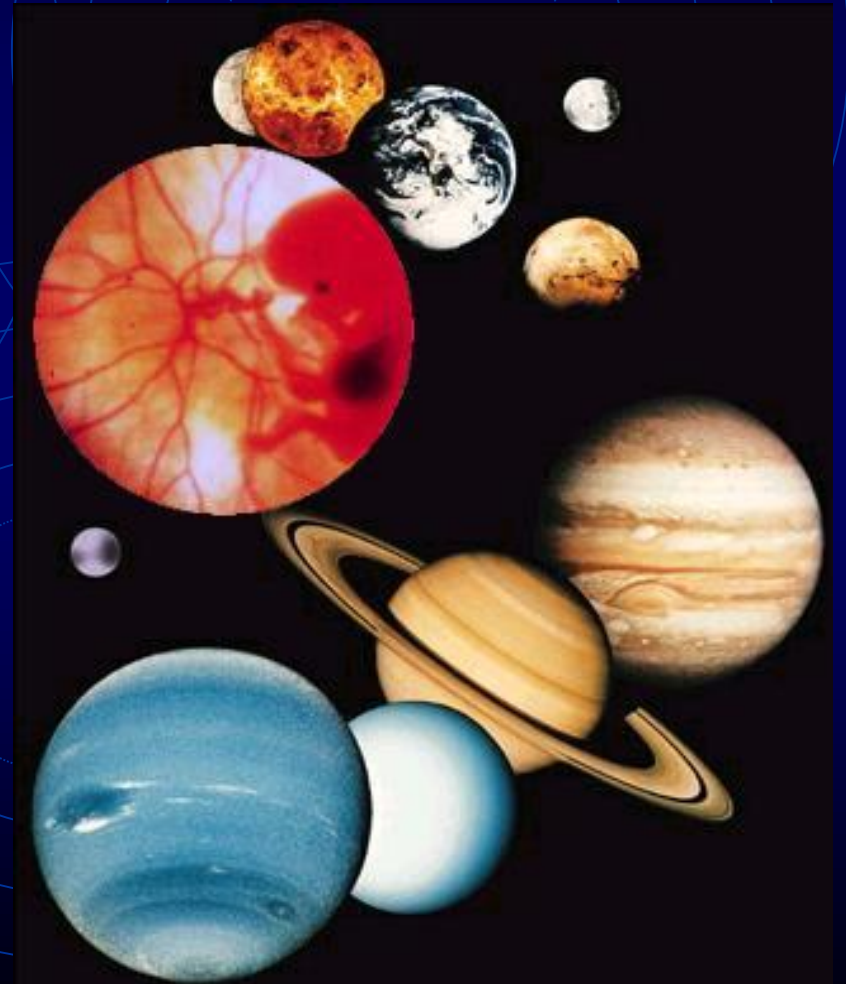
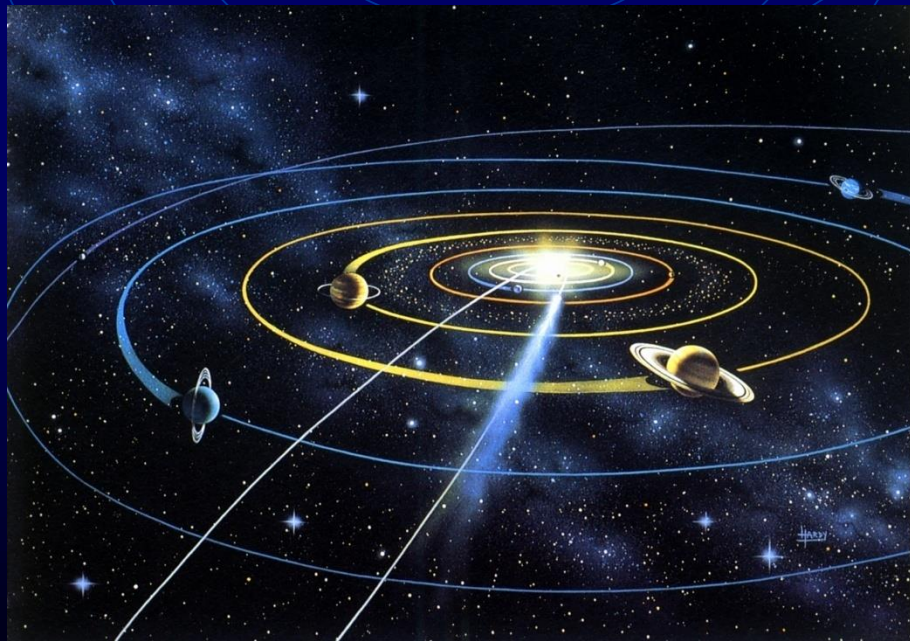


Comparative Planetology

--- Our Solar System

- 太陽 + 行星、衛星、
• • • 、灰塵、雲氣

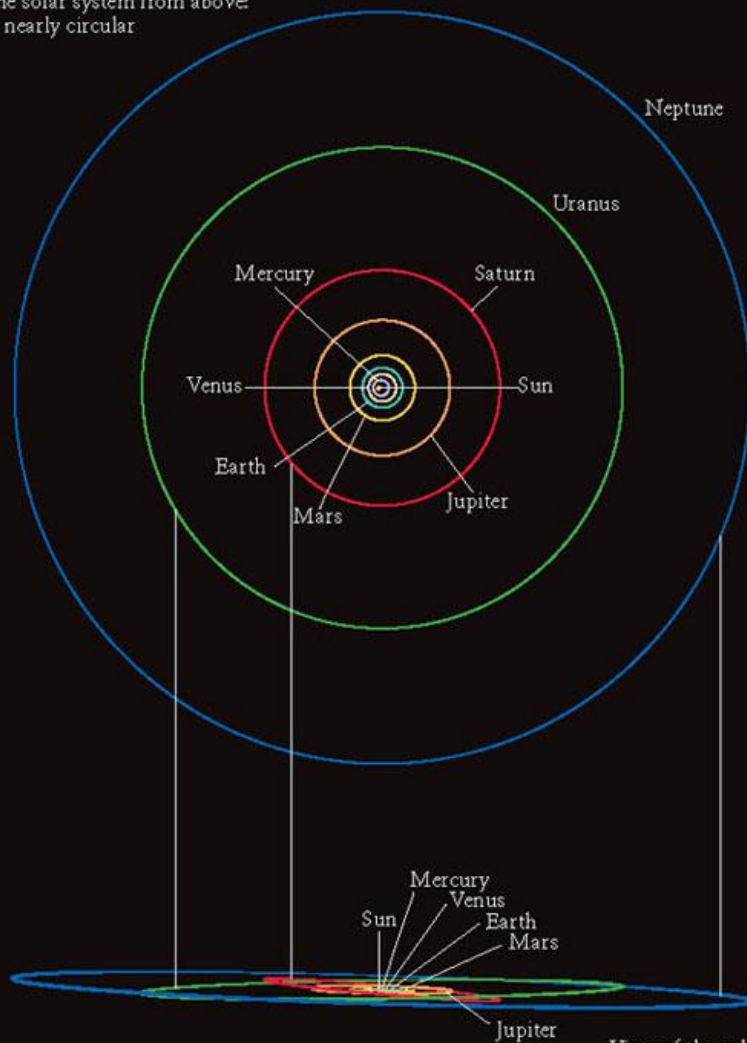


軌道

井然有序的太陽系行星系統

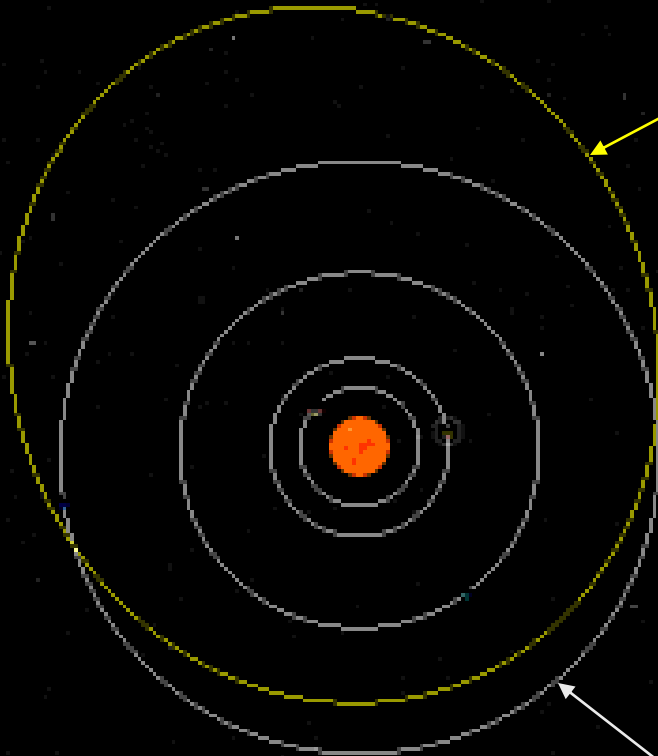
- 軌道幾乎共面
- 非常接近圓形的橢圓軌道
- 自轉與公轉同向
- 按照離日距離，行星的性質分成兩大類

View of the solar system from above:
orbits are nearly circular



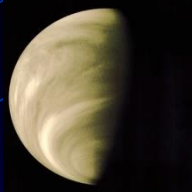
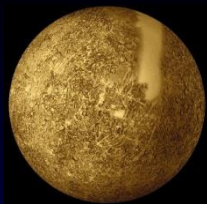
View of the solar system from the side:
orbits are all in nearly the same plane

冥王星軌道



海王星軌道

各式各樣的行星



離母恆星距離近 → 熱；距離遠 → 冷

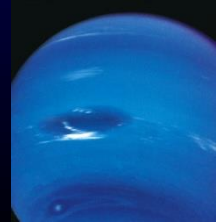
行星質量愈大 → 愈抓得住（輕的）氣體

↙ 內圍的水星、金星、地球（+月球）、火星
軌道接近、質量小、體積小、主要是岩石、
有陸地、衛星少

類地行星 (terrestrial planets)

↙ 靠外圍的木星、土星、天王星、海王星
軌道遠離、質量大、體積大、主要是氣體、
沒有陸地、衛星多

類木行星 (jovian planets)



Titius-Bode Rule?

- A series to describe the distance of a planet from the Sun

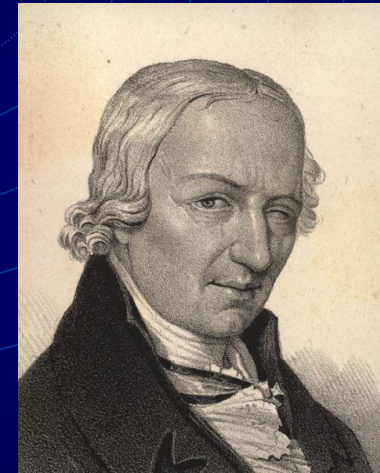
0, 3, 6, 12, 24, 48, 96, 192, ... + 4 ... /10

or $a = 0.4 + 0.3 \times 2^m$



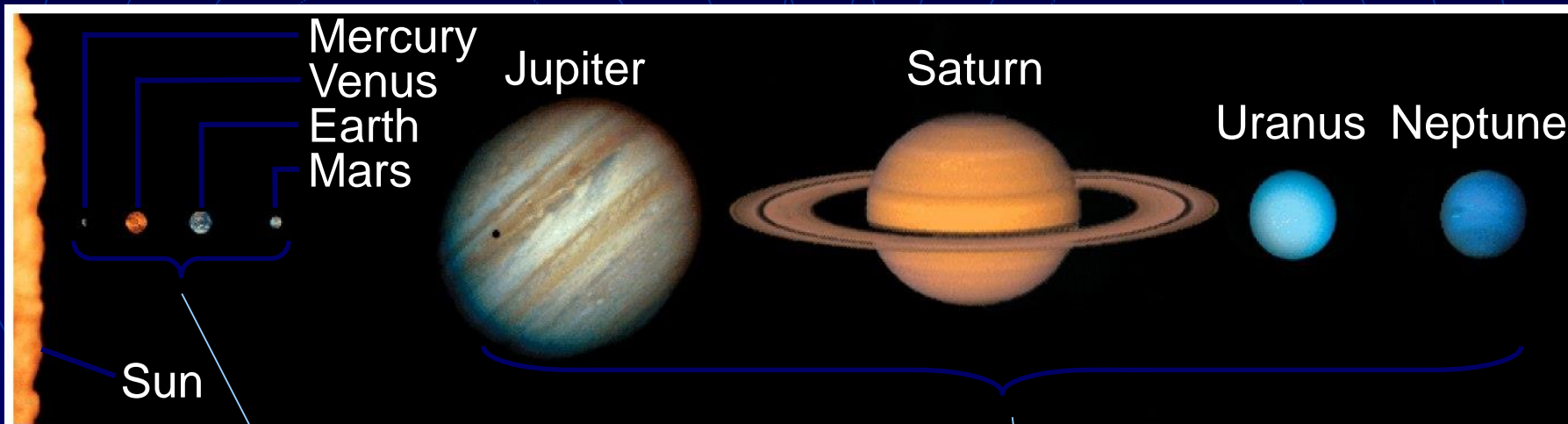
Johann Daniel Titius

Planet		T-B Rule	Real Distance (AU)
Mercury	0	0.4	0.39
Venus	1	0.7	0.72
Earth	2	1.0	1.00
Mars	4	1.6	1.52
Ceres	8	2.8	2.77
Jupiter	16	5.2	5.20
Saturn	32	10.0	9.54
Uranus	64	19.6	19.2
Neptune	128	38.8	30.06
Pluto	256	77.2	39.44



