

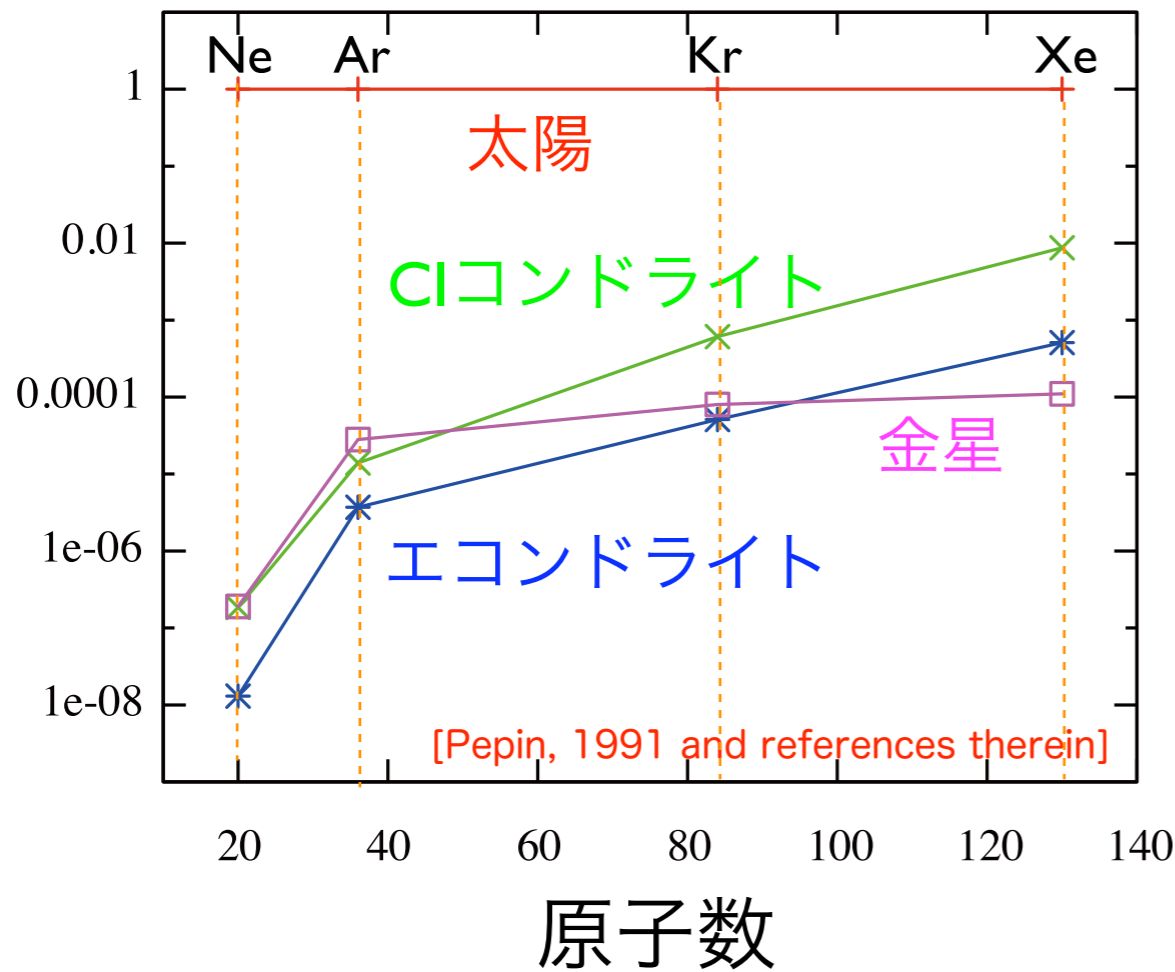
**多成分ハイドロダイナミックエスケープの数値計算：  
金星大気の希ガス分別問題への適用**

佐々木 貴教 (東工大・地惑)

阿部 豊 (東大・地惑)

