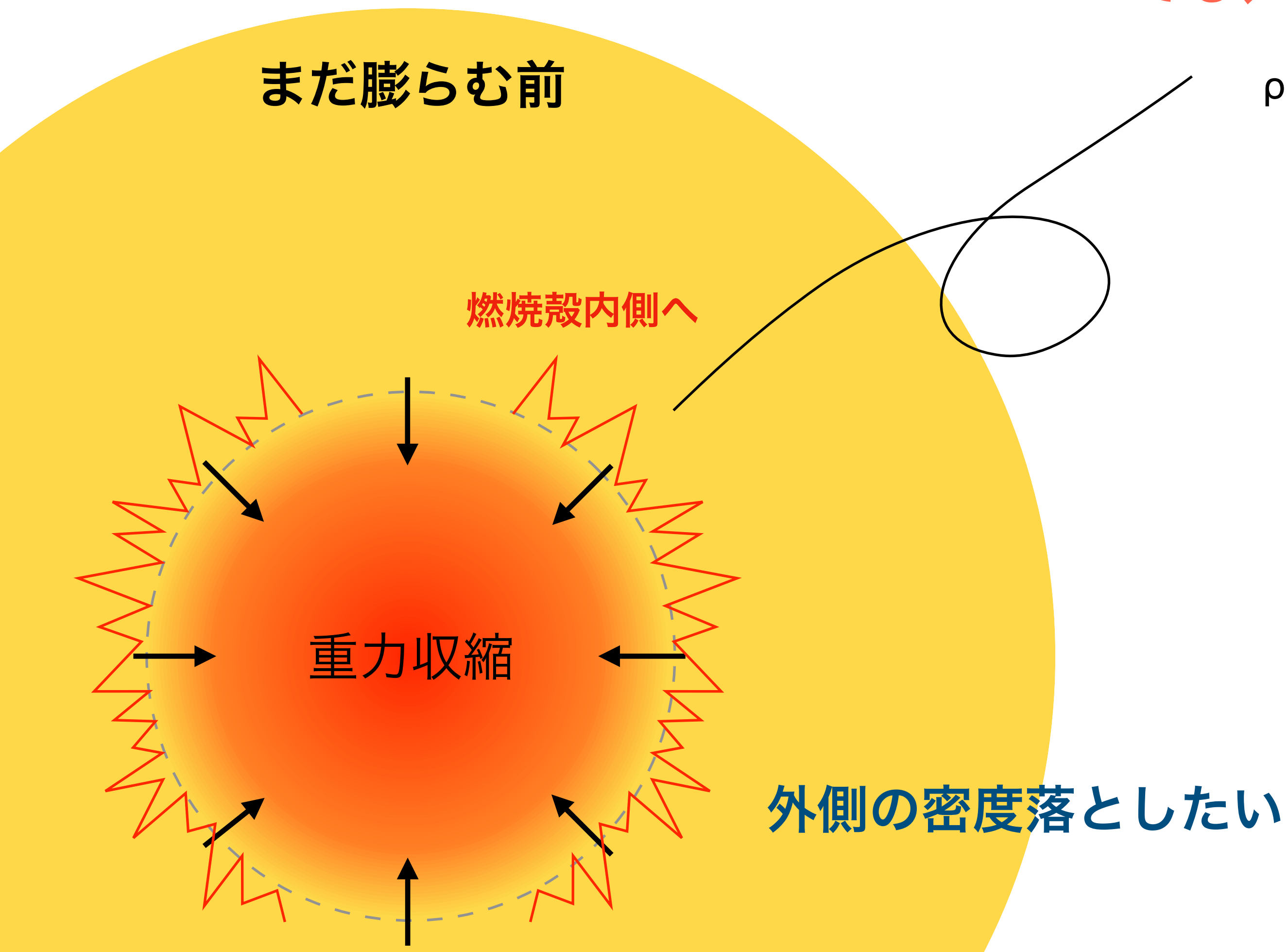
$$\frac{dP}{dr} = - \frac{GM_r}{r^2} \rho$$

