

小惑星衝突による破壊と創造 (ガス銃を用いた衝突模擬実験)

静岡大学 創造科学技術大学院 (理学部・物理学科)
三重野 哲 (Tetsu Mieno)

目標：社会に役立つ科学技術の研究成果を出す。
* 応用物理の実験研究

数学科・**物理学科**・化学科・生物科学科・地球科学科

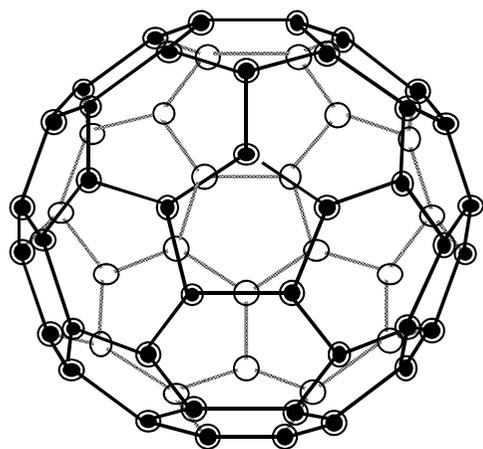
講演内容：

- 1：アーク放電を用いた炭素クラスター合成実験から、ガス銃を用いた衝突実験へ。
- 2：タイタン衛星への小惑星衝突による有機物・アミノ酸合成（ガス銃を用いた模擬実験）。
- 3：地球以外に生物がいるか？
- 4：地球における生命の始まりは？宇宙・第2のオアシスへ

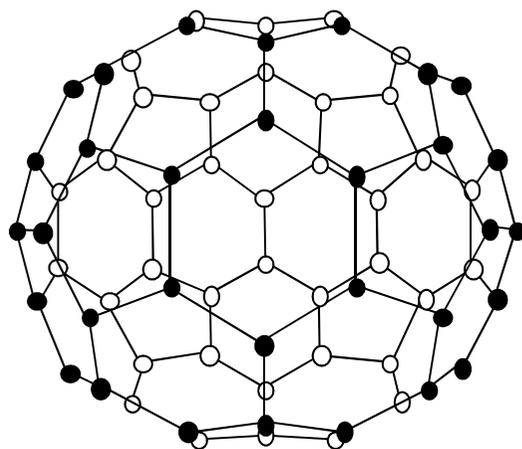
伝えたいこと：

- 1：過去から未来へ、人類の得てきた科学知識は素晴らしい。（特にこの200年間）。
- 2：科学技術の問題解決が重要！
- 3：出席の方々からの意見交換よろしく！！

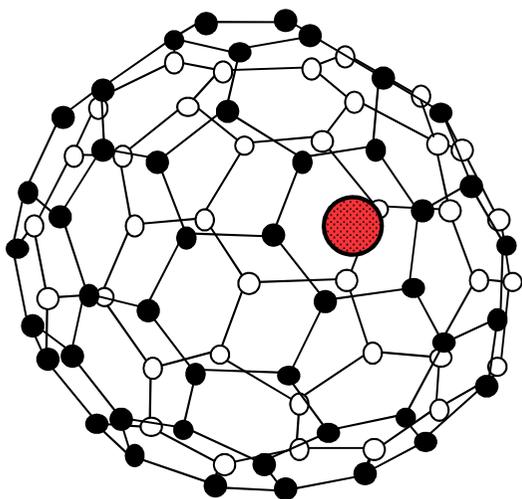
1-1 : アーク放電によるフラーレン、 ナノチューブの合成実験



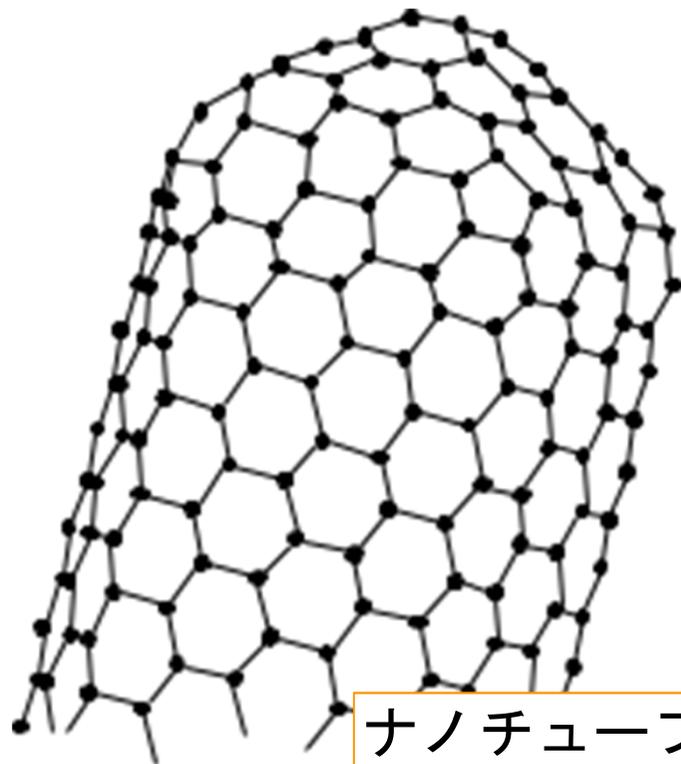
サッカーボール型分子 C₆₀



C₇₀



金属入りフラーレン LaC₈₂



ナノチューブ



サセックス大学のKroto博士
(1996年、ノーベル化学賞)

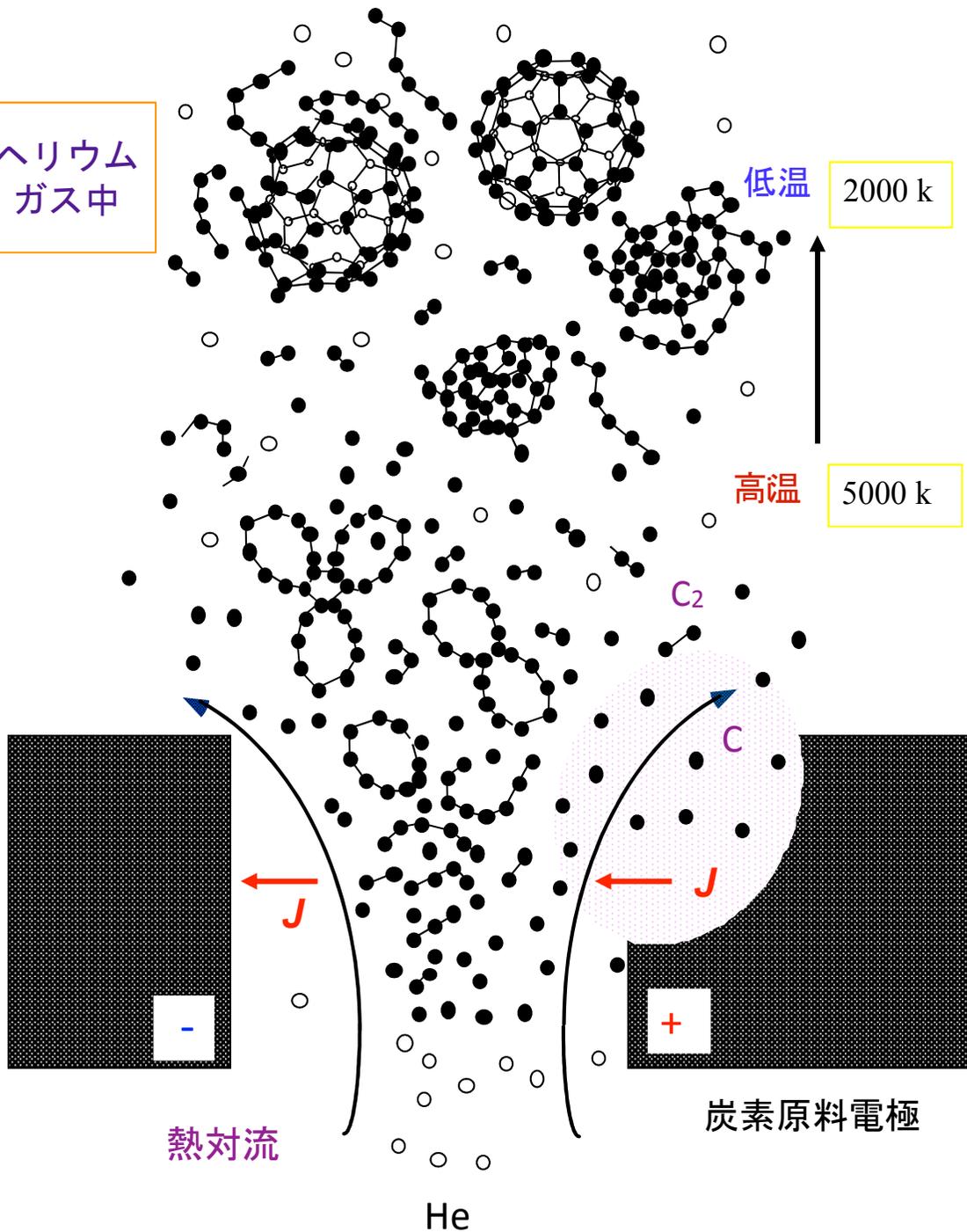


NECの飯島博士

参考書：究極のシンメトリー
(白楊社)

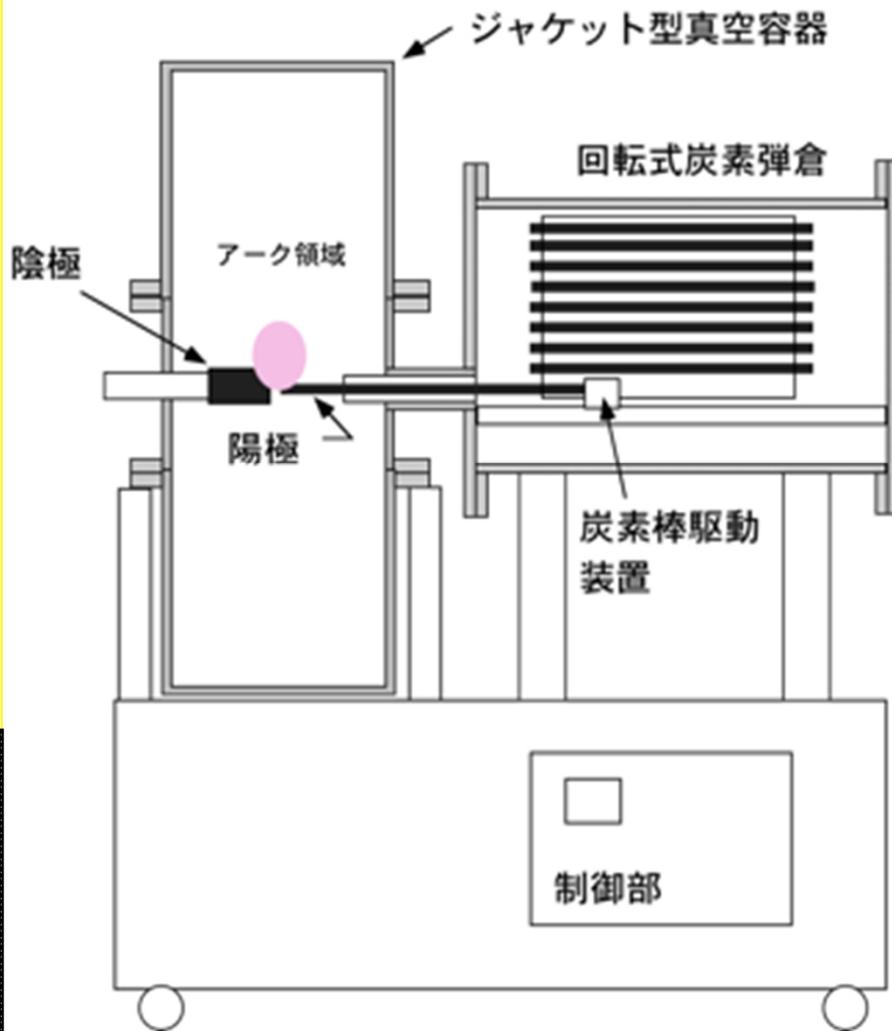
フラーレンの合成過程

ヘリウム
ガス中



開発したアーク放電合成装置

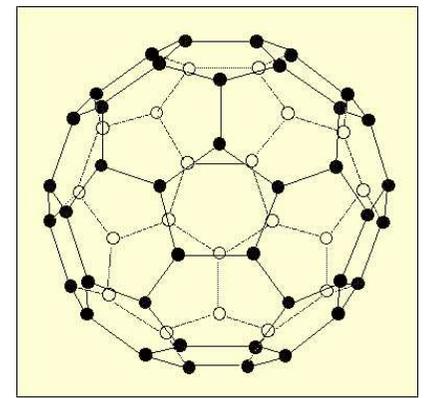
炭素クラスター連続合成装置 RIT-FP



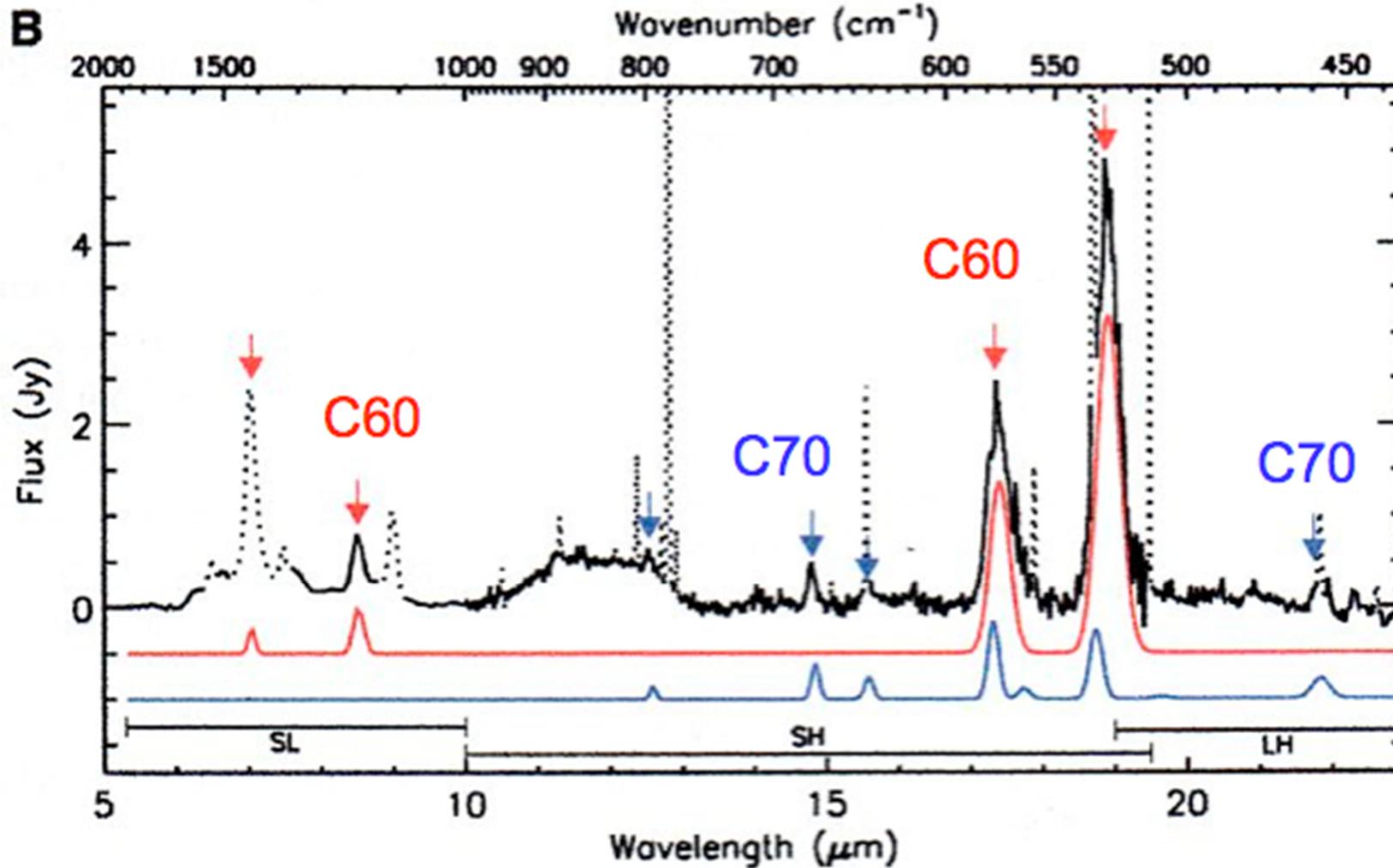
ガスアークにおいて、炭素原子が陽極から昇華して高温気相中で合成を起こす様子。

宇宙で観測されたフラレン

小惑星衝突でフラレンができる! ?

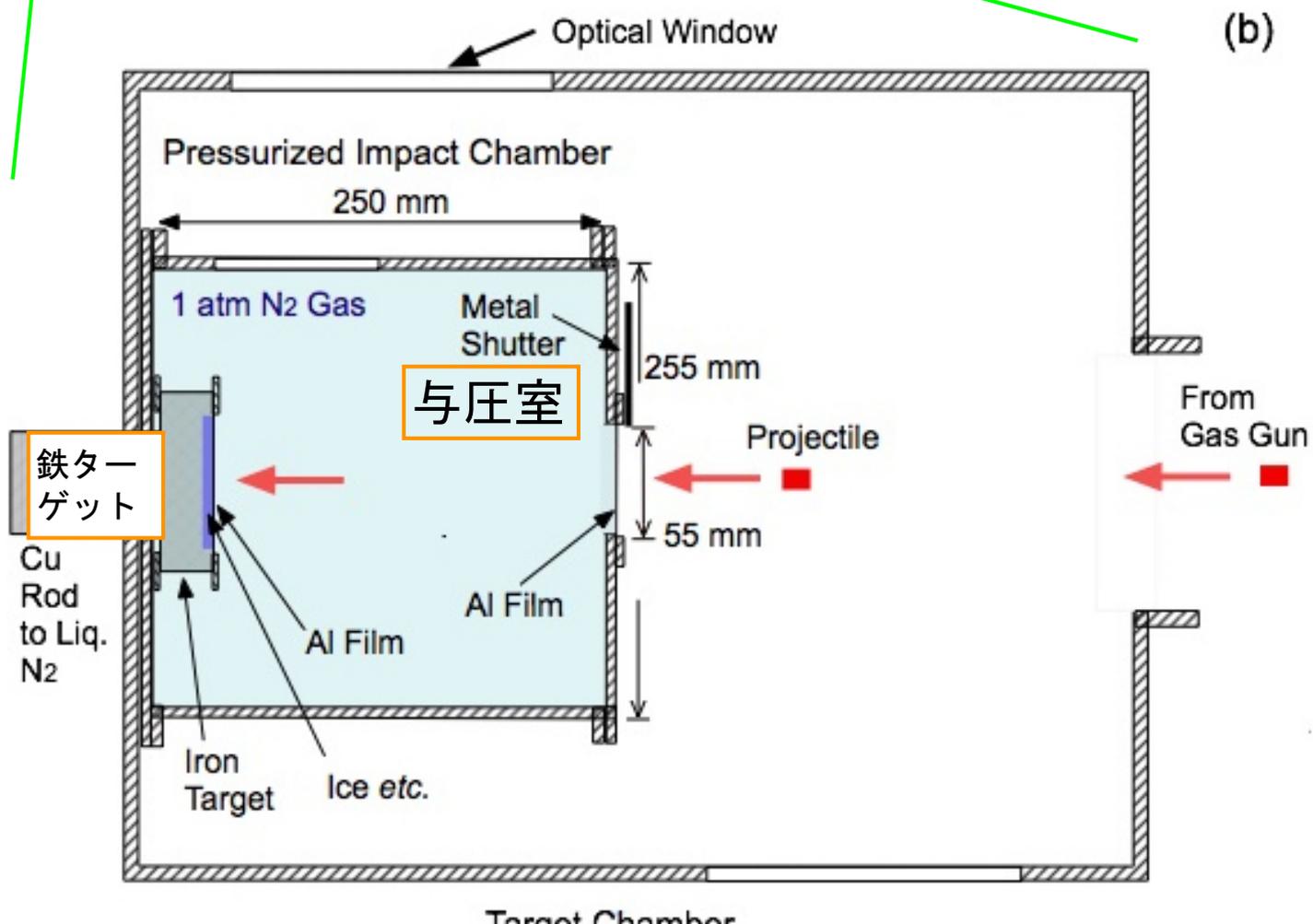
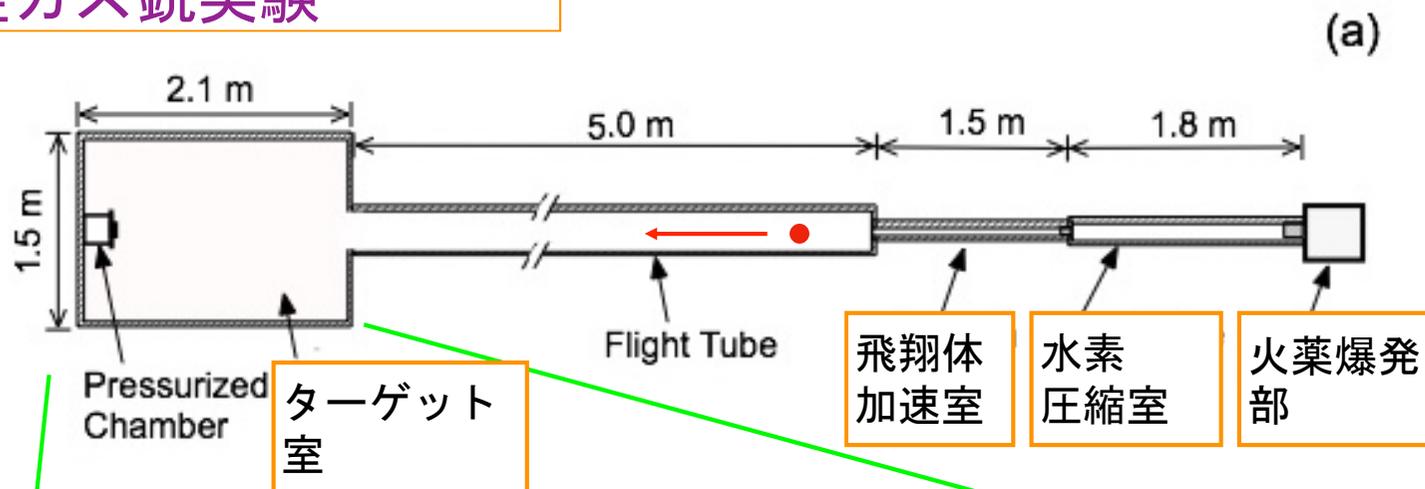