# 金星大気問題 (希ガス散逸)

太陽で規格化した存在度



①Neが太陽比より少ない

②Arの量は隕石より多い

③その他

$^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ : fractionated

$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ : un-fractionated

$^{36}\text{Ar}/^{84}\text{Kr}$ : un-fractionated

Neだけを選択的に散逸&質量分別

# H.E.による希ガス分別

## Hydrodynamic Escape 「大気の流出」

静水圧平衡が破れた場合の惑星大気の散逸

(気体分子の運動エネルギー > 重力エネルギー)

太陽EUVが強い惑星形成初期に支配的

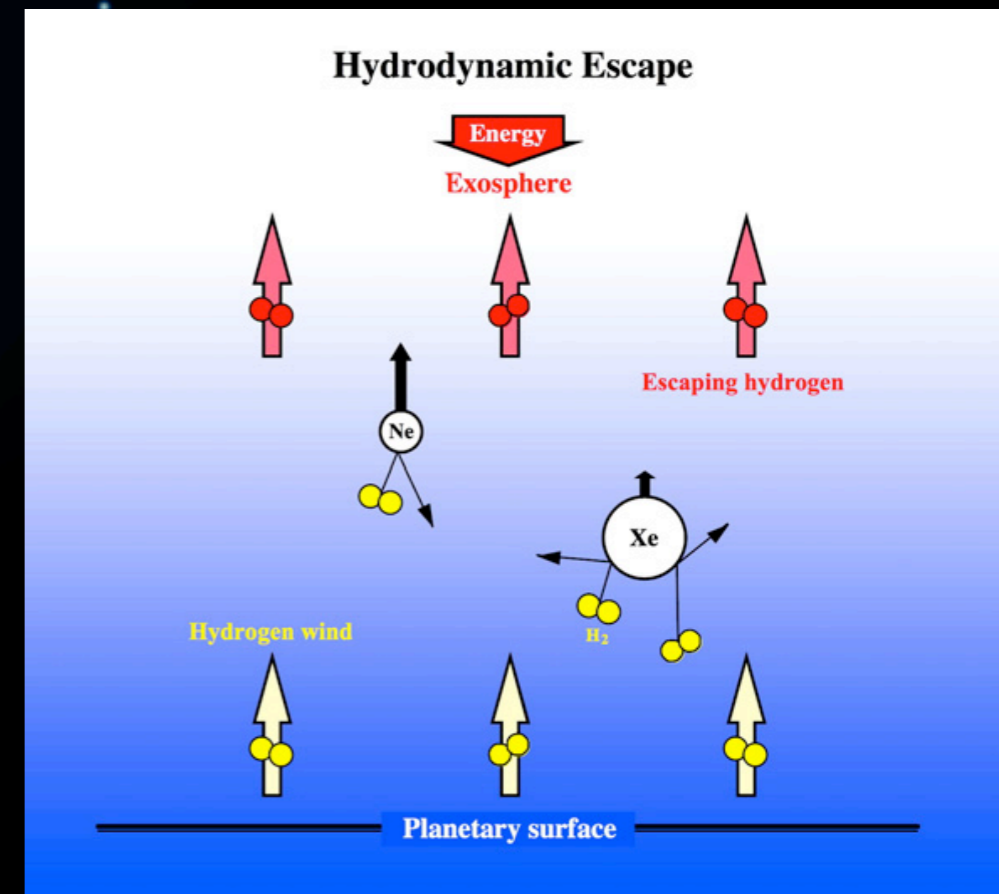
H.E.する水素が希ガス分子と衝突



軽い希ガスほど大きく加速される



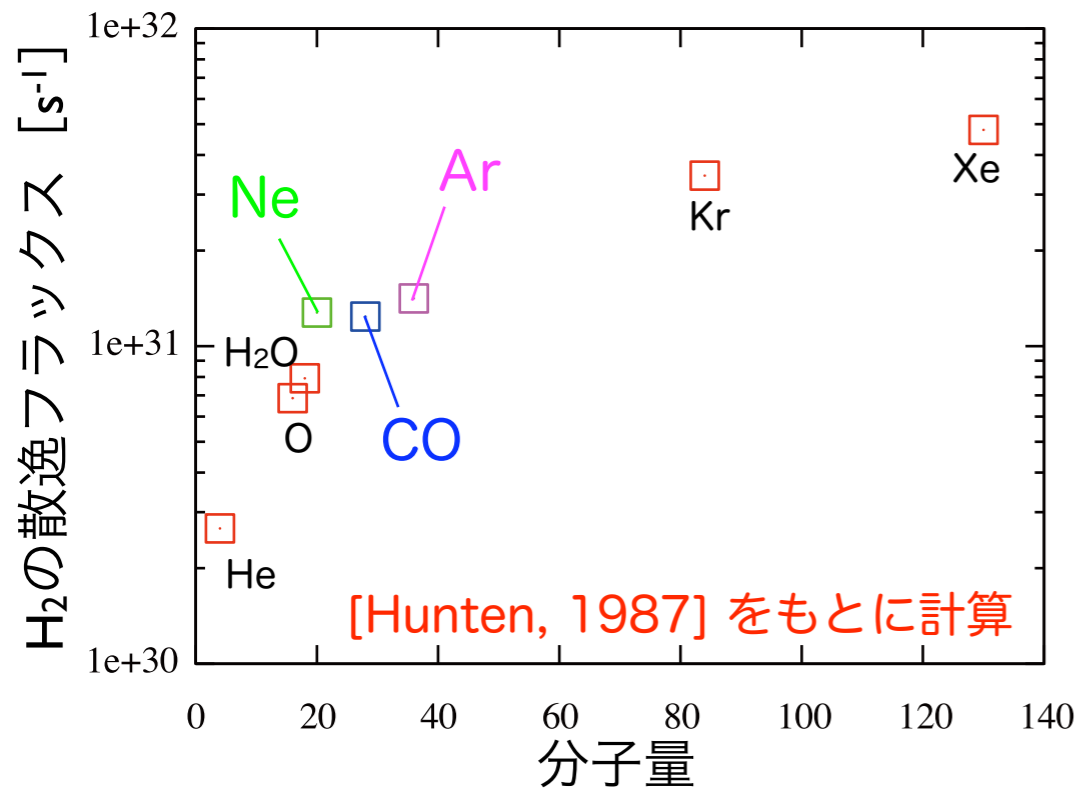
軽い希ガスほど大きく散逸する



# Neのみを散逸させる可能性

水素の散逸に伴う希ガス散逸：軽い希ガスほど散逸しやすい

各分子の散逸に必要なH<sub>2</sub>フラックス



質量差による散逸分別は難しい



COによるcoolingで解決？

- Neの散逸開始とともにCOが上空に行きcooling
- 水素の散逸フラックスが減少
- Neは散逸可, Arは散逸不可のH<sub>2</sub>フラックスが自律的な温度調整によって実現？

[Zahnle & Kasting, 1986]

CO冷却を考慮した多成分H.E.の数値計算

# 本研究の目的

金星大気の希ガス問題

Neだけを選択的に散逸&質量分別



単純な質量差による散逸分別は難しい



CO冷却を考慮した多成分H.E.の数値計算



Ne散逸可, Ar散逸不可 が実現するか検証

# 多成分H.E.モデル

1次元・多相流体のオイラー方程式 [Zahnle & Kasting, 1986; Tian et al., 2005]

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

$$\frac{\partial(\rho u r^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 r^2)}{\partial r} = -\rho G M - r^2 \frac{\partial p}{\partial r} + \boxed{\rho r^2 (u_x - u) n_x k_i} - \boxed{\alpha_T k \left( \frac{n_x n}{n_x + n} \right) \frac{dT}{dr}}$$

分子間の衝突                      分子間の熱拡散

$$\frac{\partial(E r^2)}{\partial t} + \frac{\partial[(E + p) u r^2]}{\partial r} = -\rho u G M + \boxed{q r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \kappa r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

太陽EUVによる加熱 + CO cooling による冷却  
[Ribas et al., 2005; Avakyan et al., 1998]                      Tielens & Hollenbach, 1985]

# 数値計算

## (H<sub>2</sub>, Ne, Ar, CO) の4成分大気で H.E. を計算

- 境界条件：均一圏界面 100 km, 330K を仮定 (“大気下端”と呼ぶ)
- 化学反応、水素以外の成分のEUV吸収は無視
- 太陽EUV：過去の値を観測データから与える