圧力勾配 重力

燃焼殻が中心へ沈む

⇒ Shell の位置で**重力大 = 圧力勾配大**

でも、殻 (= shell) の温度・密度はまだ一定に保つ



シェル付近の力学平衡を考える

力学平衡

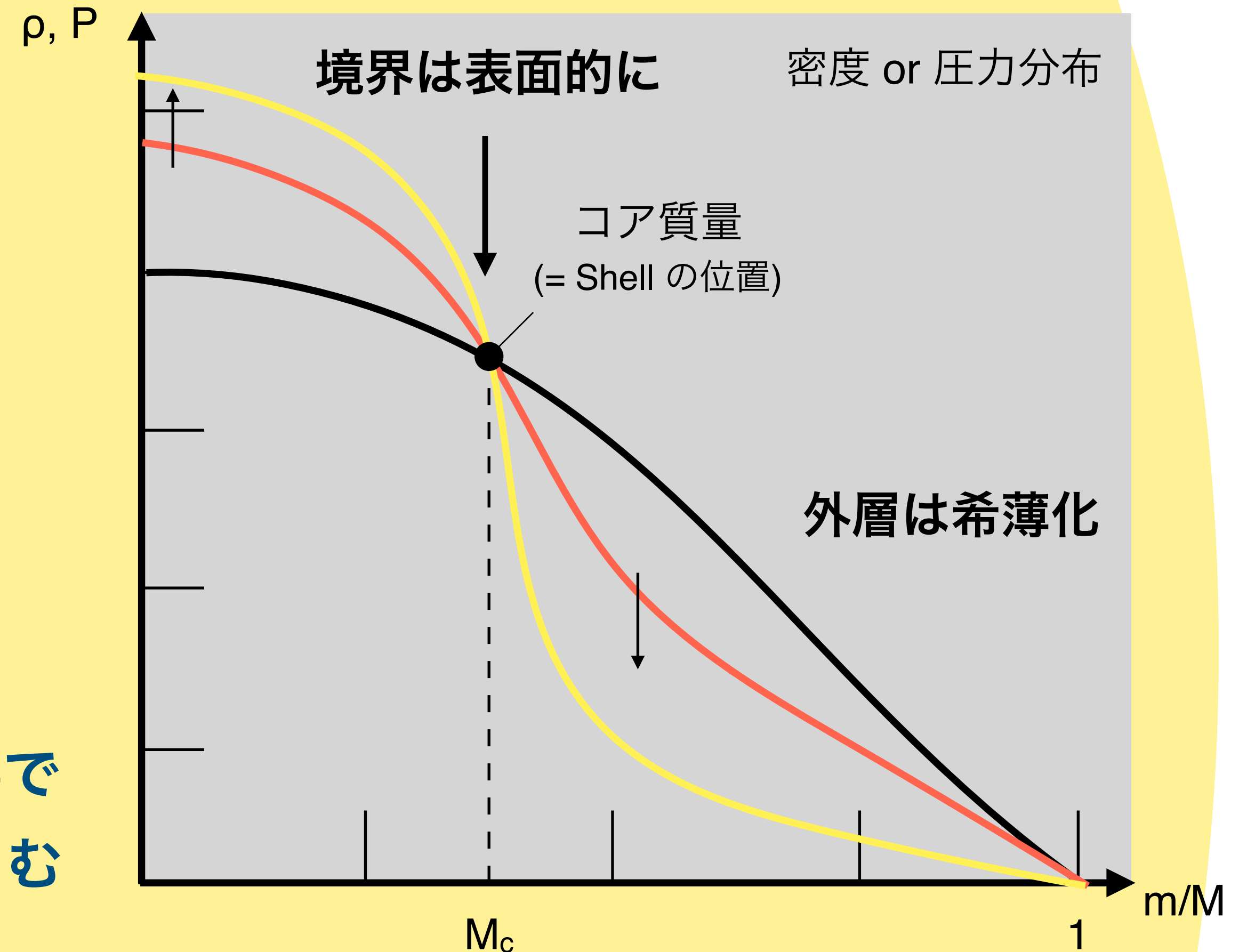
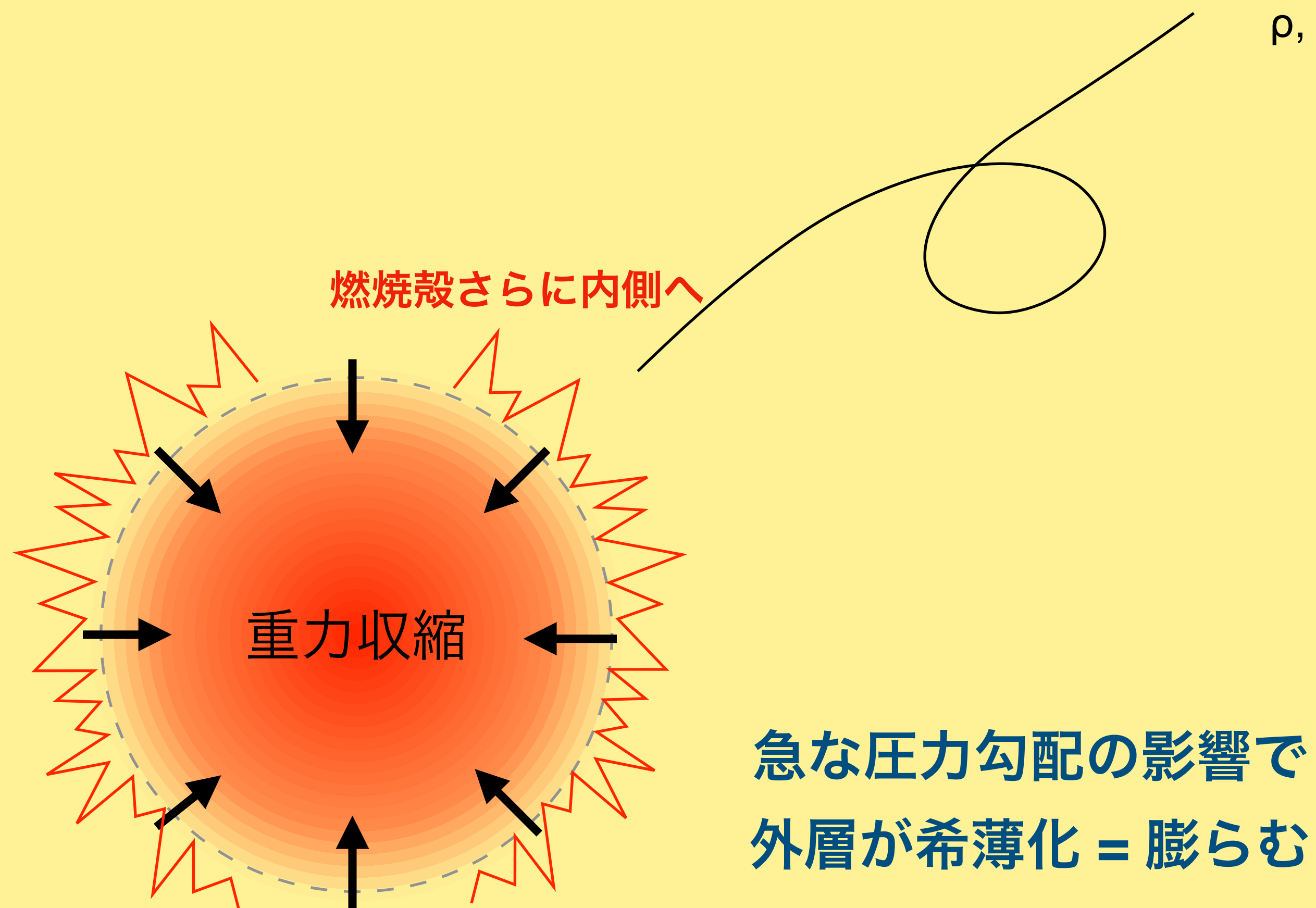
$$\frac{dP}{dr} = - \frac{GM_r}{r^2} \rho$$