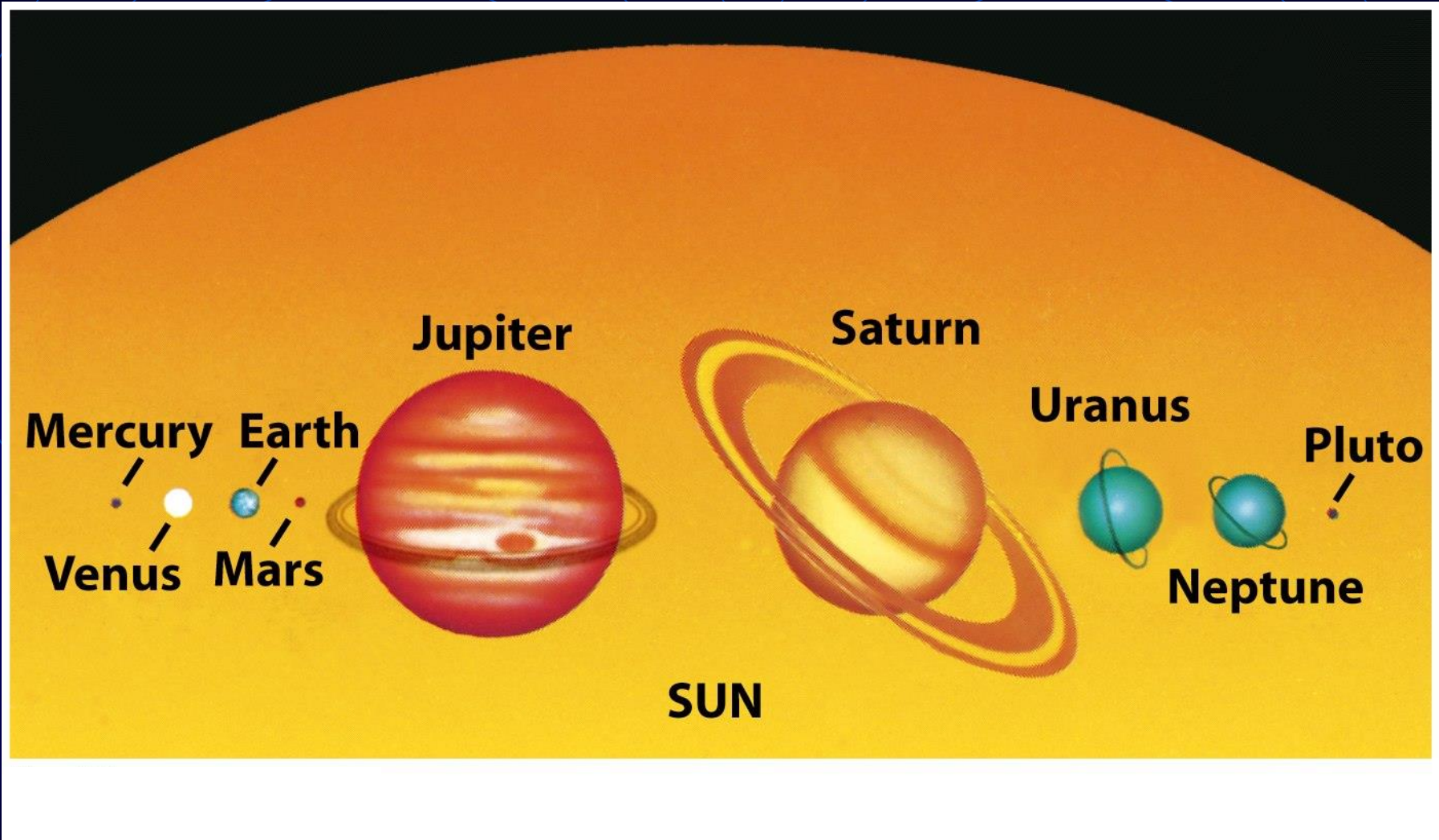
Johann Elert Bode

就目前所知
沒有理論根據



四顆類地行星
體積小、密度
高，主要由岩
石組成

四顆類木行星
體積大、密度
低，主要由氣
體組成



Physical Characteristics of the Planets

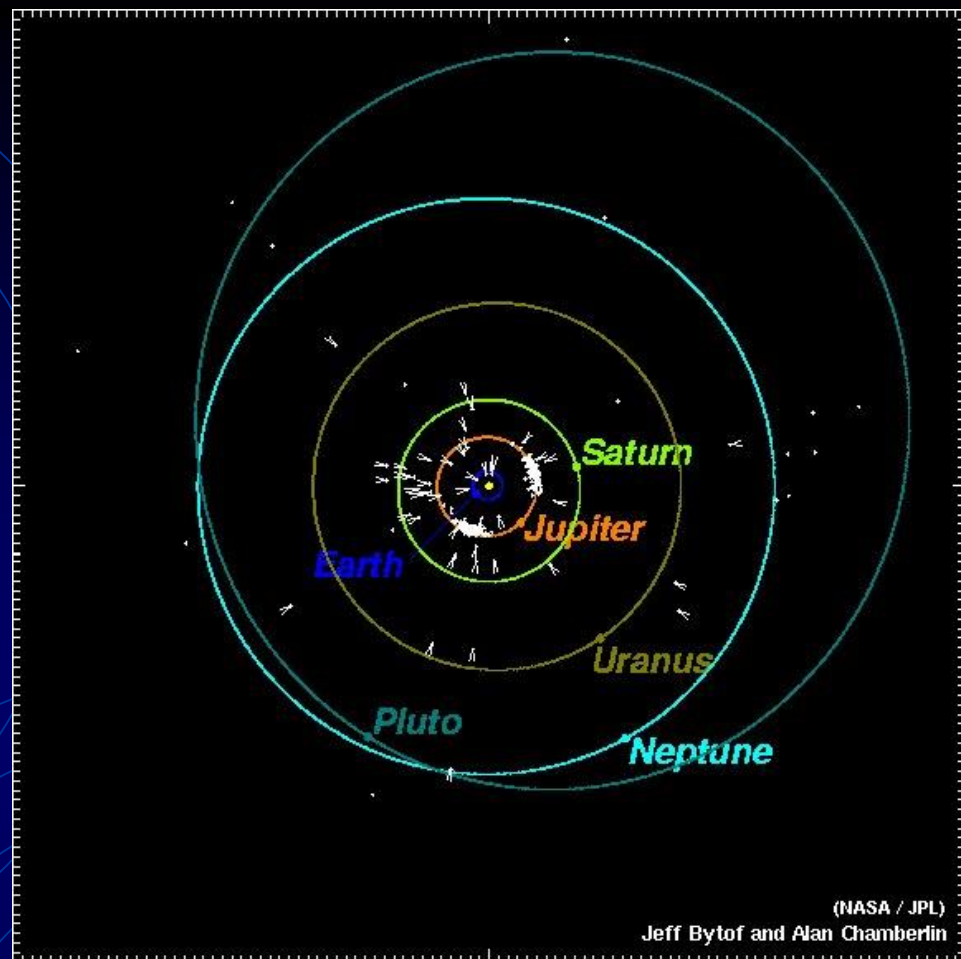
	Diameter		Mass		Average density
	(km)	(Earth = 1)	(kg)	(Earth = 1)	(kg/m ³)
Mercury	4,878	0.38	3.3×10^{23}	0.06	5430
Venus	12,100	0.95	4.9×10^{24}	0.81	5250
Earth	12,756	1.00	6.0×10^{24}	1.00	5520
Mars	6,786	0.53	6.4×10^{23}	0.11	3950
Jupiter	142,984	11.21	1.9×10^{27}	317.94	1330
Saturn	120,536	9.45	5.7×10^{26}	95.18	690
Uranus	51,118	4.01	8.7×10^{25}	14.53	1290
Neptune	49,528	3.88	1.0×10^{26}	17.14	1640
Pluto	2,300	0.18	1.3×10^{22}	0.002	2030

類地行星 水星、金星、地球、（月球）、火星
 離太陽近 (< 2 AU)、彼此距離近、質量小、
 體積小、成分主要是岩石、有陸地、衛星數目少

類木行星 木星、土星、天王星、海王星
 距離太陽遠 (> 5 AU)、彼此距離遠、質量大、
 體積大、成分主要是氣體、無陸地、衛星數目多

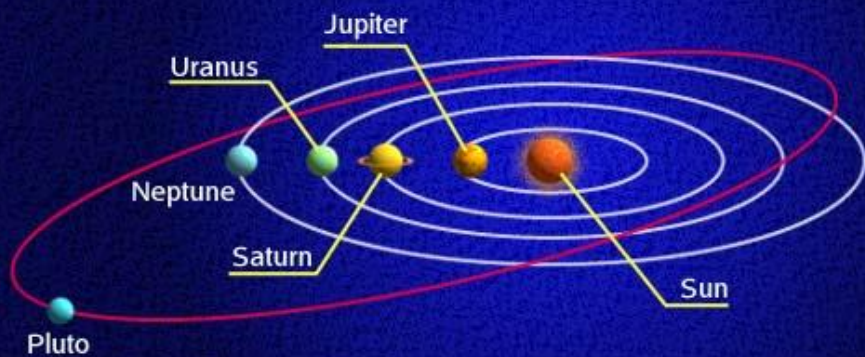
冥王星的橢圓軌道比其他行星狹長，且與黃道面傾角也較大(17度)

1979年與1999年之間，冥王星比海王星還更接近太陽



(NASA / JPL)
Jeff Bytof and Alan Chamberlin

Orbit of Pluto



Pluto 是行星中的異類，已經於2006夏天從行星除名，現在歸類於「矮行星」(dwarf planet)

□ 矮行星必須

(1) 環繞太陽；

(2) 質量夠大到成為球體；

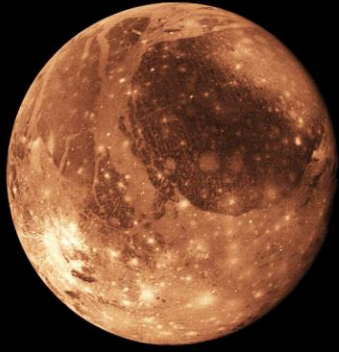
(3) 但仍未清除軌道周圍的小型天體；

(4) 不是衛星

□ 矮行星不是「小行星」(minor planets)

□ 目前發現5顆 dwarf planets，包括 Ceres, Pluto, Haumea, Makemake, 以及 Eris

類木行星的大型衛星體積 \approx 類地行星



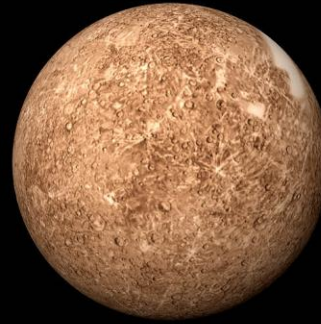
Ganymede

5262 km
(Jupiter)



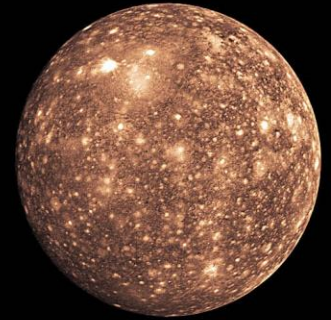
Titan

5150 km
(Saturn)



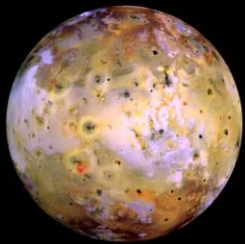
Mercury

4880 km



Callisto

4806 km
(Jupiter)