## COの回転スペクトル線による冷却：Line-by-Line法

### パラメータ

- 太陽系の年代 (→太陽EUVの値) : 0.01 Gyr ~ 0.1 Gyr
- 各成分の大気下端での数密度：  
太陽組成大気 + 脱ガス大気 の混ぜ合わせで値を振って計算

# 結果. 散逸のAr/Ne比

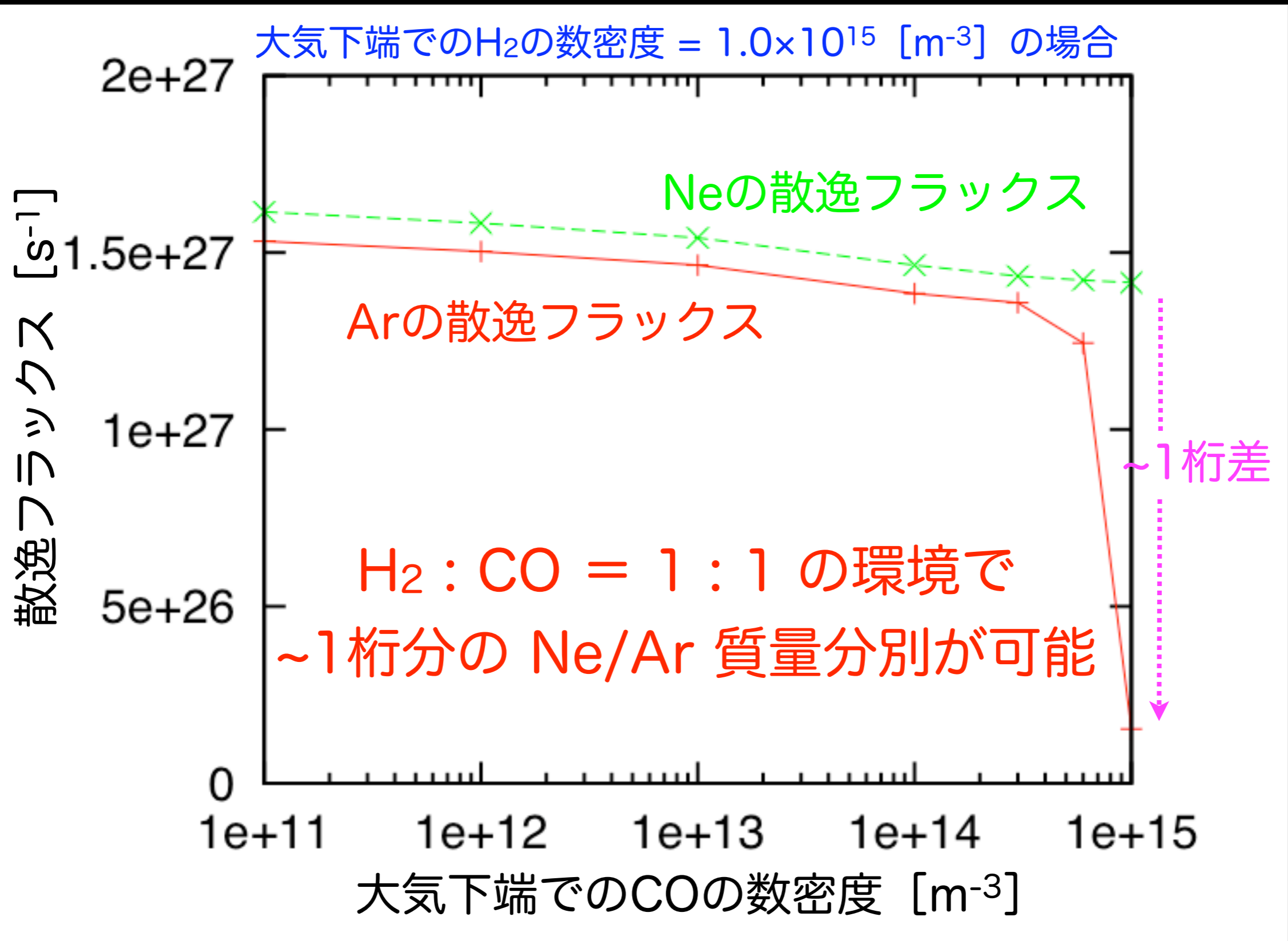
$\tau$ [Gy]	$n_{\text{H}_2}$ [ $\text{m}^{-3}$ ]	$n_{\text{Ne,Ar}}$ [ $\text{m}^{-3}$ ]	$n_{\text{CO}}$ [ $\text{m}^{-3}$ ]	$F_{\text{Ar}}/F_{\text{Ne}}$
0.01	$10^{14}$	$10^{10}$	$10^{14}$	$\triangle$
		$10^{11}$	$10^{15}$	$\triangle$
		$10^{12}$	$10^{16}$	$\triangle$
0.05	$10^{14}$	$10^{10}$	$10^{14}$	$\triangle$
		$10^{11}$	$10^{15}$	$\triangle$
		$10^{12}$	$10^{16}$	$\triangle$
0.1	$10^{14}$	$10^9$	$10^{14}$	$\triangle$
		$10^{10}$	$10^{10}$	$\triangle$
		$10^{10}$	$10^{12}$	$\triangle$
		$10^{10}$	$10^{14}$	$\sim 0.1$
	$10^{15}$	$10^9$	$10^{11}$	$\triangle$
0.1	$10^{15}$	$10^{10}$	$10^{11}$	$\triangle$
		$10^{10}$	$10^{13}$	$\triangle$
		$10^{10}$	$10^{15}$	$\sim 0.1$
		$10^{10}$	$10^{15}$	$\triangle$
		$10^{11}$	$10^{11}$	$\triangle$
		$10^{11}$	$10^{13}$	$\triangle$
		$10^{11}$	$10^{15}$	$\nabla$
0.1	$10^{16}$	$10^{11}$	$10^{12}$	$\triangle$
		$10^{11}$	$10^{14}$	$\triangle$
		$10^{11}$	$10^{16}$	$\sim 0.9$
		$10^{12}$	$10^{12}$	$\triangle$
		$10^{12}$	$10^{14}$	$\triangle$
		$10^{12}$	$10^{16}$	$\nabla$