圧力勾配 重力

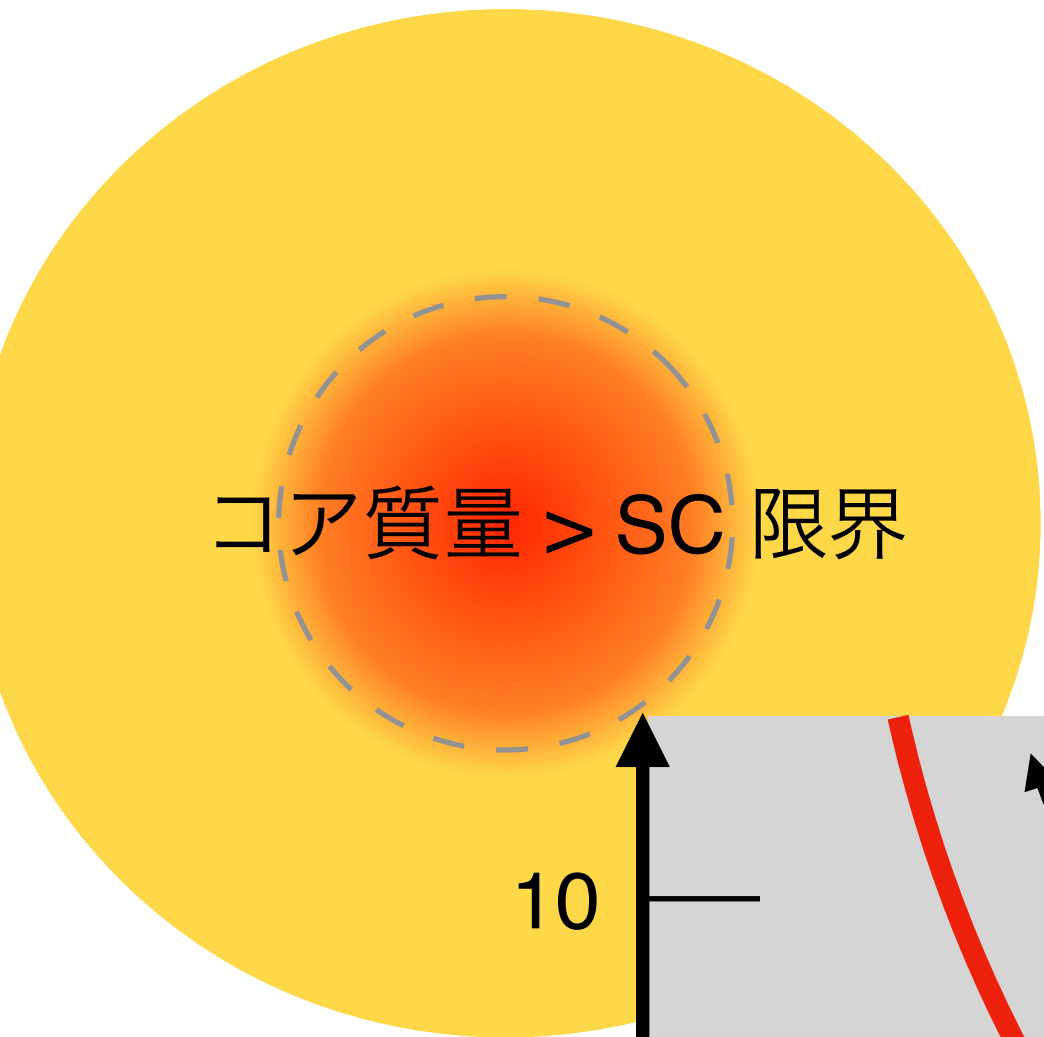
燃焼殻が中心へ沈む

⇒ Shell の位置で**重力大 = 圧力勾配大**

