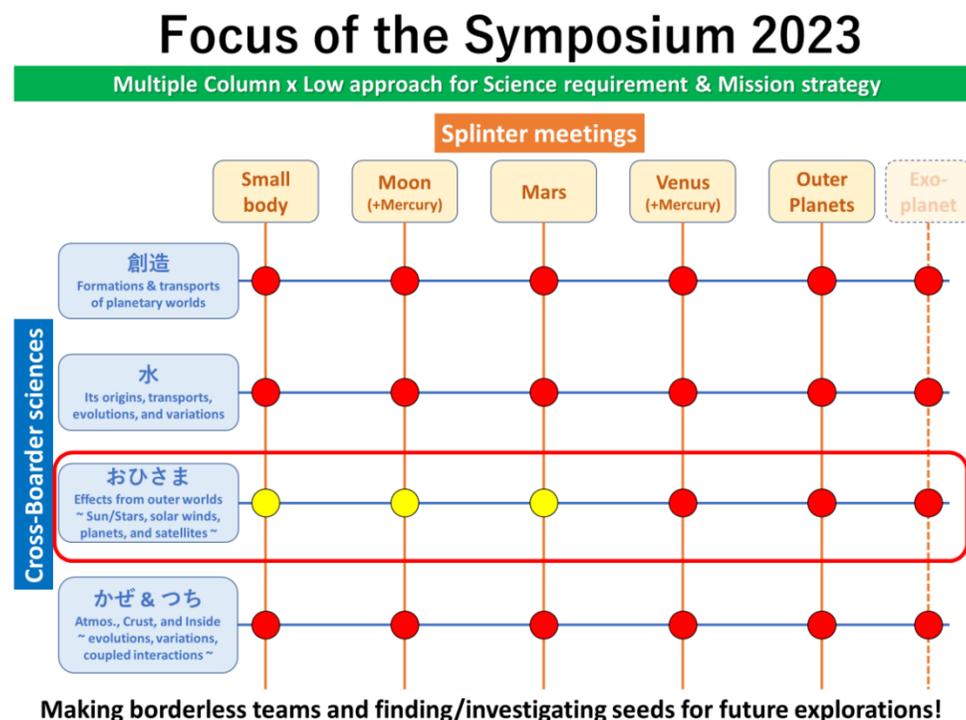


# 隕石の希ガス同位体組成に記録された 過去の太陽風フラックス



○小長谷 智哉 (北大), 中嶋 大輔 (東北大)

20 Feb. 2023, 第24回惑星圏研究会, 東北大学

# 要旨

---

過去の太陽風フラックスは長期的な惑星大気散逸過程を検討する上で重要なパラメーターである。太陽に似た恒星の観測や理論研究では現在と比べて非常に大きな過去の太陽風フラックスが提案されているが（例えば30億年前で10倍以上、10億年前で~2倍（Wood et al., 2005; Airapetian et al., 2016））、直接的証拠が無いことから実際の太陽風フラックス進化履歴は不明である。レゴリス角礫岩質隕石は小惑星レゴリスが固まった物質であり、レゴリスが小惑星表面に存在していた当時の太陽風粒子を獲得・保存している。本研究では、太陽風暴露時に同時に蓄積した宇宙線照射起源希ガスを照射期間の指標に用いることで、6つのレゴリス角礫岩質隕石に記録された過去の太陽風フラックスを推定した。その結果、すべての隕石は現在と同程度の太陽風フラックスを記録していることが明らかになった。このことは隕石レゴリスが太陽風に暴露した当時から太陽風フラックスがほとんど変化していないことを示唆する。特にKapoeta隕石（howardite）は10億年以上前に太陽風を獲得した可能性が高い。このため、これまでの恒星観測や理論研究では過去の太陽風フラックスを過剰に見積もっているかもしれない。

## 引用文献

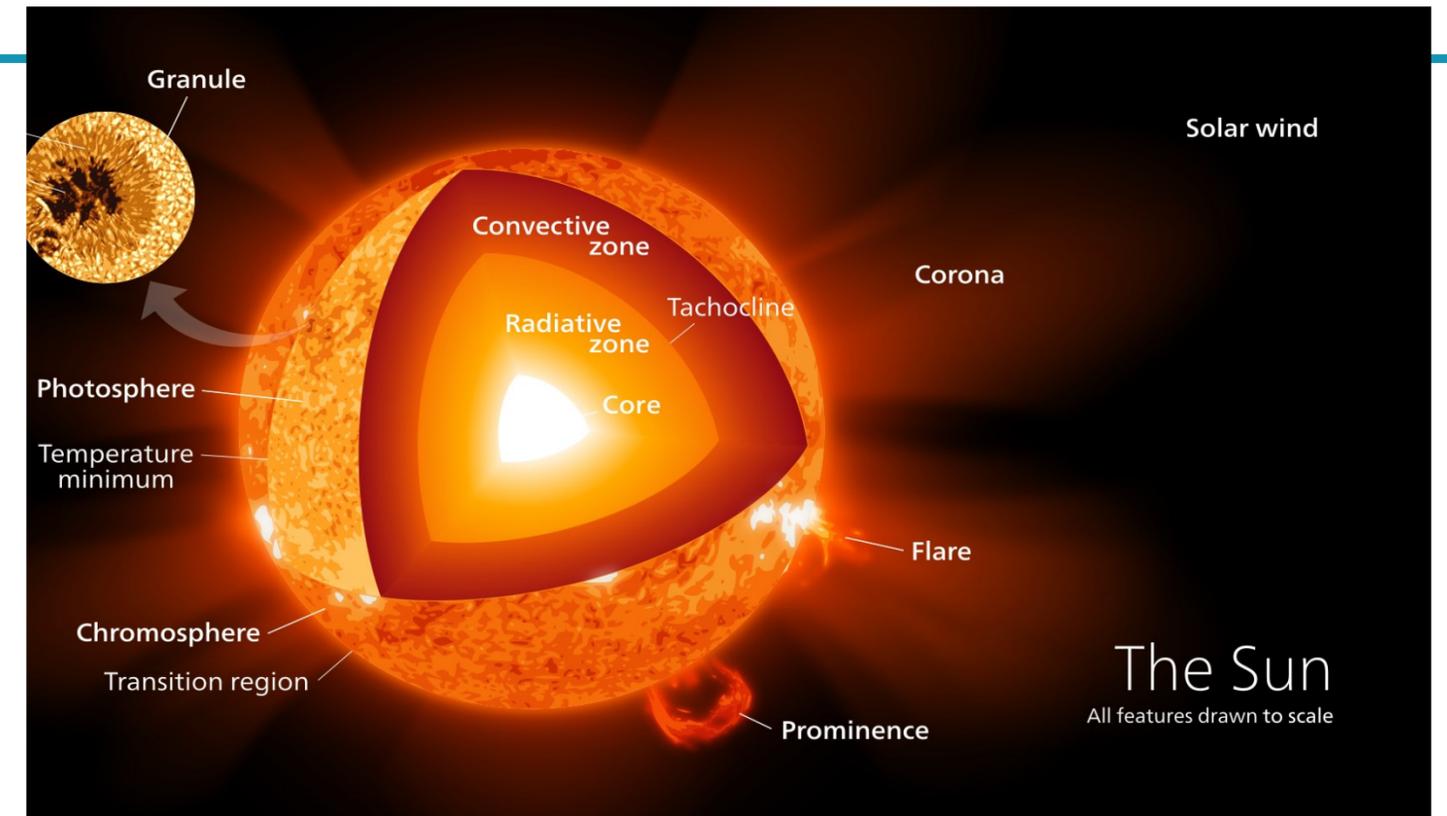
Wood, B.E., Müller, H.-R., Zank, G.P., Linsky, J.L., Redfield, S. (2005) *Astrophys. J.* 628, L143–L146.  
Airapetian, V.S., Usmanov, A.V. (2016) *Astrophys. J.* 817, L24.

