

The background features a dark blue, starry sky with several white circular diagrams overlaid. These diagrams include concentric circles, dashed lines, and arrows, resembling astronomical or scientific charts. A large circular scale with numerical markings from 140 to 260 is visible on the left side.

尋找天外的海洋世界

陳文屏

中央大學天文所、物理系

2021.11.06 仰望書房



https://www.astro.ncu.edu.tw/~wchen/wp_chen/essay/oceans.pdf

NASA 探索外星生命的指引

- *Follow the water!*
- 人類自古就「逐水而居」（可靠水源；飲用、航行）
- 人體組成70%是水；地球表面 >70%由水覆蓋

水這個東西 H₂O



□ 生命三要素？陽光、空氣、水，哪樣最不可少？

當然是水，沒有水怎麼泡咖啡？

□ 我們知道的這種生命：有效而穩定的液態化學

不一定是水，但水很不錯；宇宙含量多

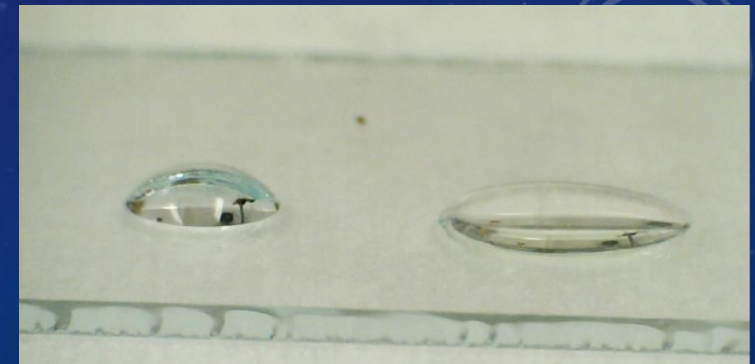
□ 奇特的「固態較輕」 特寒的環境，冰下保有活水

□ 比熱大、汽化熱大 優越的調溫功能

□ 表面張力大 框住液態化學反應

□ 「萬用溶劑」 帶着營養趴趴走

□ 偏振



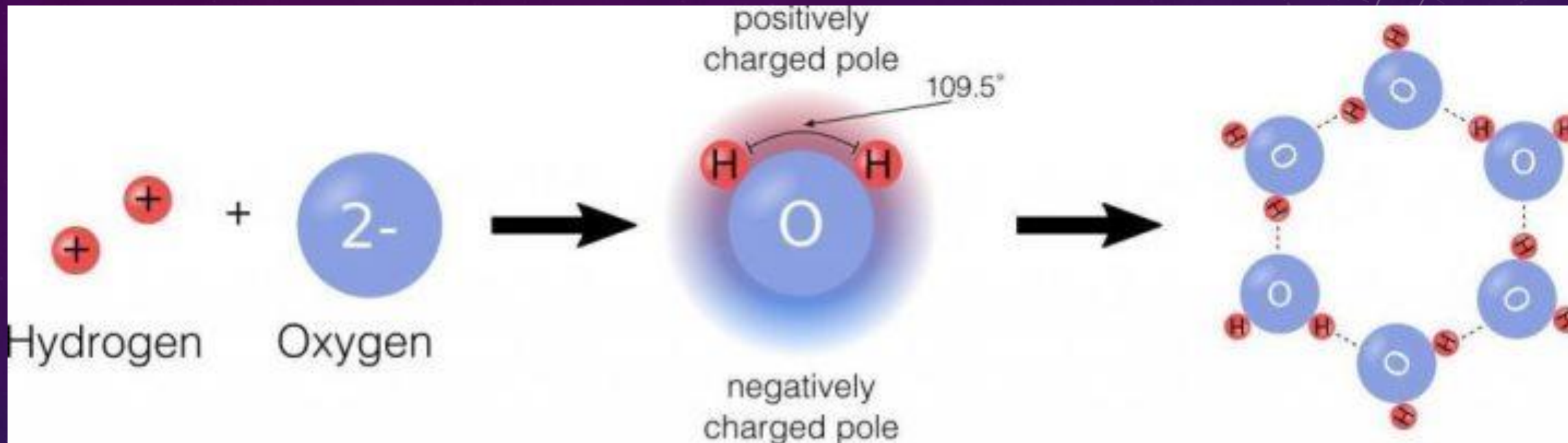
(左) 水的表面張力比 (右) 酒精來得大

天文學家的週期表

1 氫 H																	2 氦 He						
3 鋰 Li	4 鈹 Be	<div style="display: flex; justify-content: space-around; text-align: center;"> 大霹靂 大恆星 超新星 小恆星 宇宙射線 人工 </div>										5 硼 B	6 碳 C	7 氮 N	8 氧 O	9 氟 F	10 氖 Ne						
11 鈉 Na	12 鎂 Mg																	13 鋁 Al	14 矽 Si	15 磷 P	16 硫 S	17 氯 Cl	18 氬 Ar
19 鉀 K	20 鈣 Ca	21 鈦 Sc	22 鈦 Ti	23 釩 V	24 鉻 Cr	25 錳 Mn	26 鐵 Fe	27 鈷 Co	28 鎳 Ni	29 銅 Cu	30 鋅 Zn	31 鎵 Ga	32 鍺 Ge	33 砷 As	34 硒 Se	35 溴 Br	36 氪 Kr						
37 銣 Rb	38 銣 Sr	39 釷 Y	40 鋯 Zr	41 鈮 Nb	42 鉬 Mo	43 錳 Tc	44 鈿 Ru	45 銠 Rh	46 鈀 Pd	47 銀 Ag	48 鎘 Cd	49 銦 In	50 錫 Sn	51 銻 Sb	52 碲 Te	53 碘 I	54 氙 Xe						
55 銫 Cs	56 鋇 Ba	鐳系	72 釷 Hf	73 鉭 Ta	74 鎢 W	75 錒 Re	76 鋳 Os	77 銥 Ir	78 鉑 Pt	79 金 Au	80 汞 Hg	81 鉍 Tl	82 鉛 Pb	83 鉍 Bi	84 鉍 Po	85 砒 At	86 氡 Rn						
87 銣 Fr	88 鐳 Ra	錒系	104 鑪 Rf	105 鈹 Db	106 錒 Sg	107 鉍 Bh	108 鏷 Hs	109 鐳 Mt	110 鐳 Ds	111 鎰 Rg	112 鐳 Cn	113 鉅 Nh	114 鉍 Fl	115 鐳 Mc	116 鉍 Lv	117 鉍 Ts	118 鉍 Og						

