

揮発性元素同位体組成から探る 火星の形成と表層環境進化

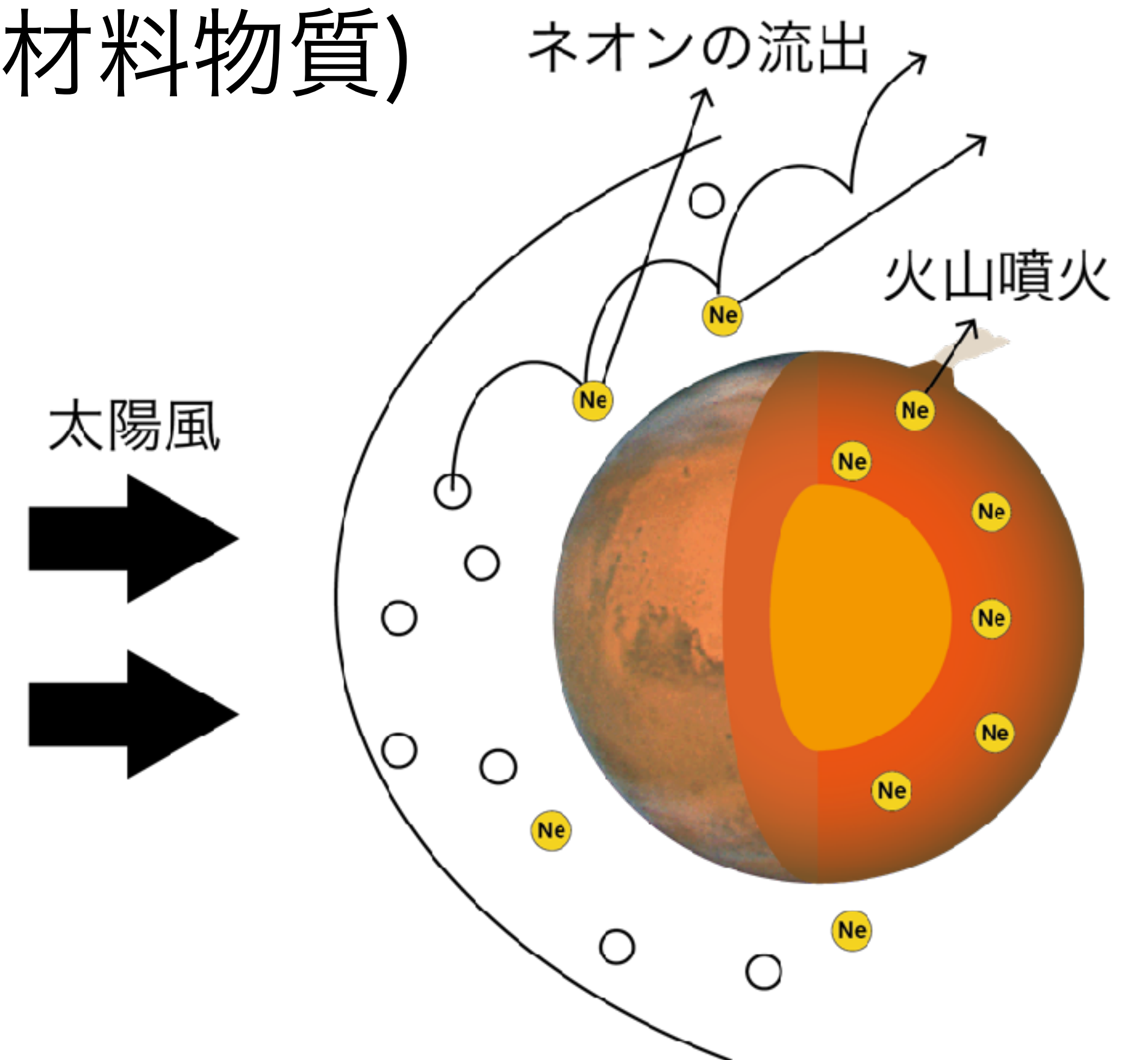
黒川宏之¹

共同研究者：杉田精司², 三浦弥生³, 長勇一郎², 吉田辰哉⁴, François Leblanc⁵,
寺田直樹⁴, 中川広務⁴, 齋藤義文⁶, 笠原慧², 吉岡和夫², 熊谷英憲⁷, 岩田尚能⁸

1: ELSI, 2: Univ. Tokyo, 3: Earthquake Res. Inst., 4: Tohoku Univ., 5: LATMOS/CNRS, Sorbonne Université, UVSQ, 6: ISAS/JXA, 7: JAMTEC, 8: Yamagata Univ.

今日のお話

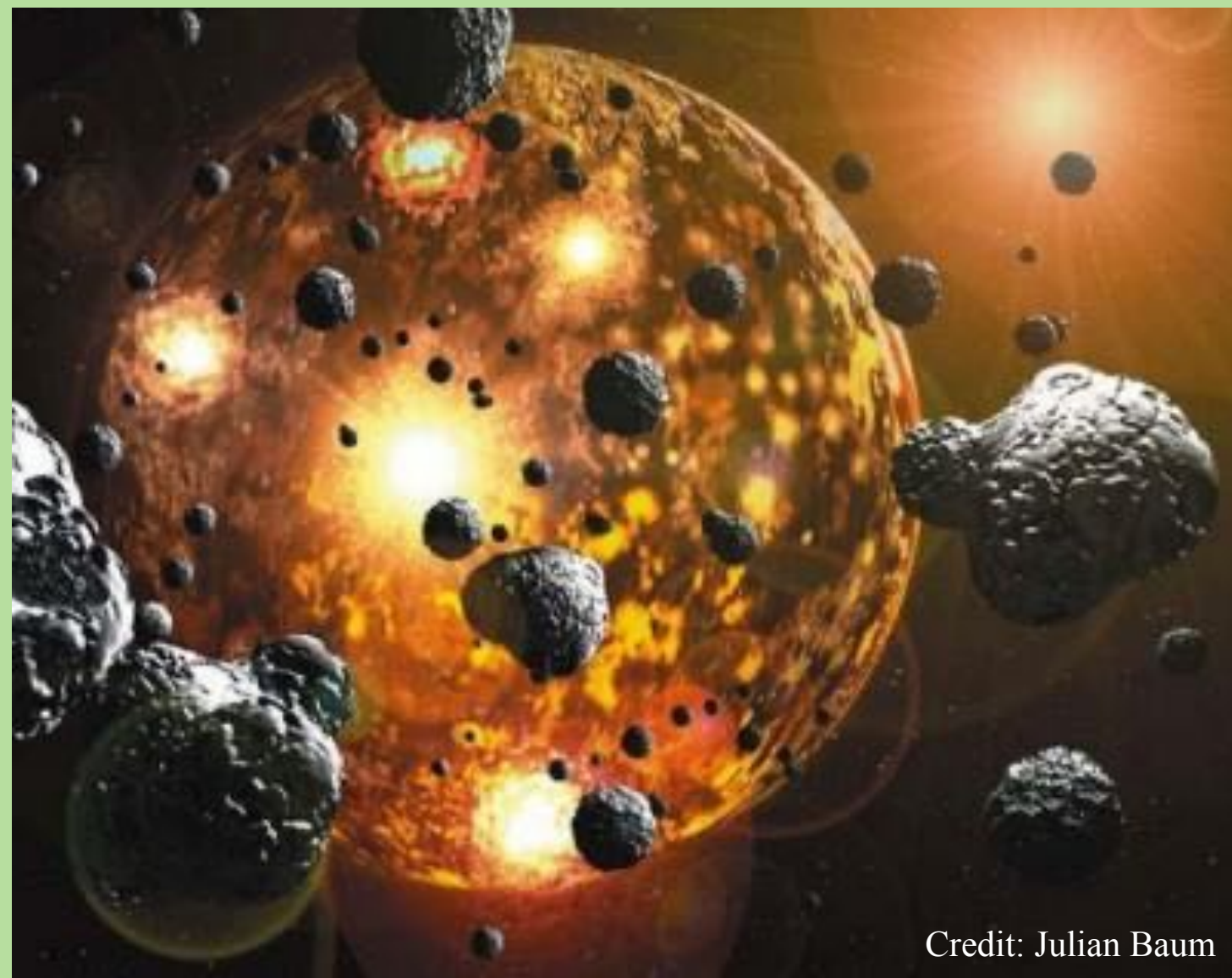
- 火星大気中のネオン →
 - 揮発性元素に富んだマントル
 - 形成過程への制約 (円盤ガス捕獲, 材料物質)
 - 初期火星の表層環境
- 将来火星探査による
ネオンその場計測の検討・機器開発



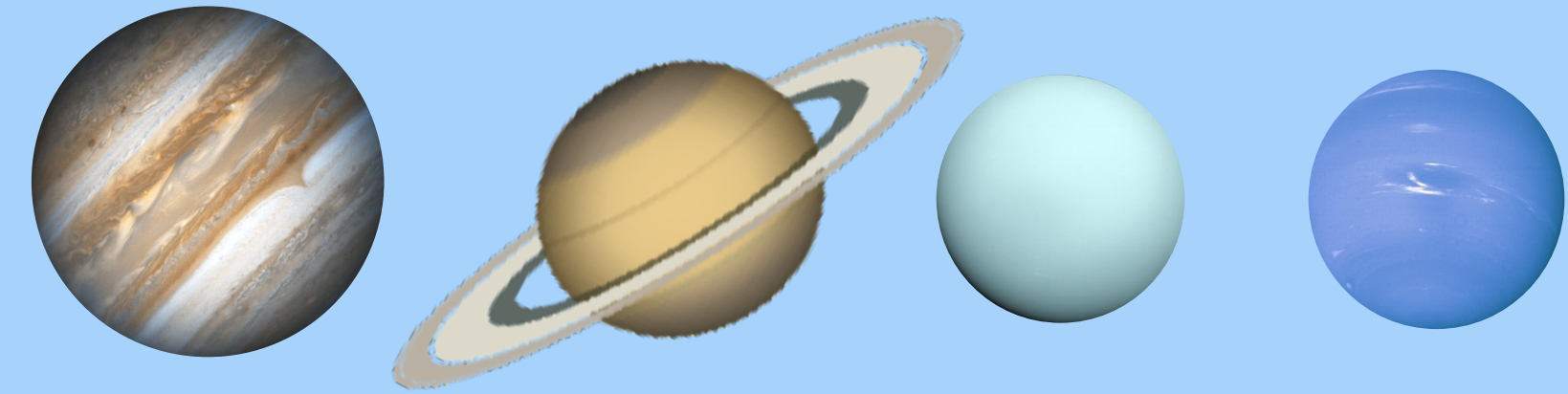
惑星形成と揮発性元素の起源



集積天体中の揮発性元素 (二次大気) :
C, Nなど重たい元素に富む



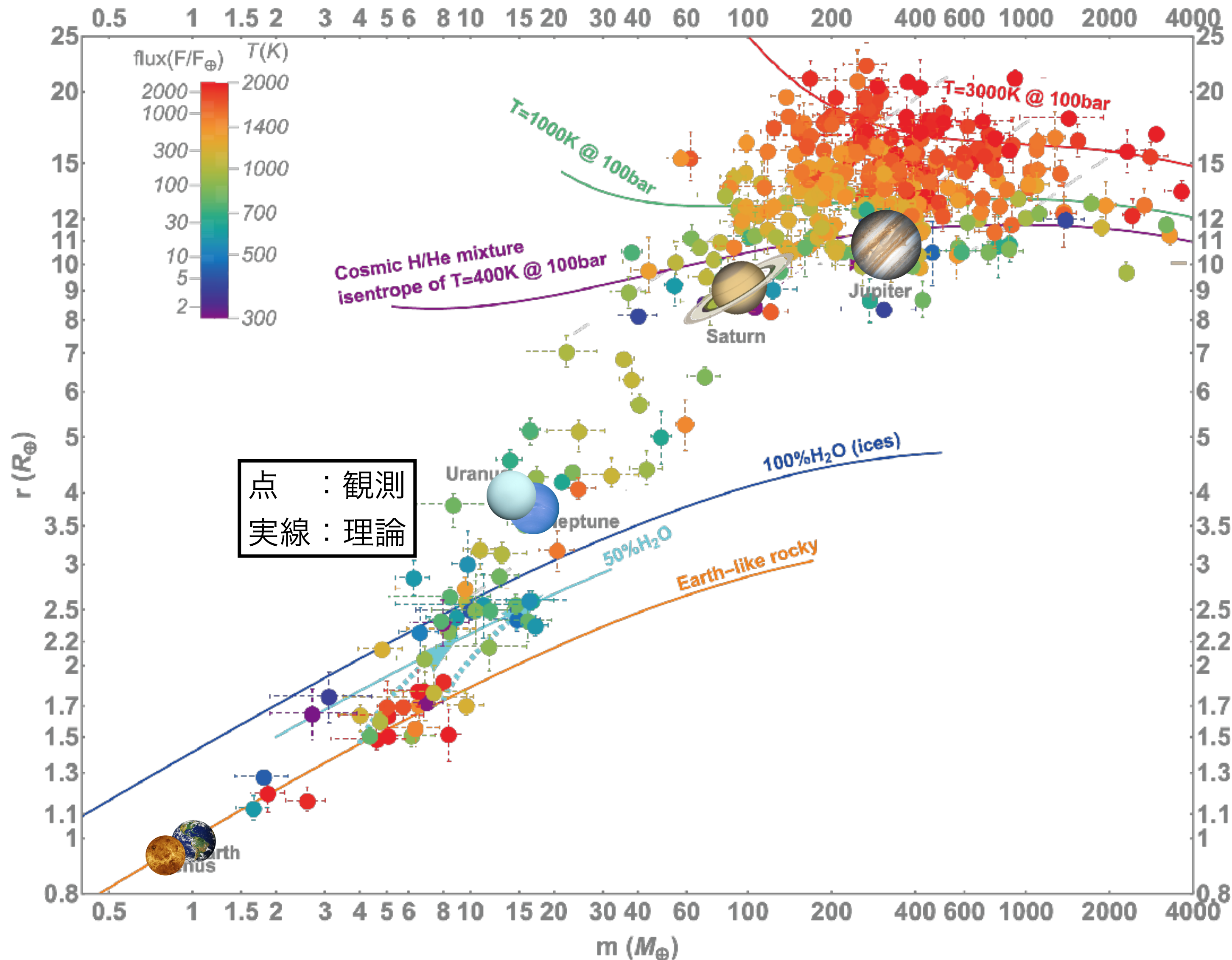
Credit: Julian Baum



原始惑星系円盤ガス (一次大気) :
軽いH, Heに富む (太陽組成)



