

第19回惑星圏研究会 (2018/3/1) 講演

月の水 (橋爪 光・茨城大学理学部)

Water on Moon (HASHIZUME, Ko; Ibaraki University, Faculty of Science)

アブストラクト:

Detection of water on Moon's surface is now considered to be a hot topic, both in scientific and practical aspects. Volatile compounds on present Moon's surface could be supplied from several sources, such as solar wind, micrometeorites, lunar rocks through ion-sputtering and/or comets. Part of the volatile compounds supplied to Moon may be liberated to the open space beyond the surface, migrate, and finally be trapped on/in the cold regolith. At the coldest circumstances, the trapped water could be accumulated for years, forming water-rich resources. We are interested in the behaviors of water on Moon's surface.

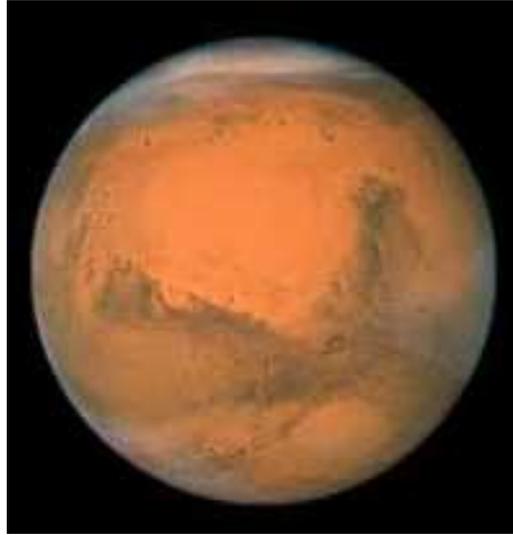
水・有機物（揮発性物質）

- 地産地消型 宇宙資源としての水
- 宇宙生命学解明の鍵としての水
- 水惑星地球の出自解明に向けた水

惑星表面水の寿命



>45億年



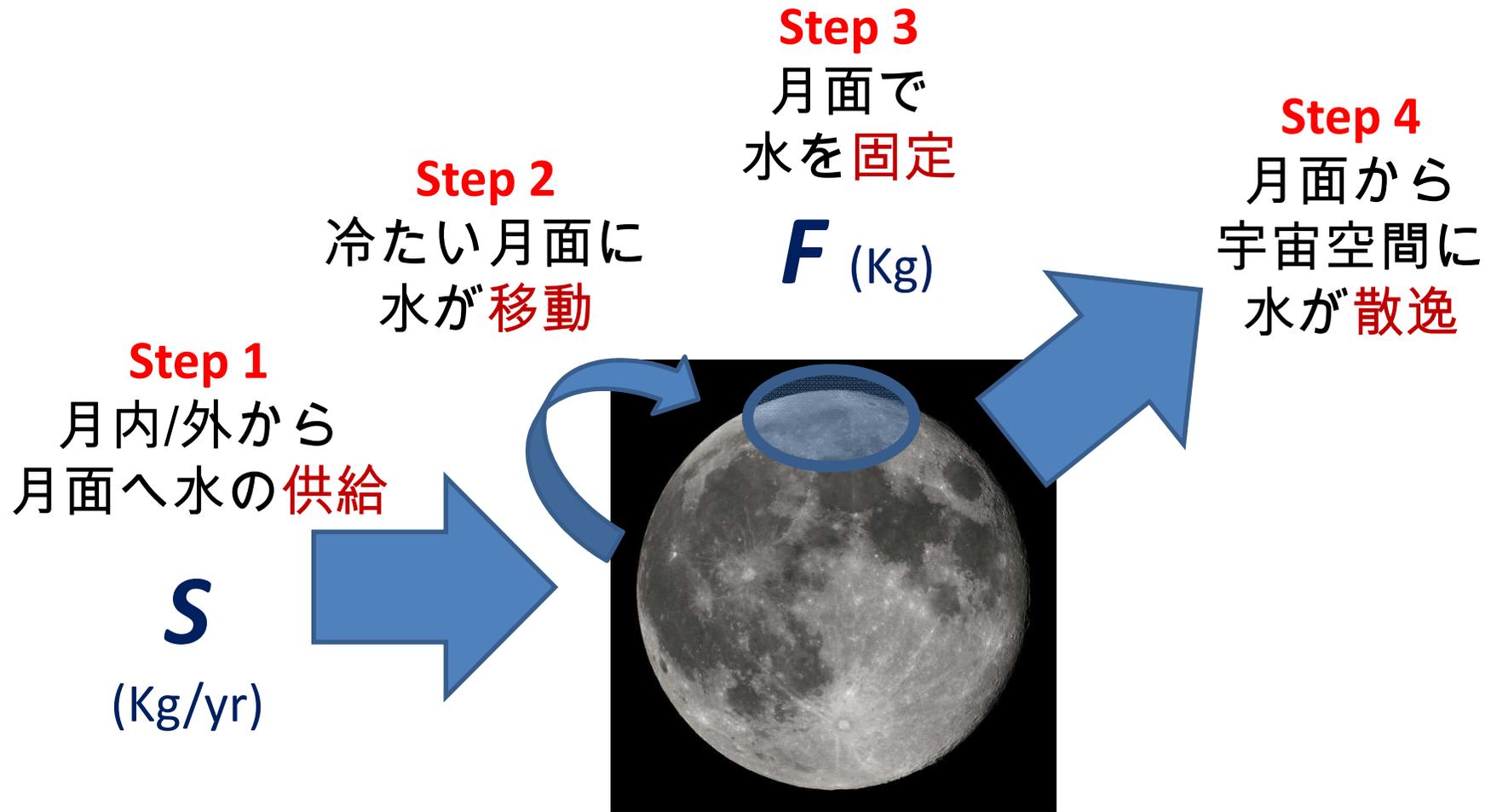
数億年



?年

- 小さな天体の表面水寿命
- それを決めるプロセス

無水ではない月面



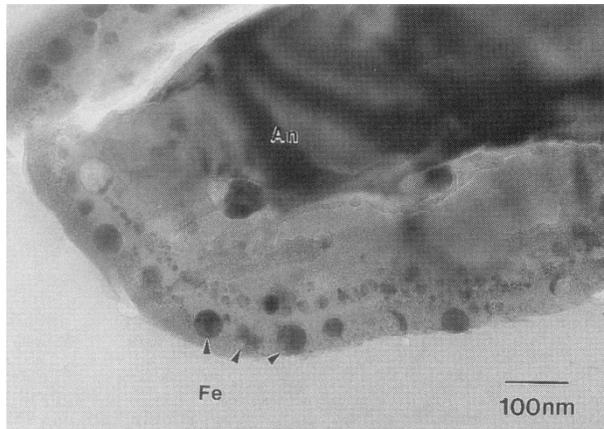
Step 2+3+4: 月の気候学

月の水・起源候補

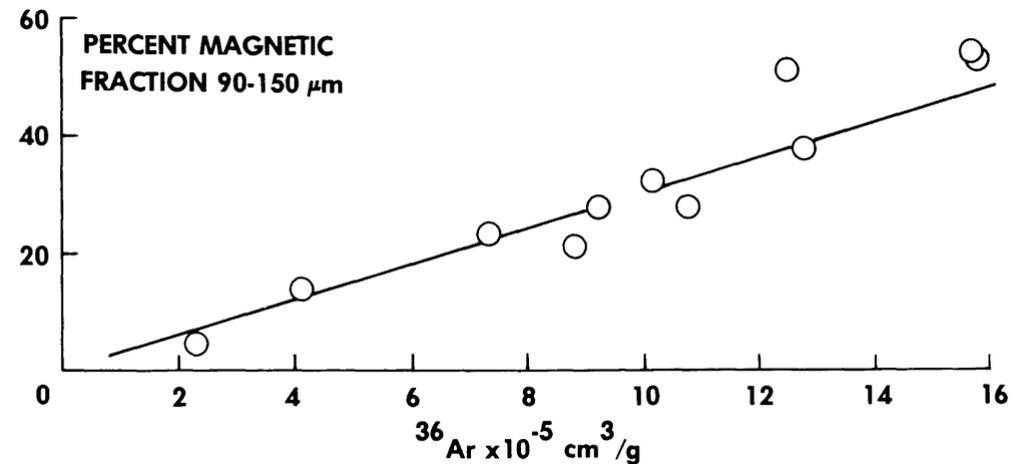
- 太陽風 + 岩石(金属酸化物)
- 隕石(微小隕石)
- 彗星
- 月固有の水(火山ガス)

太陽風と月面岩石から生成される水

- 月面岩石に含まれる酸化鉄の還元



月表土鉱物表面に見られる
数10nm サイズの金属鉄球
(Keller & McKay, 1997)

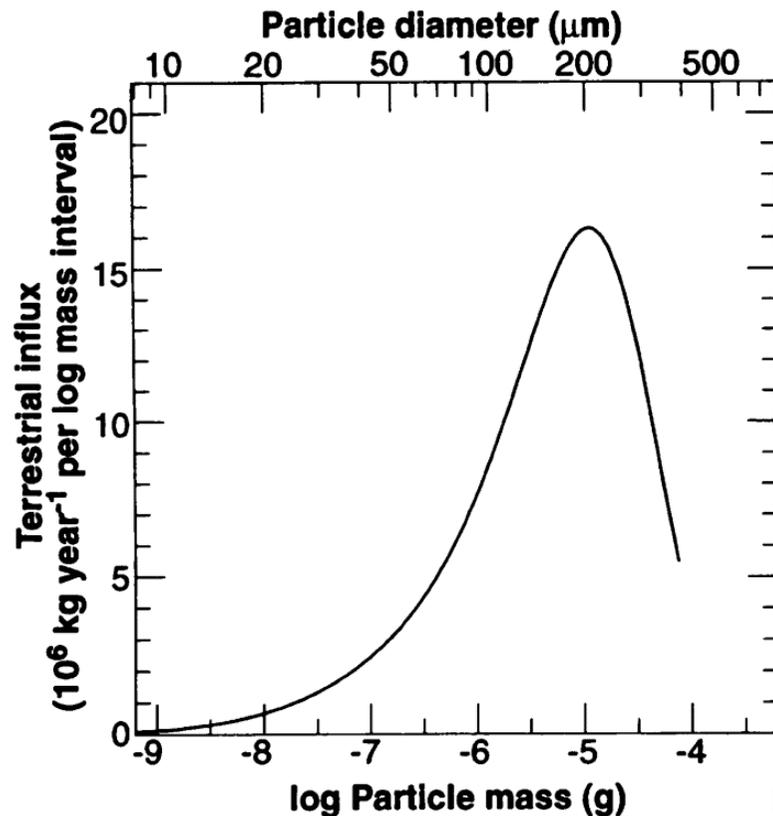


太陽風照射量と比例する**金属鉄生成量**
(Bogard, 1976)

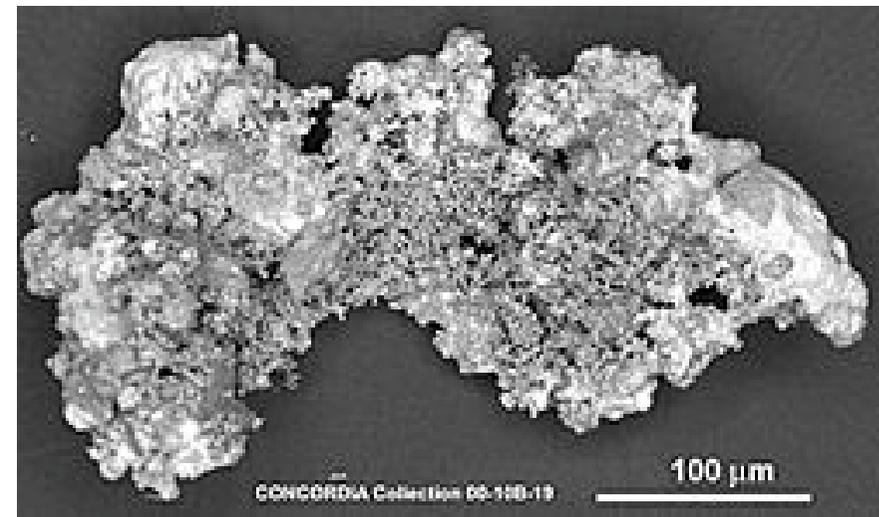
自由酸素の生成率: $[\text{O, atoms}] \approx [\text{H, atoms}] / 300$