# 太陽風

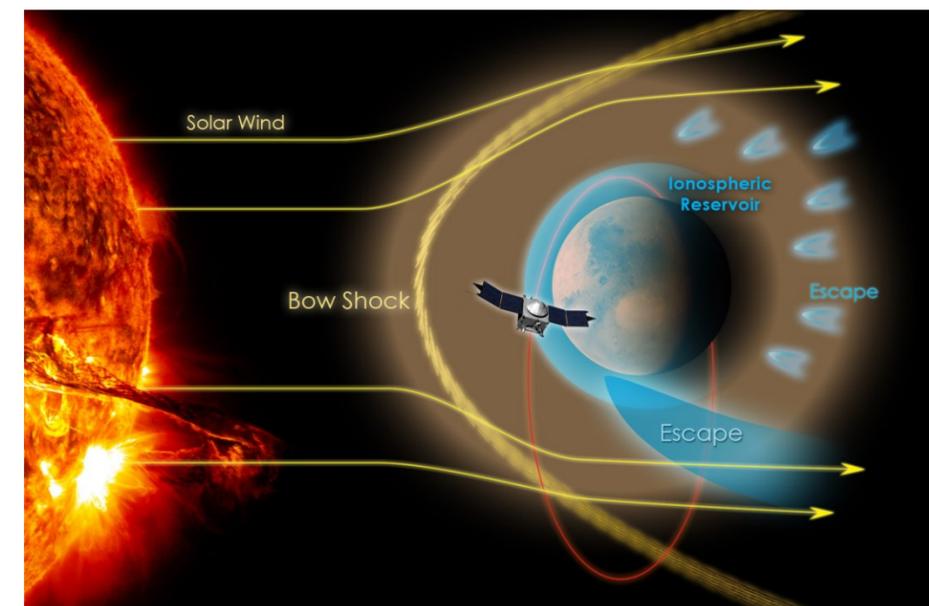
- 太陽コロナから放出されるプラズマ流
- ~400 km/s
- 太陽組成に近い (H 96%, He 4%, ほか0.1%)
- 惑星大気散逸の要因のひとつ
- 火星大気Arはこれまでに~66%失われた

[Jacosky+ 2017]

→ 過去の太陽風フラックスは、惑星大気の進化履歴を理解するうえで重要なパラメーター



<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=23371669>



[NASA/GSFC]

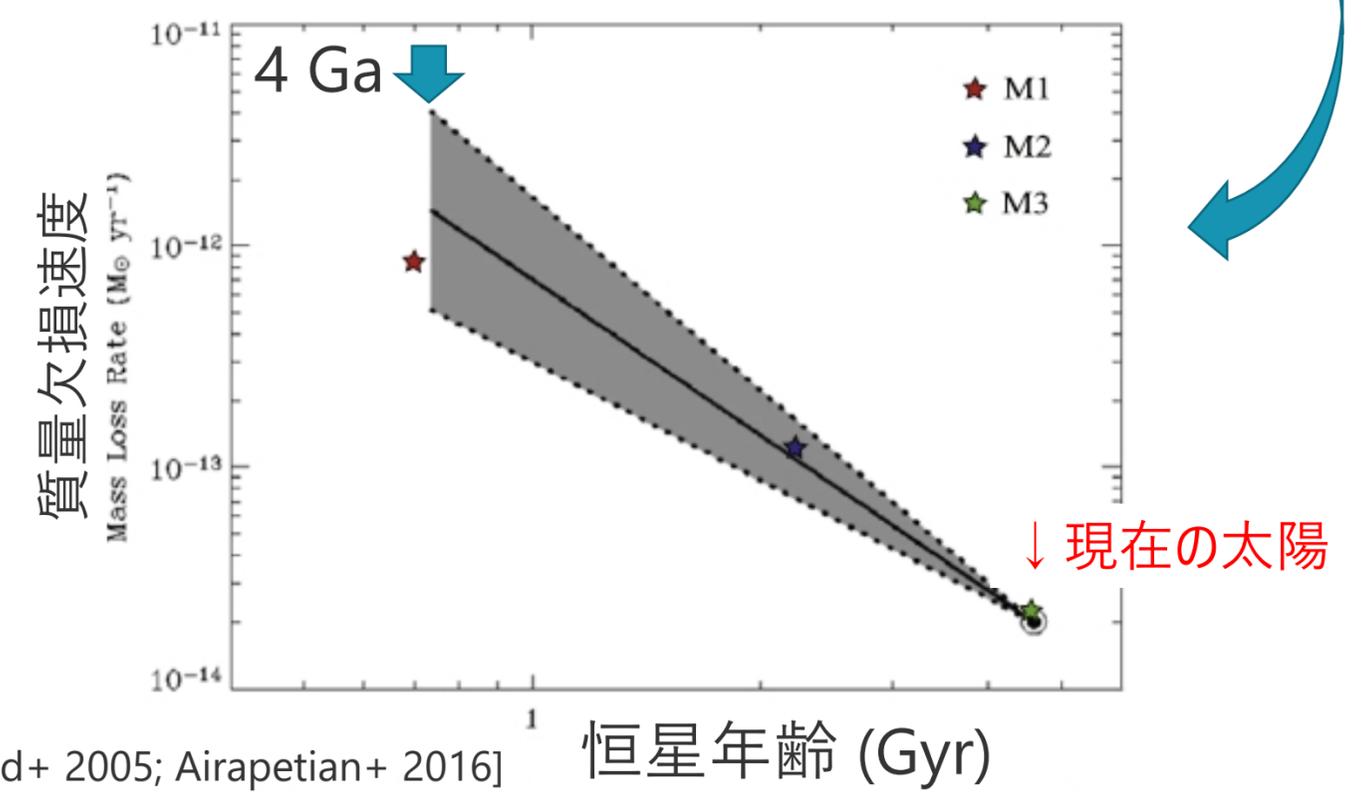
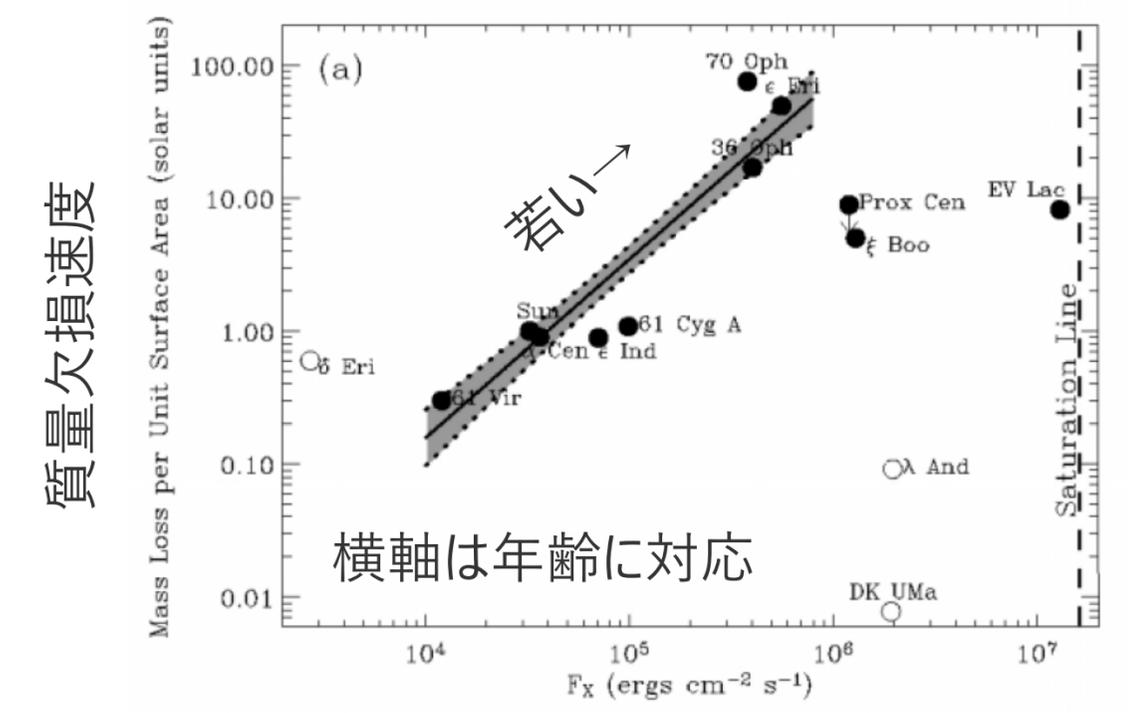
# 過去の太陽風フラックス推定