C60分子



*惑星状星雲中で観測された赤外線スペクトル。By J. Cami et al.: Science 329 (2010)1180.

1-2 : 2 段式軽ガス銃実験



JAXA 宇宙科学研究
所（相模原）・
2 段式軽ガス銃

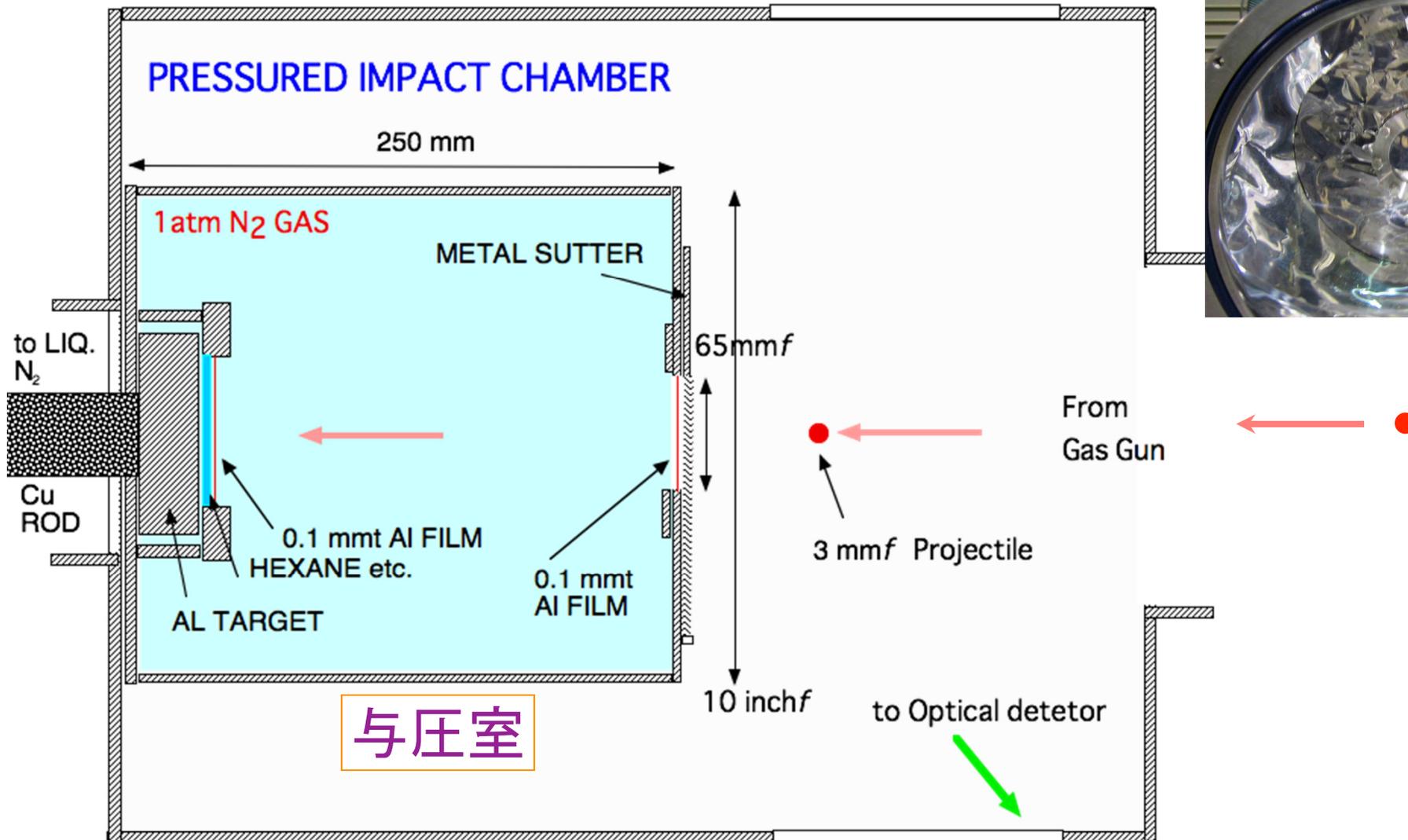


飛翔体
加速室

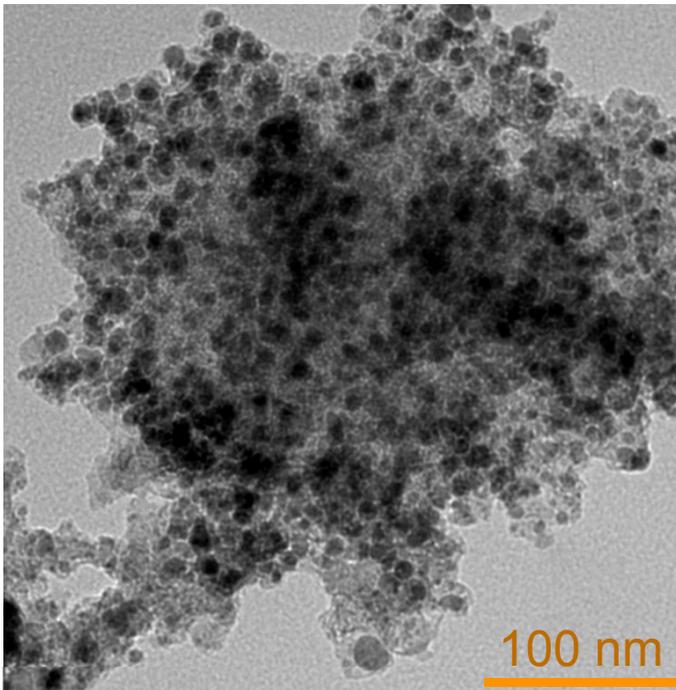
ターゲット室



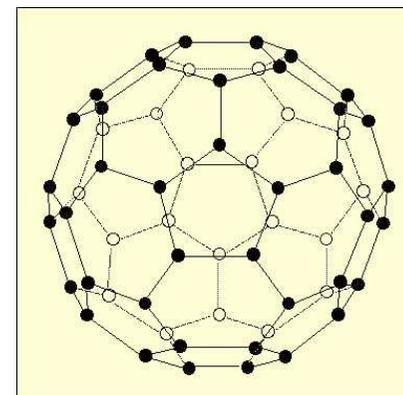
ターゲット室内、与圧室の様子。
(1気圧の窒素を充填)



合成された炭素すすと フラーレン分析

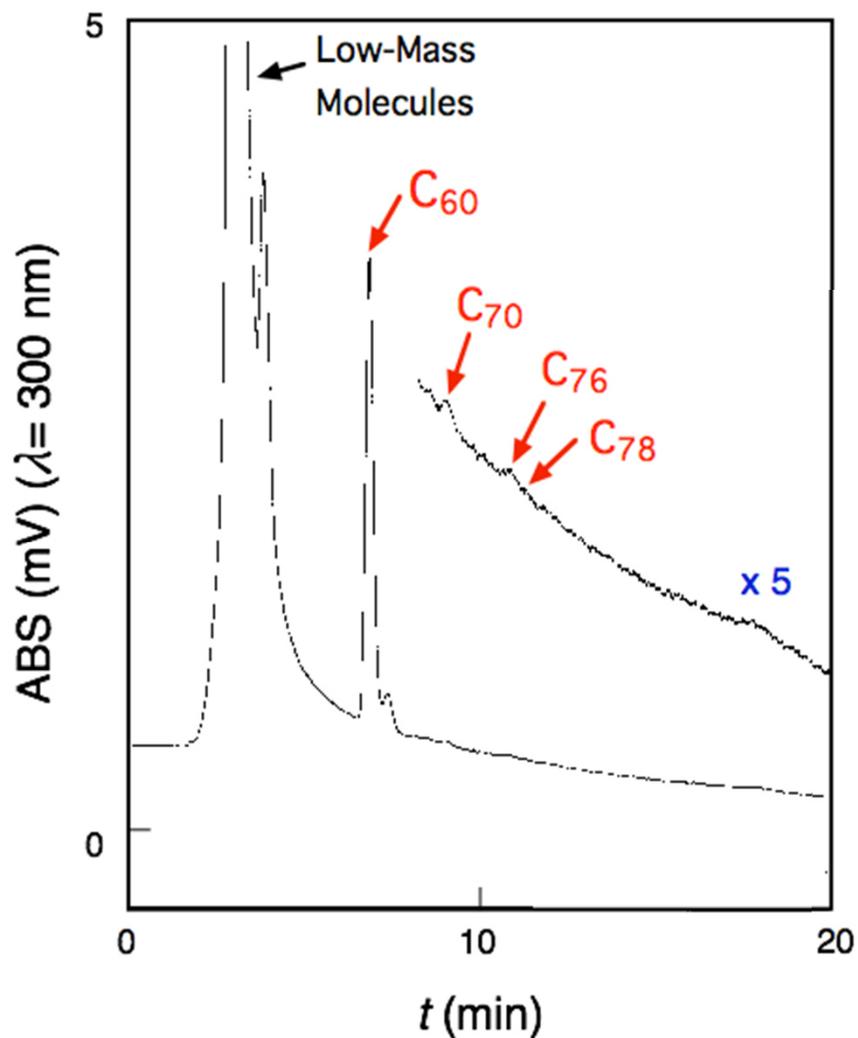


電子顕微鏡画像

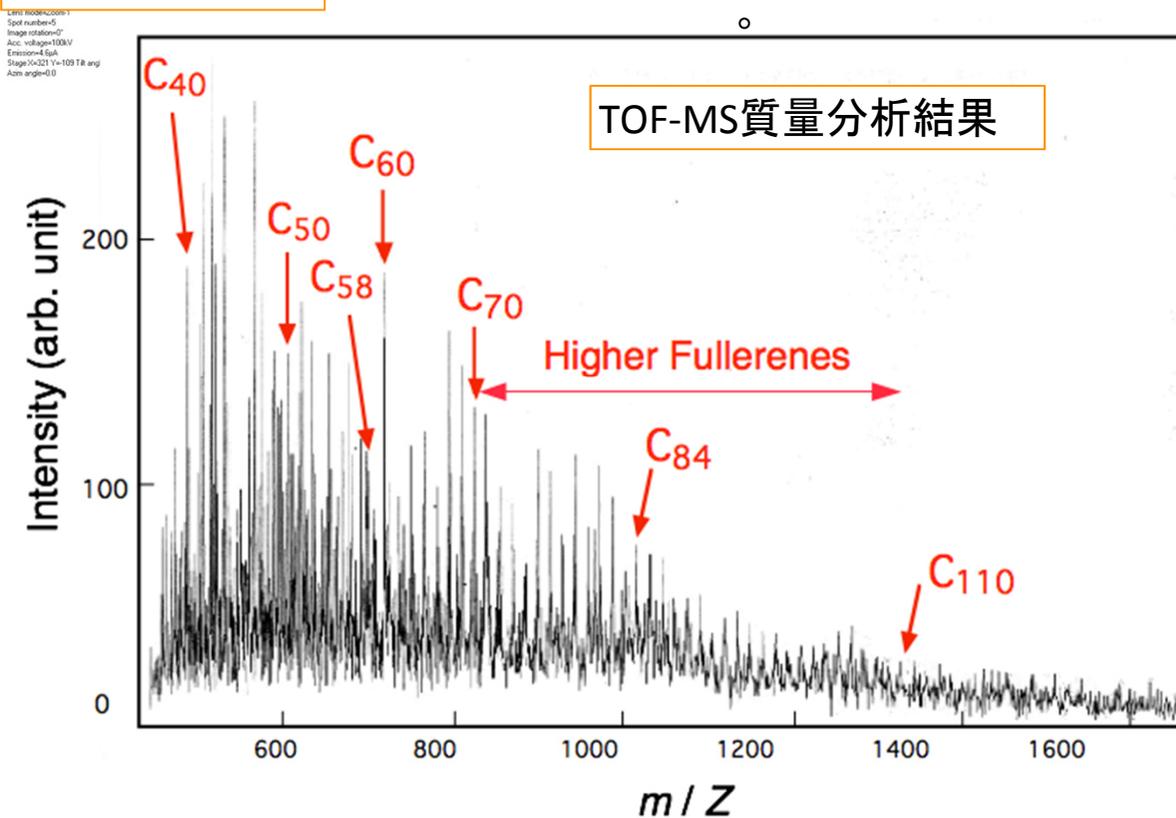


C60分子の形状

ポリカーボネート弾
→
鉄ターゲット (20°C)

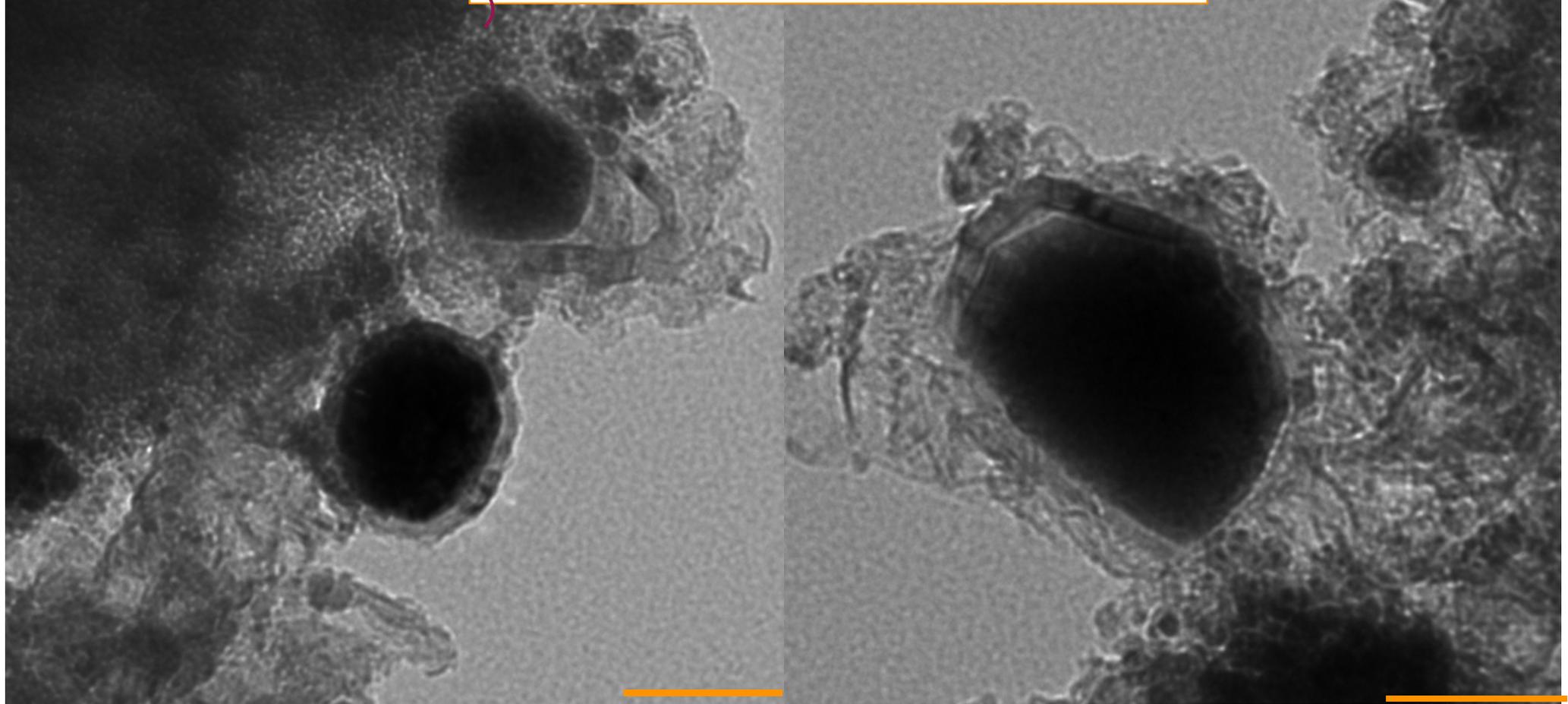


液体クロマトグラフ分析結果



TOF-MS質量分析結果

鉄内包炭素カプセル（電子顕微鏡写真）



File name=100524-A1-0005.tif
Image date=2010/09/24 13:17:26
Image number=579
Image comment=Hitachi TEM system.
Calibration=1.750 nm/pixel at x 10.0k
Magnification=x70.0k
Lens mode=Zoom-1
Spot number=5
Image rotation=0°
Acc. voltage=100kV
Emission=10.2µA
Stage X=-32 Y=204 Tilt angle=0.3
Azim angle=0.0