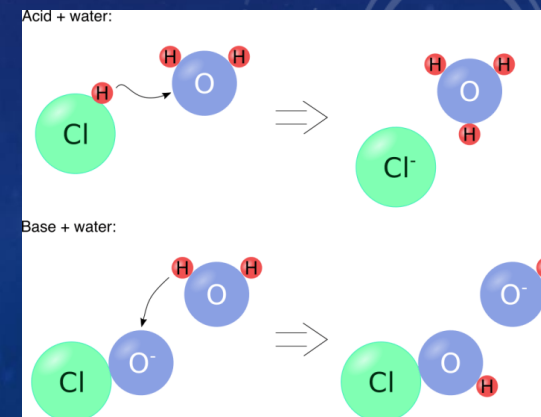
鐳系	57 鐳 La	58 鈰 Ce	59 鐳 Pr	60 釷 Nd	61 鉕 Pm	62 釷 Sm	63 鎳 Eu	64 釷 Gd	65 鉕 Tb	66 鐳 Dy	67 釷 Ho	68 鉕 Er	69 鐳 Tm	70 鉕 Yb	71 鐳 Lu
錒系	89 錒 Ac	90 釷 Th	91 鐳 Pa	92 鈾 U	93 釷 Np	94 鐳 Pu	95 錒 Am	96 錒 Cm	97 鉕 Bk	98 鉍 Cf	99 鐳 Es	100 鐳 Fm	101 鉕 Md	102 鉍 No	103 鐳 Lr

＋新理論：緻密天體（中子星、黑洞）合併製造大量複雜元素



水分子為電中性，但結構不對稱，因此微微「正負偏極」，容易跟別的極性分子（包括水分子本身）結合

還能「犧牲小我」中和酸、鹼



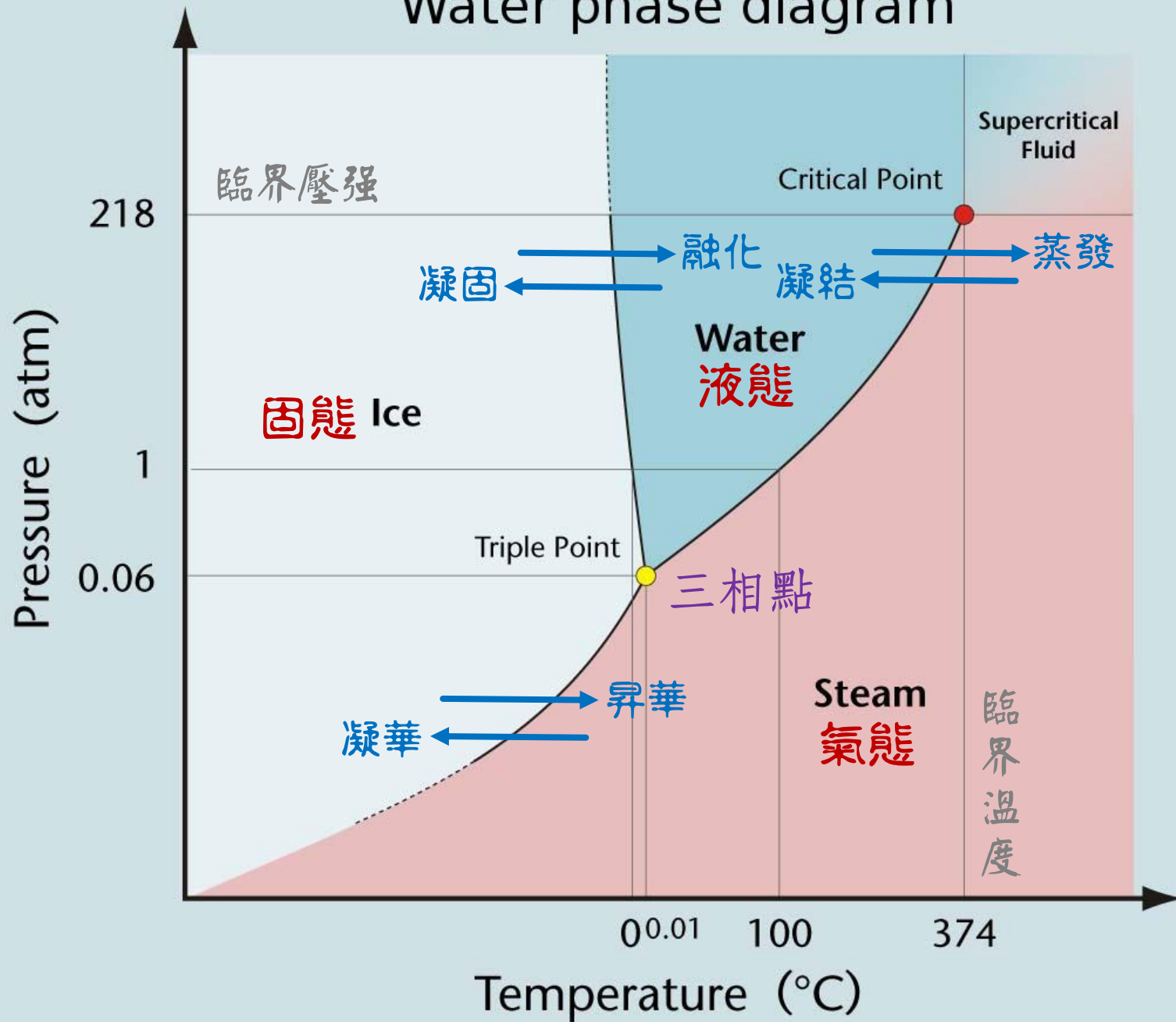
常見液體的比較

溶劑	水 (H ₂ O)	阿摩尼亞 (NH ₃)	甲醇 (CH ₃ OH)	乙醇 (C ₂ H ₅ OH)
液態溫度 (°C)	0 ~ +100	-78 ~ -33	-94 ~ +65	+37 ~ +207
溫度範圍 (°C)	100	45	159	170
比熱 (kJ/kg °C)	4.2	4.7	2.1	2.5
汽化熱 (kJ/kg)	2257	1396	1100	846

