

# Hydrodynamic Escape

## による惑星大気の散逸

佐々木貴教 & 阿部豊  
(東大・理・地惑)

# 大気の熱的散逸

- Hydrodynamic Escape 「大気の流出」

静水圧平衡が破れた場合の散逸

気体分子の運動エネルギー > 重力エネルギー

散逸fluxは “energy-limited”

散逸規模が大きく惑星大気の進化を追う上で重要

地球型惑星の原始大気散逸  
散逸に伴う希ガス質量分別  
Hot Jupiter からの質量流出  
Super-Earth の大気進化



# H.E.に関する先行研究

2000

## 90年代～00年代

- 希ガス問題を定性的に説明するための道具として計算結果を適用
- H.E.を解析的に解く限界
- 一通りやれることはやった

1990

## 80年代～90年代

- 解析的H.E.を解く研究が精力的になされた

1980

# H.E.に関する先行研究

[Tian et al., 2005]

- 時間発展方程式を解いて計算
- Jeans Escape との比較計算
- 還元的な原始地球大気の保持を示唆
- Hot Jupiter の大気散逸を計算

1成分モデルである

多成分モデルへの拡張ができていない  
化学反応、放射吸収を計算していない



扱える問題が非常に限定的

2000

1990

1980

## 本研究の大きな目標

ハイドロダイナミックエスケープの数値計算

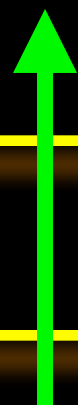
- ・ 安定に計算可能な数値計算コードの作成
- ・ 多成分モデルの構築
- ・ 太陽fluxの時間変化・光化学反応を考慮



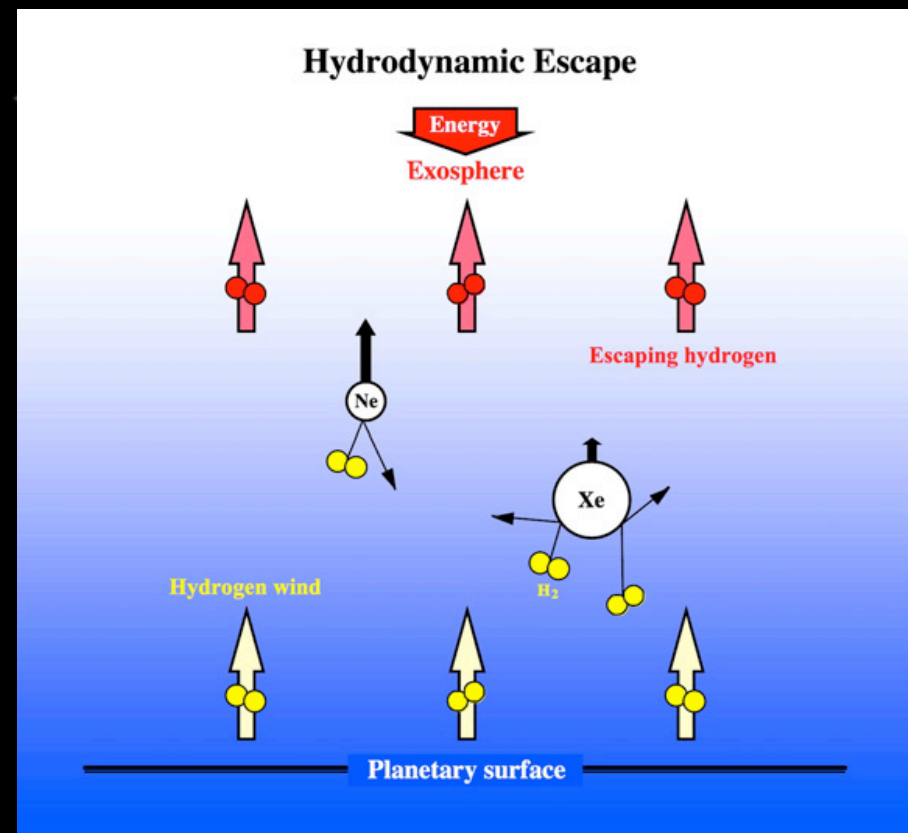
大気散逸研究の道具を手に入れる

## 具体的な問題への適用

金星大気の水散逸問題・Ne/Ar比問題に対して適用し、これらの問題に決着をつける



# 2成分H.E.モデル



## 数値計算

Zahnle & Kasting (1986) を参考に導出

- 1次元時間発展オイラー方程式
- 水素+成分Aの2層流体モデル
  - 水素と成分Aは互いにドラッグ効果を及ぼす
- 今回は化学反応、水素以外の成分の光吸収は無視