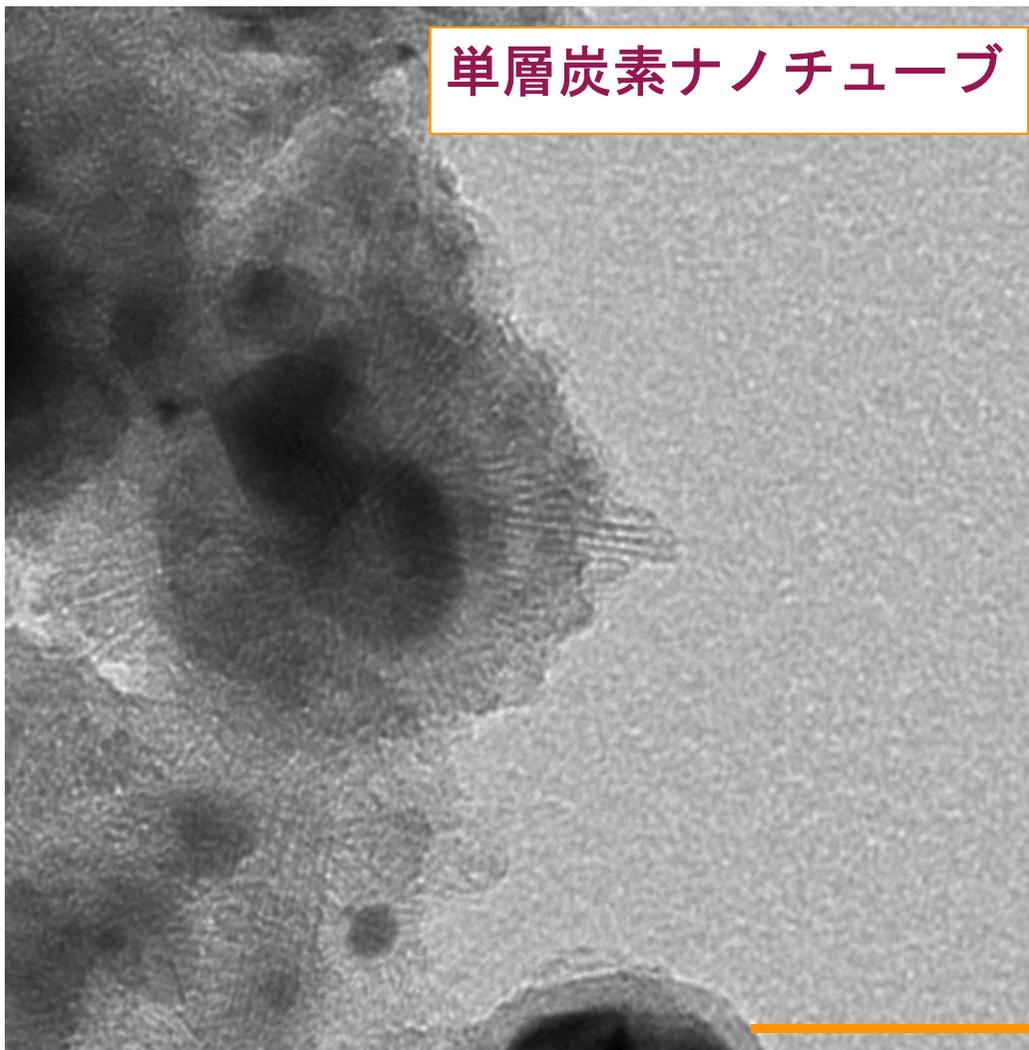
50 nm

File name=100524-A1-0009.tif
Image date=2010/09/24 13:32:12
Image number=603
Image comment=Hitachi TEM system.
Calibration=1.750 nm/pixel at x 10.0k
Magnification=x70.0k
Lens mode=Zoom-1
Spot number=5
Image rotation=0°
Acc. voltage=100kV
Emission=10.2µA
Stage X=-79 Y=223 Tilt angle=0.3
Azim angle=0.0

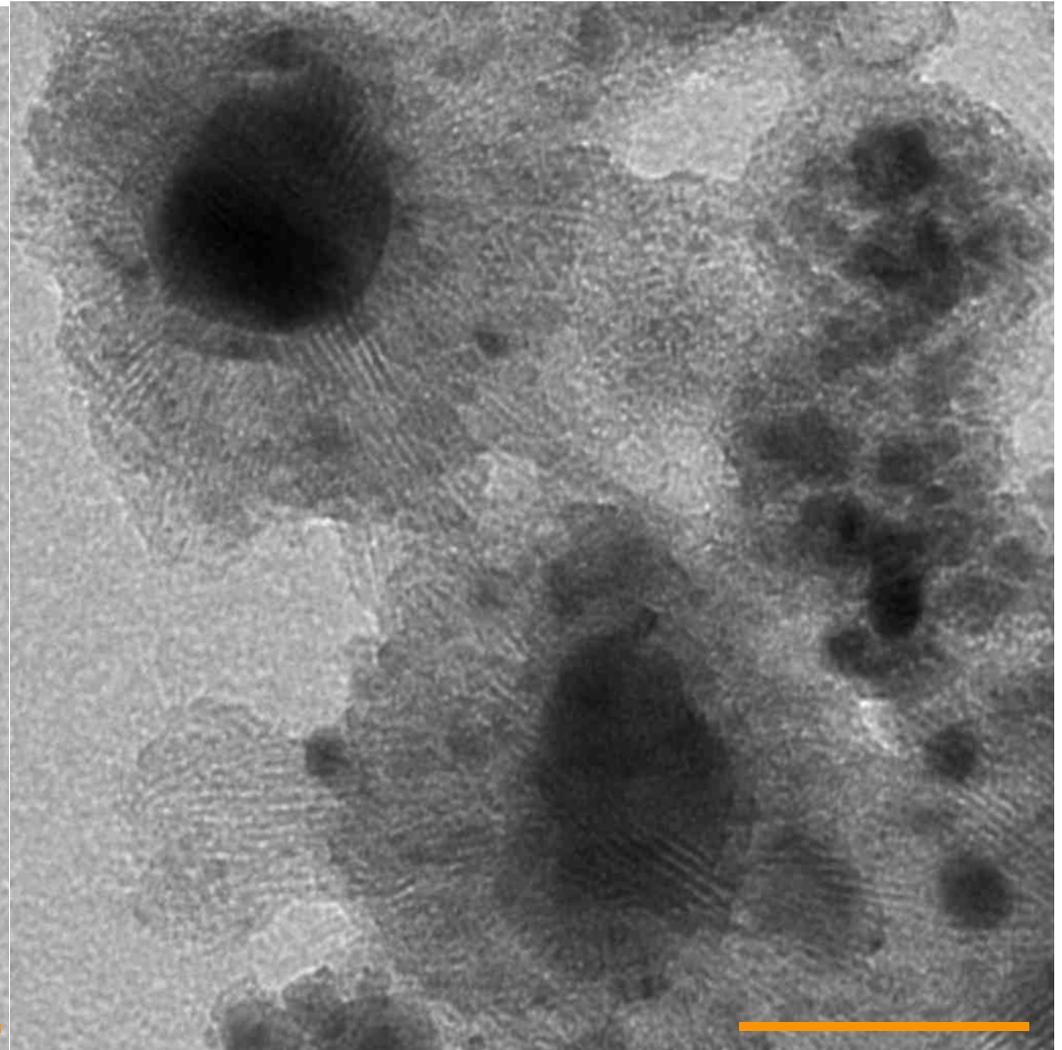
50 nm

ポリカーボネート弾→鉄ターゲット。常温。

単層炭素ナノチューブ



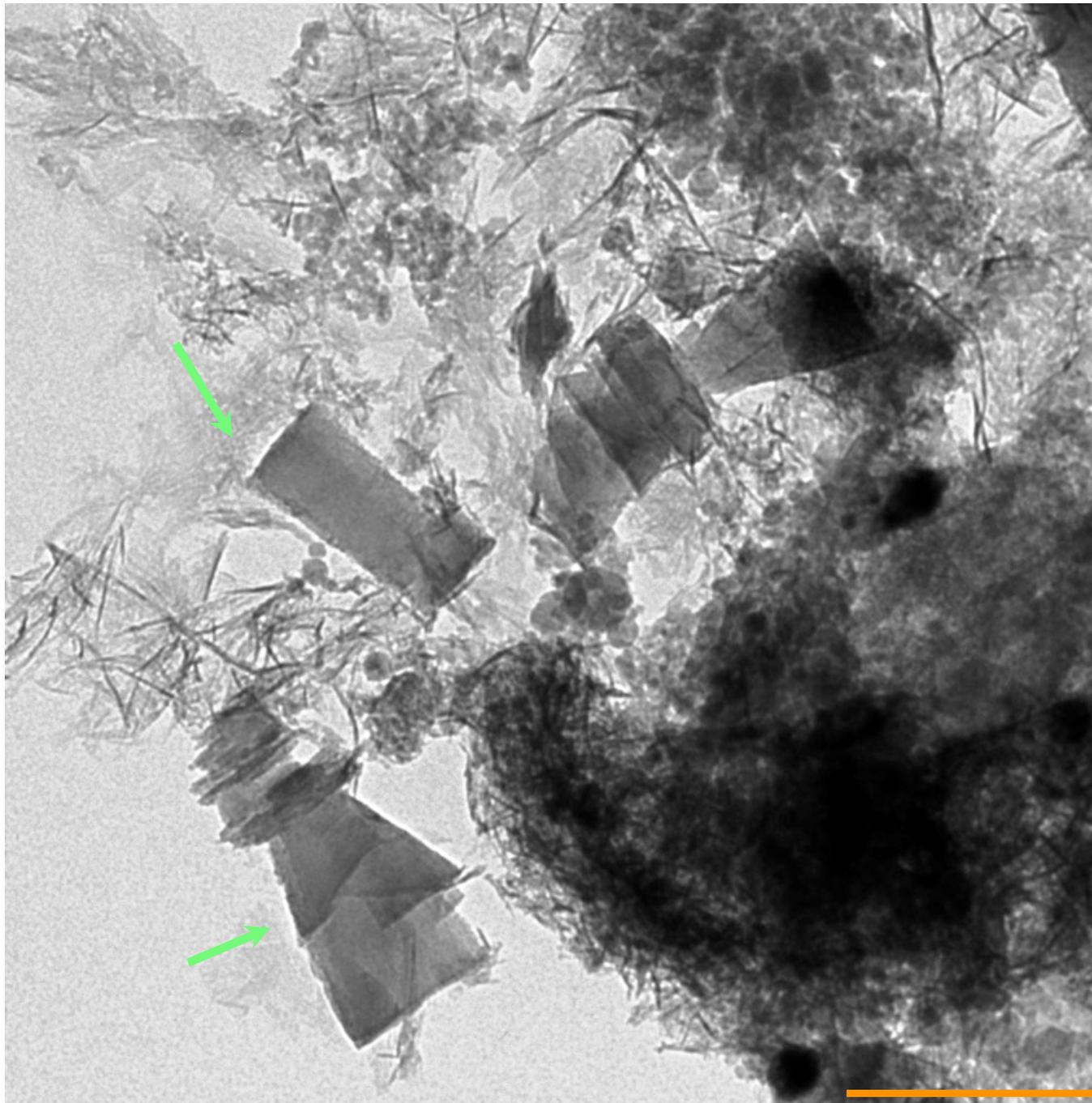
File name=09112864-A-1-0004.tif
Image date=2010/02/24 13:37:08
Image number=409
Image comment=HiTachi TEM system.
Calibration=1.750 nm/pixel at x 10.0k
Magnification=x100k
Lens mode=Zoom-1
Spot number=5
Image rotation=0°
Acc. voltage=100kV
Emission=3.0uA
Stage X=79 Y=134 Tilt angle=0.0
Azim angle=0.0



File name=09112864-A-1-0005.tif
Image date=2010/02/24 13:38:49
Image number=410
Image comment=HiTachi TEM system.
Calibration=1.750 nm/pixel at x 10.0k
Magnification=x100k
Lens mode=Zoom-1
Spot number=5
Image rotation=0°
Acc. voltage=100kV
Emission=3.0uA
Stage X=80 Y=133 Tilt angle=0.0
Azim angle=0.0

ナノチューブの直径は約 2 nm。ポリカーボネート弾 → アルミターゲット。 $T \sim -62$ °C。

ポリマーシート

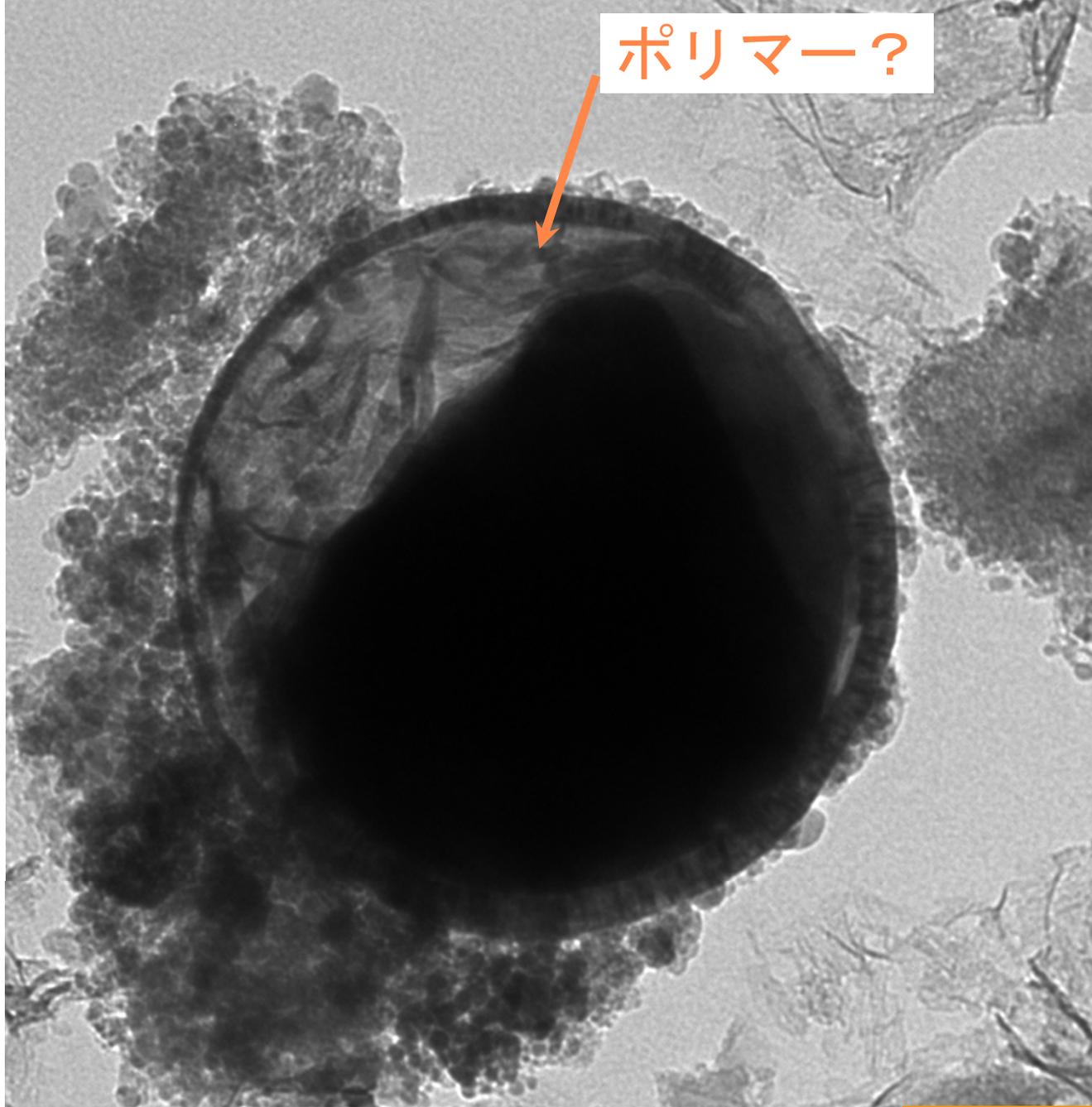


File name=2323-E-0004.tif
Image date=2011/11/15 13:35:19
Image number=237
Image comment=Hitachi TEM system.
Calibration=1.750 nm/pixel at x10.0k
Magnification=x20.0k
Lens mode=Zoom-1
Spot number=5
Image rotation=0°
Acc. voltage=100kV
Emission=9.2μA

200 nm

ポリカーボネート弾→氷+鉄
ターゲット。 $T \sim -60^\circ\text{C}$ 。

ポリマー？



File name=2323-C-0004.tif
Image date=2011/11/15 13:12:52
Image number=231
Image comment=Hitachi TEM system.
Calibration=1.750 nm/pixel at x10.0k
Magnification=x30.0k
Lens mode=Zoom-1
Spot number=5
Image rotation=0°
Acc. voltage=100kV
Emission=3.0µA
Stage X=-15 Y=600 Tilt angle=0.0
Azim angle=0.0