氣壓小（例如高海拔）則沸點降低
大氣太稀薄，液體無法存在地表

$$T_{\text{水沸點}} [^{\circ}\text{C}] \approx 100 - 0.5 (H/152.4 \text{ m})$$

Water phase diagram



1 atm
= 760 mmHg
= 101.3 kPa
= 1.013 bar
= 14.7 PSI
= 760 torr

行星或衛星要有液態水，就不能離恆星太遠（結冰）或太近（蒸發）

恆星光度 $L = (4\pi R_*^2) (\sigma T_*^4)$

$$\frac{L}{4\pi d^2} (1 - A) \eta \pi a^2 = \zeta \pi a^2 \sigma T_d^4$$

$$T_d = T_* \left(\frac{R_*}{d} \right)^{1/2}$$



行星或衛星的平衡溫度與恆星距離平方根成正比；越遠越冷

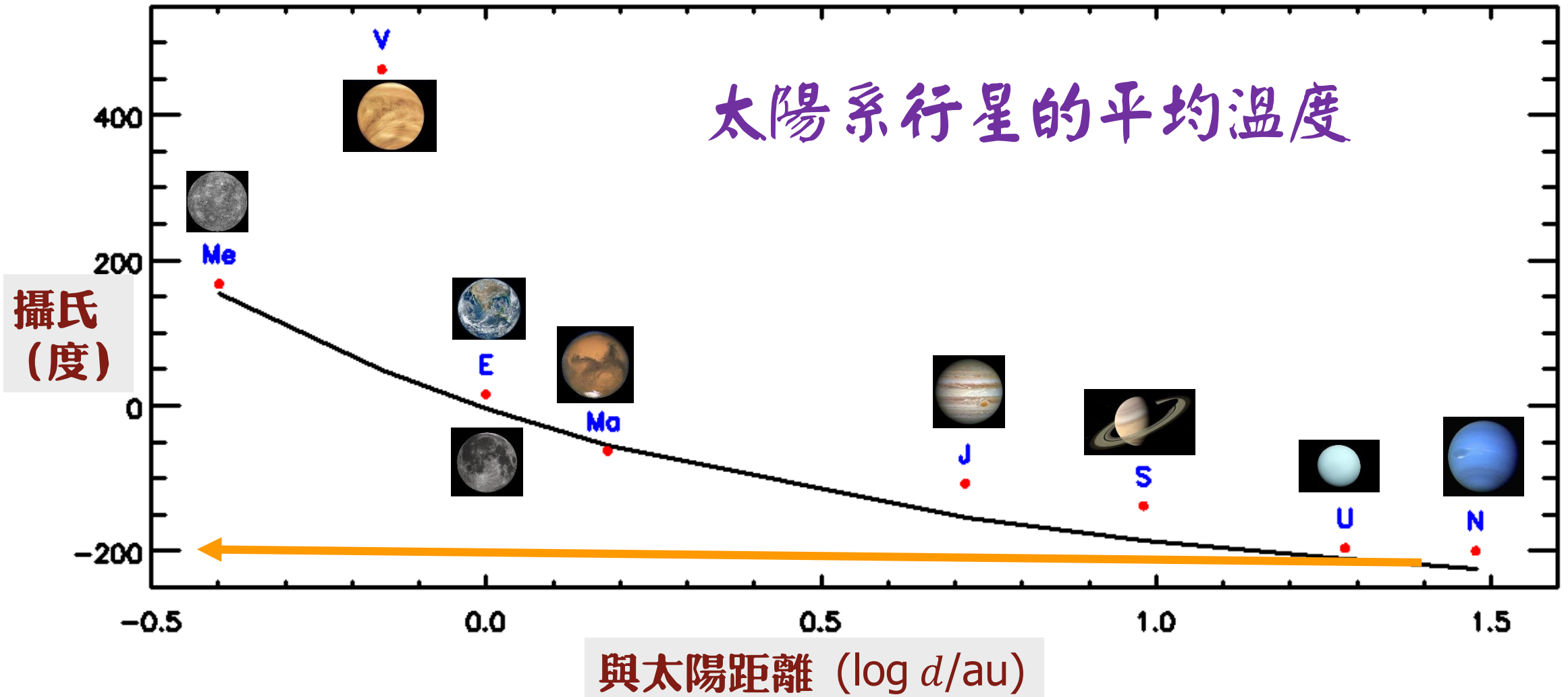
以太陽來說，如果帶入地球的參數 $A=0.3$ ，
預期 $T = 254 \text{ K} \approx -20 \text{ K} \dots$ 遠在冰點以下
實際上地球平均溫度 $\approx +15 \text{ K}$

這是溫室效應的結果！

習題：恆星理論認為太陽年輕時，光度比現在微弱些，所以地球當時應該冷得多，但是地質資料沒有這樣的證據 ...
(The Young Sun Paradox)

行星	水	金	地	火	木	土	天王	海王
太陽距離 (au)	0.4	0.7	1.0	1.5	5.2	9.6	19.2	30.1
反照率	0.1	0.9	0.3	0.25	0.3	0.3	0.3	0.3
預期溫度 (°C)	16 2	-85	-18	-60	-161	-19 0	-215	-226
實際均溫 (°C)	16 7	462	15	-63	-108	-139	-197	-201

太陽系行星的平均溫度



水 金 地 火 木 土 天 海

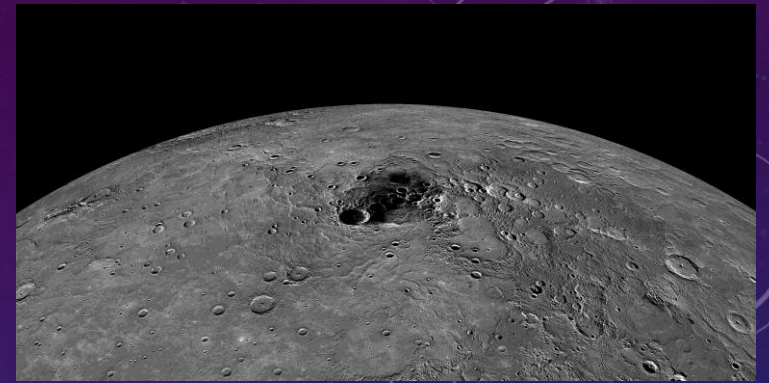
水星 (Mercury)

$a = 0.31 \sim 0.47 \text{ au}$; $T = -220^\circ\text{C} \sim 427^\circ\text{C}$

$P_{\text{地表大氣}} \lesssim 0.5 \text{ Pa}$

極區地下可能有水冰（來自行星內部，或外部撞擊）

極少量水汽



金星 (Venus)

