

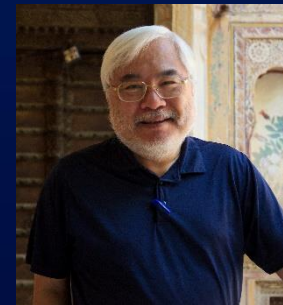
尋找人類的下個家鄉

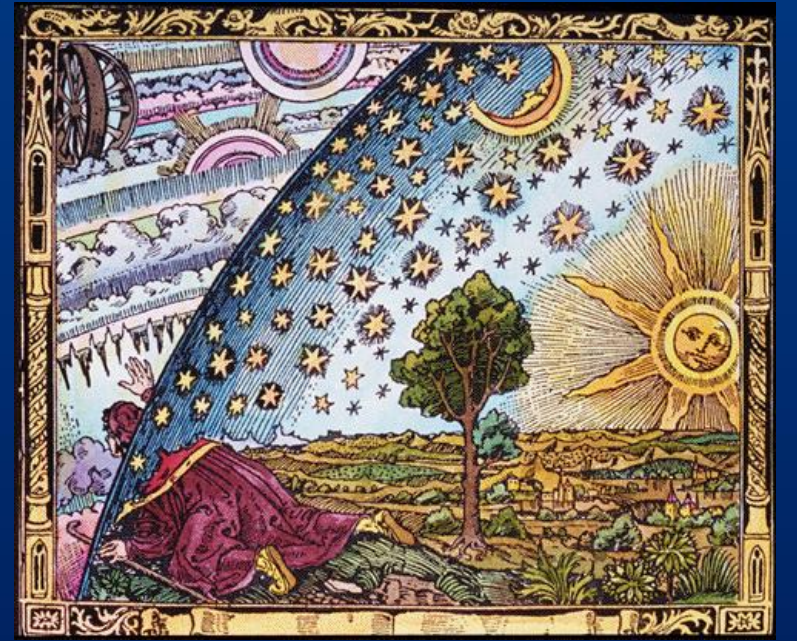
——系外行星的世界

陳文屏

中央大學 天文所、物理系

2022.04.10 週日閱讀@科工館





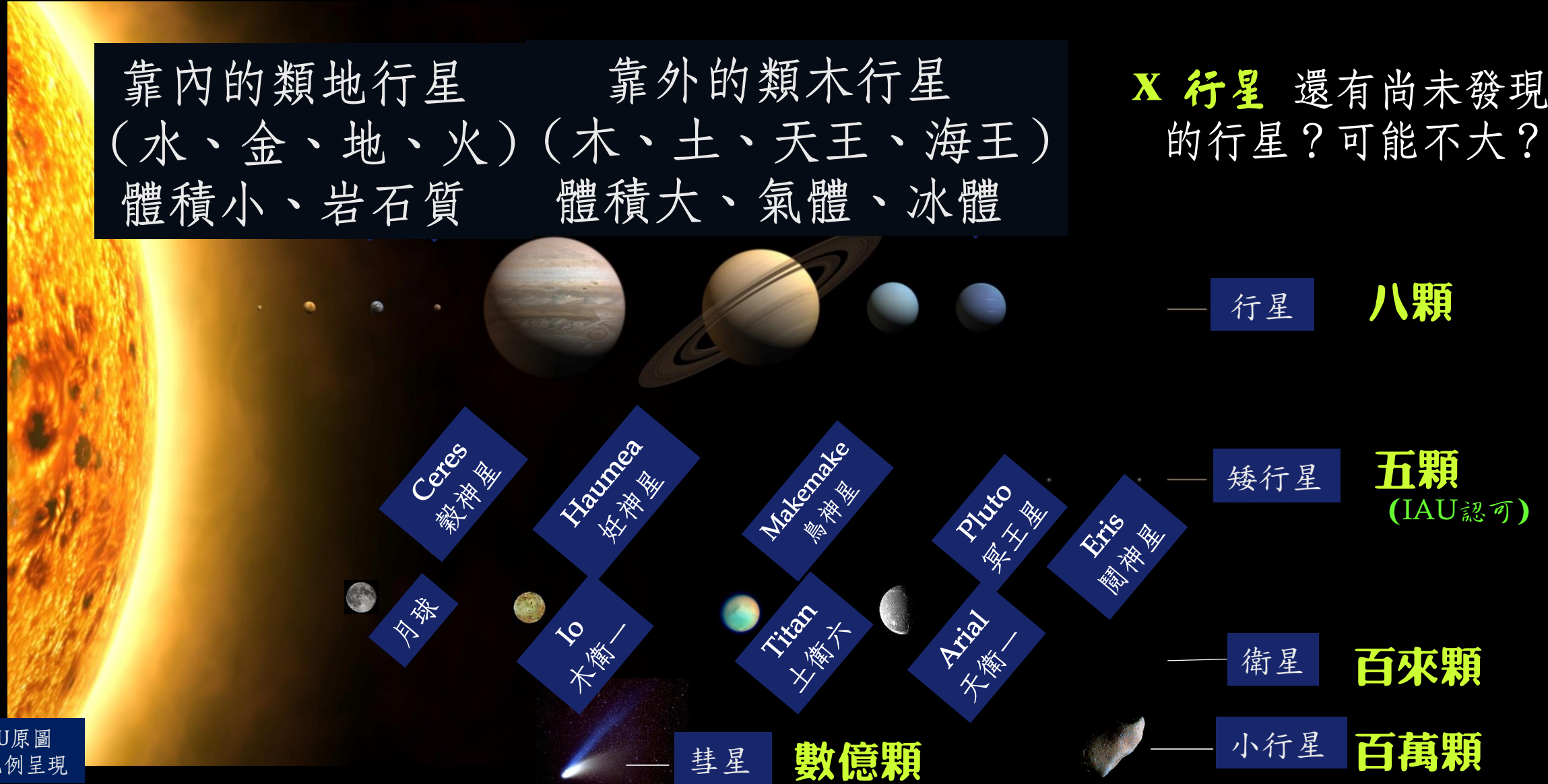
- 行星是生命誕生與發展的溫床
- 行星是恆星形成的副產品，在太空中無所不在
- 太陽系的情形
- 太陽系以外的行星世界：找什麼、怎麼找
- 目前尋找的結果；下一步呢？

太陽系家族之「巨口名簿」

一顆

靠內的類地行星 (水、金、地、火) 體積小、岩石質
靠外的類木行星 (木、土、天王、海王) 體積大、氣體、冰體

X 行星 還有尚未發現的行星？可能不大？



修改自IAU原圖
未照尺度比例呈現

太陽系的外觀

□ 行星距離越來越遠

水0.4； 金0.7； 地1.0； 火1.5； 木5.2； 土9.5； 天20； 海30 au

小行星帶

古伯帶

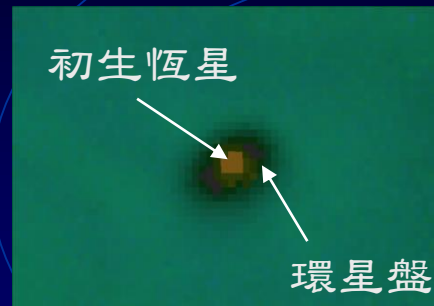
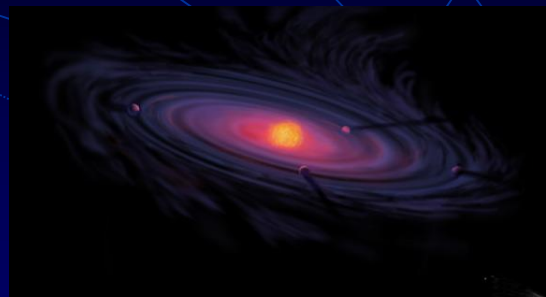
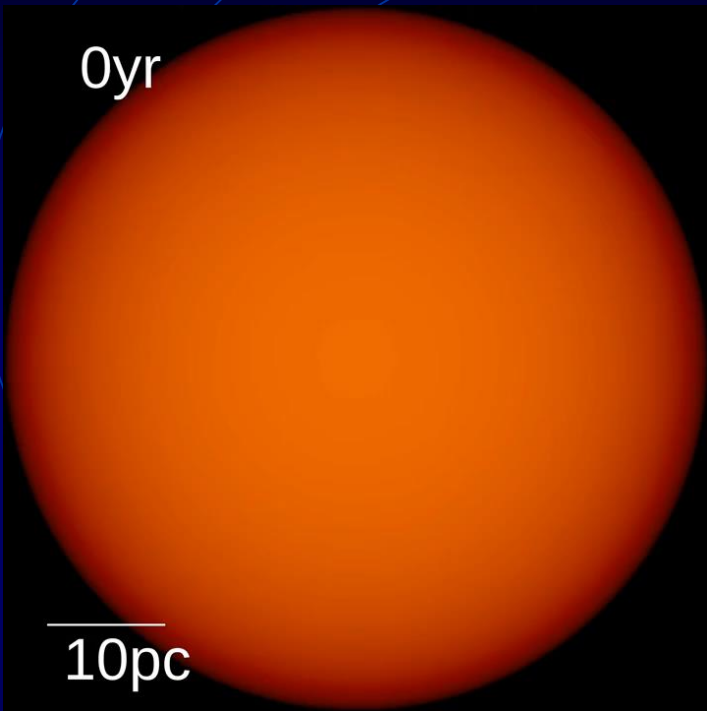
□ **共面**：絕大多數天體的公轉軌道幾乎在同樣平面（黃道面）

□ **共向**：絕大多數天體（包括太陽）轉動的方向（公轉、自轉）
幾乎都相同（順行；由西向東；由北向南看逆時鐘方向）

□ **共形**：行星軌道接近圓形

◆ 受到干擾（碰撞 金星、天王星、引力擾動 小天體）則軌道會改變

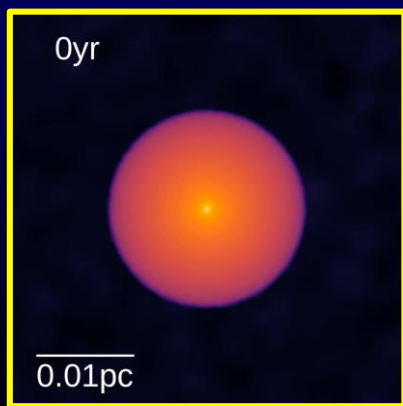
行星源於年輕恆星周圍的盤狀雲氣



星際暗雲 $\xrightarrow[\text{旋轉}]{\text{收縮}}$ 初生星球 + 扁盤 + 剩下的塵氣

溫度上升、塵消氣散

年輕太陽 + 盤狀物質

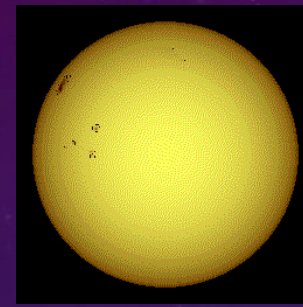


StarForge

塵埃 \rightarrow 塵塊 \rightarrow 小行星 \rightarrow 行星

太陽系中各式天體

太空雲氣收縮、溫度升高、點燃核子反應 → 太陽

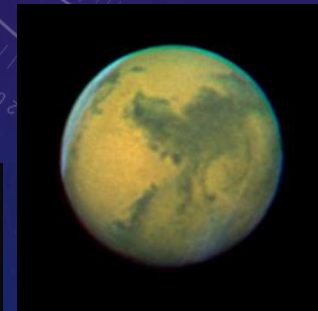
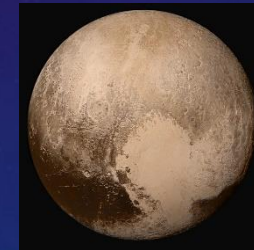