# 数値計算

## 1次元オイラー方程式

$$\frac{\partial(\rho r^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u r^2)}{\partial r} = 0$$

質量保存

分子間の衝突頻度

$$\frac{\partial(\rho u r^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 r^2)}{\partial r}$$

運動量保存

熱拡散係数

$$= -\rho GM - r^2 \frac{\partial p}{\partial r} +$$

$$\rho r^2 (u_x - u) n_x k_i$$

運動量輸送項

$$\alpha_T k \left( \frac{n_x n}{n_x + n} \right) \frac{dT}{dr}$$

熱拡散項

$$\frac{\partial(E r^2)}{\partial t} + \frac{\partial[(E + p) u r^2]}{\partial r}$$

エネルギー保存

$$= -\rho u GM + q r^2 + \frac{\partial}{\partial r} \left( \kappa r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

$k_i, \alpha_T$  は測定値を用いる  
[Zahnle & Kasting, 1986]

Species	$\Phi_i^a$	$b_i^{b,c}$ in H <sub>2</sub>	$b_i$ in H	$b_i$ in O	$b_i$ in O <sub>2</sub>
<sup>3</sup> He <sup>d</sup>	6.11	$5.51 \times 10^{17} T^{.75e}$	$1.07 \times 10^{18} T^{.732}$	$3.87 \times 10^{17} T^{.75}$	—
<sup>4</sup> He	4.83	$5.23 \times 10^{17} T^{.75e}$	$1.04 \times 10^{18} T^{.732}$	$3.44 \times 10^{17} T^{.75}$	—
O	2.10	$3.0 \times 10^{17} T^{.75f}$	$4.8 \times 10^{17} T^{.75f,g}$	—	—
H <sub>2</sub> O	2.10	$2.7 \times 10^{17} T^{.75h}$	$6.6 \times 10^{17} T^{.70h}$	$1.06 \times 10^{17} T^{.774h}$	$1.37 \times 10^{16} T^{1.072}$
<sup>20</sup> Ne	1.29	$4.37 \times 10^{17} T^{.73i}$	$7.9 \times 10^{17} T^{.73i,g}$	$1.5 \times 10^{17} T^{.75i}$	—
N <sub>2</sub>	1.36	$2.65 \times 10^{17} T^{.75e}$	$6.5 \times 10^{17} T^{.70j}$	$9.7 \times 10^{16} T^{.774}$	$8.3 \times 10^{16} T^{.724}$
CO	1.36	$2.65 \times 10^{17} T^{.75e}$	$6.5 \times 10^{17} T^{.70j}$	$9.7 \times 10^{16} T^{.774}$	$8.3 \times 10^{16} T^{.724}$
<sup>36</sup> Ar <sup>d</sup>	1.00	$2.81 \times 10^{17} T^{.75e}$	$1.06 \times 10^{18} T^{.597}$	$5.61 \times 10^{16} T^{.84i}$	—
CO <sub>2</sub>	.998	$2.3 \times 10^{17} T^{.75}$	$8.4 \times 10^{17} T^{.60j}$	$7.86 \times 10^{16} T^{.776k}$	$5.12 \times 10^{16} T^{.77}$
<sup>84</sup> Kr	.494	$2.3 \times 10^{17} T^{.76}$	$4.1 \times 10^{17} T^{.76g}$	$4.3 \times 10^{16} T^{.84i}$	—
<sup>130</sup> Xe	.358	$2.7 \times 10^{17} T^{.712}$	$4.9 \times 10^{17} T^{.712g}$	$3.5 \times 10^{16} T^{.84i}$	—

# 数値計算

## 1次元オイラー方程式

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial r} = H \quad \text{セミ・ラグランジュ法で解く}$$

[	移流項	$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial r} = 0$	→	CIP法
	非移流項	$\frac{\partial f}{\partial t} = H$	→	差分法 (時間前進・空間中心)

- 大気下端での密度・温度を与える
- 大気上端で大気は完全散逸
- 全領域でフラックスが一定になるまで反復計算

※解析解との比較による validation については省略



# 金星大気問題 (H<sub>2</sub>O散逸)

金星からの水の散逸：

H<sub>2</sub>O → H<sub>2</sub>+Oを散逸できるか？

金星軌道では暴走温室状態が発生

→ 大気上層の水蒸気が多くなる

→ 大気上層でEUVによりH<sub>2</sub>Oが解離

金星大気のD/H比は地球の100倍

→ 最低でも現在の100倍は水蒸気があった

(実際には地球と同程度の海が存在していた?)