Micro-Meteorites (MM)

- 地球に降着する地球外物質の圧倒的な質量割合
(Love & Brownlee, 1997)
- 炭素質コンドライト隕石同様、**揮発性物質に富む**
(e.g., Messenger et al., 2003)



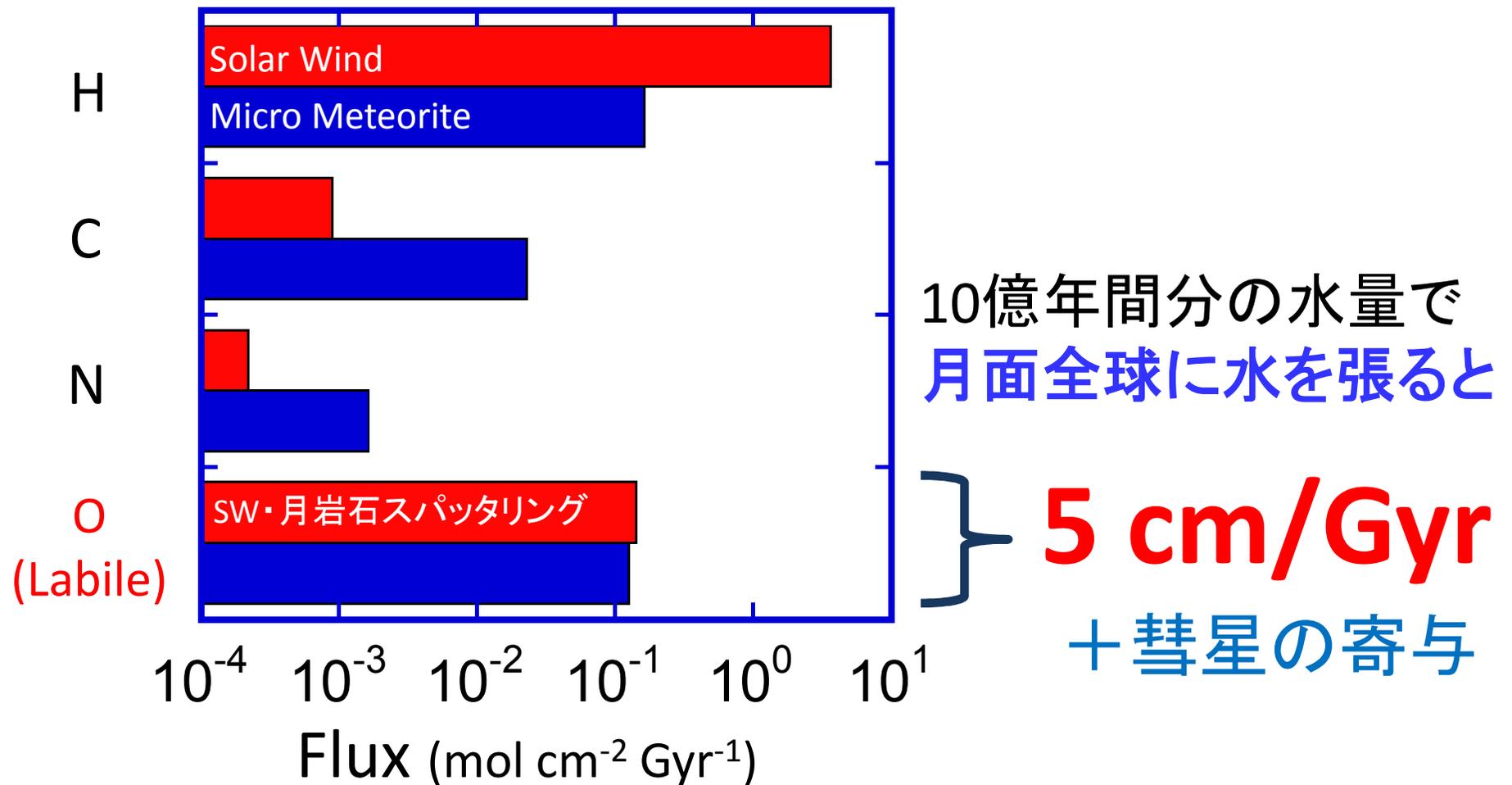
(Love & Brownlee, 1997)