系外惑星の質量と半径の分布 (精度の良いものだけプロット)



- 円盤ガスを纏った惑星は幅広い質量範囲に存在
- 理論予想：
地球質量の惑星でも
~ 1 wt.% の円盤ガスを
形成時に捕獲可能
(Hayashi et al. 1979 *EPSL*; Ikoma & Genda 2006 *ApJ*)
→ 水の起源？ (Genda & Ikoma 2008 *Icarus*)

Zeng et al. (2019) *PNAS*

希ガス：揮発性元素のトレーサー

V·T·E

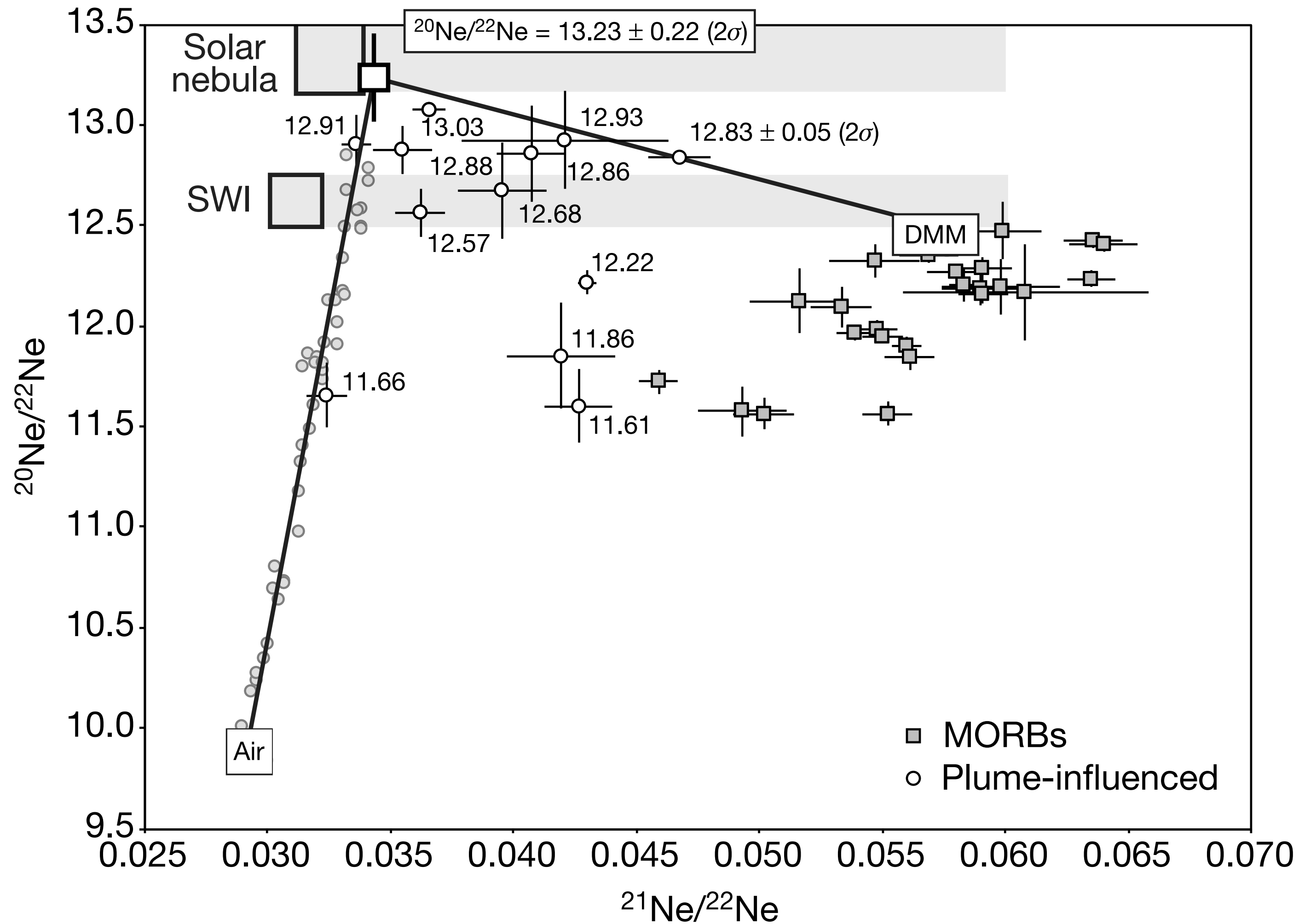
Goldschmidt classification in the periodic table

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Group → ↓ Period																			
1	1 H																	2 He	
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	*	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
			**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

Goldschmidt classification: Lithophile Siderophile Chalcophile Atmosphile Synthetic

Figure from Wikipedia

地球マントルの揮発性元素同位体組成



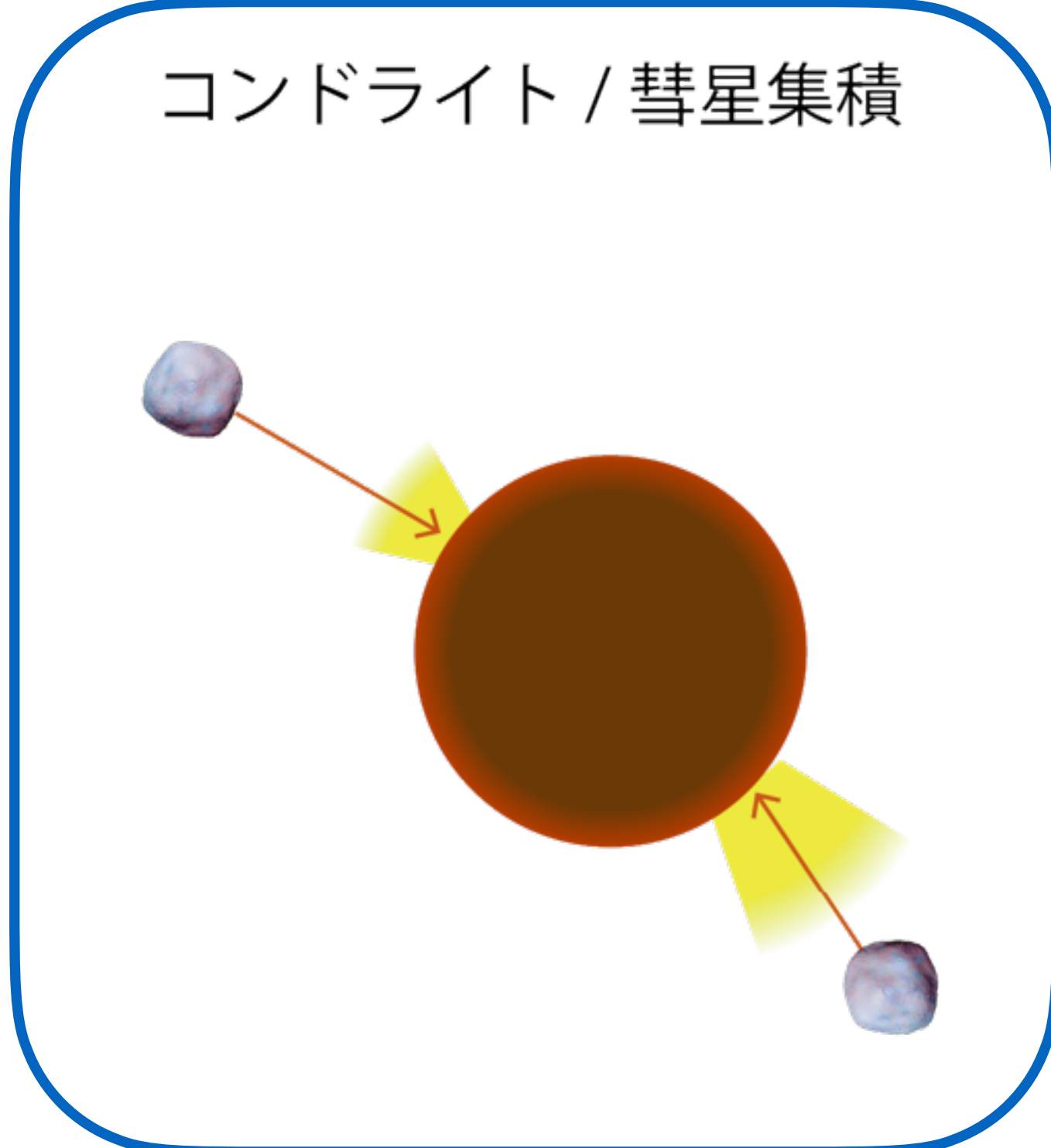
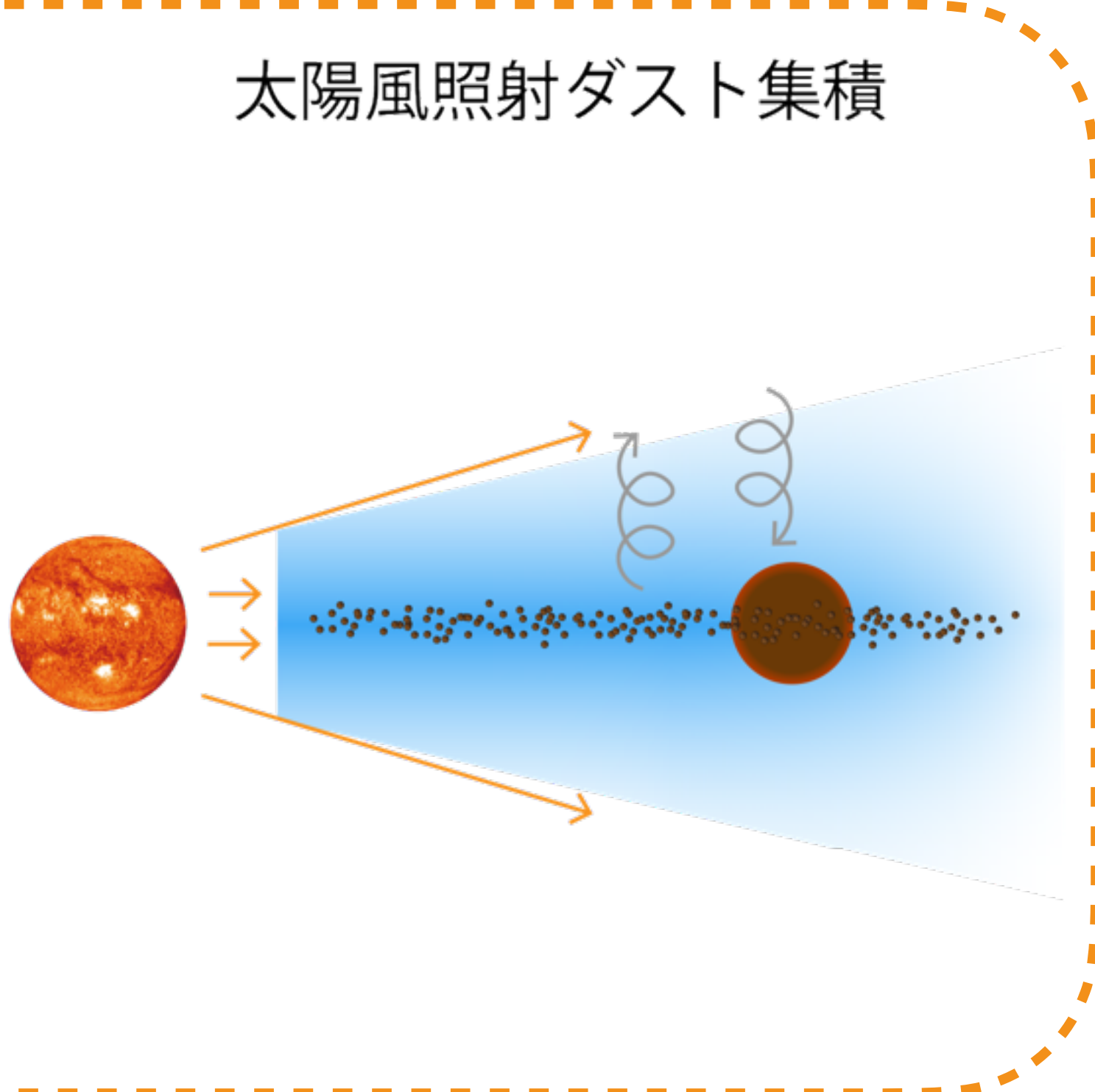
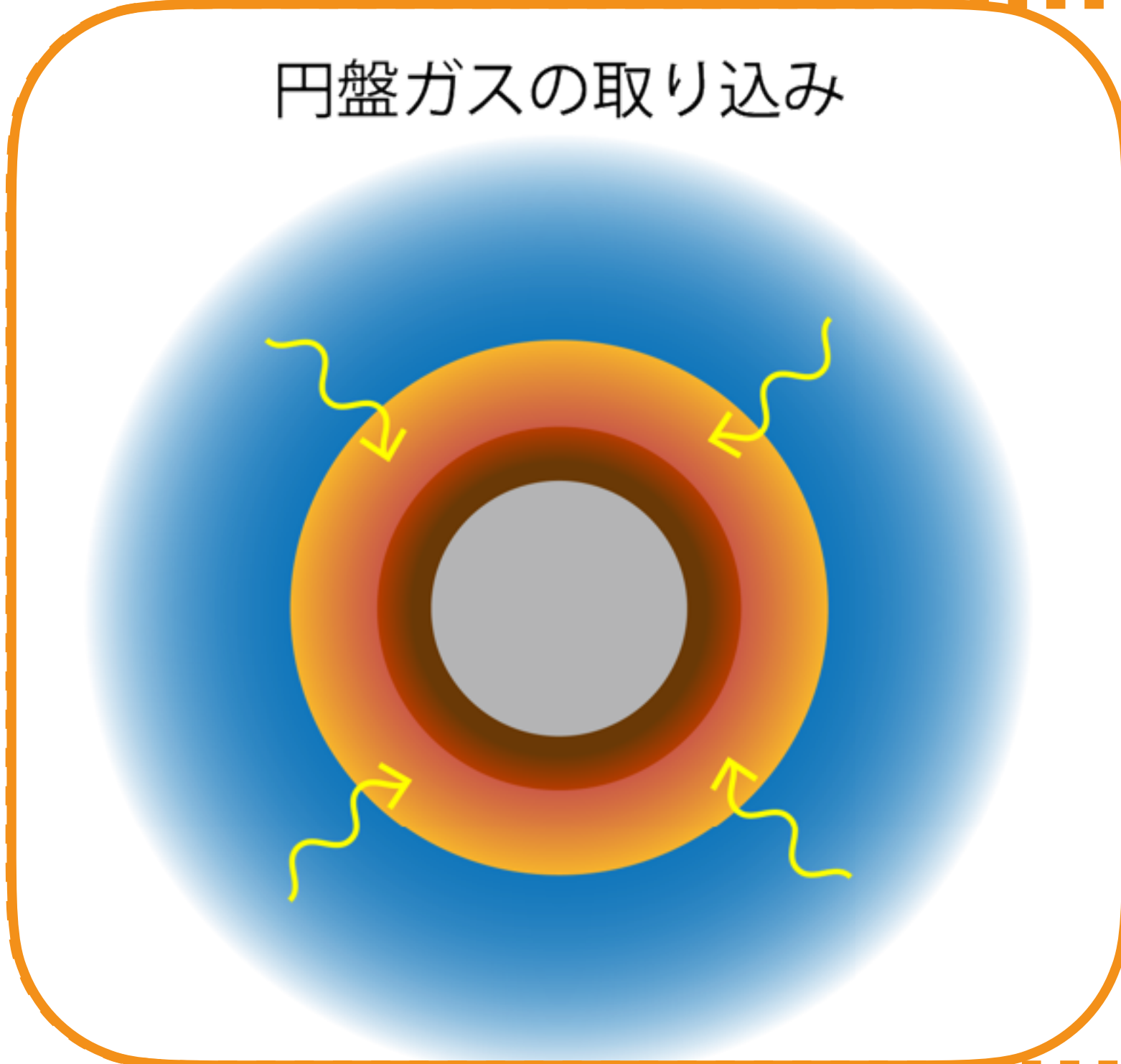
- **円盤ガス起源を示す地球マントルNe**
地球大気の新オン同位体比
 \approx 炭素質コンドライト
 \updownarrow
地球マントルの新オン同位体比
 \approx 太陽組成
- D/Hも同様？ (Hallis et al. 2015 *Science*)