でも、殻 (= shell) の温度・密度はまだ一定に保つ

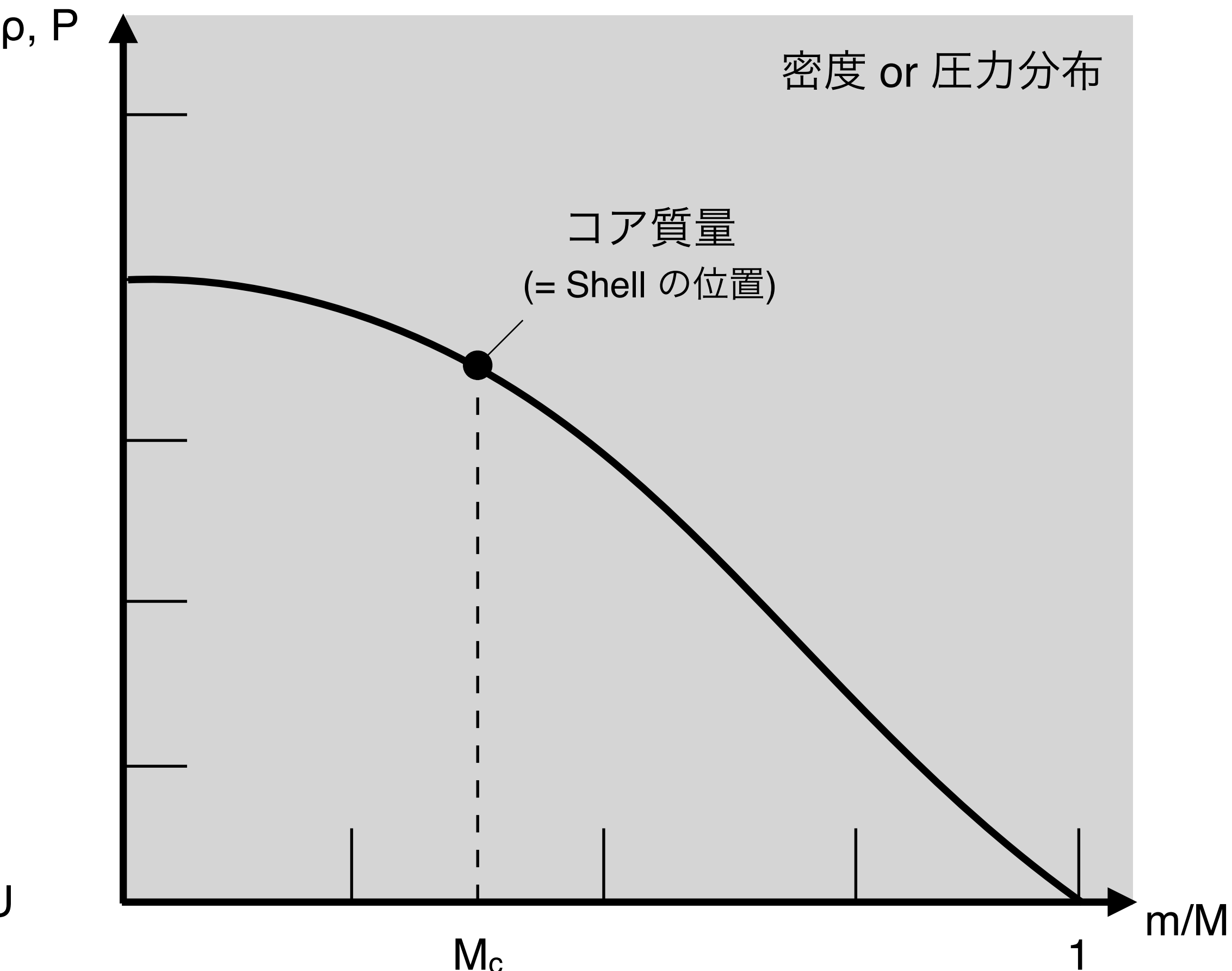
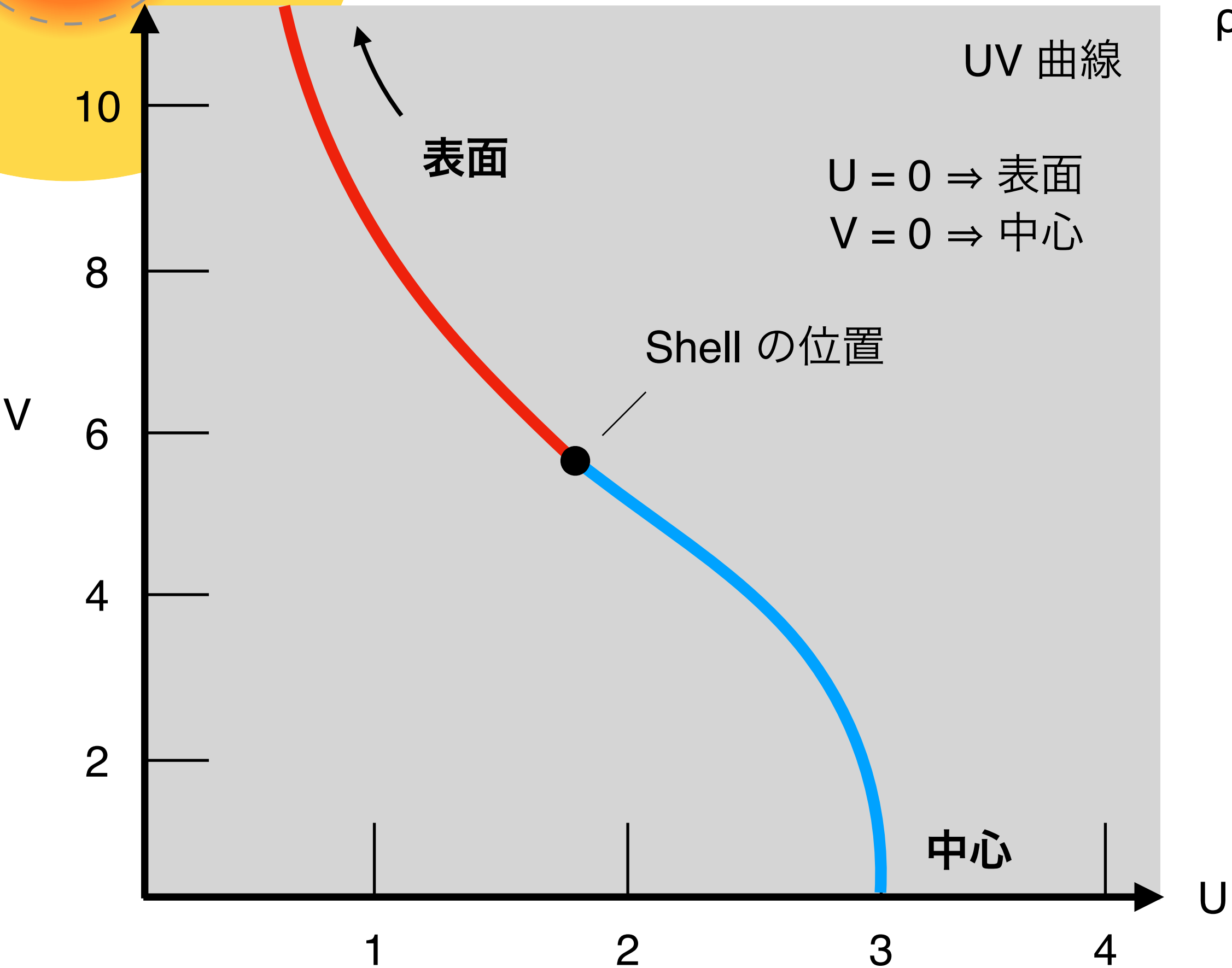