雲氣縮成扁盤狀、盤中灰塵凝集 → 小行星

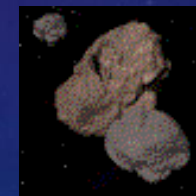


✓ 繼續凝集 → 行星、矮行星

◆ 旁邊扁盤中的灰塵凝集 → 衛星



◆ 不成形 → 外行星的環



✓ 不成形 → 留在原地，小行星帶、古伯帶

→ 被拋到遠方 → 歐特雲中的彗星核

進入太陽系內圍 → 彗星



地球是目前唯一發現有生命的天體

我們這種生命存在行星表面，以特定的因果關係運作

這些「定律」似乎放諸宇宙皆準

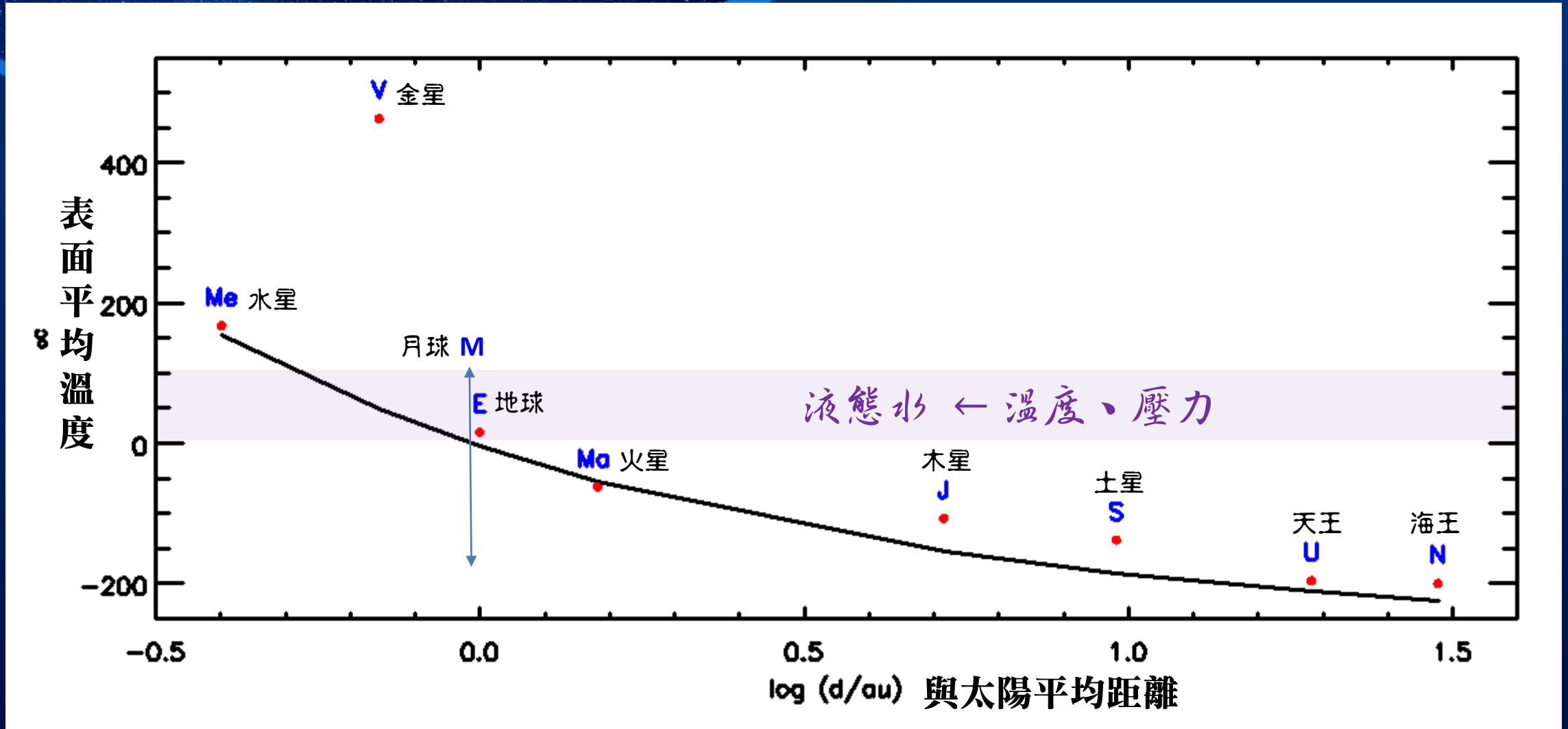
□ **其他角落呢**（太陽系內？哪裡機會大？）

□ **其他天體呢**（恆星？行星？）

□ **其他種生命型態呢**

（何謂生命？怎麼發現？摸得到？看得到？聽得到？）

行星平衡溫度 吸收陽光 = 自己輻射 與天體大小無關



恆星周圍液態水可以存在的區域（**適居區**）：地點與大小

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

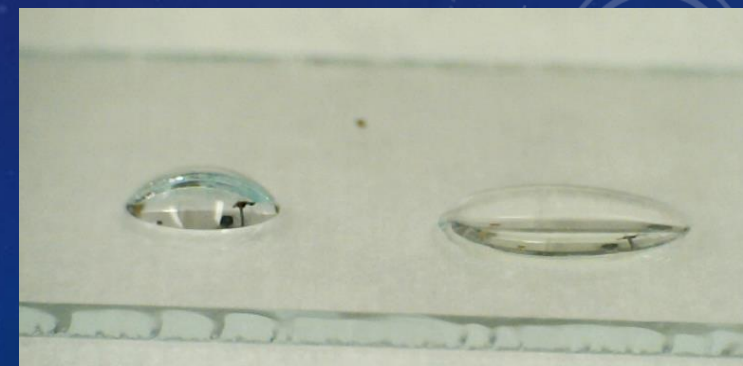
□ 奇特的「固態較輕」 特寒的環境，冰下保有活水

□ 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

NASA 探索外星生命的指引

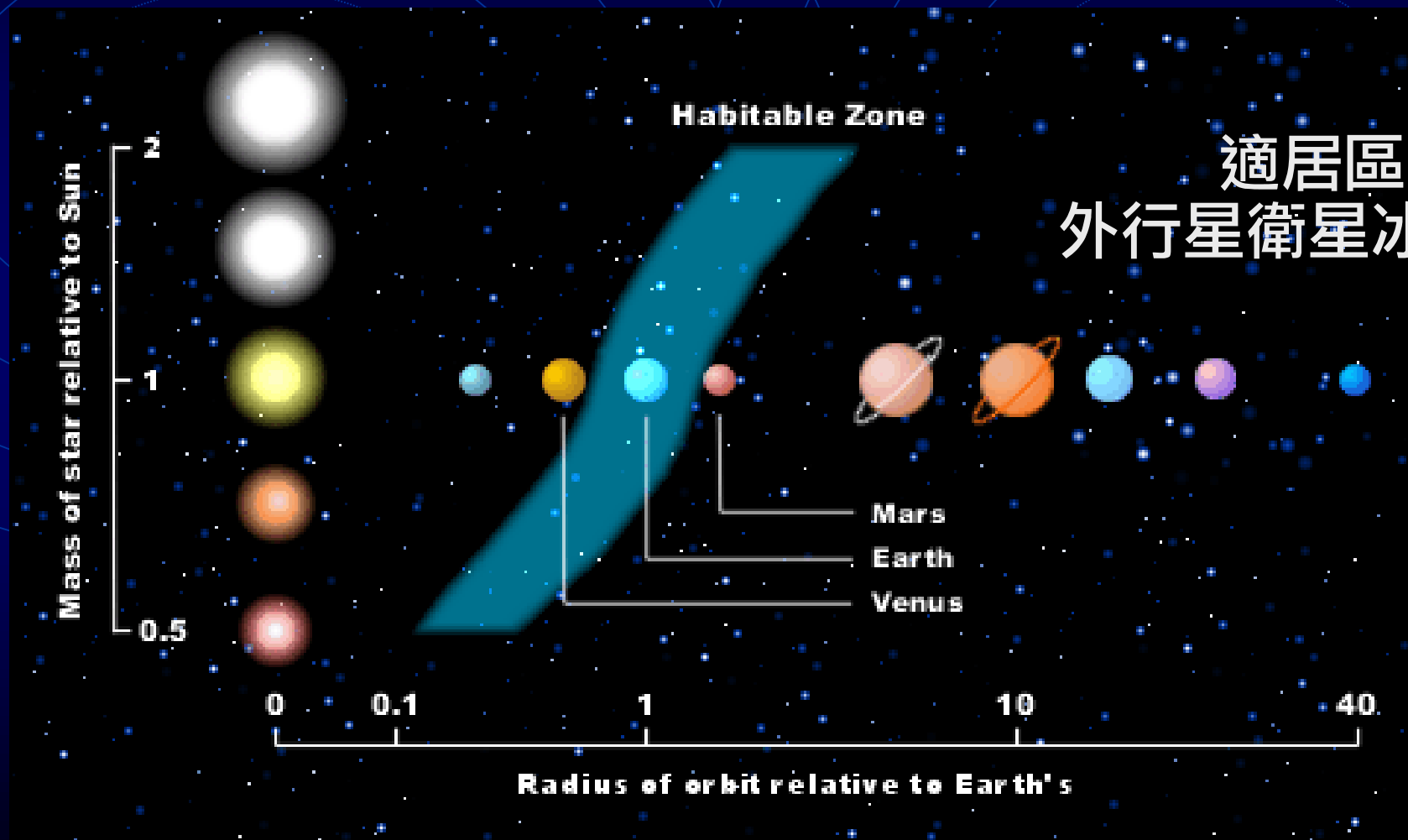
- *Follow the water!*
- 人類自古就「逐水而居」（可靠水源；飲用、航行）
- 人體組成70%是水；地球表面 >70%由水覆蓋

適居區 (habitable zone) 範圍：

太陽適居區包含地球(及火星?)