Williams & Mukhopadhyay (2019) *Nature*

地球深部の揮発性元素は円盤ガス/太陽風起源？

地球マントル

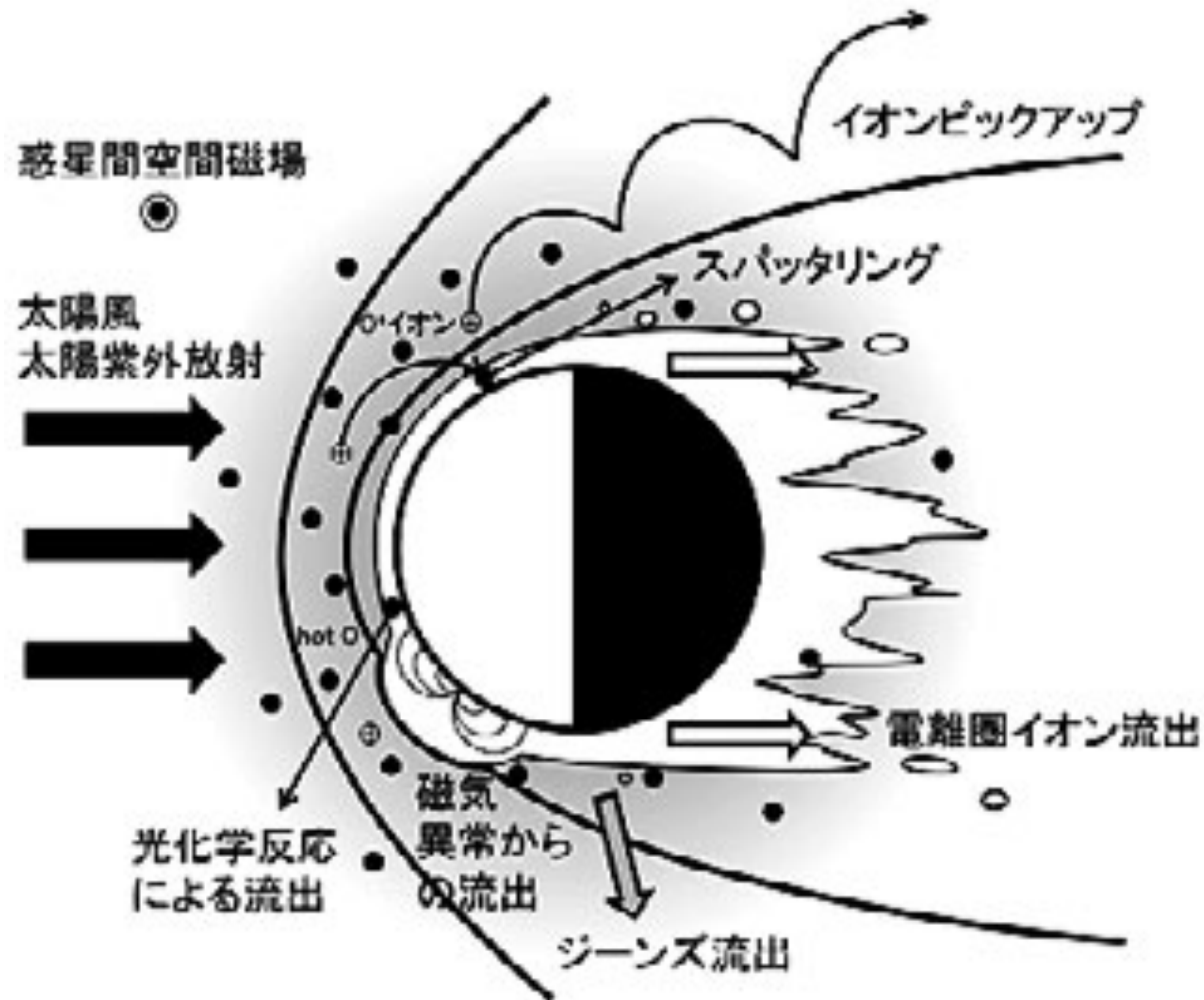
地球大気



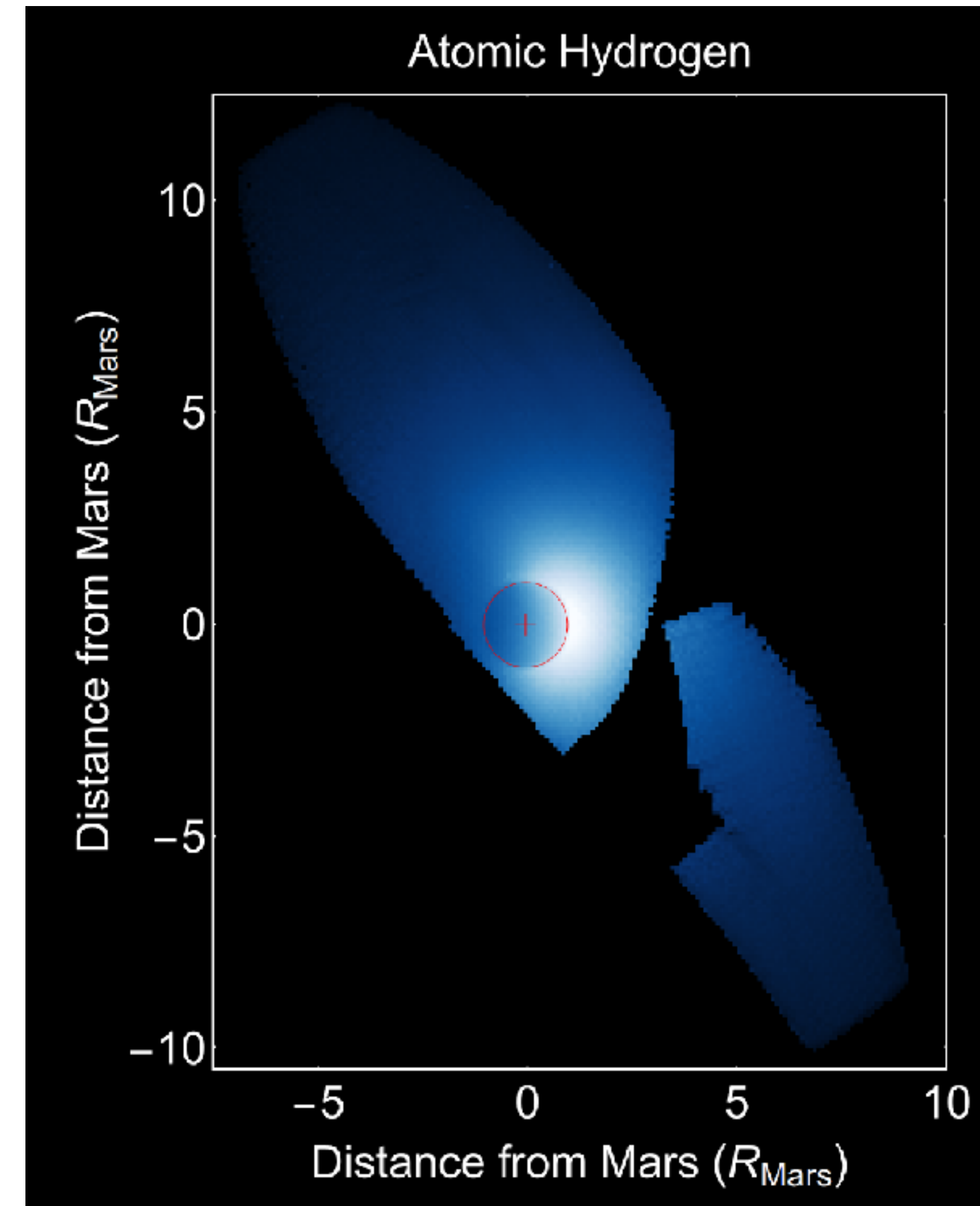
e.g., Yokota & Marty (2014), Moreira & Charnoz (2016), Williams & Mukhopadhyay (2019)

e.g., Marty & Meibom (2007)