## 恒星観測に基づく推定

- 観測から恒星の年齢と質量欠損速度を推定 [Wood+ 2004]
- 若い恒星ほど質量欠損速度 ( $\propto$  太陽風フラックス) が大きい
- **昔の太陽風フラックスは桁違いに大きかった可能性** (例えば, 40億年前→現在の50—100倍)

ただし昔の大きな太陽風フラックスについて,  
**太陽系における物質的証拠は見つかっていない**

## 恒星観測に基づく太陽風フラックスの変化

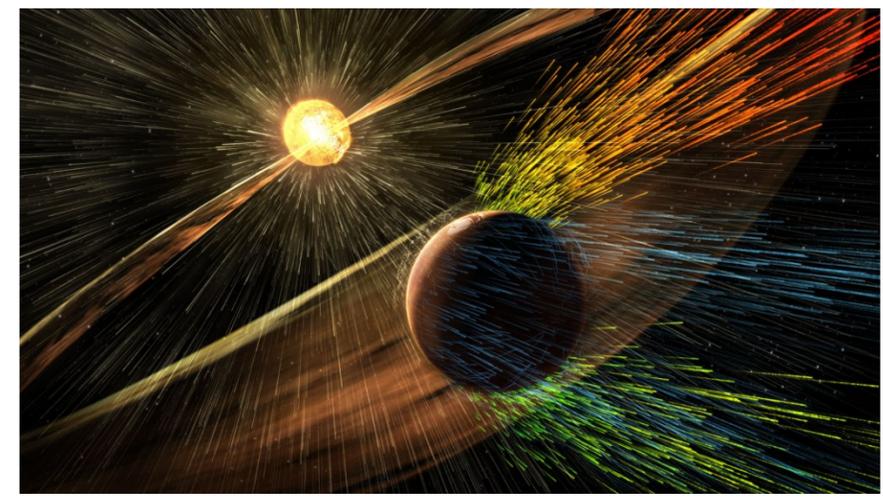


[Wood+ 2005; Airapetian+ 2016]

恒星年齢 (Gyr)

# 天体表層物質に蓄積する太陽風

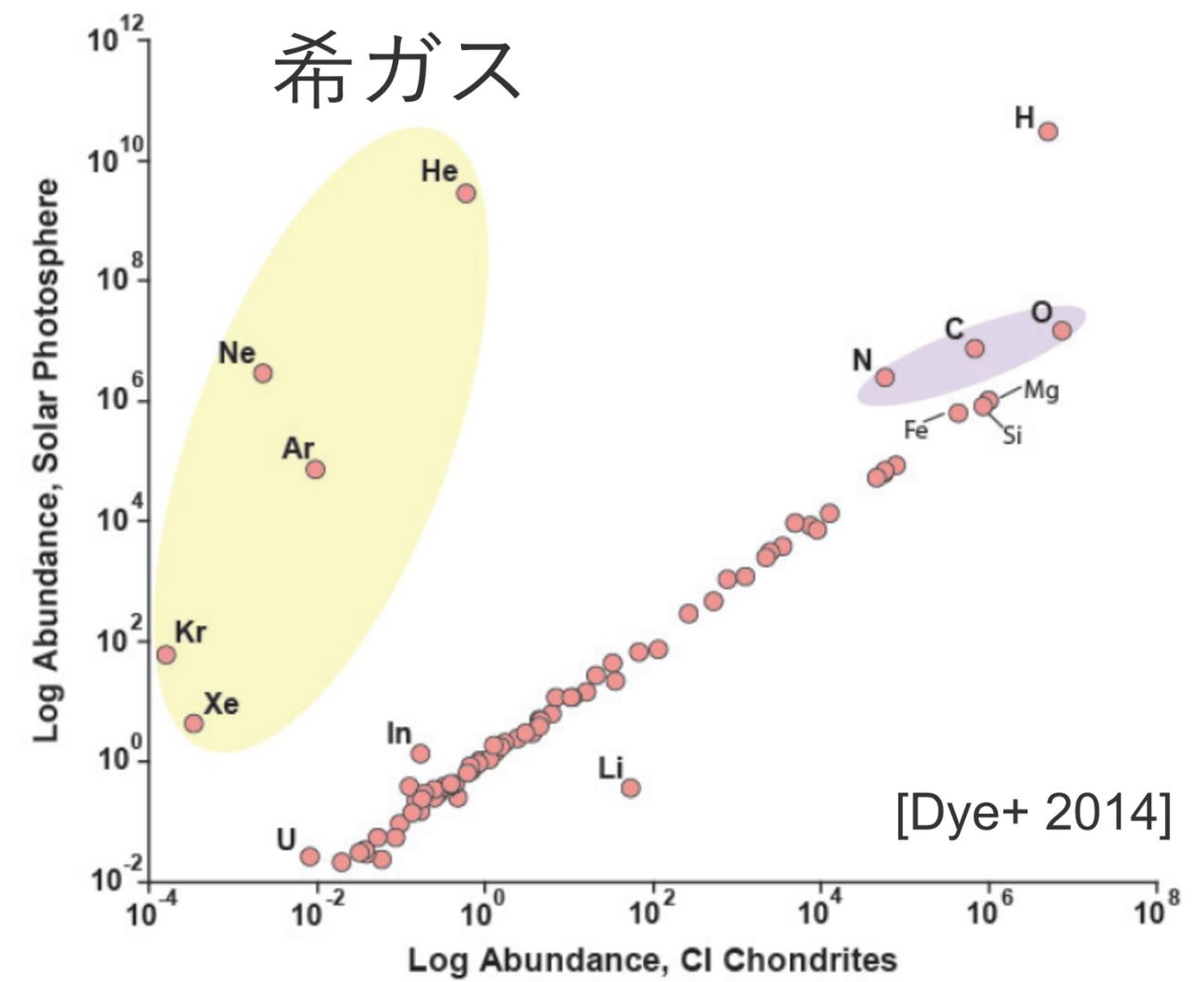
- 大気のない天体（月・小惑星など）の表層物質の表面に蓄積
  - 太陽風元素組成 ≒ 太陽組成
  - 固体物質中の希ガス存在度は非常に低い（右図）
- 希ガス組成は太陽風の蓄積に敏感



[NASA/GSFC]