100 nm

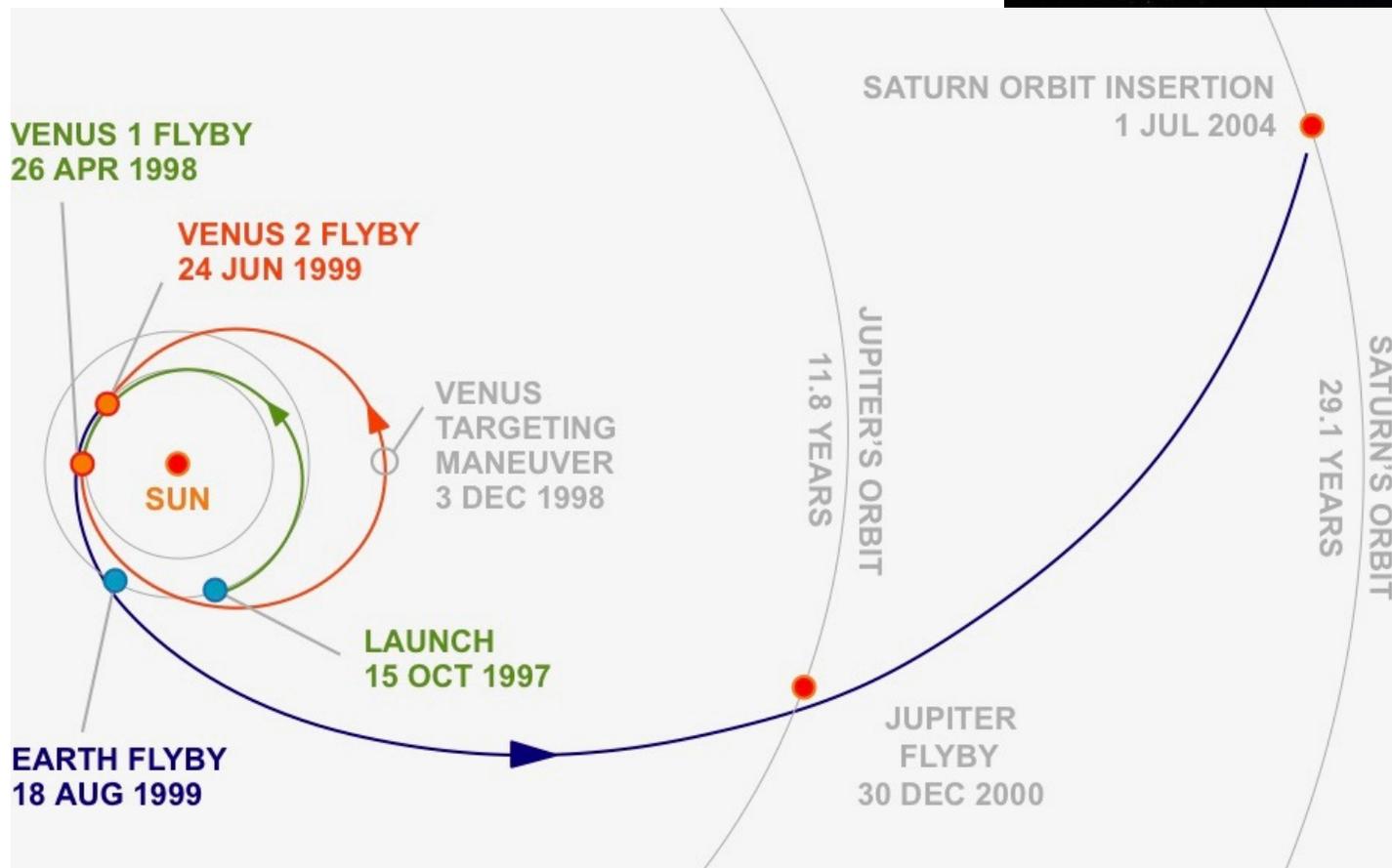
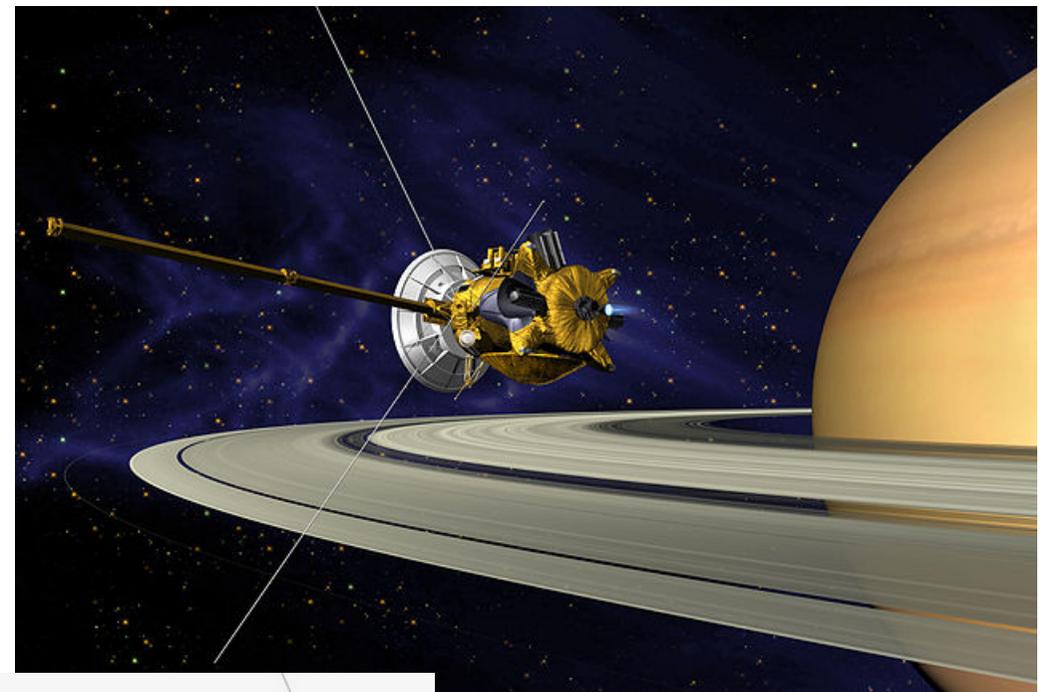
金属とポリマーが炭素カプセルに閉じ込められている？

ポリカーボネート弾→
氷＋鉄ターゲット。
 $T \sim -60^{\circ}\text{C}$ 。

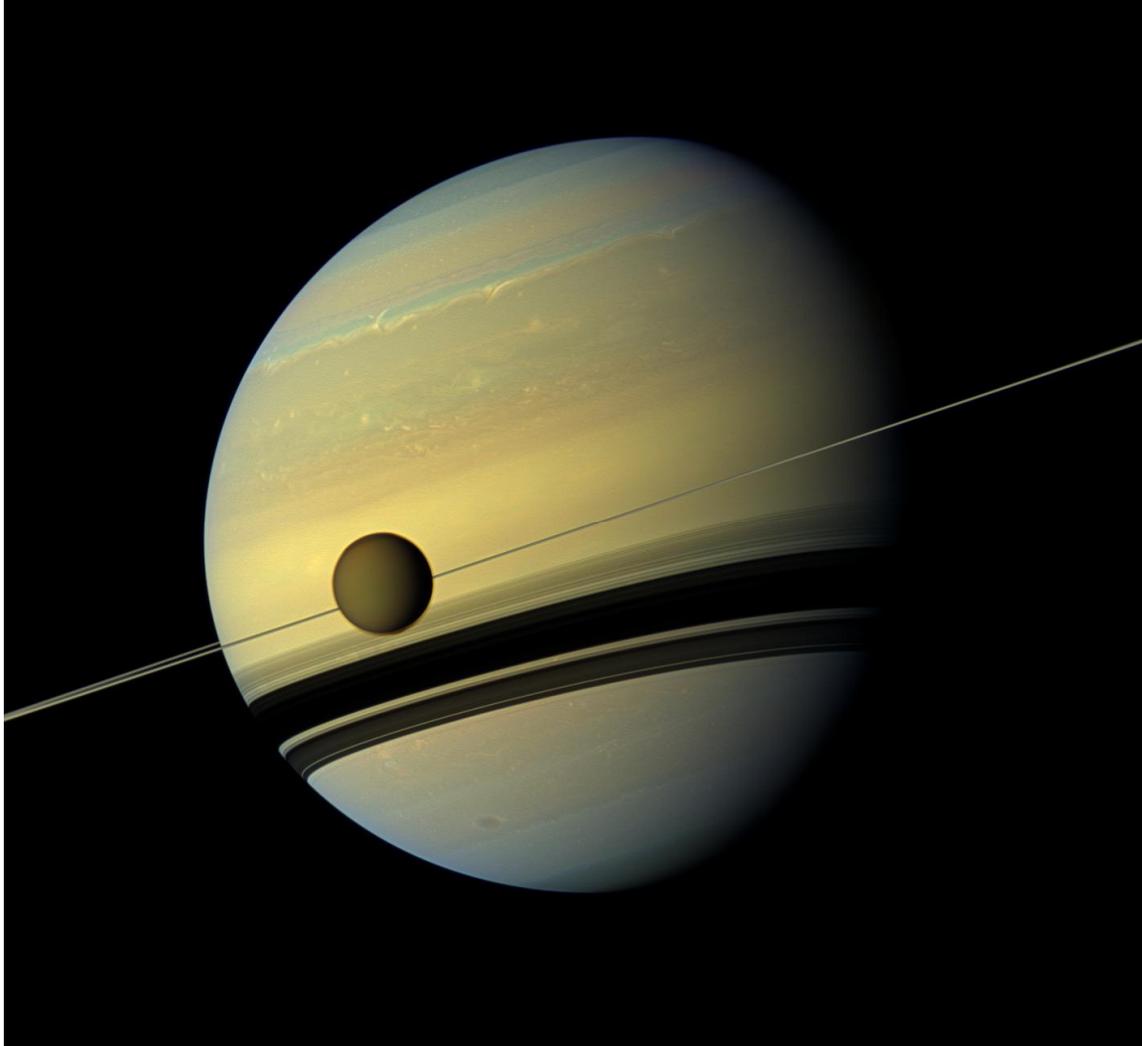
2-1 : タイタン衛星

カッシーニ探査機による土星探査
1997年打ち上げ、2004年到着 (by
NASA/ESA)

#地球から13億 km (6年の旅)

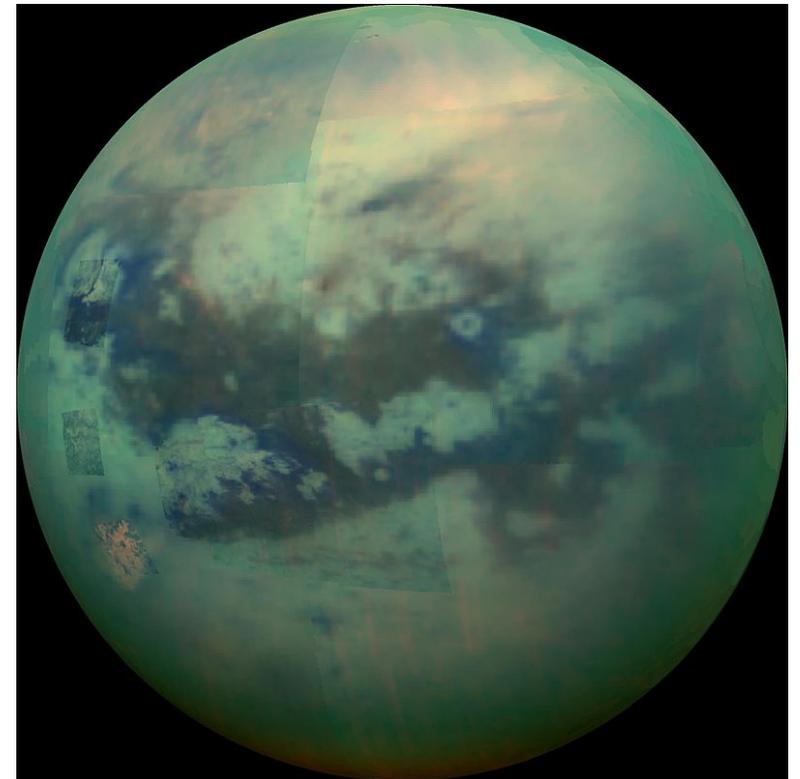


TITAN from NASA homepage



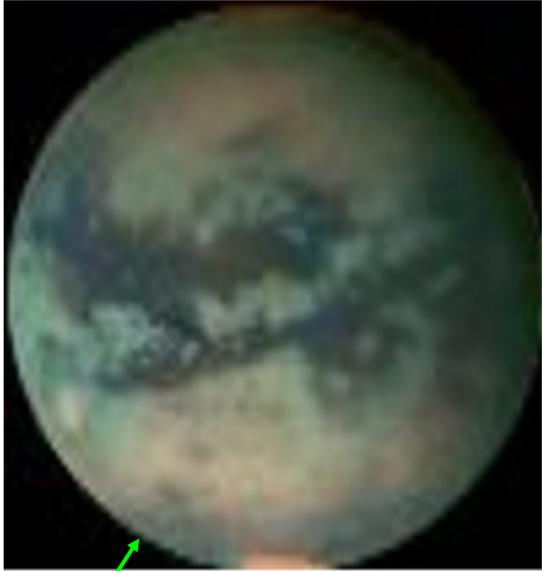
タイタン（土星の衛星）

タイタン：直径～5151 km
（月の約1.5倍）、
約1.5気圧の窒素大気、
表面温度～90 K(- 183 °C) 、
平均密度～1.88 g/cc
表面や大気にメタンが存在。



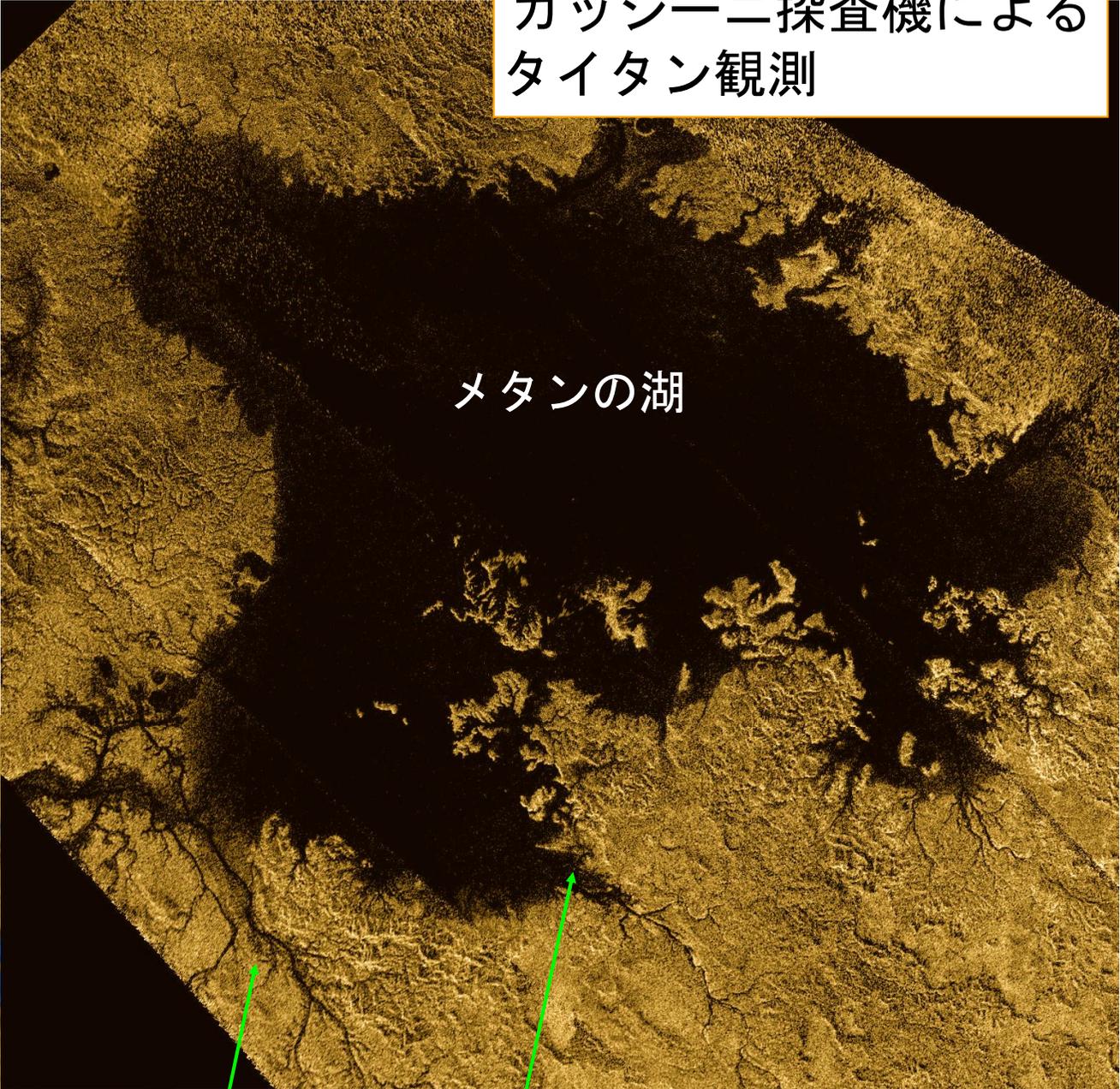
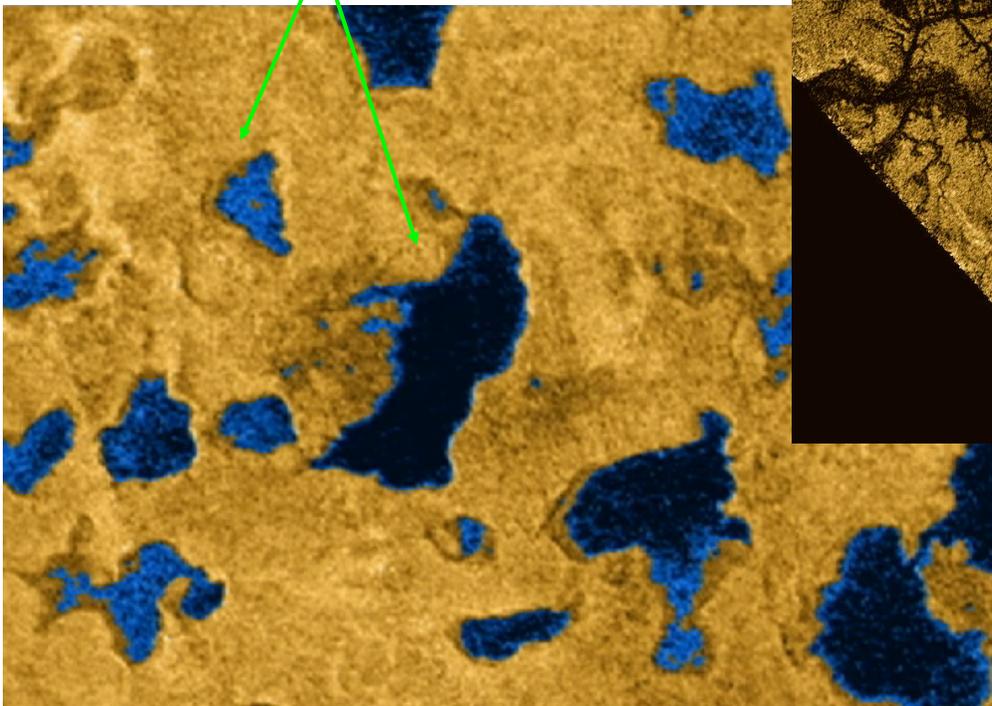
TITAN from NASA homepage

カッシーニ探査機による
タイタン観測



窒素の大気と雲

赤外線画像
(極地方のメタンの湖)



メタンの湖

河川

入江や湖岸

表面
(氷の岩)