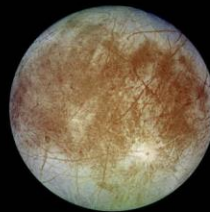
Io

3642 km
(Jupiter)



Moon

3476 km
(Earth)



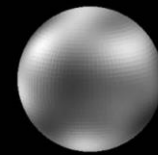
Europa

3138 km
(Jupiter)



Triton

2706 km
(Neptune)



Pluto

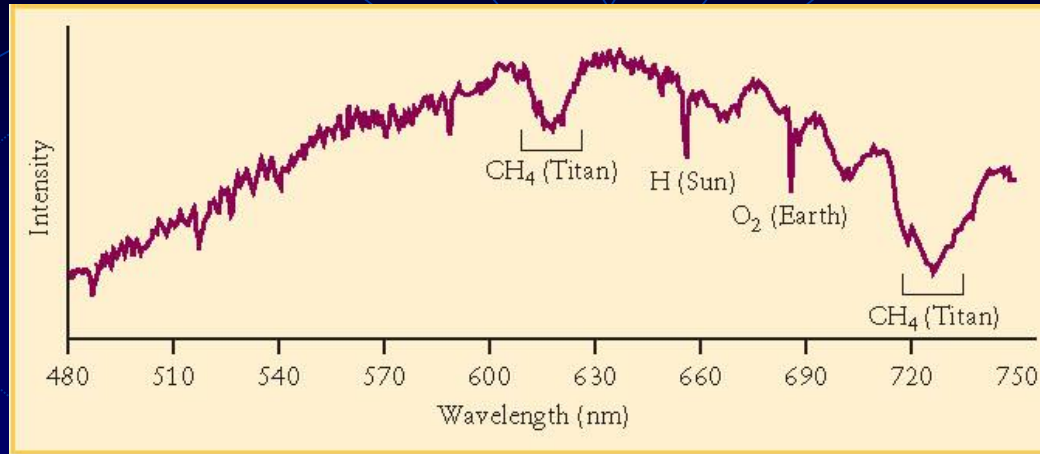
2300 km



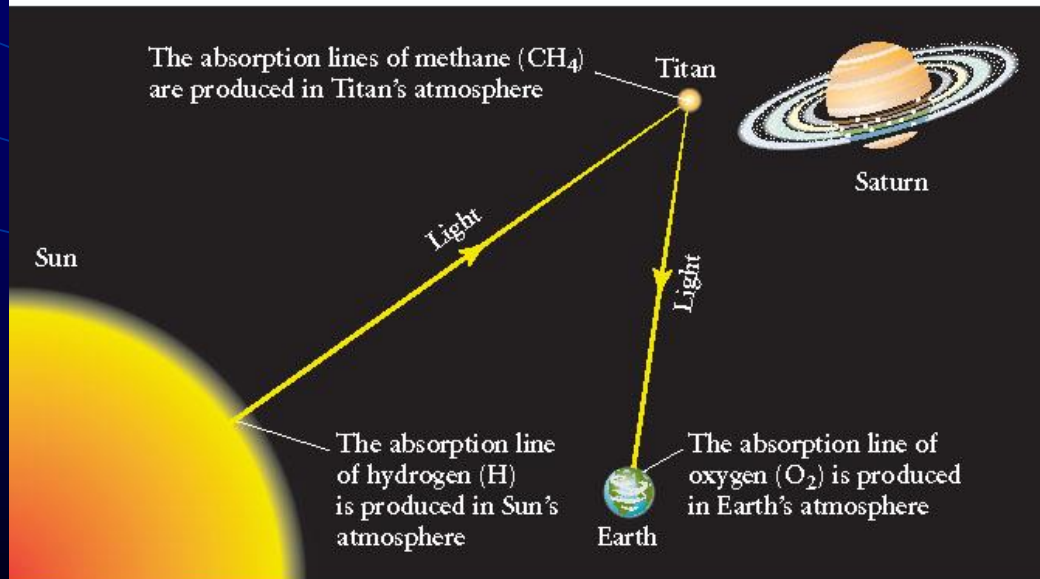
Titania

1580 km
(Uranus)