## 太陽と隕石の元素存在度 (Si = 10<sup>6</sup>)

太陽組成



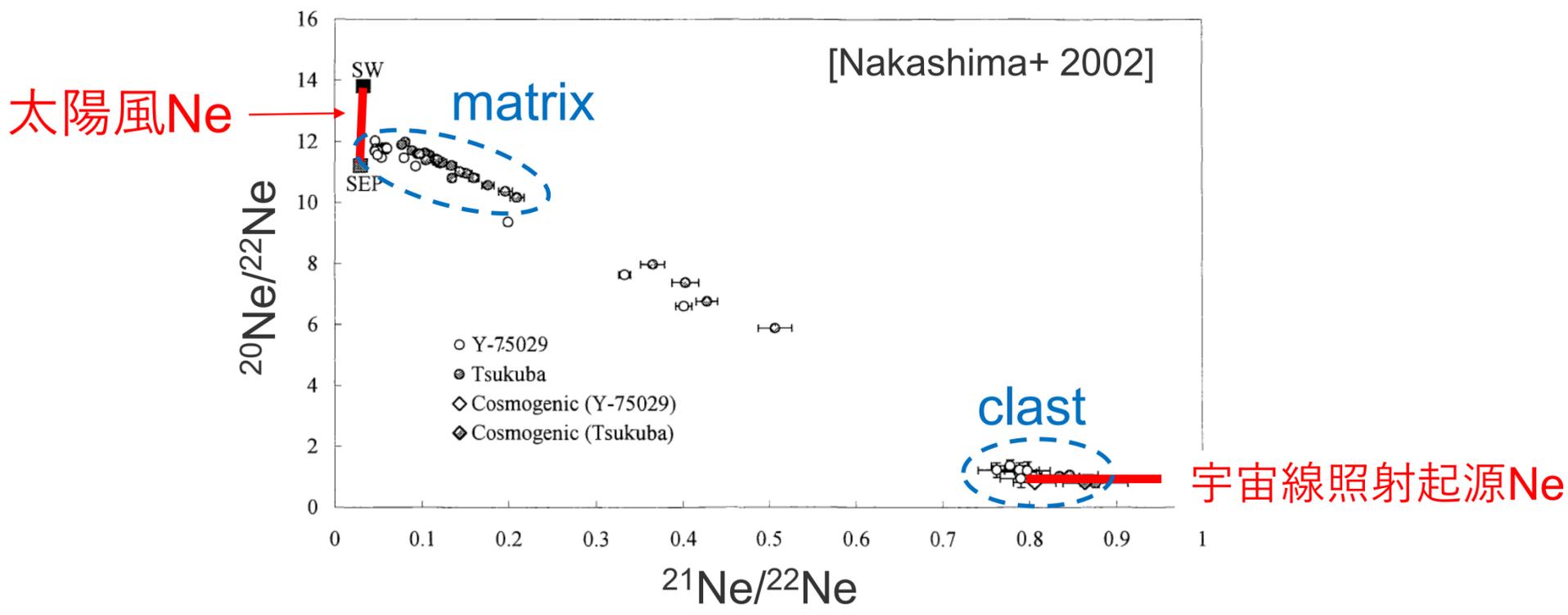
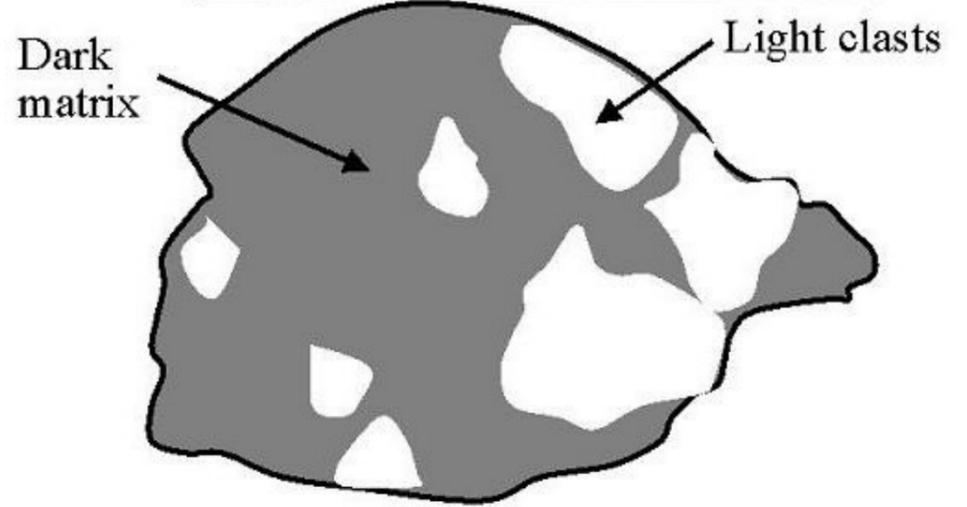
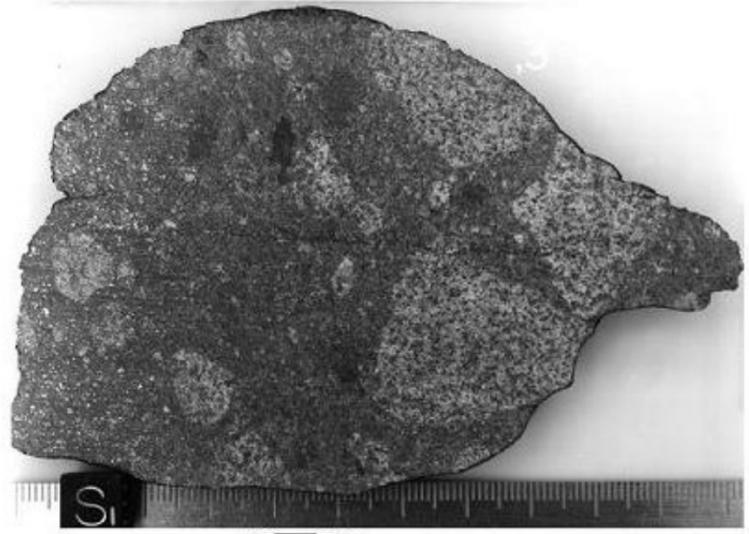
[Dye+ 2014]

始原的隕石組成  
(CIコンドライト)

# レゴリス角礫岩質隕石

- “dark/light structure”  
→ 黒色のマトリックスと白色のクラスト
- 黒いマトリックス部に大量の太陽風希ガス  
→ かつて母天体表層レゴリスだった証拠  
→ レゴリス角礫岩質隕石は、過去の太陽風を保存

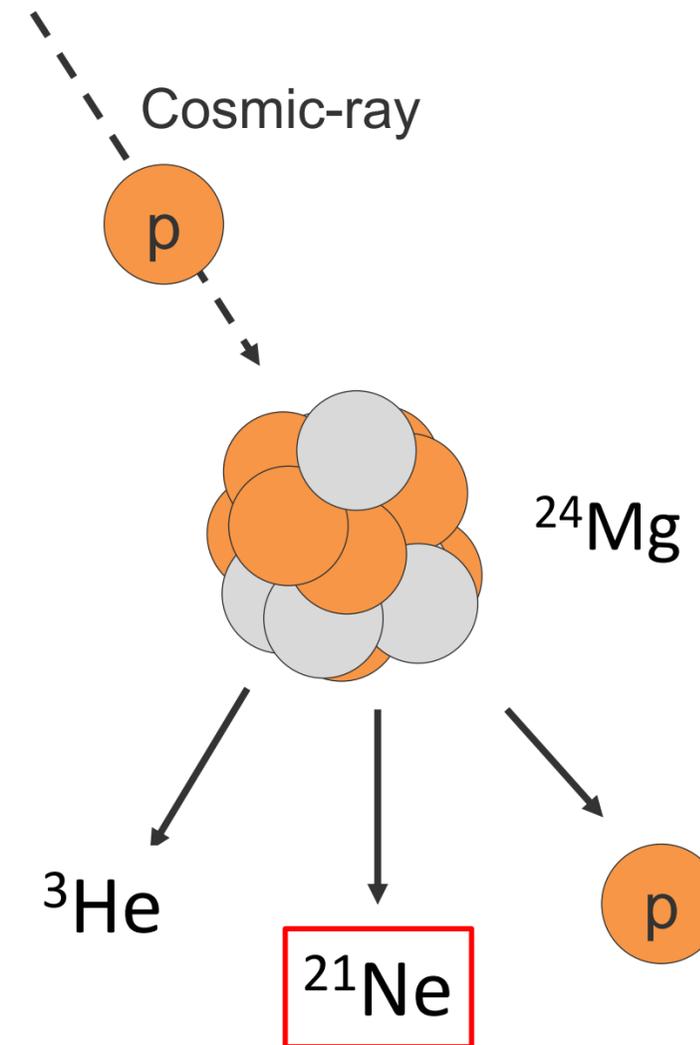
Fayetteville (H4)



[http://www.omaturn.com/Photographs/Fayetteville\\_desc.htm](http://www.omaturn.com/Photographs/Fayetteville_desc.htm)