大質量恆星 → 寬廣

小質量恆星 → 窄小



適居區 2.0
外行星衛星冰下的世界

尋找其他的世界

直接看



如何知道恆星周圍有行星？

困難：行星不發光！

→ 擋光 或 反光 或者 對恆星的影響

恆星太亮、太近

位置變化

亮度變化



偵測行星存在的方法

1—凡走過必留下痕跡

自己不發光就借光
(反光、擋光)

行星繞恆星時，若恰巧擋住恆星的光（像日食般），
恆星的**亮度**會以特別的方式變化



實際軌道面的傾角，相
對於我們視線方向，不
一定會發生凌星現象

行星本身越大、越接近
母恆星，越有機會

偵測行星存在的方法

2 一若要人不知，除非己莫為

如果恆星周圍有行星，那麼恆星（的**位置**與**運動**）
會受到行星（萬有引力）的影響（互動）



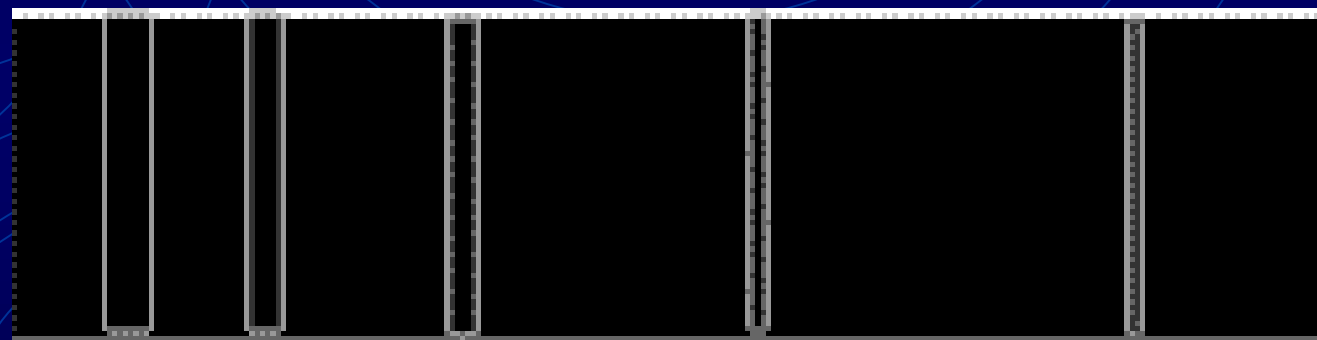
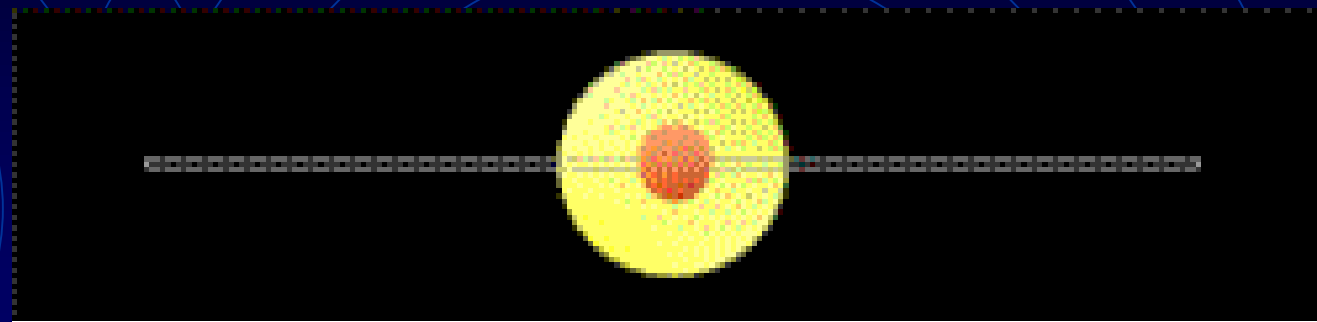
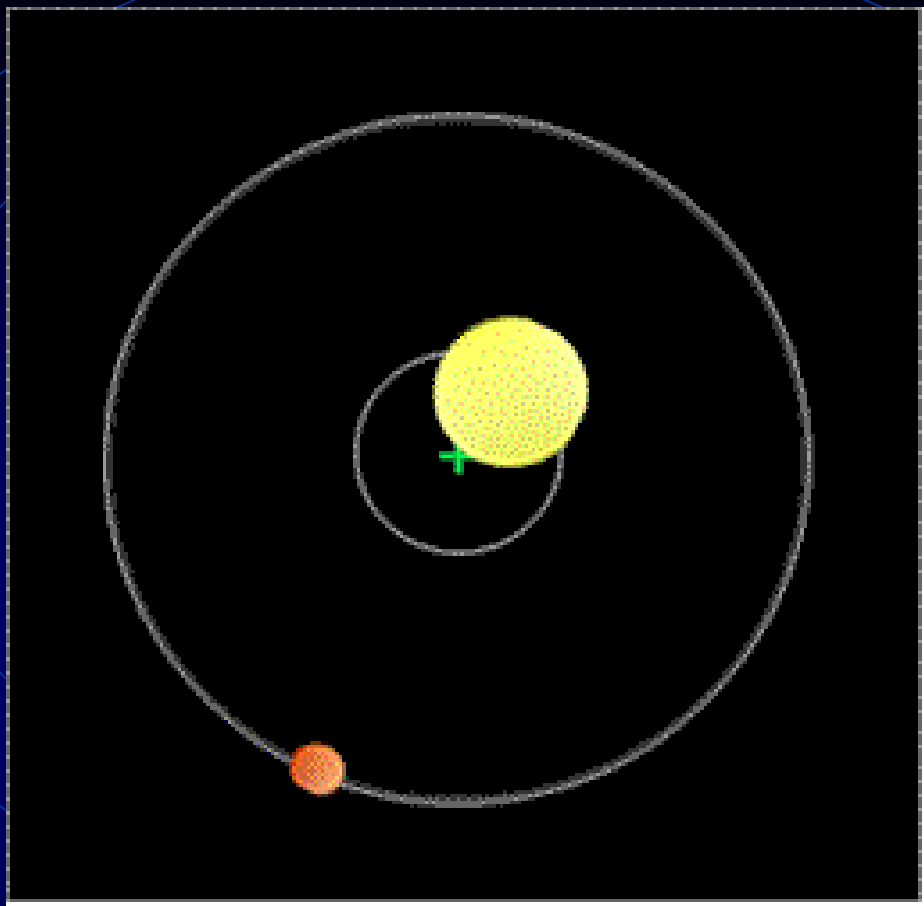
地球繞太陽？

地球與太陽相互吸引，引力一樣大，但地球小，受影響較大
（太陽反射運動 $RV_{\oplus}^{\odot} \approx 10 \text{ cm/s}$; $RV_{\oplus}^{\oplus} \approx 130 \text{ cm/s}$ ）

影響會發光的東西

Hammer throw 鏈球

都卜勒效應

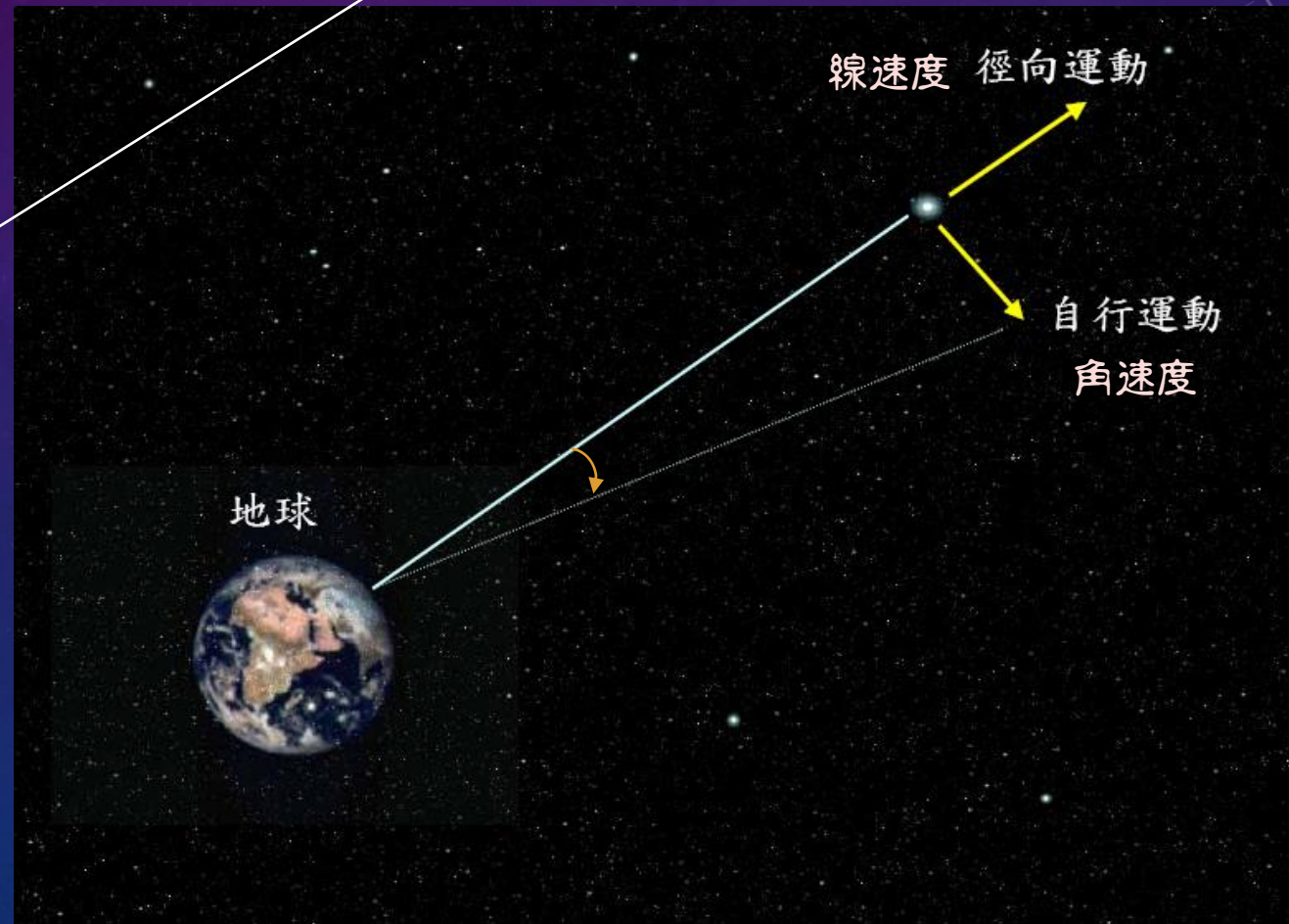


原本在太空中走直線的恆星，因為與行星互繞，而會「走螺線」

而在沿「視線」方向，則會「前後擺動」

天體在太空的運動可以分成兩個分量，
一個是投影在天球上的**自行運動** (proper motion)，
另一個為垂直於視線的**徑向運動** (radial velocity)。