もう一度 UV 曲線で考えてみる



コア収縮前: 主系列星の滑らかな内部構造

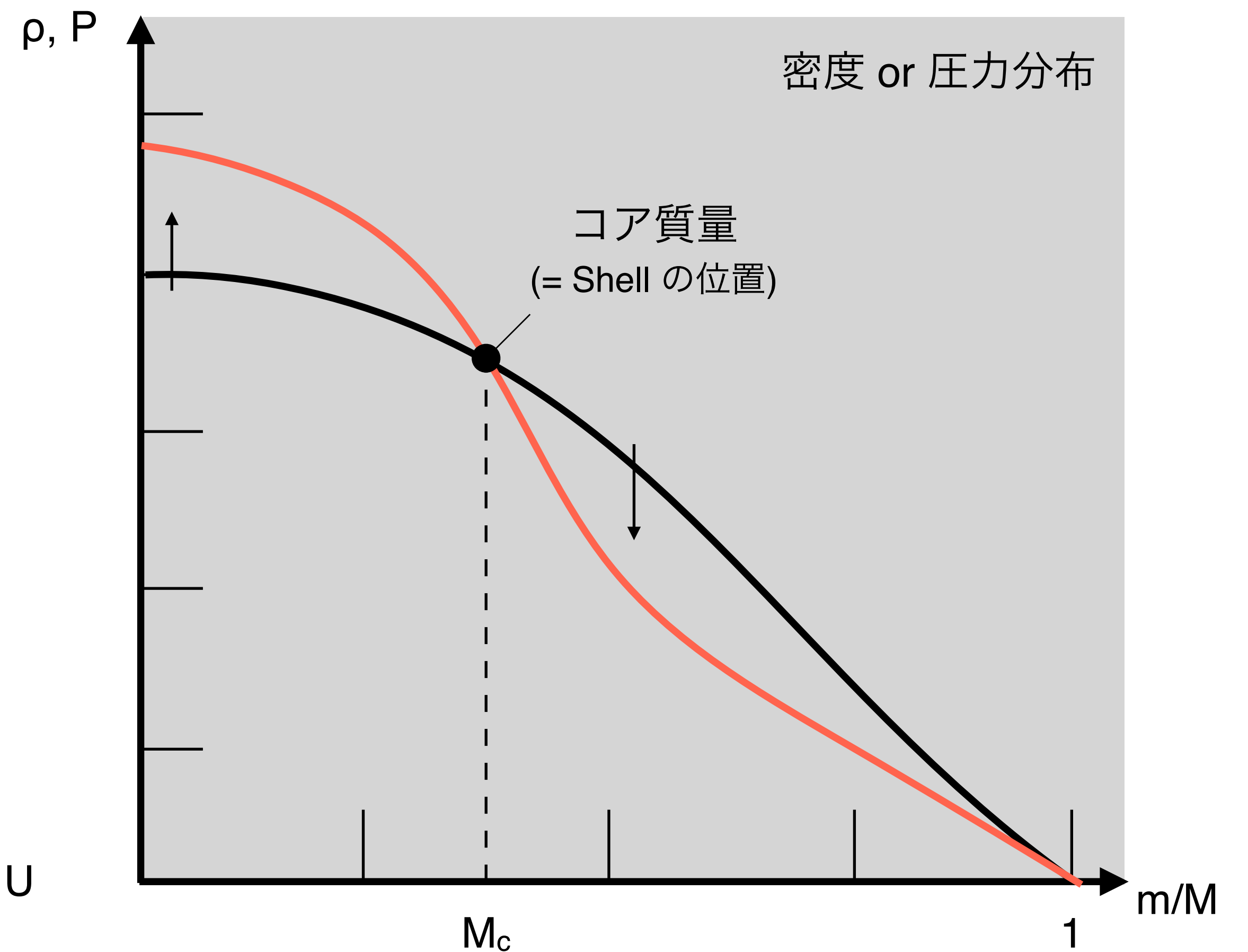