利用光譜研究天體成分

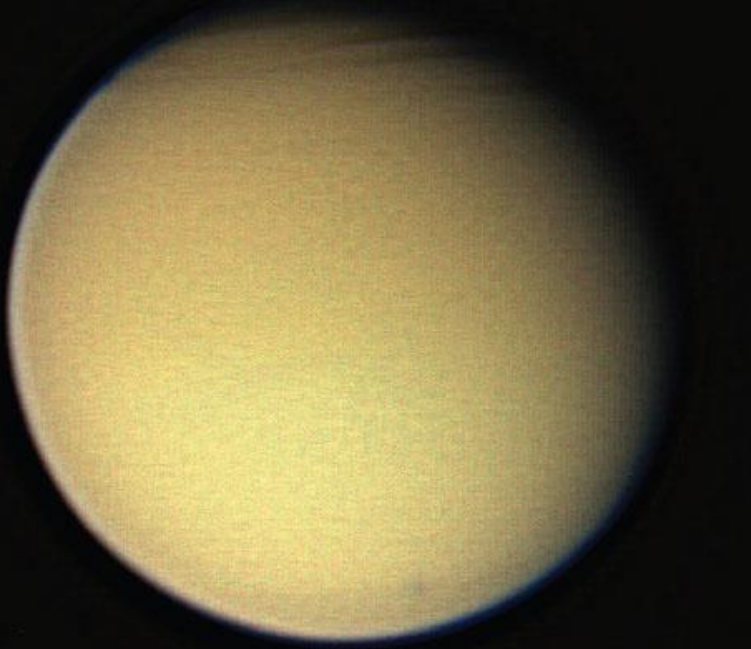


(b) The spectrum of sunlight reflected from Titan

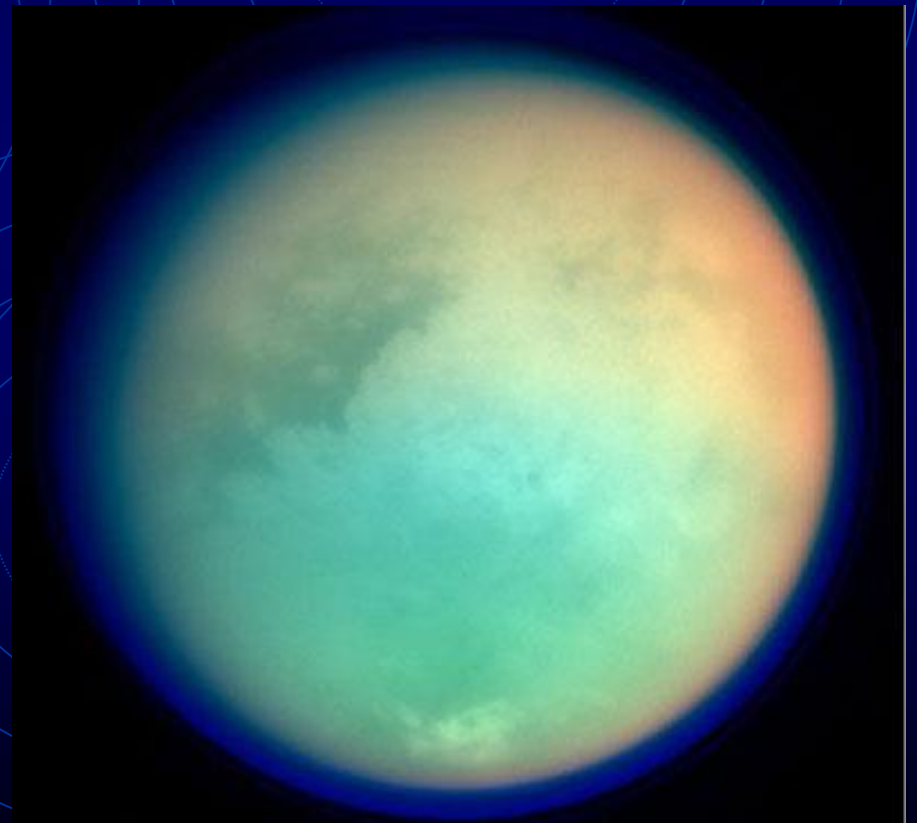


(c) Interpreting Titan's spectrum

泰坦 (Titan) 是土星的衛星，有濃厚大氣層，成分包含氮氣（97%）、甲烷，及其他碳水化合物

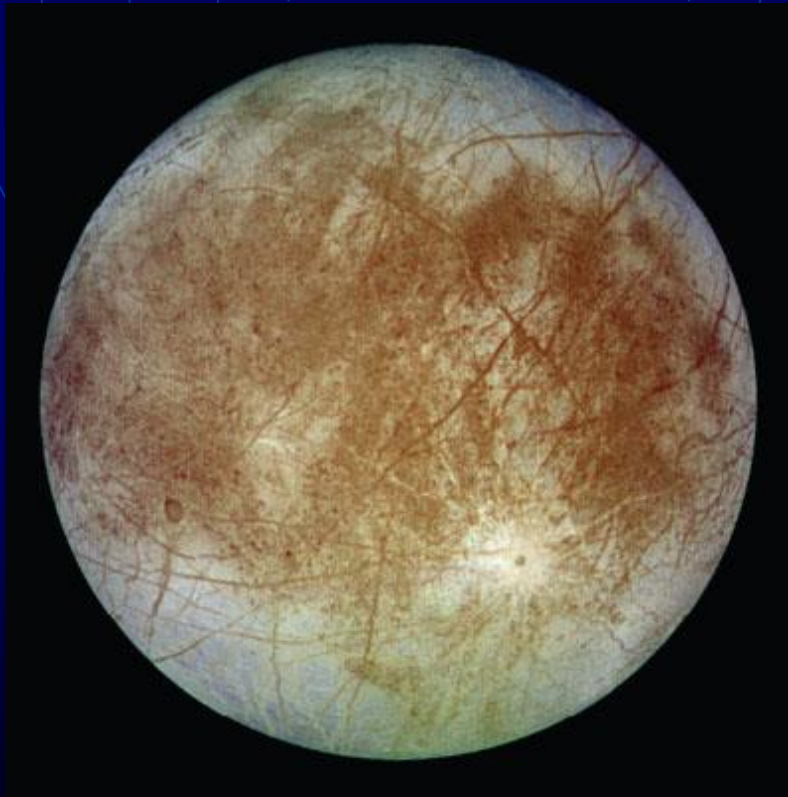


(a) Saturn's satellite Titan

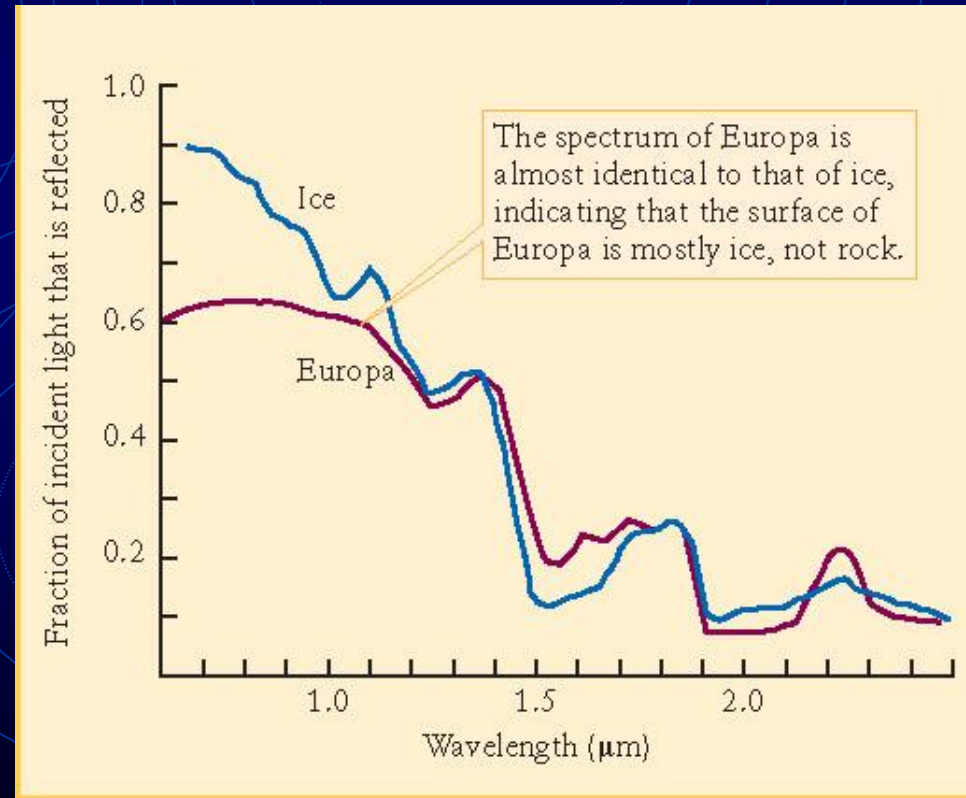


Cassini-Huygens

歐羅巴 (Europa) 是木星的衛星，沒有大氣，
分析歐羅巴反射的太陽紅外光發現其光譜
與水冰類似

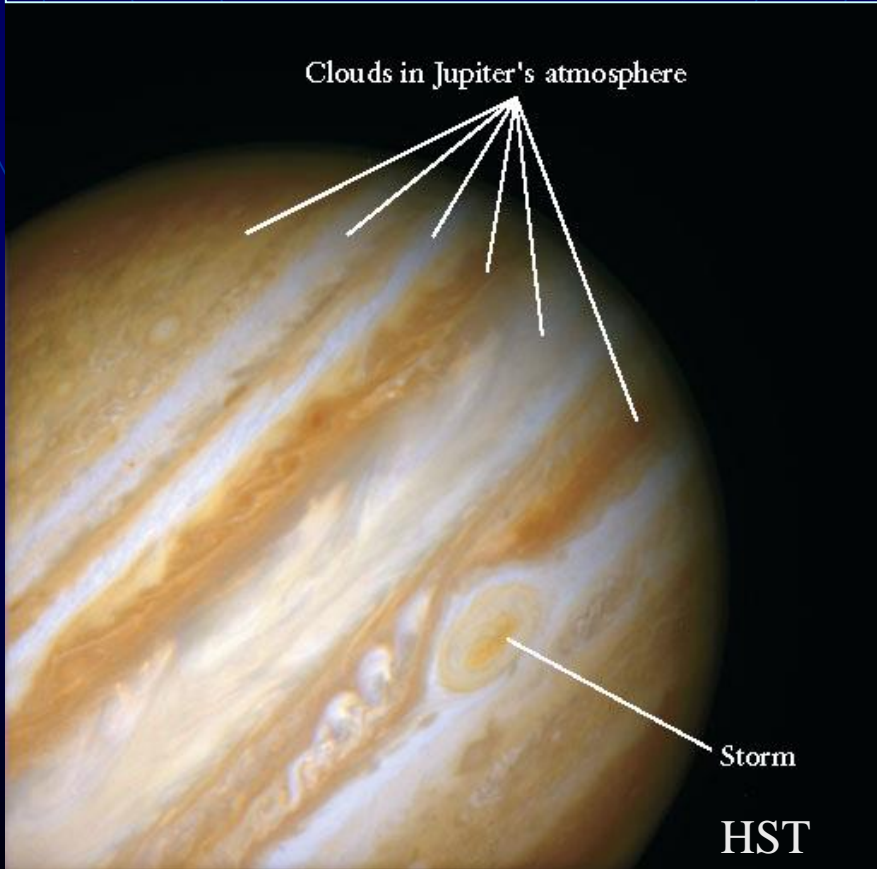


(a) Jupiter's moon Europa

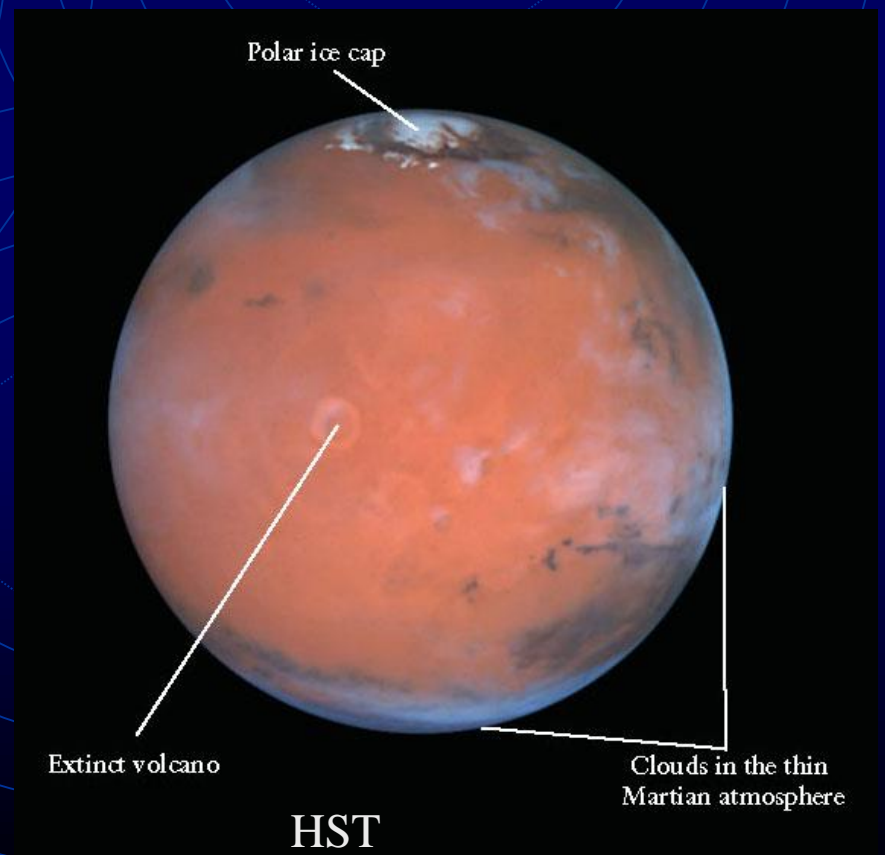


(b) The spectrum of light reflected from Europa

木星屬於類木行星，
主要由輕的元素（氫
與氦）組成。木星雲
層的顏色來自其他微
量元素



火星屬於類地行星，
主要由重的元素（例
如鐵、氧）組成。火
星只有稀薄的大氣，
紅色來自火星地表



天體的大氣

金星的大氣約為地球100倍

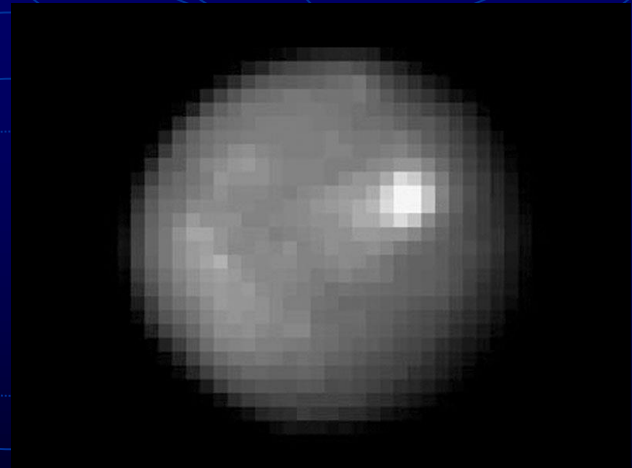
火星的大氣為地球百分之一

Q：天體怎麼樣才会有大氣？

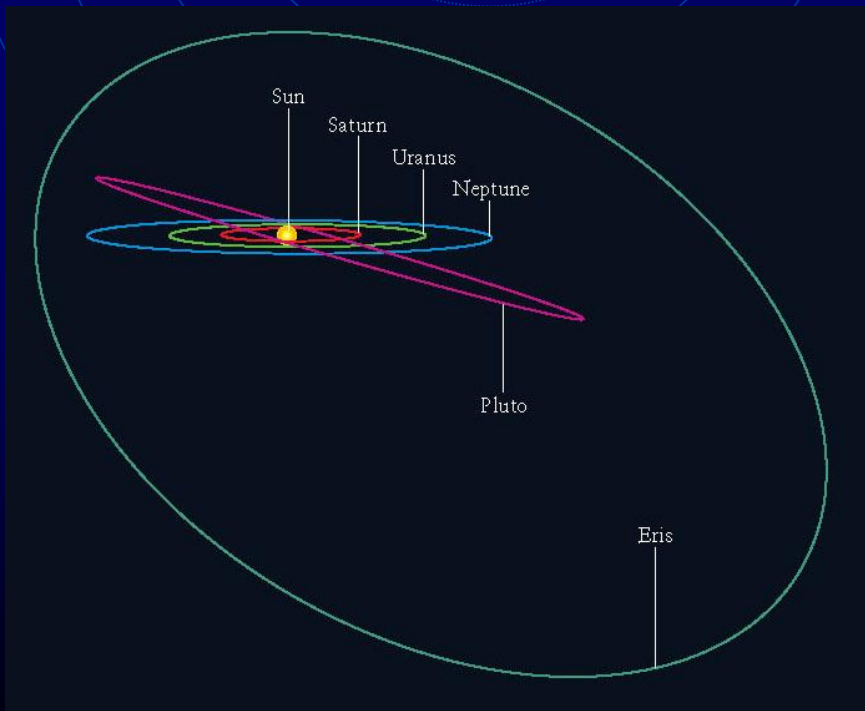
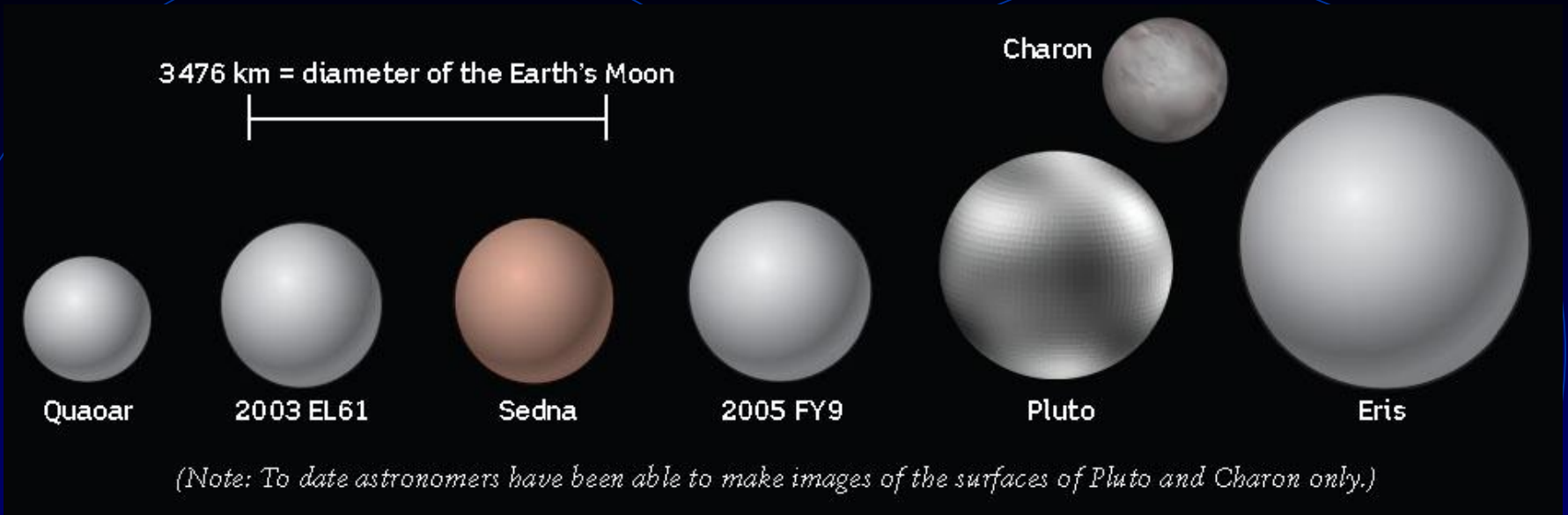
- 質量大（能夠抓住氣體）
- 溫度低（氣體運動速度低於逃脫速度）

Q：有沒有大氣又如何？

小行星 (asteroid) 主要分佈在火星與木星軌道之間，距離太陽 $2\sim 3.5$ AU，以帶狀分佈，稱為**小行星帶 (asteroid belt)**，它們體積很小。小行星與行星並沒有絕對分野，所以小行星的正式名稱稱為 **minor planets**。原來最大的小行星 Ceres（穀神星），直徑約 900 公里，現在歸類為矮行星

