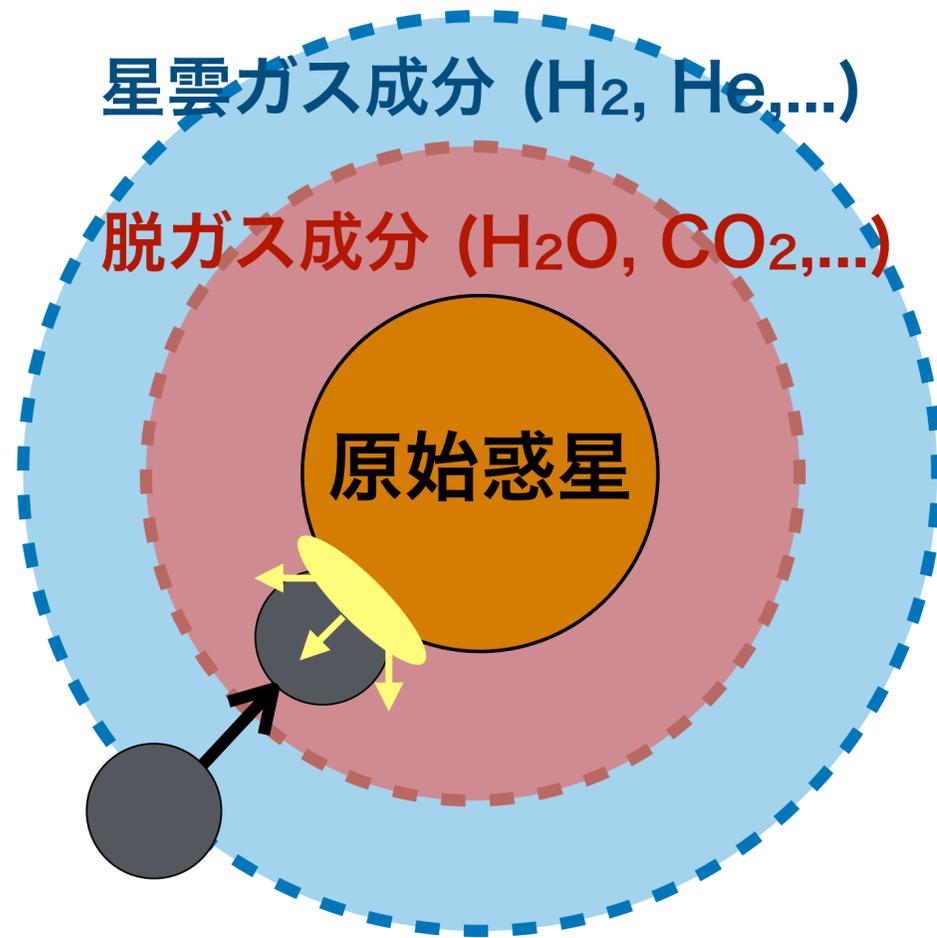


還元的原始地球大気の流体力学的散逸と進化 + α

吉田辰哉¹, 寺田直樹¹, 中村勇貴¹, 小山俊吾¹, 川村陽¹, 生駒大洋², 木村真博², 倉本圭³

¹東北大学, ²国立天文台, ³北海道大学

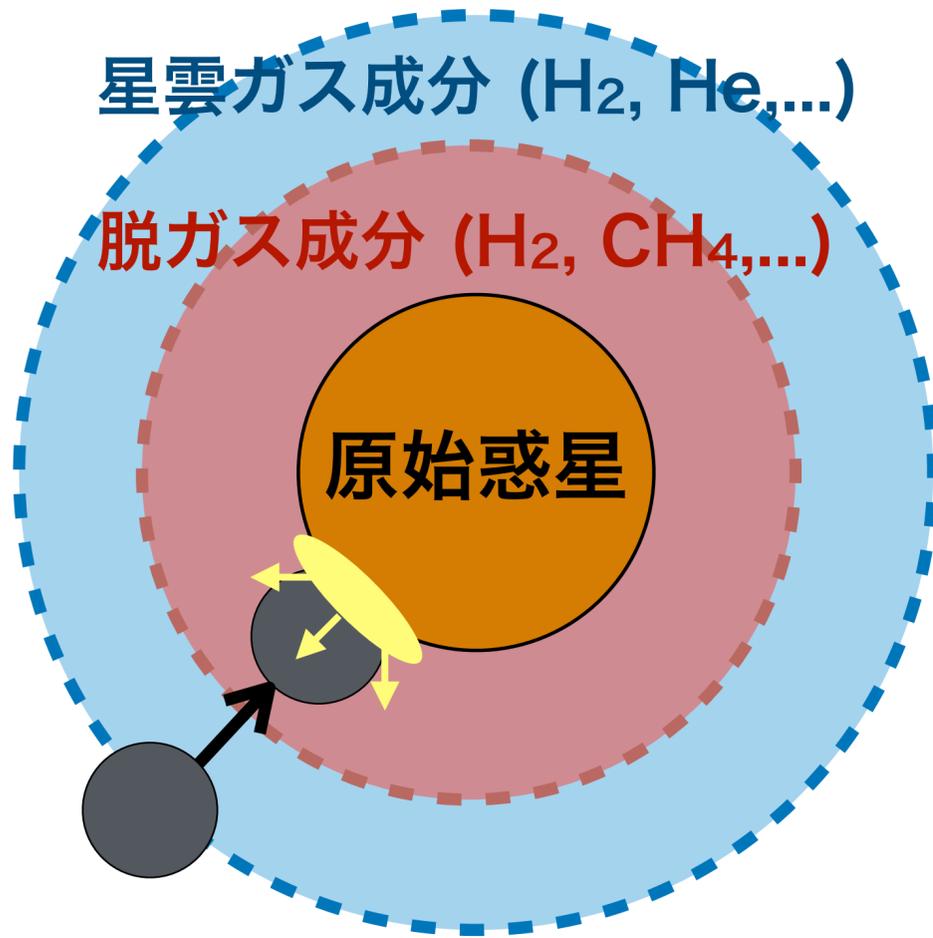
原始大気形成



従来の原始大気形成の描像

- 星雲ガス成分は星雲が晴れ上がった後に急速に散逸 (e.g., Sekiya et al., 1980; Lammer et al., 2014)
- 大気供給源の材料物質や地球マントルが酸化するため、H₂O-CO₂ 主体の酸化脱ガス大気が形成される (e.g., Matsui & Abe, 1986)

原始大気の形成



還元的原始大気形成の可能性

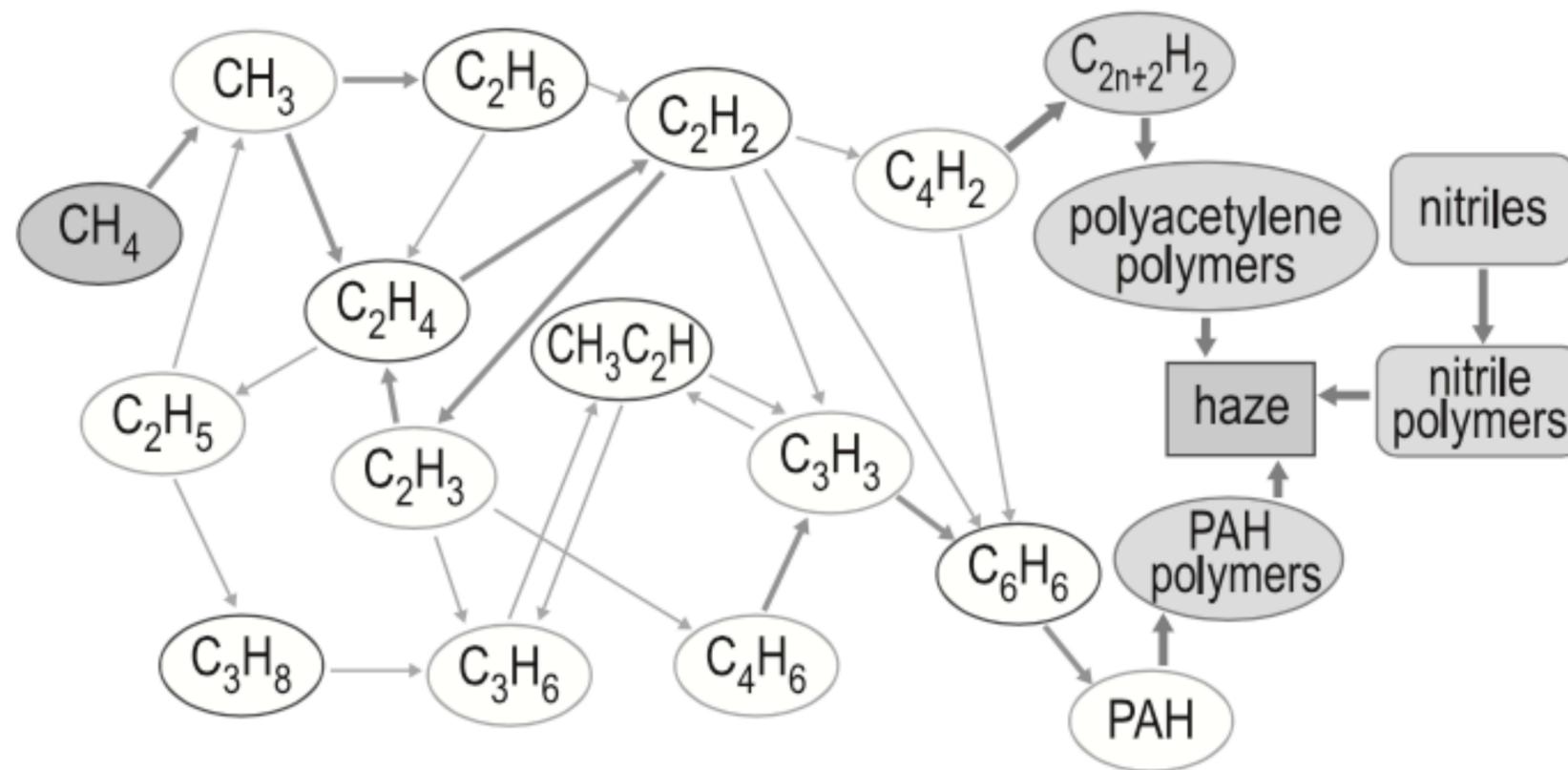
- 地球マントル物質とエンスタタイトコンドライトは多元素において同位体組成が酷似
→ 地球集積物質の大部分は終始還元的 (Dauphas, 2017)
- 集積する金属鉄が表層揮発性物質を還元
(Kuramoto & Matsui, 1996; Genda et al., 2017; Zahnle et al., 2020)



