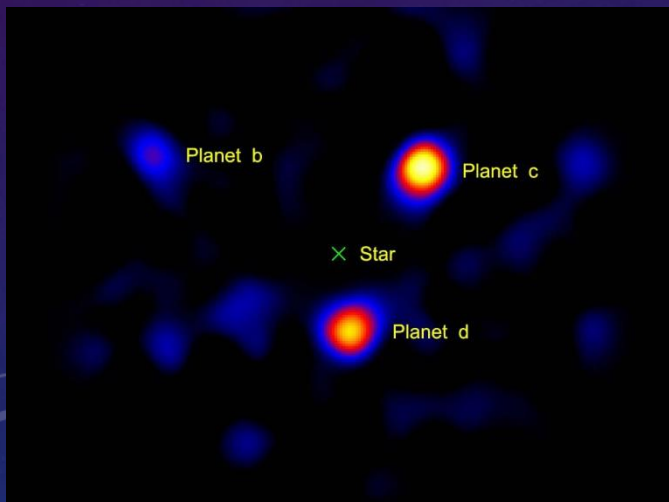
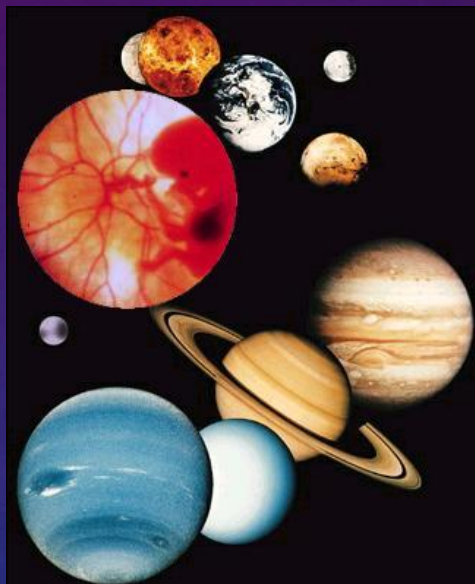
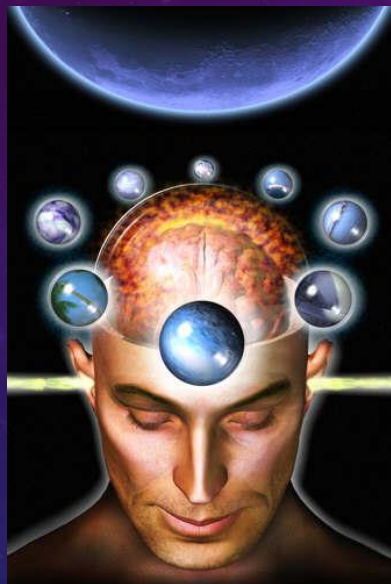


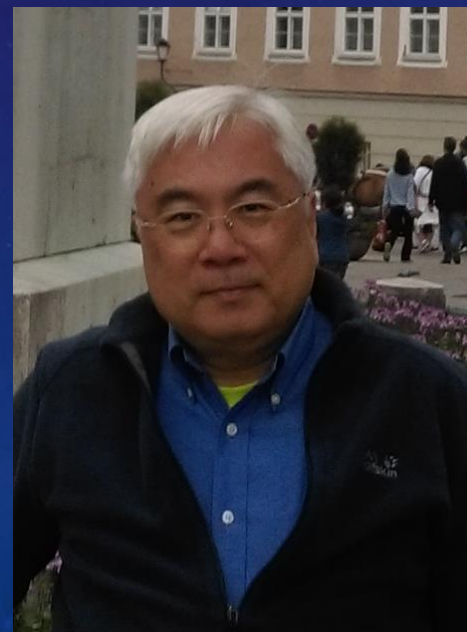
# 系外行星與地外生命



陳文屏

中央大學 天文所、物理系

2024.03.24 @ TAM 台北天文館



系外行星 extrasolar planet (exoplanet)  
地外生命 extraterrestrial life

## Astrobiology

天文生物學不只尋找外星人；也尋找地球人下個家鄉，成為外星人



<https://www.astro.ncu.edu.tw/~wchen/Tmp/exoPlanetETlife.pdf>

# 不講什麼 ...

- Space travel 時空旅行
- Pyramids, crop circles, paranormals 金字塔、麥田圈...
- The Roswell event, Area 51, UFOs ... 51區
- Alien abduction 被外星人綁架





# 會講什麼 ...

◆ Making sense 講道理

◆ What is life? 找什麼?  
(*Search for what?*)



尋找 外星 生命

◆ The extraterrestrial worlds  
(*Where to search?*) 往哪找?



◆ “Where is everybody?” 怎麼找?  
(*How to search? Are they here? Are we they?*)

**MIB**  
MEN IN BLACK

# 結論

- ◆ 沒有確實證據顯示外星文明來過地球
- ◆ 聽、看、停 —— 目前尚未在太空其他地方發現生命
- ◆ 目前人類已經有技術（逐漸）向外探尋，但才剛起步  
尋找外星人（文明）；尋找地球人的下一站
- ◆ 「適合的行星繞行適合的恆星」機會大些

多半人「相信」外星人存在，因為...

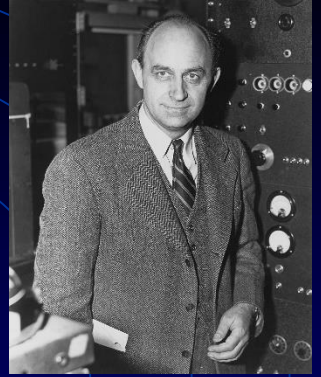
- ✓ 相信沒有對錯，但理由是什麼？
- ✓ 是因為宇宙（時間、空間）好大，無奇不有？  
不知道的事情太多了，該寧可信其有？

但目前認知宇宙並非無限

「有限的大小、時間」× 機率 = 期望值

- ✓ 地球是目前唯一已知有（智慧）生命存在的天體  
是我們特殊？還是我們找錯地方？找錯東西？

「費米悖論」(Fermi paradox) 義大利裔美籍物理學家費米(Enrico Fermi) 於1950年某個午餐時，跟 Los Alamos National Laboratory (位於美國新墨西哥州) 同事聊到不明飛行物 (unidentified flying objects; UFO) 是否存在的話題，費米突然冒出「他們都到哪去了？」*Where is everybody?* 事後對於當時用的字眼不確定 (也有說 “*Where are they?*”)



這些訓練有素的科學家基於「平庸法則」(mediocrity principle)，也就是地球很普通，進一步太陽系、行星系統、生命、文明或許也如此，那麼外星人應該到處都是，但為何似乎並非如此？是生命的可能性超出想像、還是發展出文明需要極大的機緣、又或者宇宙實在太大，它們還在路上？科學家並非不相信有外星生命，反而是因為到目前為止沒有發現，才讓人納悶



*Life as we know it.*

**地球上我們這種生命存在行星表面，  
以特定的因果關係運作** 自然科學

**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？）



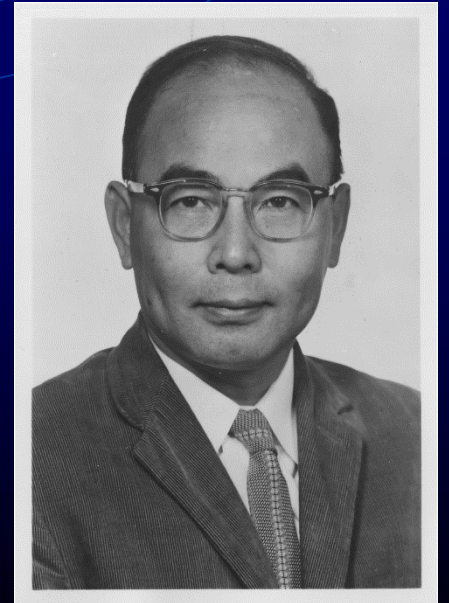
# 行星與生命

- 何謂生命？何謂文明？
  - 「我們已知的這種生命」需要能源（來活動）
    - ✓ 恆星產生大量而長期穩定的能量
    - ✓ 旁邊的行星利用能源，進行穩定的化學反應
    - ✓ 液態化學效率高而能控制（水很不錯！）
- ⇒ 找表面有液體（水）的行星

1961年在美國綠堤 (Green Bank) 舉辦了「尋找地外智慧生物」 (Search for extraterrestrial intelligence) 研討會。當時由於電波望遠鏡已經足夠靈敏，因此法蘭克·德瑞克 (Frank Drake) 提出以電波搜尋高等文明（而非原始生物）的可行性

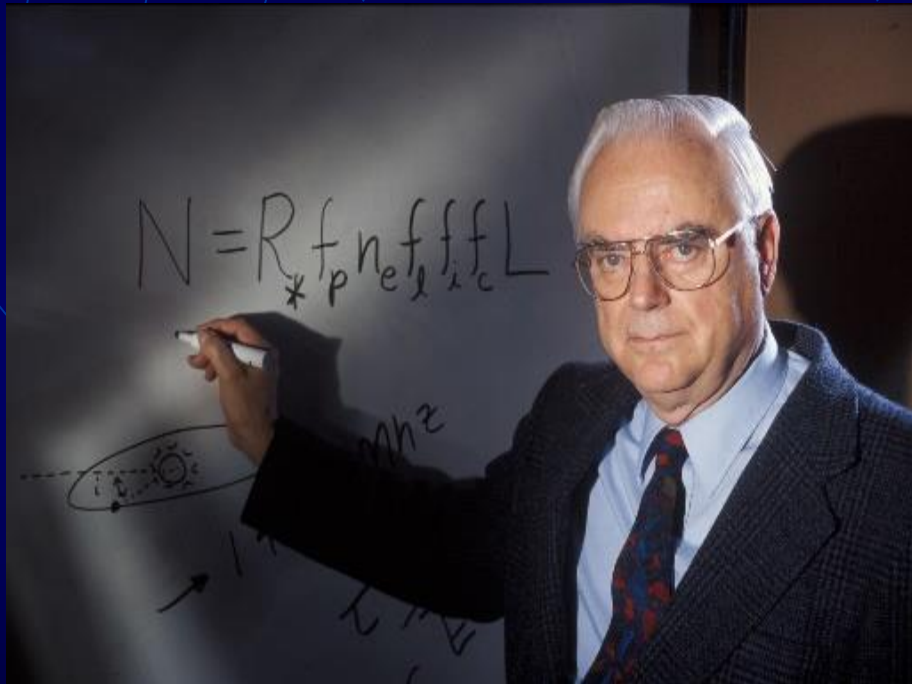
德瑞克當年提出的概念是連串的數字與機率，後人有不同表示方式。1961年該次研討會共有10位參加者，包括了天文學、化學、神經科學的學者，也有企業家

其中包括華裔天文學家黃授書 (Su-Shu Huang, 1915~1977)，他在北京清華大學獲得碩士，之後赴美芝加哥大學取得天文博士學位。早年研究原子輻射機制，後來專注於恆星大氣、雙星系統，以及在恆星周圍的行星有怎麼樣的環境，能讓液態水存在而有利於生命誕生



# 德瑞克方程 (Drake Equation)

## 銀河系中高等文明的數目



有多少文明可以聯絡？

何謂文明？以前或以後的不算

- ✓ 他們希望聯絡嗎？
- ✓ 怎麼跟他們聯絡呢？

德瑞克 (Frank Drake, 1930~2022) 直到晚年仍參與搜尋外星文明的計畫

<https://www.sciencefriday.com/articles/frank-drake-is-still-searching-for-e-t/>

$$N = N_* f_s f_p f_e f_l f_i f_c L/L_{MW}$$

- ✓  $N$  : 現在銀河系中可以通訊的**文明數** (想估計這個)
- ✓  $N_*$  : 銀河系中的**恆星數** | 天文學
- ✓  $f_s$  : **類似太陽的恆星**比例 | 天文學
- ✓  $f_p$  : 每顆類似太陽的恆星**擁有行星系統**的比例 | 天文學、行星科學
- ✓  $f_e$  : 每個行星系統中**適合生命發生**的比例 | 生命科學
- ✓  $f_l$  : 適合的行星當中**實際發展出生命**的比例 | 生命科學
- ✓  $f_i$  : 生命**演化成智慧文明**的比例 | 人類學、社會學?
- ✓  $f_c$  : 擁有技術**而且願意對外通訊**的比例 | 社會學、心理學?
- ✓  $L/L_{MW}$  : 文明能夠通訊的**時間**/銀河系的壽命 | 未來學?