散逸する火星大気

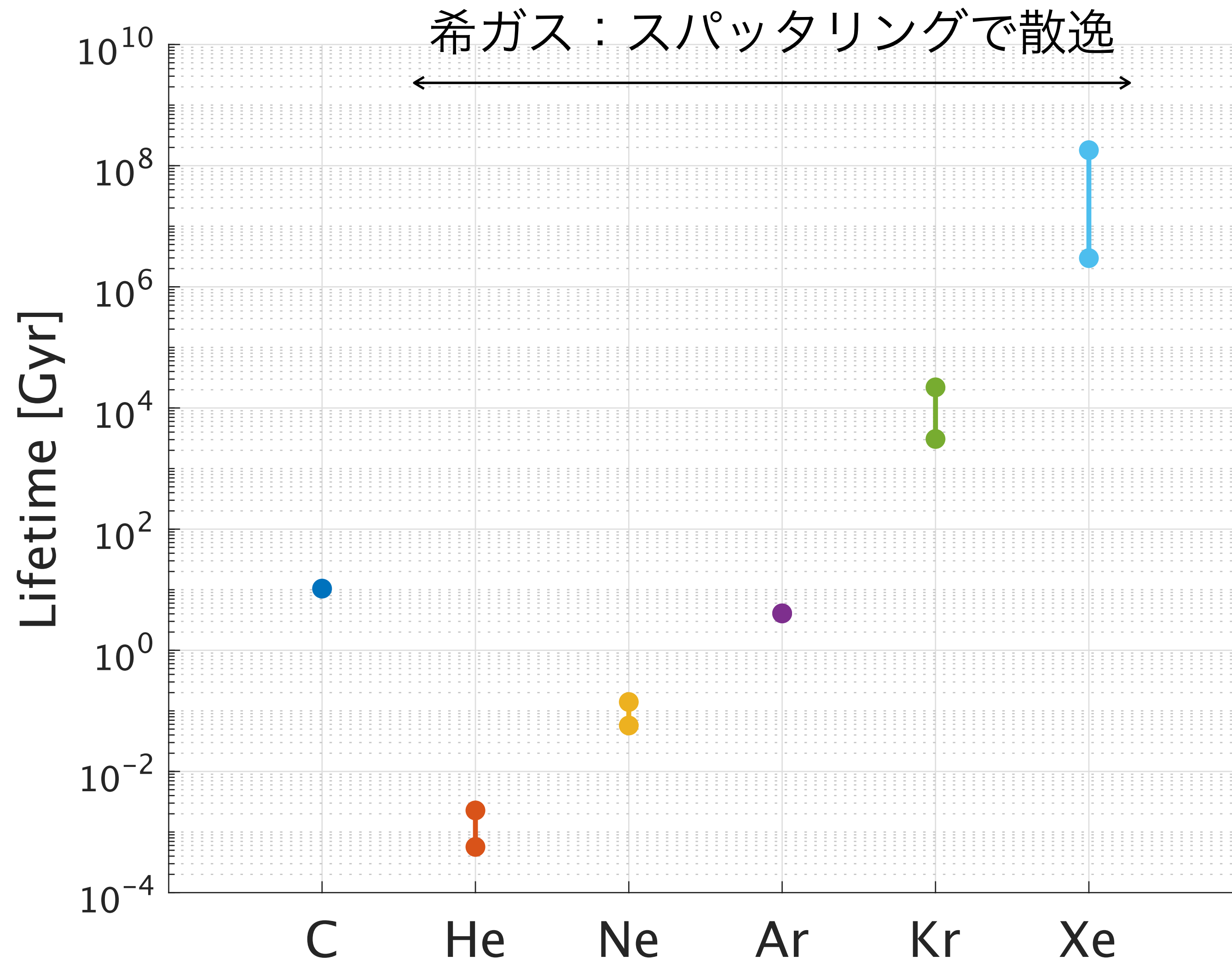


寺田 (2014) J. Plasma Fusion Res



Credit: Colorado Univ., NASA

大気散逸に対する各元素の生存時間



- 生存時間 \equiv 存在量/散逸率

- 現在の散逸率において

ネオン生存時間：0.6 – 1 × 10⁸ 年

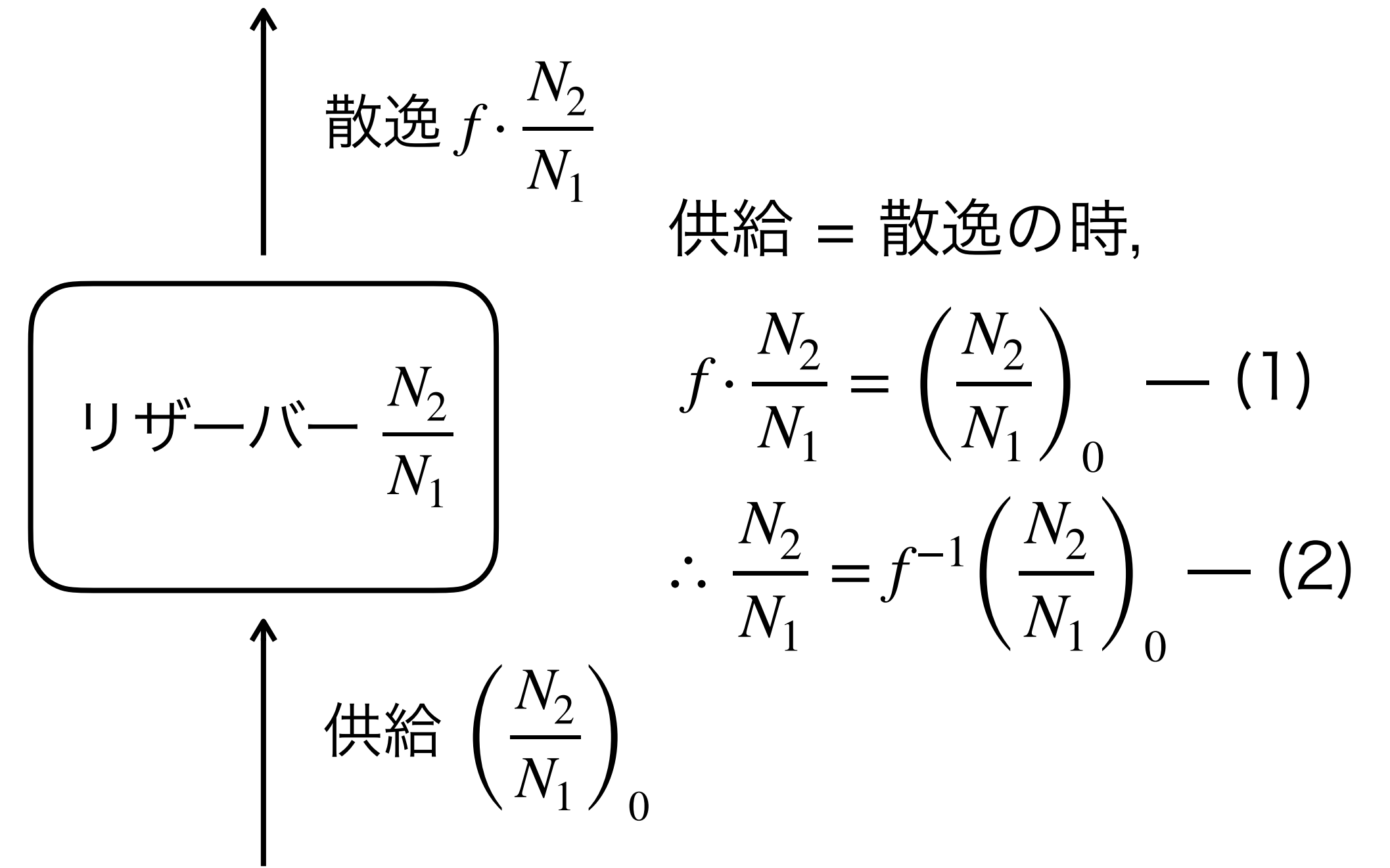
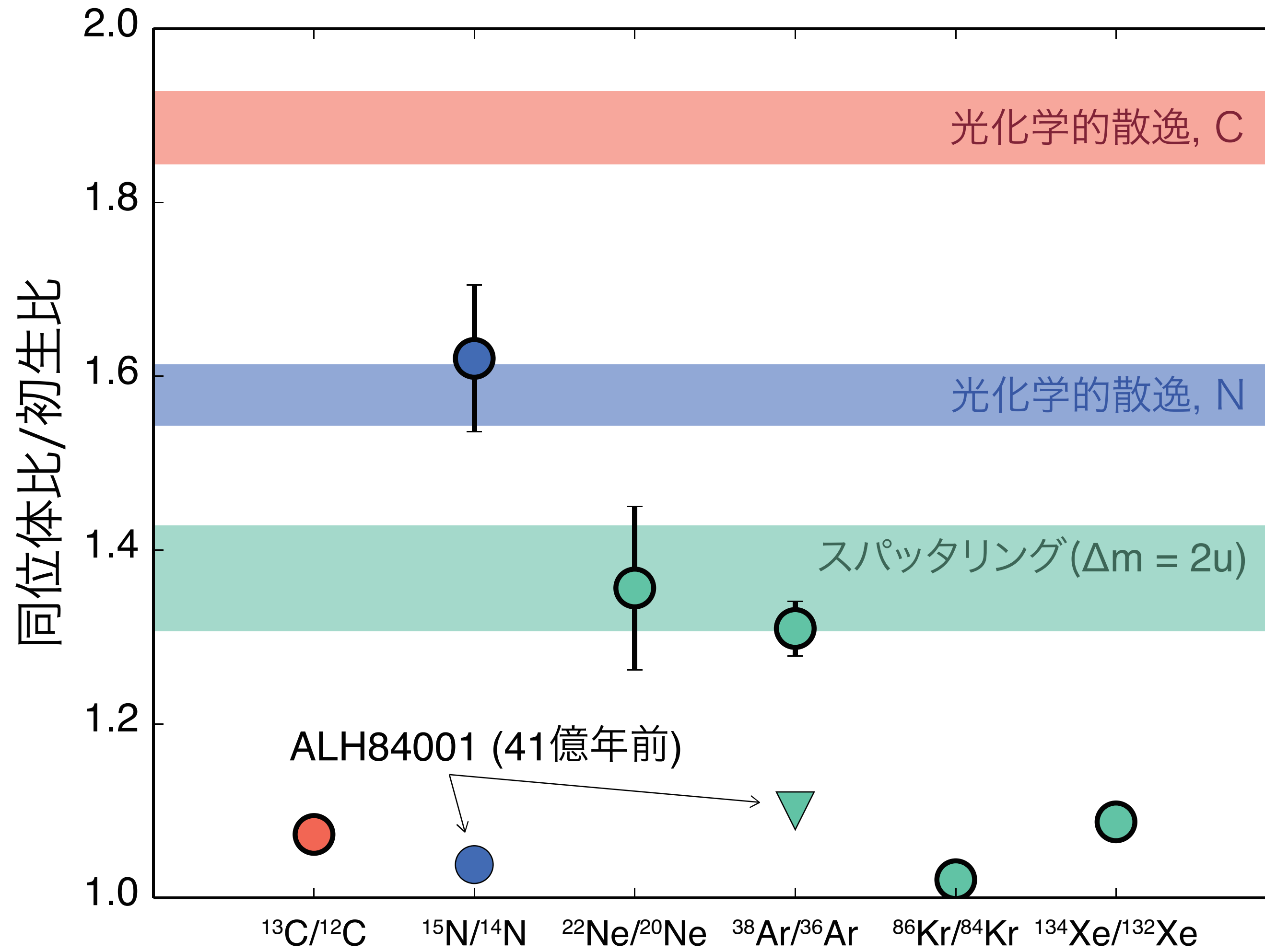
↔ 炭素：10¹⁰ 年

- 生存時間程度の時間スケールで
供給と散逸の釣り合い

(Jakosky et al. 1994; Kurokawa et al. 2018; Hu & Thomas 2022)