- **原始地球上に H₂・CH₄ に富む還元的な大気形成**

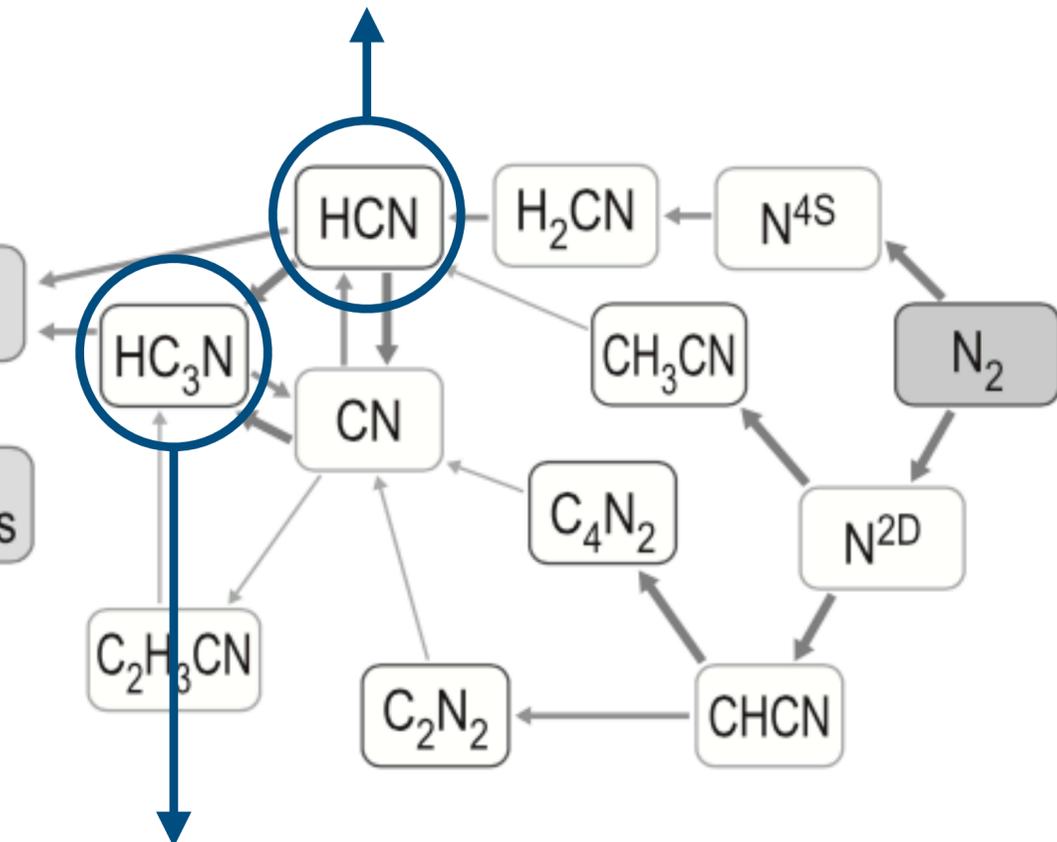
還元的大気中での有機物生成

- 還元的環境下では有機物生成が進みやすい (e.g., Miller, 1953; Miller & Urey, 1959; Schlesinger & Miller, 1983)
- **大気が生命前駆物質生成において重要な役割を果たした可能性**



Atreya et al. (2006)

アミノ酸, 核酸塩基 (アデニン, グアニン)



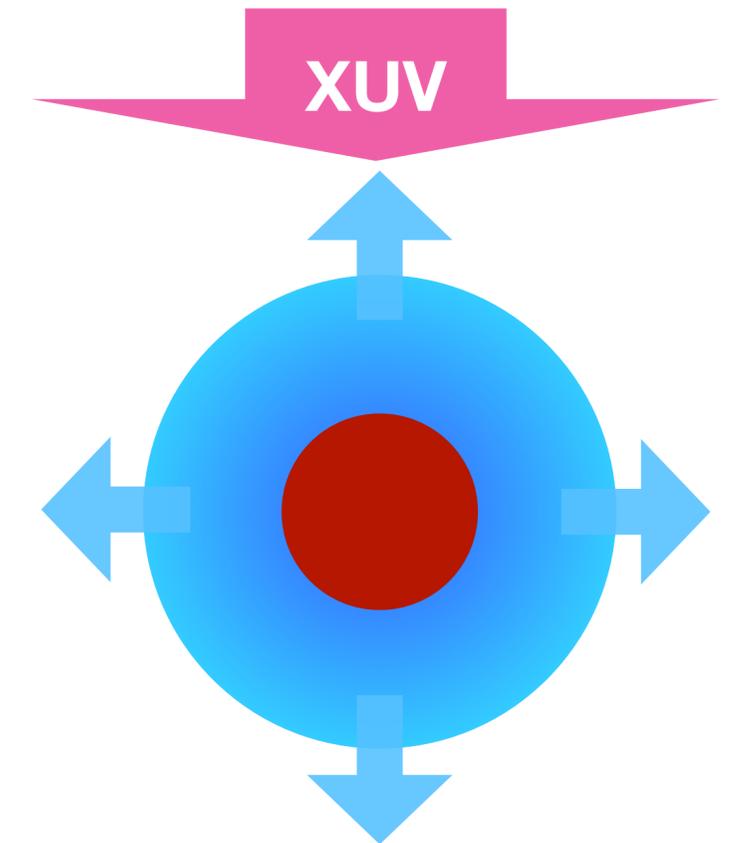
核酸塩基 (シトシン, ウラシル)

流体力学的散逸

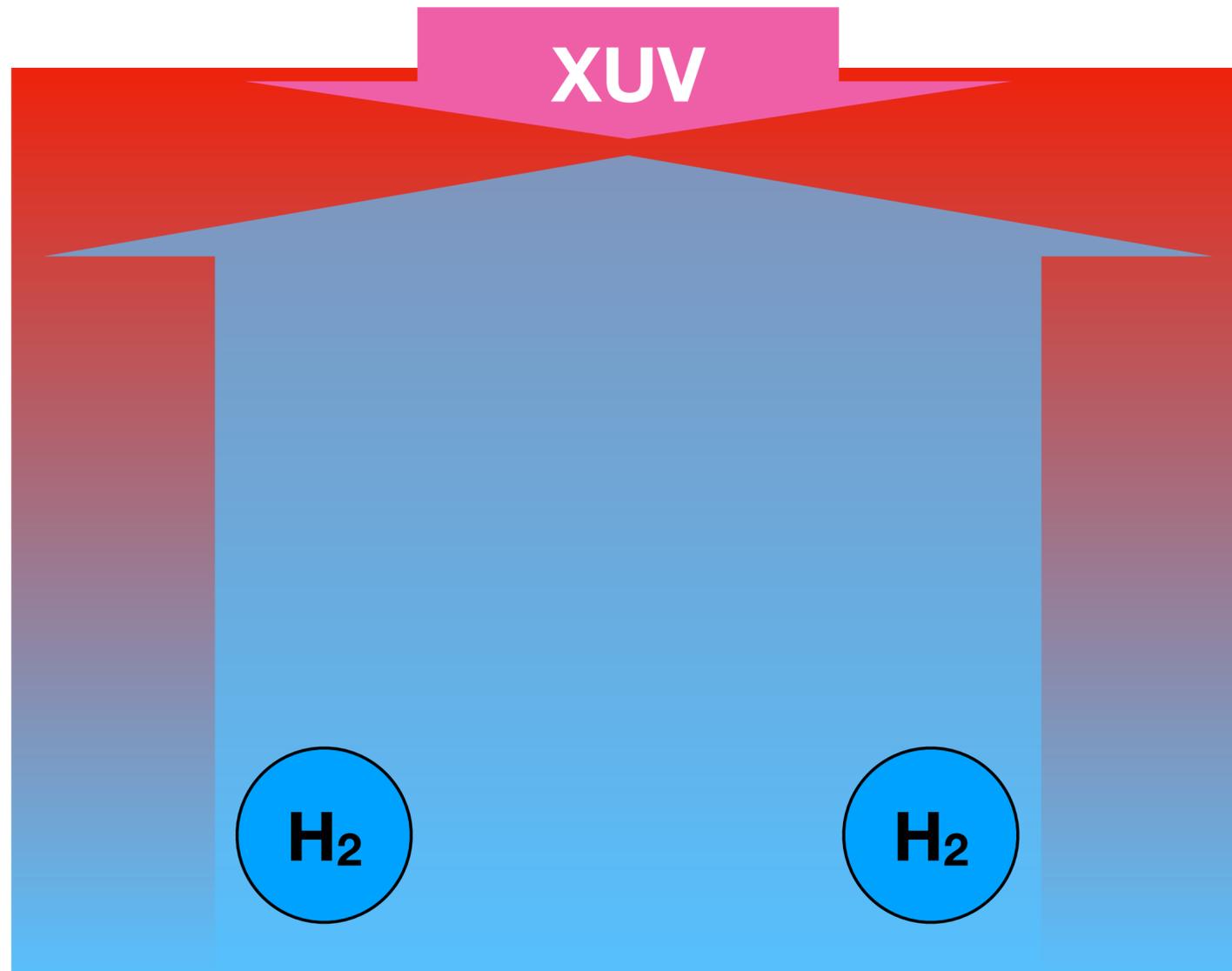
- 水素に富む還元的原始大気は**流体力学的散逸**によって刻々と変化

流体力学的散逸とは

- 上層大気が加熱され膨張・宇宙空間に流出
 - 初期太陽の強力なX線・極端紫外線 (XUV) 放射による大気加熱で駆動
 - 富水素大気で起きやすく散逸規模大 (e.g., Catling & Kasting, 2017)
- **還元的環境持続期間推定のため流体力学的散逸率推定が必要**