- Drake equation 並不是「方程式」
- ... 而是個估計數量的公式
- 公式中各個「因素」，以及各因素所採用的「數字」估計可能誤差很大
- 越前面的因素（天文的部分）我們知道得越多；越後面的因素（外星生物、社會、心理）越不確定，估計也越主觀

## 估計看看 .....

- 銀河系中大約有  $N_* = 3000$  億顆恆星
- 只考慮類似太陽的恆星， $\therefore f_s \approx 0.3$
- 太陽似乎是顆典型的恆星， $\therefore$  猜  $f_p \approx 1$
- 再猜  $f_e \approx 1/4$ ;  $f_l \approx 0.5 \sim 1$ ;  $f_i \approx 0.75 \sim 1$ ;  $f_c \approx 1$   
(這樣算保守還是無可救藥的樂觀?)
- 最不確定的數目是  $L$  (以年為單位)，亦即文明能存在多久  
我們的文明能存在 1,000 年嗎? 1,000,000 年呢?

## 估計的結果：

$$1. N = 300 G \times 0.3 \times 1 \times 0.25 \times 0.5 \\ \times 0.75 \times 1 \times L/10 G \approx L$$

$$2. N \sim 10 L \text{ (Sagan 1974)}$$

$$3. N \sim 120 L \text{ (最樂觀的估計)}$$

$$4. N \sim L/100 \text{ 億 (最悲觀的估計)}$$

最可能的關鍵在於是否「**發展出智慧文明**」

# 德瑞克估計式 的啟發

也就是說，銀河系中我們能聯絡到的文明個數  $N$   
在數值上差不多等於文明能存在的年數  $L$

$$N = L$$

文明存在越久，能碰到的機會越大！

∴ 可能的數目從  $N = 1$  (也就是我們自己) 到  $N > 1000$

$L$  是我們肩上沈重的宇宙責任 (文明要永續呀)



假設外星文明平均分布在銀河盤（半徑為  $d$ ）當中，  
那麼兩個文明之間的平均距離（ $a$ ）為

$$\pi d^2 / N = \pi (a/2)^2$$

$d = 6$ 萬光年

$N$	$a$
1	$\infty$
100	12,000 光年
1,000	3800 光年
10,000	1,200 光年
1,000,000	120 光年

當  $N = L = a$  ?

$$a = \sqrt[3]{4 d^2} = 2400 \text{ 年}$$

地球文明「被找得到」多久了呢？

得活多久呢？

# 一切都是機率問題 ...

- 如果彩券中獎機率是1000萬分之1
- 那麼買1張、1000張、1萬張、1000萬張？
- 一次買1張？買1000萬次？ 買越多，期望值越高

## 條件 機率

- ✓ 適合生命誕生的太空環境（比例）
- ✓ 環境對了，實際生命可以誕生的比例
- ✓ 生命出現後可以維持下去，發展出文明的比例
- ✓ 有了文明，可以（願意）溝通的比例
- ✓ 讓我們碰到了（去找，還是讓它們來找？）

生命活動為連串的化學反應

液態化學快速而穩定

行星地表提供穩定化學反應的環境

早年地球環境可以讓生命「土生土長」

所以，尋找外星生命，或是地球2.0，  
目標應該是圍繞在適當的恆星周圍的  
適當行星

# 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

尚未發現 X 行星?  
體積不大?

行星

八顆

矮行星

五顆

(增加中)