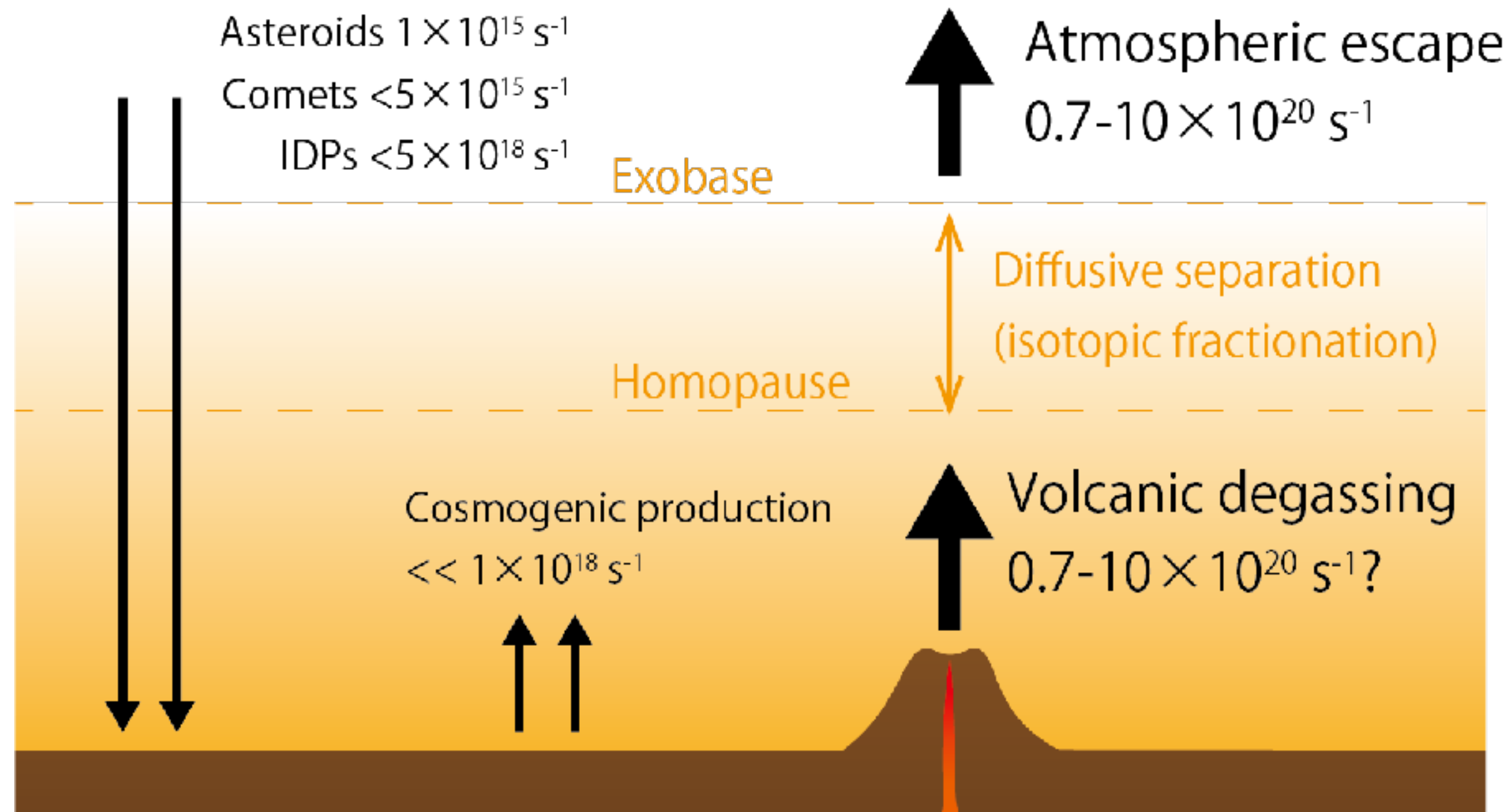
Kurokawa et al. (2021) *Icarus*

火星大気同位体比と定常解の比較



大気存在量が少なく軽い元素は
供給 = 散逸の定常解とよく合う

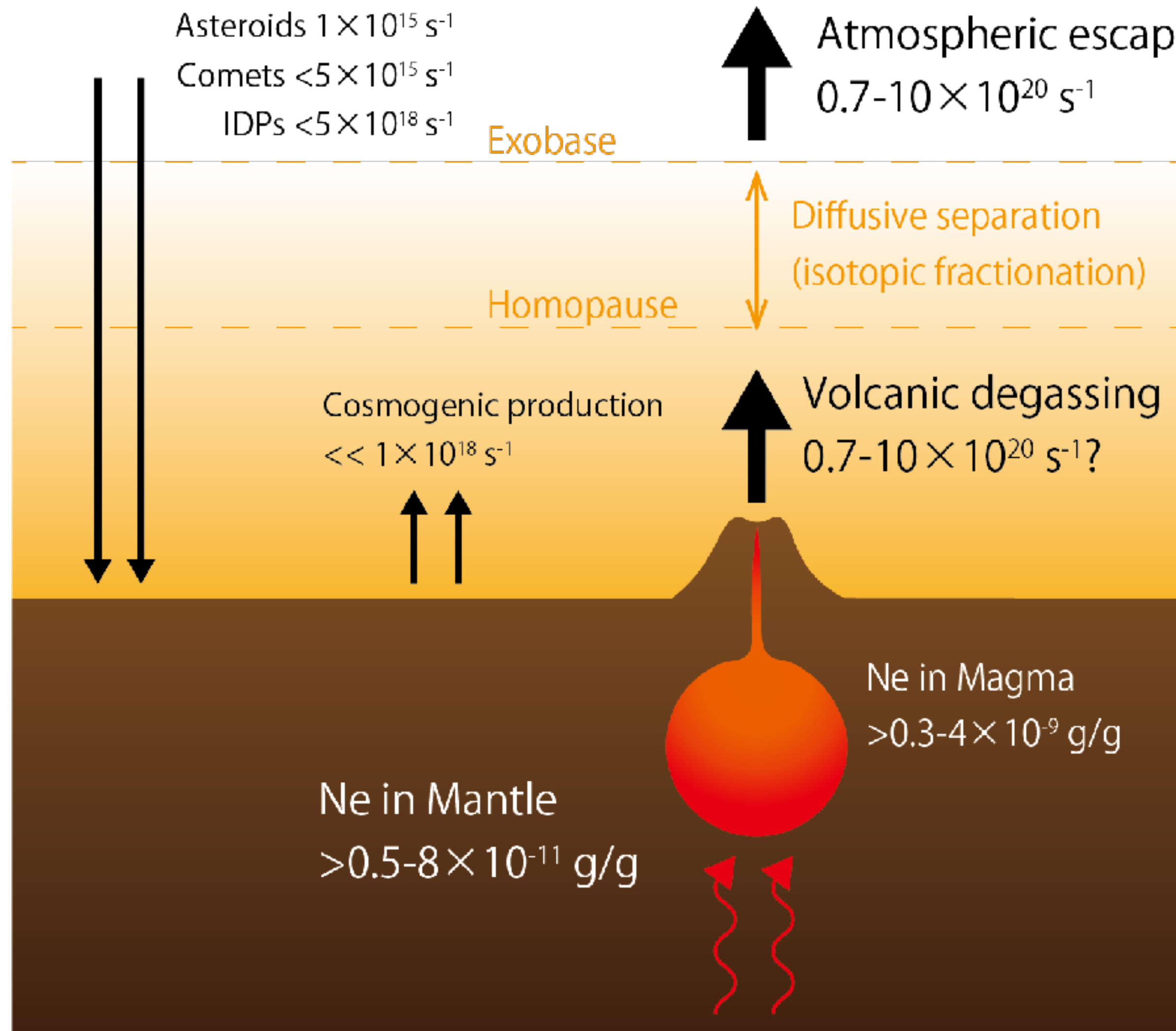
大気ネオンの供給源



- ネオン散逸率 = $0.7 - 10 \times 10^{20} \text{ s}^{-1}$ に対し,
(Leblanc et al. 2018 *GRL* のモデルにもとづく)
- 小惑星・彗星衝突による供給 $\sim 10^{15} \text{ s}^{-1}$
- 惑星間空間塵(IDPs)による供給 $< 5 \times 10^{18} \text{ s}^{-1}$
(Frantseva et al. 2018 *Icarus*; Flynn 1997 *JGR*)
- 宇宙線生成ネオンの供給 $\ll 10^{18} \text{ s}^{-1}$
(Farley et al. 2014 *Science*)
- 残る候補：マントルからの脱ガス
- **最近 (< ネオン生存時間)の火山活動の証拠**
 - タルシス： $\sim 10^{7-8}$ 年 (e.g., Hauber et al., 2011)
 - エリシウム： $\sim 10^{4-5}$ 年 (Horvath et al., 2021)

Kurokawa et al. (2021) *Icarus*

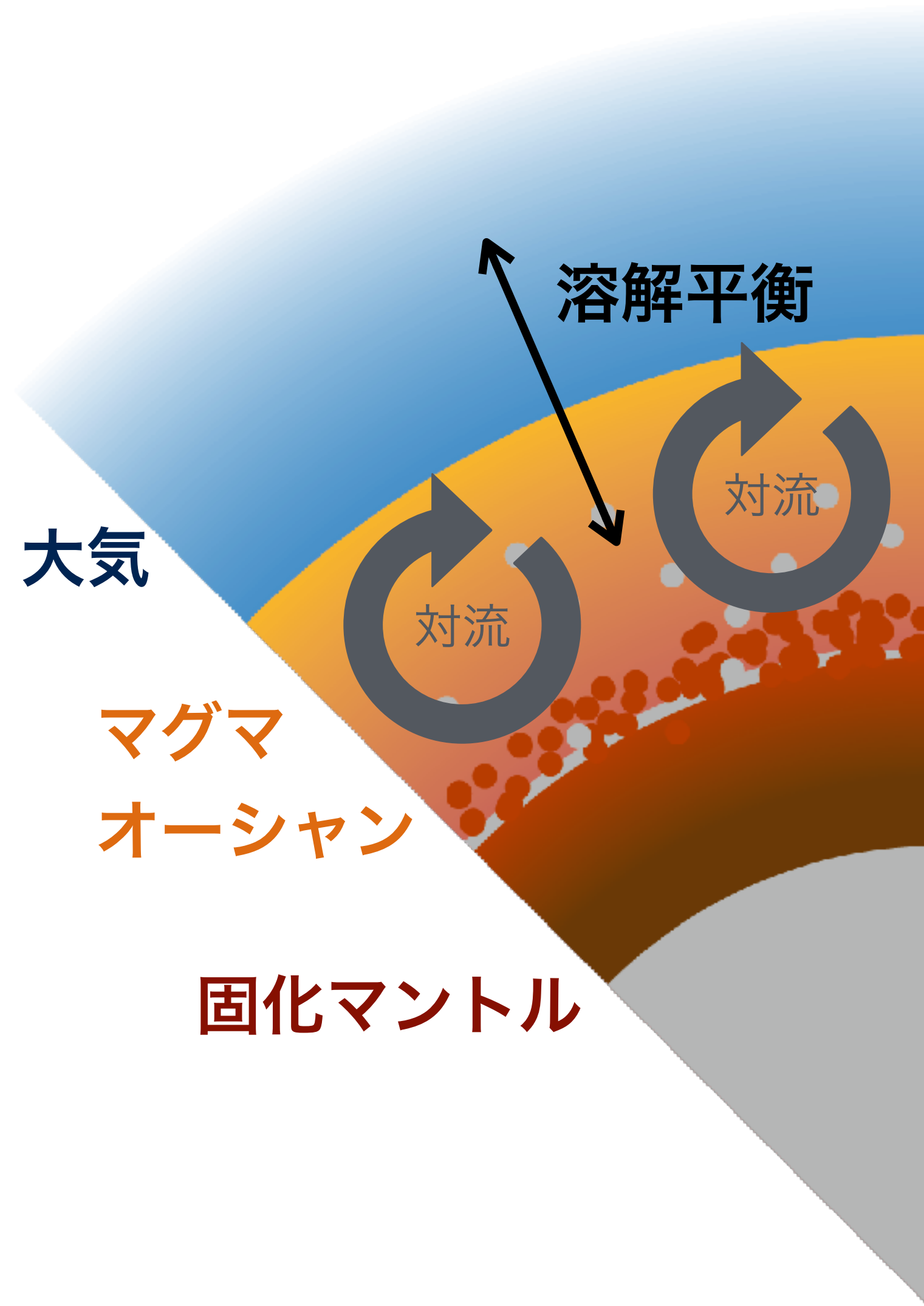
火星マントルのネオン存在度



- 大気散逸率 = マグマ噴出率 × ネオン存在度
Late Amazonian のマグマ噴出率を上限と仮定
(Greeley & Schneid, 1991 *Science*)
→ **マグマのネオン存在度** $> 0.3 - 4 \times 10^{-9} \text{ g/g}$
- マグマ中存在度 = マントル中存在度 / 部分溶融度
火星隕石のREEから部分溶融度 0.02 – 0.1
(Norman, 1999; Borg & Draper, 2003)
→ **マントルのネオン存在度** $> 0.5 - 8 \times 10^{-11} \text{ g/g}$
(地球マントルの $> 8 - 50$ 倍)

Kurokawa et al. (2021) *Icarus*

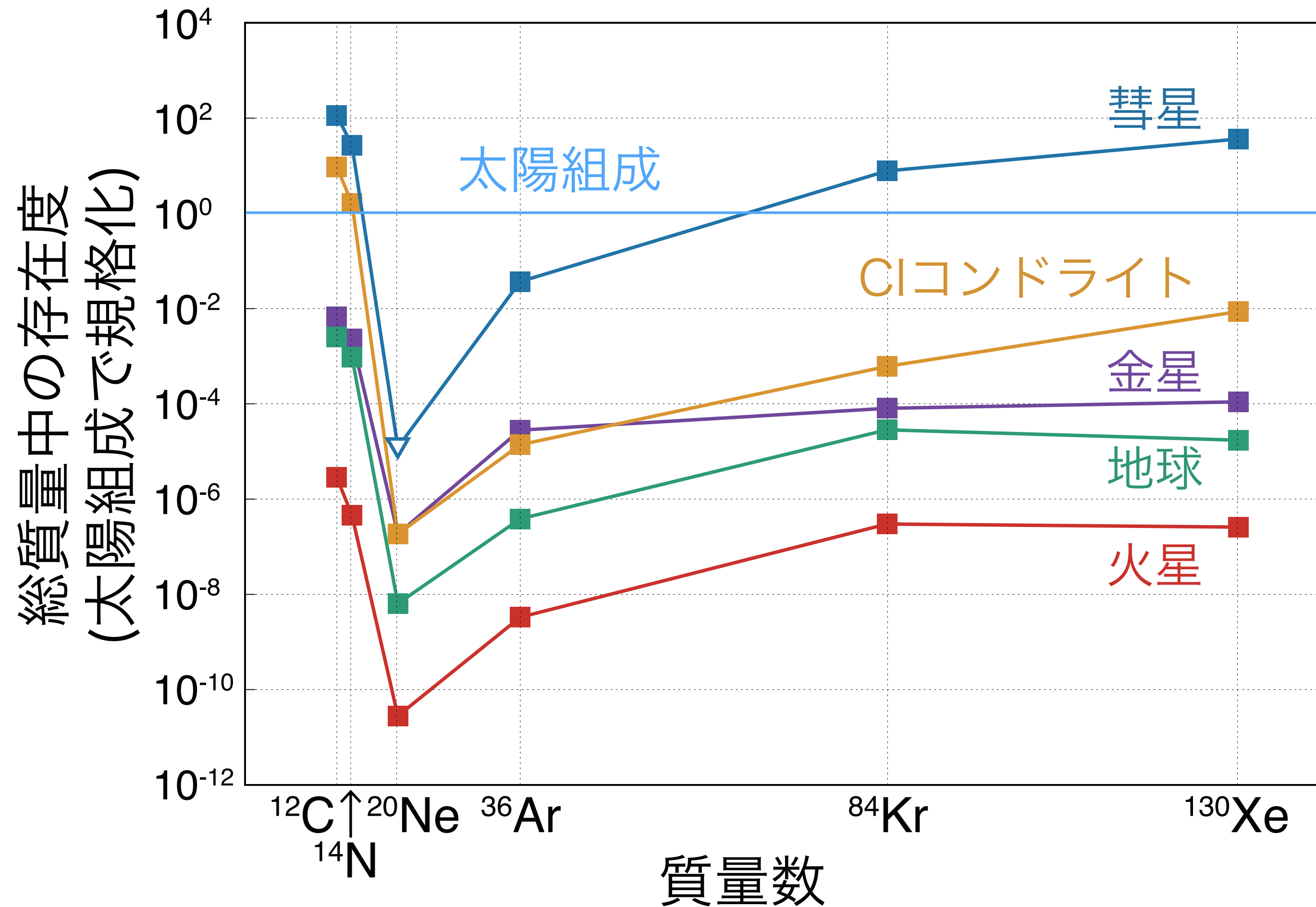
惑星形成期におけるネオン総量(分圧)



- ネオンはマグマに溶けにくく， 鉱物に取り込まれにくい
(溶解度 1.6 ppm/MPa, 鉱物-メルト分配係数 10^{-4} ,
Iacono-Marziano et al. 2010; Heber et al. 2007)
- 溶解平衡・粒間メルトへのネオン取り込みモデル)
 - **ネオン総量のうち， $< 1/300$ しか固化マントルに残らない**
 - マントルネオン存在度を説明するために必要な
初期火星のネオン分圧 $p_{\text{Ne}} > 10 \text{ Pa}$
cf.) 現在の火星： $p_{\text{Ne}} = 0.6 - 4 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ ， 地球： $p_{\text{Ne}} = 1.8 \text{ Pa}$
 - **形成期に厚い大気を保持していた証拠**