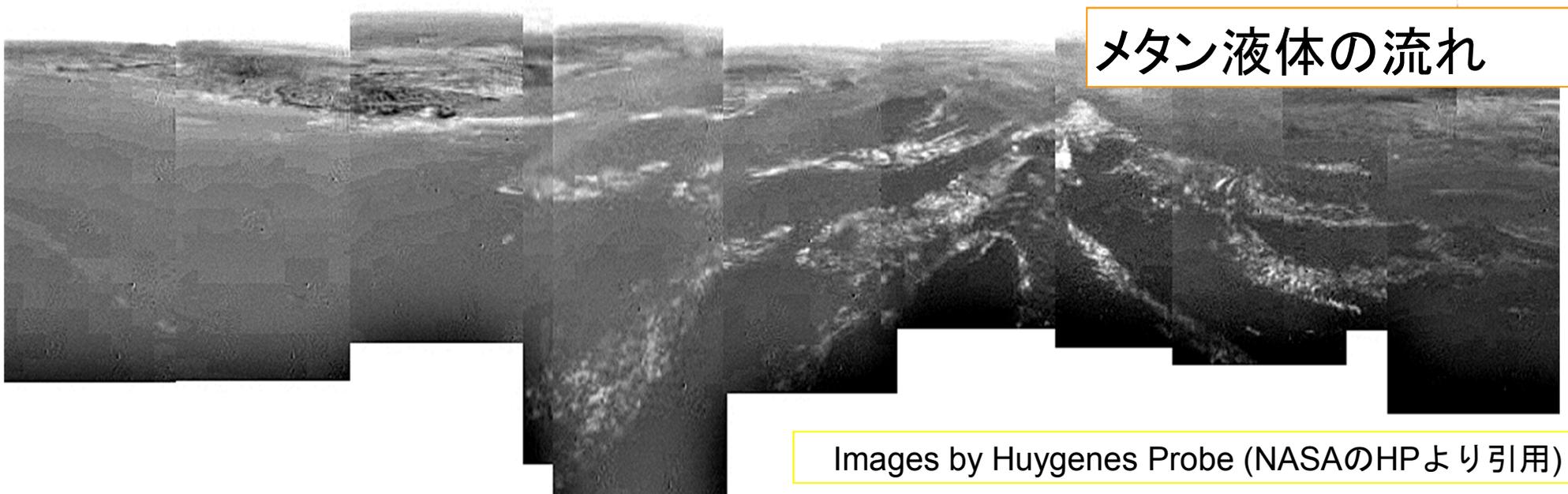


ホイヘンスプローブによる
タイタン観測

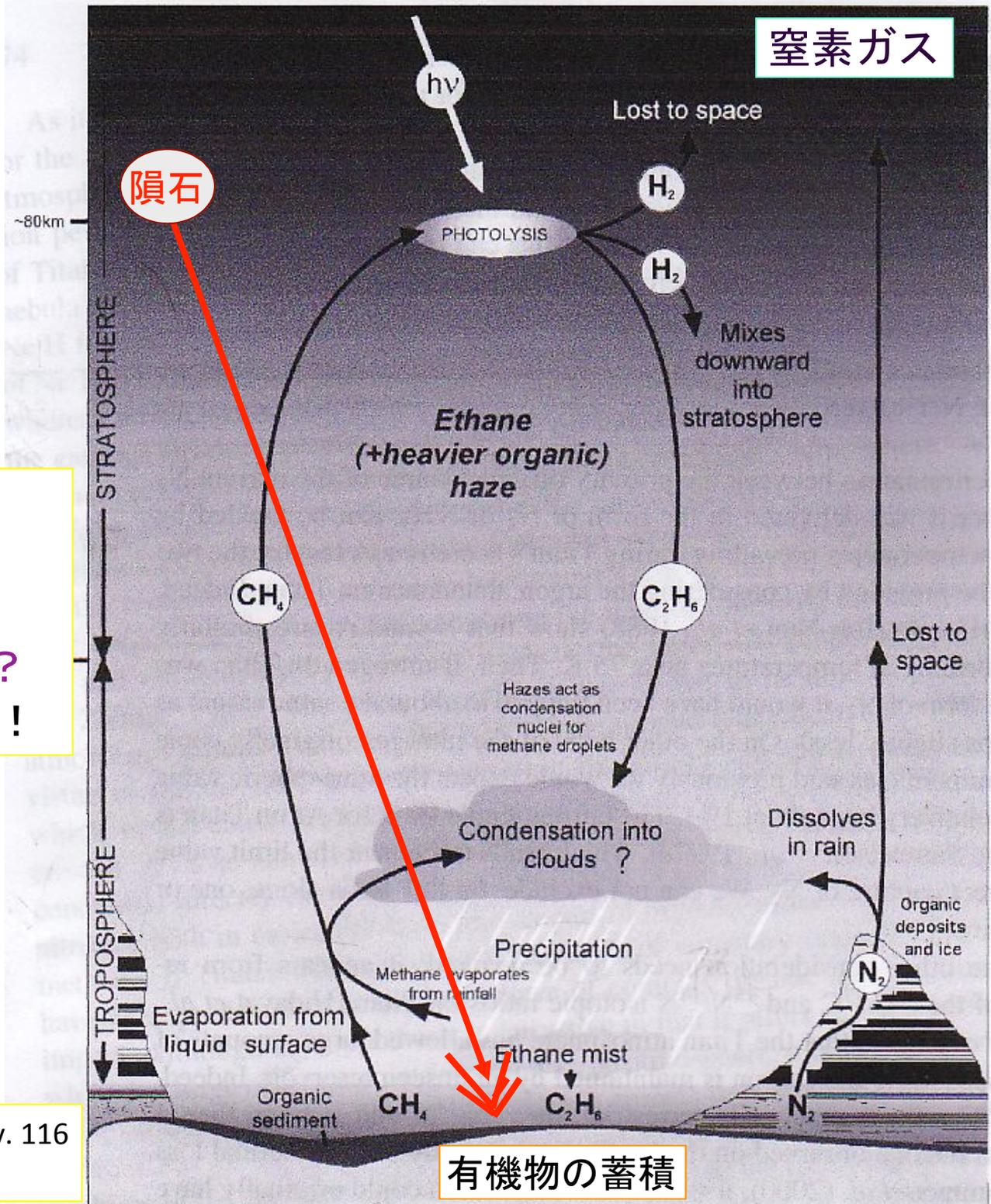
隕石クレーター



メタン液体の流れ



Images by Huygenes Probe (NASAのHPより引用)

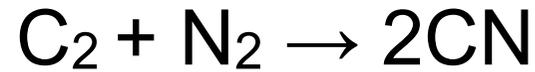


- ◎高層大気での紫外線反応で有機物合成。
- ◎小惑星衝突の高温反応で、アミノ酸、ニトリルの合成？
- ◎40億年前に隕石の大量爆撃！

By A. Coustenis: Space Sci. Rev. 116 (2005)171.

有機物の蓄積

タイタン表面での衝突反応モデル

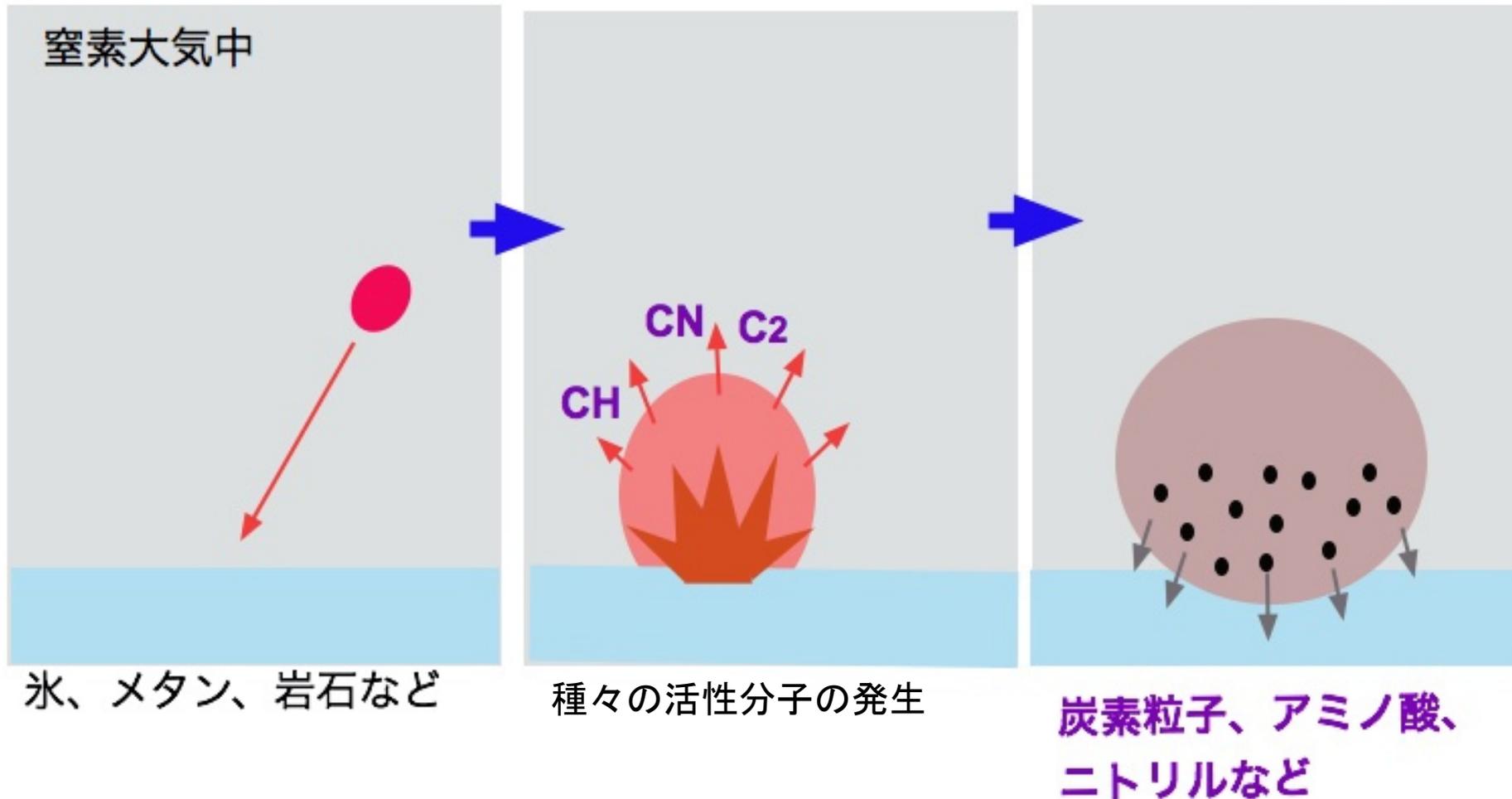


CH₃, COOH, NH₃ などのラジカル分子

小惑星の衝突

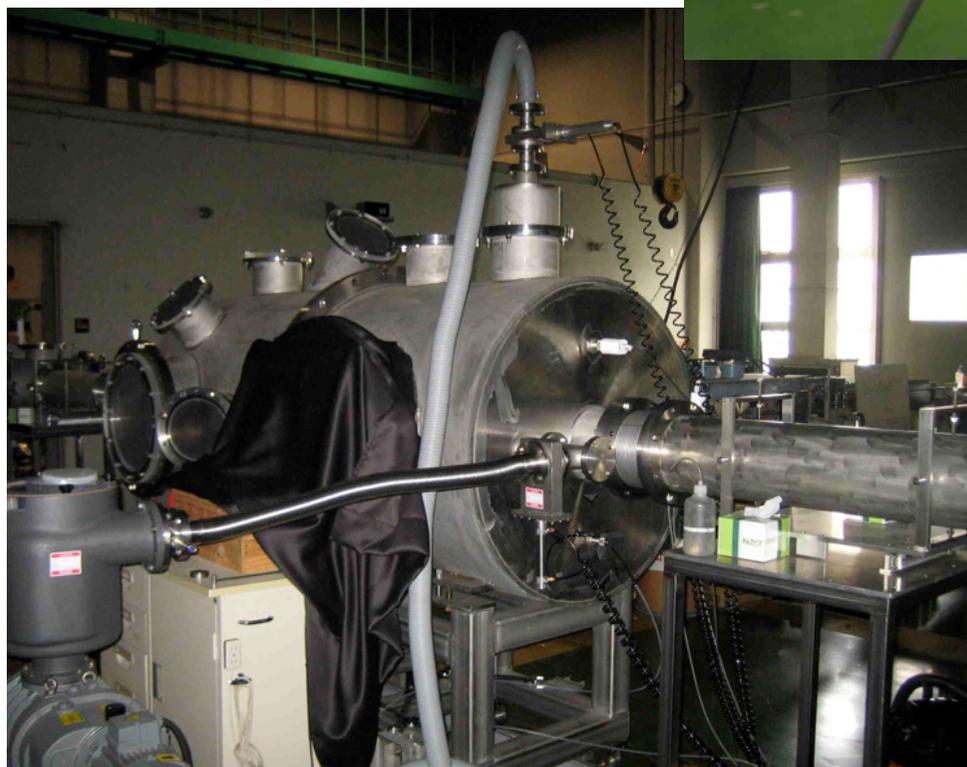
高温ガスプルームの発生
(高温化学反応)

ガスプルームの冷却と
堆積 (ナノ微粒子、有機
分子の堆積、保存)



2-2) 2段式軽ガス銃によるアミノ酸合成実験

Target chamber



- 1) ポリカ弾 (直径 7 mm) → 鉄ターゲット
- 2) ポリカ弾 → 水 + 鉄ターゲット
- 3) ポリカ弾 → 水 + ヘキサン + 鉄ターゲット

入射速さ : $v \sim 7 \text{ km/s}$

高速度カメラによる衝突の様子（与圧室の外部分）

与圧室
入口



987.770ns

氷＋鉄ターゲット

衝撃温度と衝撃圧力の見積もり

ランキン・ユゴニオの関係式を使用。



◎ポリカーボネート弾 (速さ ~ 7 km/s, 直径7.2 mm)

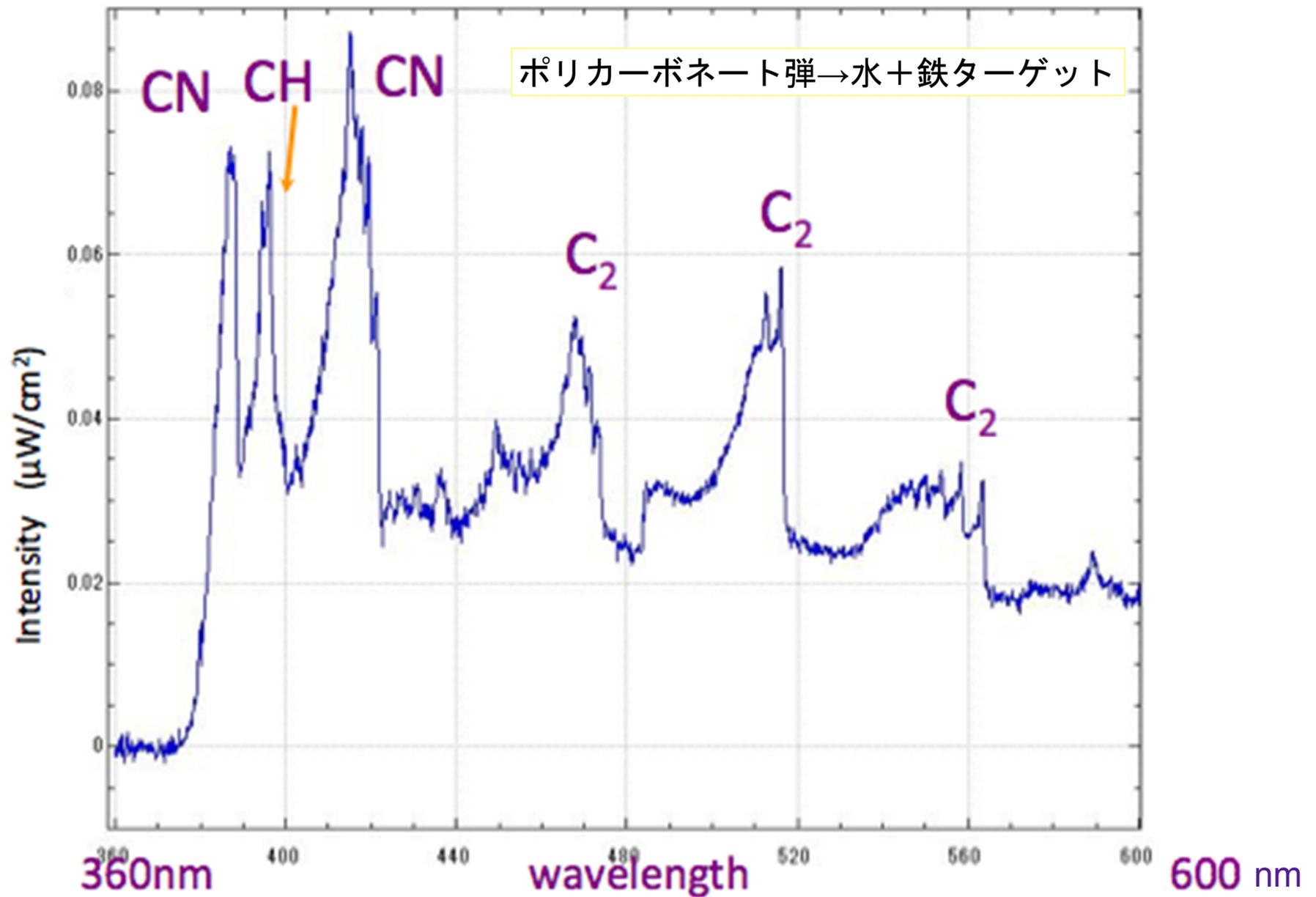
◎鉄ターゲット。直径 ~ 13 mm、深さ ~ 4 mmのクレーター。

衝撃圧力： $P \sim 75$ 万気圧

衝撃温度： $T \sim 4300$ °C

衝撃波速度： $v \sim 6.4$ km/s

衝突発光スペクトル



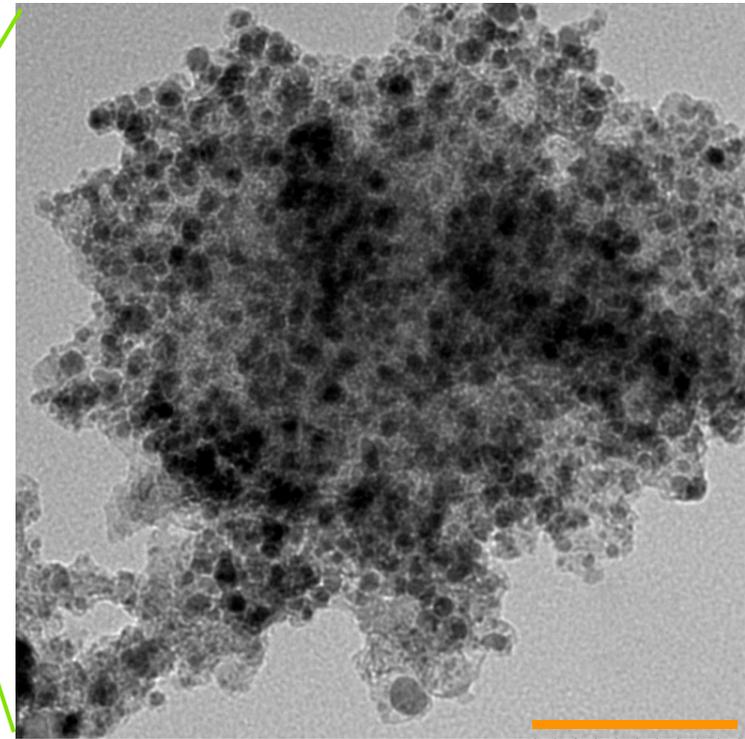
ガス温度、約5000 K、発光時間、約50 μs 。

2-3) アミノ酸は合成されているか？

- ◎ 熱水抽出法 + ダブシル化法 + 液体クロマトグラフ分析
- ◎ 加水分解法 + 液体クロマトグラフ分析



与圧室表面に堆積した合成試料。



File name=2324-GG_BT_0004.M
Image date=2012/02/08 13:22:42
Image number=288
Image comment=Hitachi TEM system
Calibration=1.750 nm/pxel at x 10.0k
Magnification=50.0k
Lens mode=Zoom-1
Spot number=5
Image rotation=0°
Acc. voltage=100kV
Emission=4.5µA
Stage X=321 Y=109 Tilt angle=0.1
Azim angle=0.0

100 nm

熱水抽出+ダブシル誘導体化法

実験試料(5 ml)

標準アミノ酸

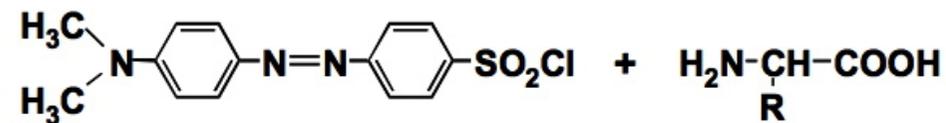
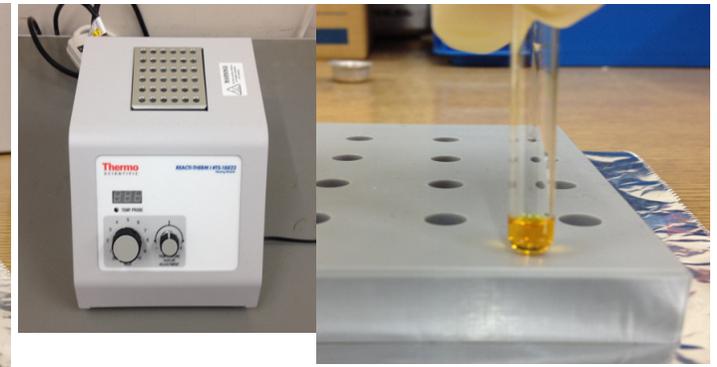
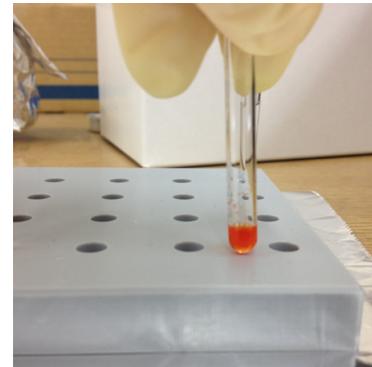
純水