利用都卜勒
效應測量



都卜勒效應

(Doppler effect/shift)

我們和波源之間的運動，改變了接收到的波動頻率（振動快慢）

在湖面敲漣漪，一秒敲一次 (1 Hz)
湖另一邊也收到 1 Hz 的訊號

要是我們向著波源過去（或是波源向著我們而來），就會「追上」原本後來才收到的訊號，也就是訊號「變快」了

光的頻率變快（波長變短）了，也就是「藍移」
要是我們跟波源互相遠離，光訊號就會「紅移」

測量訊號頻率（波長）的改變→估計跟波源之間的速度

波源在1處發出的漣漪

波源隨後在2處發出的漣漪

他看到紅移現象

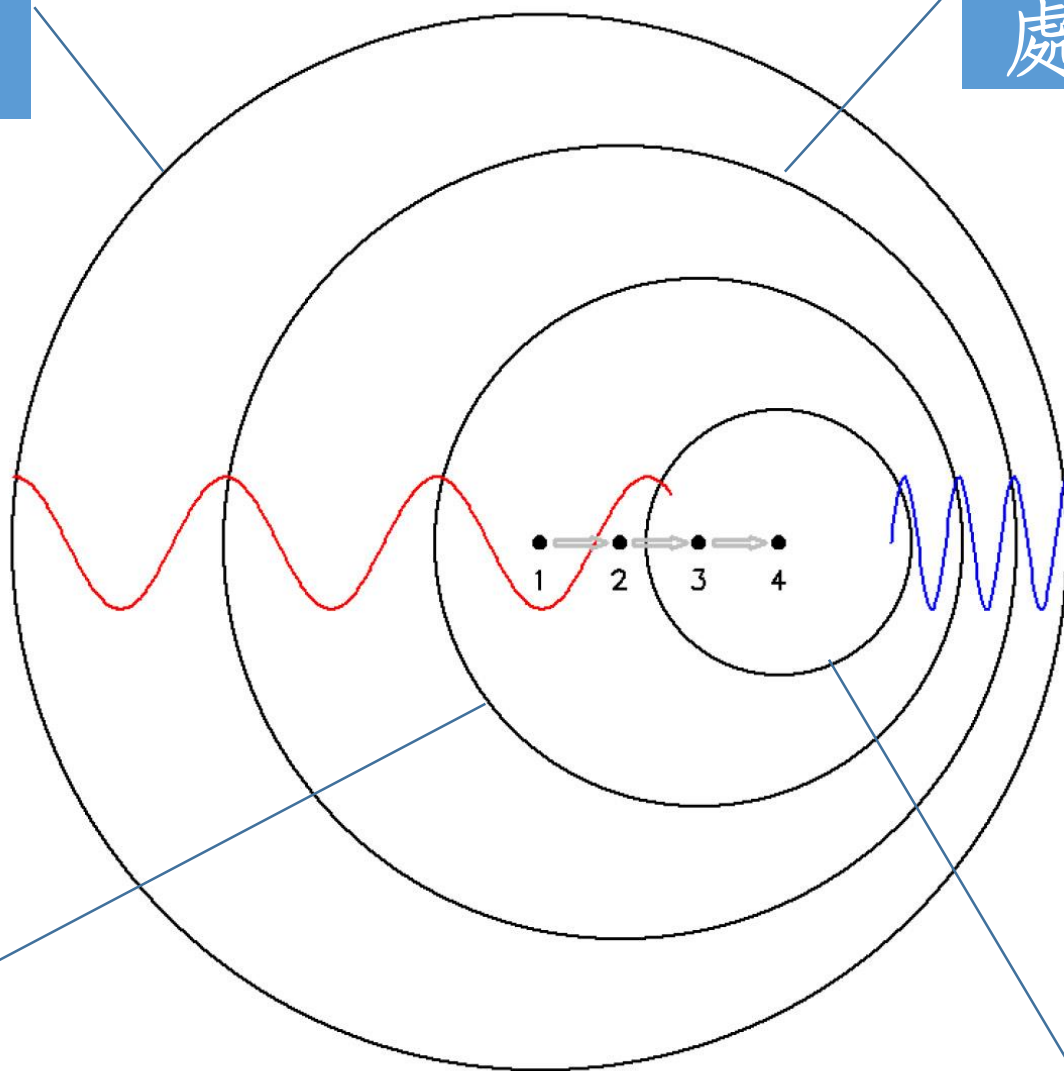


波源在3處發出的漣漪

他看到藍移現象



波源在3處發出的漣漪

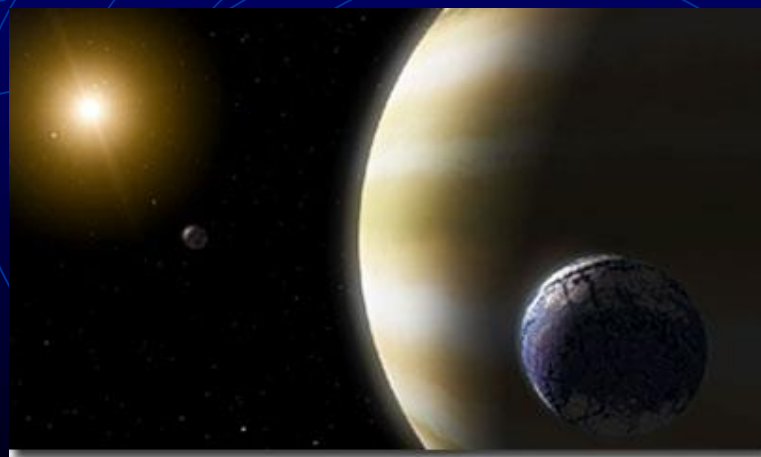
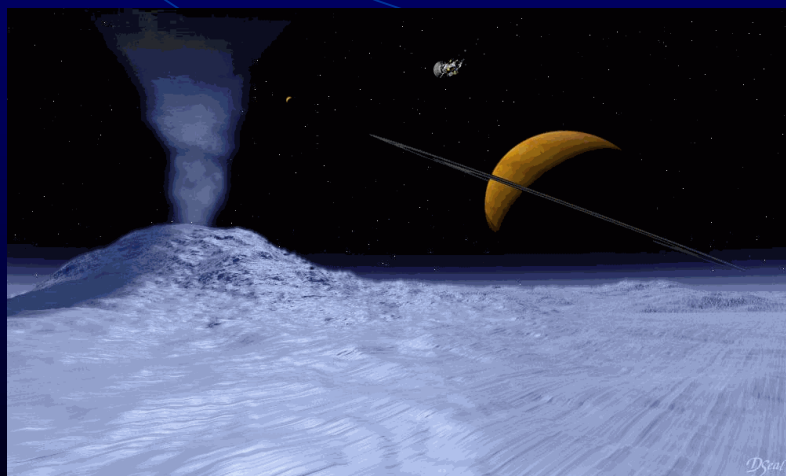
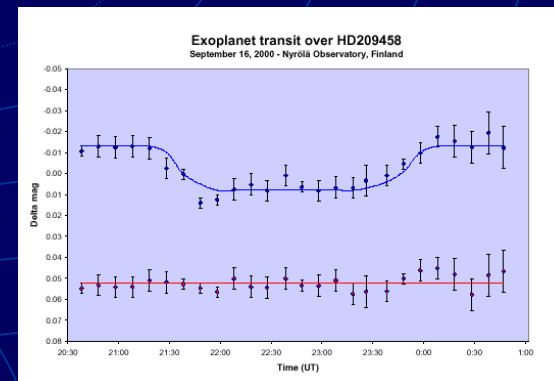
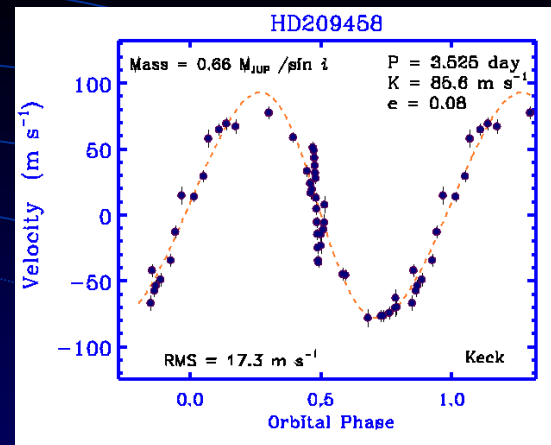


目前已經在太陽系以外發現超過 5000顆
恆星周圍有行星——系外行星

extrasolar planets; exoplanets

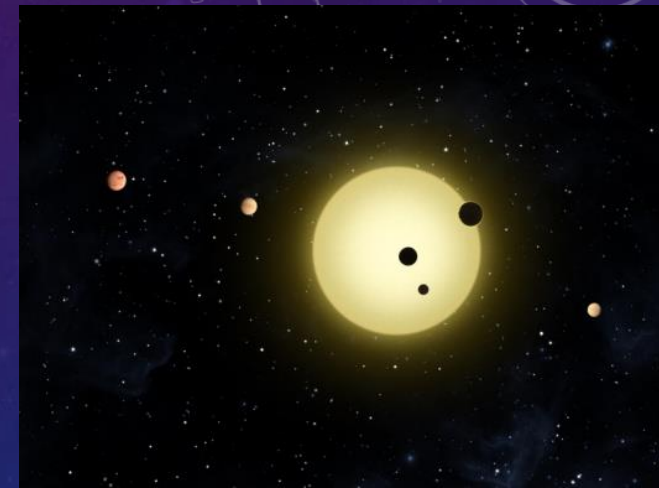
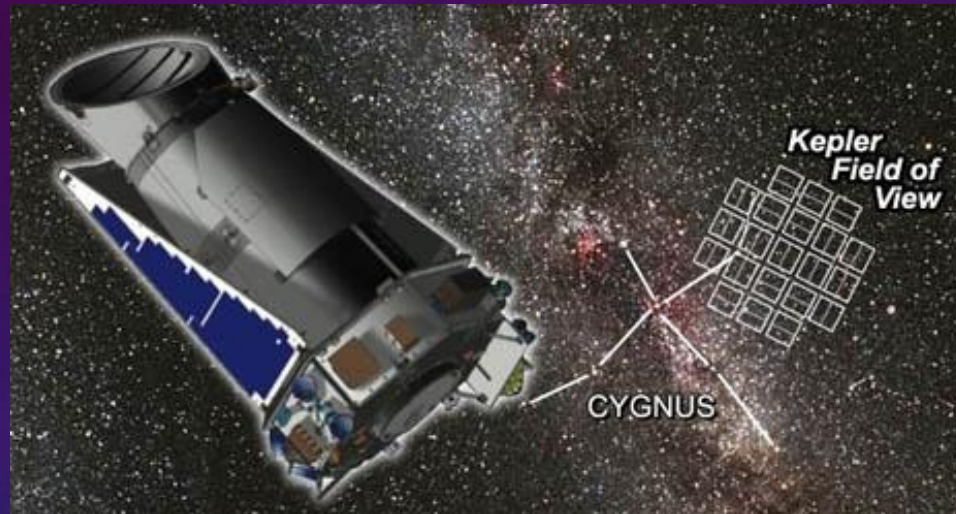
絕大多數利用「前後擺動」(19%) 或
「凌星」(77%) 的原理所發現