ネオン分圧 → 大気全圧

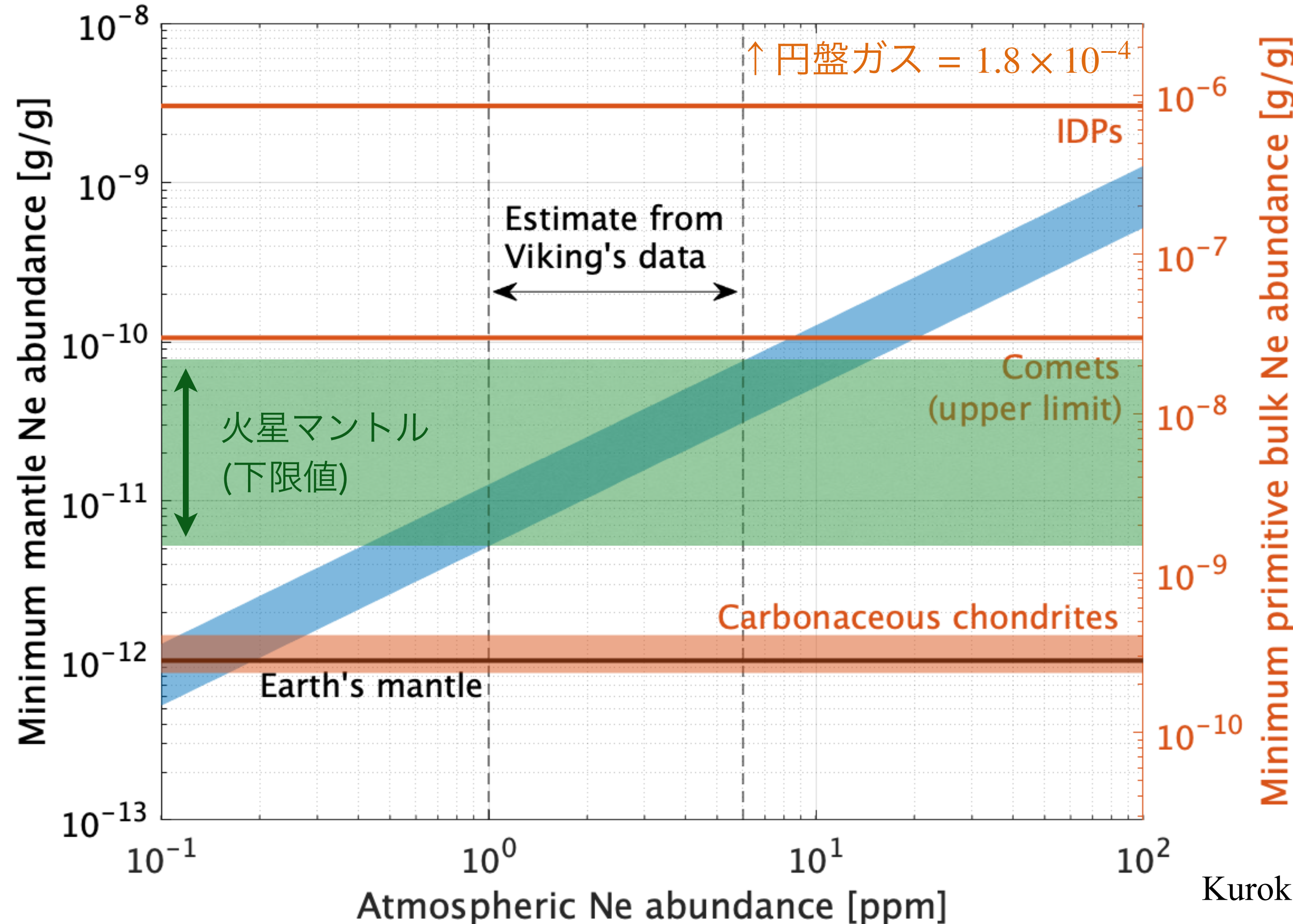
各天体の元素存在度 (惑星：表層, 隕石・彗星：バルク)



- 太陽組成を仮定
(円盤ガス起源, 希ガスリッチ)
→ 全圧 $p \gtrsim 10^{5-6}$ Pa
- 現在の大気組成を仮定
(集積天体起源, 希ガスプア)
→ 全圧 $p \gtrsim 10^{7-8}$ Pa

火星ネオンの起源：存在度から

散逸と脱ガスの釣り合いから求めたマントルネオン存在度 (左軸)と
ネオン取り込みモデルから求めた初期バルクネオン存在度 (右軸)



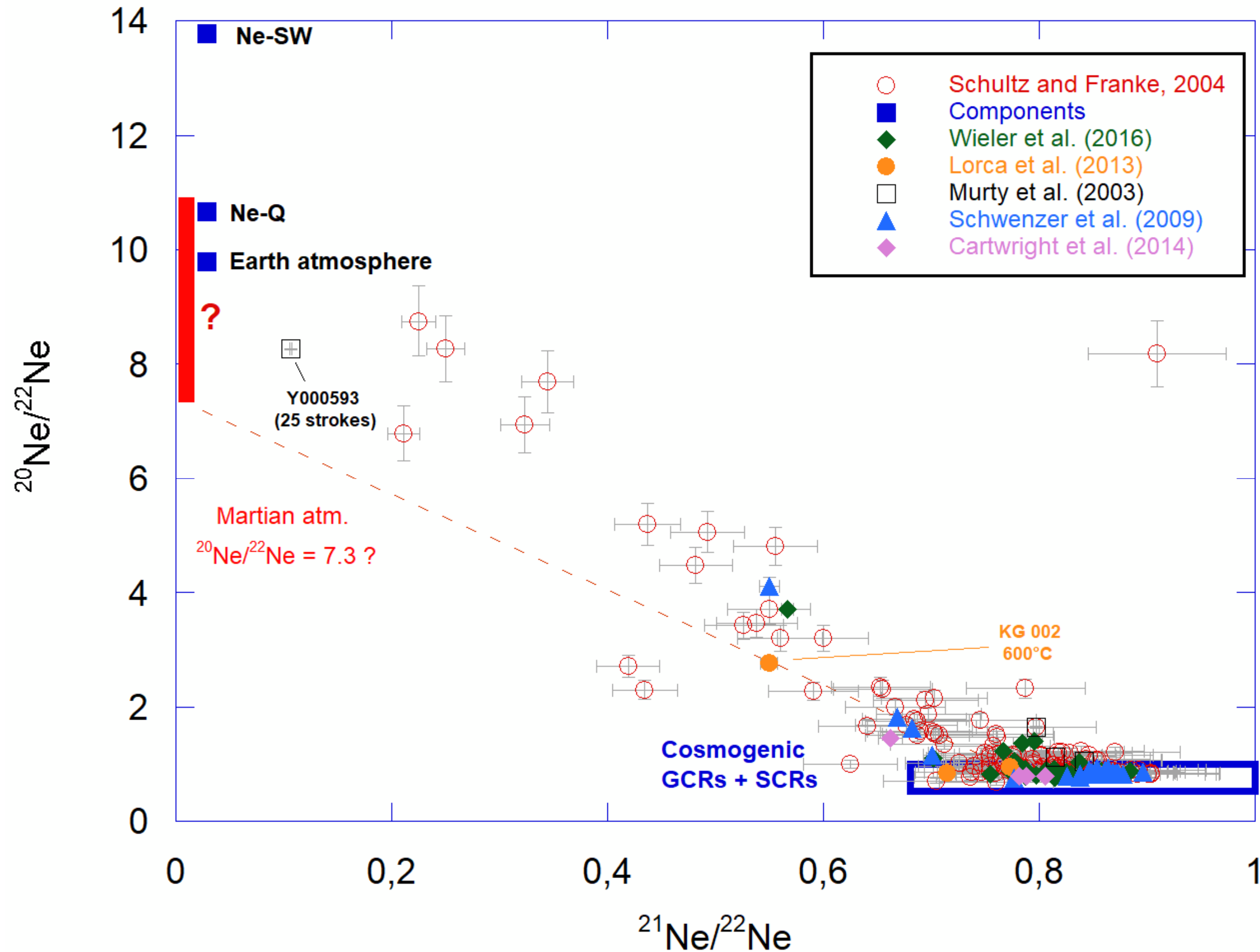
初期バルク存在度と各ソースの比較

- 炭素質コンドライトでは不足
- 彗星でも困難 (総質量の10%必要)
- 円盤ガス or 太陽風照射ダスト？
- 未知のコンドライト的天体？

Kurokawa et al. (2021) *Icarus*

火星ネオンの起源：同位体比から

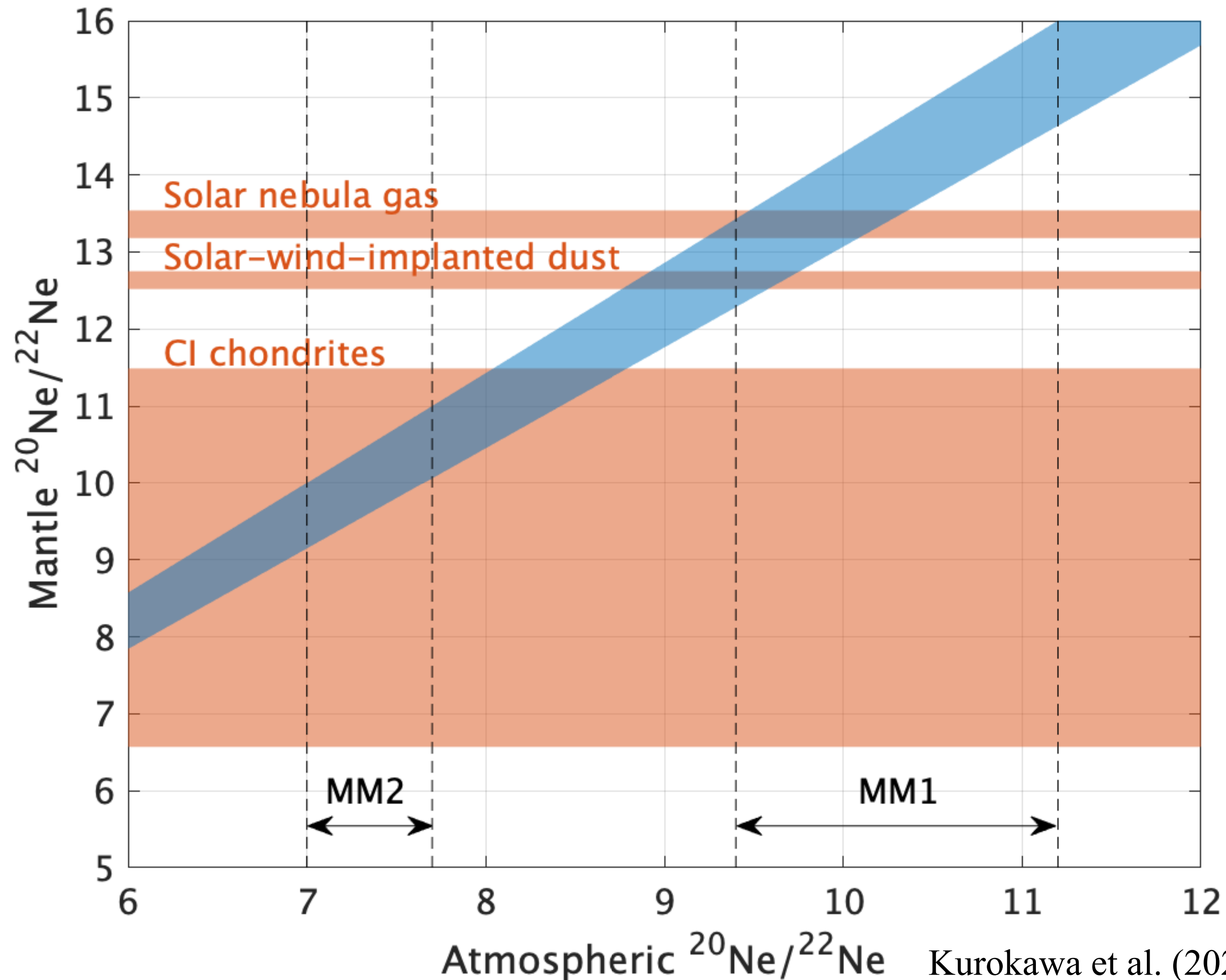
火星隕石中のネオンの同位体組成 (Smith et al. 2021)



- その場探査による測定はなし
 - 宇宙線生成ネオン (^{21}Ne -rich) が多く、火星大気成分の $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ が不定性大
 - 提案されている大気 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比
 - $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} \simeq 10 \equiv \text{MM1}$
 - $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} \simeq 7 \equiv \text{MM2}$
- (Wiens et al. 1986; Swindle et al. 1986; Park & Nagao 2006; Park et al. 2017)

火星ネオンの起源：同位体比から

散逸 = 脱ガス を仮定した大気とマントル同位体比の関係 (青)



- 脱ガスと散逸の釣り合いから

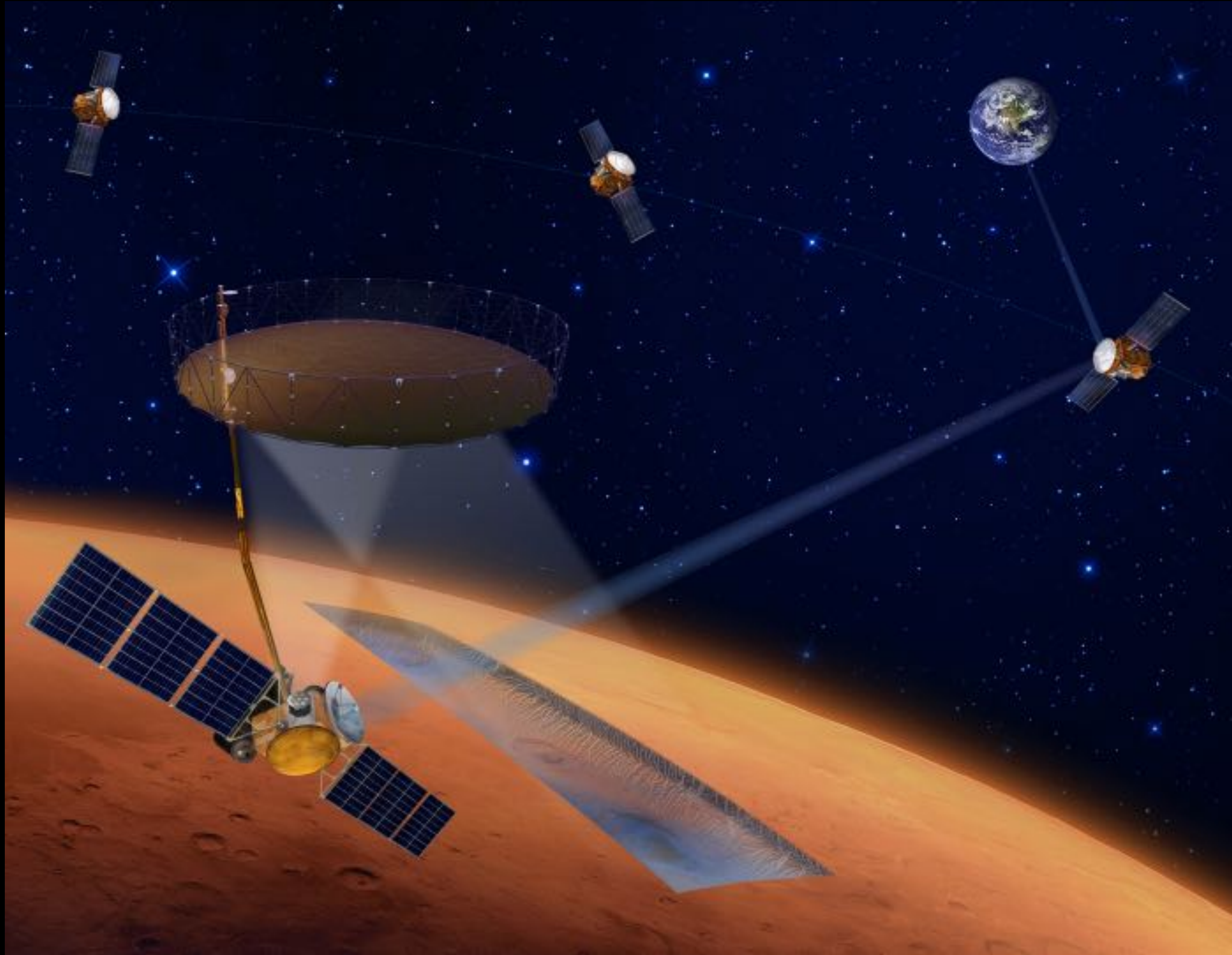
$$\left(\frac{^{20}\text{Ne}}{^{22}\text{Ne}}\right)_{\text{mantle}} = R_{\text{diff},^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}} \cdot \left(\frac{^{20}\text{Ne}}{^{22}\text{Ne}}\right)_{\text{atm}}$$