衛星

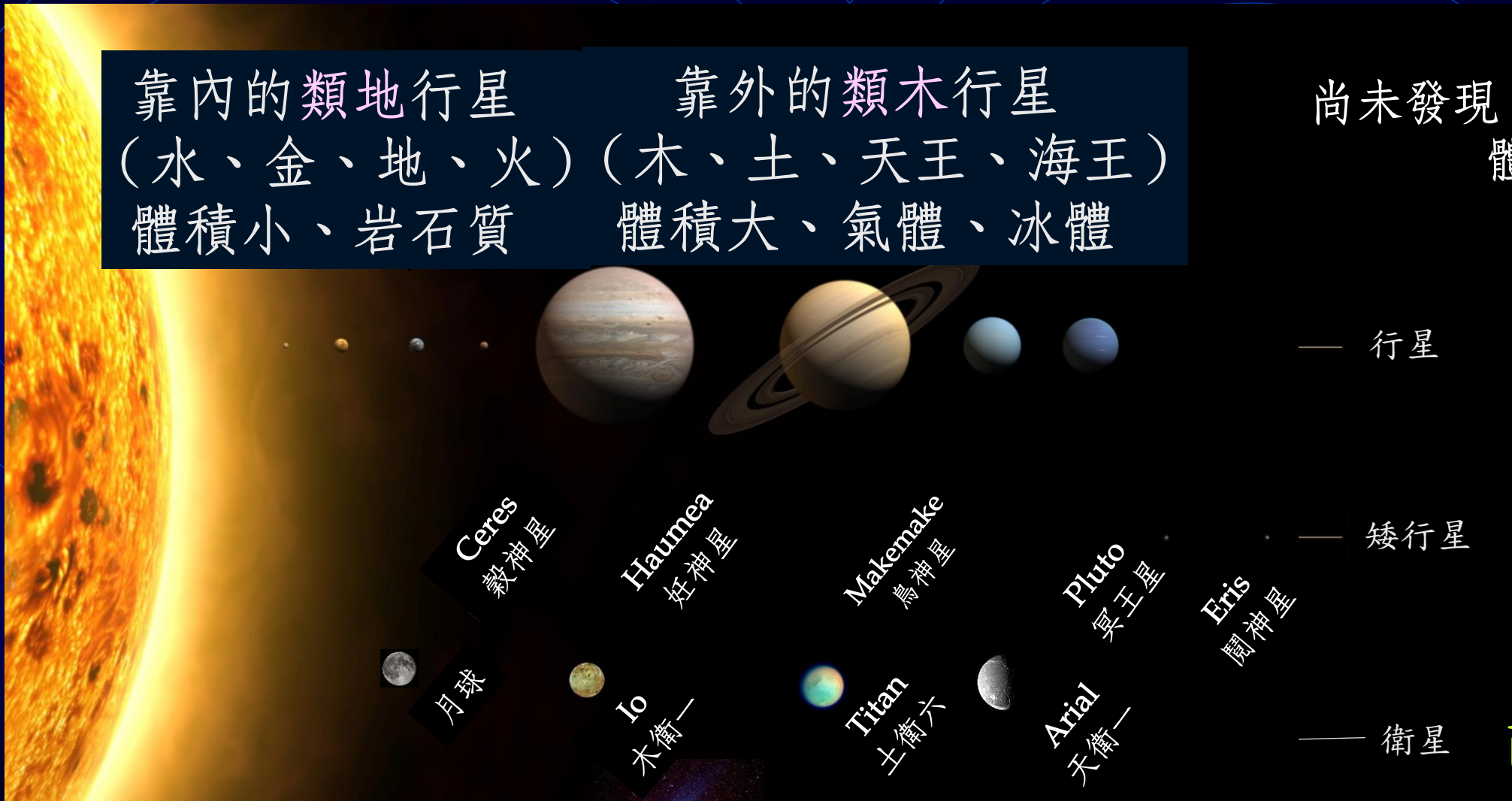
百來顆

小行星

百萬顆

彗星

數億顆



修改自IAU原圖  
未照尺度比例呈現



# 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 **恆星受影響**

恆星太亮、太近



亮度變化

星光變暗

位置變化

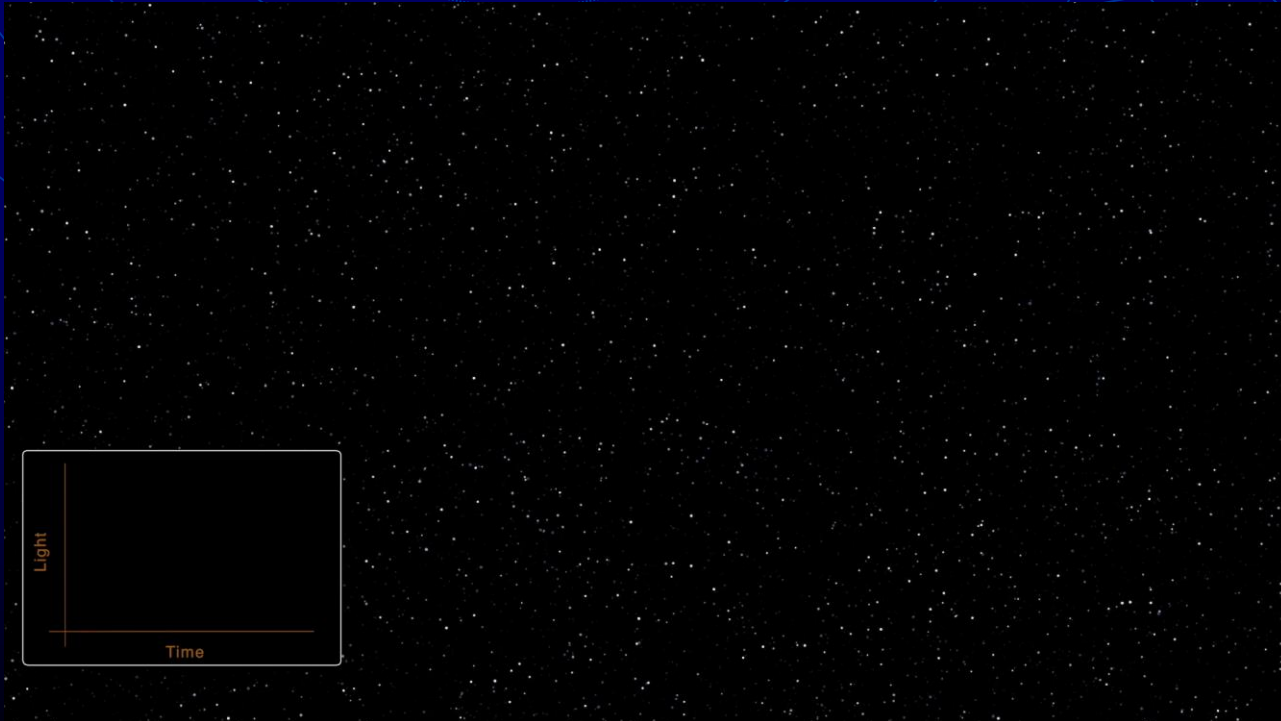
星光變亮

# 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（變暗再恢復）變化（凌星的光變曲線）



系外行星軌道面的傾角相對於我們視線方向，不一定發生凌星現象

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



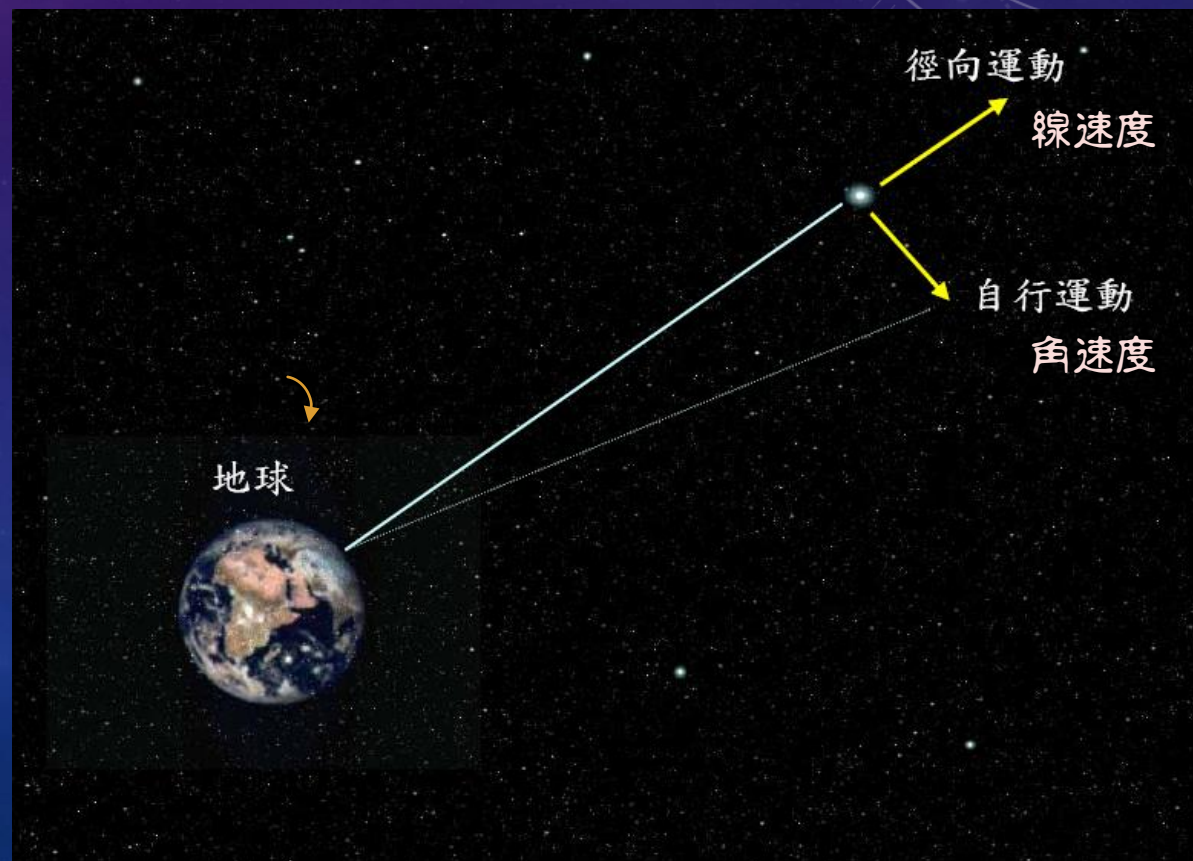
天體在太空的運動可以分成兩個分量

測量位置變化

1. 投影在天球上的**自行運動** (proper motion)，例如毫角秒／年
2. 垂直於視線的**徑向運動** (radial velocity)。

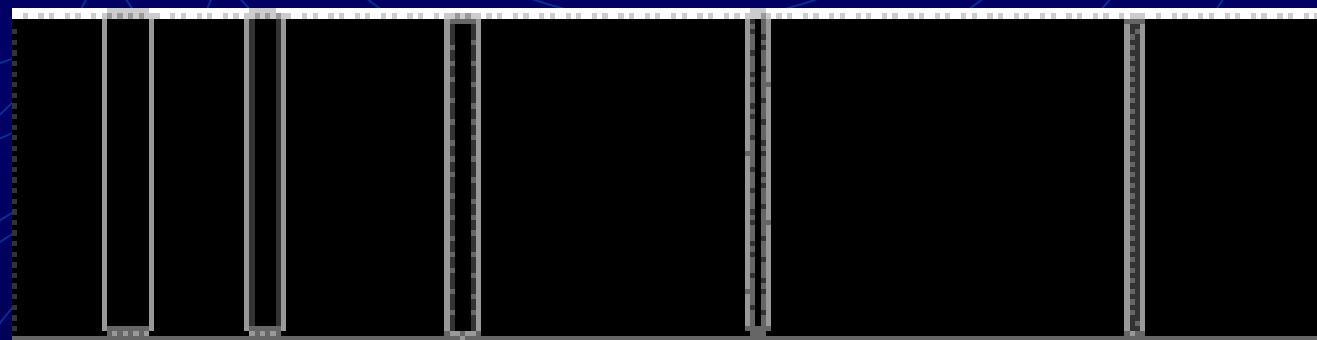
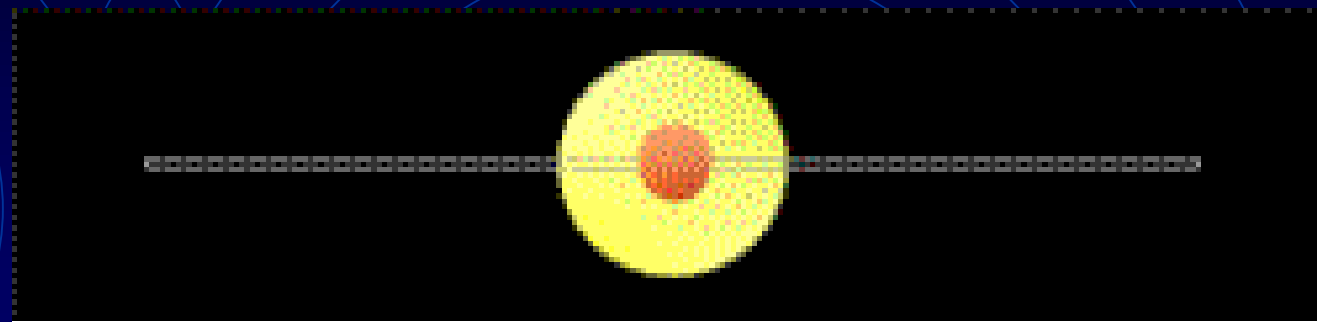
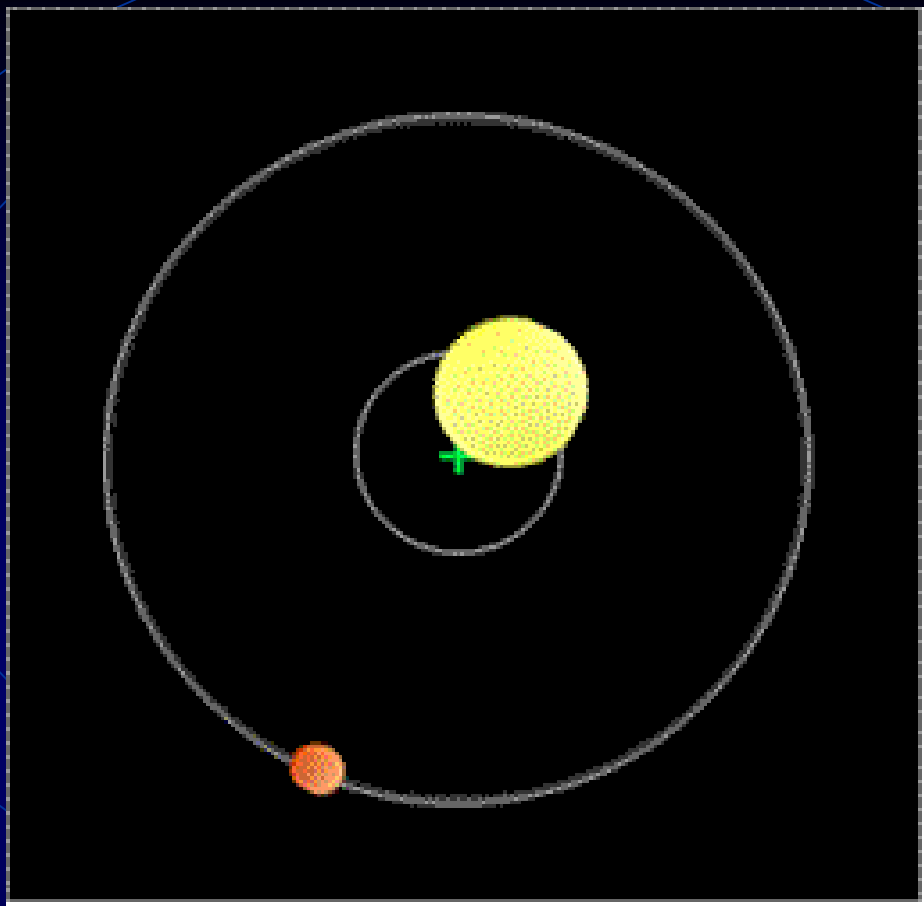
利用都卜勒  
效應測量