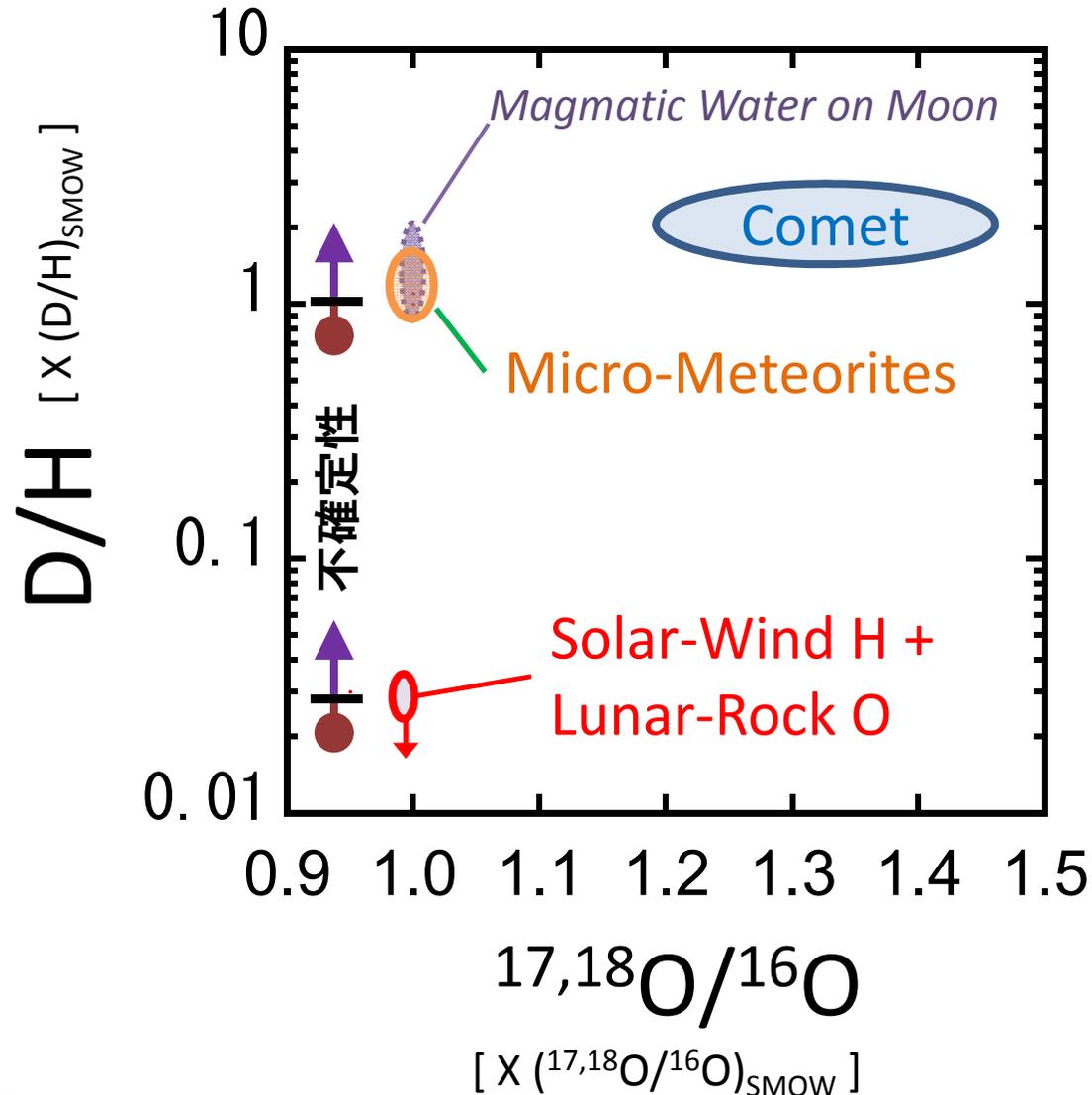
<http://leonid.arc.nasa.gov/leonidnews40.html>

水起源候補の月面総供給・生成量比較

- 現・太陽風フラックス: 2.8×10^8 protons $\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$
- 太陽風による月岩石スパッタリング(還元)レート: 1 atom O / 300 protons
- 地球軌道への微小隕石降着率: $(4 \pm 2) \times 10^{10}$ grams/yr (Love & Brownlee, 1997)