# 金星大気問題 (H<sub>2</sub>O散逸)

金星からの水の散逸：

H<sub>2</sub>O → H<sub>2</sub>+Oを散逸できるか？

H<sub>2</sub>Oが解離した後のOの捨て場所は？

△地面を酸化する → 大量の地面を必要とする

△大気を酸化する → 還元的気体が必要

△非熱的に散逸させる → 不十分 [e.g. Kulikov et al., 2006]

? H<sub>2</sub>と一緒に散逸させる → 可能か？

H<sub>2</sub>とOの量が同程度の場合のH.E.による散逸を  
定量的に計算してO散逸の可能性に制約を加える

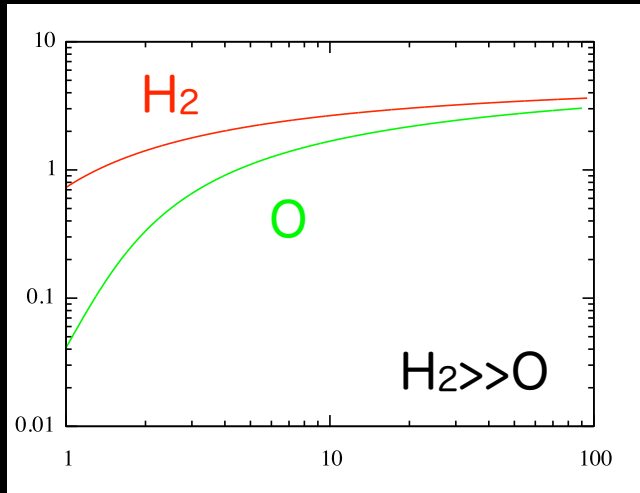
# H<sub>2</sub>とOの2成分で計算

## 計算条件

- 大気下端：100 km, 大気上端：10000 km
- 大気下端での密度： $5 \times 10^{13} / \text{cm}^3$
- 大気下端に100 ergs/cm<sup>2</sup>s の熱源  
(現在の太陽フラックスの100倍程度)
- 大気の温度は、水素が熱源からエネルギーを受け取ってエネルギー保存から決定
- H<sub>2</sub>がOを加速する効果とともに、  
OがH<sub>2</sub>を減速する効果も計算されている

# H<sub>2</sub>とOが等量ある問題

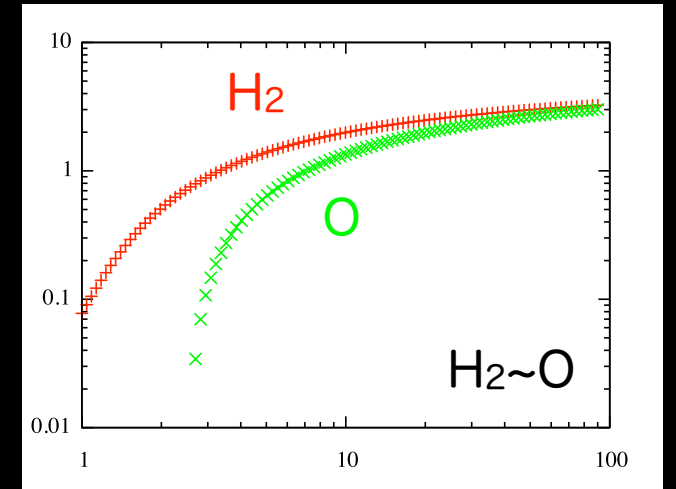
速度 (音速で規格化)



高度 (金星半径で規格化)