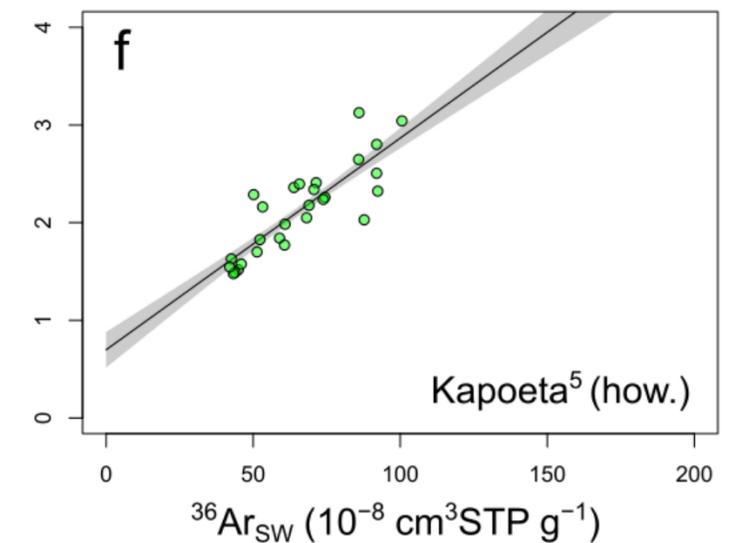
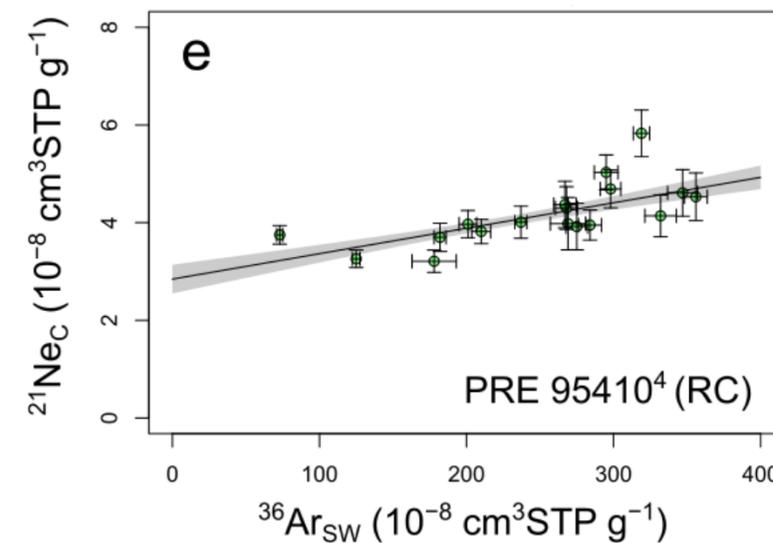
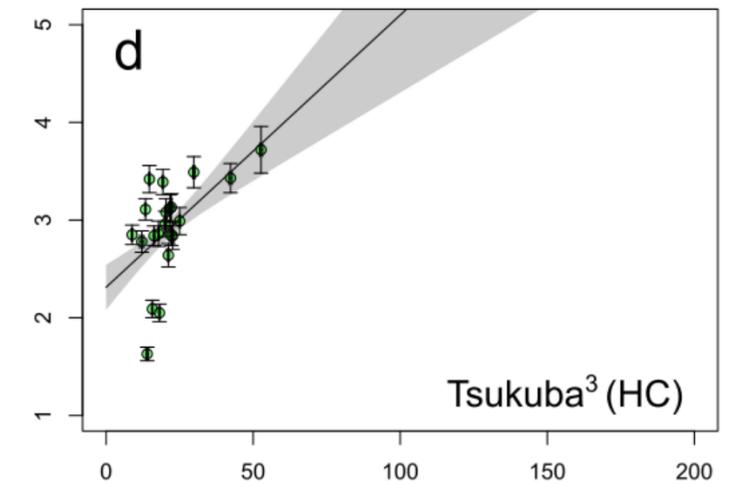
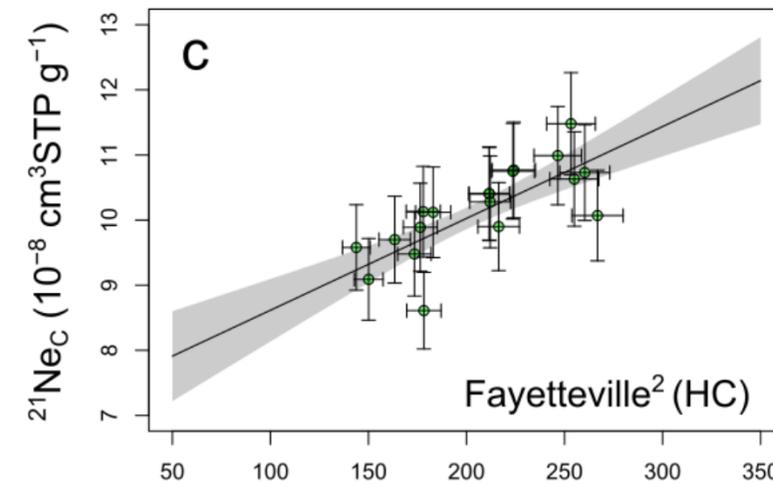
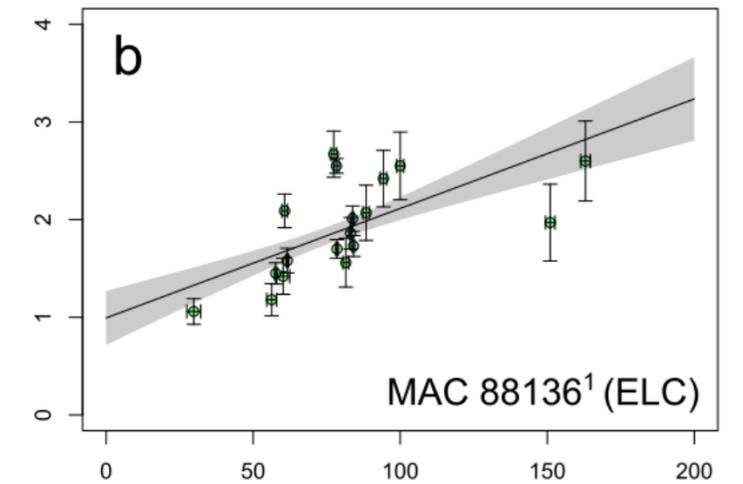
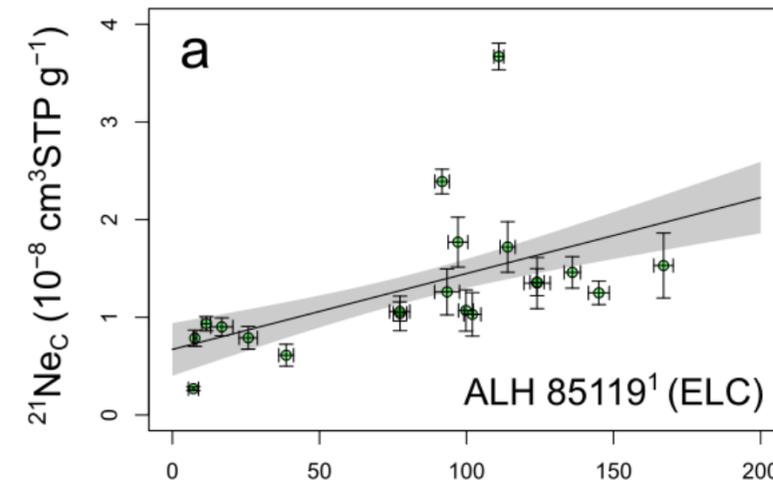
# 宇宙線照射起源 $^{21}\text{Ne}$ ( $^{21}\text{Ne}_c$ )

- 銀河宇宙線 (Galactic Cosmic Rays; GCRs) の照射による核破砕反応由来の $^{21}\text{Ne}$
  - $^{21}\text{Ne}_c$ 濃度は照射時間に比例 (宇宙線照射年代)
- $^{21}\text{Ne}_c$ 濃度を照射時間の指標として、太陽風フラックスを推定できるかもしれない