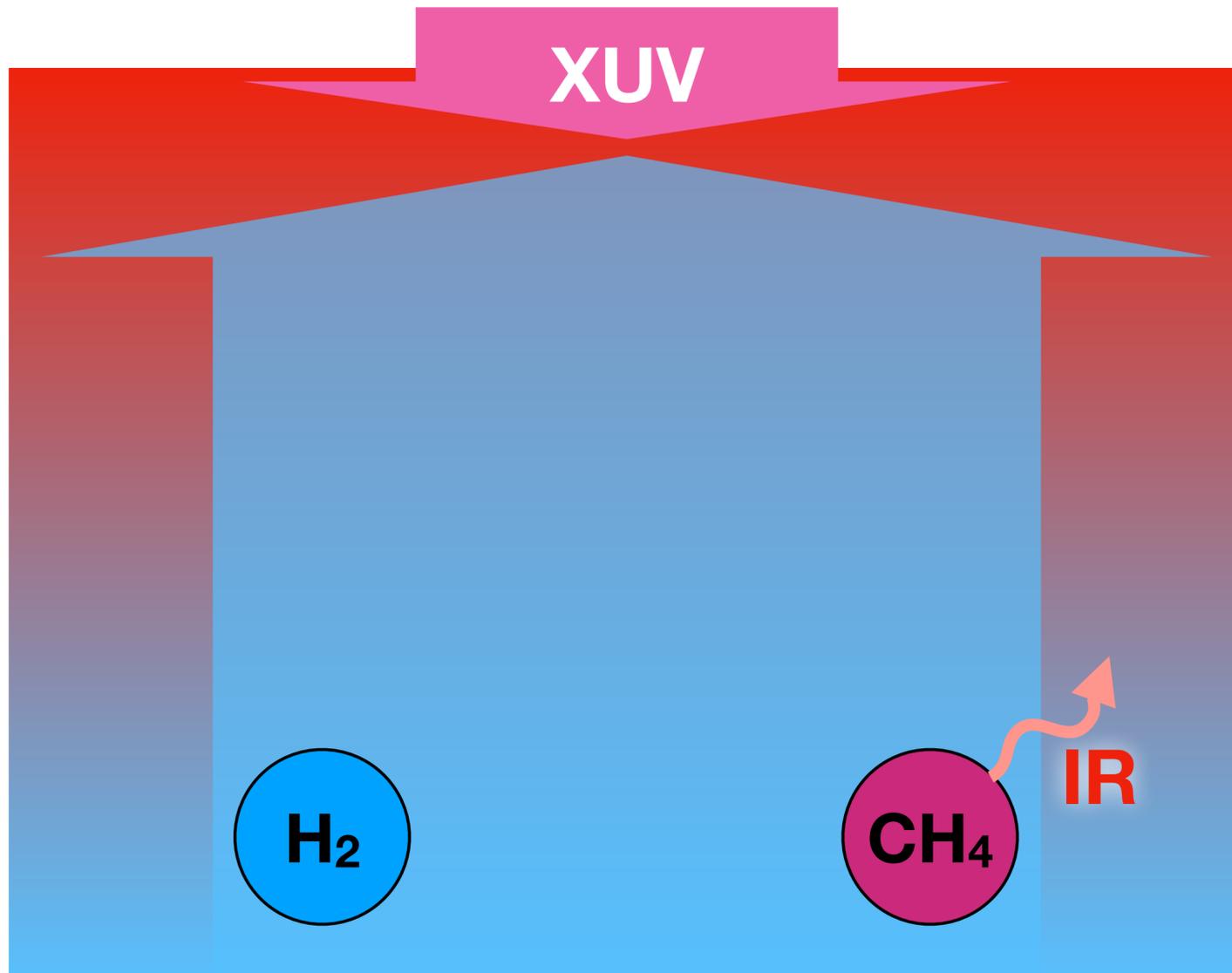


純粋水素大気の流体力学的散逸



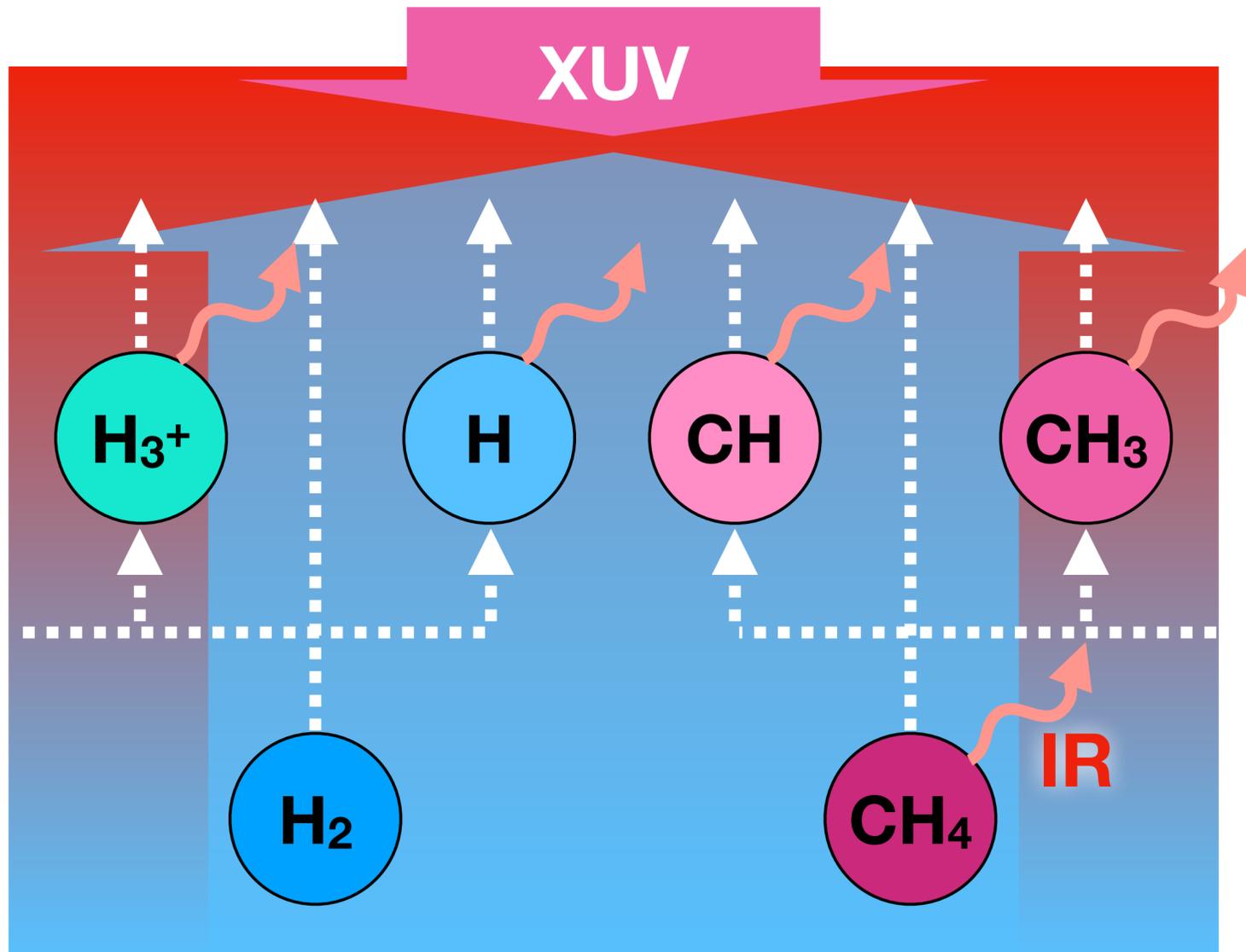
- XUV 加熱により効率的に流体力学的散逸駆動
- 現在の約 100 倍の XUV 強度を与えた場合、地球海洋と等価な量の水素大気が ~ 10 Myr 以内に散逸 (e.g., Lammer et al., 2014)

赤外活性大気種を豊富に含む還元的原始大気の流体力学的散逸



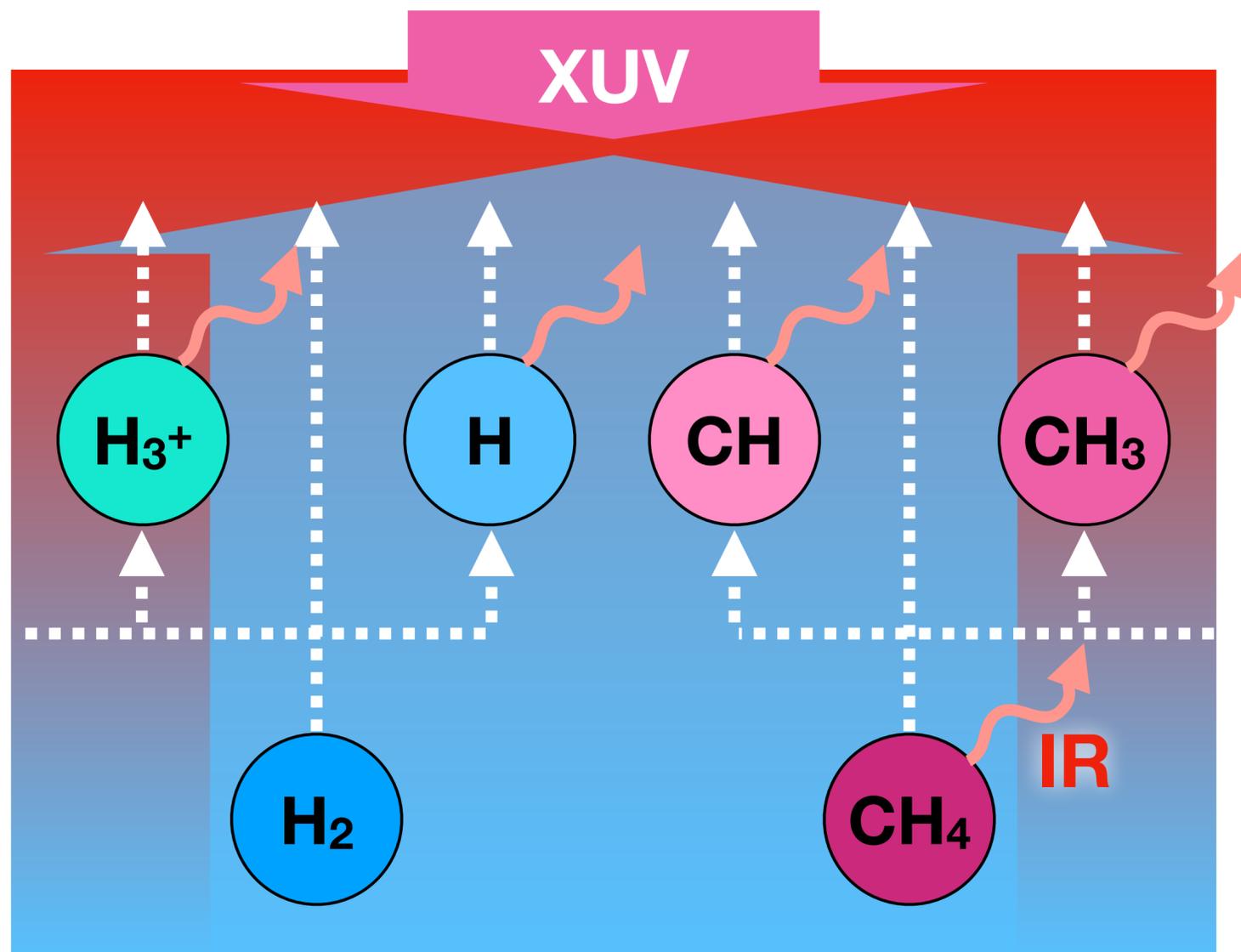
- 赤外活性大気種の放射冷却効果により大気散逸が抑制される可能性有
 - 還元的環境持続期間の長期化に繋がり得る