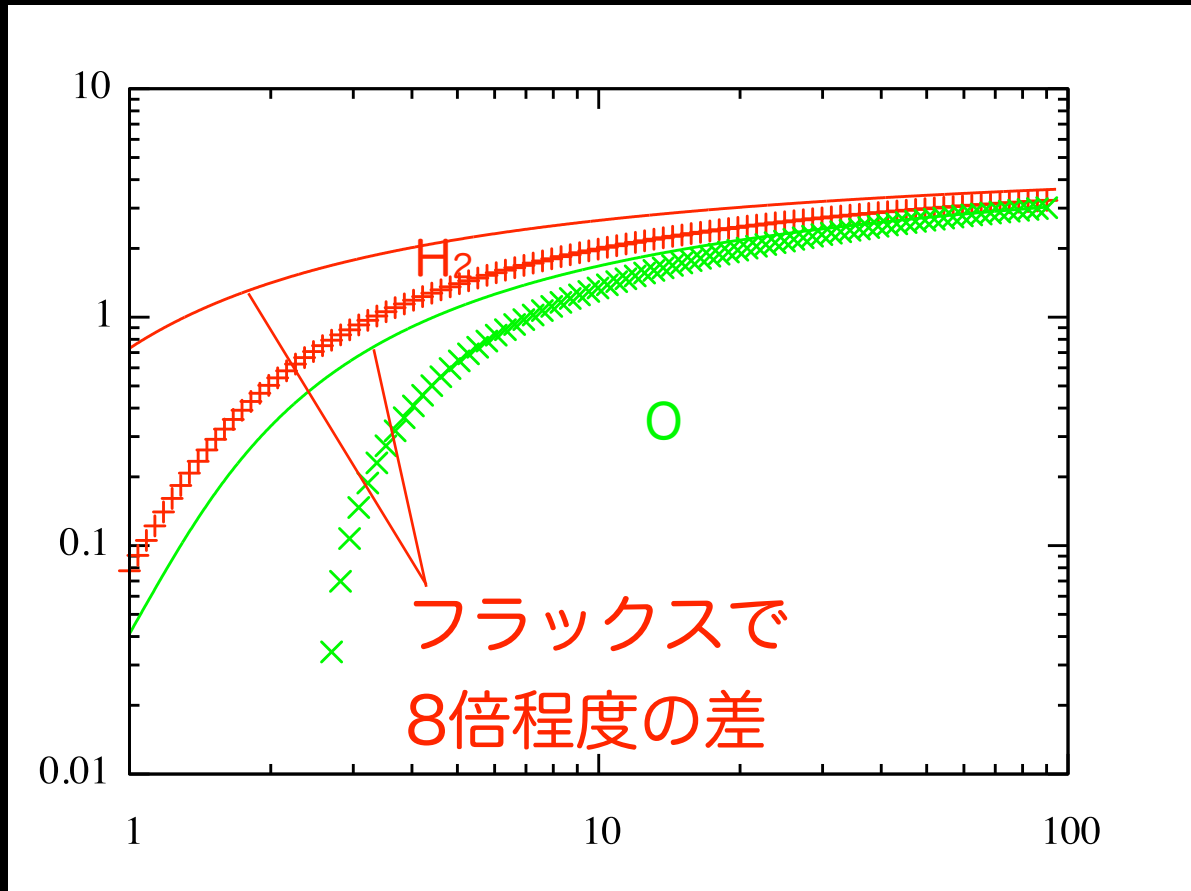
← Oが少ない場合  
 Oが多い場合 →  
 Oが存在することで  
 H<sub>2</sub>が散逸しにくくなっている!

速度 (音速で規格化)



高度 (金星半径で規格化)

速度 (音速で規格化)



高度 (金星半径で規格化)

\* 金星からのH<sub>2</sub>O散逸 \*

H<sub>2</sub>とOが等量あると  
 散逸フラックスが激減する

↓

太陽放射 (∝太陽年齢)  
 の値に制約を加える

# 金星大気問題 (H<sub>2</sub>O散逸)

金星からの水の散逸:

H<sub>2</sub>O → H<sub>2</sub>+Oを散逸できるか?

H<sub>2</sub>Oが解離した後のOの捨て場所は?