# $^{36}\text{Ar}_{\text{SW}}$ vs $^{21}\text{Ne}_{\text{C}}$

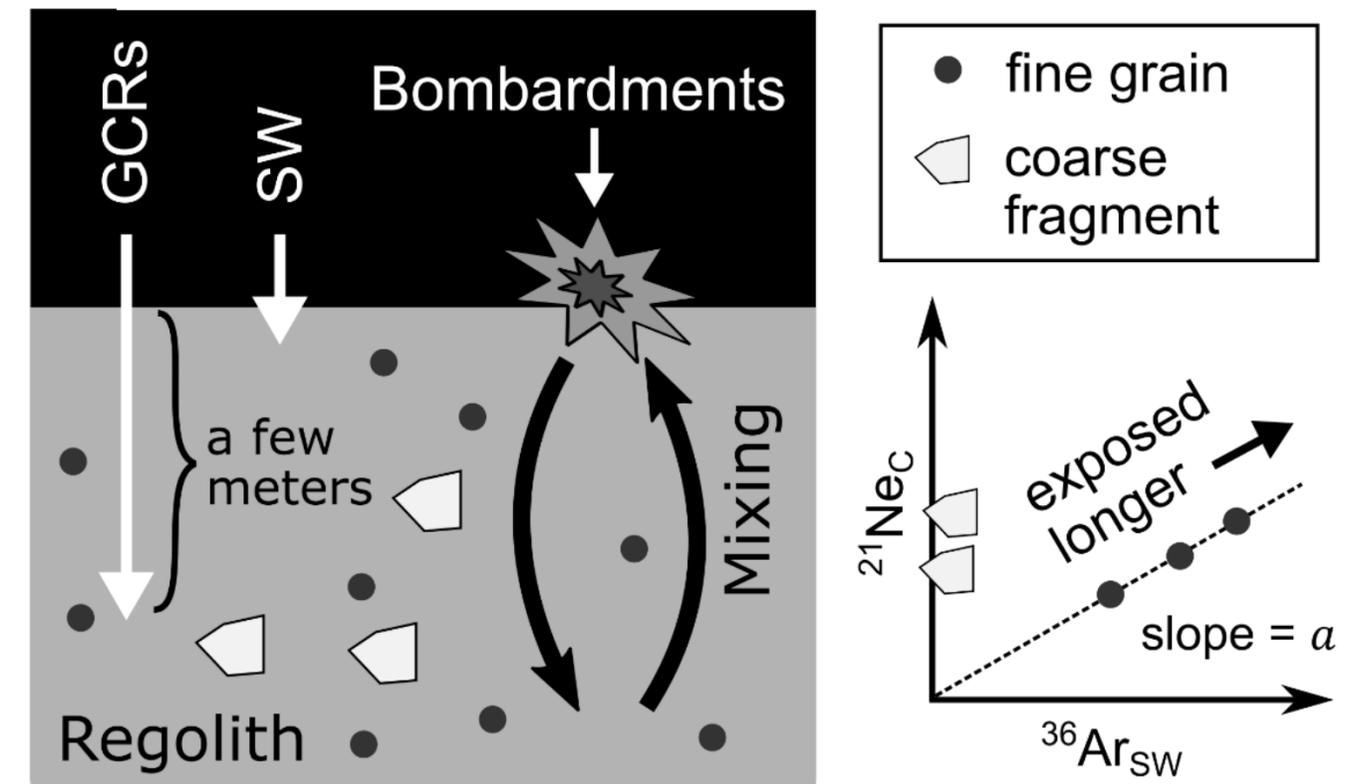
- 隕石マトリックス部の希ガス組成を複数分析したデータをプロット  
(EC × 2, OC × 2, RC × 1, howardite × 1)  
[Wieler+ 1989; Pedroni 1989; Nakashima+ 2002, 2006; Obase+ 2020]
- $^{36}\text{Ar}_{\text{SW}}$  と  $^{21}\text{Ne}_{\text{C}}$  に正の相関
- 傾きが寝るほど大きな太陽風フラックス



# レゴリス角礫岩質隕石の希ガス蓄積モデル

- 母天体表層レゴリスで太陽風と宇宙線に暴露。マトリックス部の細粒粒子に $^{36}\text{Ar}_{\text{SW}}$ と $^{21}\text{Ne}_{\text{C}}$ が蓄積
- レゴリスは天体衝突等で常に攪拌され、 $^{36}\text{Ar}_{\text{SW}}$ と $^{21}\text{Ne}_{\text{C}}$ は一定の比率で蓄積。  
 $^{36}\text{Ar}_{\text{SW}}$ — $^{21}\text{Ne}_{\text{C}}$ の正相関（傾き =  $a$ ）を形成

(a) Parent body exposure



# 太陽風 $^{36}\text{Ar}$ フラックス ( $F_{36}$ ) の算出

表層レゴリスにおいて...

$\Sigma P_{21}$  (atoms  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ): 単位面積・単位時間当たりの $^{21}\text{Ne}_C$ 生成量

$F'_{36}$  (atoms  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ): 単位面積・単位時間当たりにレゴリスが受け取る $^{36}\text{Ar}_{\text{SW}}$

→ レゴリス全体に蓄積する $^{21}\text{Ne}_C$ と $^{36}\text{Ar}_{\text{SW}}$ の比は $\Sigma P_{21}/F'_{36}$

→ レゴリス粒子が良く混合しているならば,

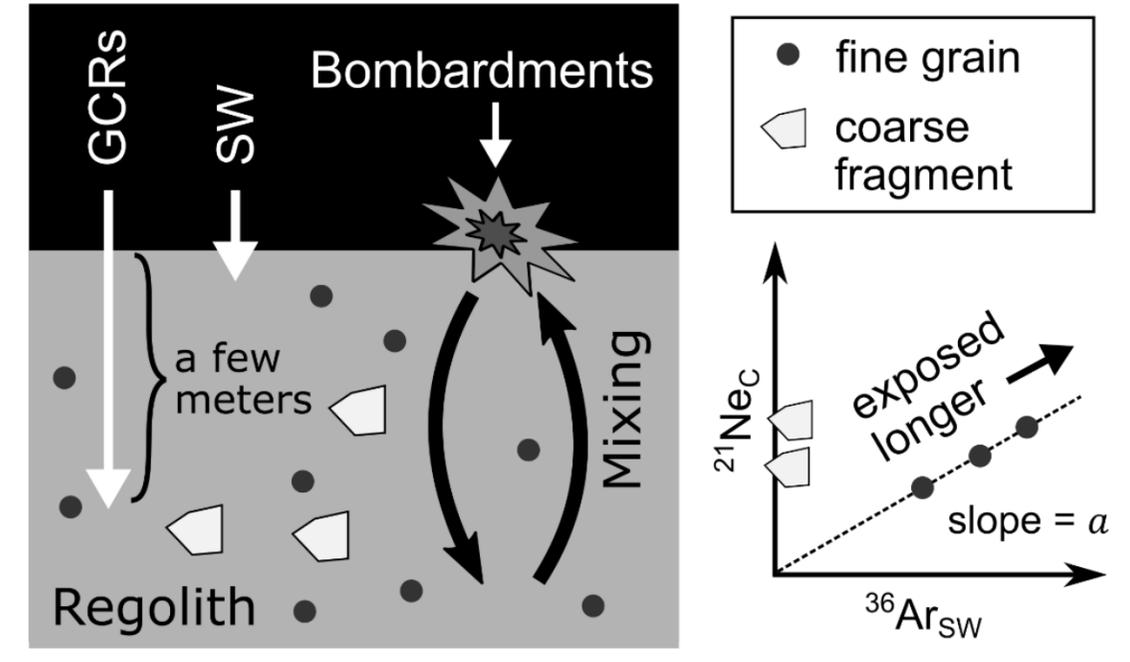
$$a = \Sigma P_{21}/F'_{36} \quad \rightarrow \quad F'_{36} = \Sigma P_{21} / a$$

$F_{36}$  (atoms  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ):  $^{36}\text{Ar}_{\text{SW}}$ フラックス