多半又大又近



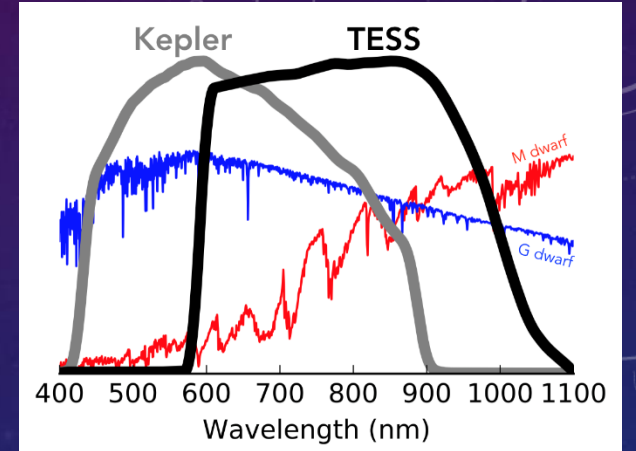
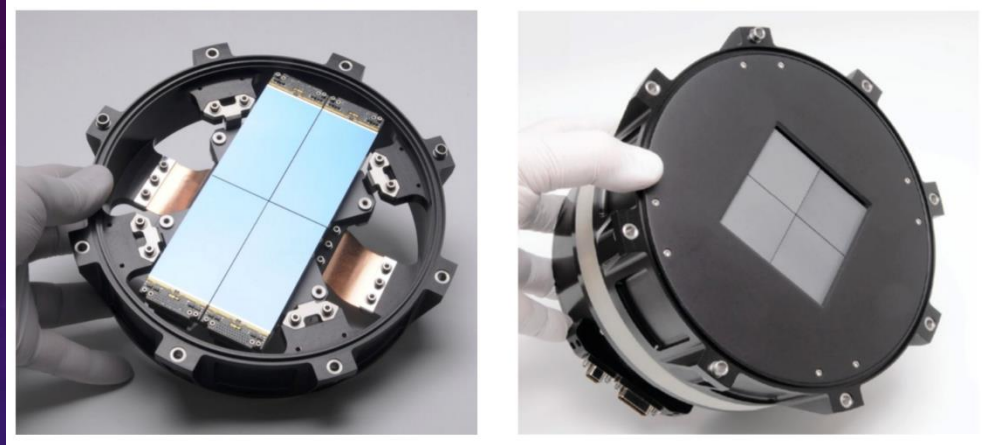
Super-earths
超級地球 → earths

克卜勒太空望遠鏡



- 利用掩星方式尋找（地球般大小）的系外行星
- 2009.3發射；監測特定天區約14萬顆恆星
- 望遠鏡口徑0.95 m；位於地球 L2 軌道
- 發現數千顆可能的系外行星

TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)



- 利用凌星技術尋找M型恆星周圍的類地系外行星
- 2018.4發射；四個10.5 cm 鏡頭；視野 $24^{\circ} \times 96^{\circ}$ 為 *Kepler* 太空望遠鏡的400倍
- 可監測85%天空，主要任務2年，監測20萬顆恆星，預期發現如地球般大小的系外行星。任務持續中

TRAPPIST-1 (K2-112)

$m_V \approx 18.8$ mag; M8V, $0.09 M_{\odot}$; 40 光年

Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope

TRAPPIST-1 System



 Belgium
1998
Achel

 Belgium
1863
Chimay

 Austria
2012
Stift Engelszell

 Netherlands
1884
La Trappe

 Belgium
1931
Orval

 United States
2013
Spencer

 Belgium
1595
Rochefort

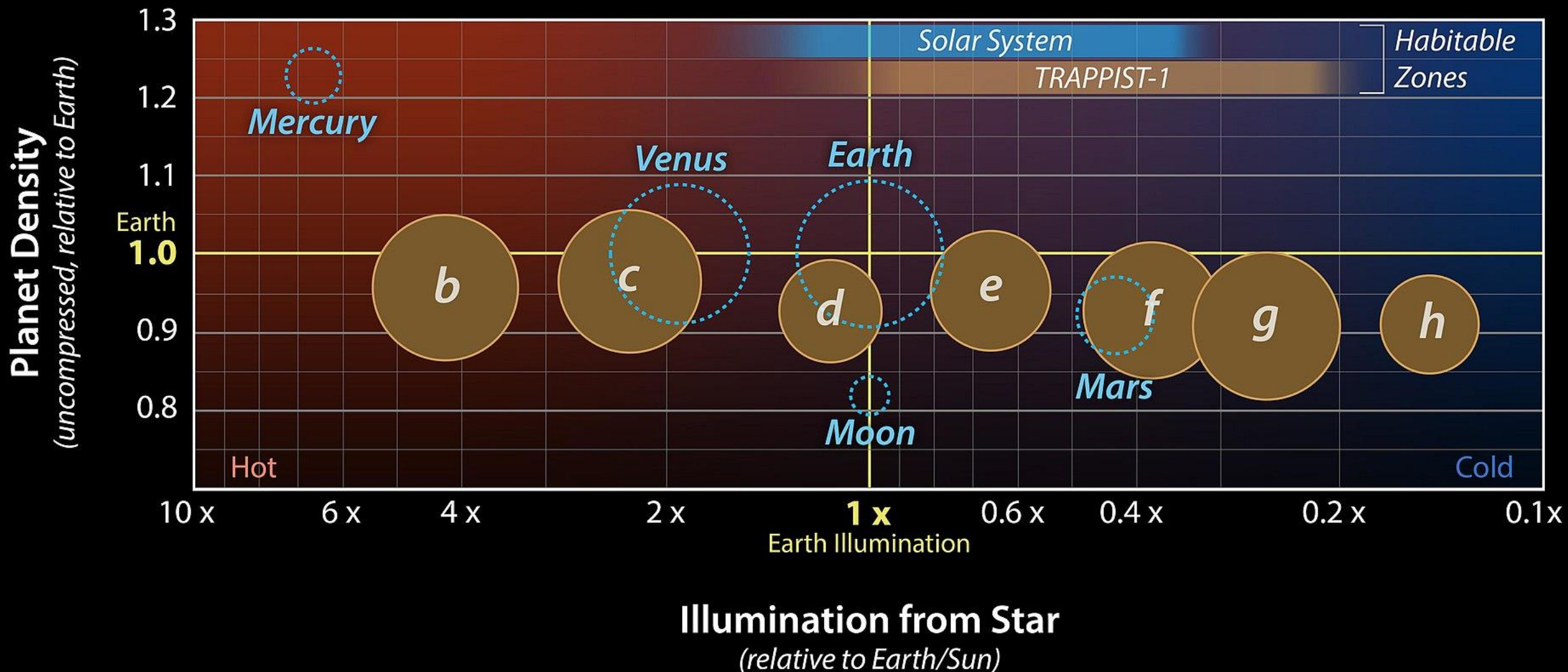
 Italy
2014
Tre Fontane

 Belgium
1836
Westmalle

 Belgium
1838
Westvleteren

 Netherlands
2014
Zundert

TRAPPIST-1/Solar System Comparison



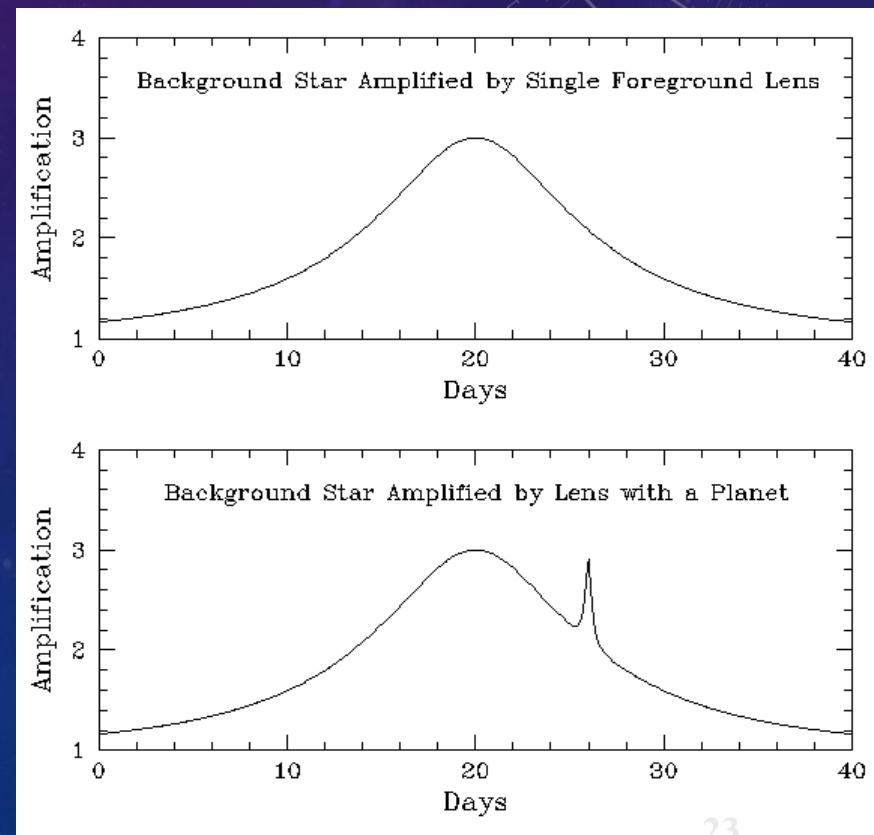
偵測行星存在的方法

3 — 擋住了，但更亮！

如果行星（前景）精準地正好位於我們和遙遠恆星（背景點光源）之間，那麼恆星的**亮度會增亮**

讓別人光芒更明亮

「**重力透鏡**」效應：行星也造成增亮



偵測行星存在的方法

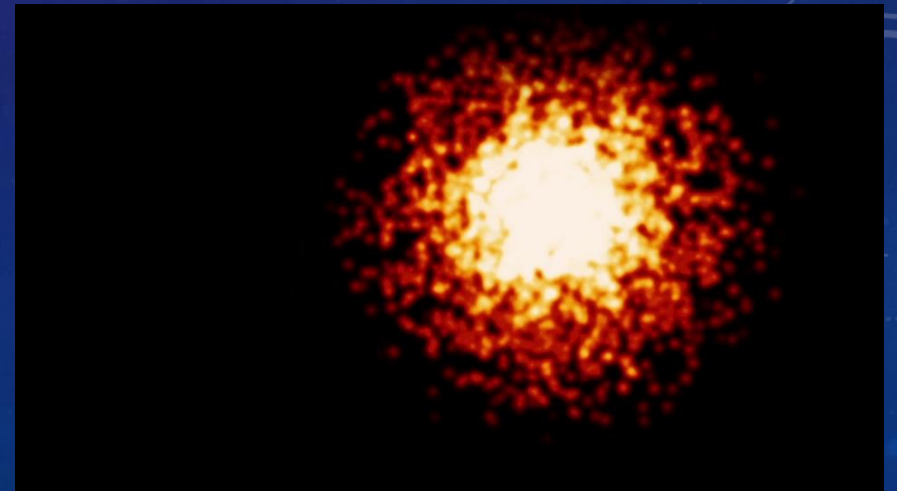
一張影像勝過千言萬語！

—— A Picture is Worth A Thousand Words!

