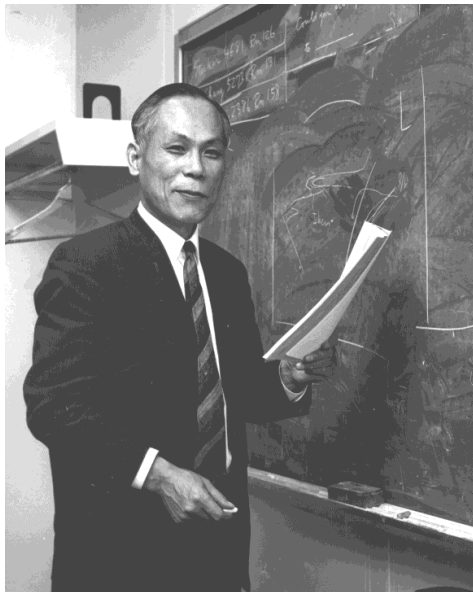


ビッグバン元素合成補足

- ビッグバン元素合成では，水素・ヘリウムとわずかなリチウムを合成できる
- ビッグバン元素合成は，太陽系元素存在度の水素とヘリウムの量を説明できる



林忠四郎 (1920-2010)

ビッグバン元素合成理論は
 $\alpha\beta\gamma$ -林理論とも呼ばれる

- Alpher, R. A.; Bethe, H.; Gamow, G. (1 Apr. 1948), “The Origin of Chemical Elements”, *Physical Review*.
- Hayashi, C. (1950), “Proton-Neutron Concentration Ratio in the Expanding Universe at the Stages Proceeding the Formation of the Elements”, *Prog. Theor. Phys.*

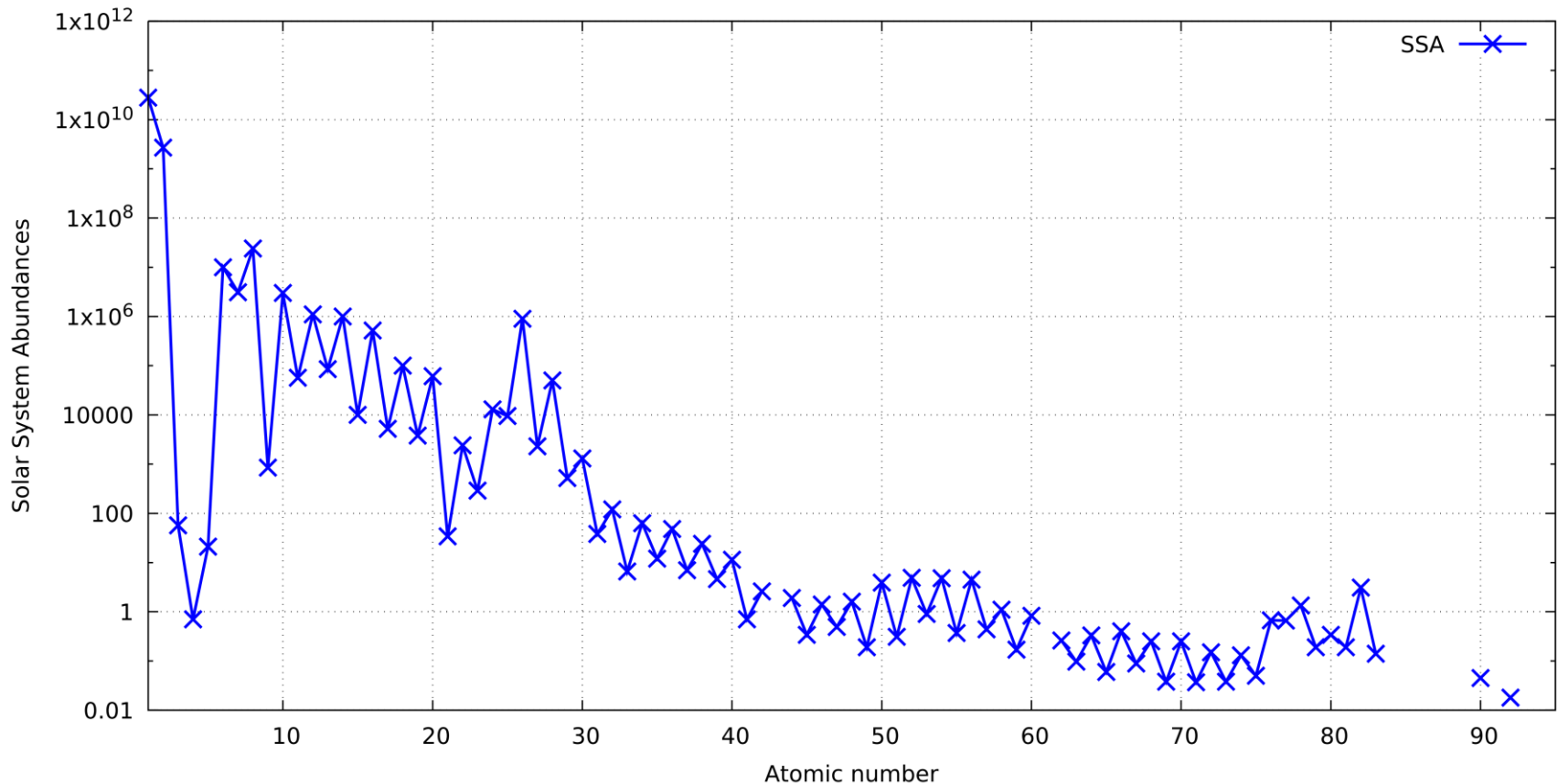
宇宙元素存在度

～太陽系を作った元素たち～

宇宙元素存在度

太陽系元素存在度 Solar system abundance

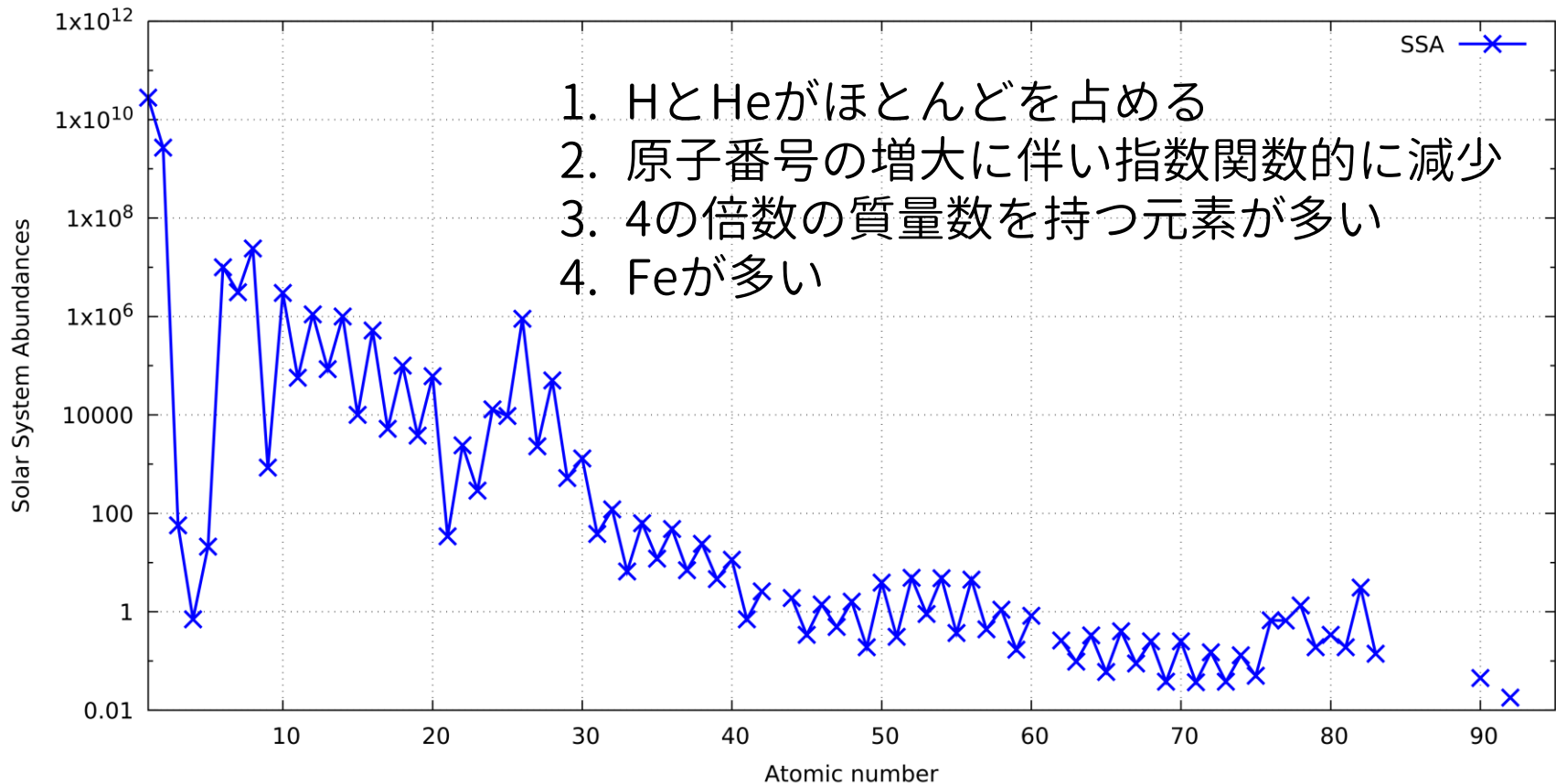
太陽系の平均組成（宇宙でも平凡な組成だとされる）。
太陽スペクトルとCIコンドライト隕石の分析から推定。