赤外活性大気種を豊富に含む還元的原始大気の流体力学的散逸



- 赤外活性大気種の放射冷却効果により大気散逸が抑制される可能性有
- 還元的環境持続期間の長期化に繋がり得る

赤外活性大気種を豊富に含む還元的原始大気の流体力学的散逸

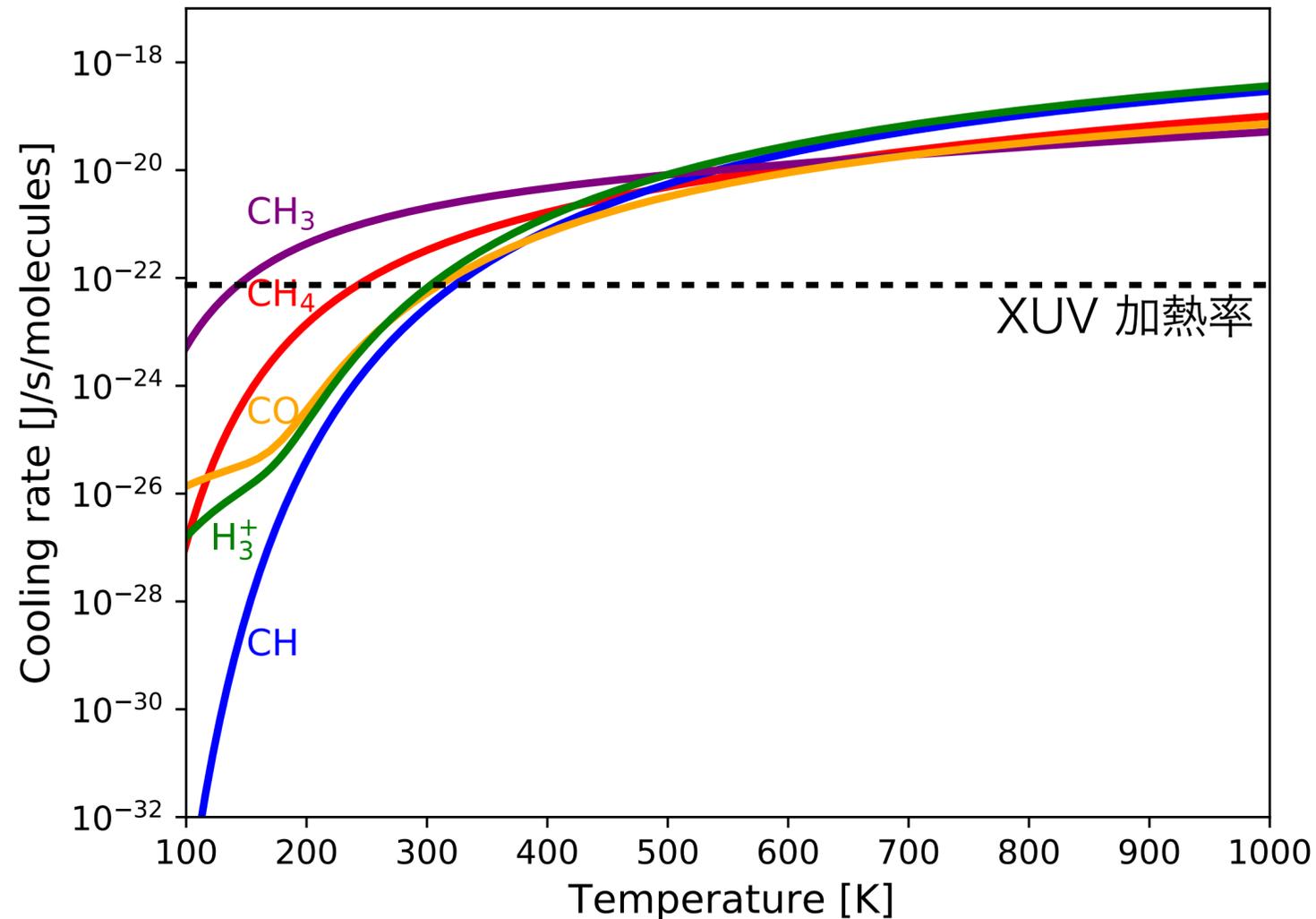


- 赤外活性大気種の放射冷却効果により大気散逸が抑制される可能性有
 - 還元的環境持続期間の長期化に繋がり得る

モデリングの課題

- 放射冷却に伴うエネルギー損失はこれまで自由パラメータとして扱われ、影響の不定性大
- 流出大気の光化学も簡略化されることが多く、赤外活性光化学生成物の影響も不明

赤外活性大気種を豊富に含む還元的原始大気の流体力学的散逸



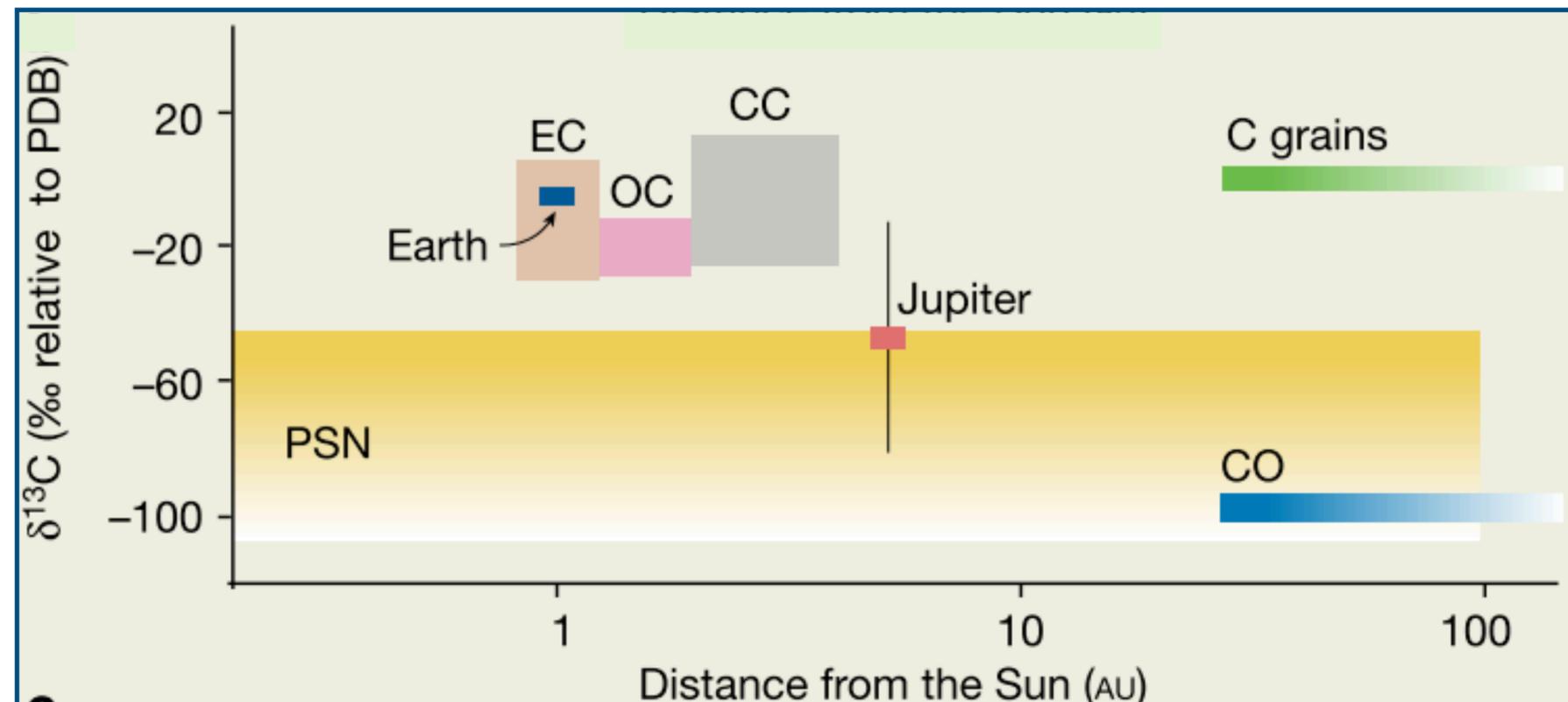
- 赤外活性大気種の放射冷却効果により大気散逸が抑制される可能性有
 - 還元的環境持続期間の長期化に繋がり得る

モデリングの課題

- 放射冷却に伴うエネルギー損失はこれまで自由パラメータとして扱われ、影響の不定性大
- 流出大気的光化学も簡略化されることが多く、赤外活性光化学生成物の影響も不明

同位体組成による大気散逸の制約

- 流体力学的散逸が起きると大気成分の同位体組成が変化するはず (e.g., Hunten et al, 1987)
- 地球と始原的隕石の炭素・窒素同位体比はほぼ等しく、大気散逸の影響をほとんど受けていないように見える (Marty, 2012)
- **放射冷却によって炭素種・窒素種の散逸が抑制された場合は同位体組成の類似性と整合的**



Broadley et al. (2022)

研究目的

- 還元的原始大気における流体力学的散逸モデルを構築
 - 従来簡略化されていた放射冷却過程と化学過程を陽に組み込む



- 放射冷却過程/化学過程が流体力学的散逸に影響を明らかにし大気散逸率を推定
- 現表層揮発性元素の貯蔵量/同位体組成と統合的な大気進化経路/還元環境持続期間を推定

数値モデル概要

- 下層中層大気： $\text{H}_2 + \text{CH}_4$
 - CH_4/H_2 比はパラメータ
- 太陽 XUV 放射に曝され上層大気 (XUV 吸収が主に起こる領域) が膨張・散逸
 - 球対称一次元系

数值モデル概要

力学過程

化学過程

放射過程



数值モデル概要

力学過程

- 運動方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial r} = \underbrace{-\frac{1}{\rho_i} \frac{\partial p_i}{\partial r}}_{\text{圧力勾配}} - \underbrace{\frac{GM}{r^2}}_{\text{重力}} + \underbrace{\sum_j (u_j - u_i) n_j \mu_{ij} k_{ij}}_{\text{運動量交換}}$$

圧力勾配

運動量交換

重力



数値モデル概要

化学過程

- 大気成分 (計 16 成分)

- H₂, CH₄, H, C, CH, CH₂, CH₃, H⁺, H₂⁺, H₃⁺, C⁺, CH⁺, CH₂⁺, CH₃⁺, CH₄⁺, CH₅⁺

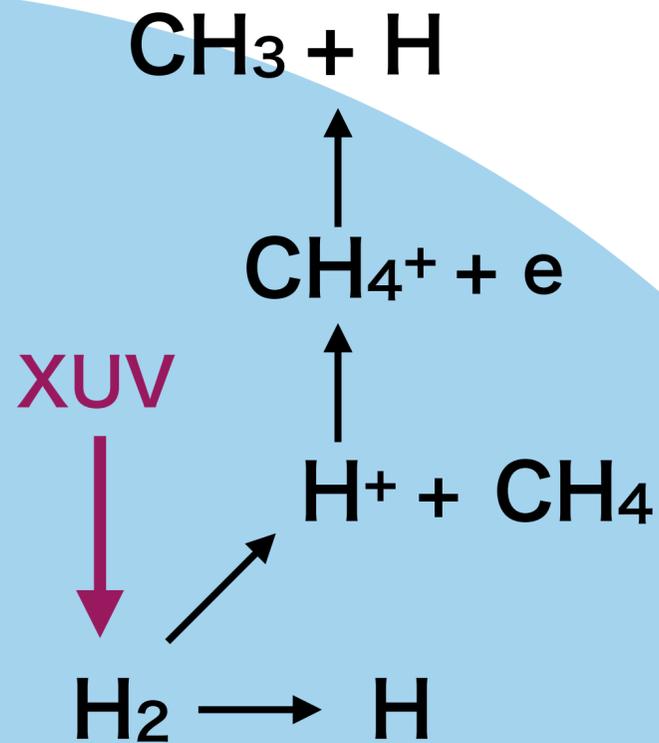
- 化学反応 (計 97 反応)