- ・ 蒸留水 50 ml で還流
- ・ 吸引ろ過による不純物除去
- ・ 濃縮

ダブシル試薬によるダブシル化

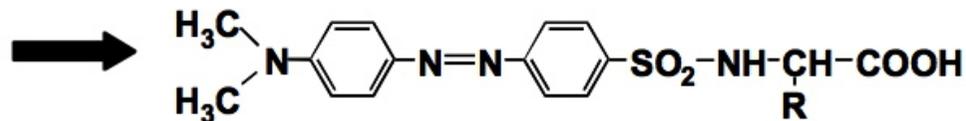


HPLC



Dabsyl-Cl

Amino acid



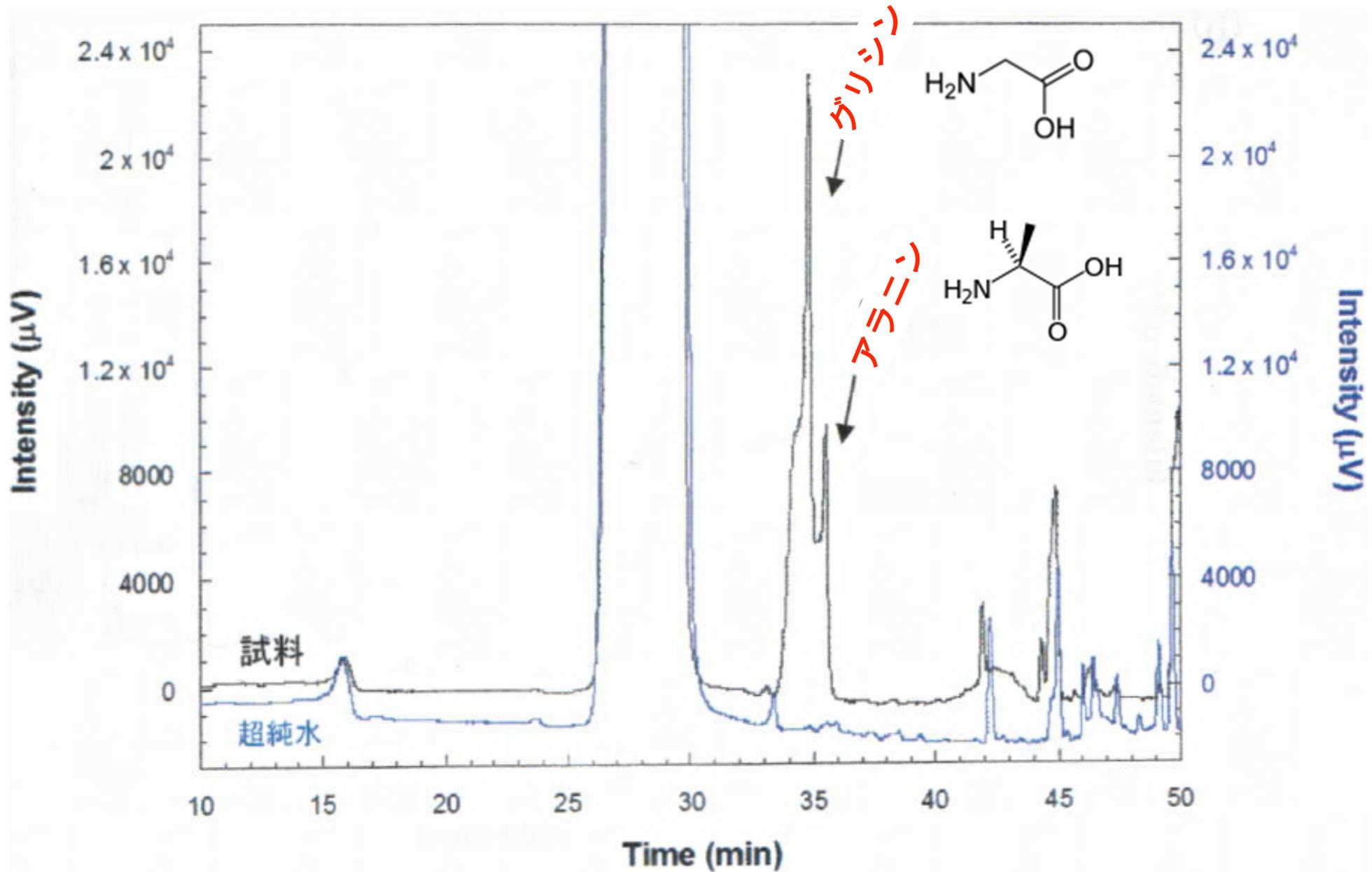
Dabsyl amino acid

液体クロマトグラフ分析

ダブシル化の反応機構

結果 (氷+ヘキサン+鉄ターゲット)

実験試料と純水



グリシンとアラニンのピークを検出。グリシンが約 1.5 nmol/mg 存在する。
回収すす : 11.9 mg。

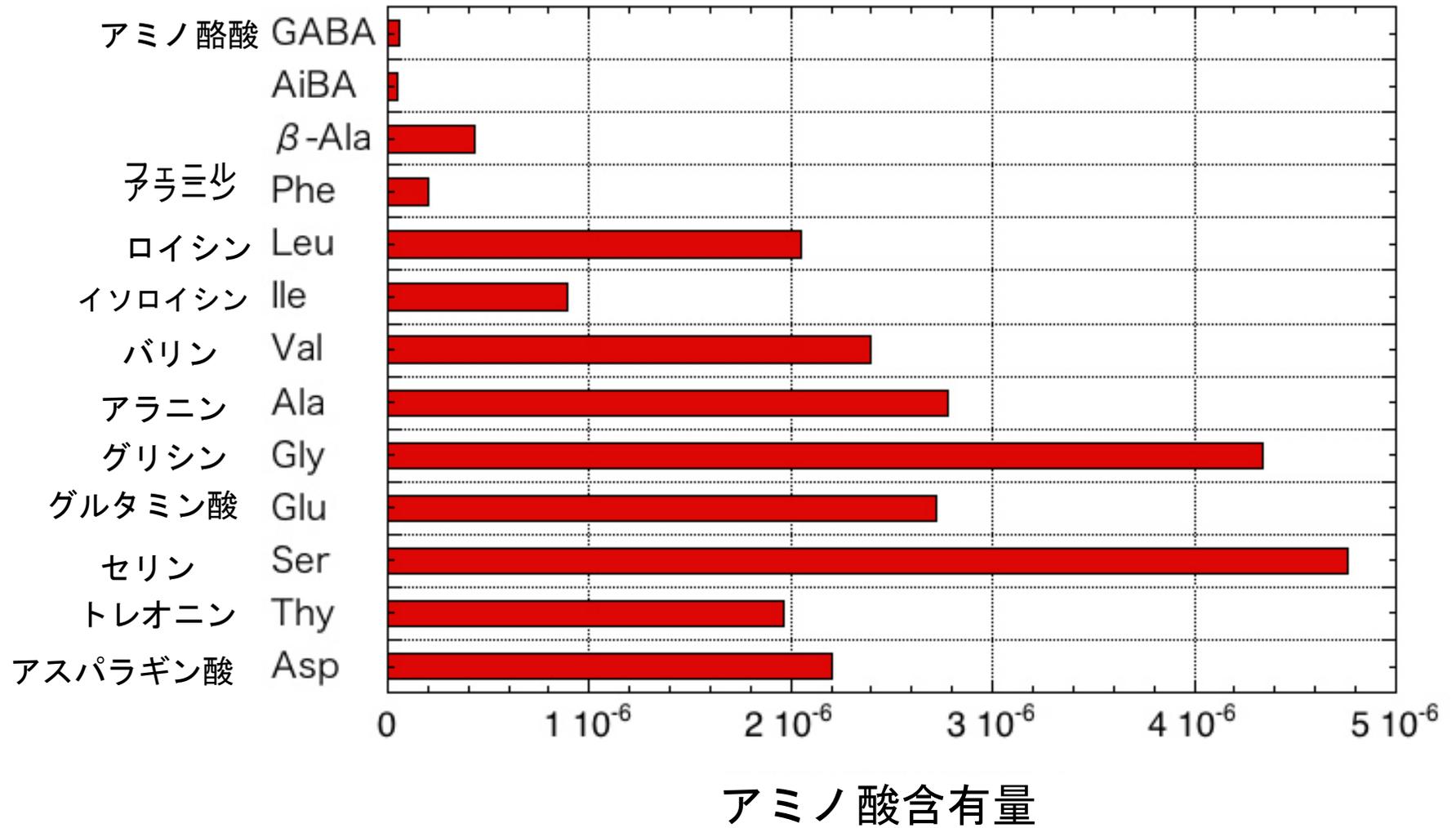
加水分解処理法（横浜国大、小林研究室）

（アミノ酸前駆体がアミノ酸になる。アミノ酸は、凝集体、重合体を作りやすい。たんぱく質の原料。）

- 1) 試料を注意深く回収し、塩酸を加え、110°Cで1日、加水分解処理。
- 2) 陽イオン交換クロマトグラフ分析
- 3) OPAポストカラム誘導体化検出（蛍光検出）。

加水分解+HPLC分析 (横浜国大・小林研究室)

ポリカ弾 → 氷+鉄ターゲット。

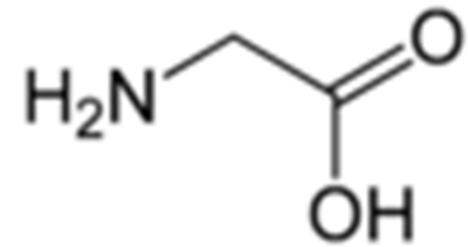


ガスルーム
内の高温
化学反応

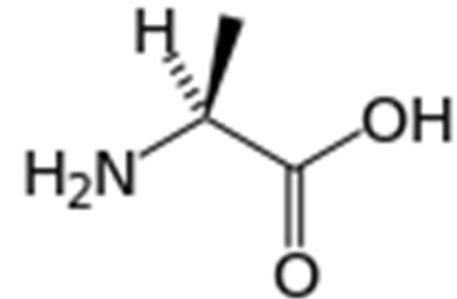


CN
CH_x
NH₃
HCHO
etc.

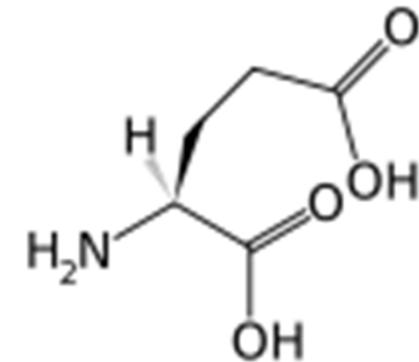
多衝突
冷却過程



グリシン



アラニン



アスパラギン酸

前駆体分子の結合

タイタンへの小惑星衝突を模擬した実験で種々のアミノ酸が合成できることが分かった！タイタン表面に多くのアミノ酸が蓄積しているのでは無いか？！将来の探査に期待！

アミノ酸含有量の比較

アミノ酸	マーチソン隕石 (pmol/mg)	水+ヘキサ ン+鉄 (pmol/mg)	氷+鉄 (-50℃, pmol/mg)
グリシン	24.5	1948	402
Lアラニン	10.4	852	335

(マーチソン隕石データ@オーストラリア：
Engel & Macho, Nature **389** (1997) 265.)



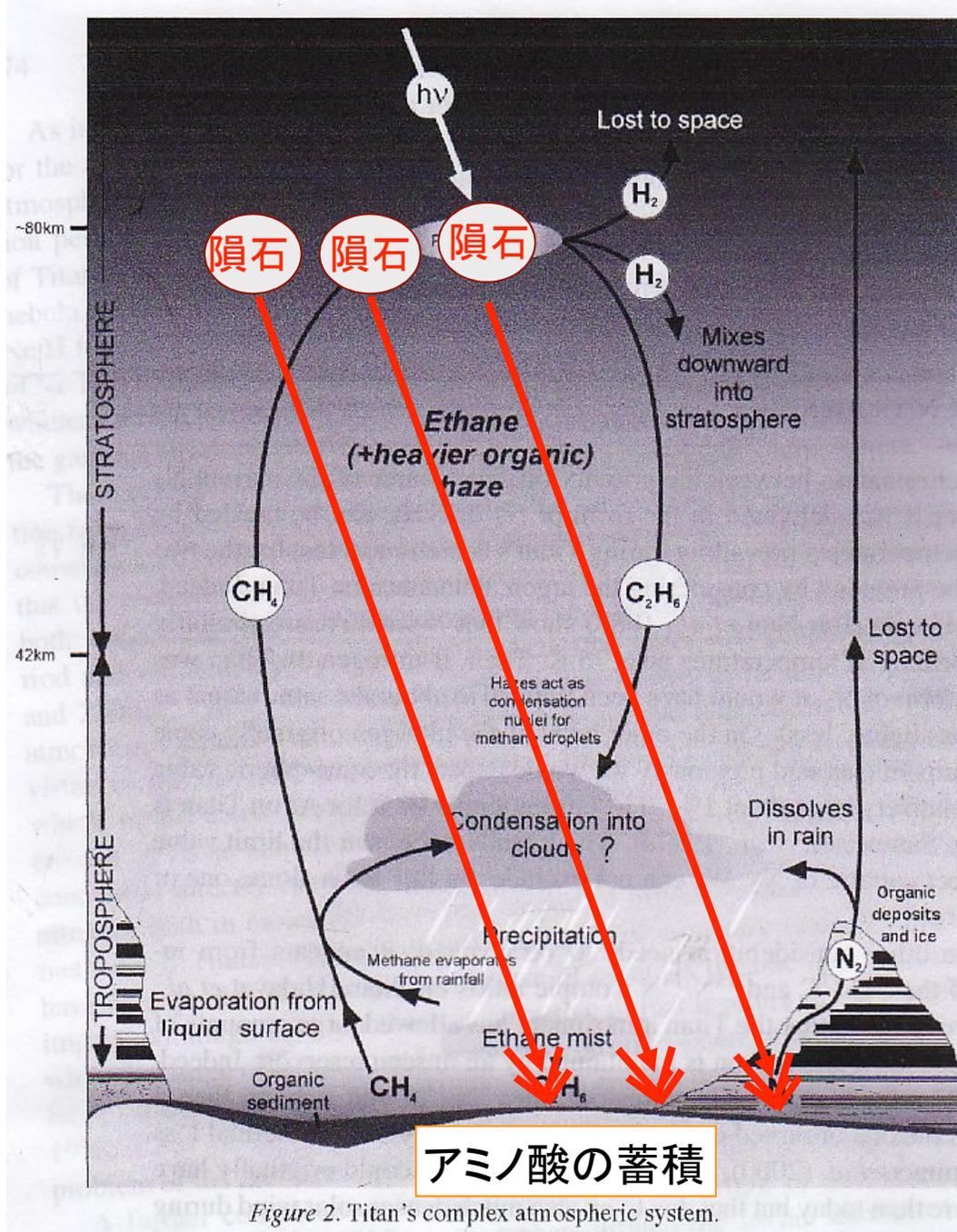
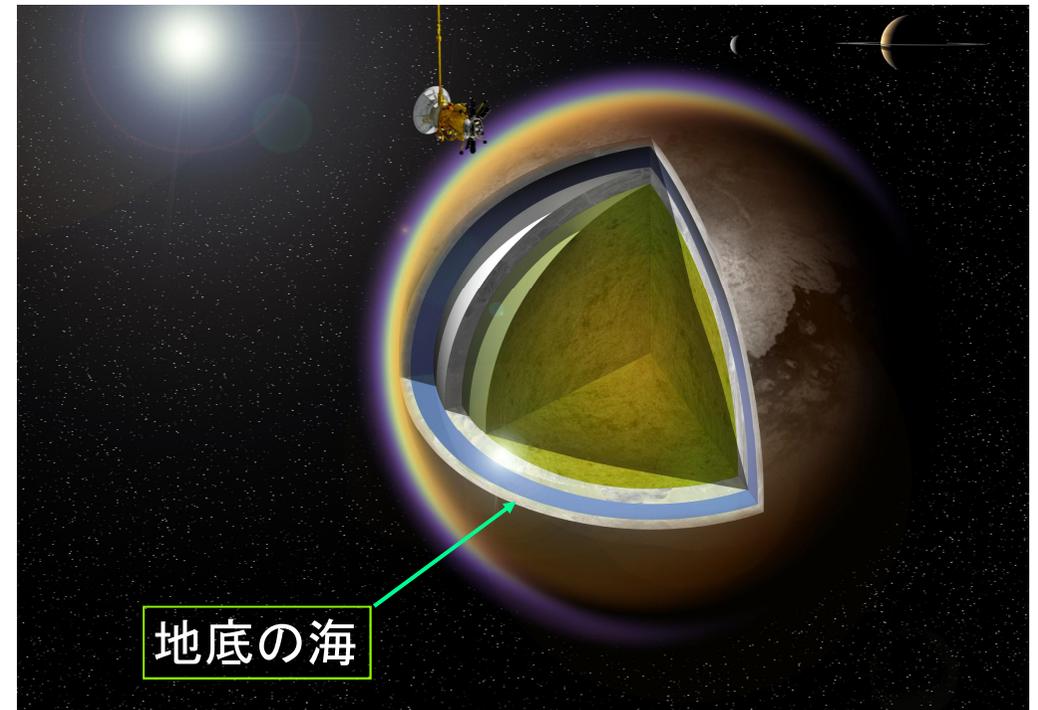


Figure 2. Titan's complex atmospheric system.