宇宙元素存在度

太陽系元素存在度 Solar system abundance

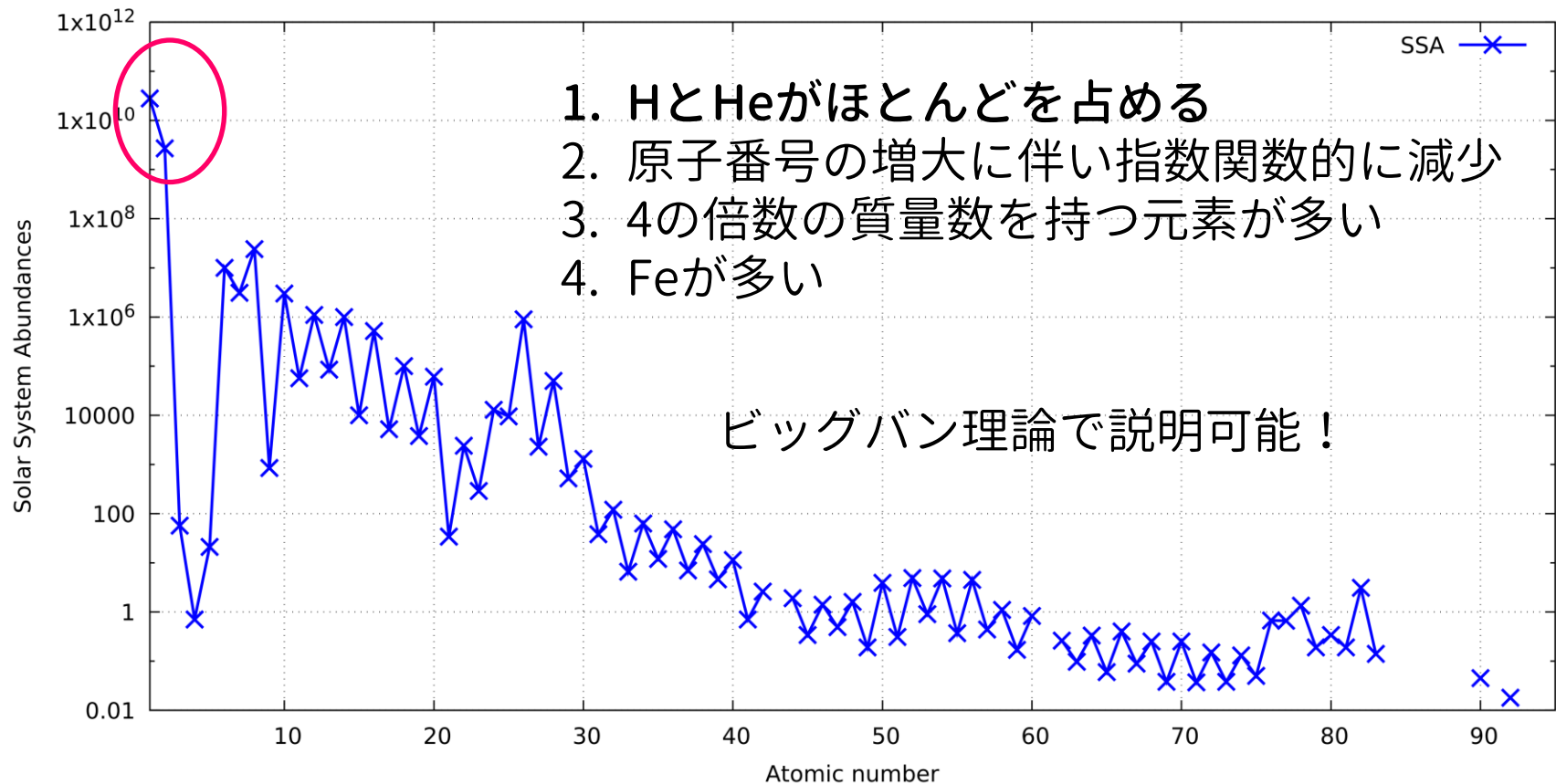
太陽系の平均組成（宇宙でも平凡な組成だとされる）。
太陽スペクトルとCIコンドライト隕石の分析から推定。



宇宙元素存在度

太陽系元素存在度 Solar system abundance

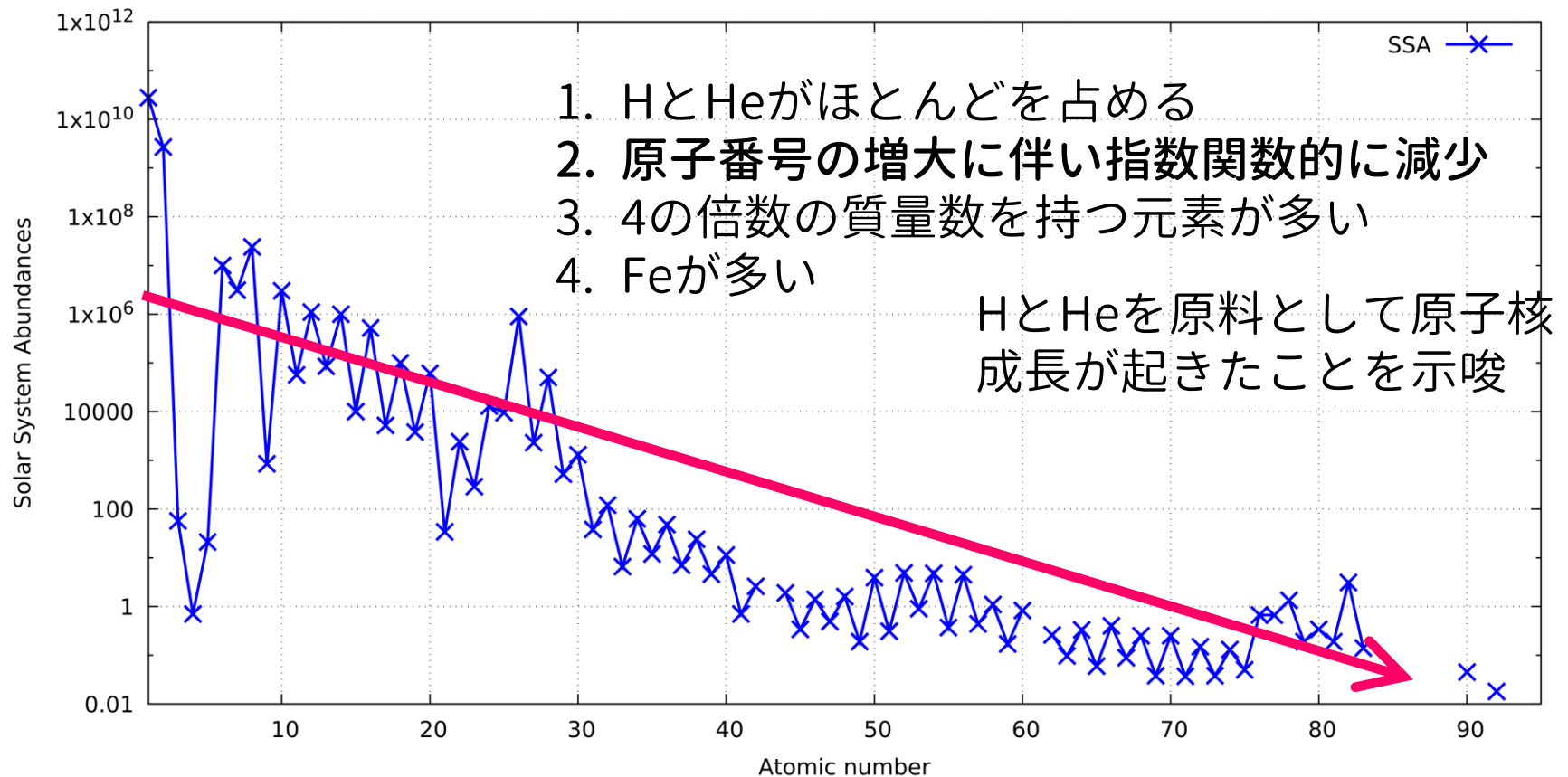
太陽系の平均組成（宇宙でも平凡な組成だとされる）。
太陽スペクトルとCIコンドライト隕石の分析から推定。



宇宙元素存在度

太陽系元素存在度 Solar system abundance

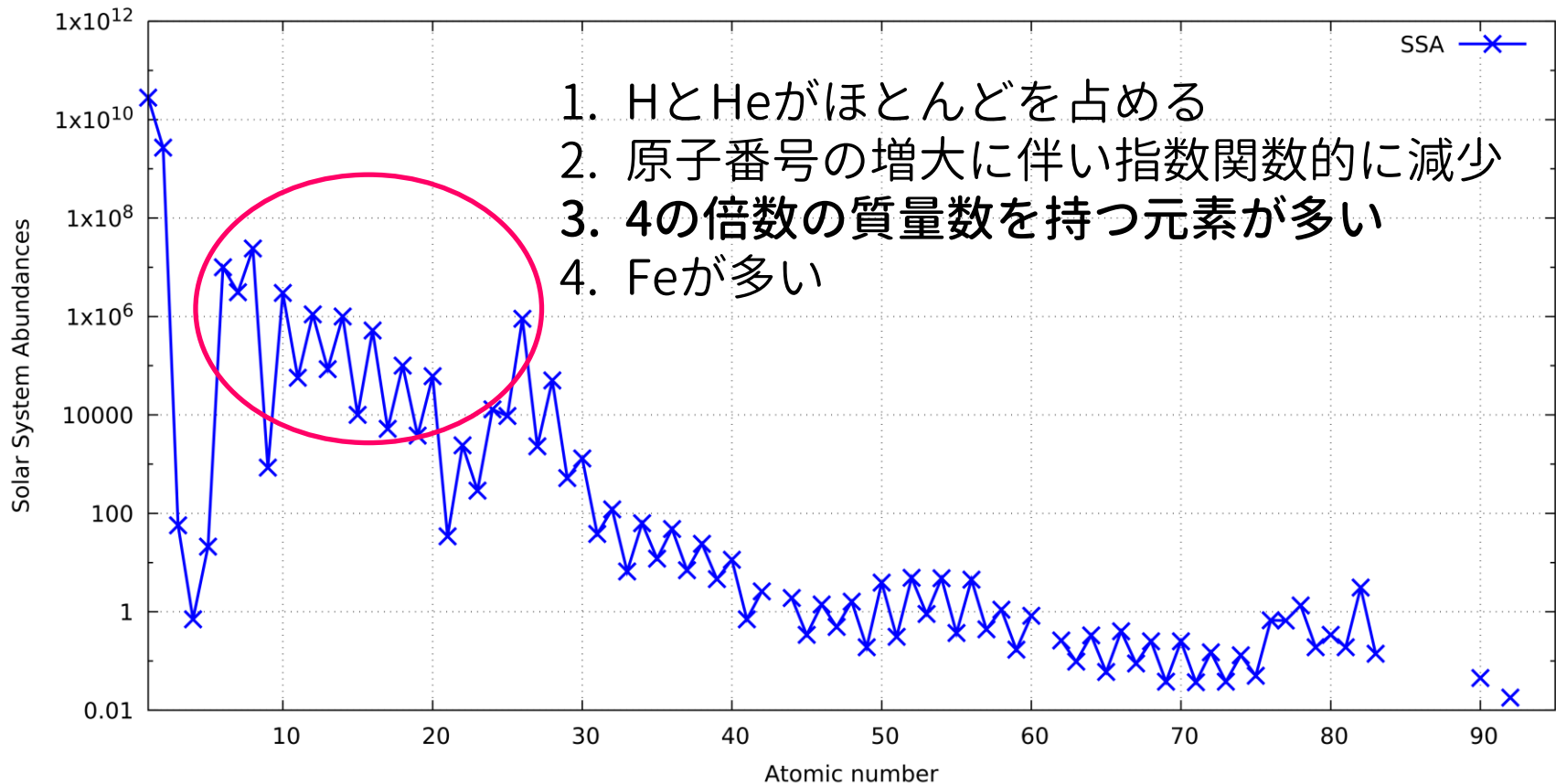
太陽系の平均組成（宇宙でも平凡な組成だとされる）。
太陽スペクトルとCIコンドライト隕石の分析から推定。