看甚麼呢？行星自己發的光與熱？反射恆星的光與熱？

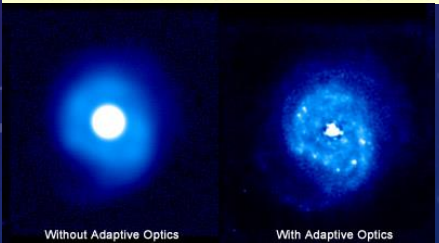
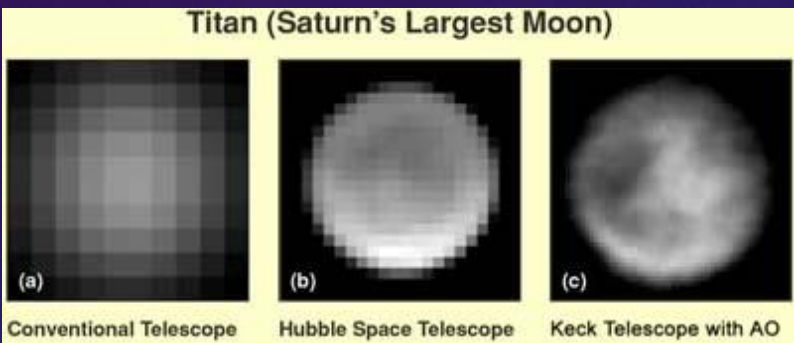
在恆星的強光旁，想要辨認出（偵測到）微弱的（行星）
光點極為困難