自行運動 × 距離 = (投影的) 線速度  
再考慮徑向運動 = 太空中 3D 的真實運動





# 都卜勒效應 (Doppler effect)



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」

# 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

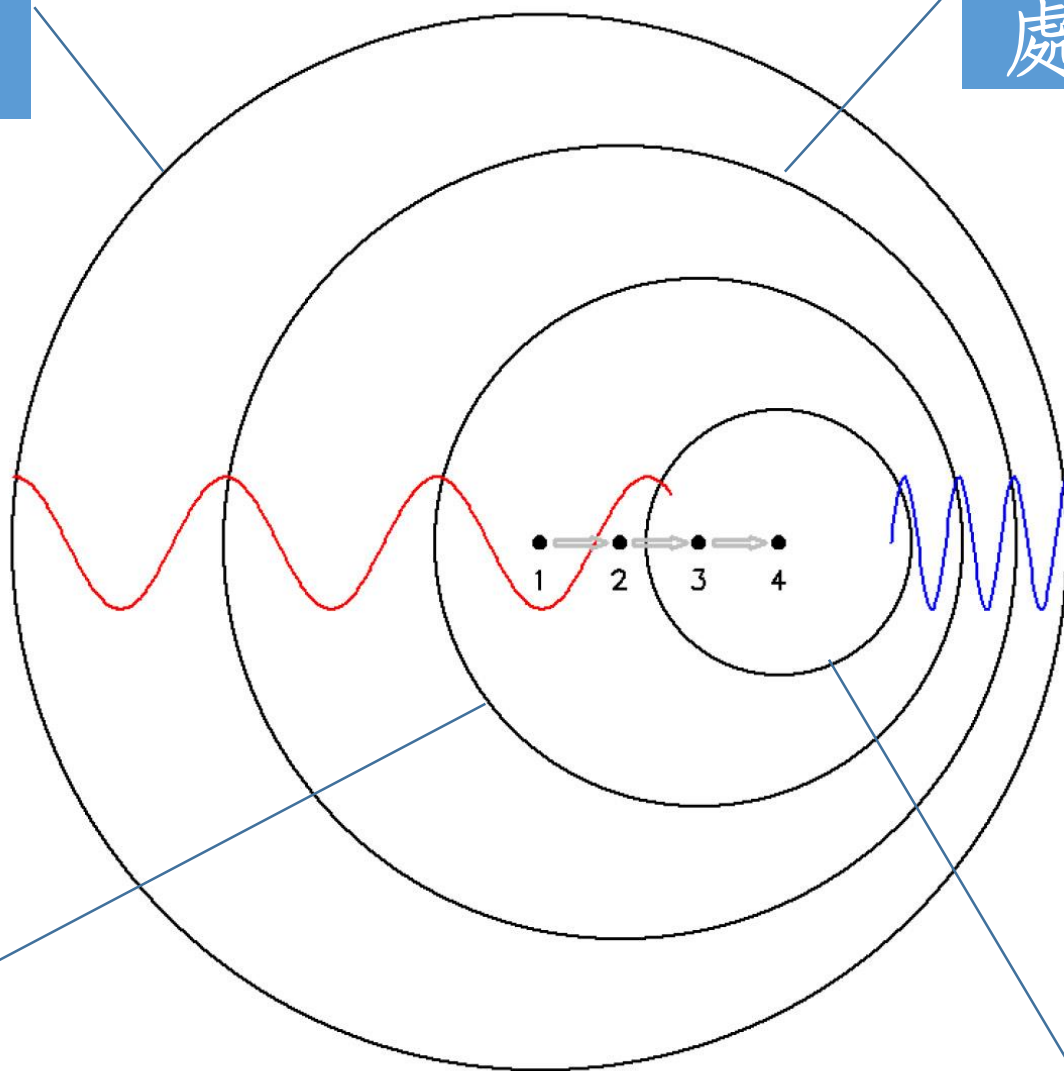


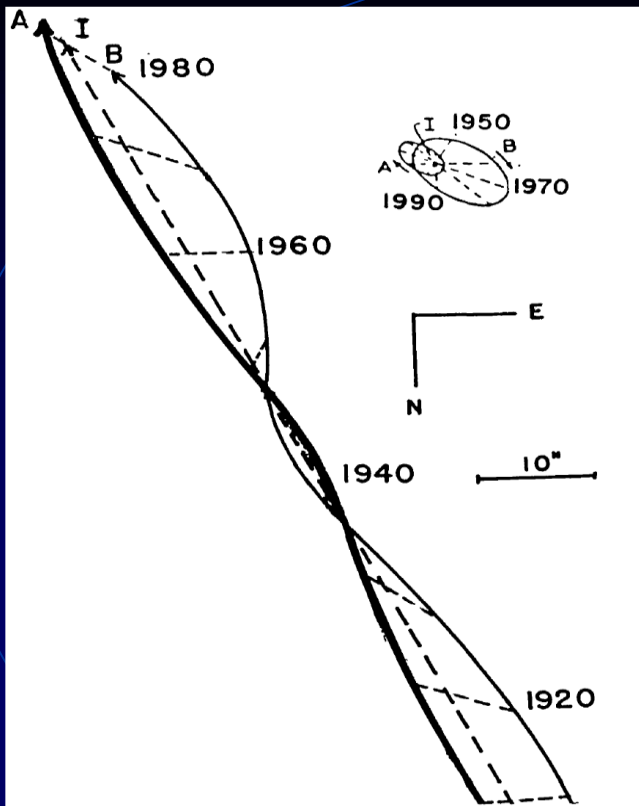
波源在3處發出的漣漪

他看到藍移現象

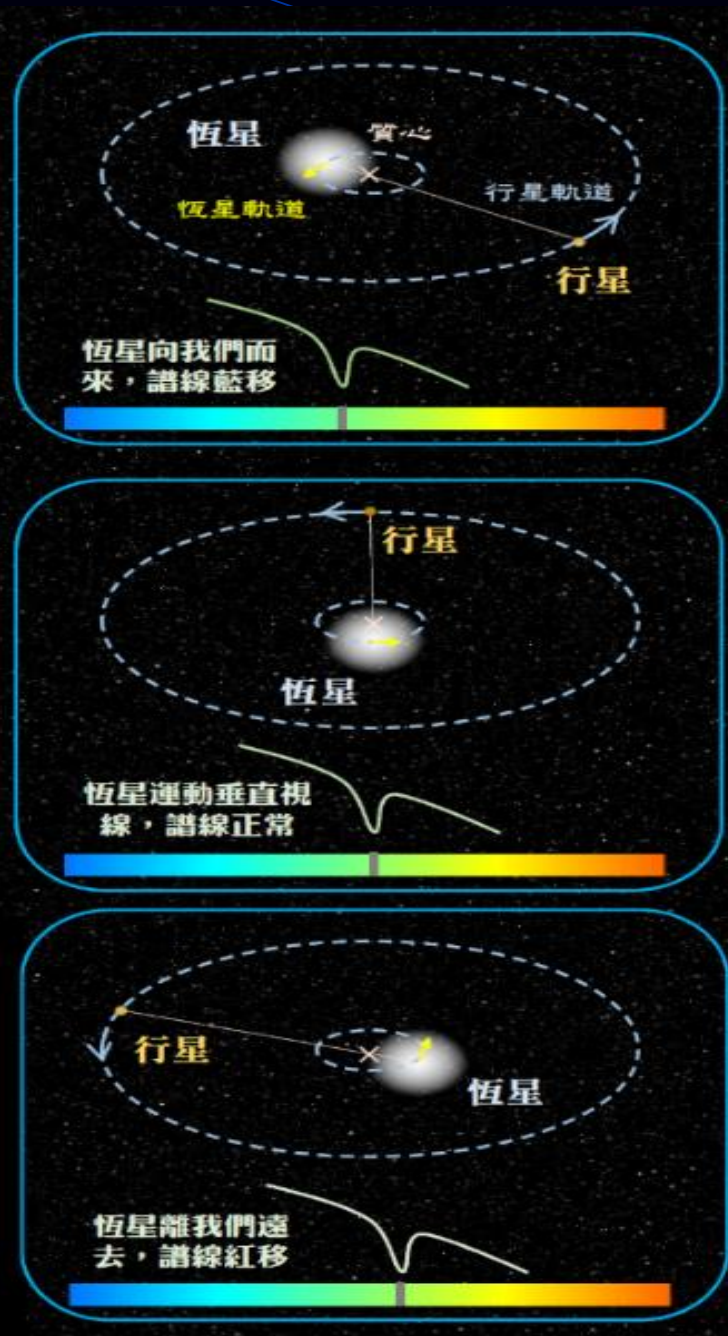


波源在3處發出的漣漪

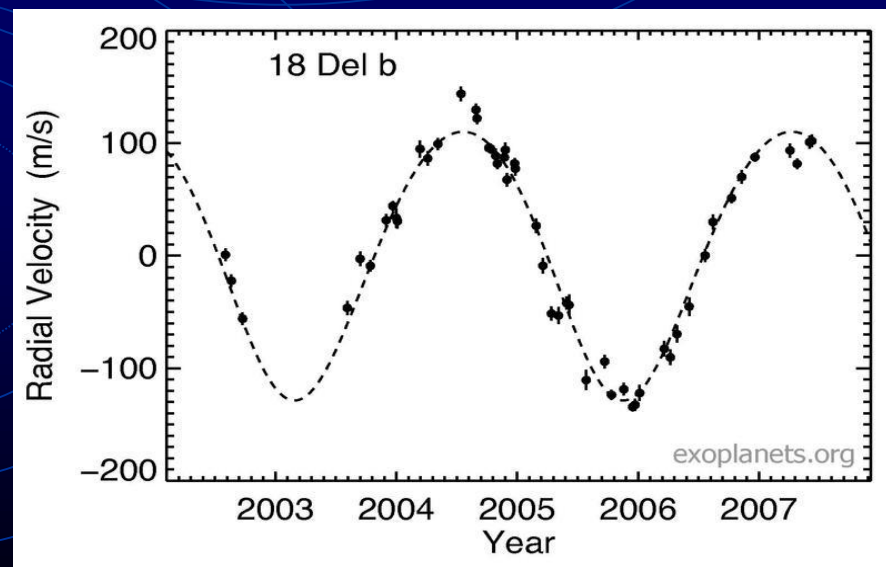




天狼星看起來的軌跡並非成直線，而因為跟伴星互繞，看起來彎曲前進 (Lippincott 1961)