$a = 0.72 \sim 0.73 \text{ au}$; $T = 464^\circ\text{C}$

$P_{\text{地表大氣}} = 93 \text{ bar} = 9.3 \text{ MPa} = 92 \text{ atm}$; 主要 CO_2 ，水汽 0.002%

地球 (Earth)

地球與太陽距離恰當，本身夠大以致引力抓住足夠大氣，地表因此有大量液態水

地球海水占整個地球質量 $1/4400$ ，比太陽系任何天體都多

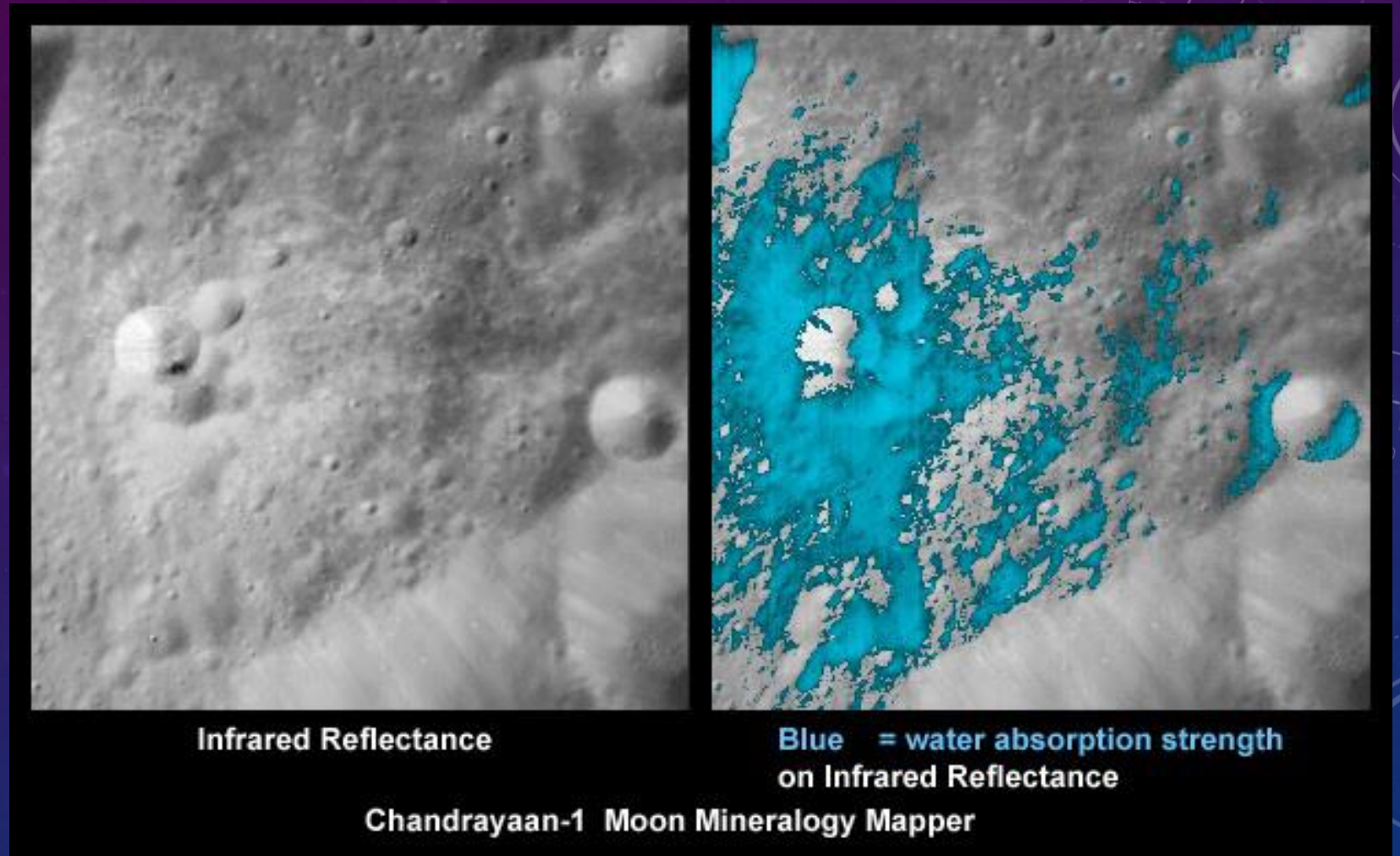
這些水怎麼來的？彗星、小行星撞擊？火星、月球也被撞呀

同位素 → 小行星 **main-belt comets or active asteroids**