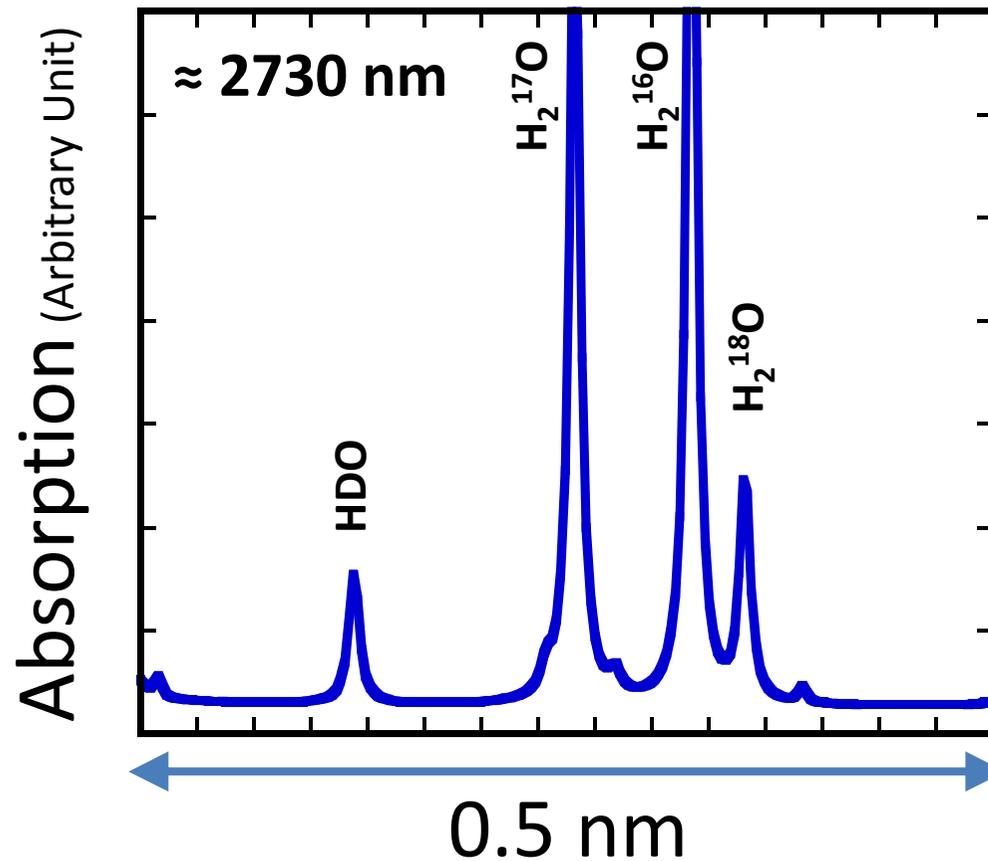
起源毎の水素・酸素同位体組成



SMOW:
地球・標準海水

光学分析法～近赤外光吸収法～

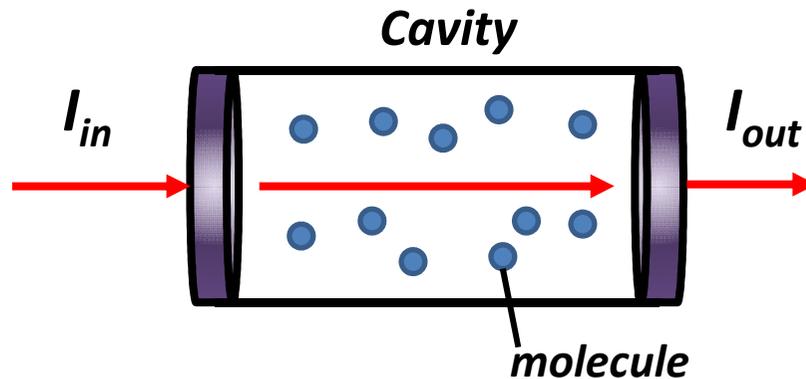
分子の振動・回転準位の遷移に必要なエネルギー(波長)が同位体種ごとに異なることを利用し、**光吸収を測定**



Curiosity に搭載され、火星大気・土壌分析

近赤外光吸収法

CRDS(Cavity Ring-Down Spectroscopy)



$$Abs = -\ln\left(\frac{I_{out}}{I_{in}}\right) = \sigma(\nu)NL$$

$\sigma(\nu)$; 吸光断面積

N ; 単位体積当たりの数密度

L ; 光路長

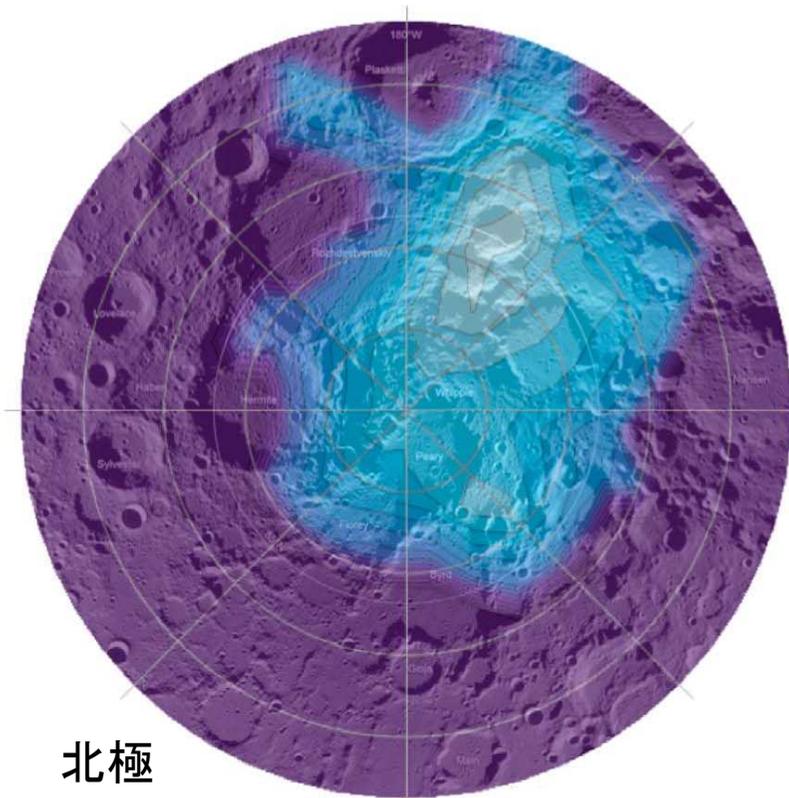
- 高反射率鏡を用いたキャビティで $L = 10 \text{ Km}$ 実現
- 微量水・同位体分析計として技術的に確立済み
- 小型・軽量化が容易

(Simulation) 月極域・表土中の水

月面への水の供給率: **5 cm/Gyr**

- 月面全域に**供給**された水(2百万年分)
0.01 cm 全月面に均等に張った水深
- 極域(表面積**1%**=緯度 $>82^\circ$)に水が**移動**
1 cm 極域に均等に張った水深
- 冷たい表土中(**1m**厚)に水を**捕獲**
0.5 wt% 極域表土中の平均濃度

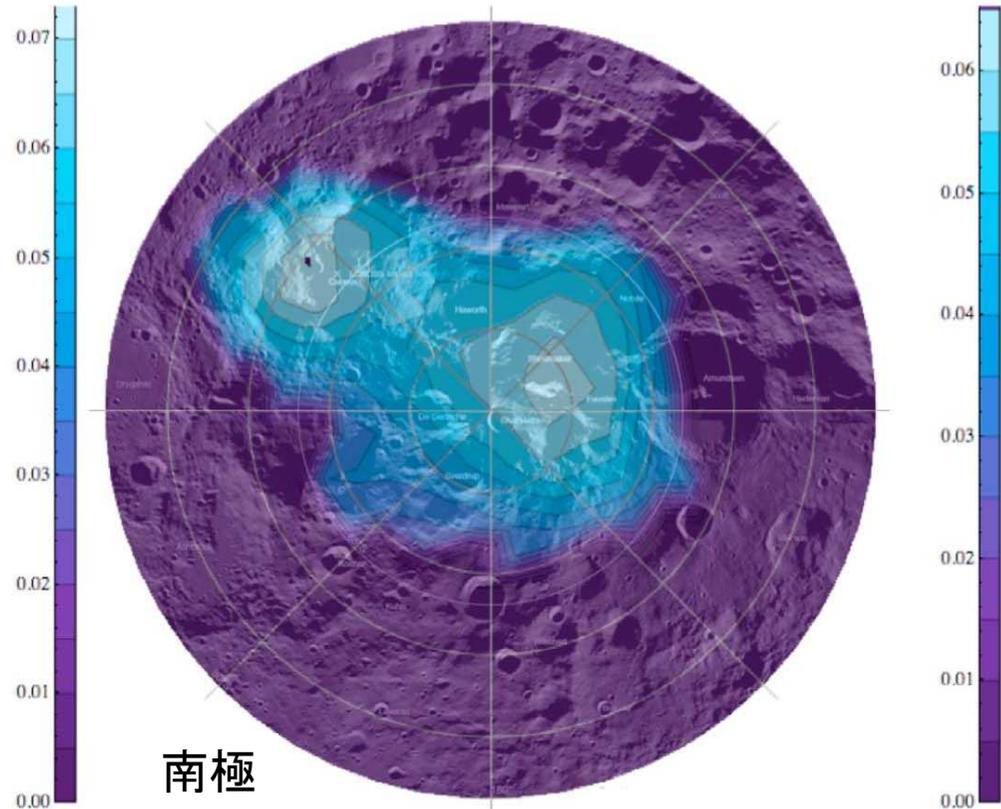
月極域で広範に見られた水素濃集 -中性子分光法-



北極

(緯度80° 以上)