$\triangle$  : NeとArが  
ほぼ同程度散逸

Ar/Ne  $\sim 0.1$ で  
Neの方が多く散逸

$\nabla$  : NeもArも  
どちらも非散逸

# 結果. 質量分別が起こる場合



# 現在のNe/Arは説明可能か

## ・~~太陽組成大気起源~~

~~希ガス → ほぼ現在の金星のAr量, Neは過剰 [Genda & Abe, 2005]~~

~~$H_2 : CO \doteq 1 : 0.01 \rightarrow CO$ 冷却が十分に効かない~~

## ・~~脱ガス大気起源~~

~~希ガス → Arの量が現在の金星のAr量に足りない~~

~~$H_2 : CO \doteq 1 : 1 \rightarrow CO$ 冷却により1桁分のNe/Ar散逸分別可能~~



~~太陽組成大気（希ガス） + 脱ガス大気（その他）の混合大気~~

~~Neの1/10もArが散逸すると、現在の金星のAr量が説明できない~~

現在の金星の希ガス存在度は実現できない

# まとめ & 今後の課題

金星からの希ガスの散逸：

CO冷却下で希ガス分別可能か？ H.E.の数値計算で検証

現在の金星の希ガス存在度はH.E.では説明できない

ではどうやって現在の希ガス存在度を実現するか？

H<sub>2</sub>Oのcoolingの影響：さらに温度を下げてArの散逸量を減らす？

→ ただし計算が極めて煩雑, H<sub>2</sub>Oの初期量を見積もる必要あり

太陽風が打ち込まれた物質から太陽組成大気を付加？ [Sasaki, 1991]

彗星 (Ne/Ar が小さい) の衝突により希ガスを付加？ [Owen, 1992]

→ ただしこれらの物質の存在や組成は不明 (観測されていない)

複数の起源と進化を組み合わせることで議論することが重要