- 光分解
- 大気成分間の二体反応

- 連続の式

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (n_i u_i r^2)}{\partial r} = \underline{\omega_i}$$

化学反応による正味生成率



数値モデル概要

放射過程

● 放射加熱

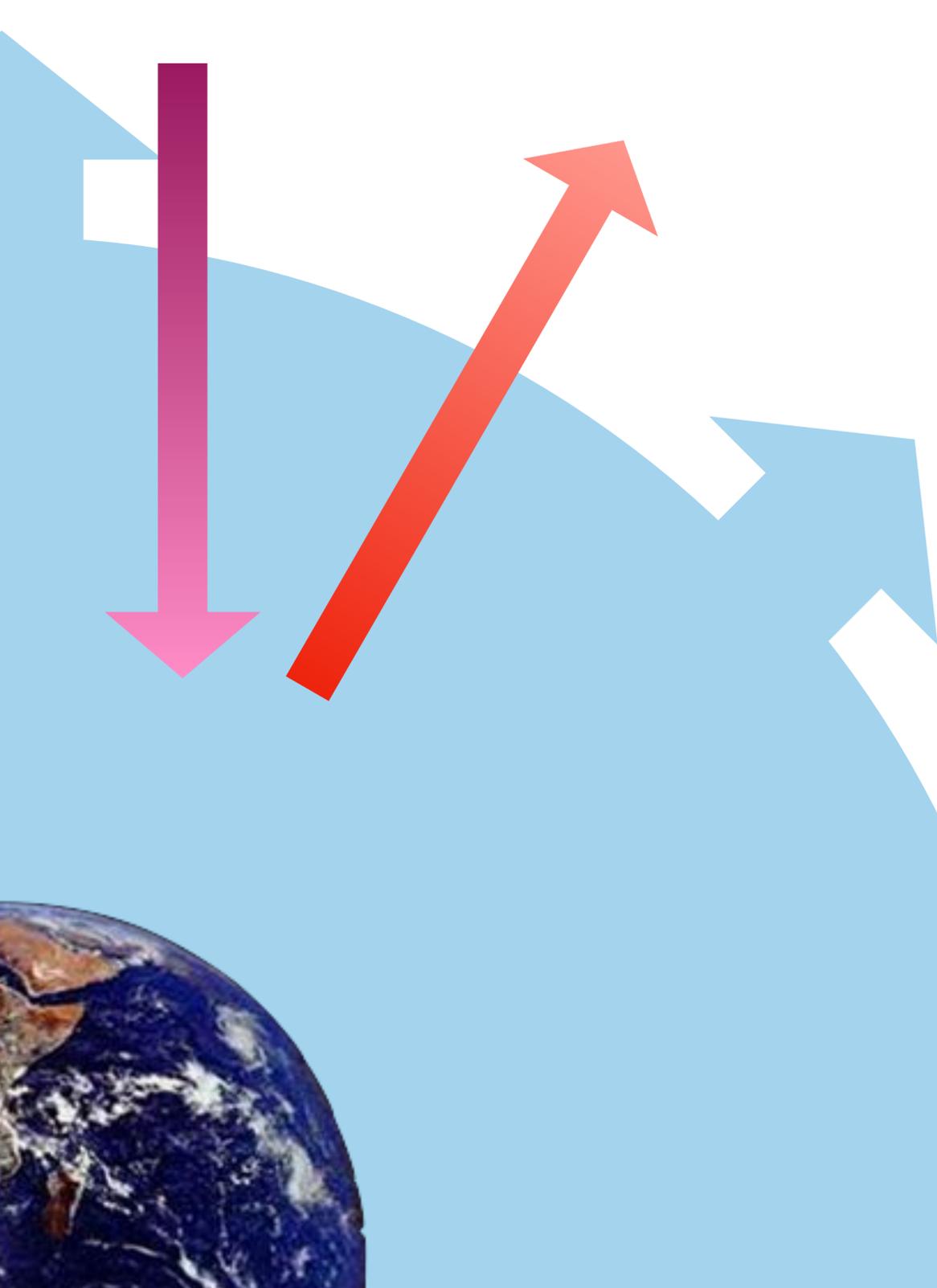
- H₂, CH₄, H, C, CH, CH₂, CH₃ による UV 吸収を考慮
 - 初期太陽 UV スペクトルを入力 (Claire et al., 2012)
 - 波長範囲：0.1 - 165 nm
 - XUV フラックス：現在の約 100 倍

● 放射冷却

- CH₄, CH, CH₃, H₃⁺ による赤外輝線放射を考慮
 - 対空間冷却近似の下，各高度での冷却率を計算
 - 流出運動に伴うドップラー偏移を考慮

● エネルギー方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(\frac{1}{2} u^2 + E \right) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{1}{2} u^2 + E + \frac{p}{\rho} \right) u r^2 \right]$$
$$= - \frac{GM}{r^2} \rho u + \underbrace{q_{XUV}}_{\text{放射加熱率}} - \underbrace{q_{ch}}_{\text{化学反応エネルギー消費率}} - \underbrace{q_{rad}}_{\text{放射冷却率}}$$