18 Delphini 恆星因為與行星 18 Del b 繞行而產生徑向速度的週期變化 (James McBride)



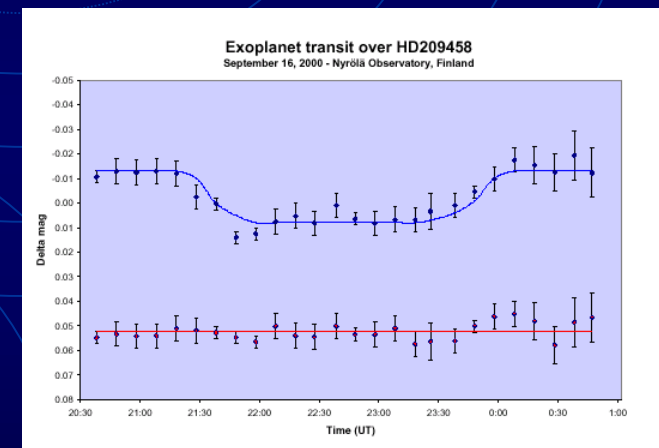
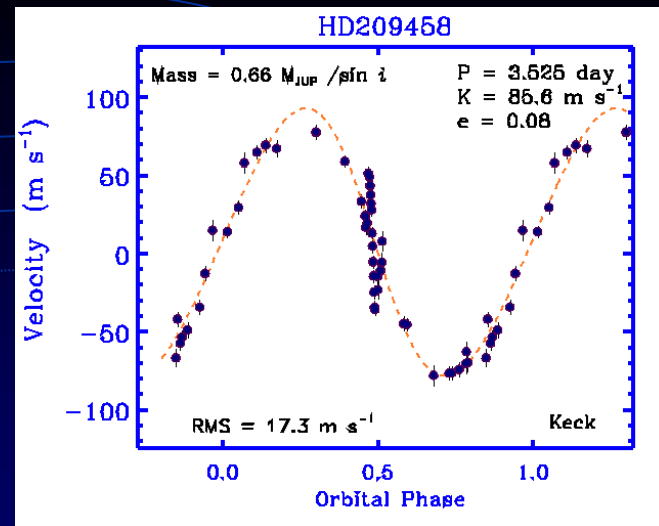
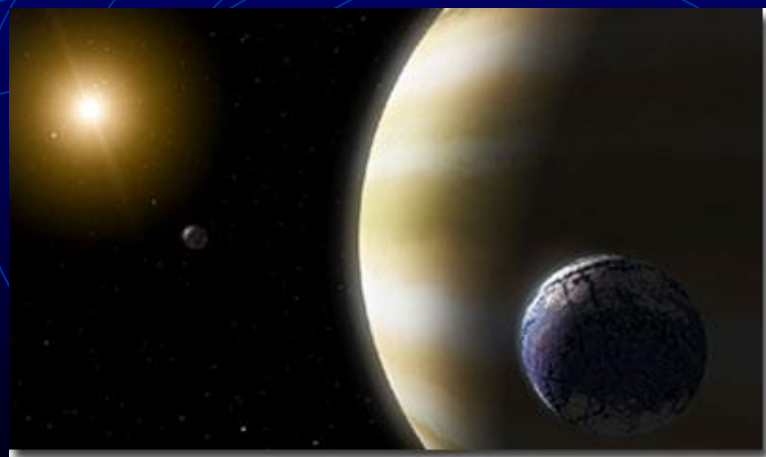
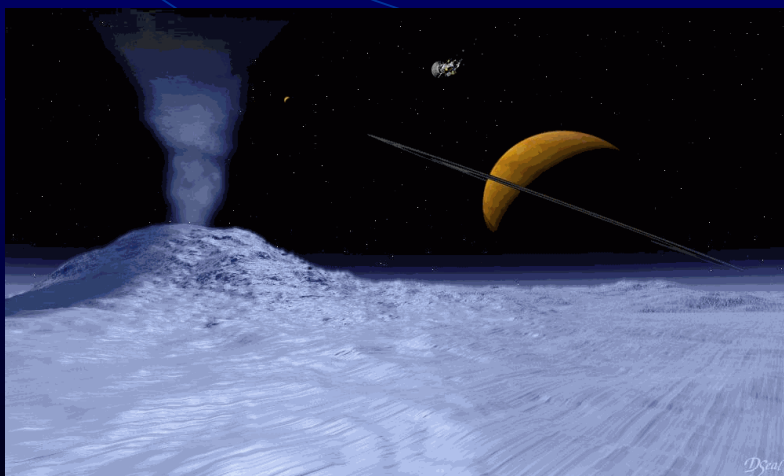


目前已經在太陽系以外發現超過 5000顆  
恆星周圍有行星——**系外行星**

extrasolar planets; exoplanets

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

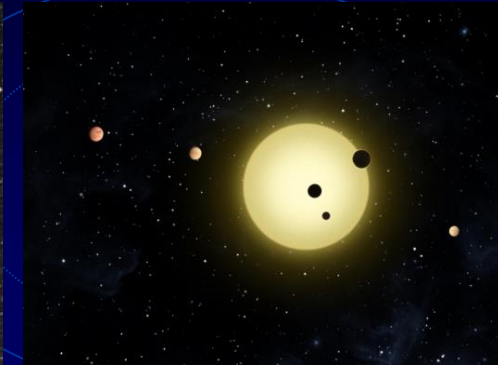
1~8 顆；多半又大又近



Super-earths  
超級地球 → earths

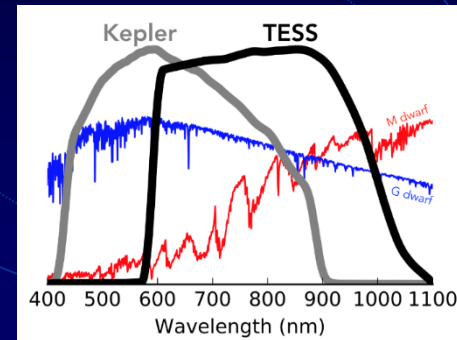
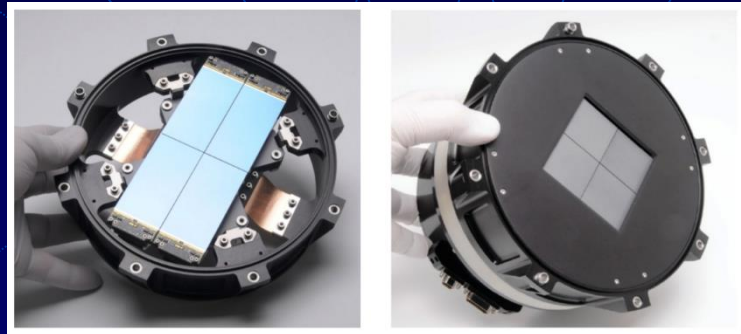


# 克卜勒太空望遠鏡 (Kepler Space Telescope)



- 利用掩星方式尋找（地球般大小）的系外行星
- 2009.3發射；同樣天區監測15萬顆恆星，預計3.5年壽命，實際已經超過10年
- 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，預期發現超過地球大小的行星；任務持續中

# 如何稱呼天體伴侶？

都可以申請取暱稱

先發現已經有名稱，伴星依序英文大寫 B, C, etc.

例如天狼（星）（Sirius, Alpha CMa 大犬座 $\alpha$ 星）

伴星天狼B（星）；Sirius = Sirius A

周圍行星 英文小寫 b, c, d

從母姓 51 Pegasi b; 55 Cancri c; Alpha Centauri Bb

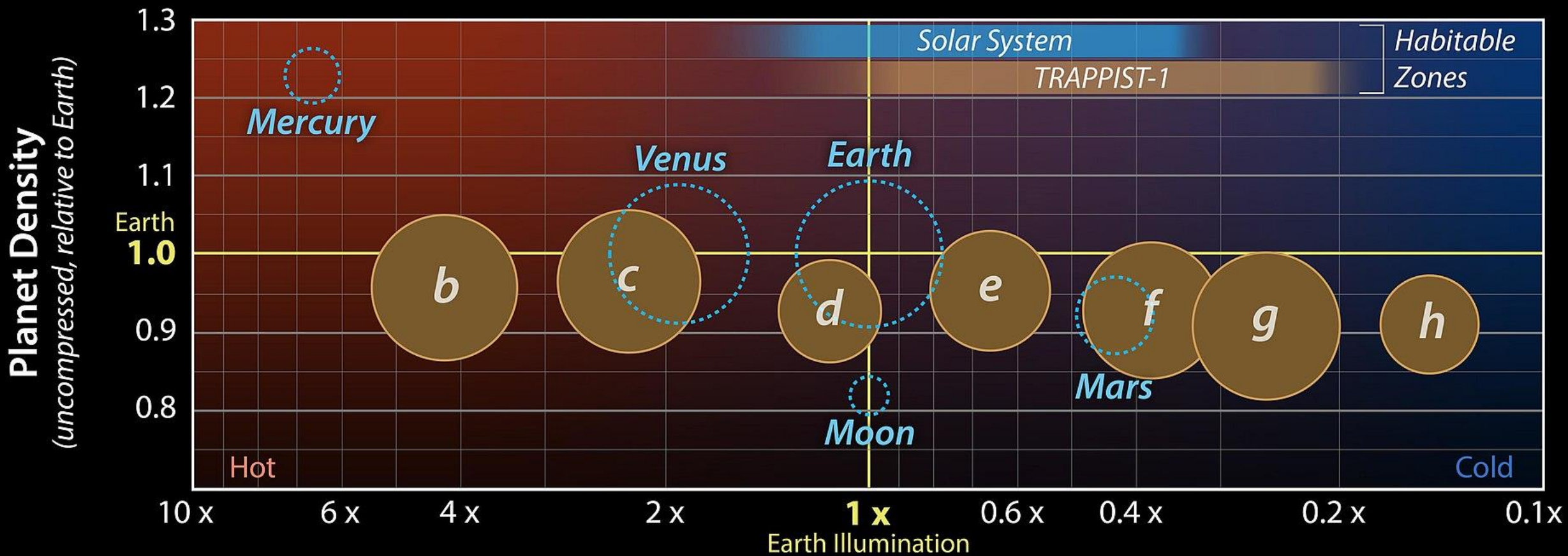
從儀器 Kepler-186f; CoRoT7-b; Qatar-1b

繞著雙星 Kepler-34(AB)b



# TRAPPIST-1/Solar System Comparison

M8, R = 16.5 mag, 41 ly



Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope (TRAPPIST) at La Silla Observatory in Chile