宇宙元素存在度

太陽系元素存在度 Solar system abundance

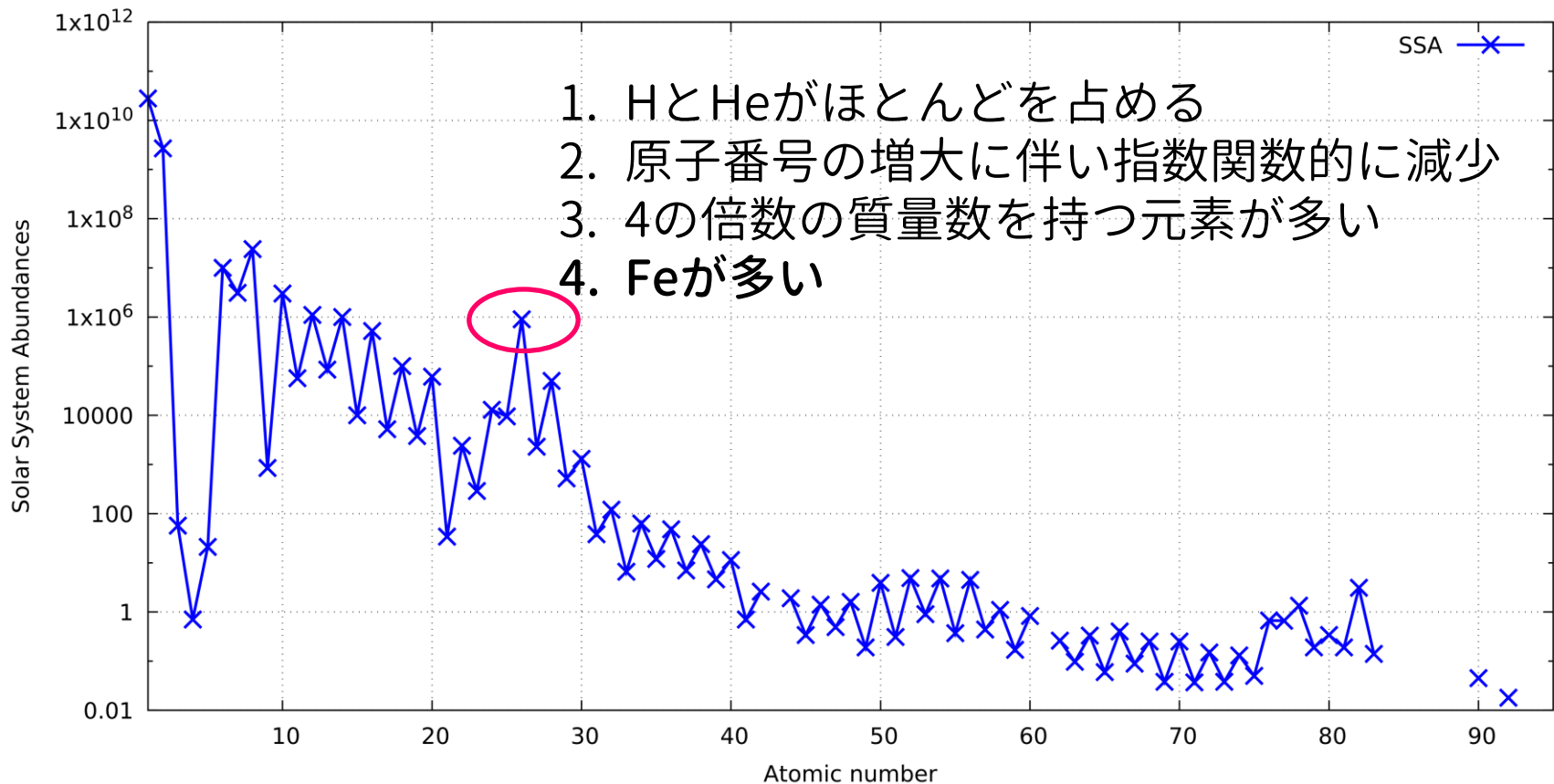
太陽系の平均組成（宇宙でも平凡な組成だとされる）。
太陽スペクトルとCIコンドライト隕石の分析から推定。



宇宙元素存在度

太陽系元素存在度 Solar system abundance

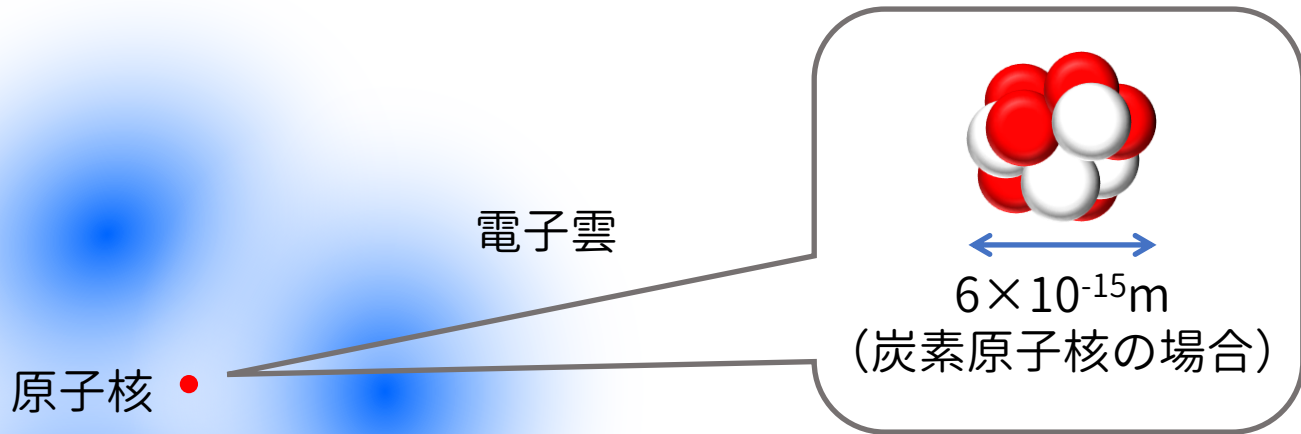
太陽系の平均組成（宇宙でも平凡な組成だとされる）。
太陽スペクトルとCIコンドライト隕石の分析から推定。



原子核と核融合

～核力のはたらく系のふるまい～

原子の構造



直径は 1 \AA (10^{-10}m) のオーダー

● 陽子：電荷が +1

○ 中性子：電荷が 0

核子は静電気力よりも強く束縛されていない
(核力)

原子核成長の2方式

1. 原子核同士をくっつける（核融合反応）

原子核はプラスの電気を帯びているので簡単にはくっつかない。



2. 中性子をくっつける（中性子捕獲反応）

簡単にくっつくが、孤立した中性子は短寿命（15分程度）であり、すぐに陽子に変化してしまうという難点がある。

核融合の障壁

原子核の間にはたらく力

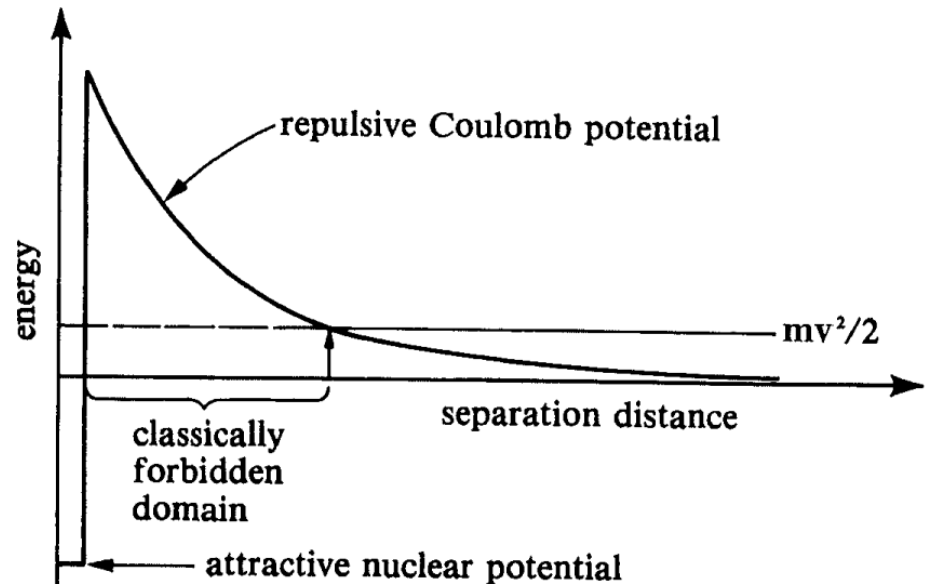
1. 電磁気力…基本的に斥力, 到達距離スケール長
2. 核力…基本的に強い引力, 到達距離スケール短