数値モデル概要

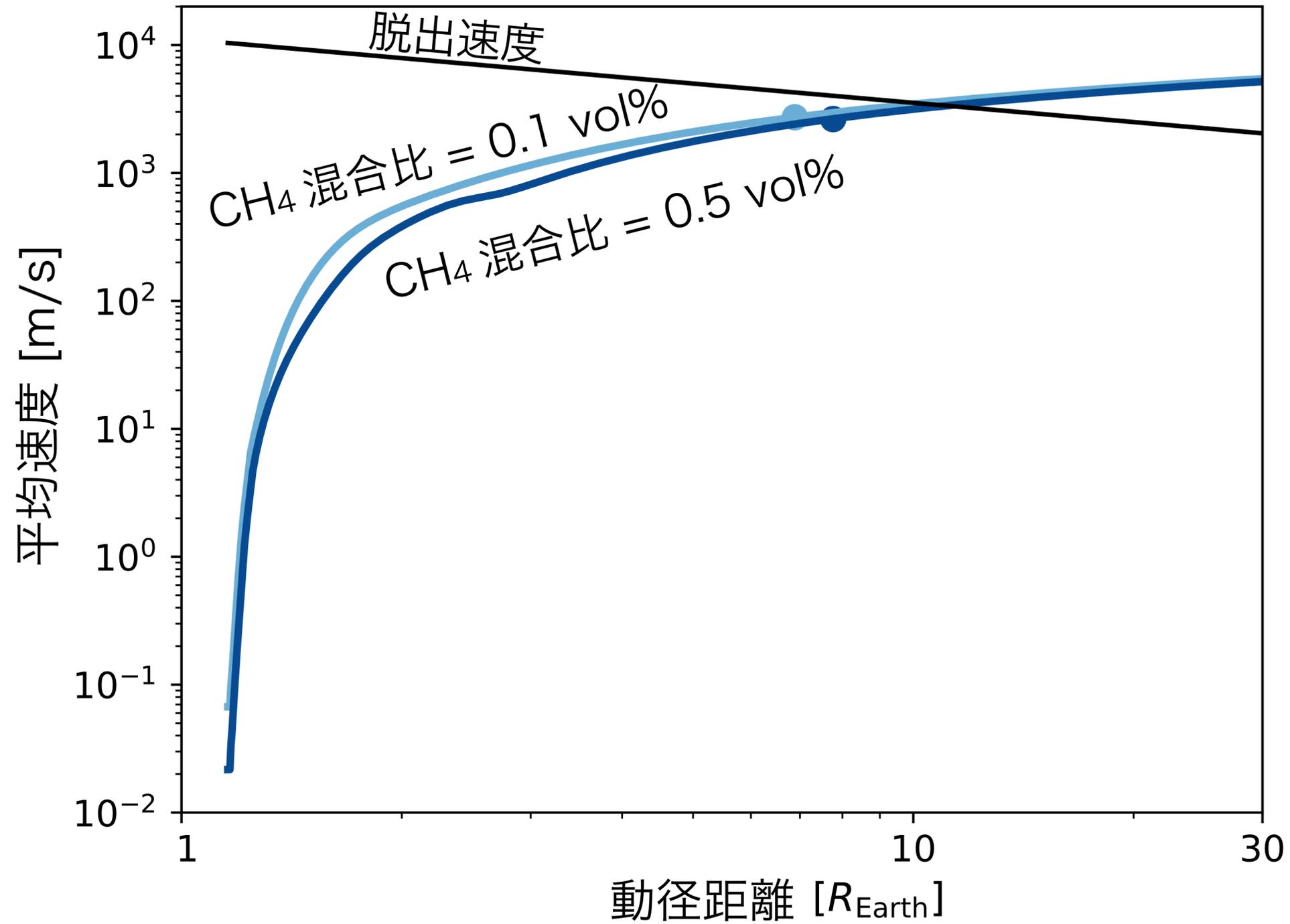
上部境界条件

- 動径距離：30 R_{Earth}
- 数密度・速度・圧力：計算領域から外挿

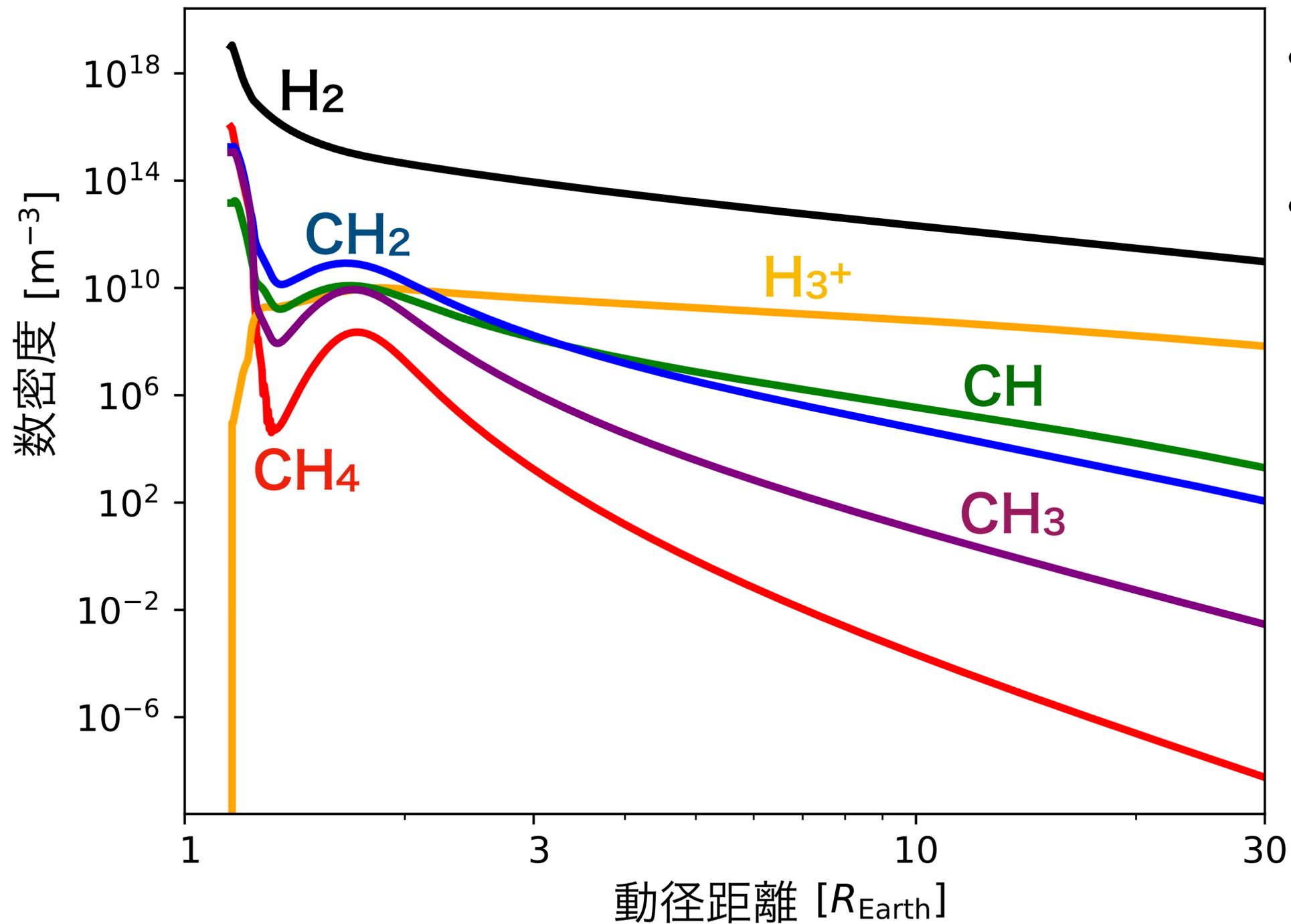
下部境界条件

- 動径距離： $R_{\text{Earth}} + 1000 \text{ km}$
- 温度：200 K
- H_2 数密度： $1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
- CH_4 数密度：0 - $1.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$
- 速度：計算領域から外挿

速度分布

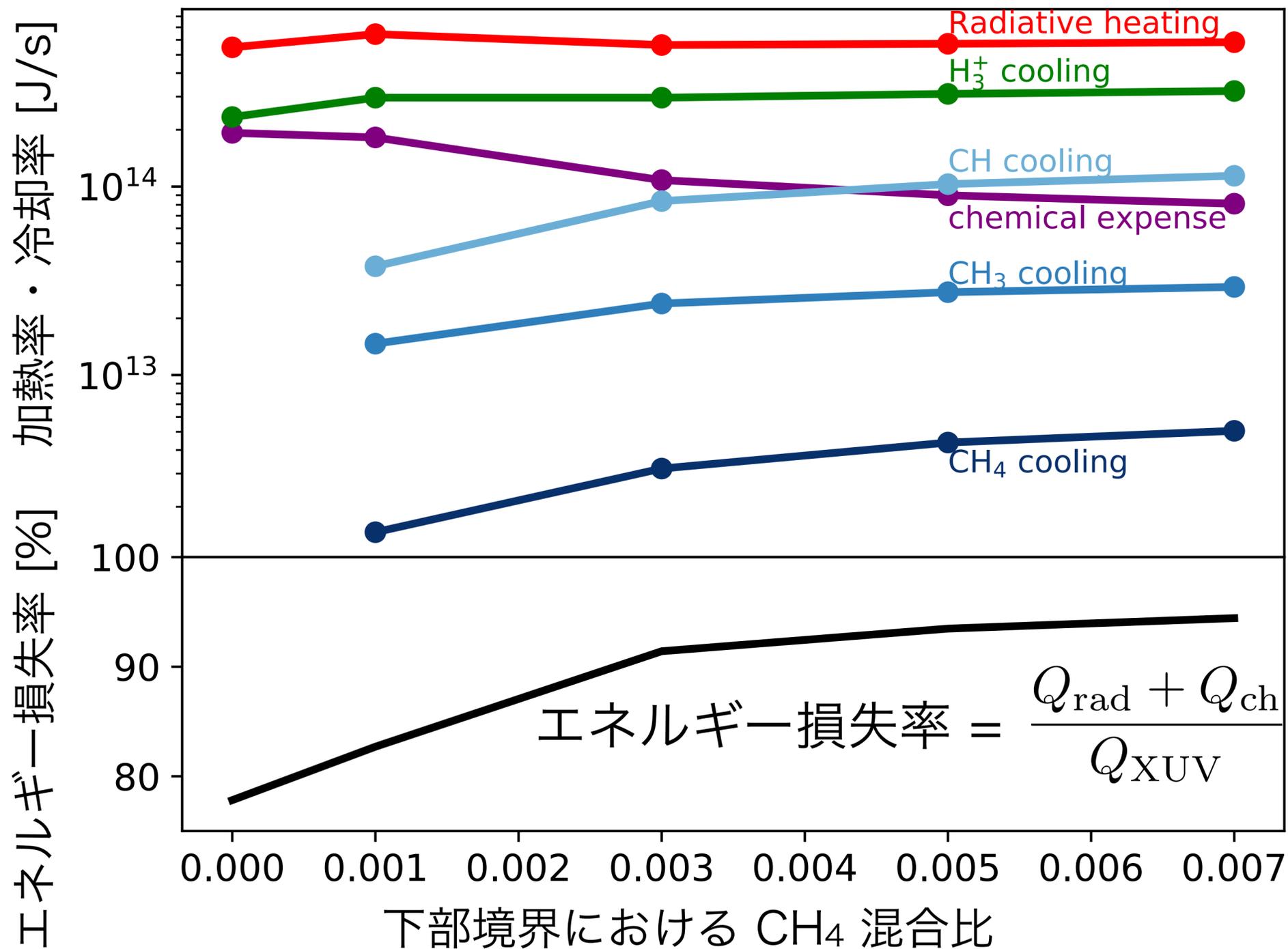


数密度分布 (CH₄ 混合比 = 0.1 vol%)



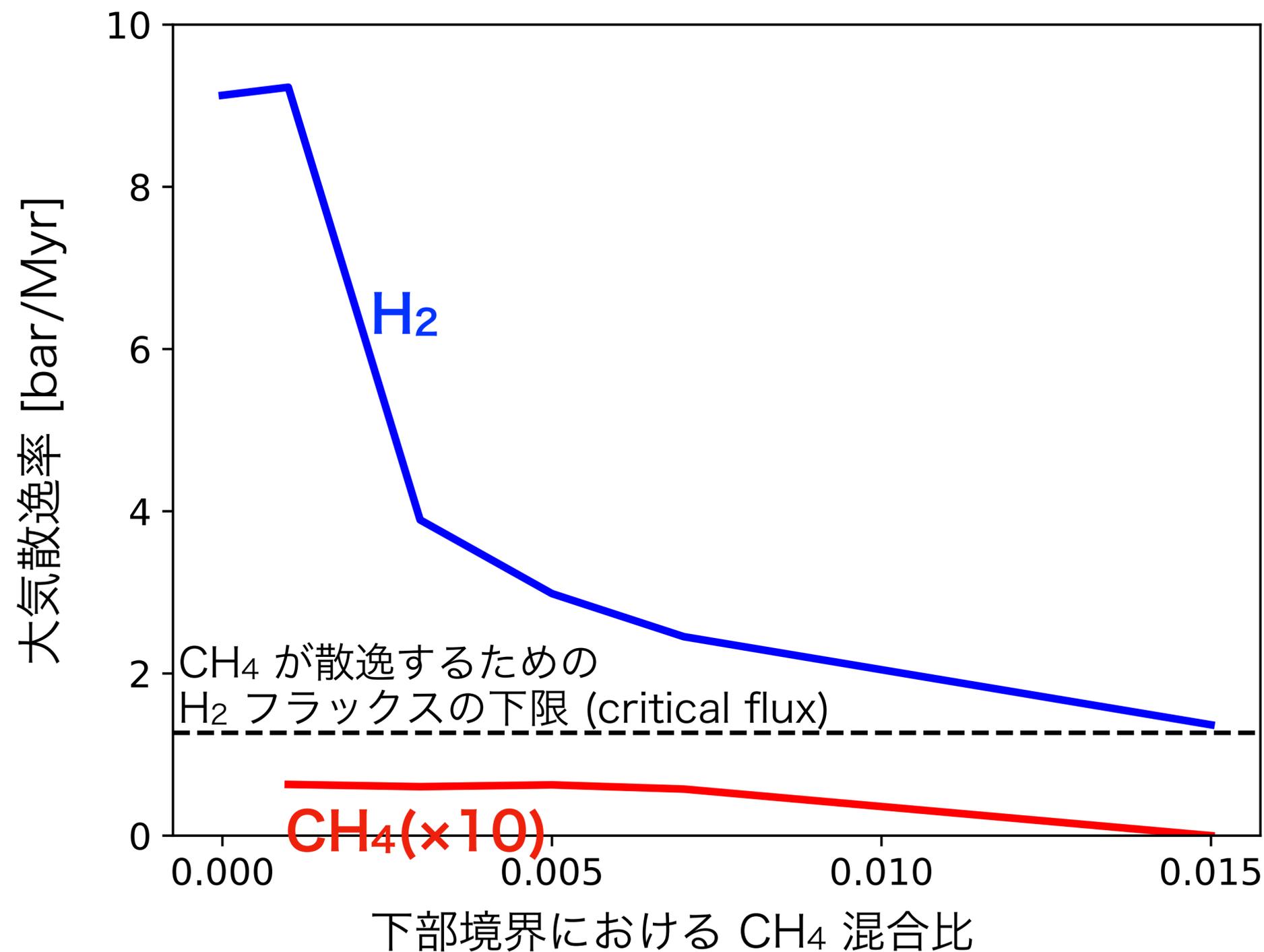
- CH₄ は下層で光分解・イオンとの反応により急速に分解
- CH₄ 分解に伴い CH, CH₂, CH₃ 等の新たな赤外活性分子生成
 - $\text{CH}_4 + h\nu \rightarrow \text{CH}_2 + \text{H}_2$
 - $\text{CH}_4 + h\nu \rightarrow \text{CH}_2 + \text{H} + \text{H}$
 - $\text{CH}_4 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4^+ + \text{H}$
 - $\text{CH}_4 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3^+ + \text{H}_2$