△地面を酸化する → 大量の地面を必要とする

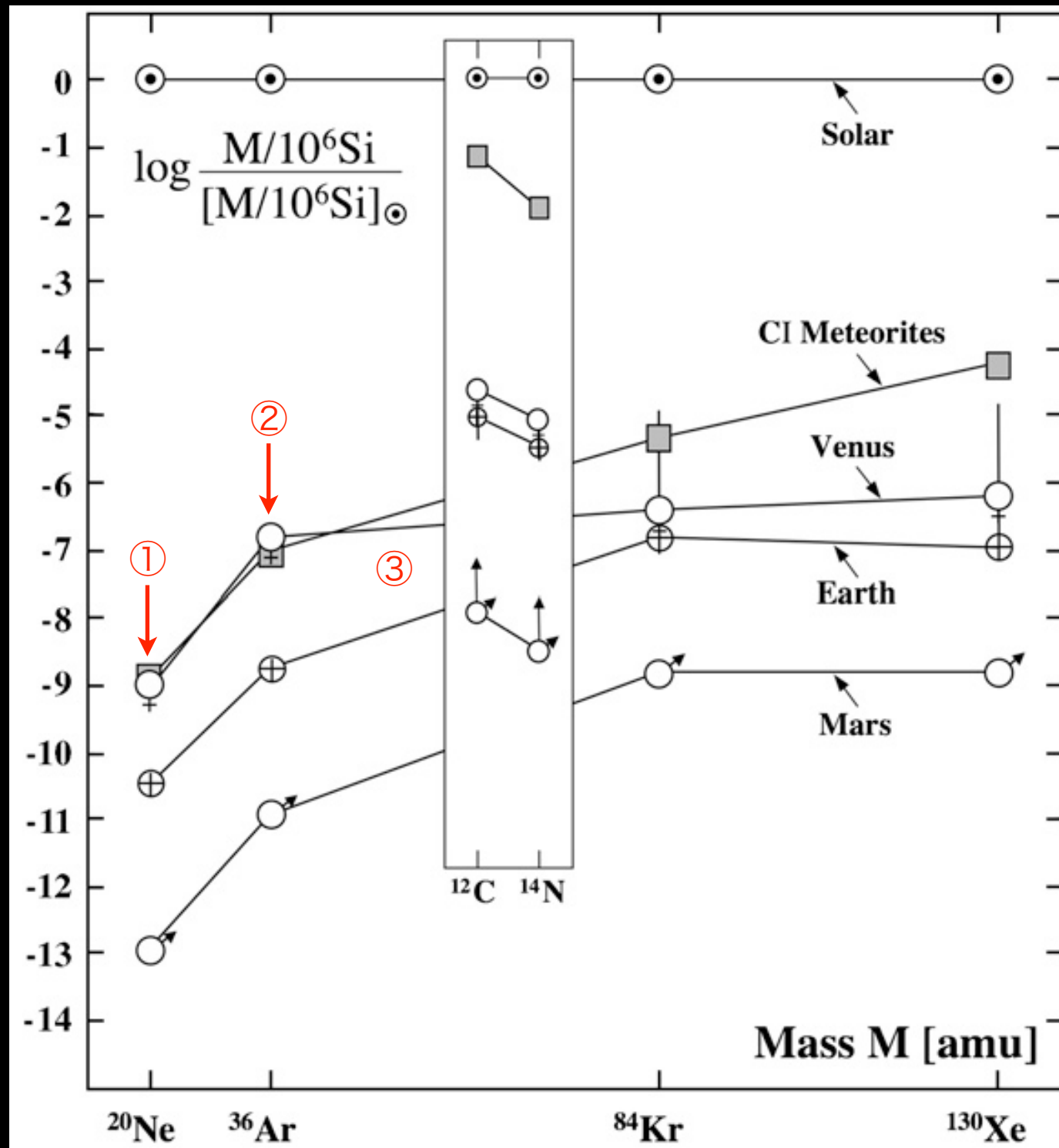
△大気を酸化する → 還元的気体が必要

△非熱的に散逸させる → 不十分 [e.g. Kulikov et al., 2006]

? H<sub>2</sub>と一緒に散逸させる → パラメタによる

H.E.によるO散逸を計算することで、入射エネルギーフラックス (∝太陽年齢) に制約が加わる

# 金星大気問題 (希ガス散逸)



- ① Neがdeplete
  - ② Arが隕石と等量かそれ以上
  - ③ その他の同位対比など
    - $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  fractionated
    - $^{36}\text{Ar}/^{84}\text{Kr}$  un-fractionated
    - $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  un-fractionated
- [Pepin, 1991 and references therein]

Neだけを選択的に減らす  
and  
Neだけを質量分別させる

# 金星大気問題 (希ガス散逸)

金星のNe, Arの分別問題:

Neは depleted, fractionated

Arは not depleted, not fractionated

どうやってNeとArの分別を起こすか?