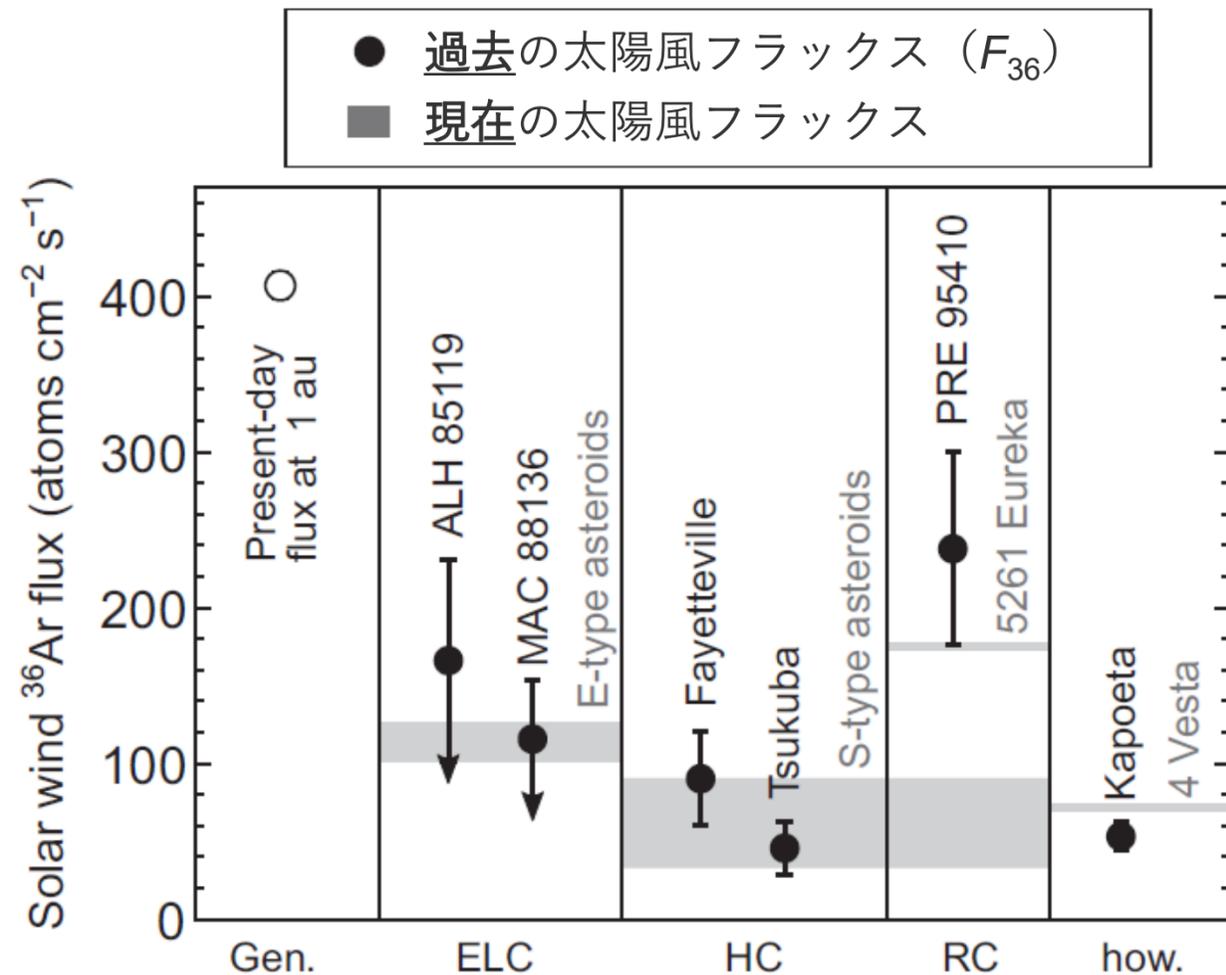
母天体は自転しているので、レゴリスへの太陽風照射量は $1/\pi$

$$\rightarrow \quad F_{36} = \pi F'_{36}$$

(a) Parent body exposure



# 隕石に記録された過去の太陽風フラックス



- 隕石に記録された**過去の太陽風フラックス**と、対応する小惑星（Eタイプ，Sタイプ，小惑星ベスタ）における**現在の太陽風フラックスを比較**
- 太陽風フラックスは距離の二乗に反比例して減少（E: 1.8–2.0 au, S: 2.1–3.4 au, ベスタ: 2.4 au）

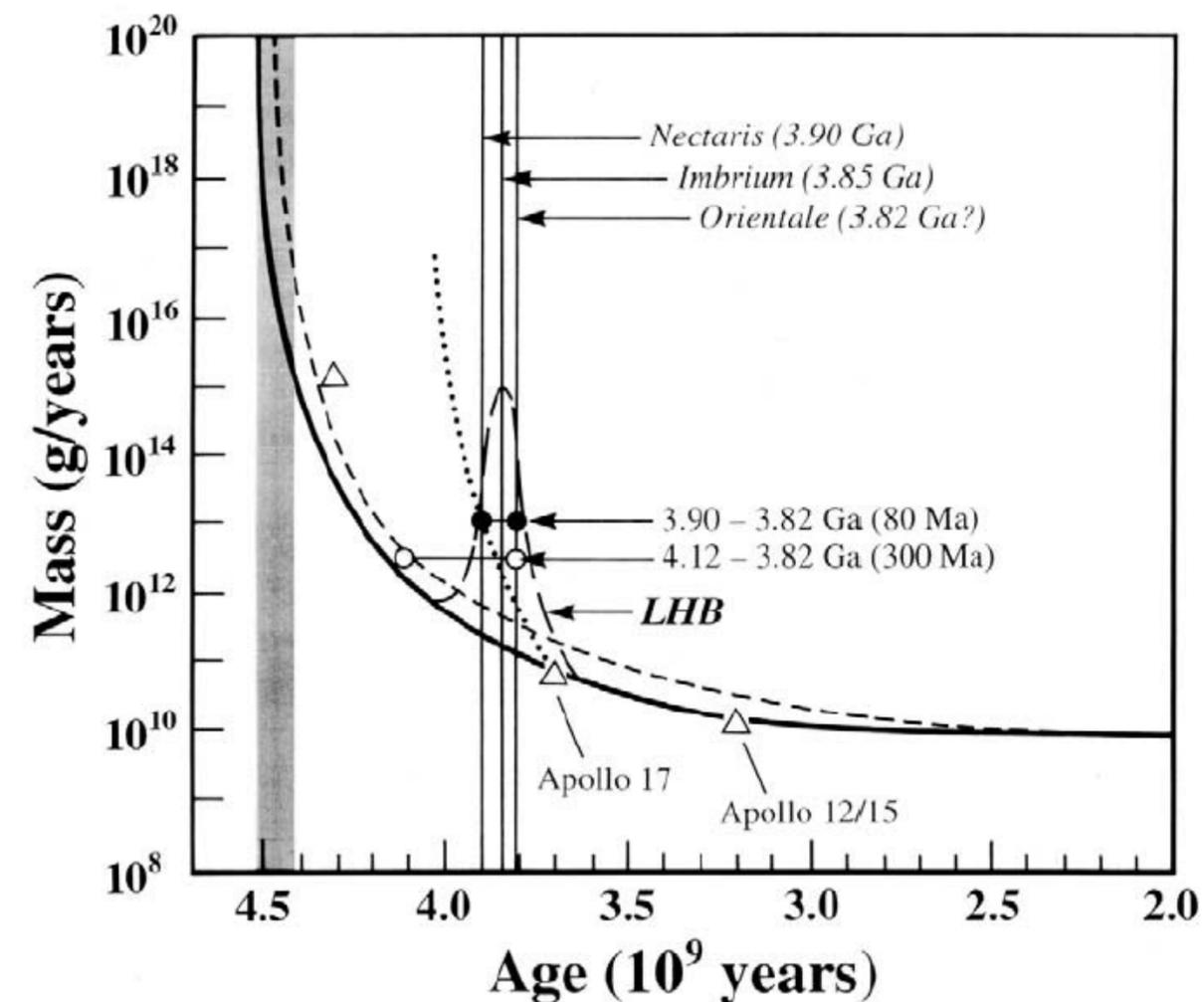
結果：**太陽風フラックスは現在と同程度**

→ 太陽風フラックスは長期間変化していない？

隕石に記録された過去の $^{36}\text{Ar}_{\text{SW}}$ フラックスと、対応する小惑星における現在のフラックス

# 太陽風の獲得時期

- 天体衝突は昔ほど高頻度
  - “天体衝突頻度  $\propto$  レゴリス形成速度”  
だとすると、  
レゴリスの多くは30億年前以前に形成
- レゴリス質隕石の大半は、  
かなり古い太陽風を記録？  
観測（~数十倍）と異なる結果！