放射冷却の影響



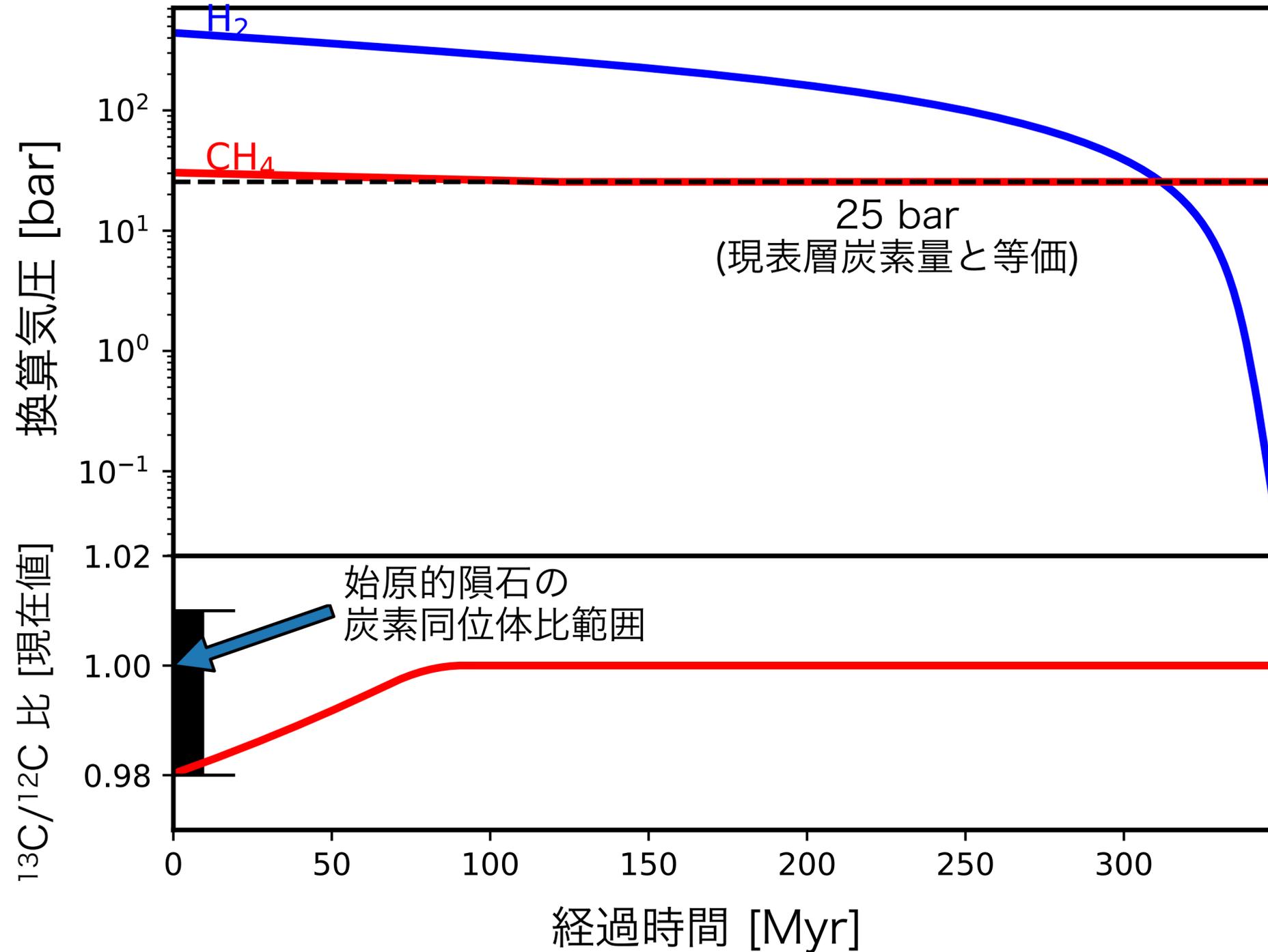
- 化学反応に伴うエネルギー消費と H₃⁺ の放射冷却により ~75 % のエネルギー損失
- **CH₄ 混合比増加に伴い, CH, CH₃ の放射冷却によりエネルギー損失率増大**
 - CH₄ 混合比 ~0.5 vol% の時, エネルギー損失率 ~95 %

大気散逸率



- CH₄ 混合比増加に伴い、エネルギー損失率増大により大気散逸率減少
 - CH₄ ~ 1.5 vol% の時、H₂散逸率が純水素大気と比べ約1桁減
- CH₄ ≥ ~1.5 vol% の場合、CH₄ 散逸はほぼ停止

大気進化経路

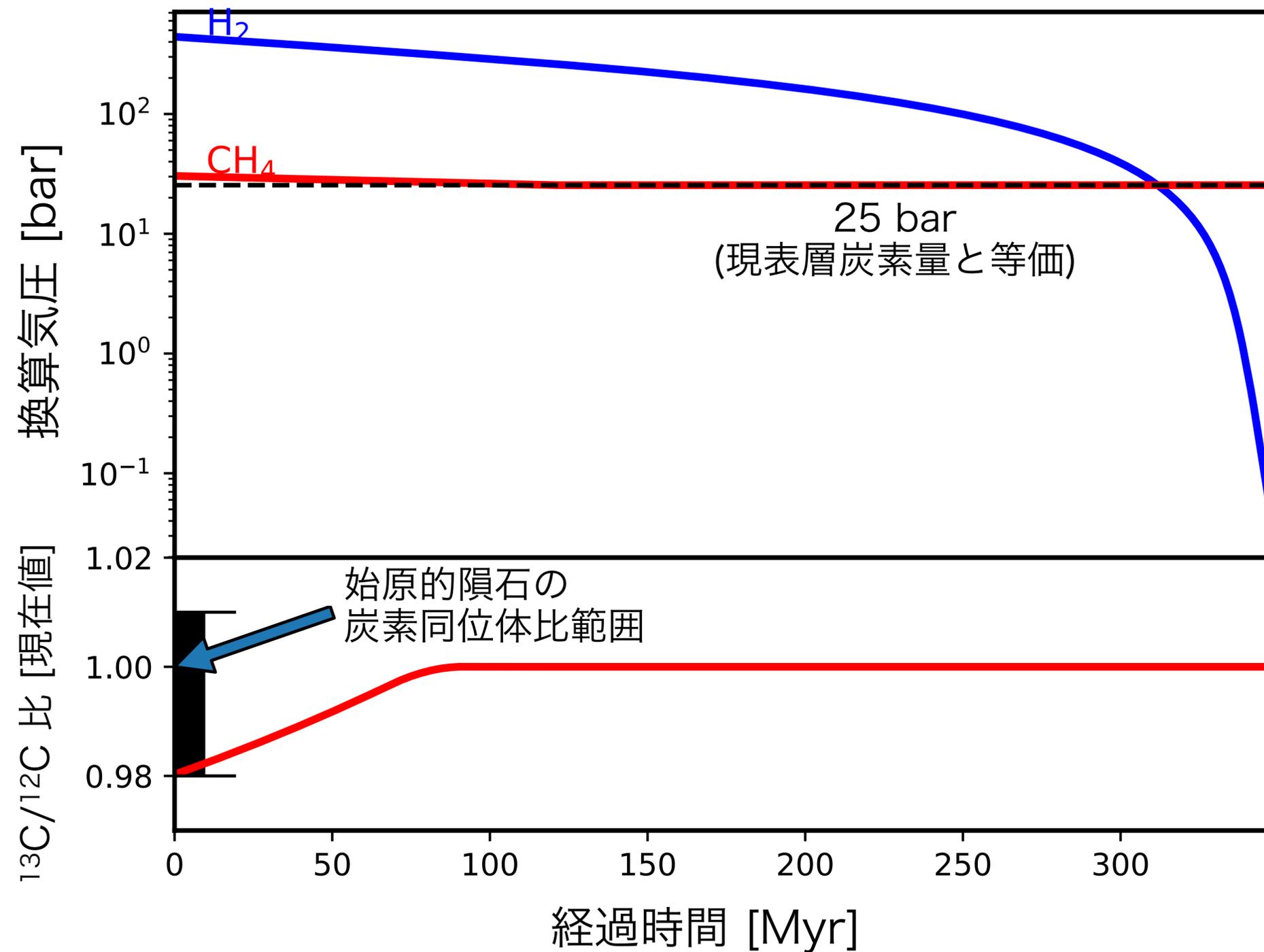


仮定

- 大気中炭素は常に CH_4 として存在
- 最終的に現表層炭素量 ($\text{CO}_2 \sim 70 \text{ bar}$) と等価な CH_4 が残留
- 初期炭素同位体比は始原的隕石炭素同位体比の範囲に収まる
- XUV 強度固定
- 散逸中の大気供給過程と他の大気散逸過程を無視

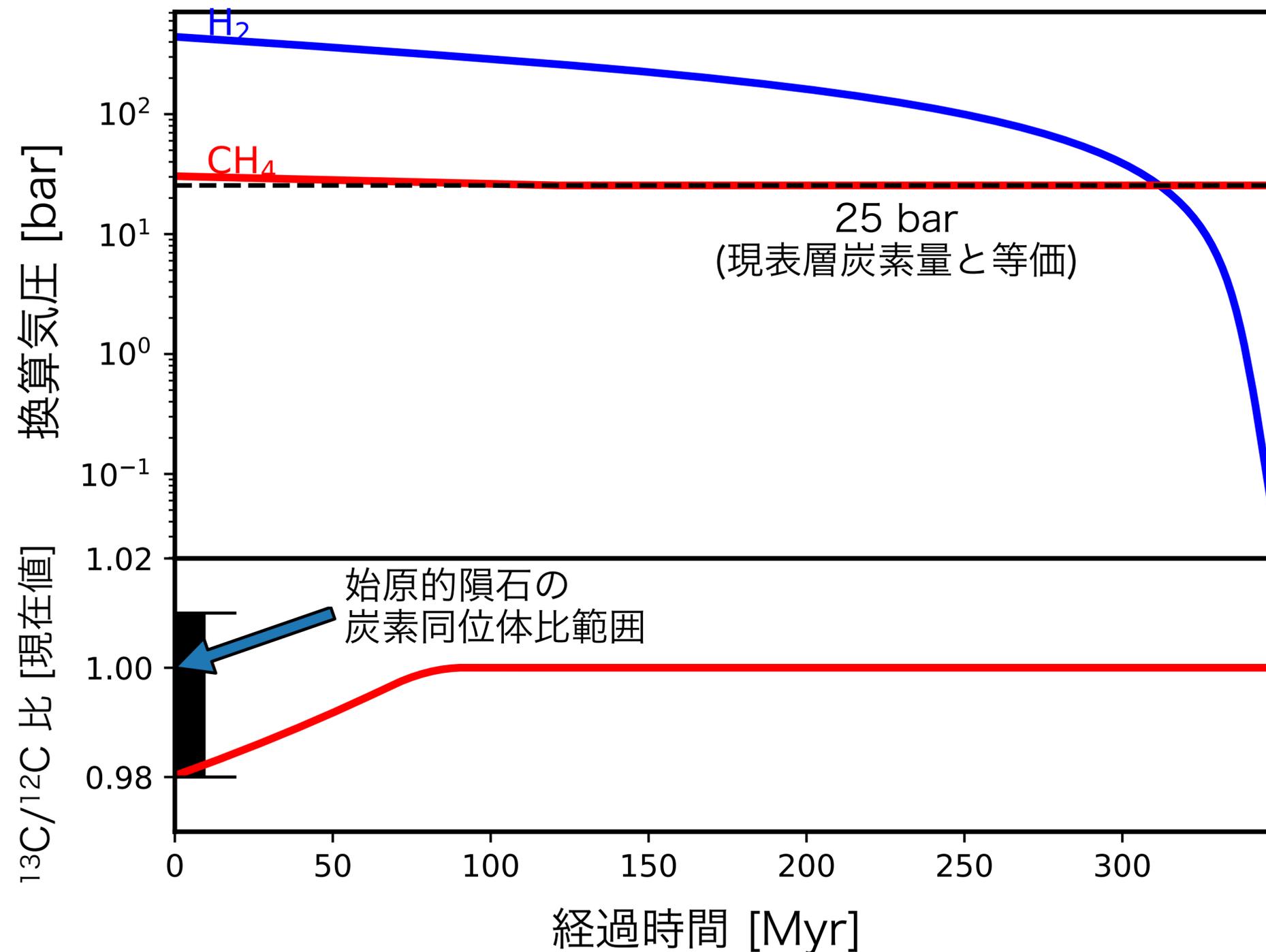
初期大気量と組成をパラメータとし
残留大気量・大気散逸率を元に
大気量と同位体比の時間変化を推定