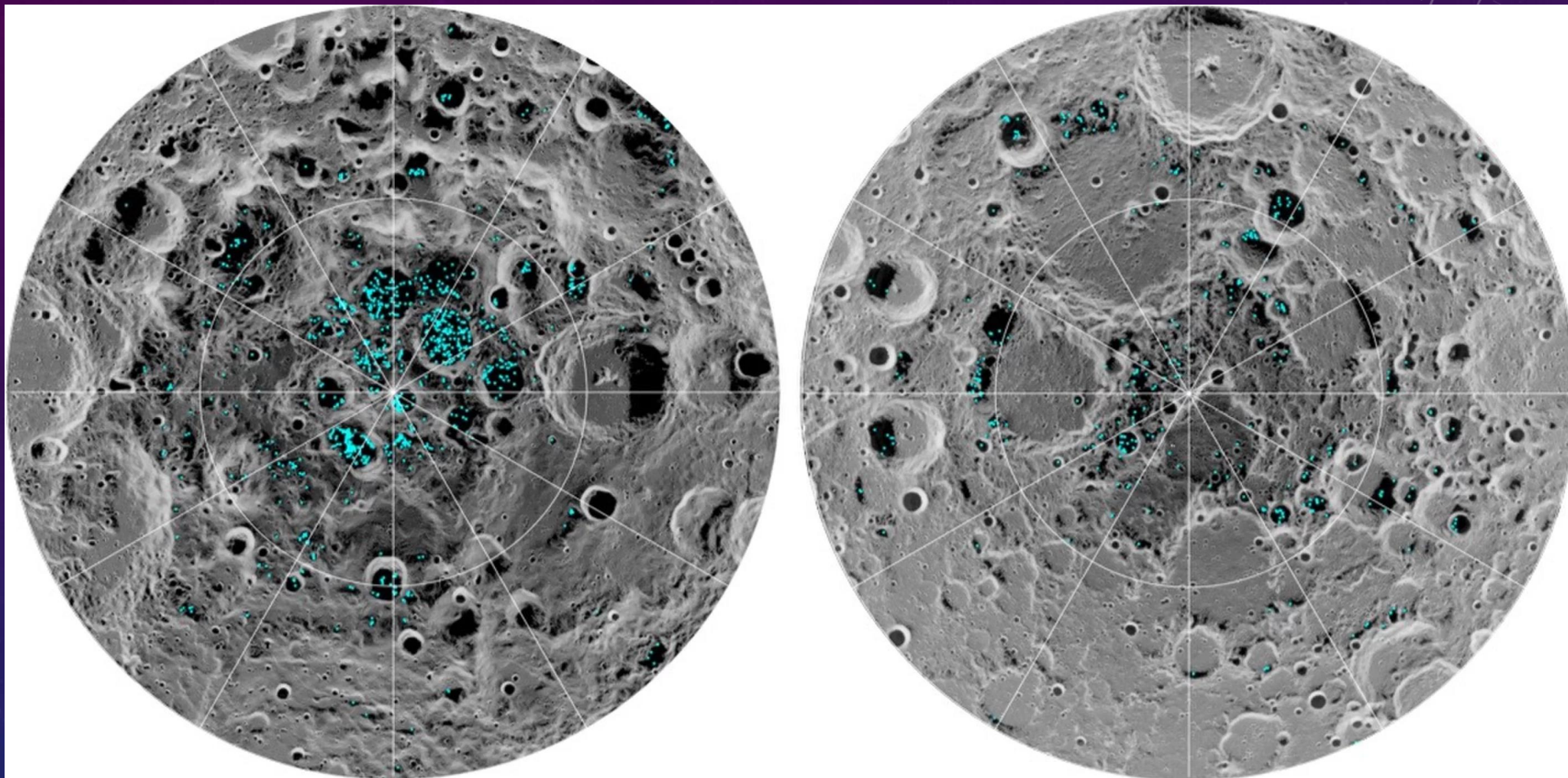
小行星的軌道，彗星的組成（都在木星軌道之內）

e.g., 7968 Elst-Pizarro 小行星 → 133P/Elst-Pizarro

月球 (Moon)



2009 印度太空機構 ISRO (The Indian Space Research Organization) 搭載美國 NASA Moon Mineralogy Mapper (M^3) 偵測到月球表面波長 $2.8\sim 3.0$ micron 的水吸收譜帶



2018年 NASA 確認 M³ 觀測到月球兩極有水冰



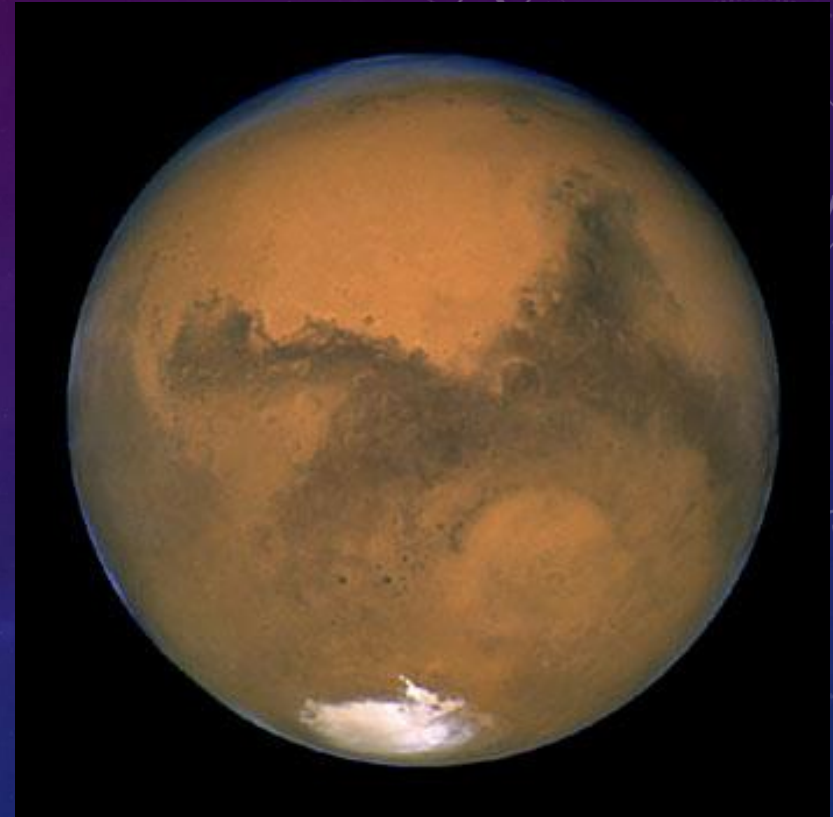
2020年 NASA SOFIA 觀察到即使向陽面也有水（雖然含量只有薩哈拉沙漠的百分之一）