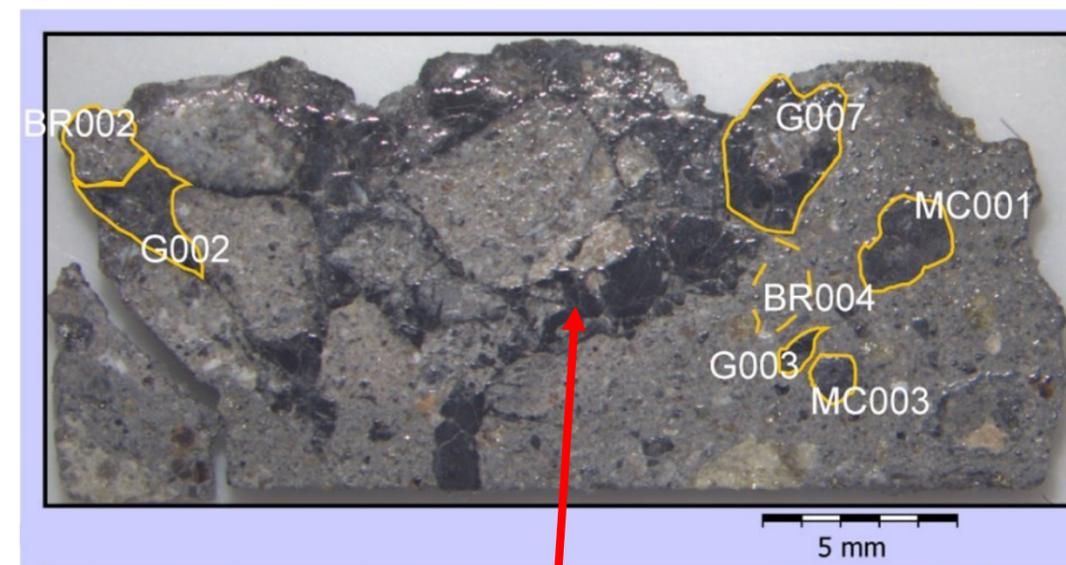


月への物質集積量変化 [Koeberl, 2003]

# Kapoeta隕石 (howardite) のレゴリス形成年代

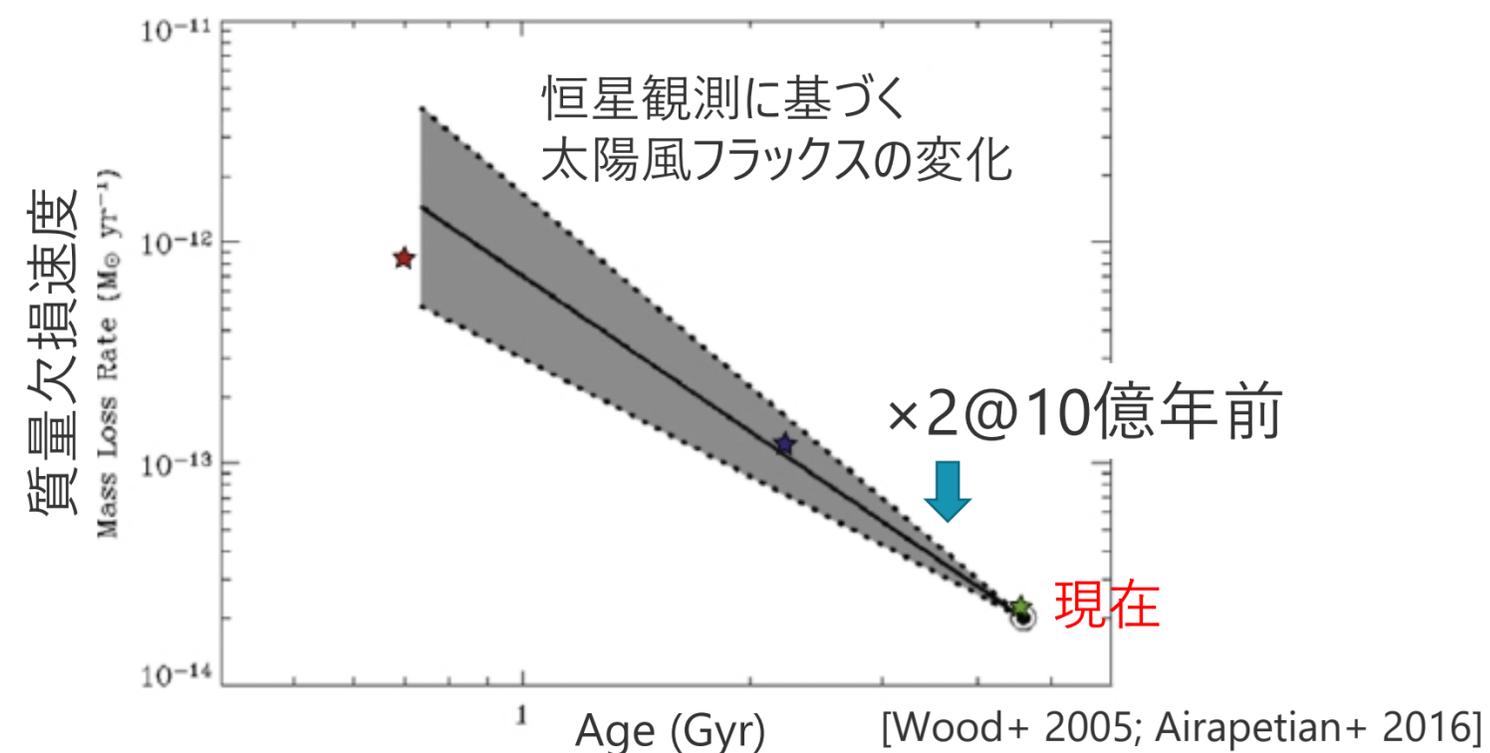
- **Kapoetaの太陽風フラックスは現在とほぼ同じ**
  - 角礫化組織を貫くような衝撃溶融ガラス脈が存在 (右図)
  - ガラス脈の形成年代は~10億年前 [Lindsay+ 2015]
- **レゴリス形成 (すなわち太陽風獲得) は10億年前より過去におきた可能性が高い**

恒星観測に基づく過去の太陽風フラックスの推定値 (~2倍@10億年前) は過大かもしれない



Kapoeta  
[Lindsay+ 2015]

Glass vein



# まとめ

- レゴリス質隕石が記録する過去の太陽風フラックスは、現在のフラックスと同程度
- 恒星観測に基づく過去の太陽風フラックス推定値は過大？
- 太陽風フラックス進化履歴の定量化には隕石が太陽風を獲得した時期の制約が必要

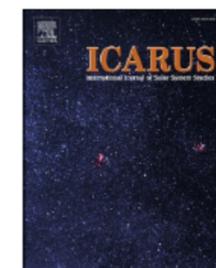
Icarus 389 (2023) 115290



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Icarus

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/icarus](http://www.elsevier.com/locate/icarus)



Past solar wind flux recorded in solar-gas-rich meteorites

Tomoya Obase<sup>a,b,\*</sup>, Daisuke Nakashima<sup>a</sup>