核融合反応率

= 自分の密度 × 相手の密度
× 反応断面積 × 速度

反応断面積の温度依存性が大きい

(Maxwell-Boltzmann分布
とトンネル効果)

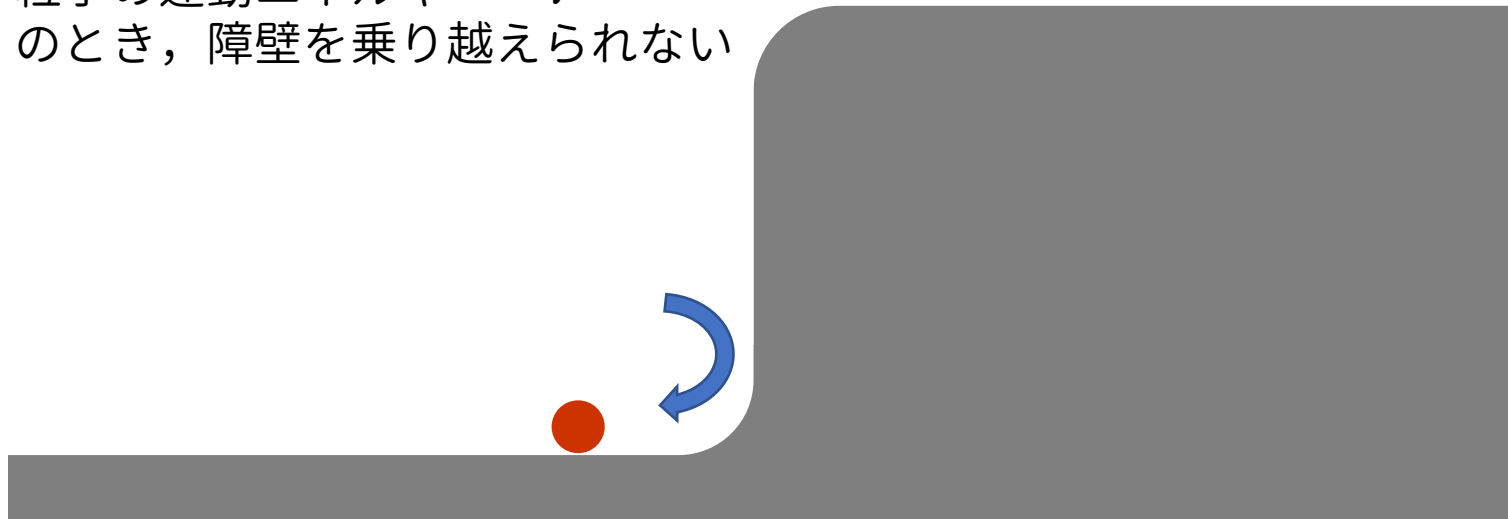


トンネル効果

古典論的には乗り越えられないポテンシャルをもつ領域に、波動関数が「染み出す」現象

古典論描像

粒子の運動エネルギー $< V$
のとき、障壁を乗り越えられない



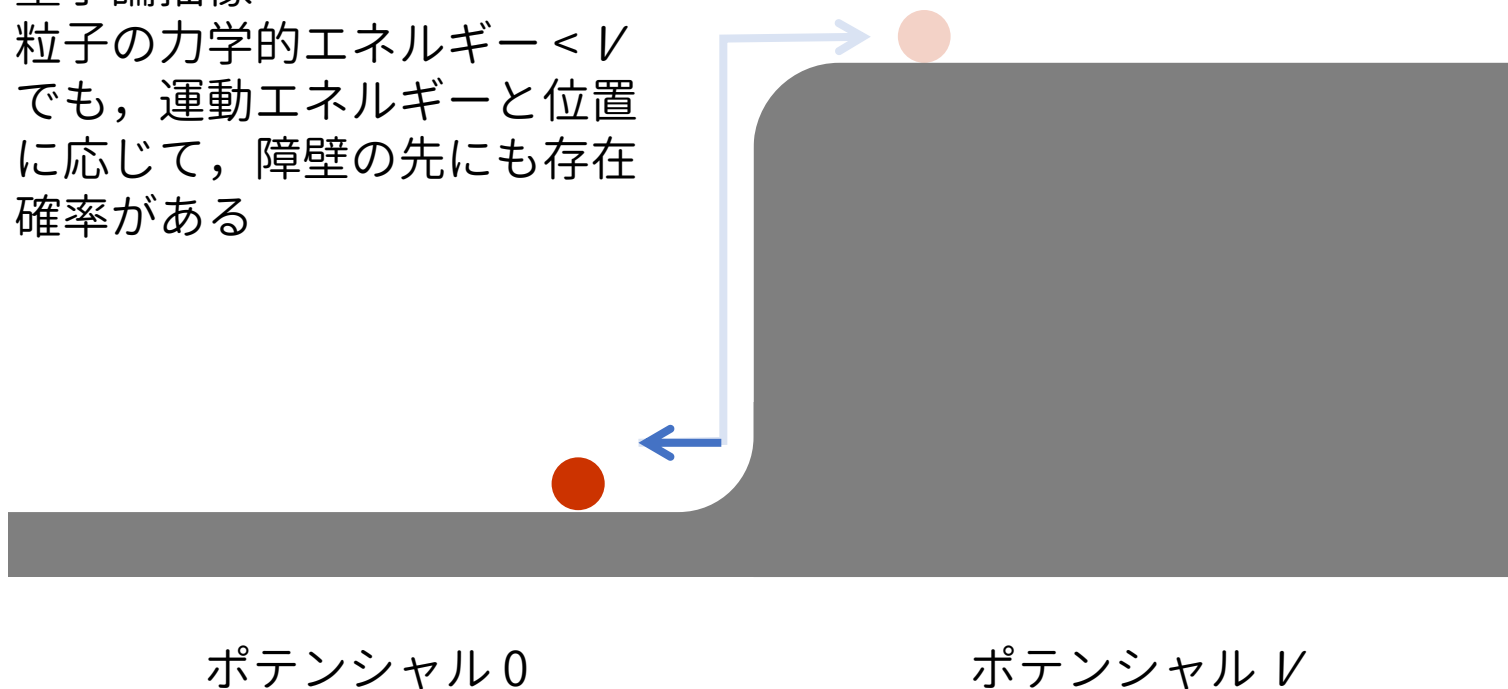
ポテンシャル 0

ポテンシャル V

トンネル効果

古典論的には乗り越えられないポテンシャルをもつ領域に、波動関数が「染み出す」現象

量子論描像
粒子の力学的エネルギー $< V$
でも、運動エネルギーと位置
に応じて、障壁の先にも存在
確率がある



トンネル効果



- 非ポテンシャル領域で $\psi = \psi_0$ の波動関数.
- 粒子のエネルギー $E < V$ とする.

$x=0$

定常 Sch. eq:

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \partial_x^2 + V \right\} \psi = E\psi.$$

これを解いて,

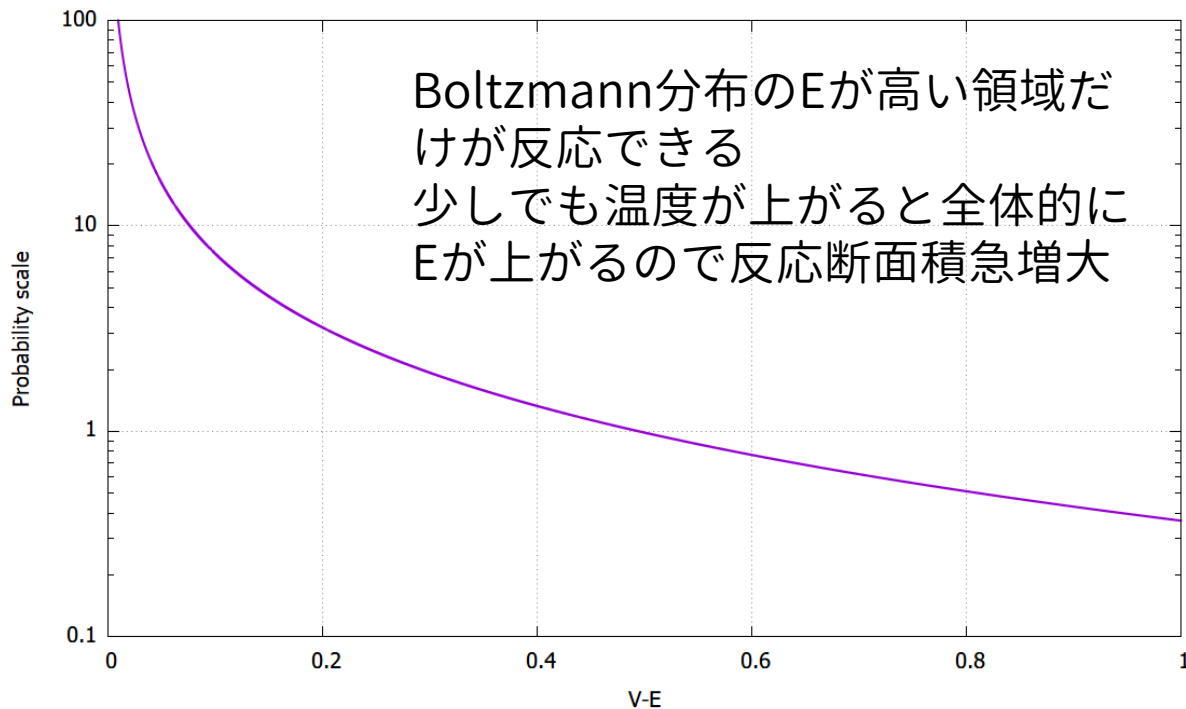
$$\psi(x) = \psi_0 \exp\left(-\frac{x}{x_{\text{tu}}}\right), \quad x_{\text{tu}}^{-1} = \sqrt{\frac{2m(V-E)}{\hbar}}, \quad x > 0.$$