$R_{\text{diff},^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}}$: 大気散逸の分別係数

- ネオン同位体比のその場測定なし
- 火星隕石から提案されている2つの同位体比
 - MM1 → 円盤ガス or 太陽風照射ダスト
 - MM2 → コンドライト的

(Wiens et al. 1986; Swindle et al. 1986;
Park & Nagao 2006; Park et al. 2017)

Mars Ice Mapper

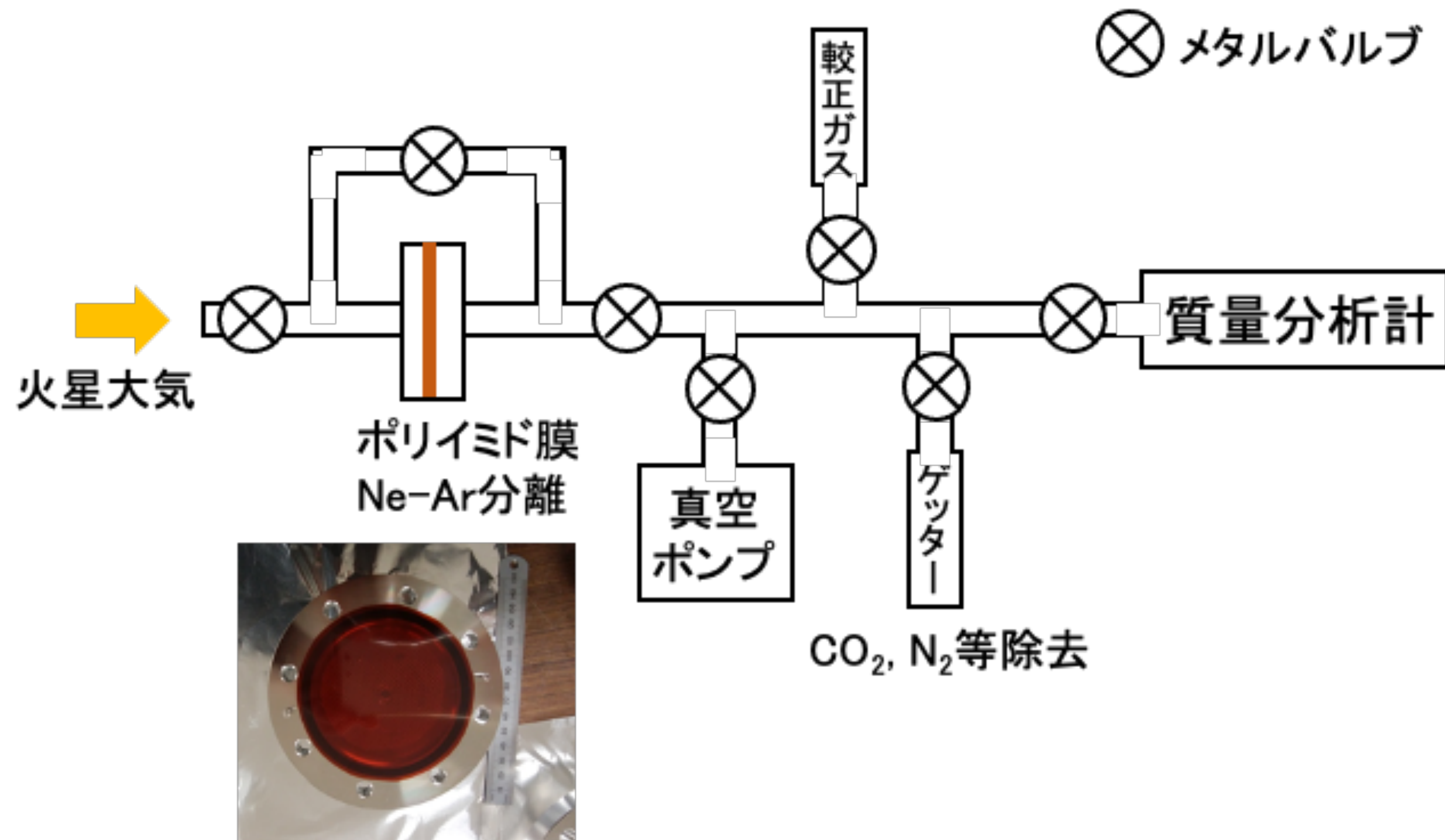


Credit: NASA

- 2028年打ち上げを目指す
- 将来の有人探査に向けた地下氷探査
- 日本の着陸機(EDL)搭載の可能性
- 日本の火星探査ロードマップ
 - 水の起源・分布・進化

分析装置の検討・開発状況

ネオンその場分析装置の構成



- ネオン-アルゴン分離装置
- 原理実証実験済 (Miura et al. 2020, *PSS*)
 - 過去の探査における障壁であった⁴⁰Ar(数%)と²⁰Ne(数ppm)の分離に成功
- 宇宙仕様品の試作中
- 質量分析計(MS)
 - 月極域探査用のMS (Triton) を使用
 - 軽量化版のデザイン (6 kg → 3.5 kg)
 - 総重量 5.5-6 kg とし,
Mars Ice Mapper 着陸機への搭載を可能に

MIM/EDLに搭載された場合の Success Criteria

Minimum success

- **ネオン存在度(^{20}Ne)を誤差ファクター6で制約**
→ Vikingの ^{22}Ne 計測に基づく間接的な見積もりを確認

Full success

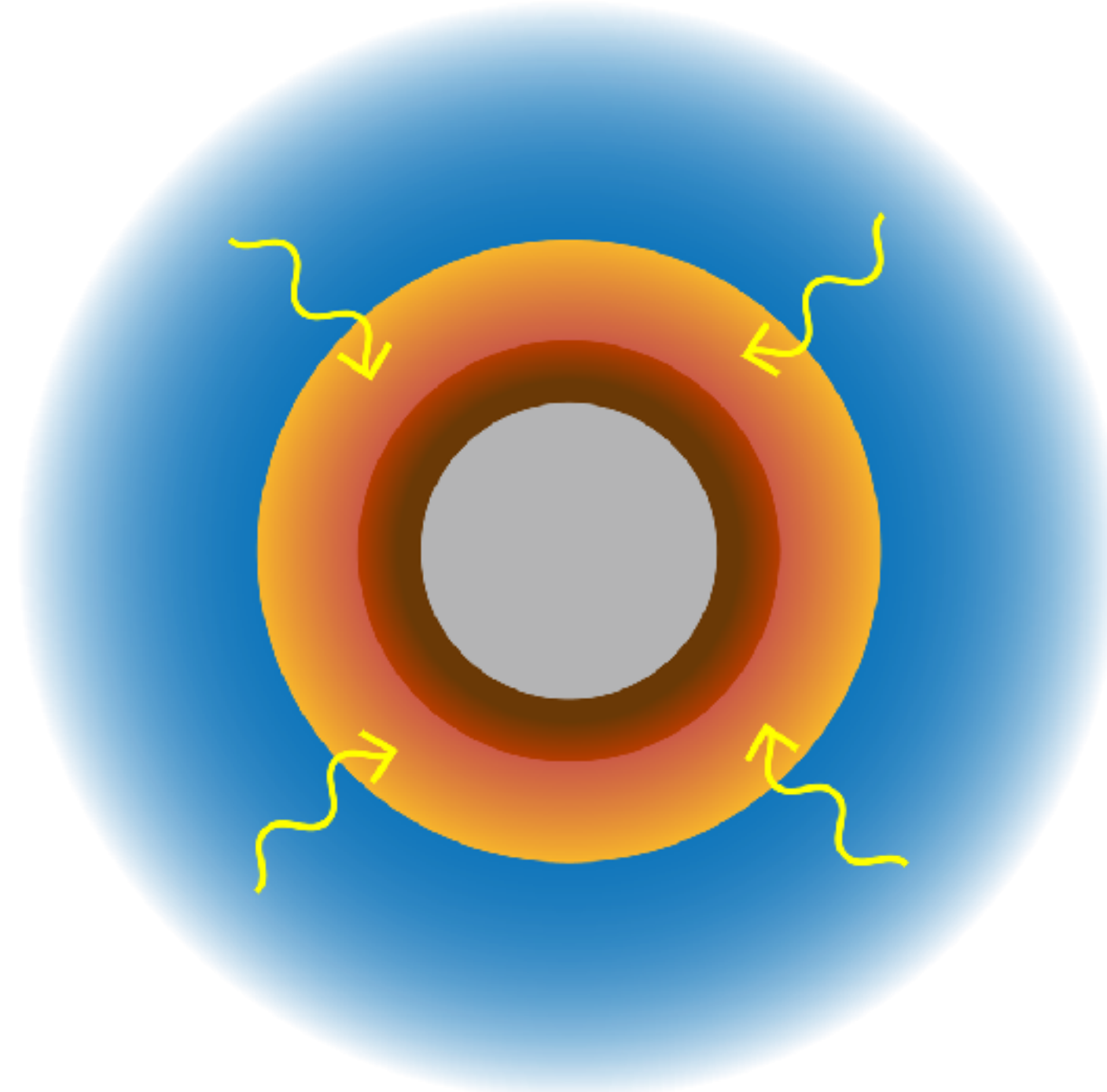
- **ネオン存在度(^{20}Ne)誤差ファクター2で制約**
→ マントルネオン存在度をファクター10で見積もる
- **大気ネオン同位体比($^{20}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$)を誤差10%で計測**
→ 太陽組成(円盤ガス or 太陽風インプラント) と コンドライト組成 を区別