**Illumination from Star**  
(relative to Earth/Sun)



TR

my



B

1

A



escope

etherlands

14

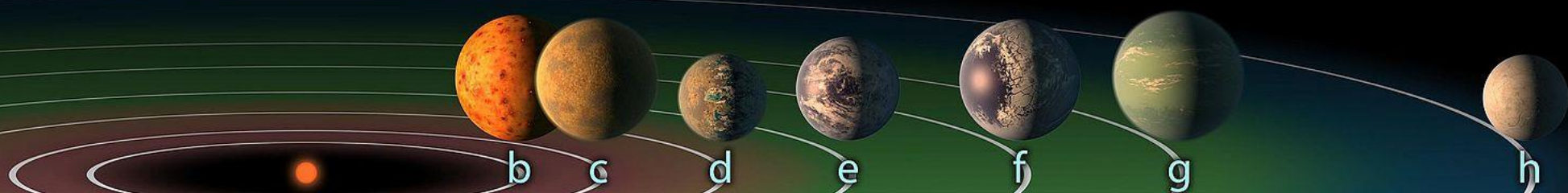
ndert



tion



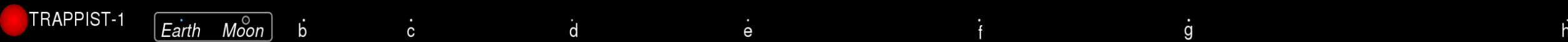
# TRAPPIST-1 System



# Inner Solar System



Enlarged 25x



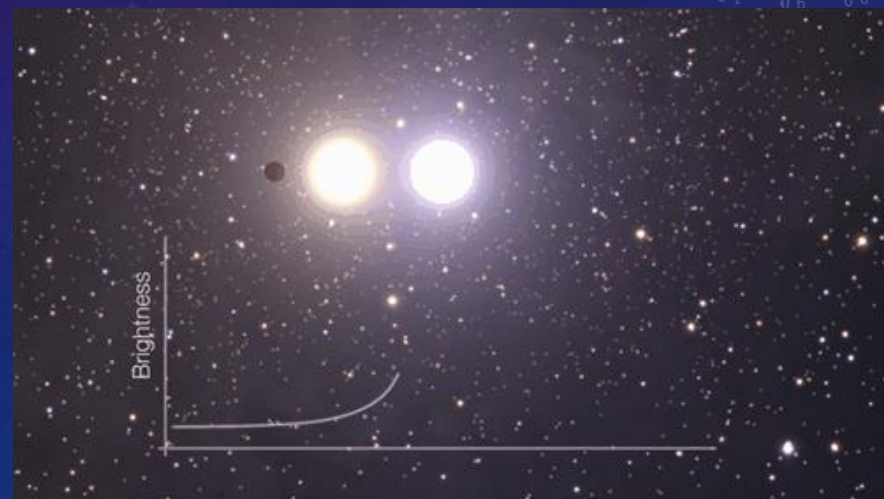
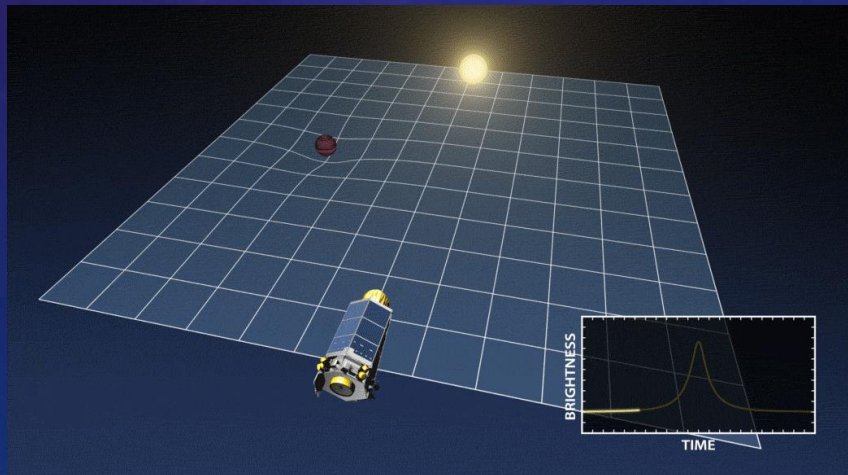
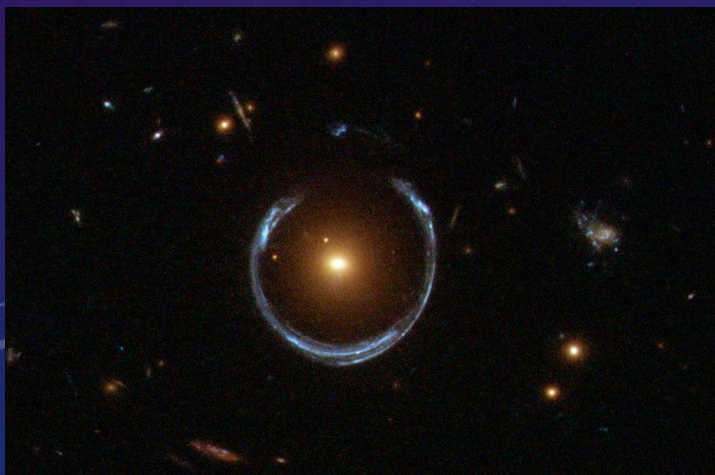
# 偵測行星存在的方法

## 3—擋住了，但更亮！

如果（前景）的恆星或行星正好精準地位於我們和背景光源之間，那麼背景光源的**亮度會增亮**

「**重力微透鏡**」效應

**讓別人光芒更明亮**





# 偵測行星存在的方法

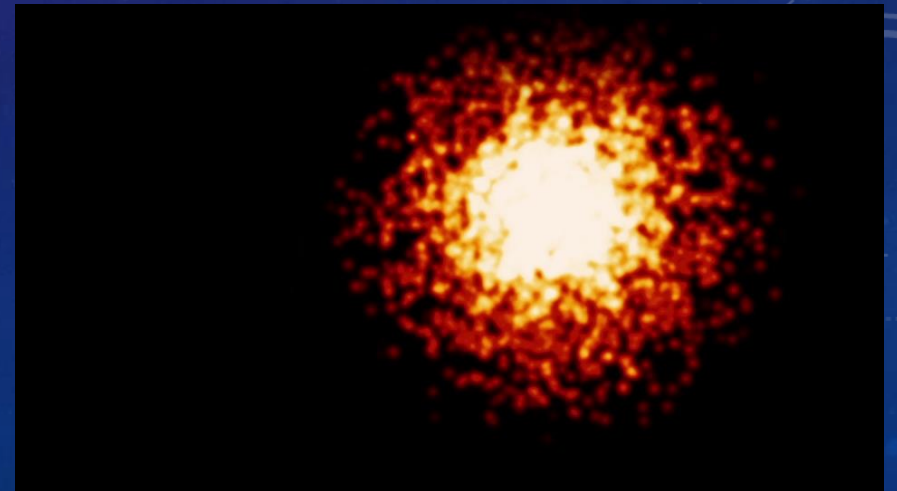
一張影像勝過千言萬語！

—— 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

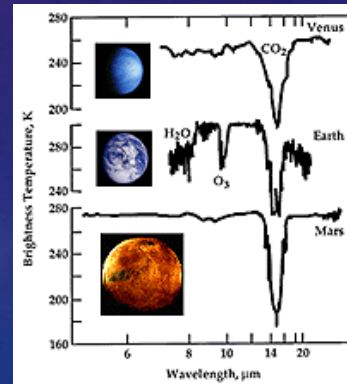
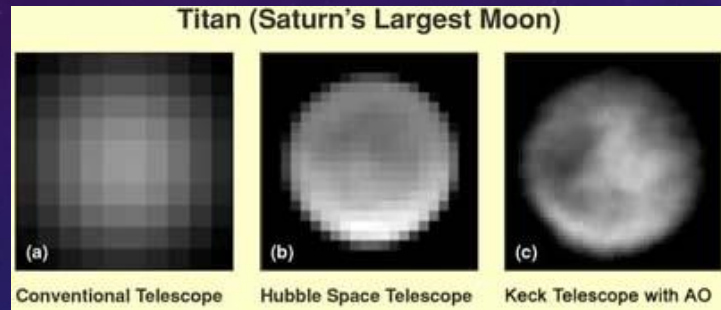
可能的技術：把恆星的光消除！