小惑星衝突の効果

- 1) 衝突高温反応によりアミノ酸を合成。冷たくて暗い地表に蓄積
- 2) 表面のアミノ酸をさらに反応させる。宇宙に拡散させたり、地下に送り込む。

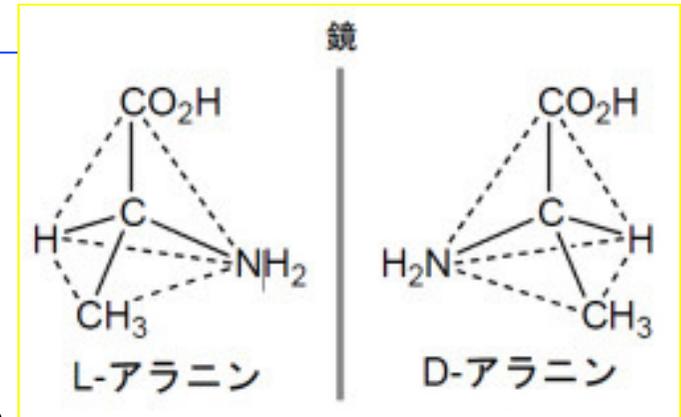


タイタンの地底の海の想像図。
NASAのHPより。

アミノ酸の鏡像異性体（キラル分子）

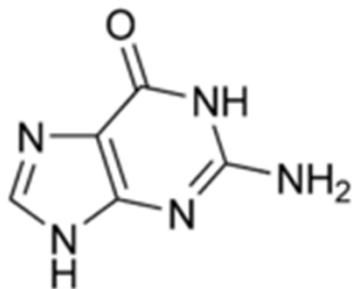
はどうか？

- 1) 鏡像アミノ酸の測定。
- 2) 生物の持つアミノ酸の大部分はL型。
- 3) 隕石に含まれるアミノ酸もL型過剰が多い。
- 4) なぜL型が多いか？生物はなぜ、L型アミノ酸を選択したか？

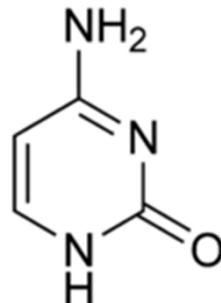


核酸塩基も合成されるか？

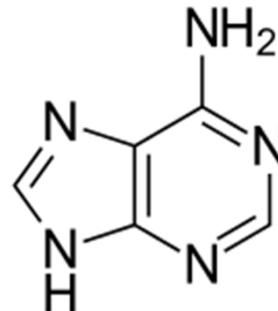
グアニン



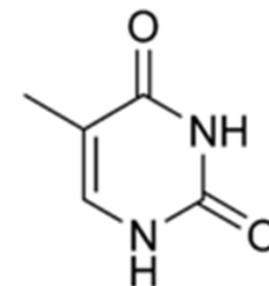
シトシン



アデニン



チミン



3-1 : 地球外生命の可能性？

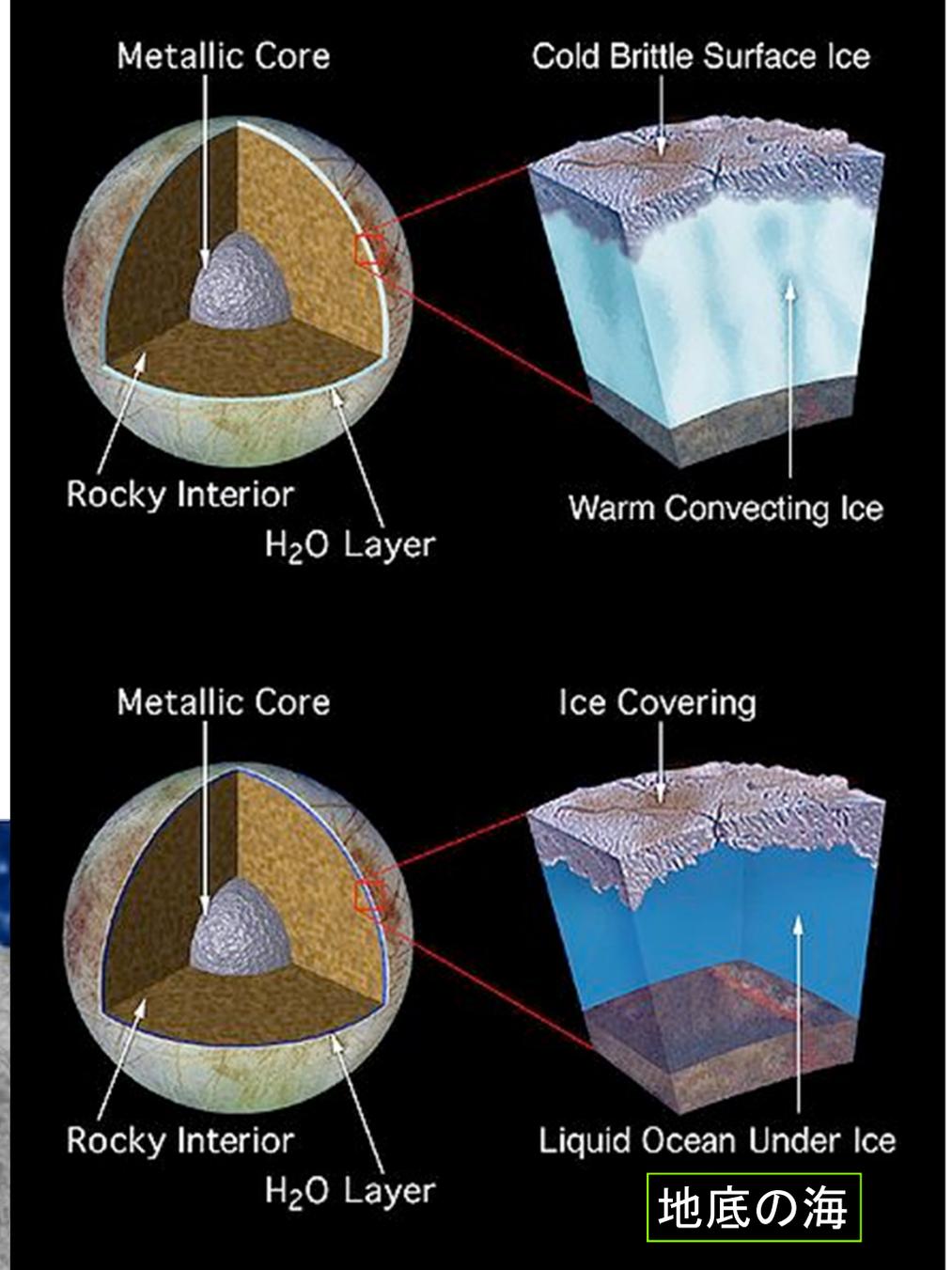
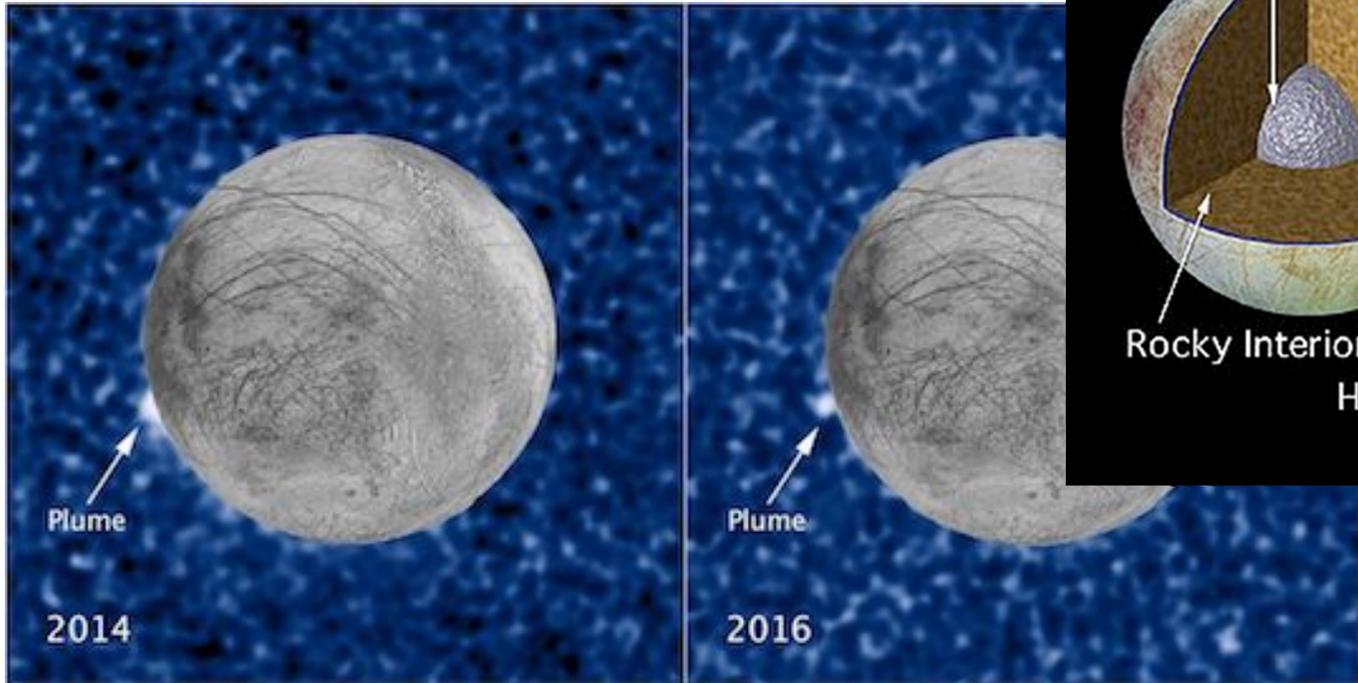
- ◎ 土星の衛星、タイタン（地底の海）
- ◎ 木星の衛星、エウロパ（地底の海）
- ◎ 土星の衛星、エンケラドス（地底の海）