WEH enhancement = $([H] - [H]_0) \times 9$
[H]₀: average non-polar level (0.045% WEH)



南極

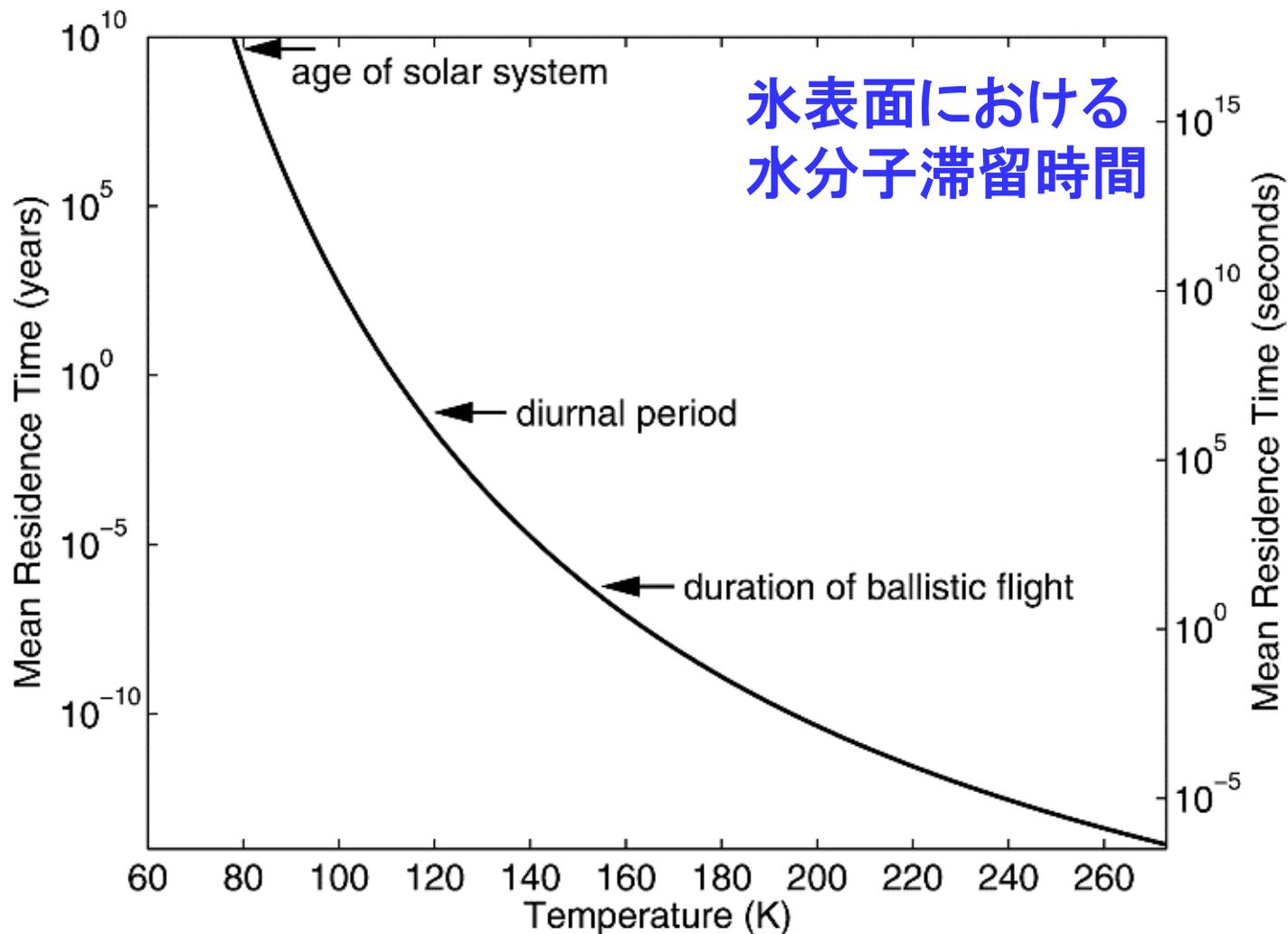
(緯度80° 以上)

Epithermal neutron (Resol: 400 m/pixel)