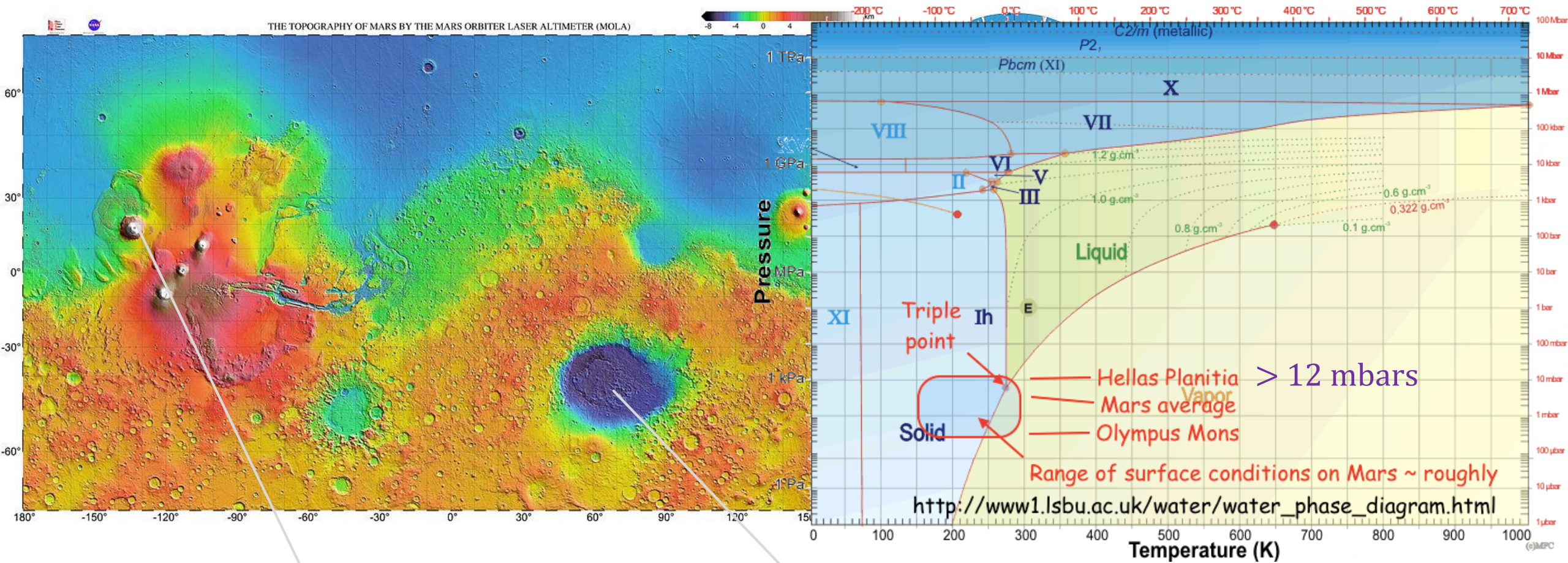
來源：撞擊的彗星、小行星，或是太陽風氫氣（質子）撞擊月面含氧礦物

<https://youtu.be/U70y8ypCbyA>

火星 (Mars)

- **紅色**外觀源於土壤及大氣中的氧化鐵 (鐵鏽)
- ✓ 直徑 6792 公里 = 地球 53%
- ✓ 質量為地球 1/10
- ✓ 自轉軸傾斜24度，有季節變化，兩極有冰 → **極帽** (polar caps)
- 二顆小衛星 (< 10公里)，Phobos ('fear') 及 Deimos ('panic') 形狀皆不規則，為攫獲之小行星；Phobos 越來越接近火星
- 表面大氣壓 = 6.518 millibars





Olympus Mons
 (火表最高點；22 km high;
 134W,18N)

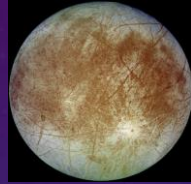
Hellas Planitia
 (火表最低點；7 km deep;
 70E, 43S)；



Residual water ice inside an unnamed impact crater on Vastitas Borealis, a broad plain that covers much of Mars' far northern latitudes. Credit: ESA/ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

巨型行星擁有眾多衛星具有岩石表面（或是矮行星），可以撐托海洋，即使溫度低於冰點，但在覆蓋表面的冰層之下，仍可能有海洋存在。

歐羅巴 (Europa) 木衛二



木星強大潮汐力加熱；冰層20 km 之下可能有龐大海洋直徑只有地球1/4，但海水總量可能是地球2倍

甘尼米德 (Ganymede) 木衛三

太陽系最大衛星，沒有大氣，但有磁場

卡利斯多 (Callisto) 木衛四

地下冰層厚達100公里，之下有200公里深的海洋？

埃歐 (Io) 木衛一

活躍地質活動 >400座活火山
地下有岩漿海

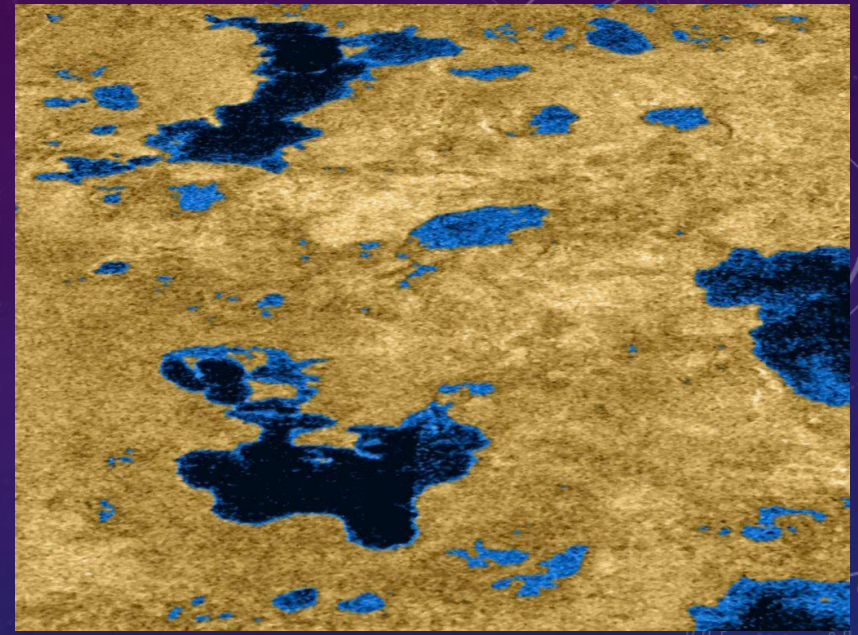
泰坦 (Titan) 土衛六

大氣是地球1.5倍，成分幾乎都是氮氣 (95~98%)

表面有甲烷構成的湖泊；地表之下50公里就有海洋 → 複雜的有機化學，與早期地球相仿，適合生物發展

如果甲烷的湖泊中有生物，它們吸入氫分子（而非氧），以乙炔代謝（而非葡萄糖），然後呼出甲烷（而非二氧化碳）

地球生物以水為溶劑，土衛六上面的生物，則說不定利用甲烷或乙烷為溶劑，或以甲烷為化學反應的細胞膜



卡西尼太空船飛越泰坦時利用雷達偵測到表面由甲烷構成的湖泊 (NASA)

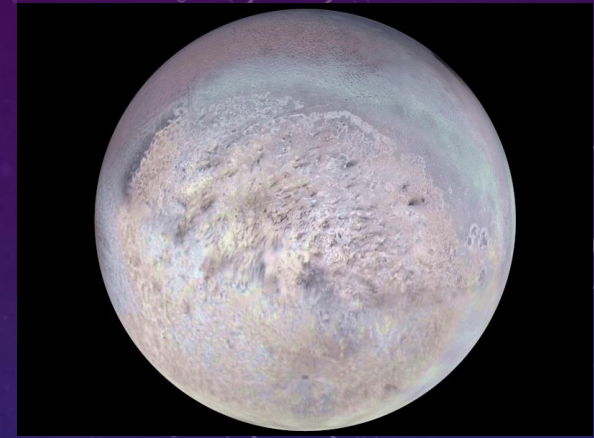
特里同 (Triton) 海衛一

公轉與海王星自轉相反 → 古伯帶中的矮行星？

陽光微弱，溫度 -235°C

地球半徑 21% (月球為 27%)