可能的技術：把恆星的光消除！

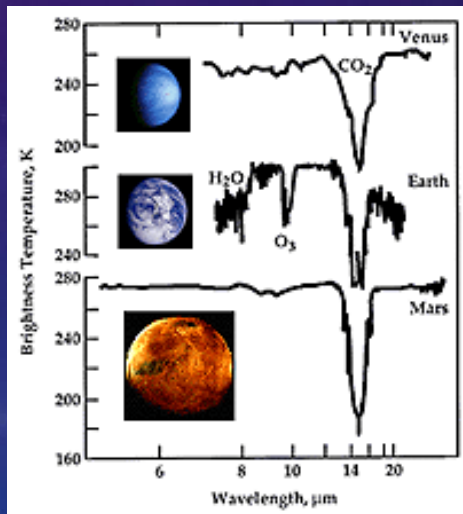




越來越大
(集光力)
的望遠鏡



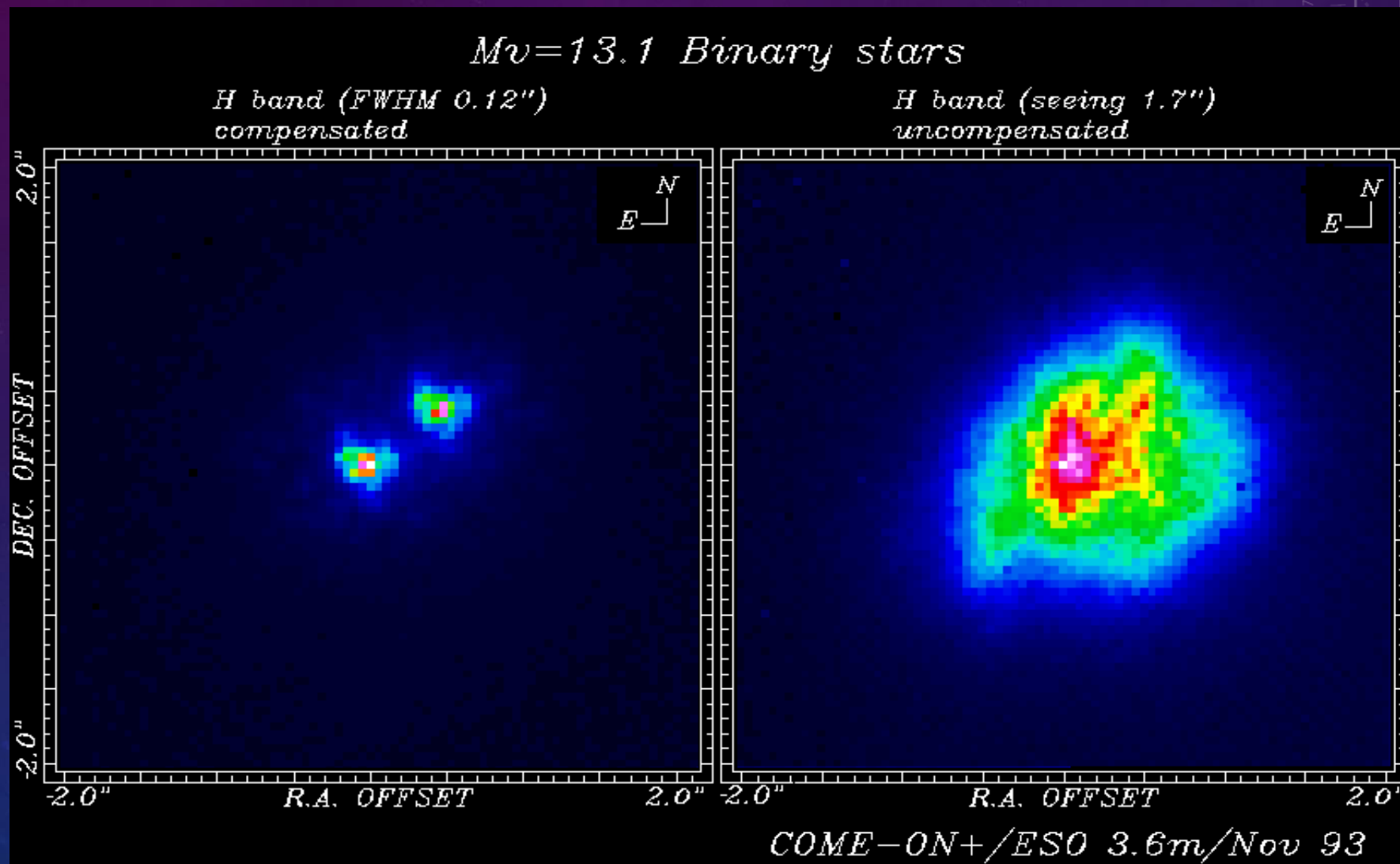
越來越看得清楚
的觀測技術



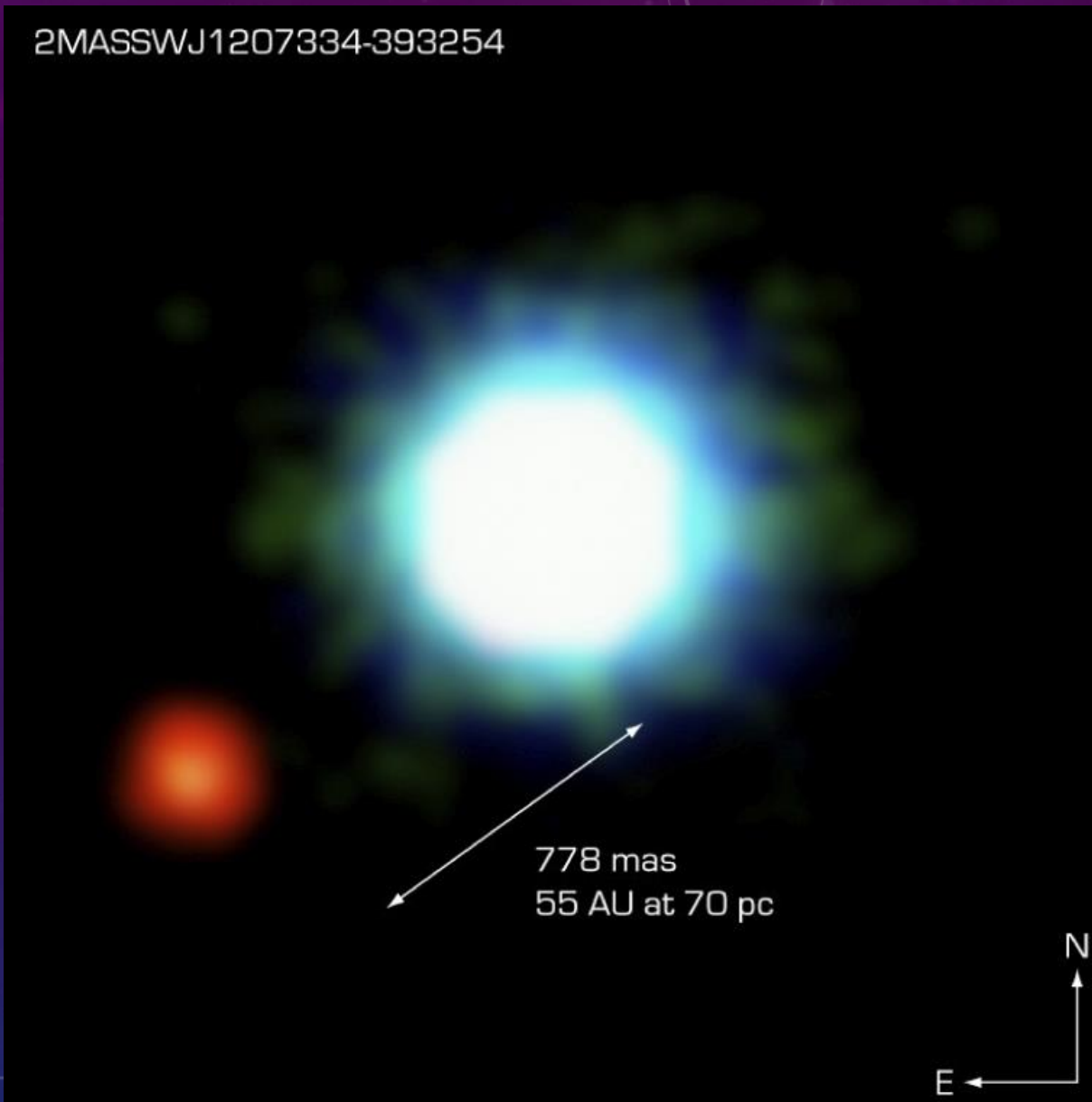
越來越靈敏
的偵測儀器



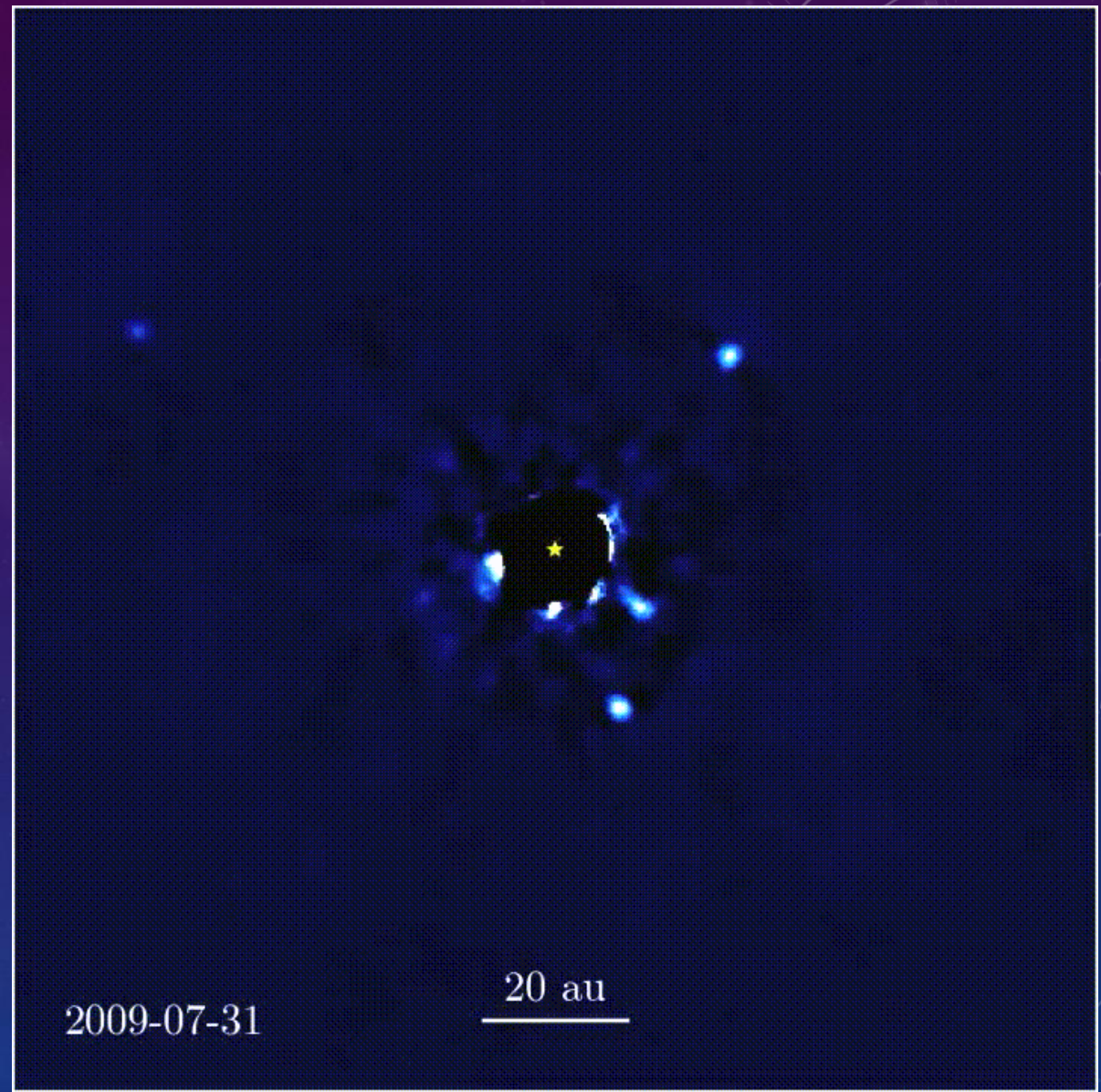
「消除」地球大氣干擾，讓觀測更清晰



2MASSWJ1207334-393254



2M1207 a 距離我們約200光年，周圍的行星 2M1207b 亮度暗了100倍，公轉週期1200年



HR 8799 及環繞行星系統，由Keck 望遠鏡 七年之間所取得的影像製作的動畫

其他偵測系外行星的方法

--- 脈衝星 (pulsar) 計時

第一顆系外行星以此技術發現

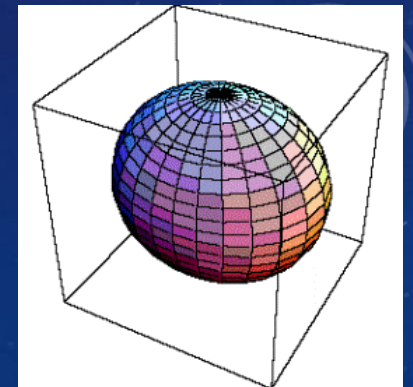
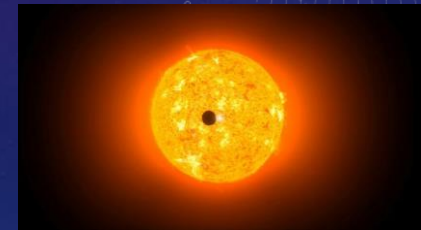
--- 已知行星凌星計時

其他行星造成凌星週期改變

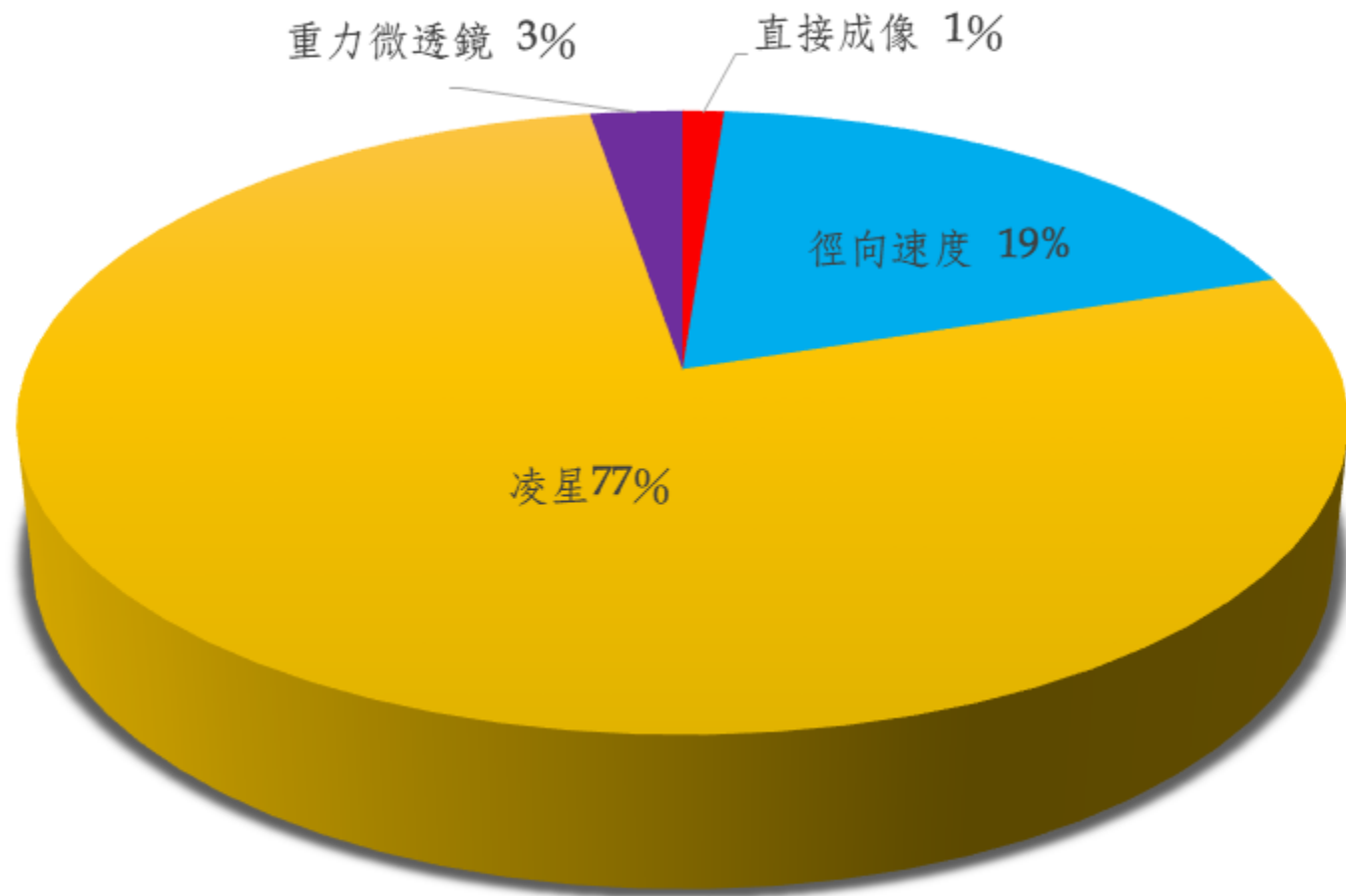
--- 星震

行星存在改變了星震模式

...