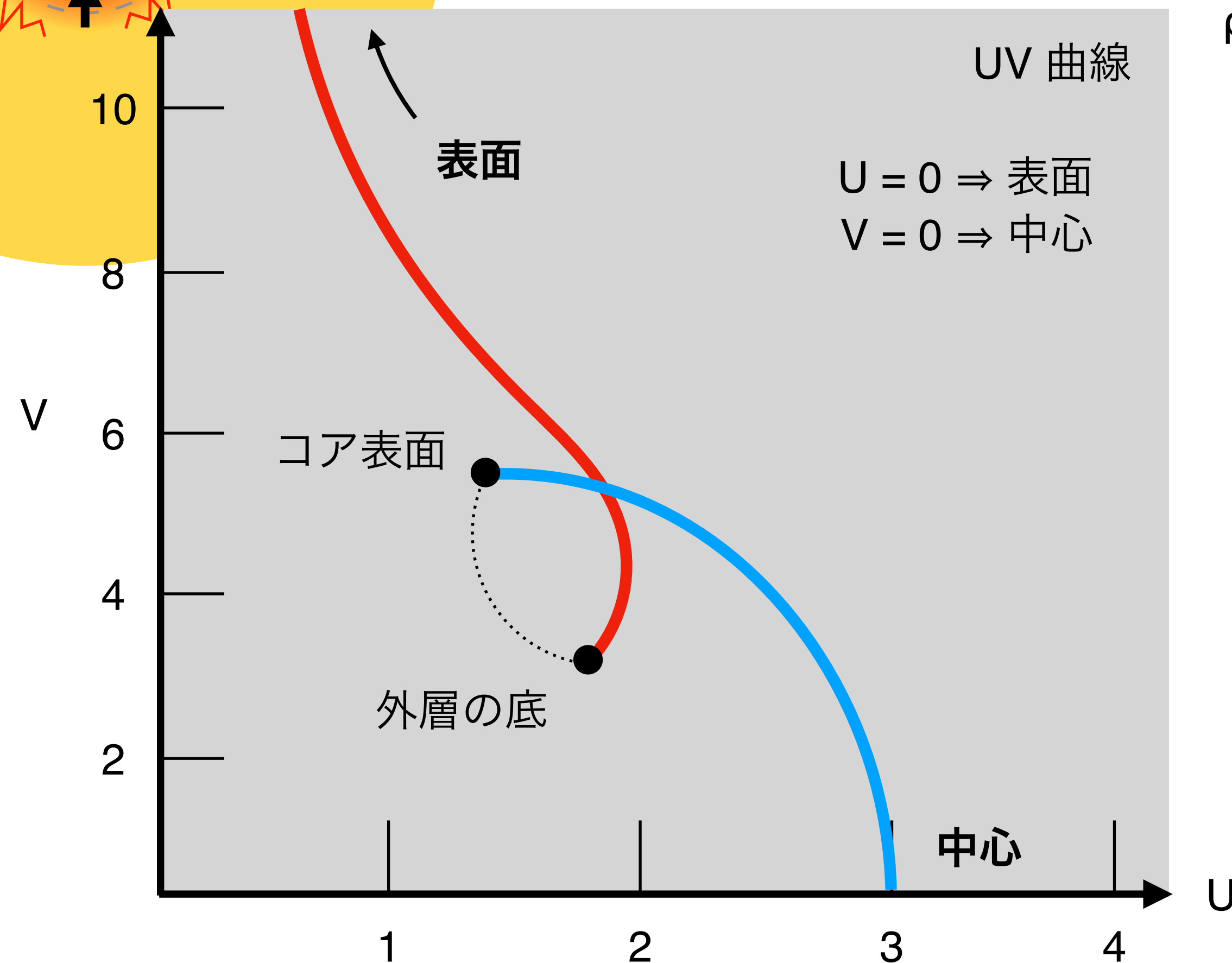
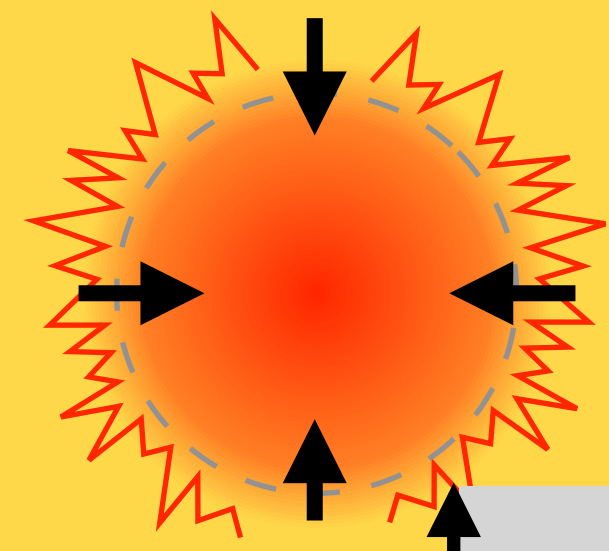
UV 曲線に飛びやループ構造がなく「正常解」な曲線