大気進化経路



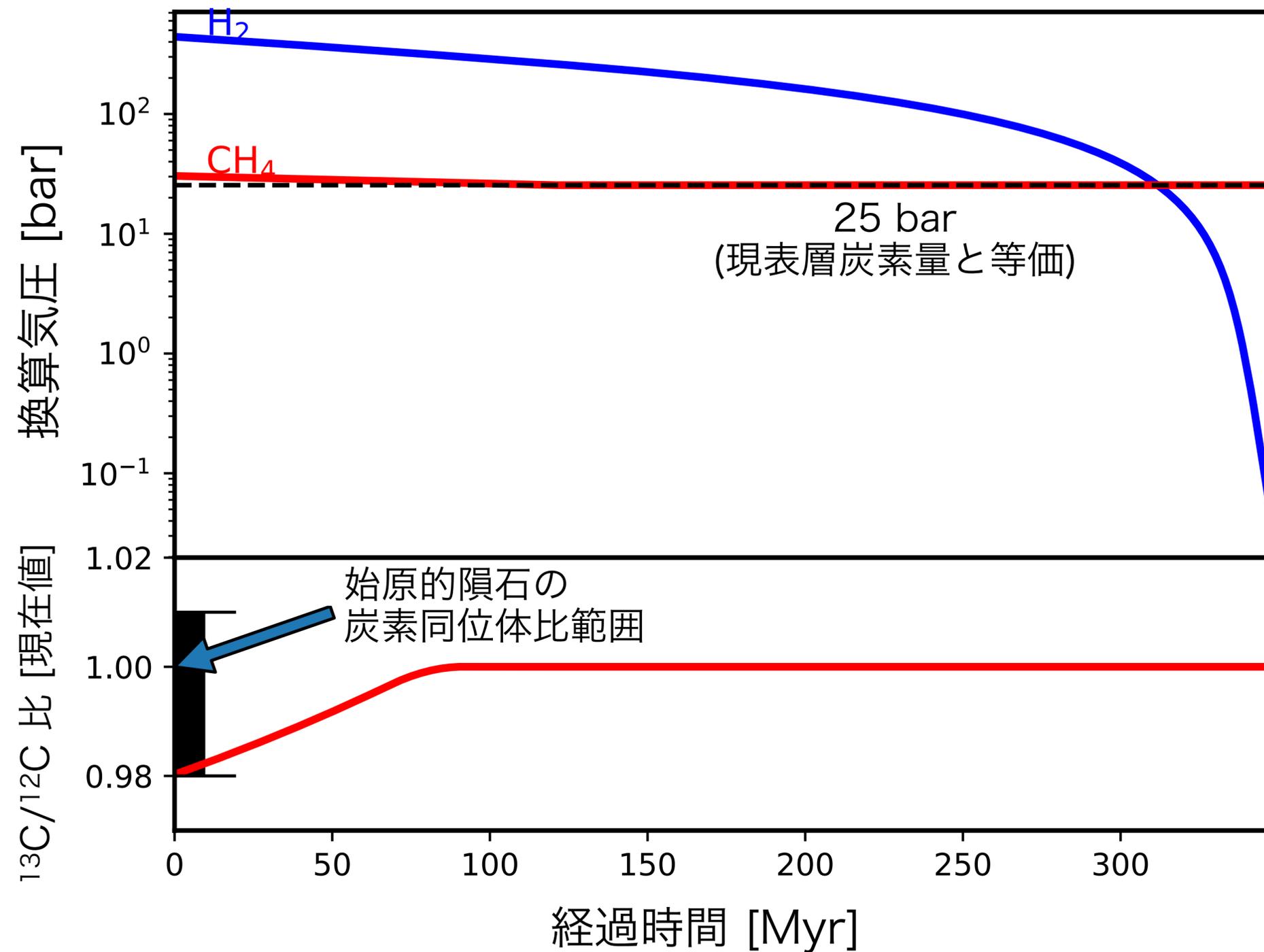
- H₂ と比べ CH₄ は殆ど散逸しない
 - 炭素同位体比の制約から決まる
CH₄ 散逸量上限値 ~5 bar

大気進化経路



- 大質量の富水素大気が形成された場合も初期同位体比の制約を満たす
 - 富水素環境下でも放射冷却により CH_4 が殆ど散逸せず分別しないため
 - H_2 初期量上限 ~ 400 bar
 - 地球集積時の表層化学状態も数百 bar の富水素大気形成を示唆 (Kuramoto & Matsui, 1996; Genda et al., 2017)

大気進化経路



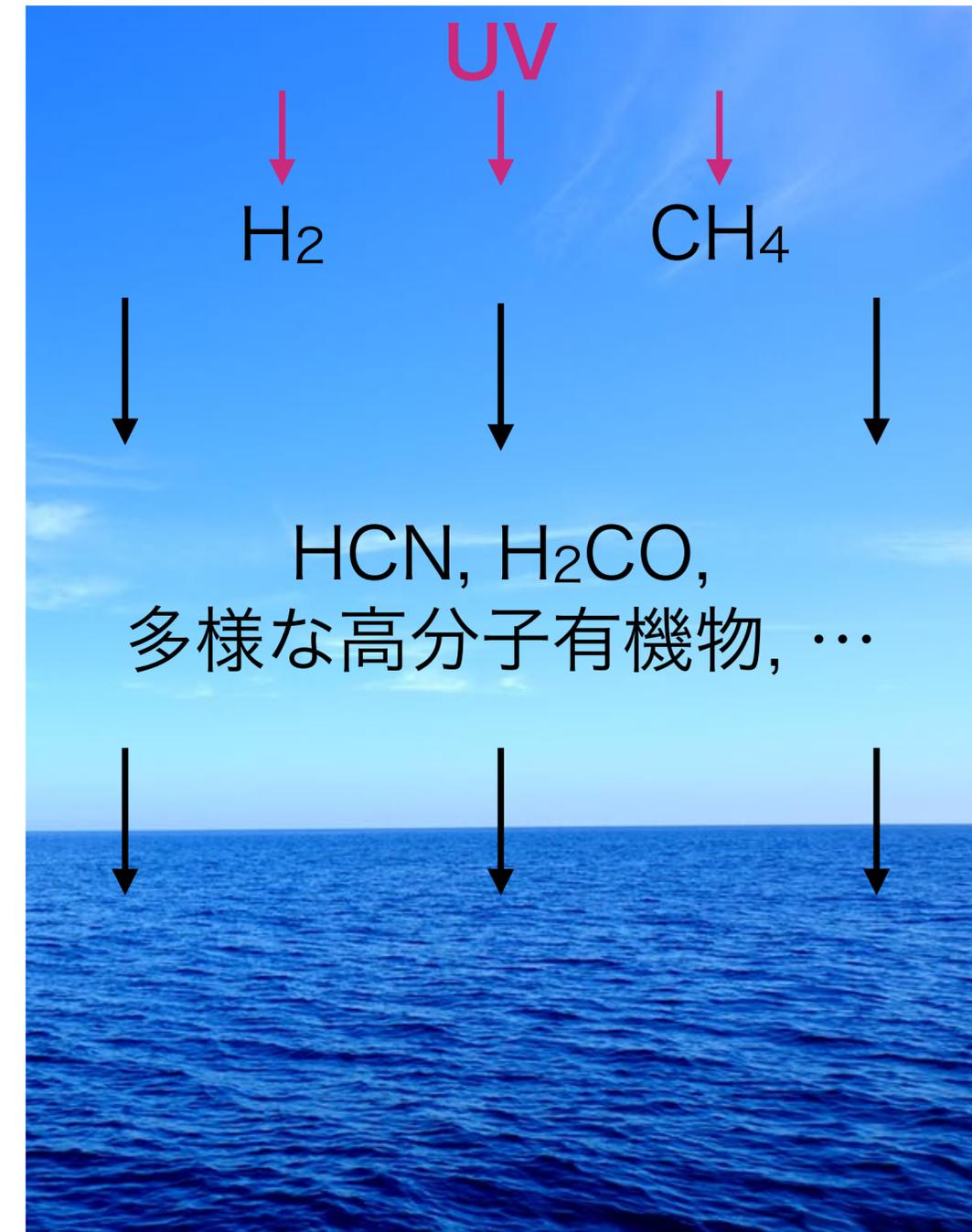
● 富水素環境が数億年に渡り持続可能

- 水素残留期間上限値 ~ 400 Myr
- 放射冷却効果により純水素大気と比べ約 1 桁長期化

還元的大気長期持続の重要性

- 還元的大気中では有機物の光化学的生成が進みやすい
- 冥王代において継続的に有機物の生成・海洋への堆積進行
 - HCN や H_2CO 等, 生命前駆物質生成において重要な有機分子も含まれていた可能性
 - JpGU にて還元的大気的光化学的進化・有機物生成のモデリングについて発表予定

**生命誕生に繋がる有機物生成において
大気が主要な役割を果たした可能性がある**



まとめ

大気散逸の振る舞い

- H₂ 大気に少量でも CH₄ が含まれると大気散逸が著しく抑制される
 - CH, CH₃, H₃⁺ による放射冷却の影響
 - CH₄ 混合比 ~1.5 vol% の時点で
H₂ 散逸率は約 1 桁減少 + CH₄ の散逸ほぼ停止

原始地球大気の進化

- 炭素種・窒素種はほとんど散逸しない
 - 現在の炭素・窒素同位体組成と整合的
- 数億年に渡り水素に富む還元的環境が持続した可能性がある
 - 大気が主要な有機物生成場として機能した可能性