トンネル効果

$$\psi(x) = \psi_0 \exp\left(-\frac{x}{x_{\text{tu}}}\right), \quad x_{\text{tu}}^{-1} = \sqrt{\frac{2m(V-E)}{\hbar}}, \quad x > 0.$$

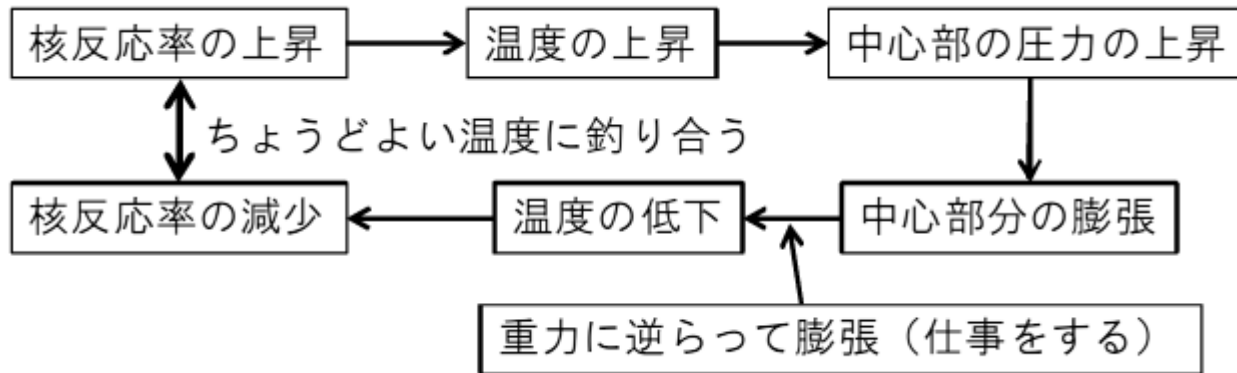
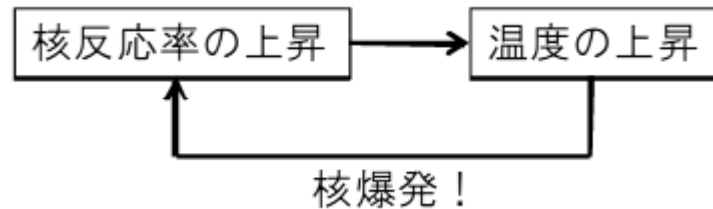
ある距離 x_{bar} を超える確率は,

$$\int_{x_{\text{bar}}}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx = 2x_{\text{tu}}\psi_0^2 \exp\left(-\frac{2x_{\text{bar}}}{x_{\text{tu}}}\right) \propto \frac{1}{V-E} \exp(-C\sqrt{V-E}).$$



核融合反応系の安定性

恒星…低温の核融合
水爆…高温の核融合



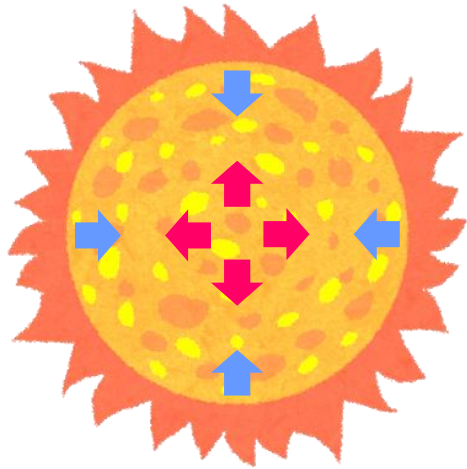
<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/ida/taku/lecture/ocha14/lecture3BW.pdf>

自己重力系の核融合反応は負のフィードバックで安定化する

恒星の形成と進化

～天然の原子炉～

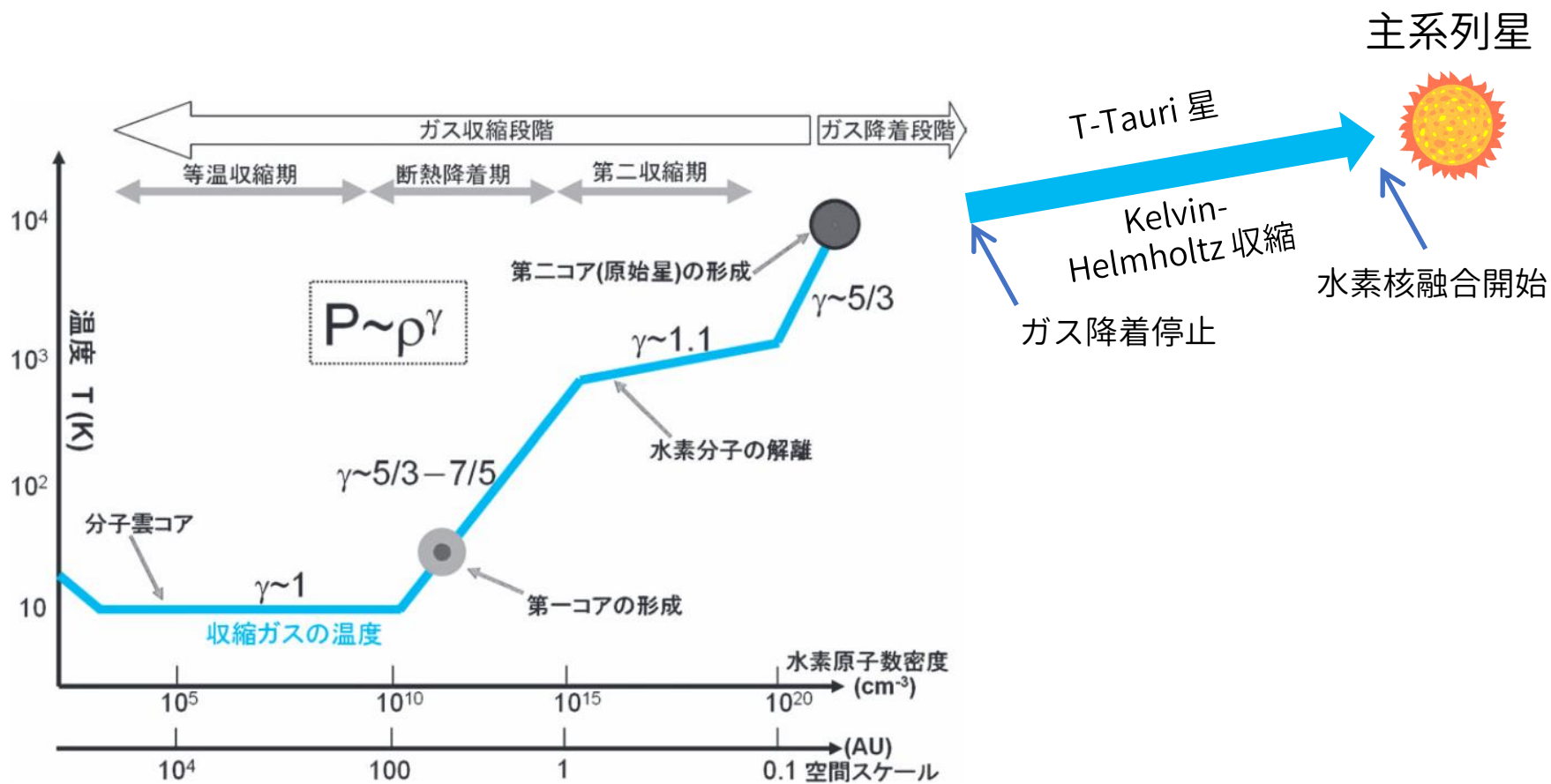
恒星とは



軽水素を基盤とした核融合由来の発熱に伴う圧力と自己重力がつりあっている天体

「自ら光り輝く天体」は厳密には間違い (e.g. 白色矮星)

星形成の大まかな流れ



町田 (2012)

T-Tauriフェーズ

降着が穏やかになった第二コア
は**T-Tauri型星**と呼ばれる

おうし座T星 (NASA)

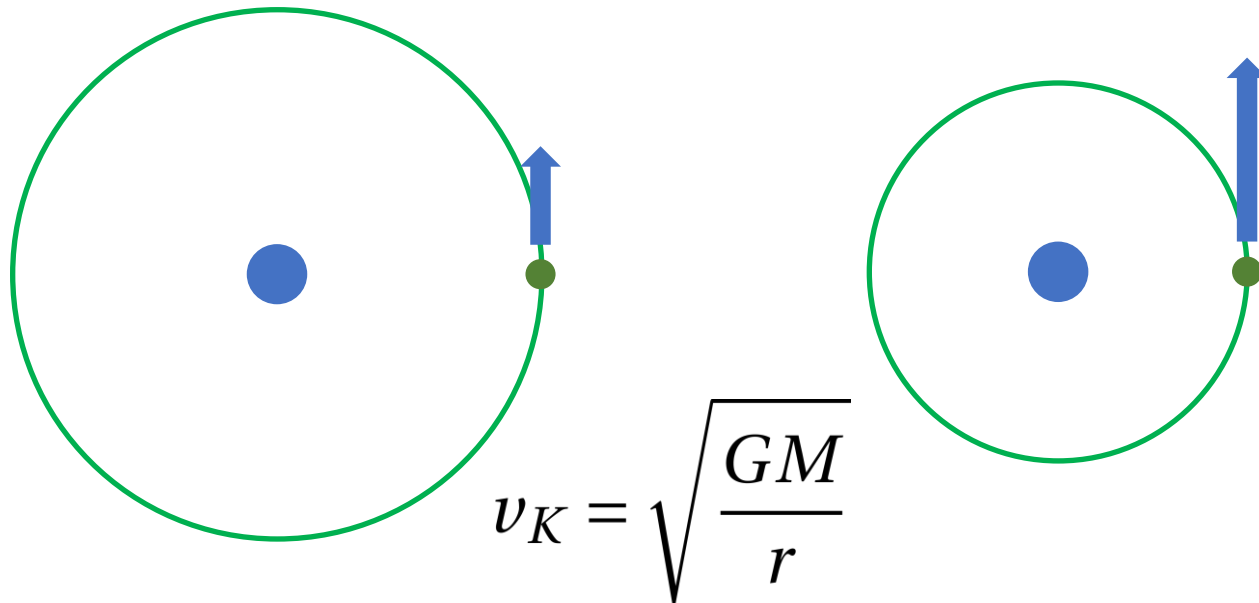


T-Tauri型星は自身の光度で
エネルギーを失いながら準静的に重力収縮する
(**Kelvin-Helmholtz収縮**)