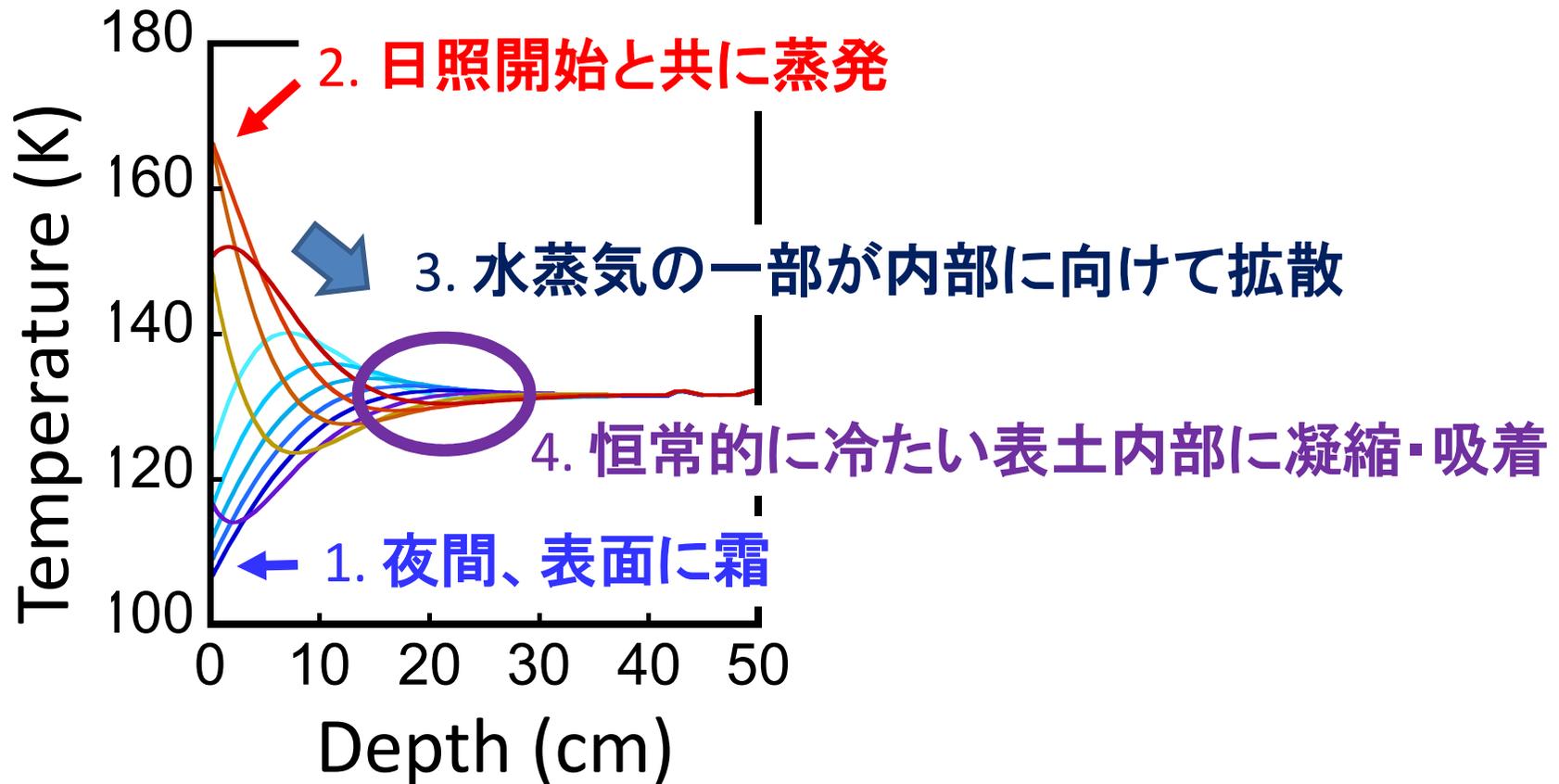
Miller et al., 2012

WEH \approx 0.1-0.5 wt% (Sanin et al., 2017)

120K以下において、月の一日の間、
80K以下において、月形成以来、氷は昇華しない



恒常的に冷たい月面内部における水

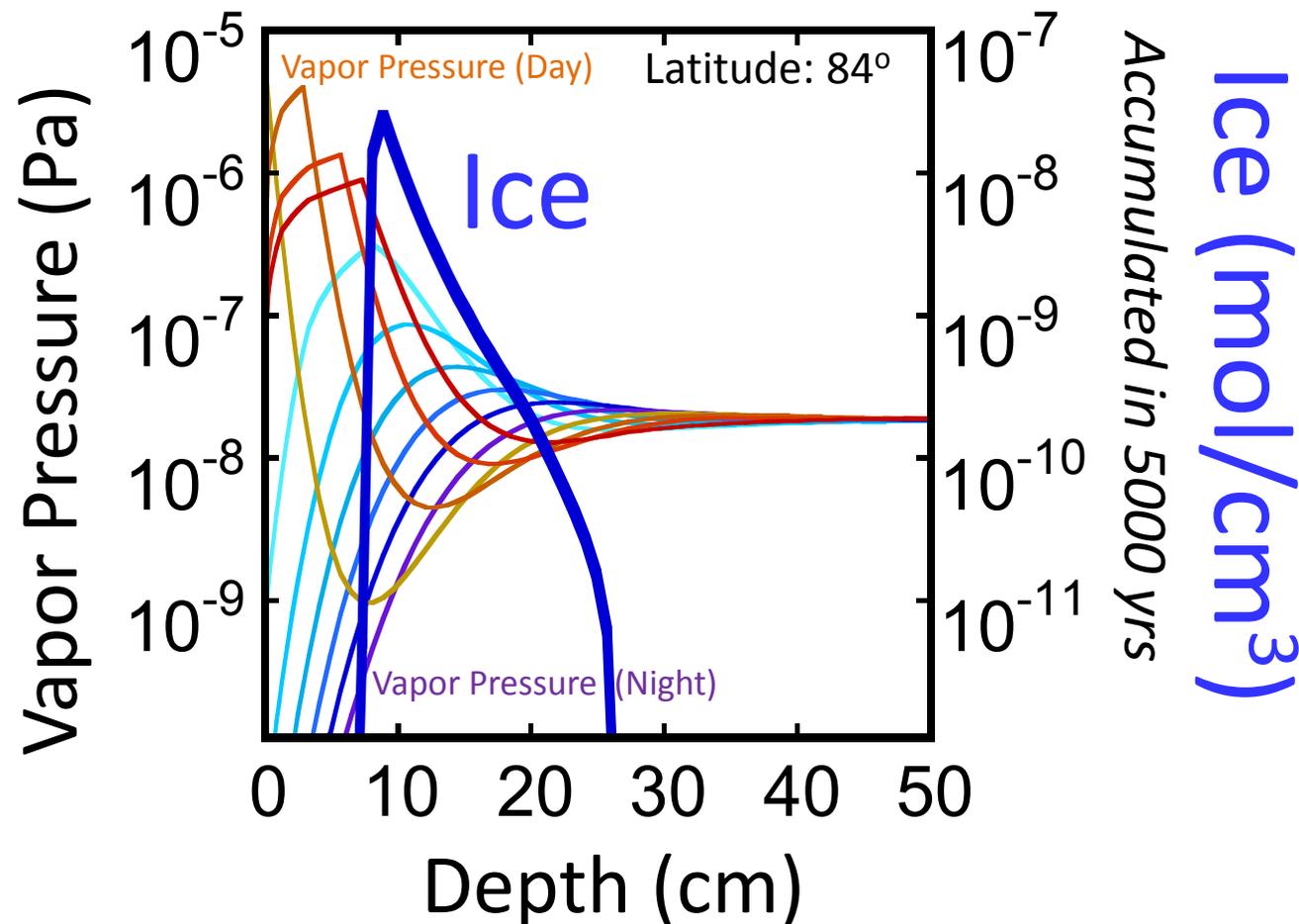


曲線: 昼間・夜間の表土内部の温度分布

私たちの予想:

月極域表土中深度数十cmに存在する含水層

(Pumping Effect: Schorghofer & Taylor, JGR, 2007)



月の水・起源候補

- 太陽風 + 岩石(金属酸化物)
- 隕石(微小隕石)
- 彗星
- 月固有の水(火山ガス)

2008年以後続々と報告された月固有の水

Glass beads (Volcanic Glasses)

Saal et al., *Nature*, 2008

月マグマが地上に噴出・急冷

Melt inclusions (in nominally anhydrous minerals)

Hauri et al., *Science*, 2011

Saal et al., *Science*, 2013

火成岩に閉じ込められたマグマ

Apatite $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$

Boyce et al., *Nature*, 2010

McCubbin et al., *PNAS*, 2010

Greenwood et al., *Nature Geoscience*, 2011

Barnes et al., *EPSL*, 2014

水を構造中に含む火成鉱物

Plagioclase

Hui et al., *Nature Geoscience*, 2013

月・最初期の地殻構成鉱物

Remote Sensing

Klima et al., *Nature Geoscience*, 2013

Milliken & Li., *Nature Geoscience*, 2017

地表に露出した深成岩

Reviews:

Robinson & Taylors, *Nature Geoscience*, 2014

Hauri et al., *EPSL*, 2015

Anand et al., *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2015



地球の水、月の固有水

水惑星・地球の出自を知る天体、月

Apatite: $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$

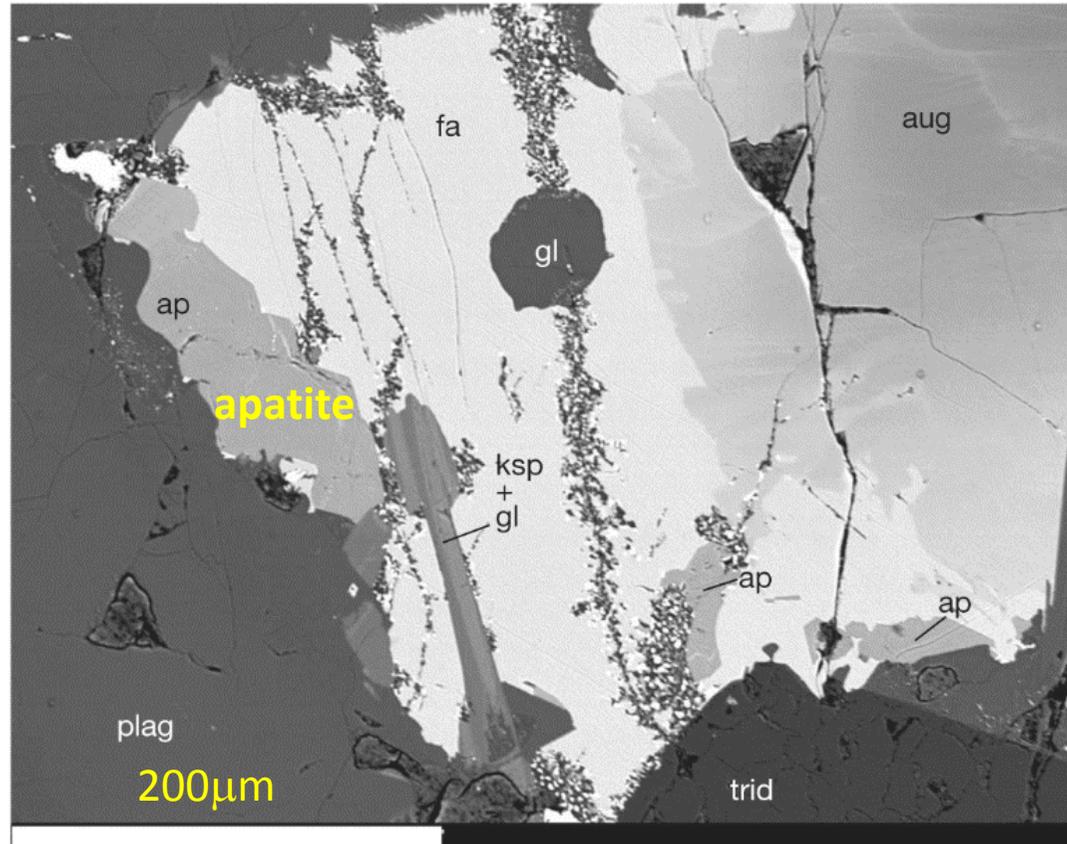


Figure 1 | Backscattered electron image of the area in rock section (14053,241) analysed in this study. Scale bar is 200 μm. Minerals are labelled as: ap (apatite), fa (fayalite), gl (glass), aug (augite), trid (tridymite), ksp (K-feldspar) and plag (plagioclase).

まとめ

- 水 - 宇宙生命学解明の鍵
 - 月面水から制約する水惑星成立条件の下限
 - 月内部水から解明する水惑星・地球の出自
- 月面水理解の現状
 - 月面水は複数の月外・月内起源を持つ可能性
 - 極域広範に、少なくとも 0.1-0.5wt% の水濃度
 - 月岩石圏に含まれる水の発見
- 今後求められる取り組み
 - 月面水総合理解に向けた月の気候学
 - 月マントル中の全岩水濃度推定