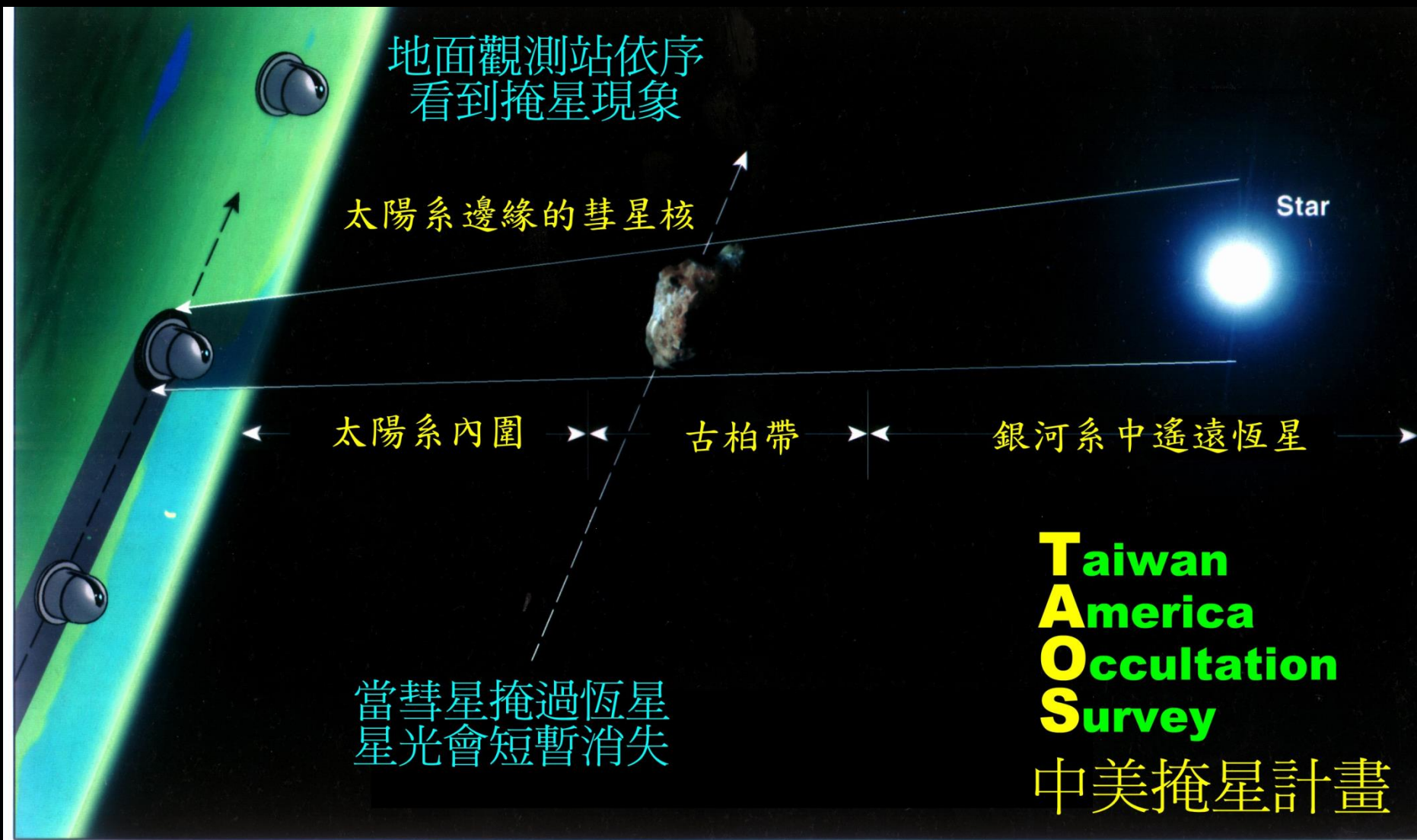


HST's view of Ceres



在海王星軌道之外還有為數眾多的小天體，稱為 trans-Neptunian objects，它們和小行星一樣呈帶狀分佈，稱為 **古柏帶 (Kuiper belt)**

TAOS will detect KBOs by stellar occultation





Earth



Ceres



The Moon

Copyright © Walter Myers
<http://www.arcadiastreet.com>

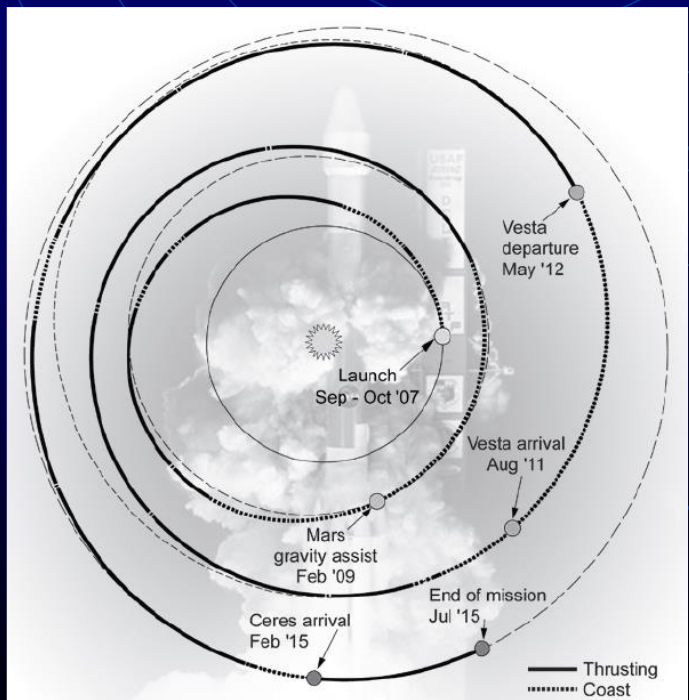
http://www.arcadiastreet.com/cgvistas/ceres_105.htm

Dawn (曙光號)

NASA's space mission to orbit
Ceres and Vesta (灶神星)
--- A journey to the beginning
of the Solar System



2007.09.28 liftoff by Delta

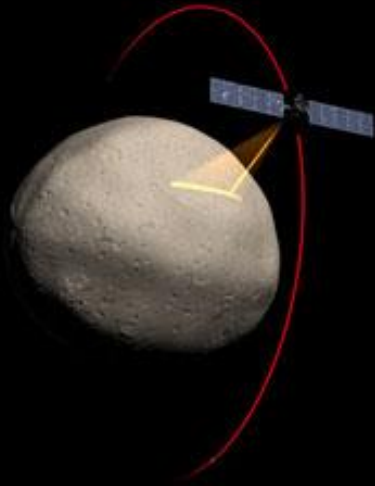


2007.10.09 --- *NASA's Dawn spacecraft successfully completed the first test of its ion propulsion system.*

2011.08 --- Vesta arrival

2015.02 --- Ceres arrival

Dawn at Vesta (artist concept)



Dawn at Ceres (artist concept)



富含冰體的小天體，接近太陽時，
會產生**彗星 (comet)** 現象



<http://www.twitter.com/CometISON2013>



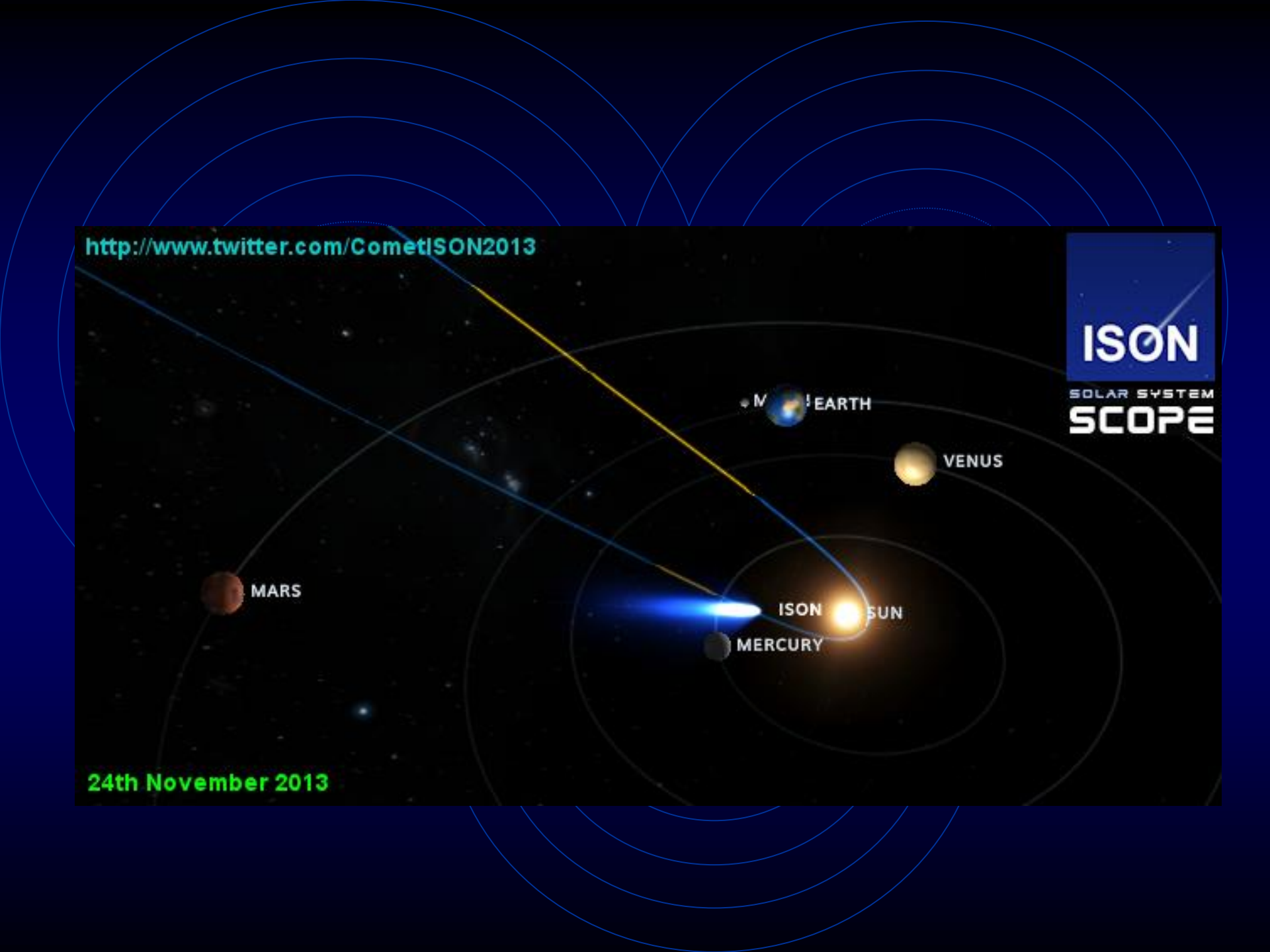
MARS

M EARTH

VENUS

ISON SUN
MERCURY

24th November 2013





Damian Peach /SkyandTelescope.com

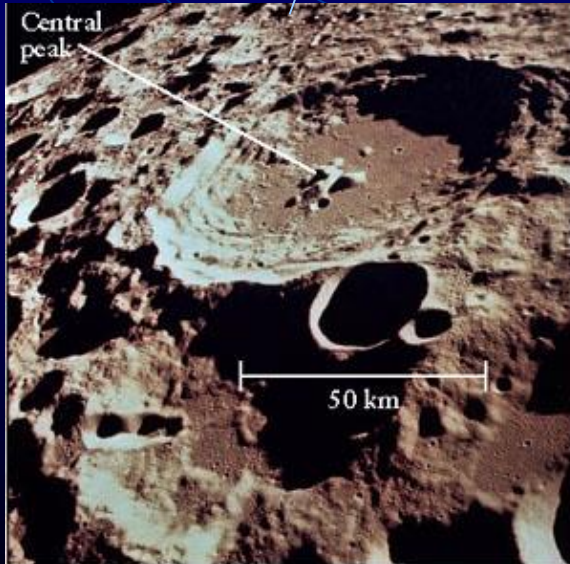
地表的這個隕石坑位於加拿大魁北克，年代超過2億年，經過冰河沖刷痕跡逐漸消退，目前只存約100公里直徑的環狀湖泊