Kelvin-Helmholtzタイムスケール： $t_{\text{KH}} \sim \frac{GM^2/R}{L}$.
太陽の場合では $\sim 10^7$ yr

準静的冷却と温度上昇

自己重力系は、準静的にエネルギーを失って収縮すると
温度が上昇する（**負の比熱**）

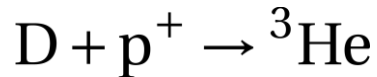


熱核融合が可能な温度に達すると、
核融合による発熱由来の圧力でKH収縮が停止

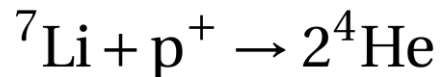
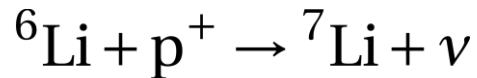
前主系列核融合

反応断面積が大きな核種は、水素燃焼よりも前に点火する
(ただし、存在度が低いため持続期間は高々100万—1億年)

重水素燃焼 (10^6 K; $M > 16 M_J$)



リチウム燃焼 (2.5×10^6 K; $M > 65 M_J$)



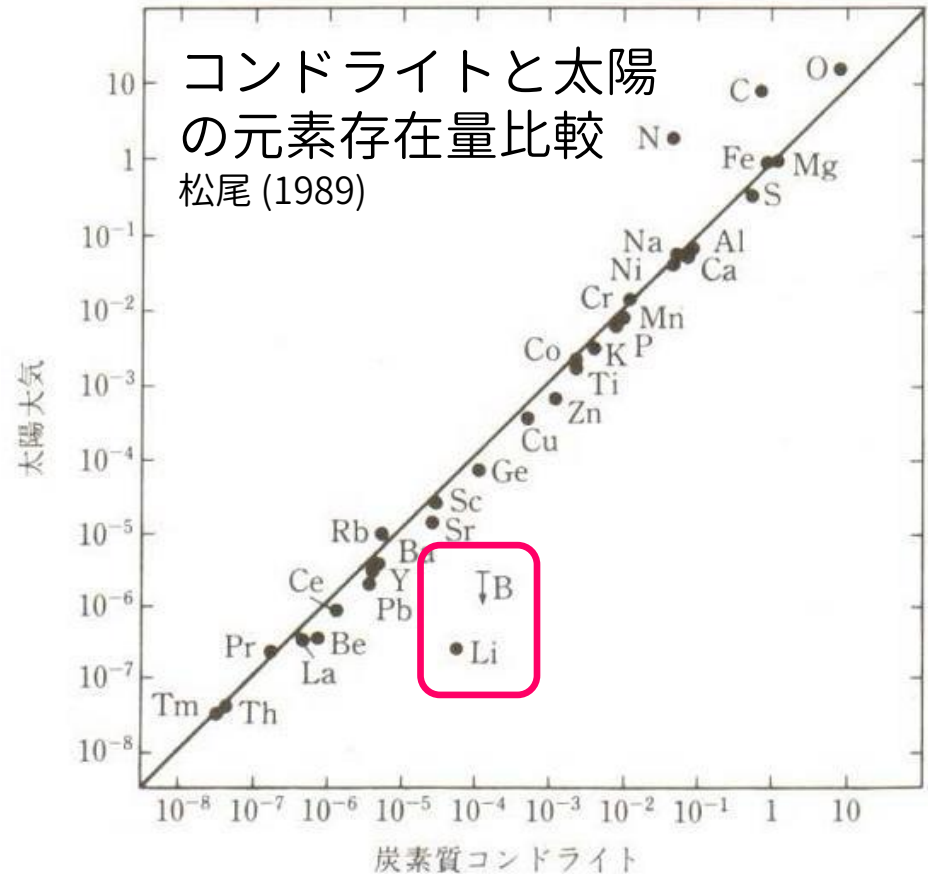
これらの反応熱は、収縮を一時的に止めて前主系列質量降着
の時間稼ぎをする

→ 大きな恒星 ($> 2-3 M_\odot$) を作ることに寄与

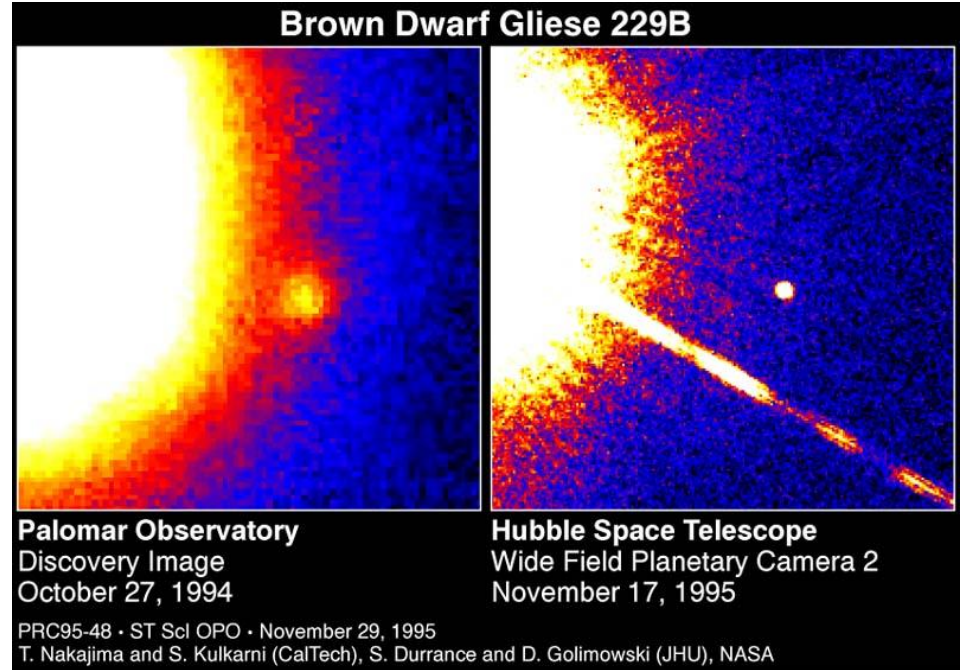
前主系列核融合核種の枯渇

月レゴリス測定から得られた太陽風のD/H
(Epstein & Taylor, 1971; Wiens+ 2004)
... $< 3 \times 10^{-6}$

ISO, Galileo, Cassiniで得られた木星・土星のD/H
(e.g. Pierel+ 2017)
... $\sim 2 - 2.5 \times 10^{-5}$



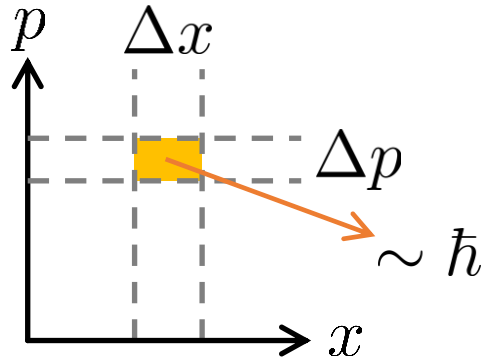
褐色矮星



一時的に重水素燃焼は起こしたが、その後電子の縮退が始まって軽水素燃焼温度に到達する前に収縮が停止した天体、質量範囲： $13-80 M_J$ ($0.01-0.08 M_{\odot}$)

電子の縮退圧で支えられ、過去の核融合の余熱で光る

縮退圧



Heisenbergの不確定性原理

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

- 不確定性範囲内の量子状態は区別できない（相空間の「最小体積」）
- Fermi 粒子（電子や陽子・中性子など）は同一量子状態を占めることができない（Pauli の排他原理）