→ 內部放射性元素提供熱能維持大規模地下海洋；
表面充滿固態氮；偶有氮氣噴泉



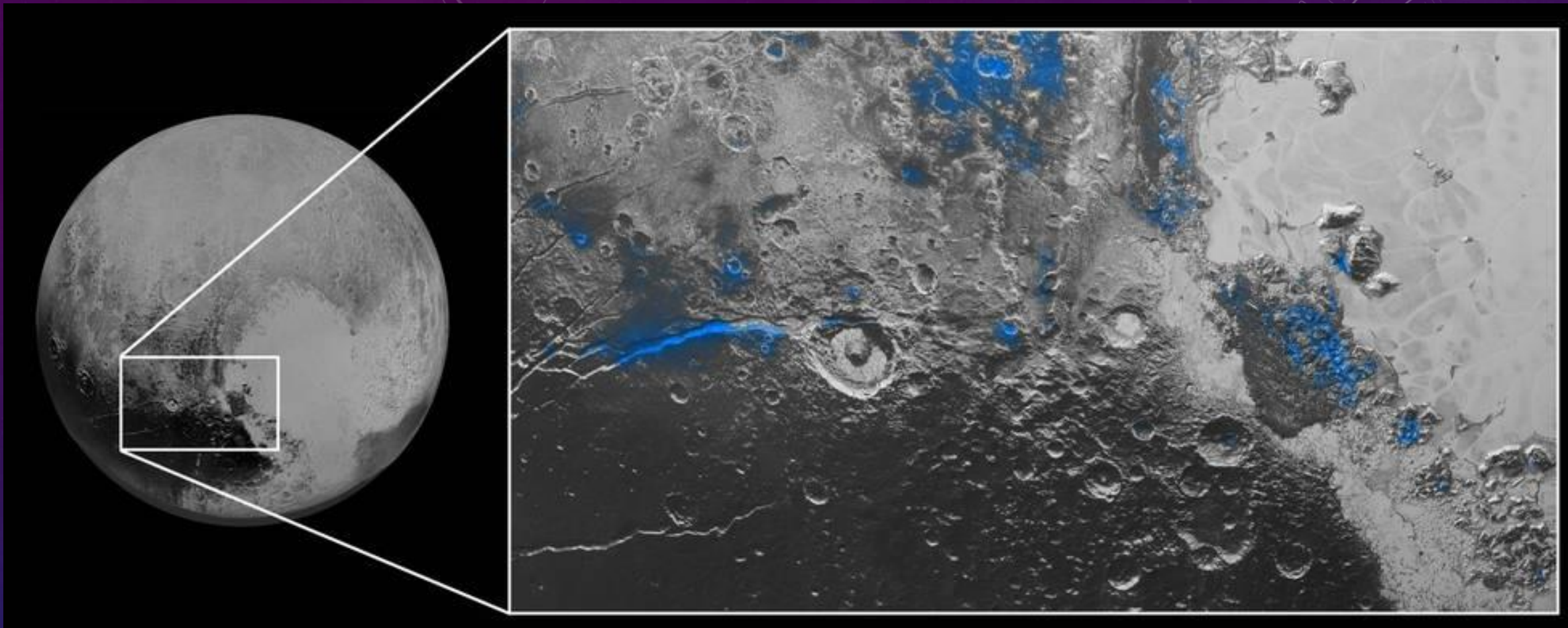
Voyager 2

冥王星 (Pluto) 矮行星

30~49 au；地球半徑 19% 溫度 -229°C

表面滿是冰山、固態氮與固態甲烷；地質活躍，
可能是內部放射線元素產生的熱能，地下有超過
100公里深的液態海洋？





冥王星是太陽系天體當中，表面亮度與顏色反差最大者（有如 **Iapetus**）… 藍色標示水冰所在

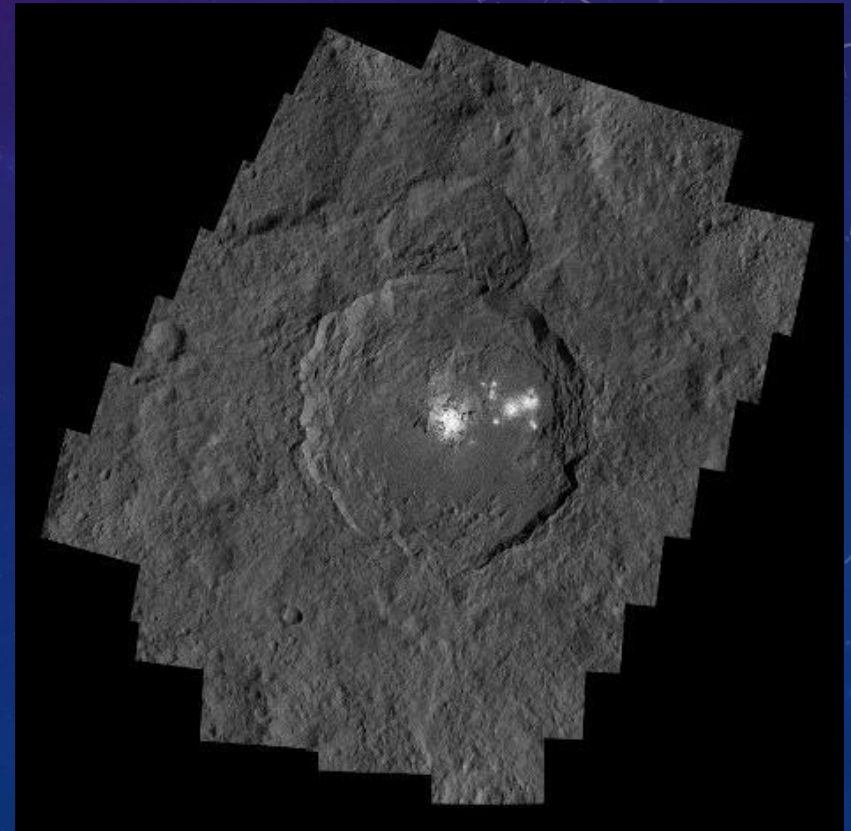
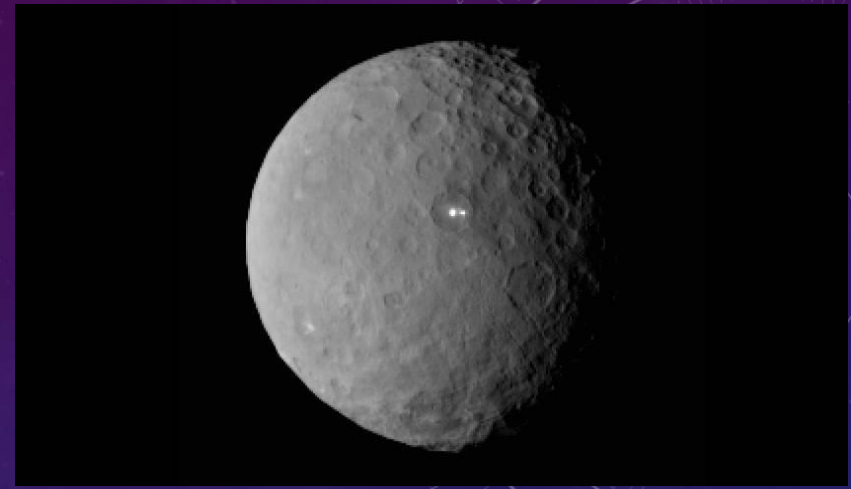
[Animation video](#)