Extra success

- **大気ネオン同位体比を誤差1%で計測**
→ 円盤ガス起源 と 太陽風インプラント起源 を区別

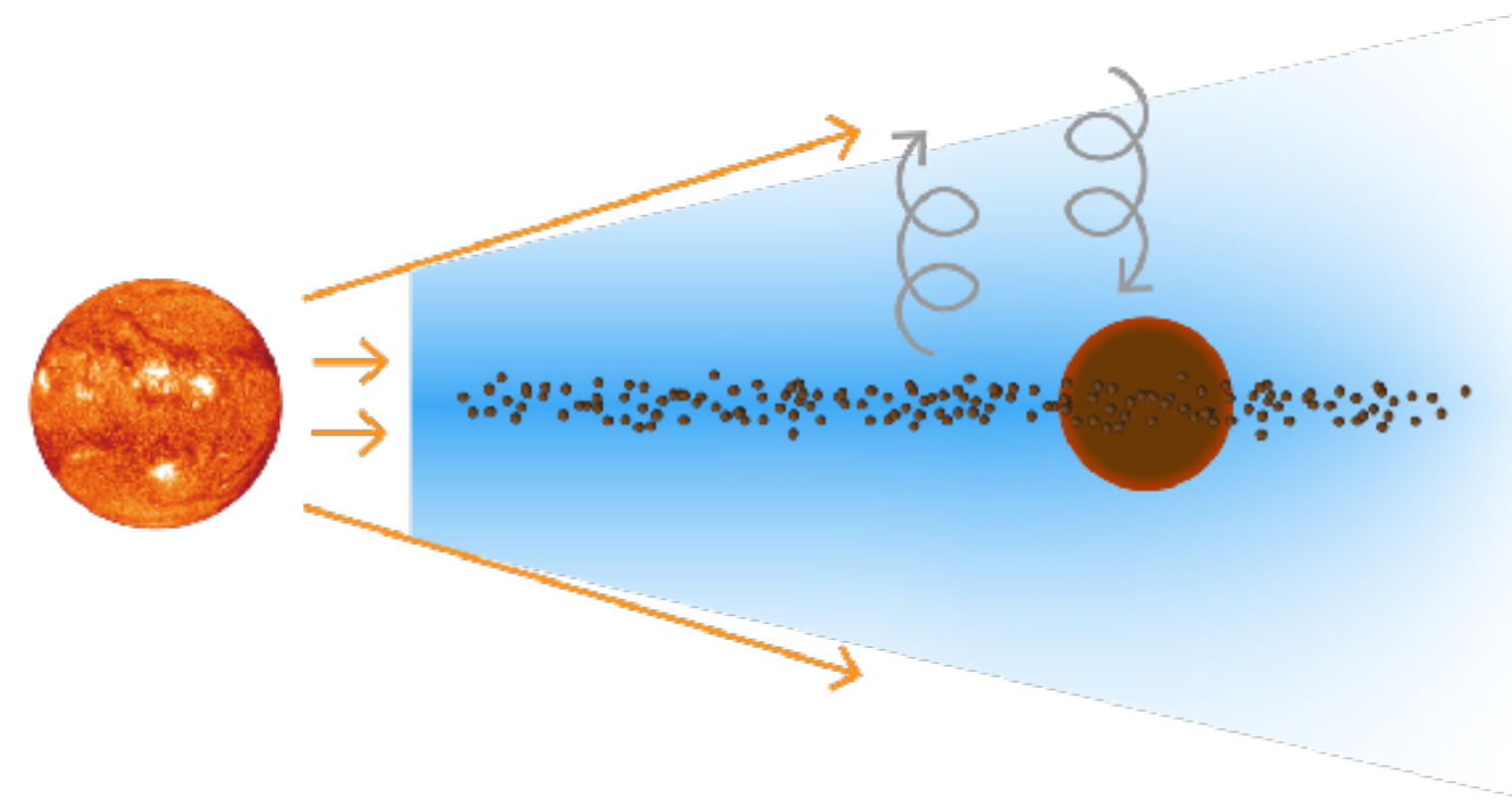
火星の形成・進化への示唆

円盤ガスの取り込み



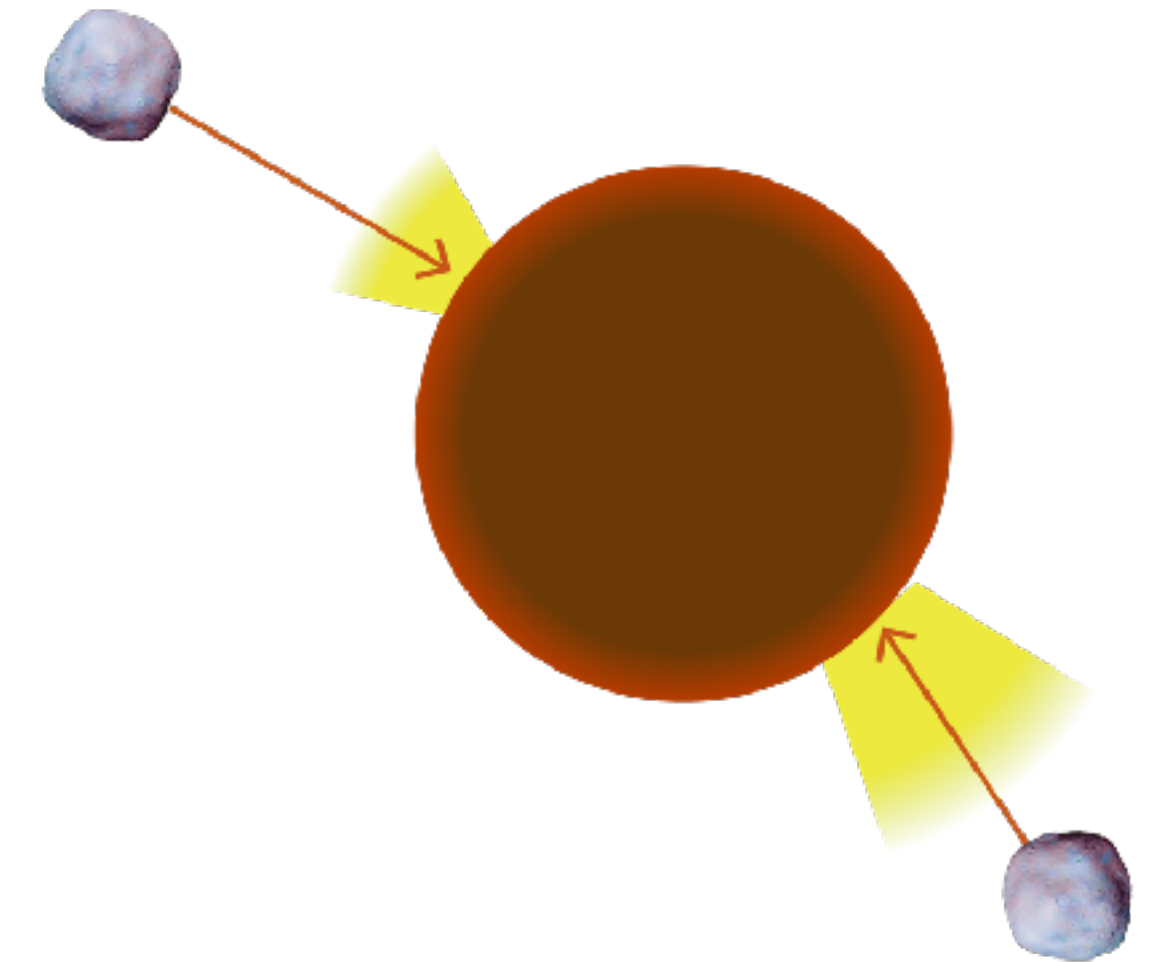
- 早期の火星形成
- 効率的な円盤ガス捕獲
- 円盤ガスからの水生成 (> 火星の古海洋質量)

太陽風照射ダスト集積



- 円盤内の物質輸送 (ダストサイズ・乱流強度)

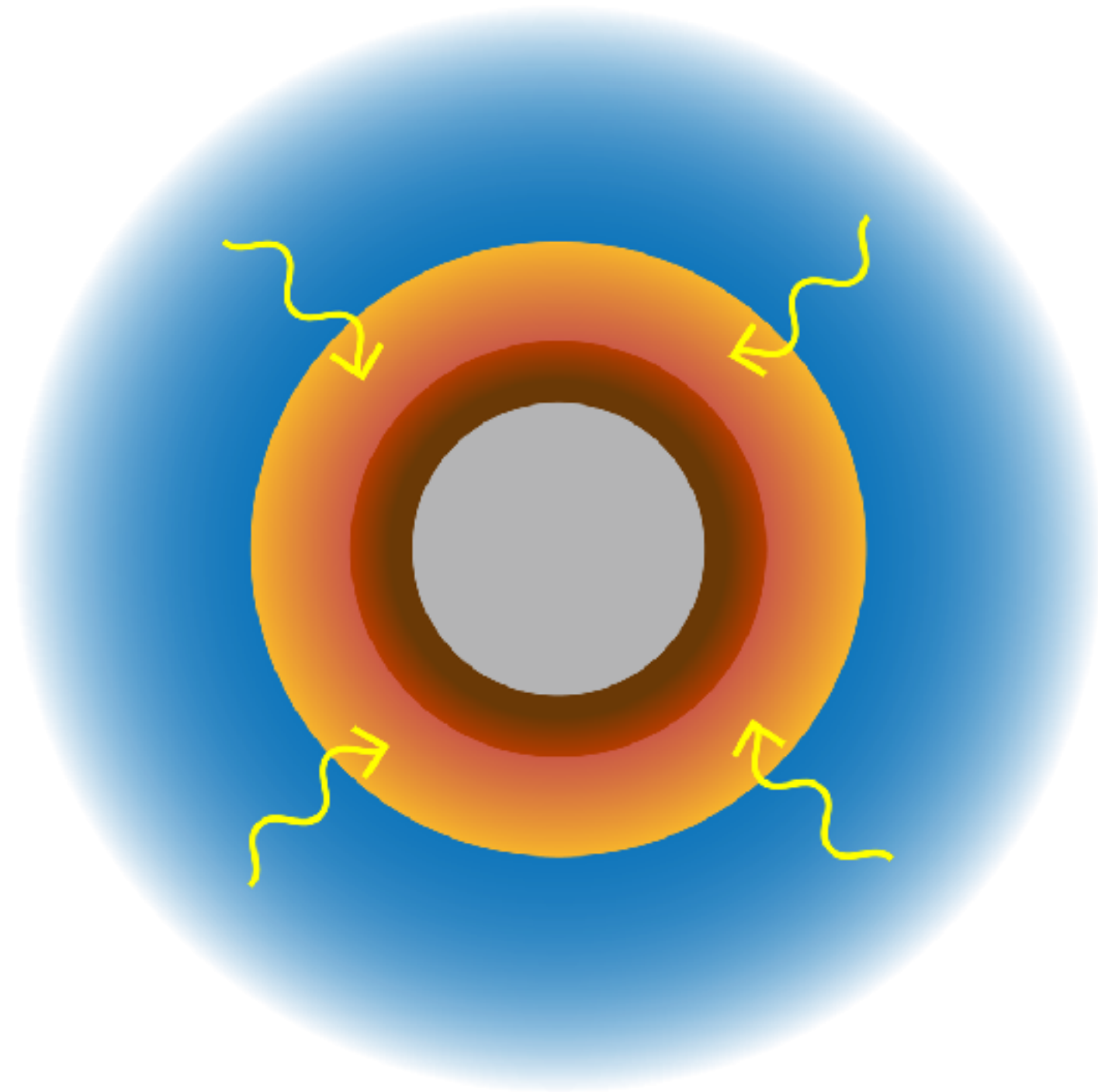
コンドライト / 彗星集積



- 火星の材料物質
- 揮発性元素に富んだ初期火星

→ 火星から諸惑星の形成過程の解明へ

例：円盤ガス捕獲起源のネオン



1次元球対称・静水圧平衡・放射平衡モデル (Sasaki & Nakazawa 1990 Icarus)

$$\text{地表全圧 } p \simeq 1 \times 10^3 \left(\frac{\mu}{2.35} \right)^4 \left(\frac{\kappa}{0.1 \text{ m}^2/\text{kg}} \right)^{-1} \left(\frac{\tau_{\text{acc}}}{1 \text{ Myr}} \right) \text{ Pa} \quad (3)$$

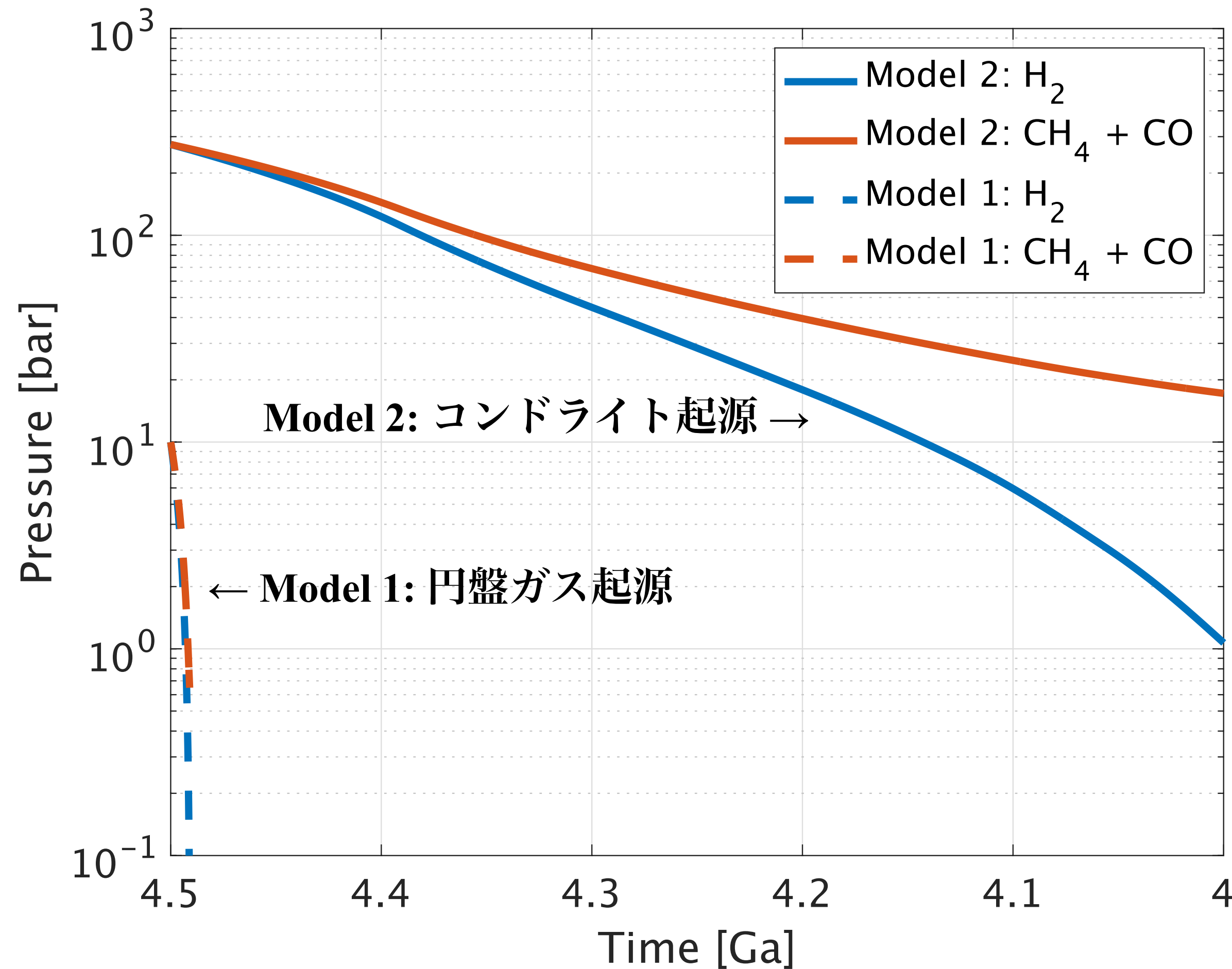
→ 典型的なパラメータでは2桁足りない

- 円盤ガス散逸直前に集積率小 (τ_{acc} 大) ?
- ダスト枯渇によってオパシテイ (κ) 低?
- 二次大気の混合によって平均分子量 (μ) 大?

いずれも、従来の想定より円盤ガス捕獲は効率的であったことを示唆

火星の形成・進化への示唆

原始大気の大気散逸進化 (Kurokawa et al. 2022 LPSC Abstract)



- ネオン量でアンカーされているため,
- コンドライト起源の場合のほうが初期大気多い
- 効率的な放射冷却による低い大気散逸率

(Yoshida & Kuramoto 2020 *Icarus*)

- 数億年間に渡り原始大気が維持
- 温暖な初期火星, 有機化学進化

まとめ

- 火星大気中のネオン →
 - 揮発性元素に富んだマントル
 - 形成過程への制約 (円盤ガス捕獲, 材料物質)
 - 初期火星の表層環境
- 将来火星探査による
ネオンその場計測の検討・機器開発