ある温度未満の高密度状態では、粒子系が低エネルギーの量子状態に移ろうとしても、上記の理由により「状態の席」が埋まっている

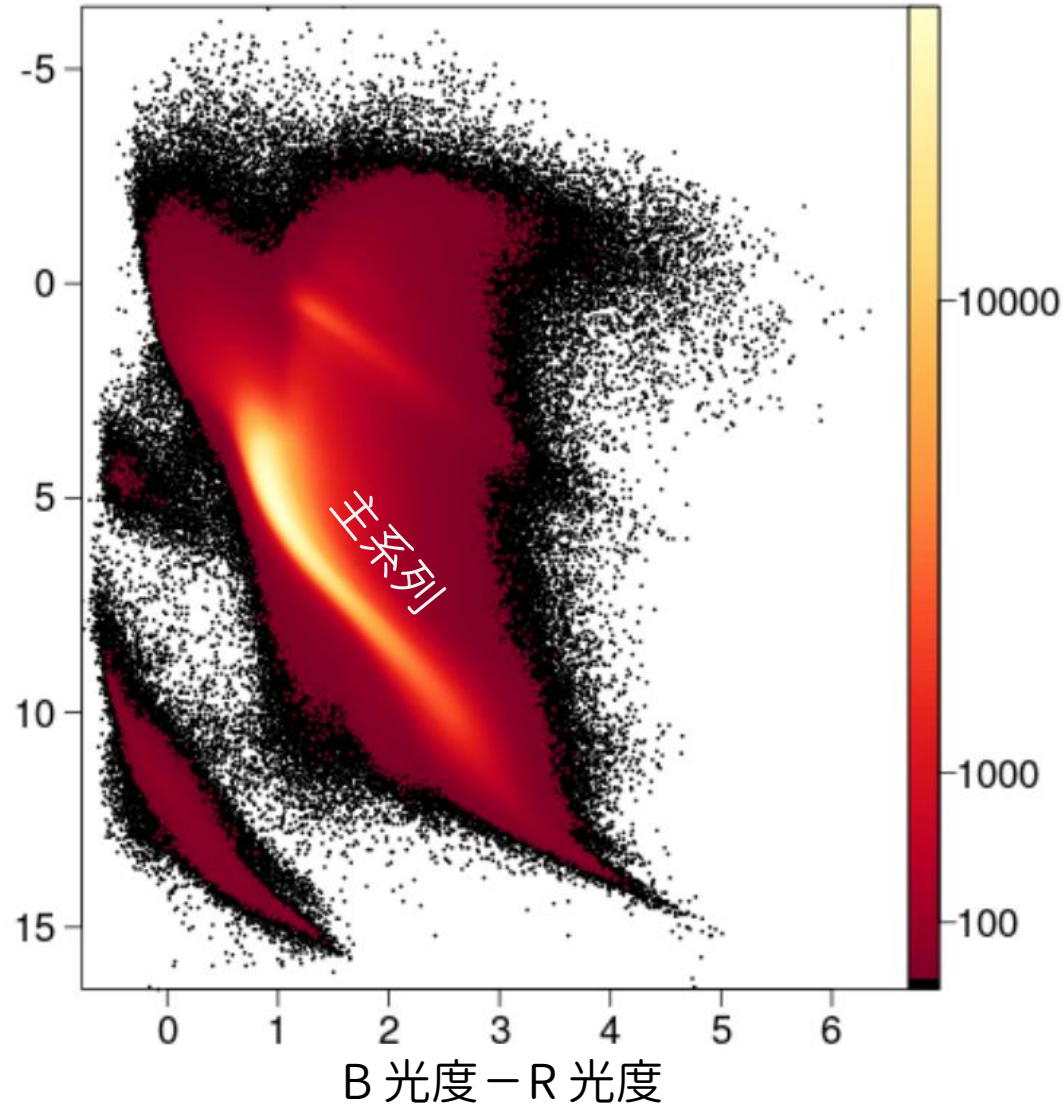
→ すべての粒子で運動量 0 になれず、圧力を持つ

主系列星

300万K以上では水素燃焼
が起こり，**主系列星**となる

- HR図の主系列に所属する恒星
- 恒星の一生の大部分は主系列段階
- 中心核の水素の核融合がエネルギー源
 - $4\ ^1\text{H} \rightarrow\ ^4\text{He} + 2e^- + 2\nu_e$

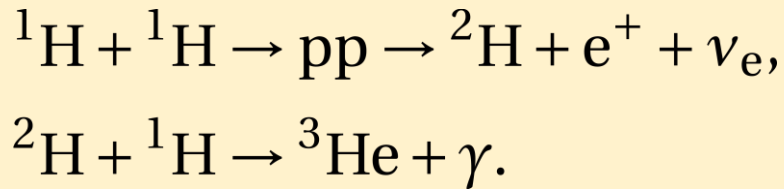
絶対等級



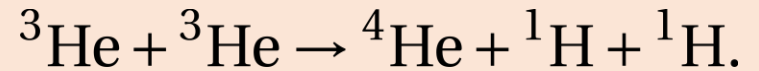
Gaia DR2による Hertzsprung-Russell 図
Gaia Collaboration, Babusiaux et al. (2018)

水素燃焼

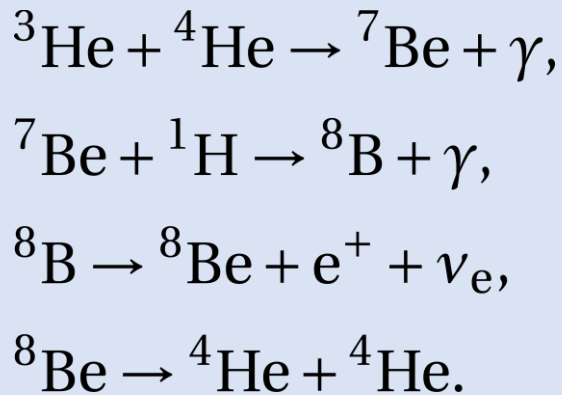
太陽 (15MK) やそれより軽い恒星で主に起きている水素燃焼
…陽子-陽子連鎖反応 (p-p chain)



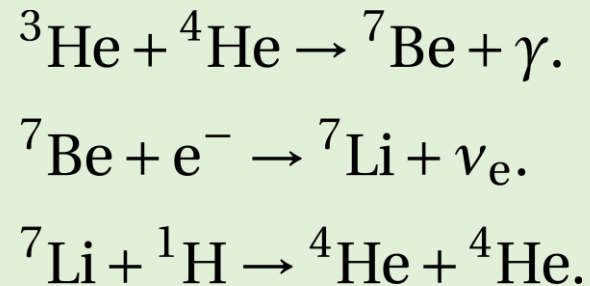
pp-1 分枝反応 (10-14MKで優勢)



pp-3 分枝反応 (23MK以上で優勢)



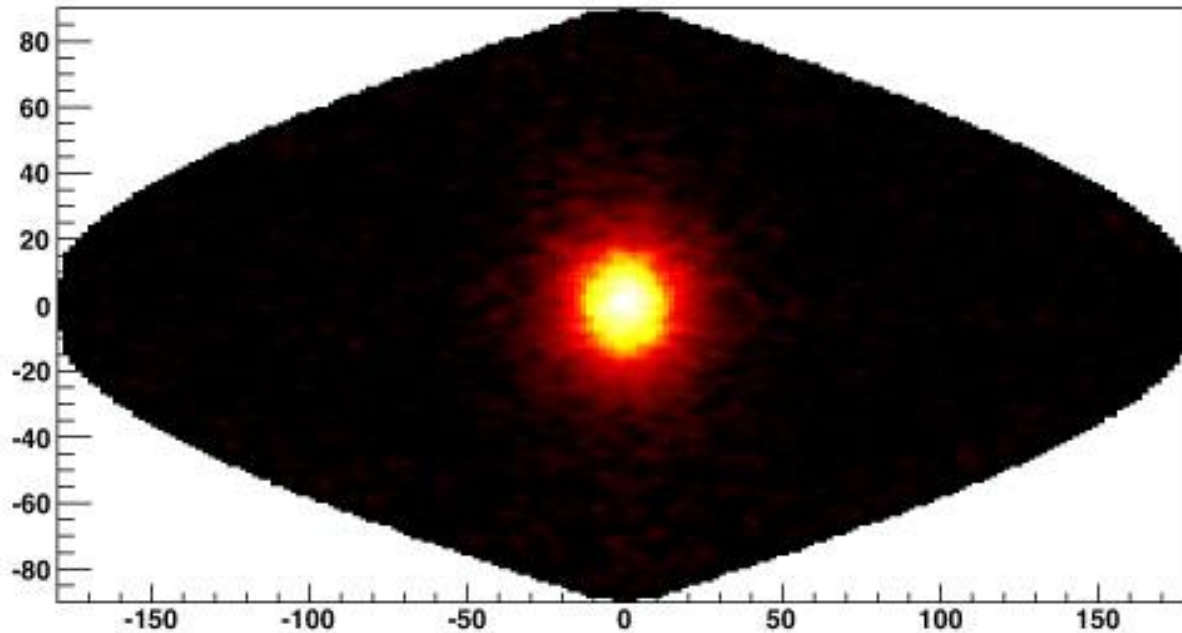
pp-2 分枝反応 (14-23MKで優勢)



恒星内部での平均反応時間は1Gyr
ビッグバン時や初代星内部でも同様の反応が起きていた

水素燃焼

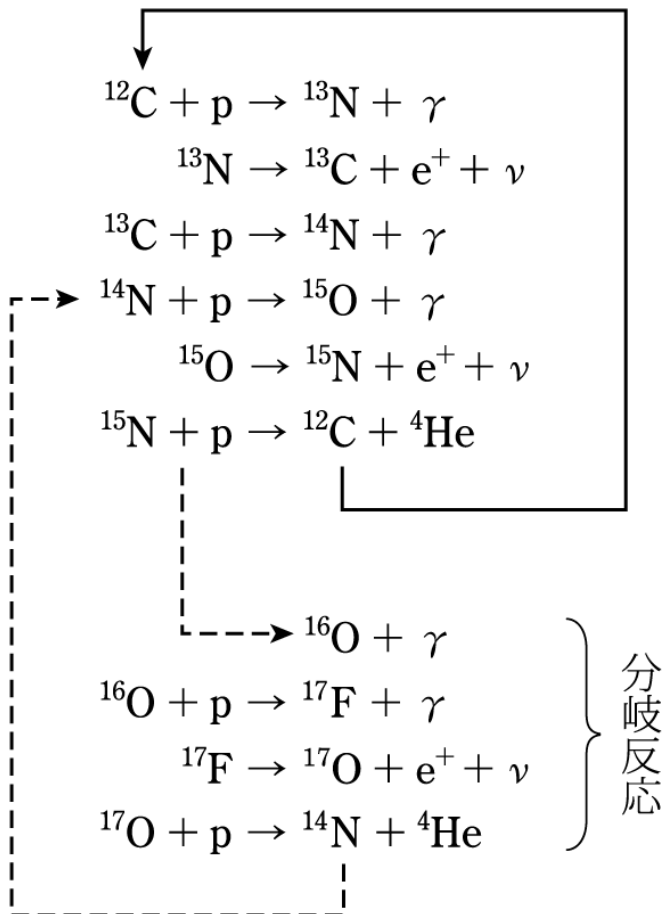
太陽中心核（15MK）で主に起きている水素燃焼
…陽子-陽子連鎖反応（p-p chain）