離太陽這麼遠，溫度這麼低，怎麼還能這麼活躍？

穀神星 (Ceres) 矮行星

早年溫度高，可能富含水，表面的碳酸鈣 (Na_2CO_3) 或許就是殘存的證據

目前冰層之下可能有液態海洋



「曙光號」飛過穀神星時，拍攝到表面白色亮點，目前已知成分為碳酸鈉，但成因仍不明
(NASANASANASA)

系外行星與適居區

怎麼知道是否有海洋？

理論預期

— Location, location, location! 地點、地點，還是地點

— 質量夠大

實際觀測 凌星與沒有凌星的光譜差別

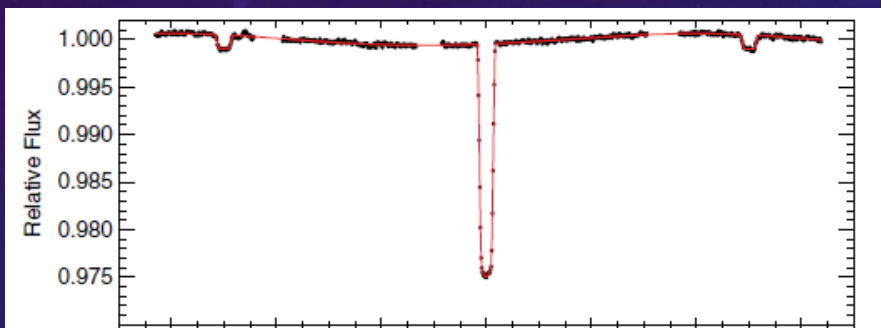
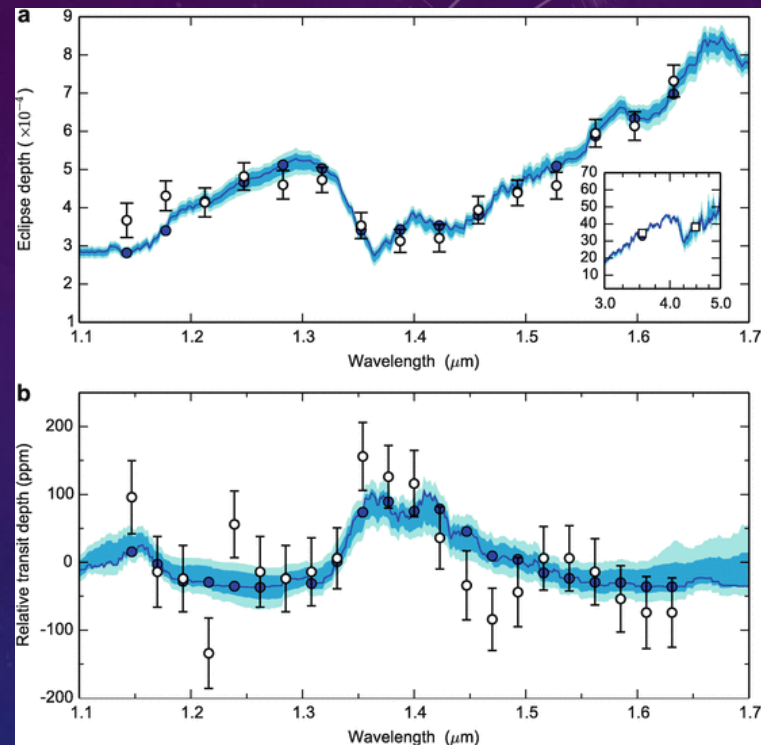
Transit

(Secondary)
occultation

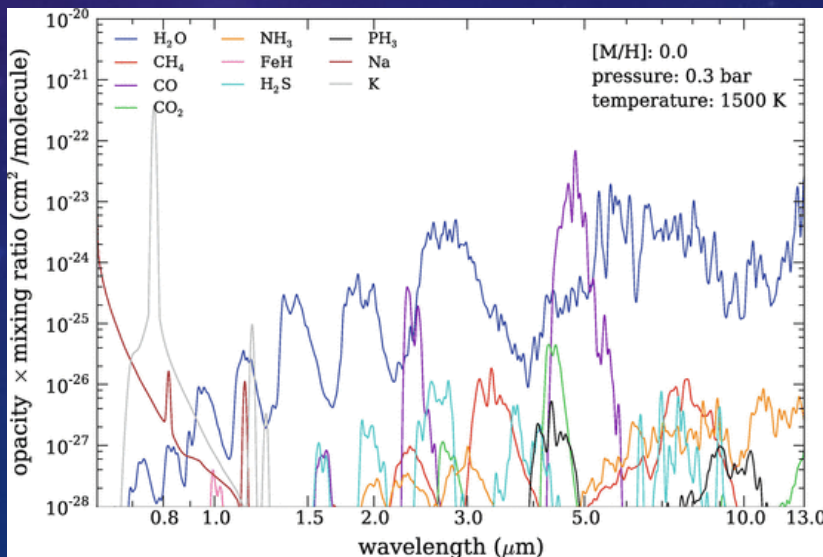
熱輻射光譜

WASP-43b

透射光譜



HD 189733b



太陽成分模擬光譜
(不透明度)

Kreidberg 2017
Handbook of Exoplanets, pp 1--23



喝水、聽海，在地球上多麼稀疏平常

科學家一貫求知，要探天外之水，太空之海，
而這些探索才正要開始