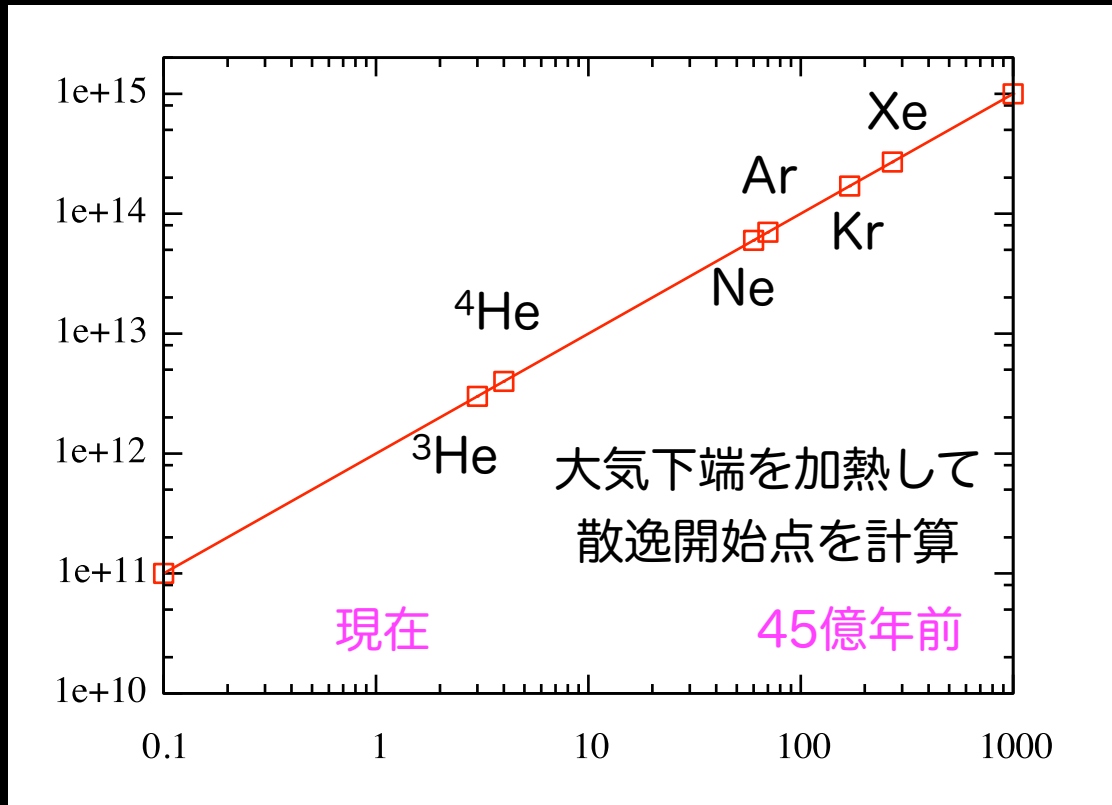
?  $^{20}\text{Ne}$ と $^{36}\text{Ar}$ の質量によるH.E.フラックスの差

## 数値計算

- $\text{H}_2 + \text{X}$  (希ガス) の2成分大気を考える
- 太陽EUVによる大気下端の加熱率を徐々に上げる
- 各希ガスで散逸が始まる加熱率を求める

# NeとArが一緒に動く問題

水素の散逸フラックス [mol/cm<sup>2</sup>s]



太陽EUVによる加熱率 [ergs/cm<sup>2</sup>s]

\*金星Ne-Ar分別問題\*

単純な質量差による  
散逸分別は難しいかも

COによるcoolingを  
考慮する必要あり？

## COによるcoolingの影響

- <sup>20</sup>Neが散逸可能な加熱率のもとでNeは散逸する
- <sup>36</sup>Arが散逸を始める前に<sup>28</sup>COが上空に行きcoolingによって温度が下がりArが散逸できなくなる



# 金星大気問題 (希ガス散逸)

金星のNe, Arの分別問題：

Neは depleted, fractionated

Arは not depleted, not fractionated

どうやってNeとArの分別を起こすか？

$\Delta^{20}\text{Ne}$ と $^{36}\text{Ar}$ の質量によるH.E.フラックスの差

？ $^{28}\text{CO}$ によるcoolingの影響

多成分大気でCOのcoolingを考慮に入れて  
計算すればNe, Ar質量分別が実現できる？

→ 現在モデルを構築中

# まとめ

- 2成分大気のH.E.を解く数値計算コードを構築した
- 金星大気の水散逸問題に適用
  - H<sub>2</sub>とOが等量あるとOの散逸量が激減
  - Oの完全散逸を実現するための太陽年齢に制約？
- 金星大気のNe, Ar分別問題に適用
  - 単純な質量分別で Ne $\ll$ Ar を説明するのは難しい
  - COのcooling効果を考慮すれば実現可能？
- 今後の展望
  - エネルギー分配, 太陽fluxの変化はモデル化済み
  - COの光化学反応のモデルは先行研究あり [坂本, 修論]