太陽中心座標系で見たニュートリノ検出マップ
(Kamioka Observatory, ICRR, Univ. of Tokyo)

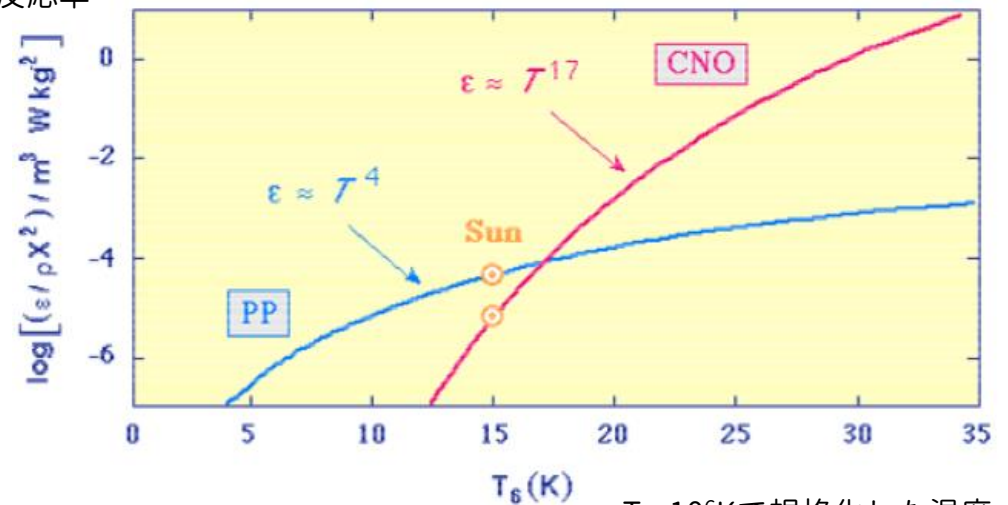
水素燃焼

太陽よりも重い恒星で支配的な水素燃焼
 …CNOサイクル



- C, N, Oが触媒となる.
- 20MK以上の高温 (2M_☉以上) で優勢な反応.
- 平均反応時間が0.38Gyr →仕事率が大きい.

反応率

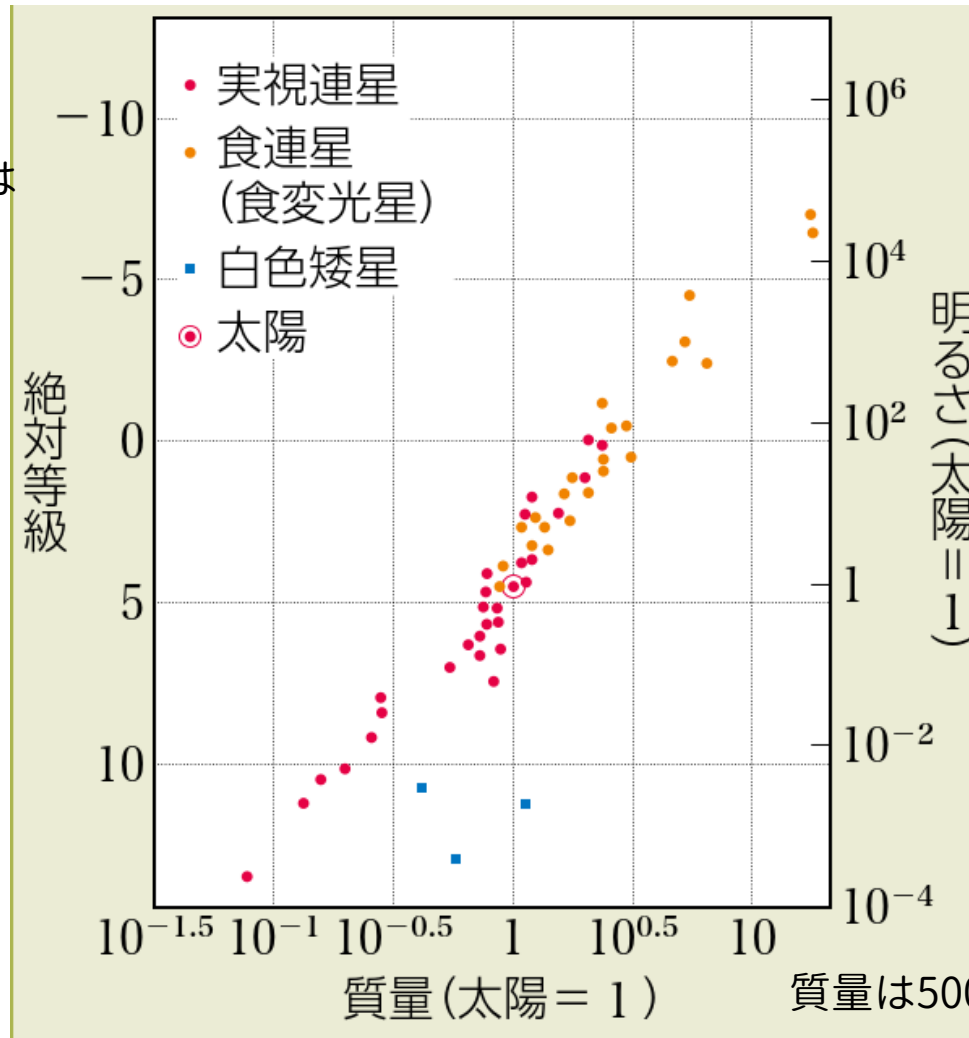


T₆: 10⁶Kで規格化した温度

質量光度関係

核融合反応率の温度依存性は、質量光度関係を説明する

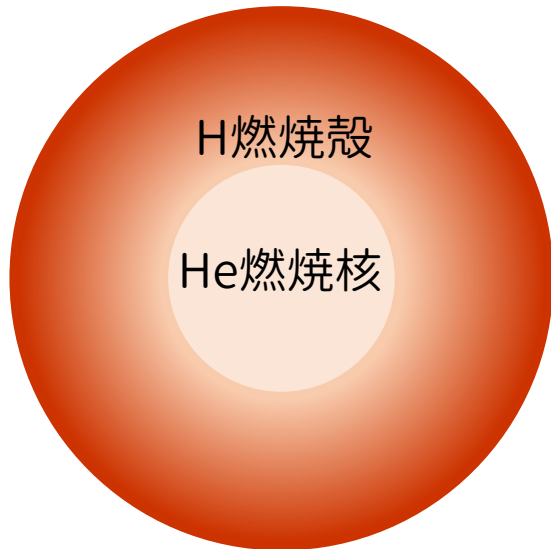
光度（エネルギー発生率）は
1億倍の幅



もえかすの点火

水素燃焼環境では、Heは核融合を起こさない（もえかす）
→核内で水素が枯渇しHe核が形成→He核の核融合が停止

He核は力学平衡状態にないため自己重力収縮しながら温度上昇
→2億度に達すると、He燃焼が始まる



He燃焼による加熱

核融合領域の外側移動

外層の膨張

この状態を赤色巨星という

赤色巨星

目で見える赤い恒星は赤色巨星

(赤色矮星は絶対等級が小さすぎて肉眼で見えるものはない)



アンタレス
(さそり座)



ベテルギウス
(オリオン座)



アルデバラン
(おうし座)



アークトゥルス
(うしかい座)

	質量[太陽=1]	温度[K]	半径[太陽=1]
アンタレス	15.5	3500	800—900
ベテルギウス	11.6	3590	~900
アルデバラン	1.5	3910	44.2
アークトゥルス	1—1.5	4290	26

He燃燒

中性子数

	6H 3E-22s	7He 3E-21s	8Li 8E-1s	9Be STABLE	10B STABLE
	5H ~1E-21s	6He 8E-1s	7Li STABLE	8Be 7E-17s	9B 8E-19s
	4H 1E-22s	5He 7E-22s	6Li STABLE	7Be 53.22d	8B 8E-1s
	3H 12.32y	4He STABLE	5Li 4E-22s	6Be 5.E-21s	7B 4E-22s
n 10.3m	2H STABLE	3He STABLE	4Li 9E-23s		
	1H STABLE				

陽子数

He 燃焼

Heの3体衝突による核融合反応（トリプル α 反応）



トリプル α が起こる確率は ${}^8\text{Be}$ の半減期（ $6.7 \times 10^{-17}\text{s}$ ）が重要

純粋三体衝突が起きるときの速度スケールは、

$$kT = \frac{1}{2} m_{\text{He}} v^2 \Rightarrow v \sim 2.9 \text{ km/s}.$$

純粋三体衝突が起こるチャンスタイムスケールは、

$$\Delta t \sim \frac{2 \text{ fm}}{v} \sim 10^{-21} \text{ s}.$$

${}^8\text{Be}$ の半減期はアルファ共鳴のため比較的長い

それ以降の燃焼反応

太陽質量の8倍以上の大質量星では、さらにもえかすの核融合が起こる。

- 炭素燃焼 8.7億度，Mg, Neを生成，1000年間持続。
 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{24}\text{Mg}, ^{20}\text{Ne} + ^4\text{He}.$
 - ネオン燃焼 16億度，Mgを生成，7カ月間持続。
 $^{20}\text{Ne} + ^4\text{He} \rightarrow ^{24}\text{Mg}.$
 - 酸素燃焼 20億度，Si, Sを生成，1年間持続。
 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{32}\text{S}, ^{28}\text{Si} + ^4\text{He}.$
 - ケイ素燃焼 33億度，Feを生成，数日間持続。
 $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{56}\text{Fe}.$
- ※ 20太陽質量の場合，He燃焼…100万年持続。

いずれも ^4He が関連する反応

→4の倍数質量数核種が多いことと調和

安定核種の結合エネルギー