- ◎ 太陽系以外の衛星（Gliese 581- g、TRAPPIST-1など。赤色矮星。）



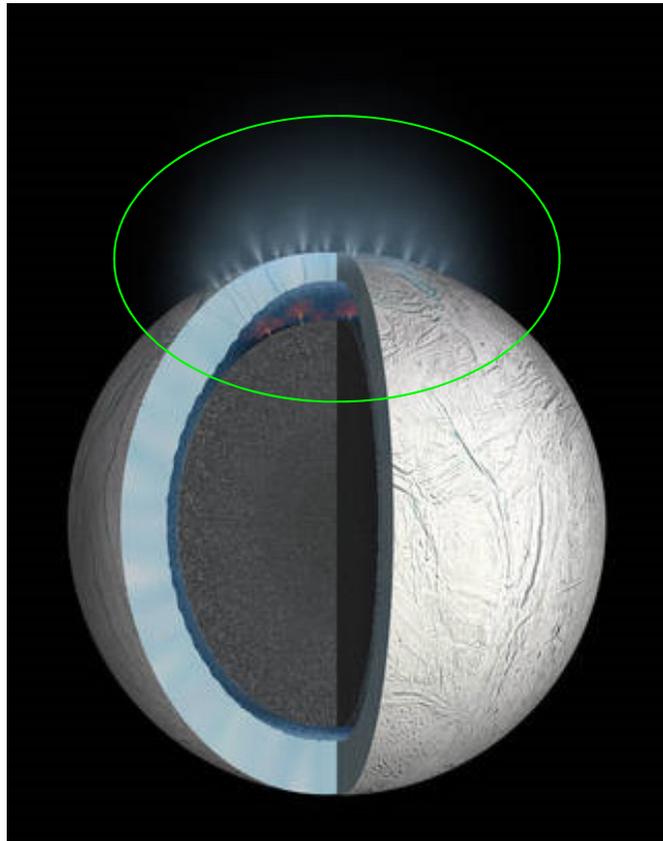
ケプラー宇宙望遠鏡

木星の衛星 エウロパ

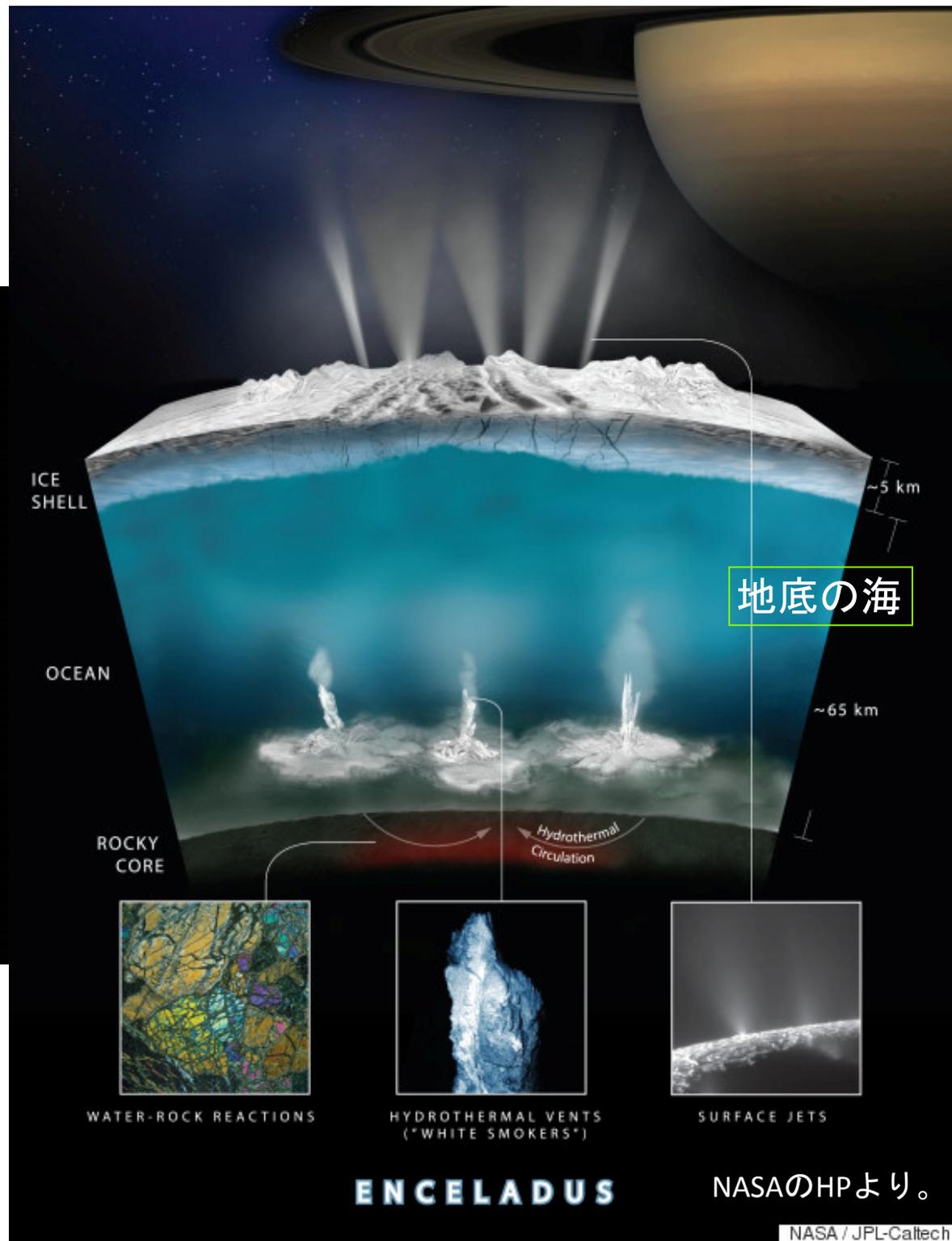


NASAのHPより。

土星の衛星 エンケラドス



水噴出物に有機物
があるか？



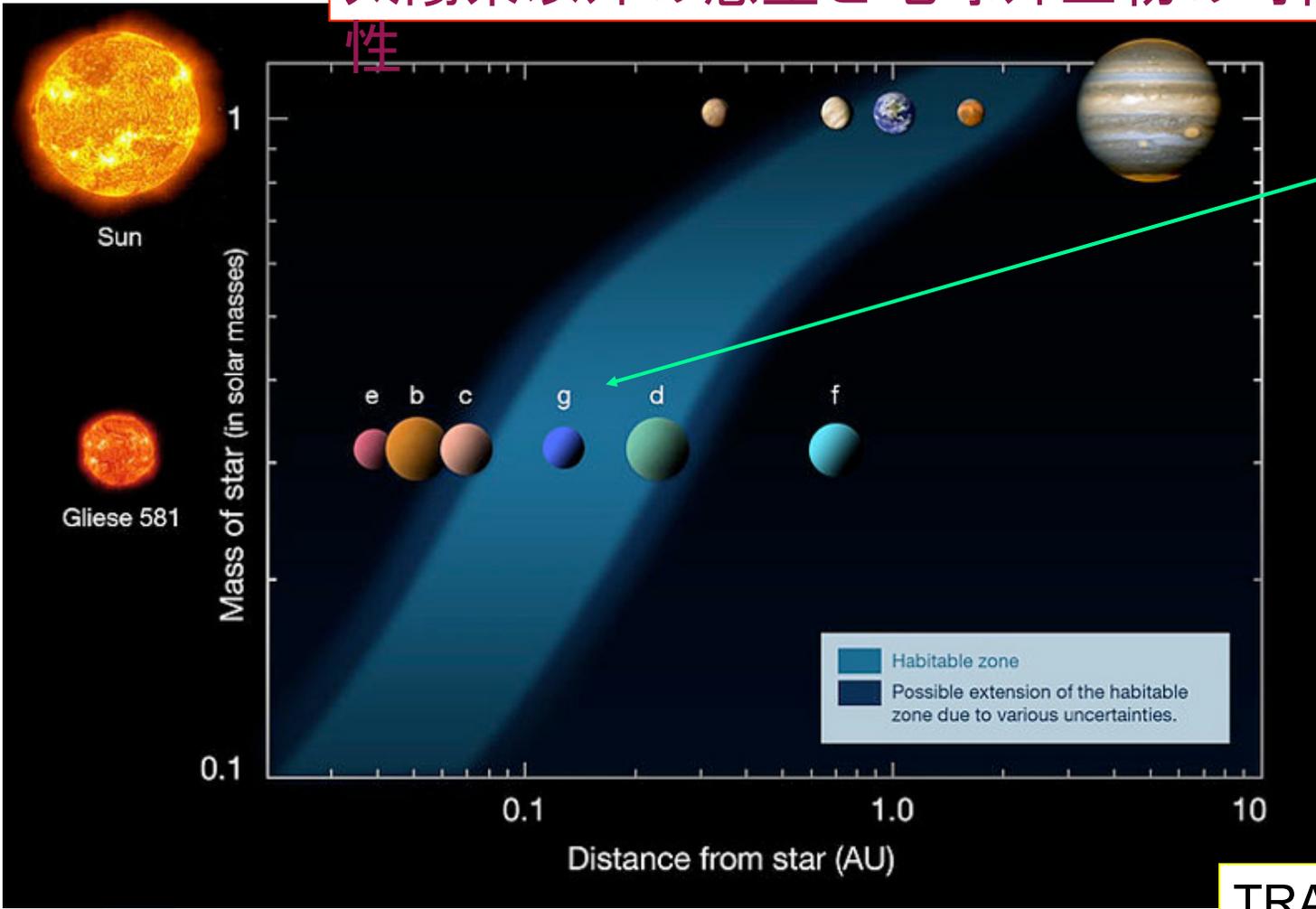
地底の海

ENCELADUS

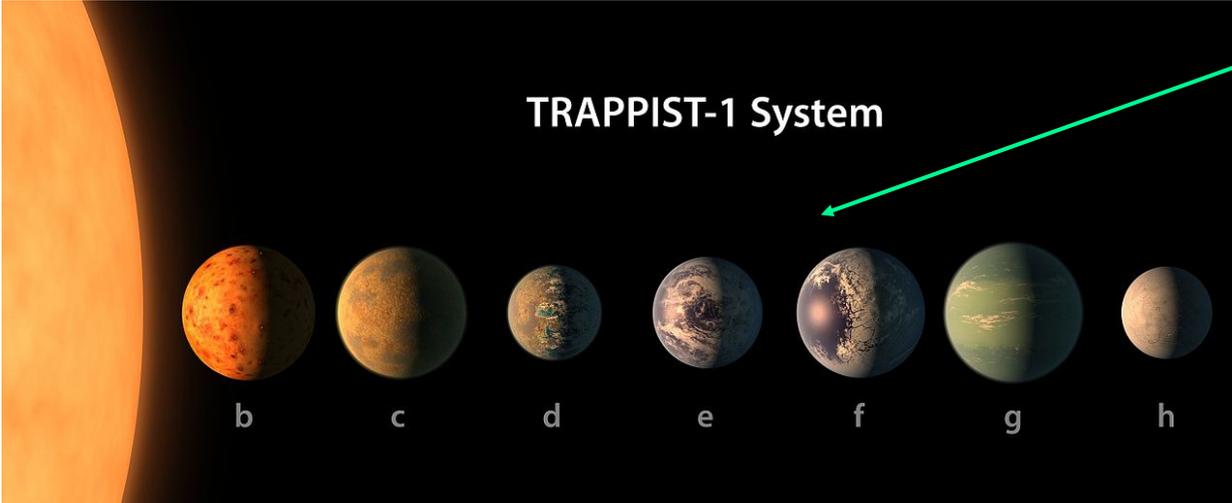
NASAのHPより。

NASA / JPL-Caltech

太陽系以外の惑星と地球外生物の可能性



Gliese 581- g 衛星.
20光年の距離。

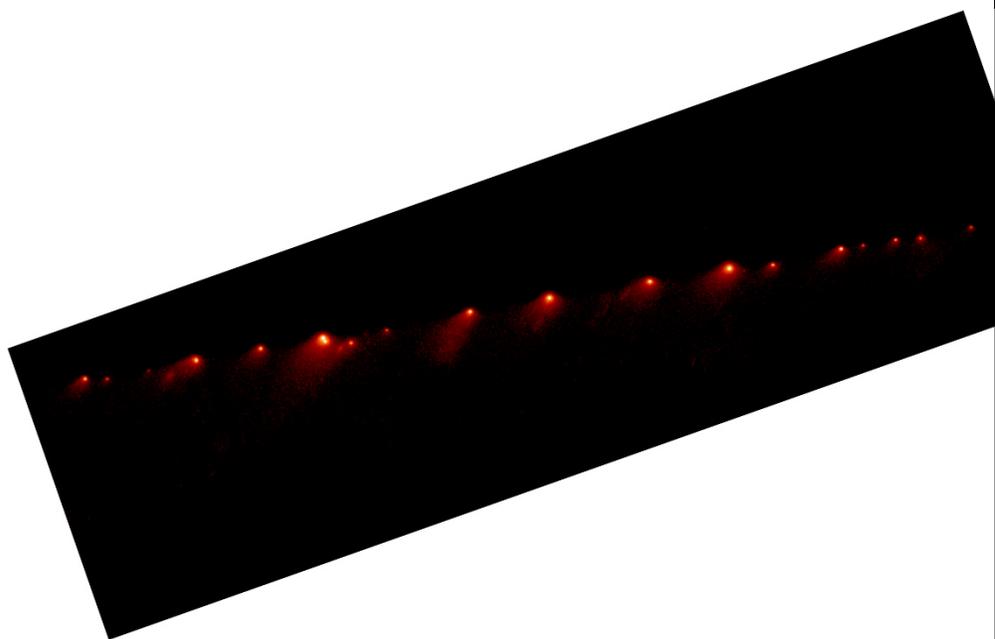


TRAPPIST-1 衛星.
39 光年の距離。赤色矮星。

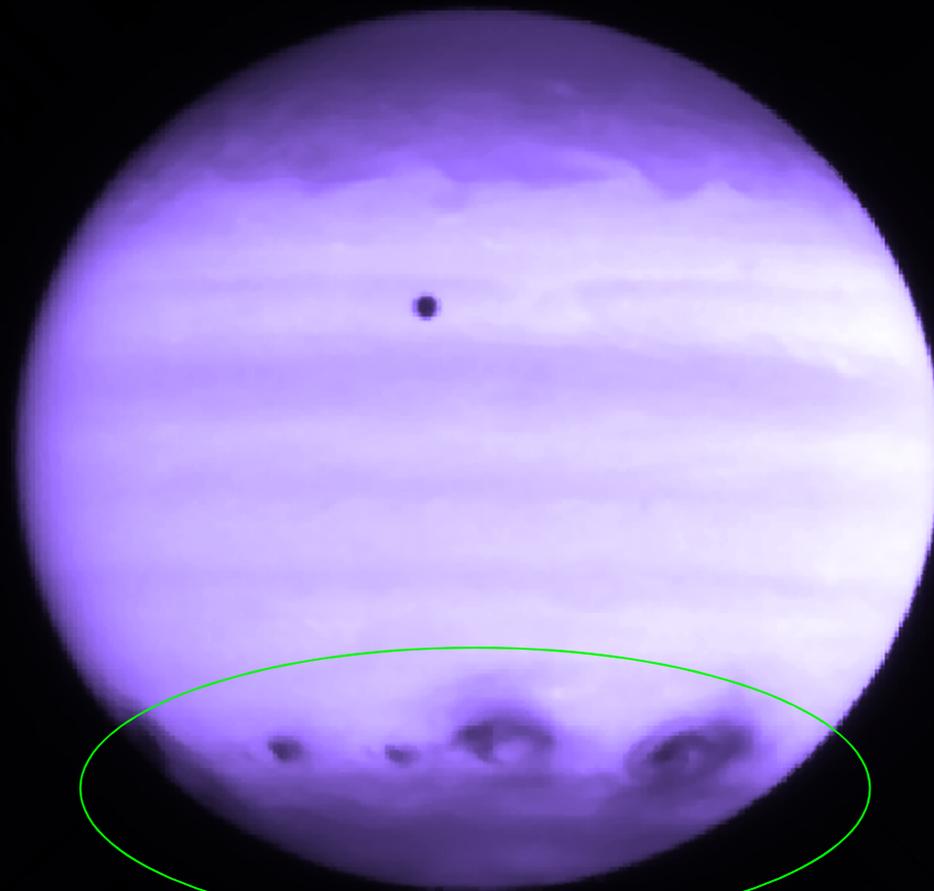
NASAのHPより。

太陽系内で小惑星衝突は
今も起きている！

木星へのシューメーカー・レビ
9 彗星の衝突！ 1994年7月。



Jupiter in Ultraviolet



↑ H ↑ N ↑ Q₂ ↑ D/G ↑
 ↑ B ↑ Q₁ ↑ R ↑ L

Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera 2

NASAのHPより。

4-1 : 地球生命の誕生はどうだったか？

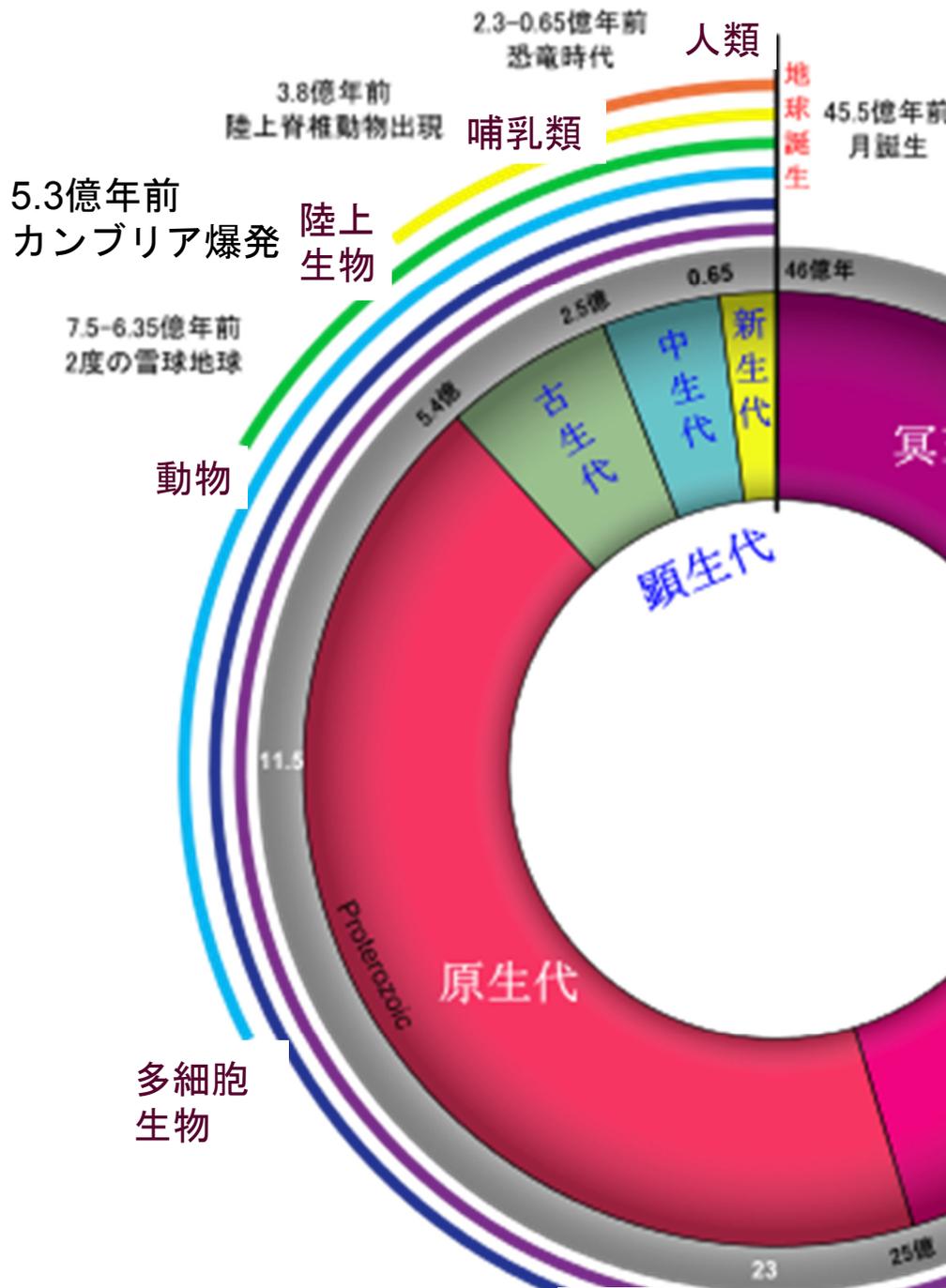
- a) 太古に宇宙より微生物として飛来した（パンスペルミア仮説）？
- b) 有機物が宇宙より隕石と共に飛来して蓄積した？
- c) 小惑星衝突が頻繁に起こり、地球表面で大量の有機物が合成され蓄積した？（隕石の重爆撃期）
- d) 海底の熱水孔付近で有機物が反応して生命の起源を作った？
- e) 太陽からの宇宙線が有機物を作った。

参考：生命の起源および進化学会のHP。

更科、「宇宙からいかにヒトは生まれたか」、新潮選書

地球時計

46億年



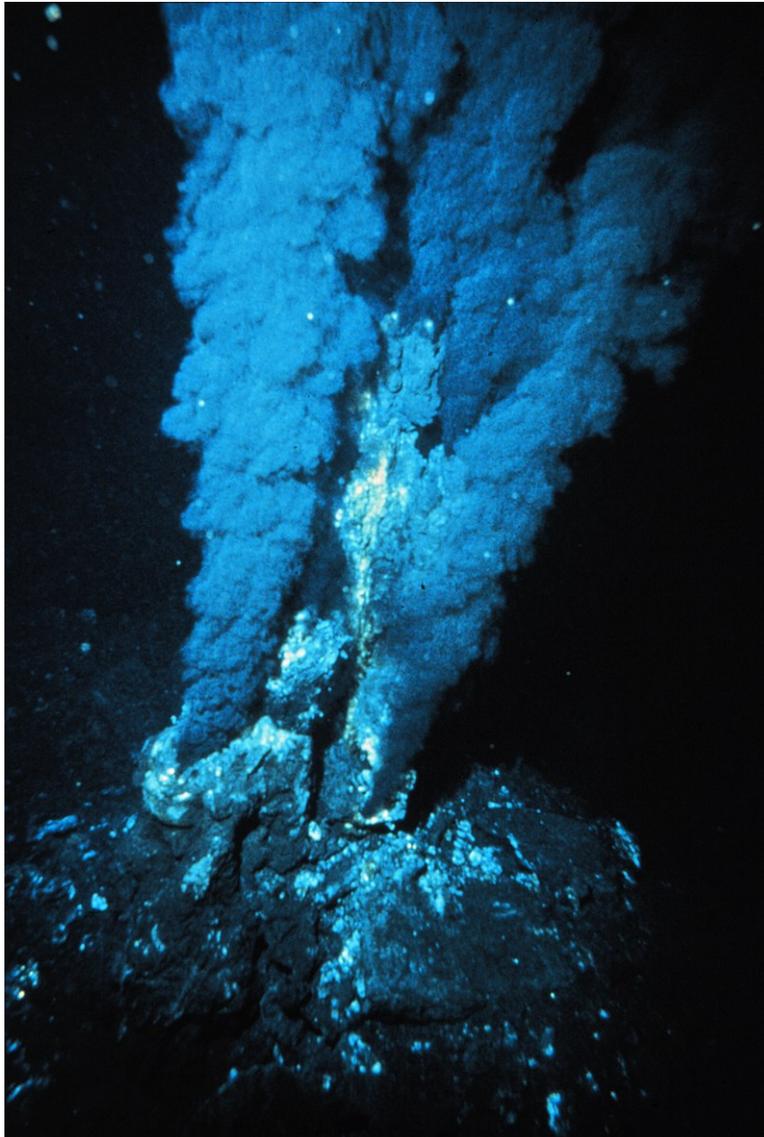
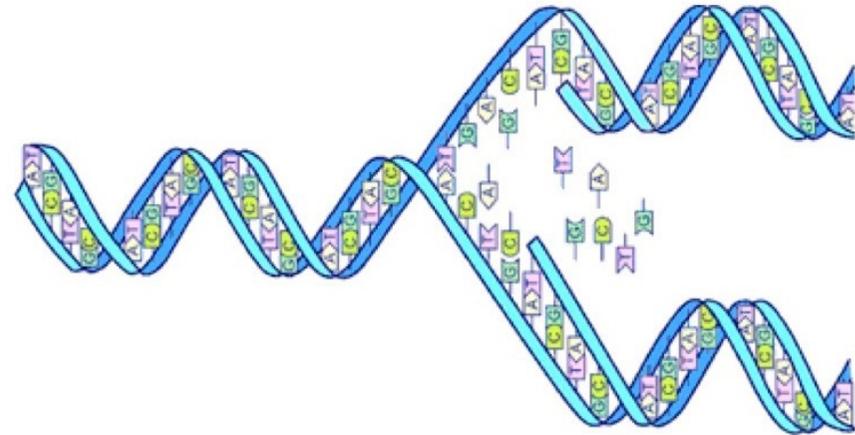
40億年前
後期重爆撃期終了
生命誕生

35億年前光合
成開始

真核生物 23億年前大気中の
酸素濃度上昇

熱水噴出孔が生命の起源か？

- 1) ガラクタワールドからの進化？
- 2) RNAワールドからの進化？



海底の熱水噴出孔

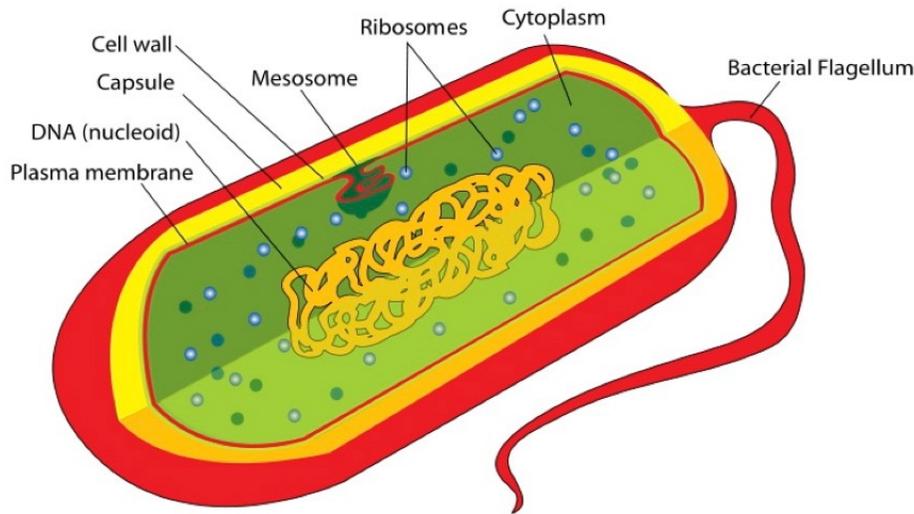
参考: 生命の起源 (小林、講談社)



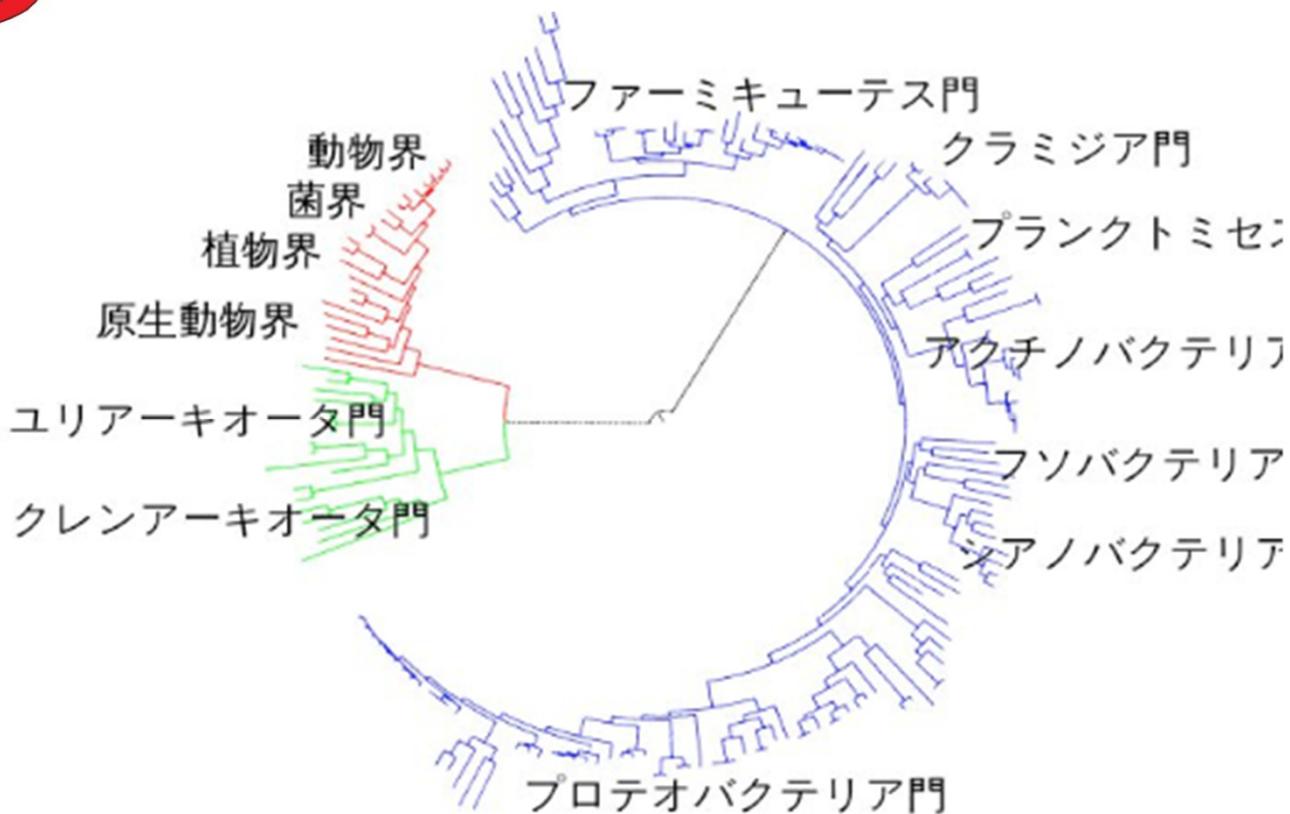
ストロマトライト (藍藻、オーストラリア)

Wikipedia より引用

古細菌がまずは繁殖したか？



好熱菌、好塩基菌、メタン菌など。
* 酸素不要。光合成不要。



地上生物系統樹。生物の種は1000万以上と言われている。
地中、深海中にまだかなりの未知の種が居るといわれている。

まとめ

- 1) 宇宙における小惑星が炭素を含む惑星／衛星に衝突し、種々の炭素化合物を作ってきた。タイタン表面は、その代表例であろう。
- 2) この模擬実験として、ガス銃を用いて窒素ガス中で衝突実験を行った。約 $50 \mu\text{s}$ 程度の寿命で、高温ガスプルーム発生。5000 K 程度の温度。CN, C_2 分子の強い発光。
- 3) 与圧室内に、炭素すすが堆積。この合成試料を純水還流し、液体クロマトグラフ法で分析。グリシン、アニリンなどのアミノ酸が合成されることを確認。
- 4) タイタン衛星表面に多くのアミノ酸が蓄積しているのでは無いか？
- 5) タイタンなどに地球外生命の可能性。
- 6) 地球生命の誕生は謎が多い。
- 7) 小惑星衝突は宇宙でこれからも起きる。第2のオアシスに期待する！

謝辞：大学院生の大河内君、中村君、関口君。

References :

- * K. Okochi, T. Mieno, S. Hasegawa, K. Kurosawa, Origin Life Evol. Biosphere 45 (2015) 195.
- * T. Mieno, S. Hasegawa, K. Mitsuishi, Jpn. J. Appl. Phys. **50** (2011) 125102.