越來越大的望遠鏡

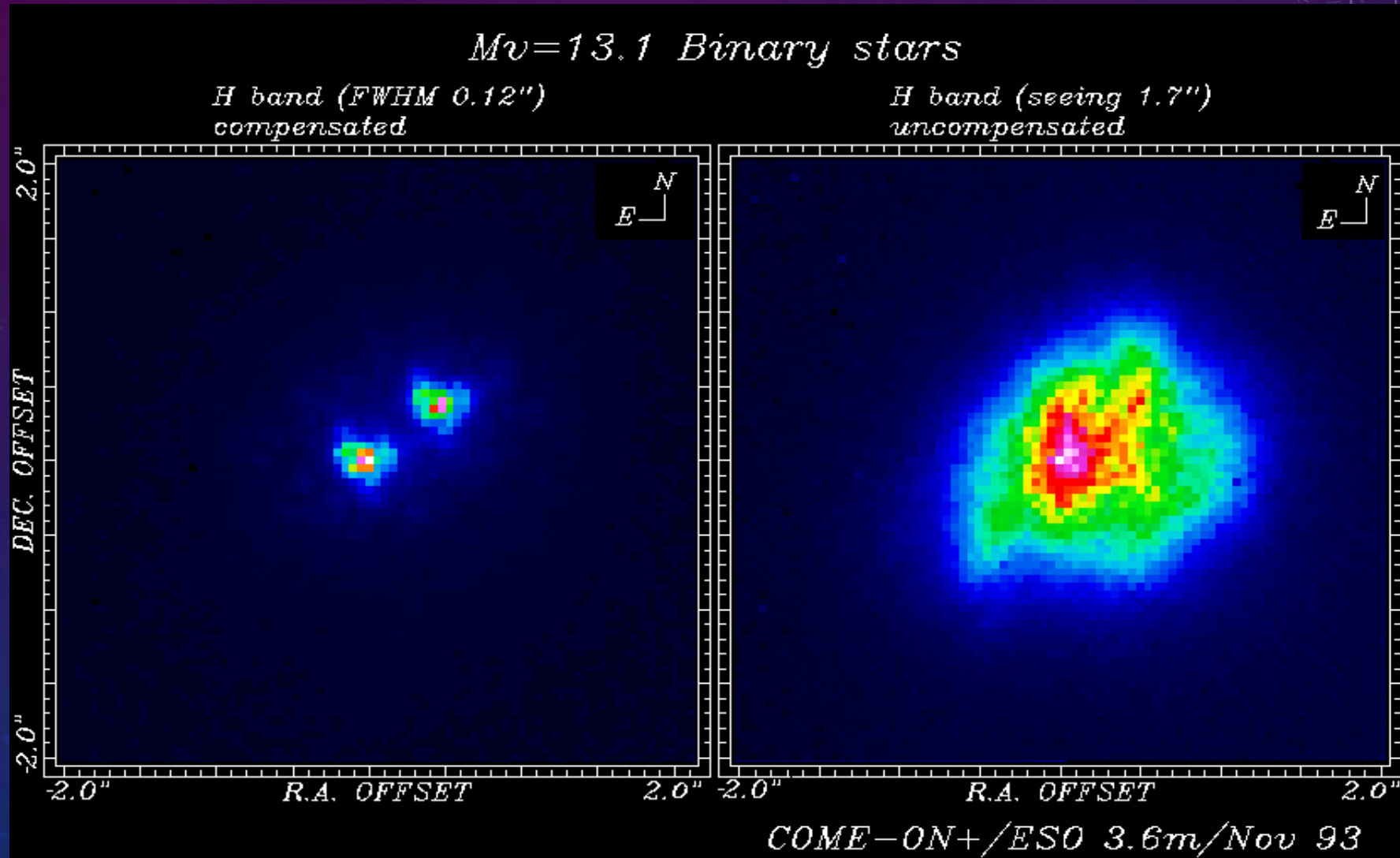


看得越來越清楚的觀測技術

越來越靈敏的偵測儀器

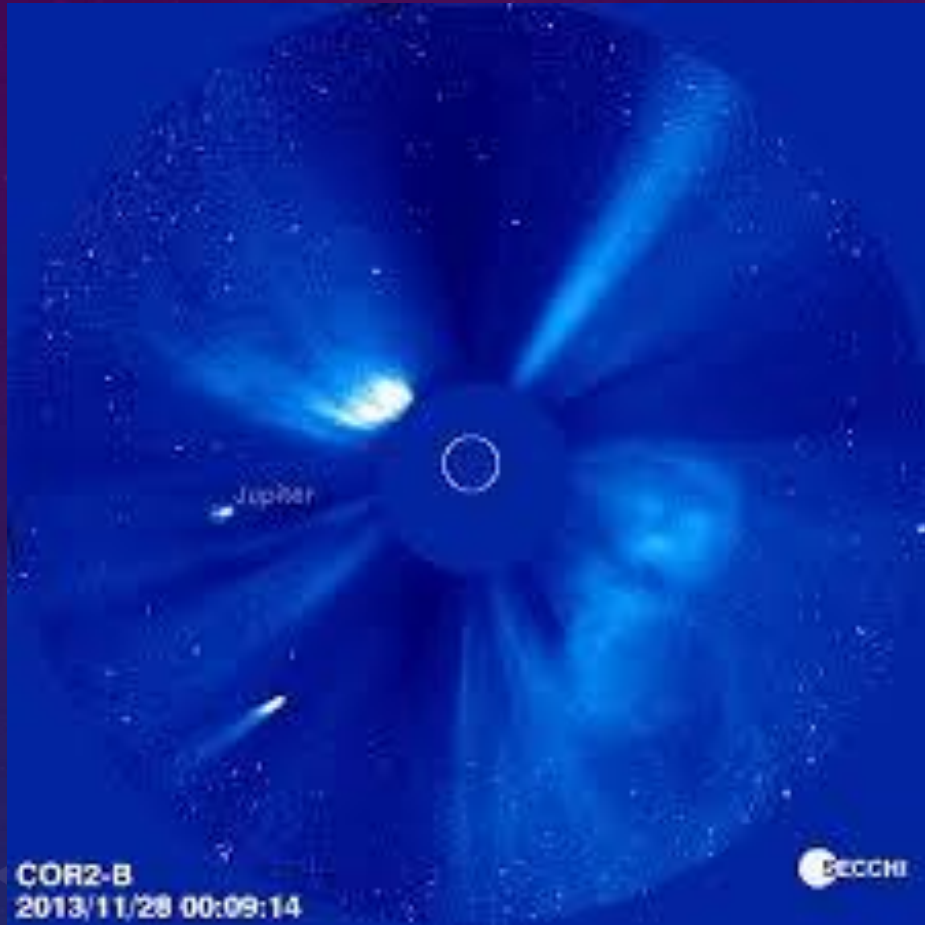


# 「消除」地球大氣干擾，讓觀測更清晰

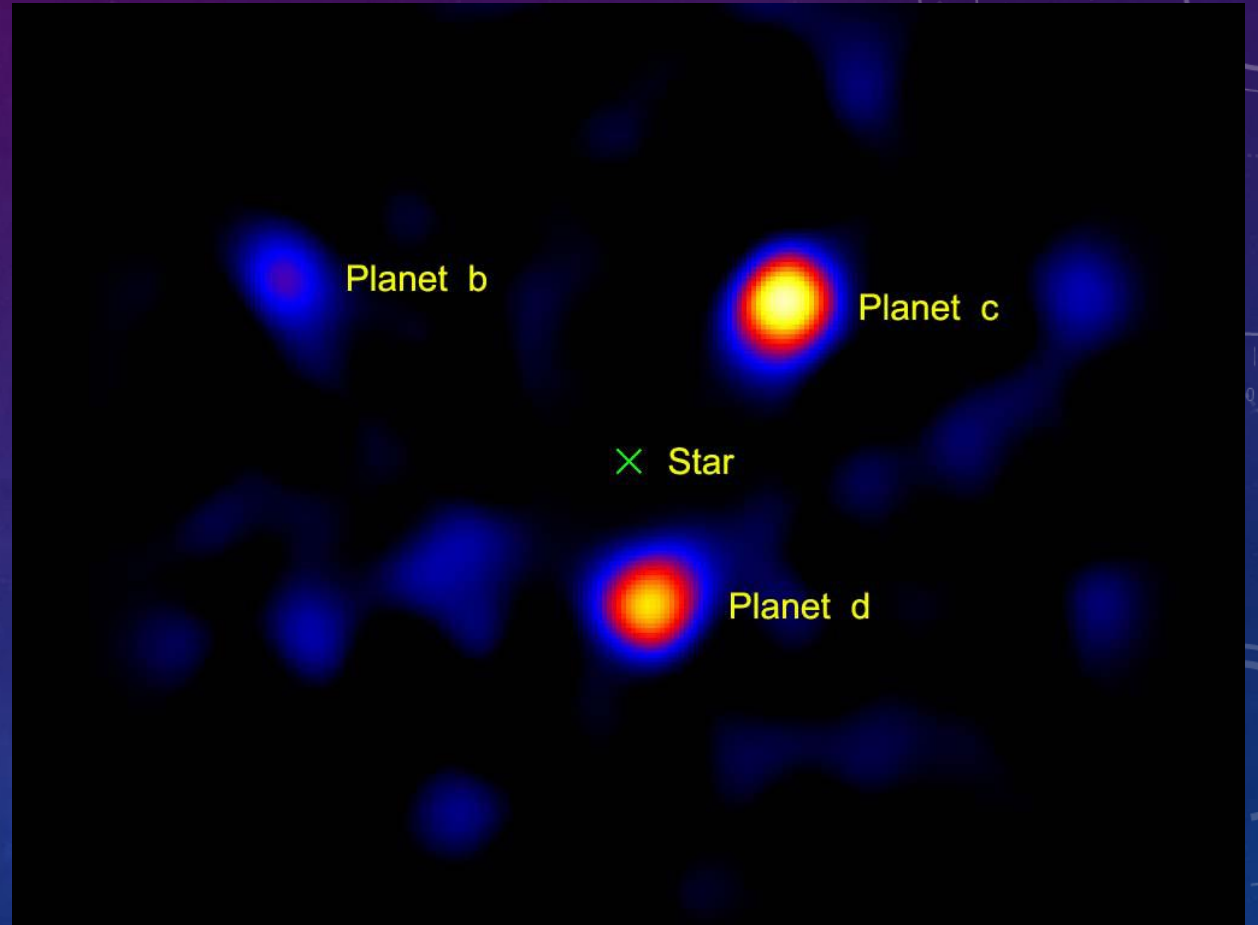


# 日冕儀 (Coronagraph)

把鄰近太亮的天體擋住



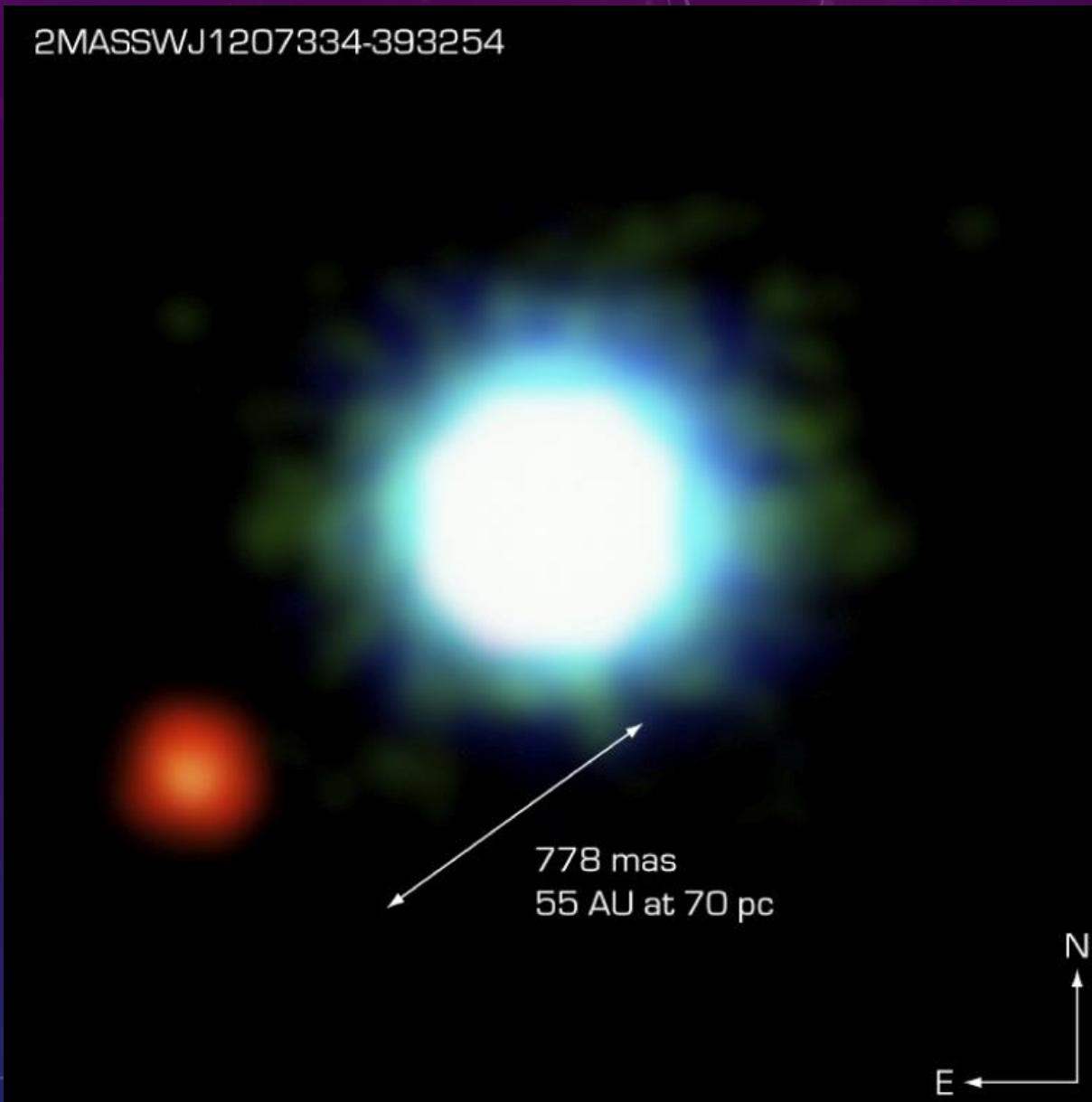
太陽衛星拍攝的太陽影像 + 彗星



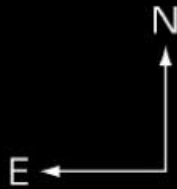
帕洛瑪天文台 5.1 公尺望遠鏡，使用其中 1.5 m 部分口徑，加裝日冕儀拍攝 HR5799 周圍的行星