もう一度 UV 曲線で考えてみる

水素燃焼シェルを境界に「コア-外層」の異なる構造へ

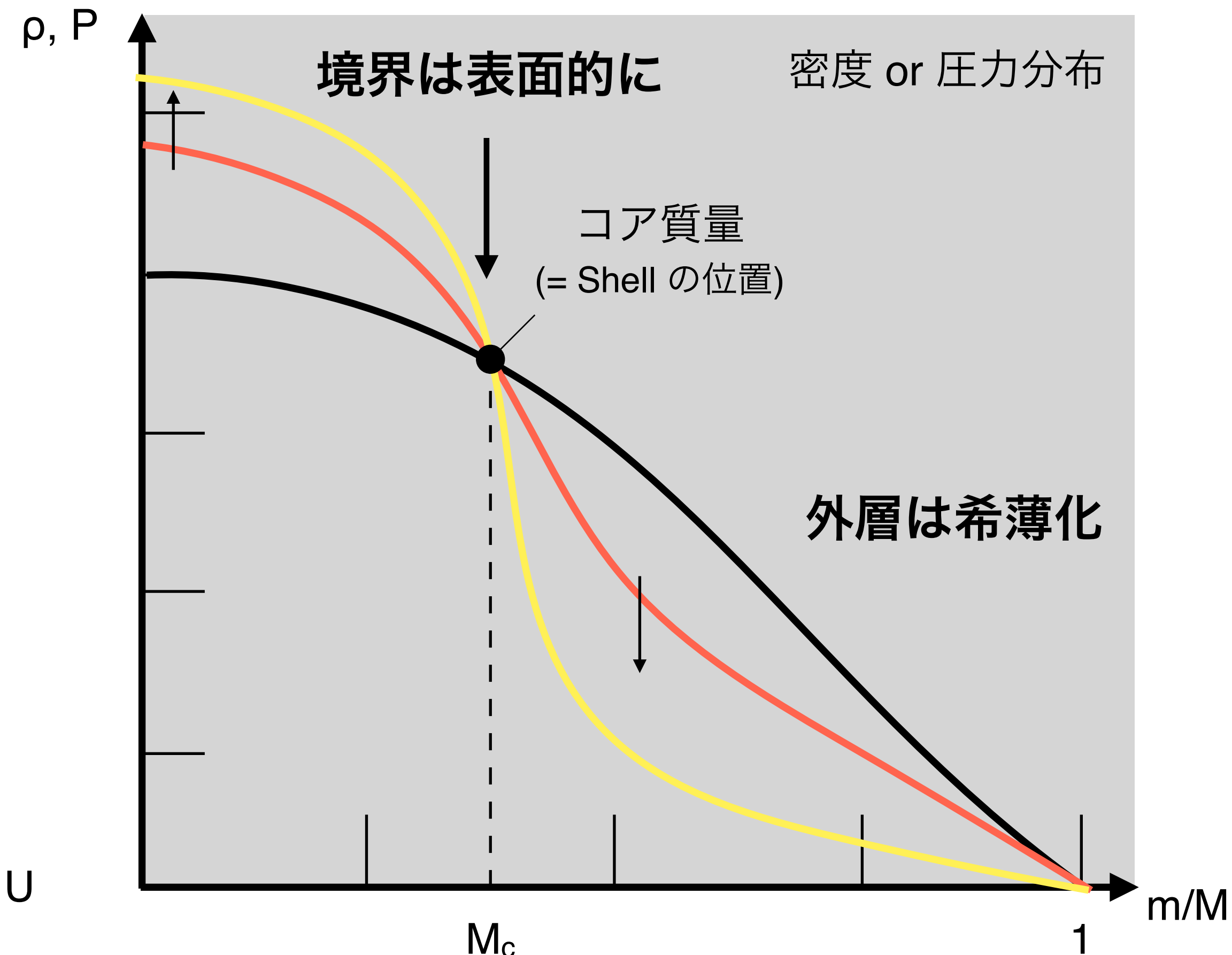
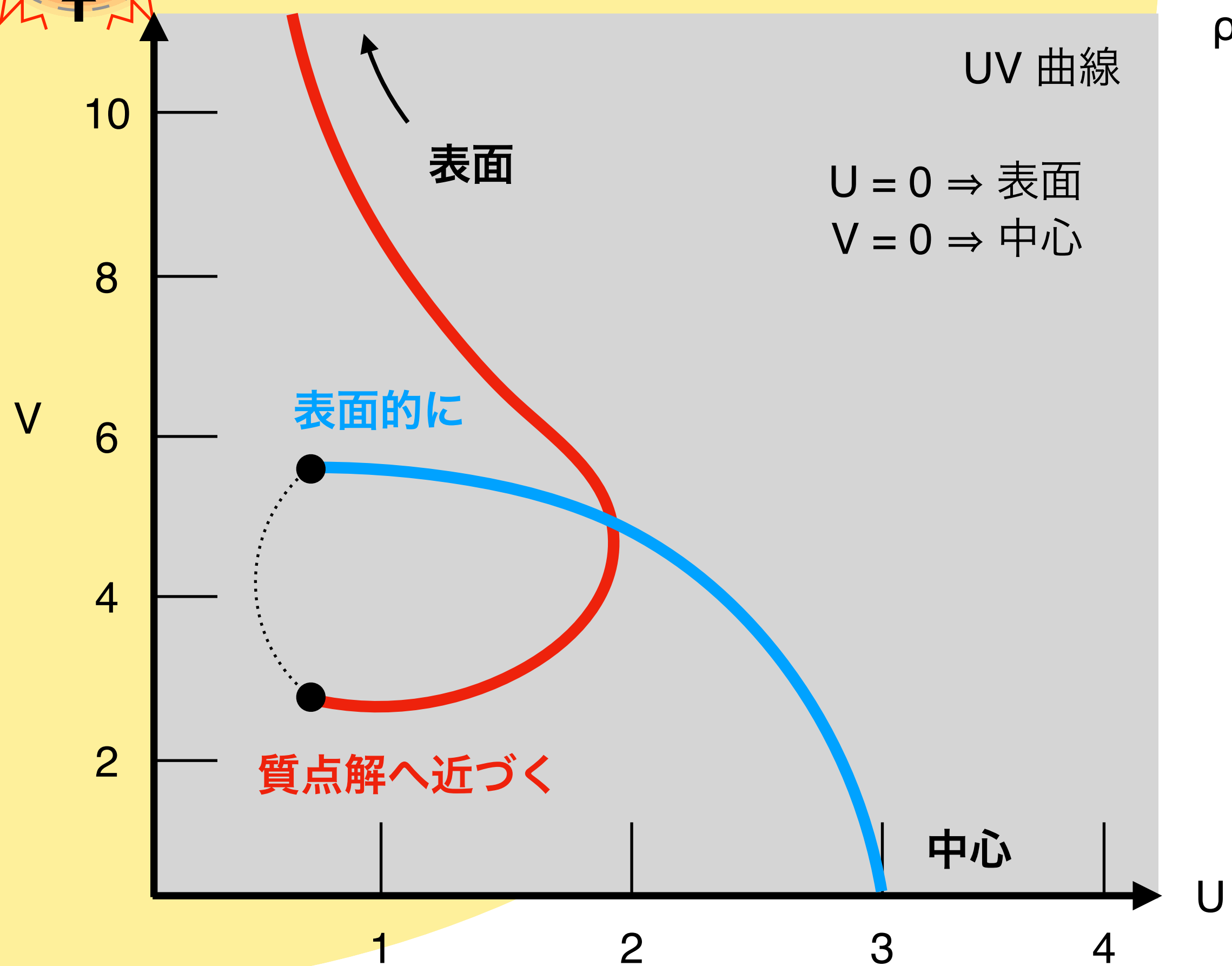
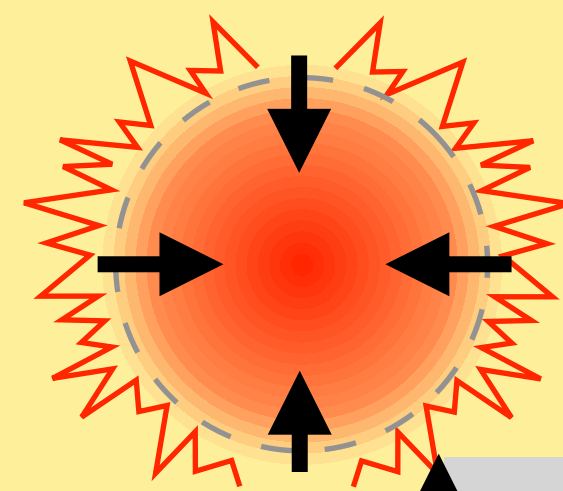
シェルが内側に沈み、重力を増し、圧力勾配が急になる