行星際太空殘骸撞擊，可以估計表面的

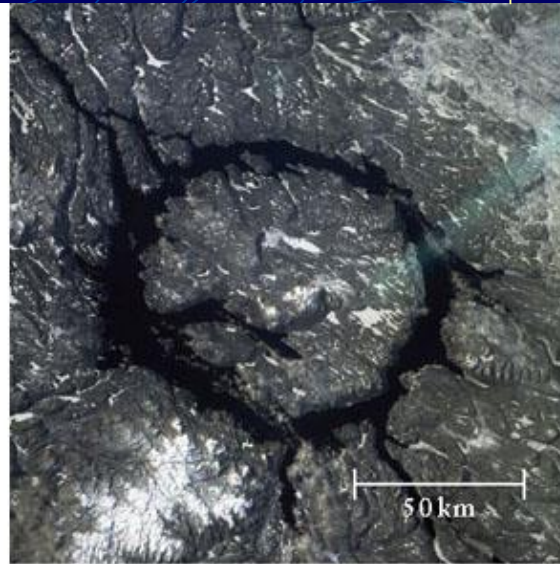
小行星

火星表面重疊的隕石坑，這個 Lowell Crater 直徑約200公里，位於火星南半球高地。上面可以看到乾冰屑。

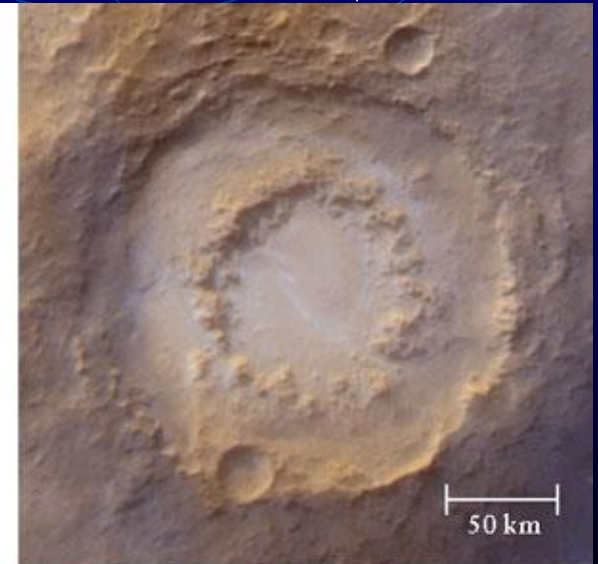
隕石坑，直徑約100公里，隕石坑直徑約80公里



(a) A crater on the Moon



(b) A crater on the Earth



(c) A crater on Mars

Q：為什麼月球的隕石坑都是圓形？

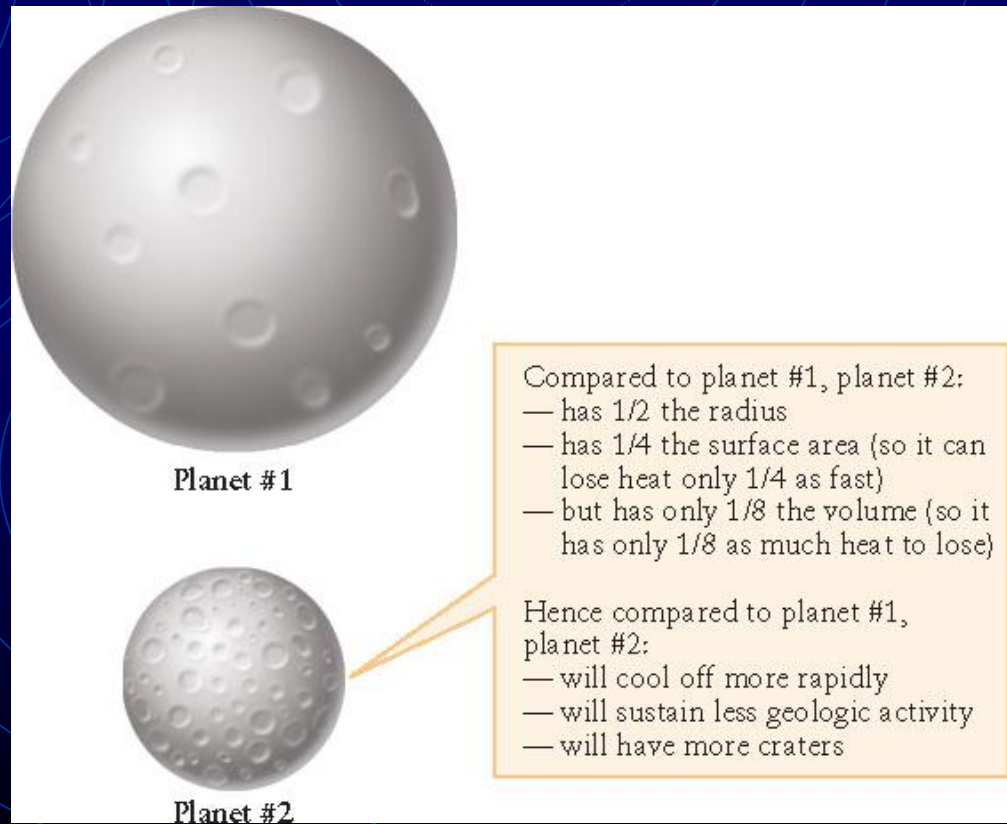
- 如果是隕石撞擊，除非是正面衝撞，否則應該有各種形狀才對...(1824 German astronomer Franz Gruithuisen)

不同天體的隕石坑

- 行星或衛星體積越小，能保有的內能越少
(為什麼?)

- 缺少地質活動
- 地質年齡越老
- 隕石坑越多

→ 利用行星或衛星表面隕石坑數量，估計地質年齡與地質活動的程度



太陽系高山比一比

地球 凱亞山 (Mauna Kea) 位於夏威夷的休眠火山，有很大一部分在海平面下，因此凱亞山其實比聖母峰 (Everest) 還要來得更高，山頂有許多大型望遠鏡 [10 km]

金星 馬特山 (Maat Mons) 淺坡上有綿延數百公里的熔岩，是凝固熔岩形成的典型盾狀火山

火星 奧林帕斯山 (Olympus Mons) 25 km 太陽系最高峰，可能是座活躍的盾狀火山，部分在數十億年前形成，部分僅有數百萬年的歷史 [25 km]

水星 卡洛里山脈 (Caloris Montes) 這座環形山是由造成卡洛里盆地 (Caloris Basin) 的巨大撞擊所產生，岩盤爆裂反彈後，落在周圍形成山脈 [2 km]

土衛六 (Titan) 末日火山 (Mount Doom) 有山峰、巨大隕坑，以及斜坡物質流過的證據，在在顯示這可能是座冰火山 [1.5 km]

木衛一 (Io) 波阿索利山脈 (Boosaule Montes) 這座巨大的山脈位於木星的第三大衛星上，是由衛星地殼下方累積的壓力往上推擠所造成 [18 km]

月球 惠更斯山 (Mons Huygens) 月球上最高的山峰，以荷蘭天文學家克里斯蒂安·惠更斯命名，位在亞平寧山脈的群山之中 [5.5 km]

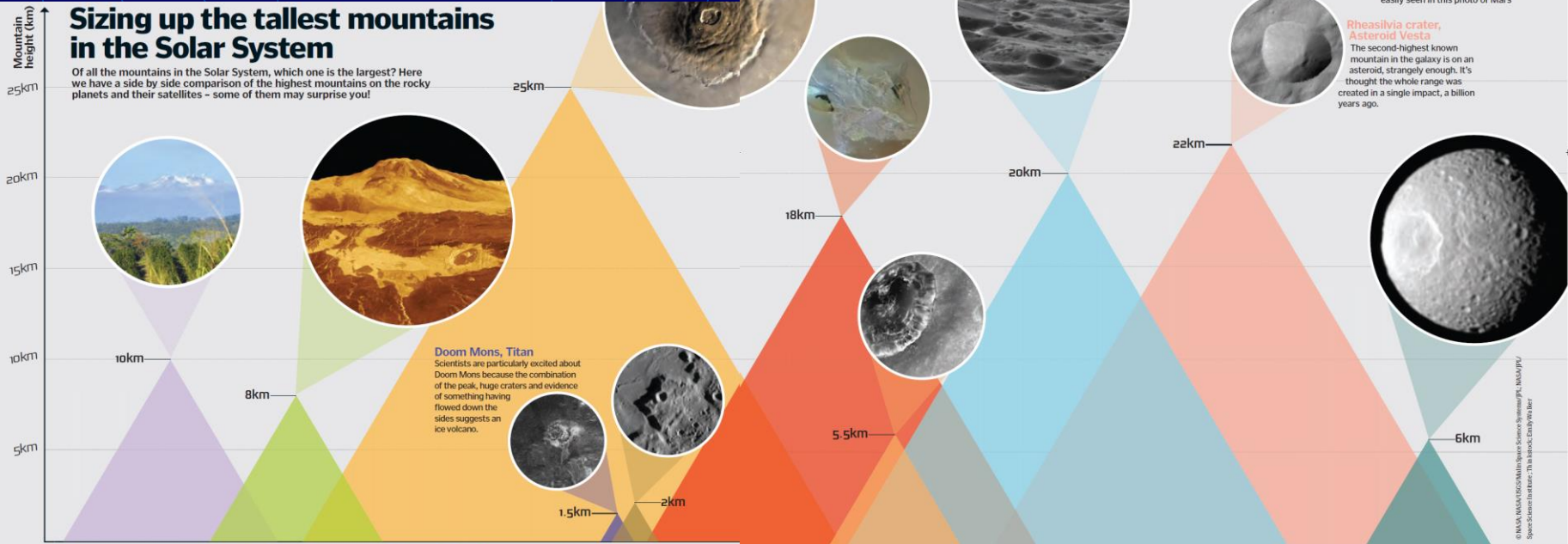
土衛八 (Iapetus) 赤道脊 (Equatorial Ridge) 土星第三大衛星的赤道脊並非源自衛星本身，而是被衛星重力場捕捉住的岩石，凝聚成為衛星的一部分 [20 km]

土衛一 (Mimas) 赫歇爾隕坑 (Herschel Crater) 太陽系最大的隕石坑之一，隕石撞擊的力量造成隕坑中央的突起山峰 [6 km]

小行星灶神星 (Vesta) 雷亞希爾維亞隕坑 (Rheasilvia crater) 這顆小行星上面居然有目前已知的太陽系第二高峰，整座山脈可能源於十億年前某次撞擊 [22 km]

Sizing up the tallest mountains in the Solar System

Of all the mountains in the Solar System, which one is the largest? Here we have a side by side comparison of the highest mountains on the rocky planets and their satellites - some of them may surprise you!



Mauna Kea, Earth

Topping Everest because so much of it is underwater, Mauna Kea is a dormant volcano in Hawaii that houses many NASA telescopes.

Maat Mons, Venus

This mountain has lava stretching for hundreds of kilometers down the shallow slopes, typical of a shield volcano, made up of solidified lava.

Olympus Mons, Mars

The tallest mountain in the galaxy is a potentially active shield volcano. Part of it formed over billions of years while some parts may only be a few million years old.

Caloris Montes, Mercury

This mountain ring is made up of bedrock disturbed by a huge impact that created the Caloris Basin. The rocks settled and became mountains.

Boosaule Montes, Io

Jupiter's third-largest moon is home to this vast mountain, created by pressure built up under the moon's crust that pushed their way upward.

Mons Huygens, Moon

The highest mountain on the Moon is named after Dutch astronomer Christiaan Huygens and is found in the Montes Apenninus mountains.

Equatorial Ridge, Iapetus

It is thought the equatorial ridge around Saturn's third-largest moon isn't actually from the planet but was dragged there by gravity and became part of the moon.

Herschel Crater, Mimas

Rising up from the centre of one of the largest craters in the Solar System is a mountain created by the force of an impact on this Saturnian moon.

Mountain name and location

Waves of increased temperature and pressure spread over the planet's surface, causing rocks to crack and rebound, forming a peak around the crater edge. An example of a crater mountain is the Herschel

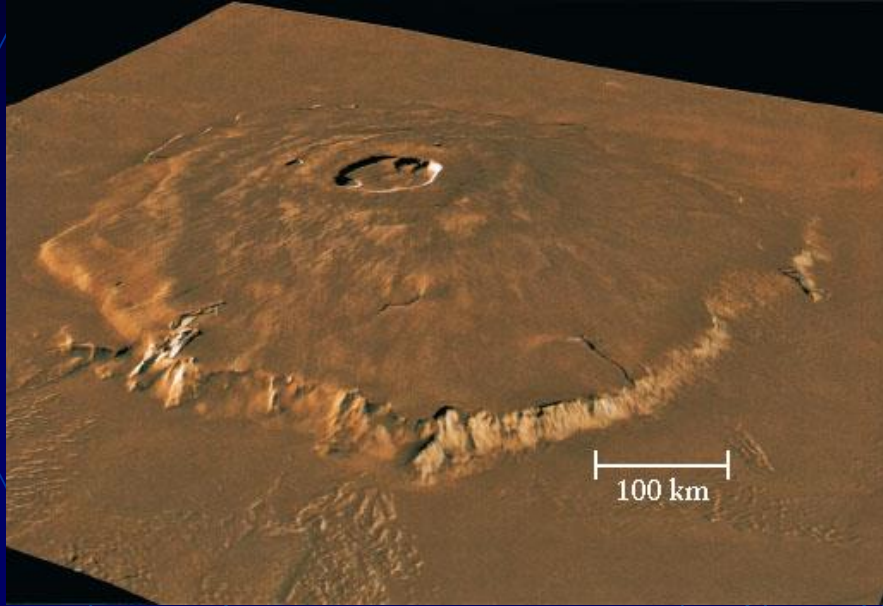
and space debris were trapped in the moon's gravitational field, pulled towards it and became stuck to the planet, forming this ever-expanding ridge and creating a vast mountain range.