系外行星發現方法統計



■ Imaging

■ Radial Velocity

■ Transit

■ Microlensing

共5009顆 2022.04.05

◆ 若母恆星質量太小，適居區內恰好有行星的機會不大。即使有，可能也被潮汐力鎖住，以同一面朝著磁場劇烈的母恆星

◆ 若恆星質量太大 → 壽命太短

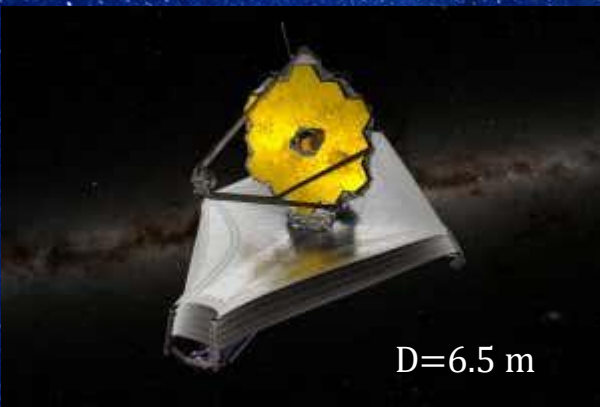
地球上的生命花了 35~40 億年才發展出現在的文明

太陽可以活100億年，太空裡藍白色耀眼星星只能活不到一億年

◆ 所以**類似太陽的恆星機會比較大**，它們供應光與熱的生命期夠長，適居帶也夠寬廣。圍繞在恆星周圍的行星，是生命誕生、演化的好地方

→ 要找我們所瞭解的生命，就先找行星吧

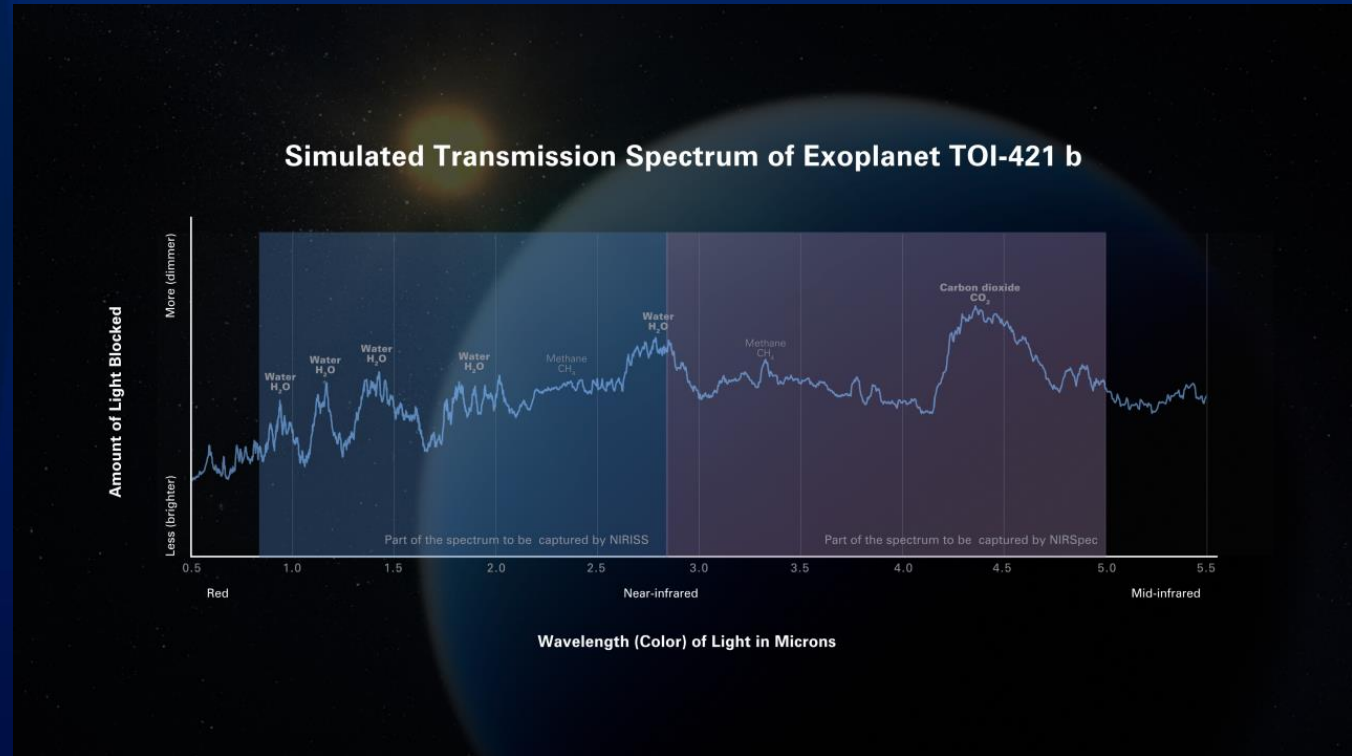
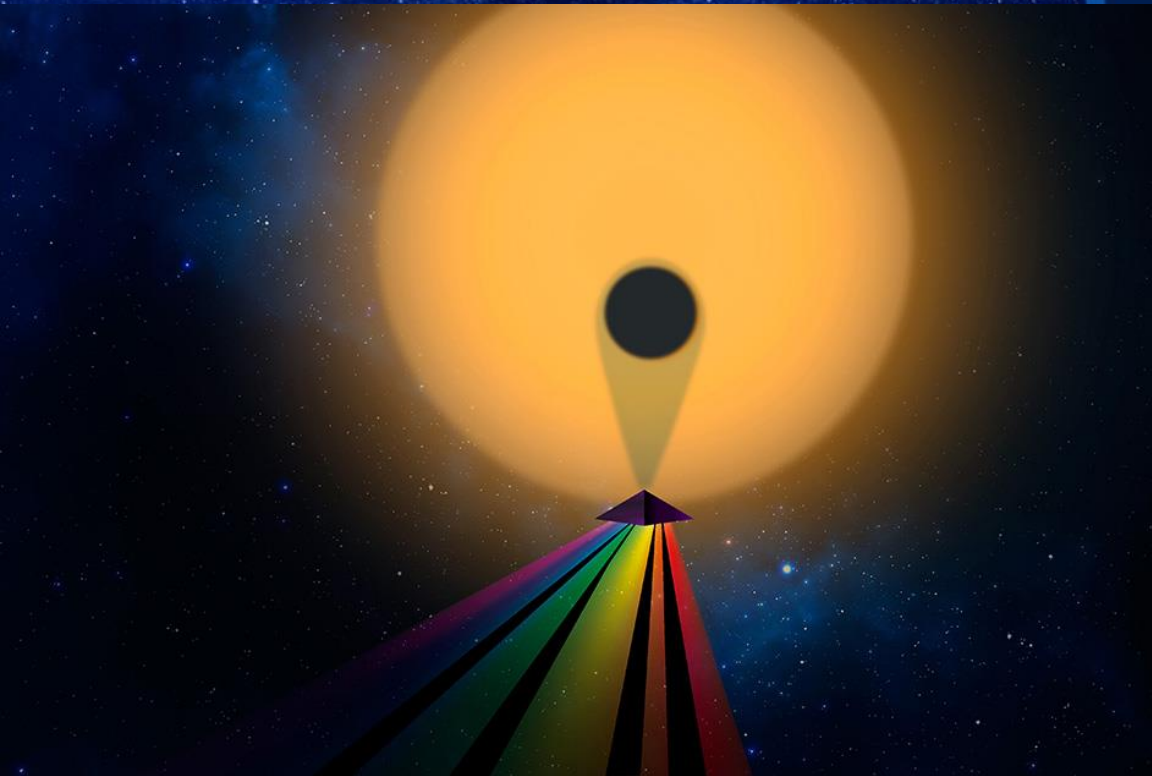
~~ 目前發現行星的確無所不在



D=6.5 m

James Webb Space Telescope (JWST) 韋伯太空望遠鏡

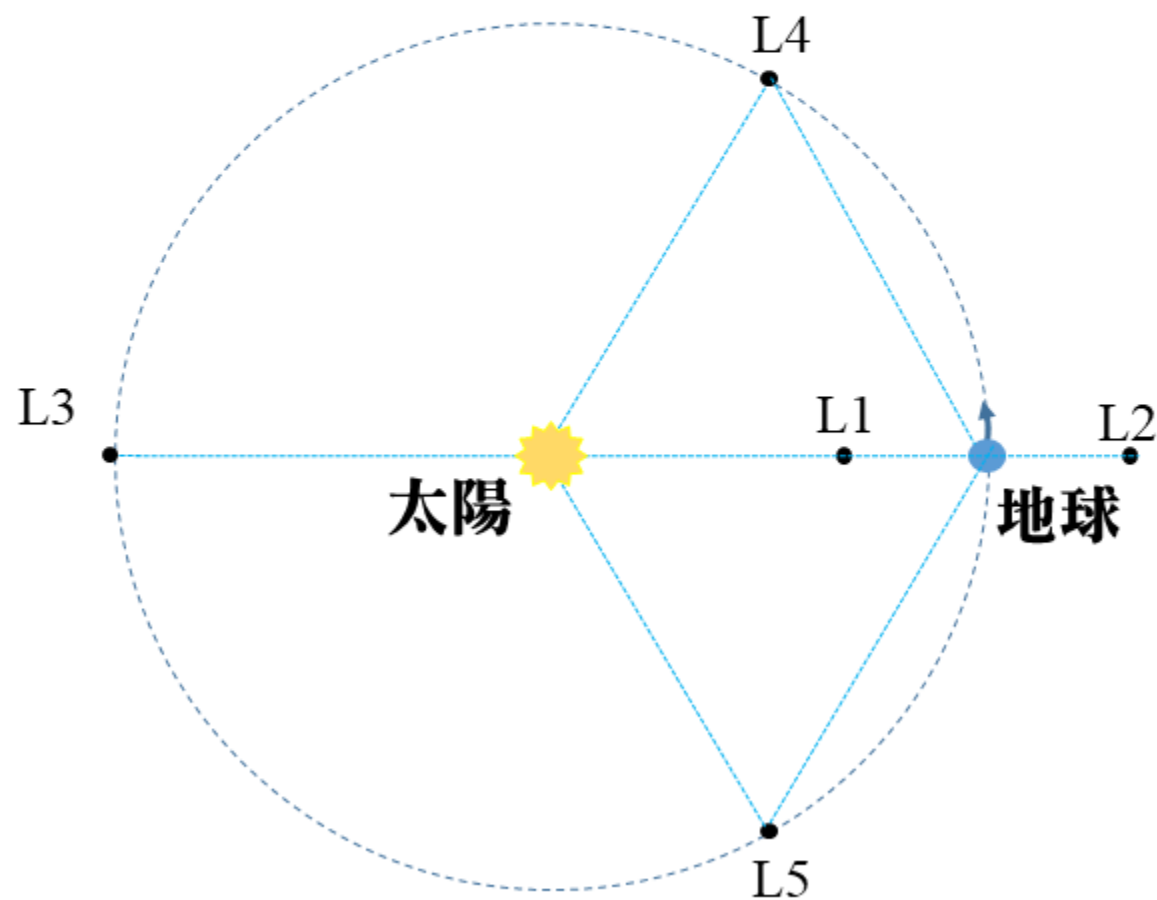
since 2021.12.25



拉格朗日點

(Lagrangian point)

兩個天體勢力（引力）相當之處；第三個小天體可維持不變相對位置



日地 L2 區域：除了繞太陽原來軌道，還多了地球引力

→ 與地球公轉週期相同，一直被地球遮住，背對太陽。距離地

球 $\approx \sqrt[3]{\frac{M_{\oplus}}{3M_{\odot}}}$ [au]，約150萬公里

適合放望遠鏡（無法維修；通訊容易，但太陽能板怎麼辦？）：WMAP, Planck, Herschel, Gaia, JWST ...

L1 適合放觀察太陽的望遠鏡

結論

- 「適當」的行星環境可能孕育出生命
- 現在的「世界觀」：目前已經發現超過5000顆系外行星，都在太陽附近 …
- … 有些可以是地球 2.0
- 尋找這些行星不僅因為部分有機會出現生命（即使我們認不出來），也是地球文明的下個家鄉