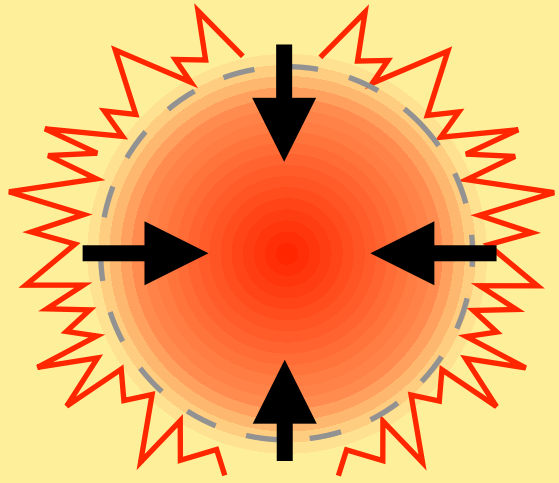
もう一度 UV 曲線で考えてみる

中心コアの外側は表面的に、外層の底は希薄に

結果として、コアの収縮と共に外層が大きく膨張する



まとめ



1. 水素燃焼シェルでは温度・密度がほぼ一定に保たれ進行
2. コアは収縮し、燃焼シェルも内側へ落ち込む
3. シェルの位置での重力が増し、圧力勾配が大きく
4. シェル付近の急な圧力勾配で外側 (外層) の密度が落ちる
5. 外層が膨らむ

その他 参考文献, 資料

“Why stars become red giants” Sugimoto & Fujimoto (2000), ApJ, 538:837-853

“Stellar structure and evolution” by Sugimoto, https://www.cps-jp.org/~pschool/pub/2011-01-10/01_Sugimoto/lecture2/pub/20110111_sugimoto_02.pdf