The colossal Olympus Mons can be easily seen in this photo of Mars

Rhea Silvia crater, Asteroid Vesta

The second-highest known mountain in the galaxy is on an asteroid, strangely enough. It's thought the whole range was created in a single impact, a billion years ago.

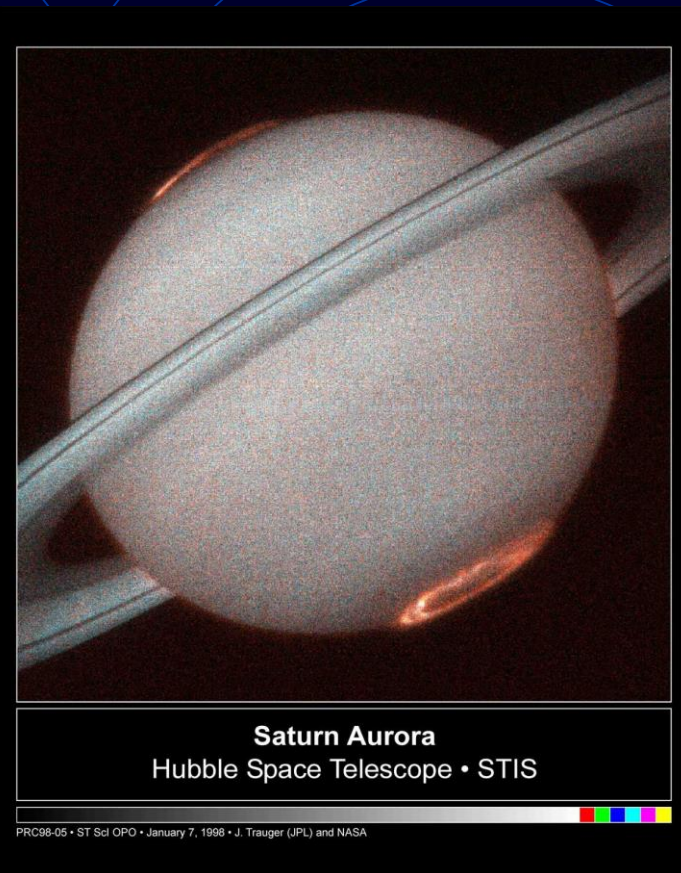
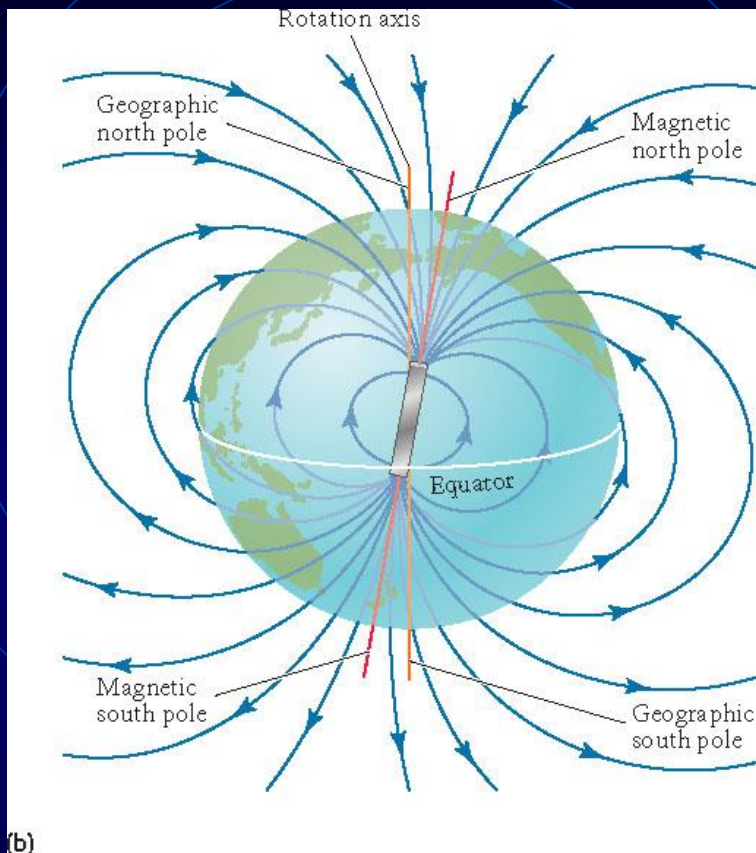
火山活動



火星曾經活躍，但是內部目前已經冷卻。此為火星表面的（死）火山 Olympus Mons 為太陽系當中最大的火山，底部跨距 600 km，環繞底部的峭壁達 6 km. 圖中央的火山口 (caldera) 直徑約 70 km

地球仍然活躍，例如板塊運動、造山運動、火山噴發等，此為 The Krakatoa Volcano, Indonesia

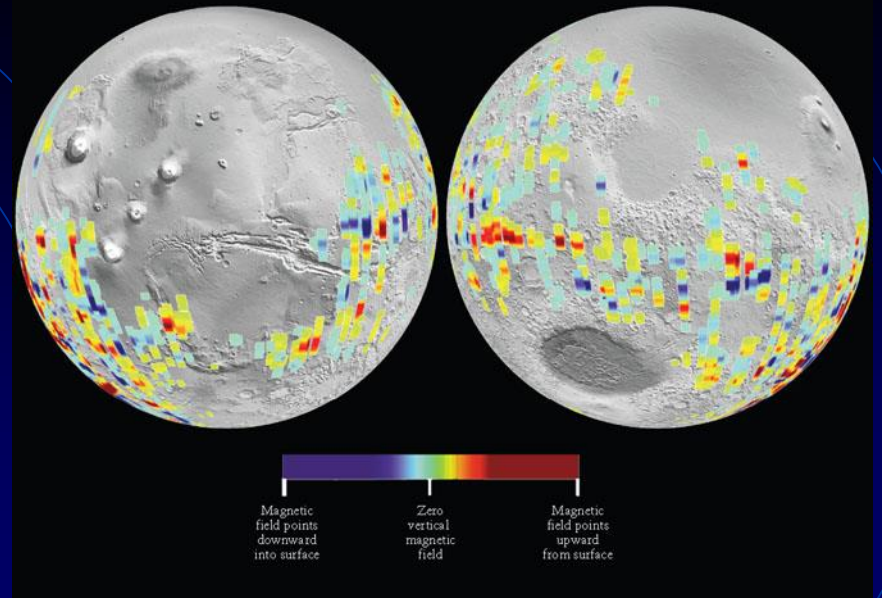
天體的磁場



偶極有如（但不是）磁鐵。
磁鐵棒當中電子以相同方向自轉，但超過 770°C 便排列凌亂

天體有磁場，表示內部有流體運動

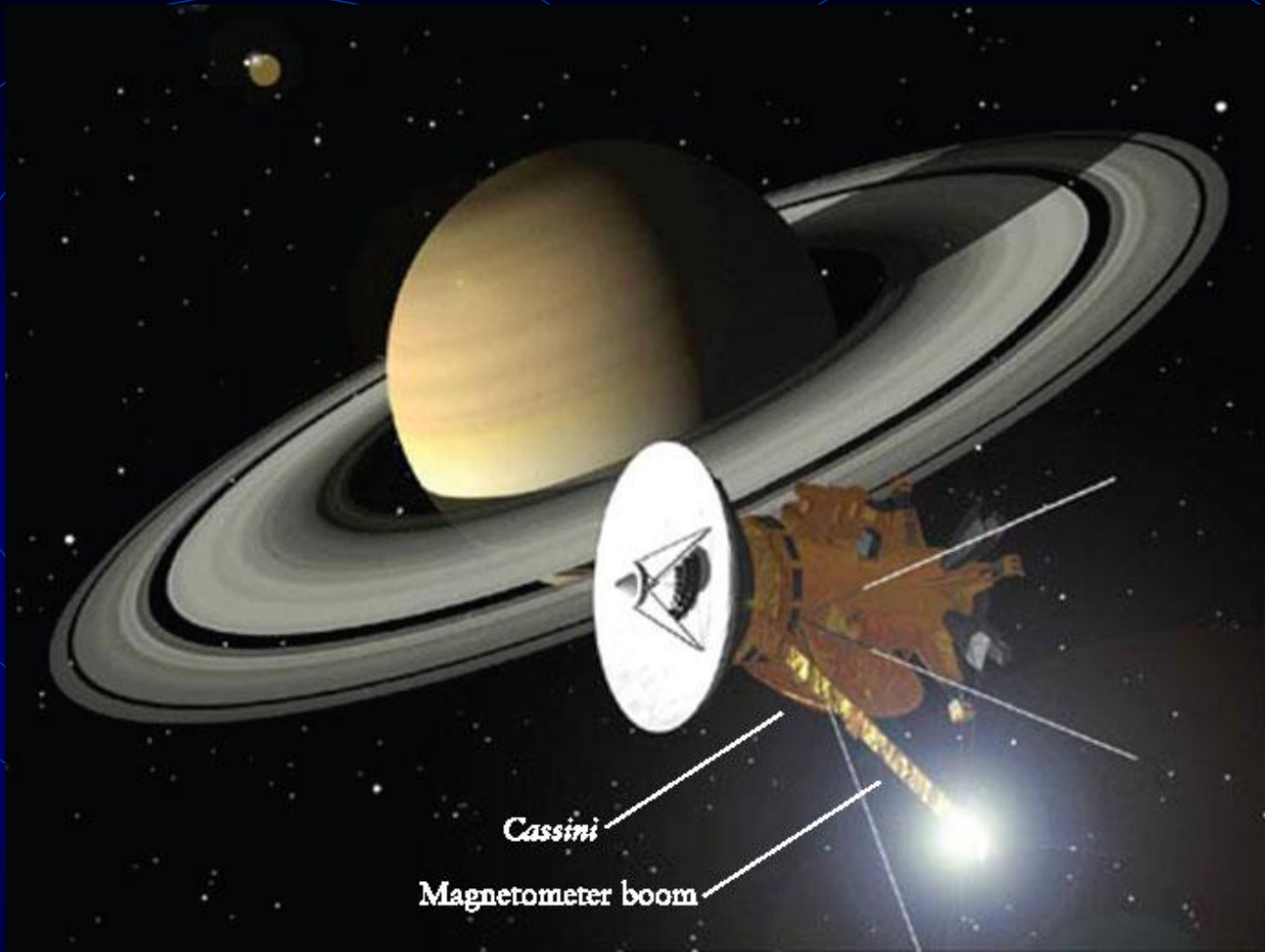
火星內部不是已經
固化了嗎，怎麼還
有磁場呢



Q: 為什麼體積較大的行星比較容易有磁場？

Q: 木星內部主要是氫與氦，那為什麼有強大磁場（地球14倍）呢？

Q: 天王星與海王星也有磁場，來源為何呢？



Cassini 太空船於 2004年7月1日抵達土星，眾多儀器當中包括了 magnetometer (磁力計)

有組織的太陽系結構

- 行星軌道同向共面
- 行星軌道接近圓形
- 規律的類地行星與類木行星

→ 太陽系起源

太陽系組成

Composition of the solar system
(Sun, planets, and small bodies)
by mass:

71%

Hydrogen

27%

Helium

2%

Other elements

Sun

Mercury

Earth

Venus

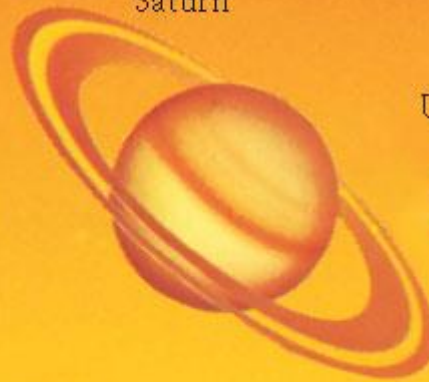
Mars

Jupiter

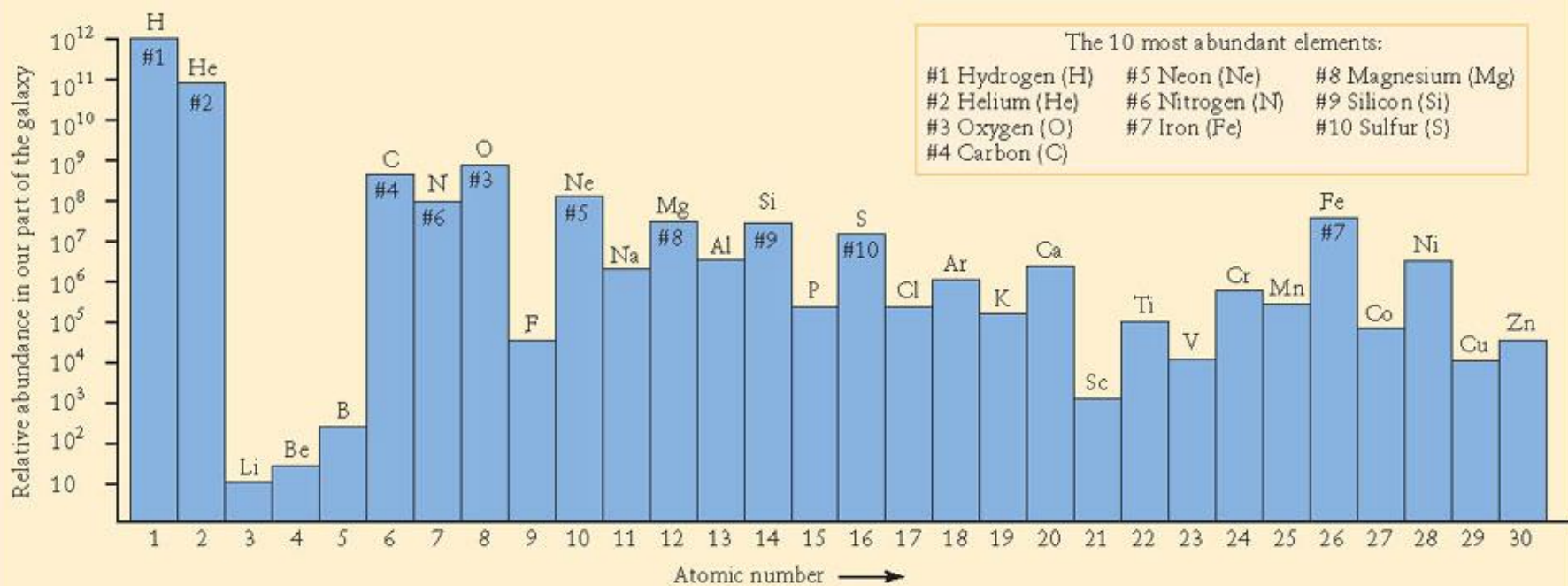
Saturn

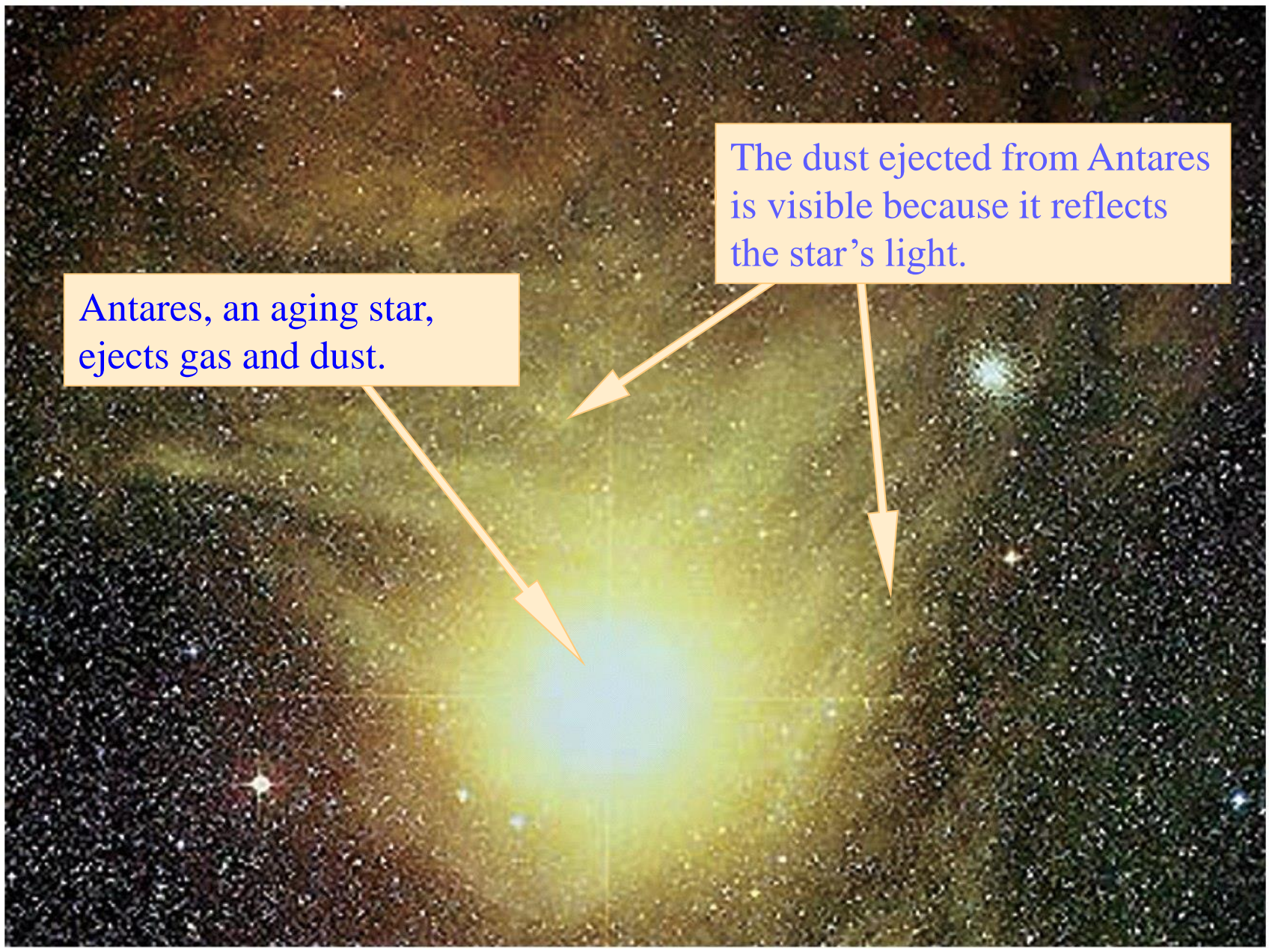
Uranus

Neptune



- 宇宙中最常見的元素是氫 (為什麼?)
- 類地行星之所以體積小，是因為它們由不常見的物質組成
- 宇宙中物質含量多寡，是恆星演化的結果

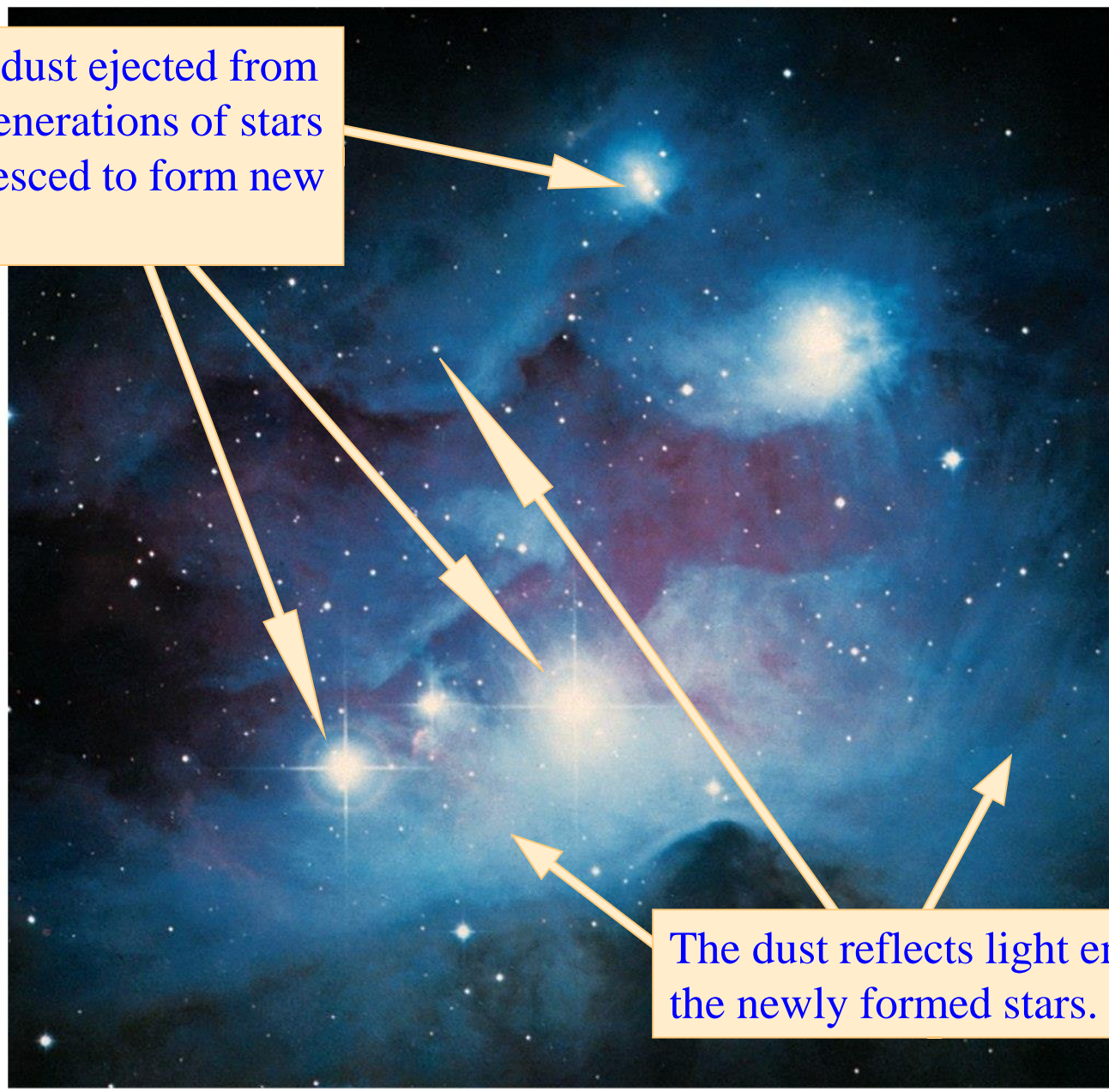




Antares, an aging star,
ejects gas and dust.

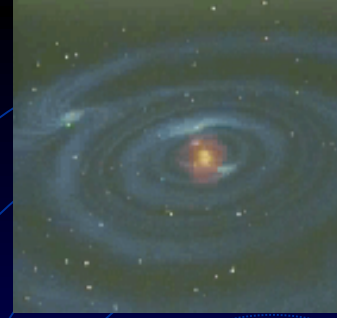
The dust ejected from Antares
is visible because it reflects
the star's light.

Gas and dust ejected from earlier generations of stars has coalesced to form new stars.



The dust reflects light emitted by the newly formed stars.

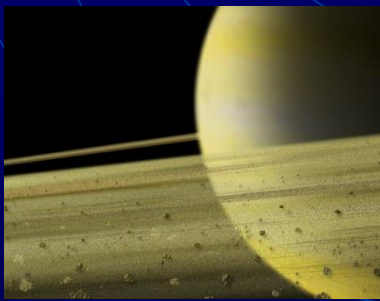
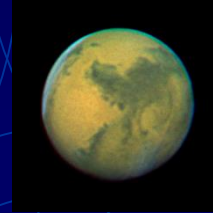
太陽系中各式天體



雲氣收縮、中央溫度升高、點燃核子反應 → 太陽

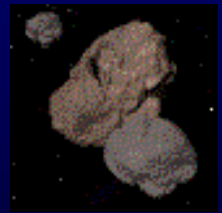
雲氣縮成扁盤狀、盤中灰塵凝集 → 小行星

✓ 繼續凝集 → 行星



❖ 旁邊扁盤中的灰塵繼續凝集 → 衛星

❖ 不成形 → 外行星的環



✓ 不成形 → 留在原地，例如小行星帶

→ 被拋到遠方 → 歐特雲中的彗星核
不小心進入太陽系內圍 → 彗星



水冰凝固 甲烷凝固