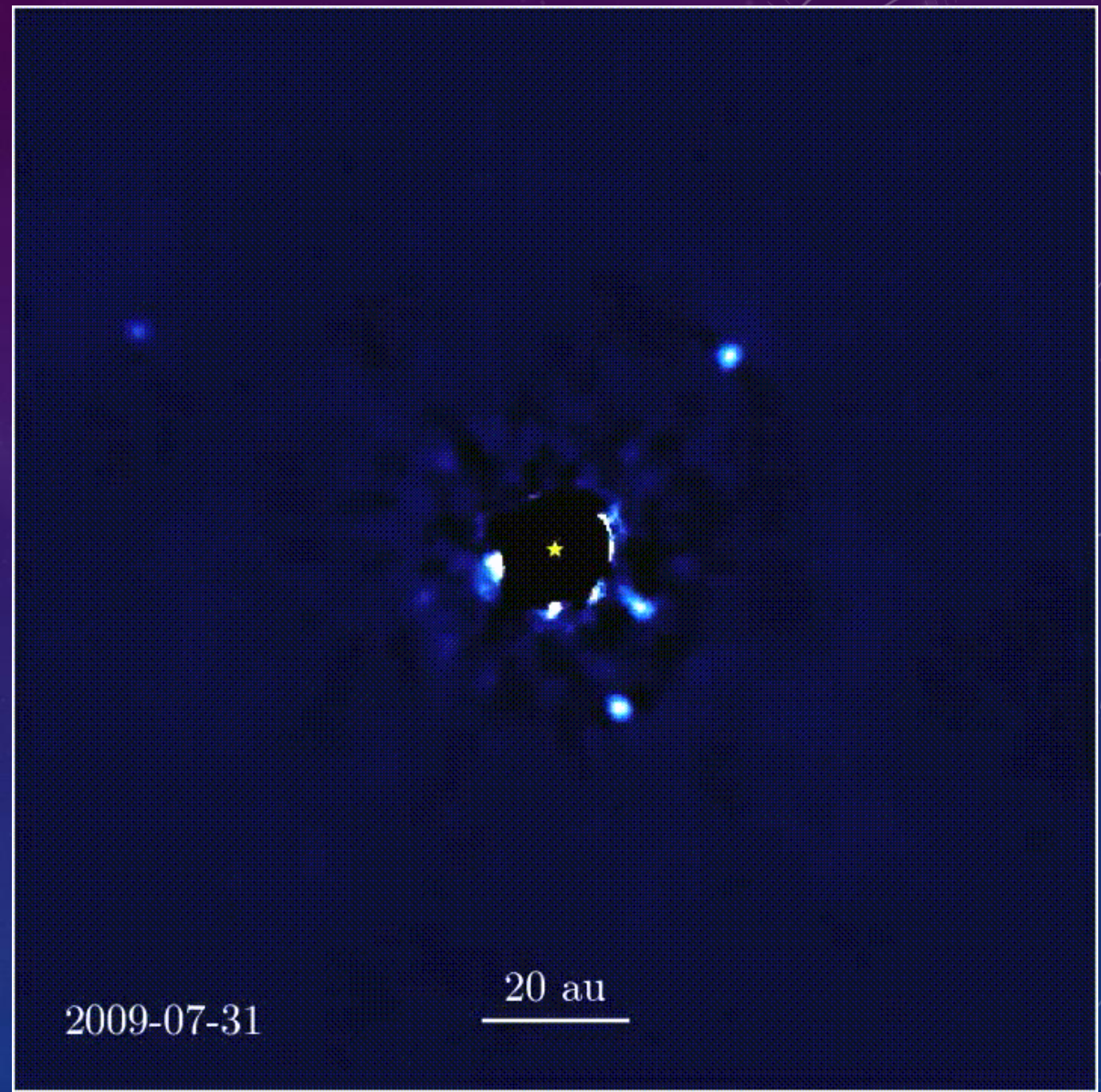
2MASSWJ1207334-393254



778 mas  
55 AU at 70 pc



2M1207a 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



2009-07-31

20 au

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

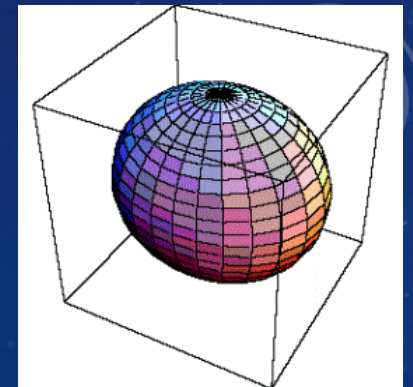
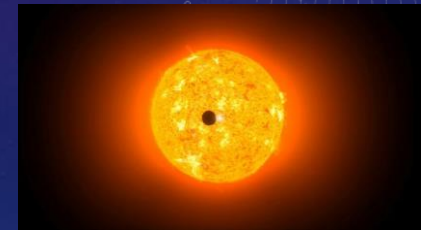
## --- 已知行星凌星計時

其他行星造成已知凌星週期改變

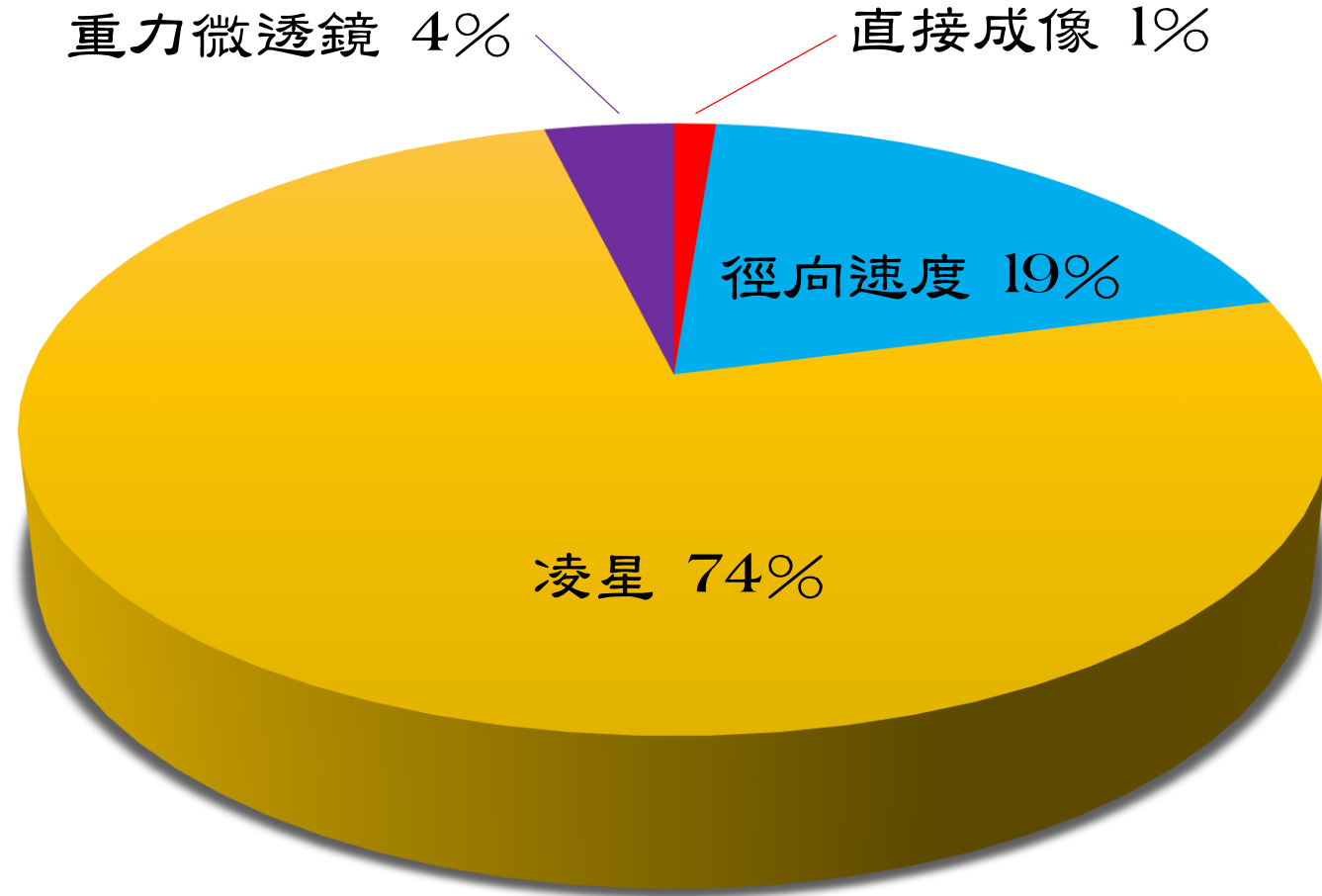
## --- 星震

行星改變了星震模式

...



# 系外行星偵測方法統計



2024.03.20

Discovery Method	Number of Planets	%
<a href="#">Astrometry</a>	3	0.05%
<a href="#">Imaging</a>	68	1.21%
<a href="#">Radial Velocity</a>	1087	19.41%
<a href="#">Transit</a>	4166	74.41%
<a href="#">Transit timing variations</a>	29	0.52%
<a href="#">Eclipse timing variations</a>	17	0.30%
<a href="#">Microlensing</a>	210	3.75%
<a href="#">Pulsar timing variations</a>	7	0.13%
<a href="#">Pulsation timing variations</a>	2	0.04%
<a href="#">Orbital brightness modulations</a>	9	0.16%
<a href="#">Disk Kinematics</a>	1	0.02%

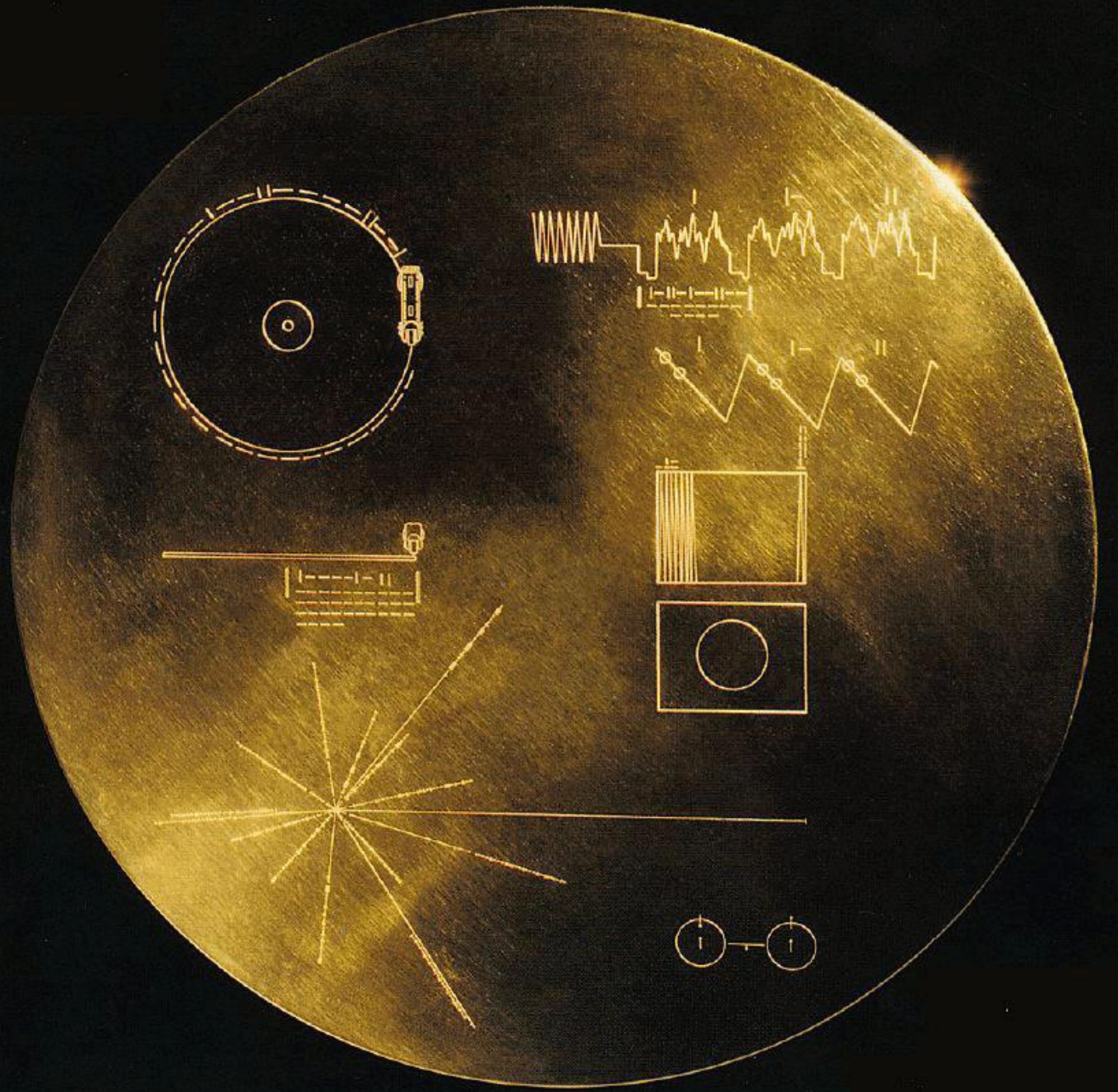
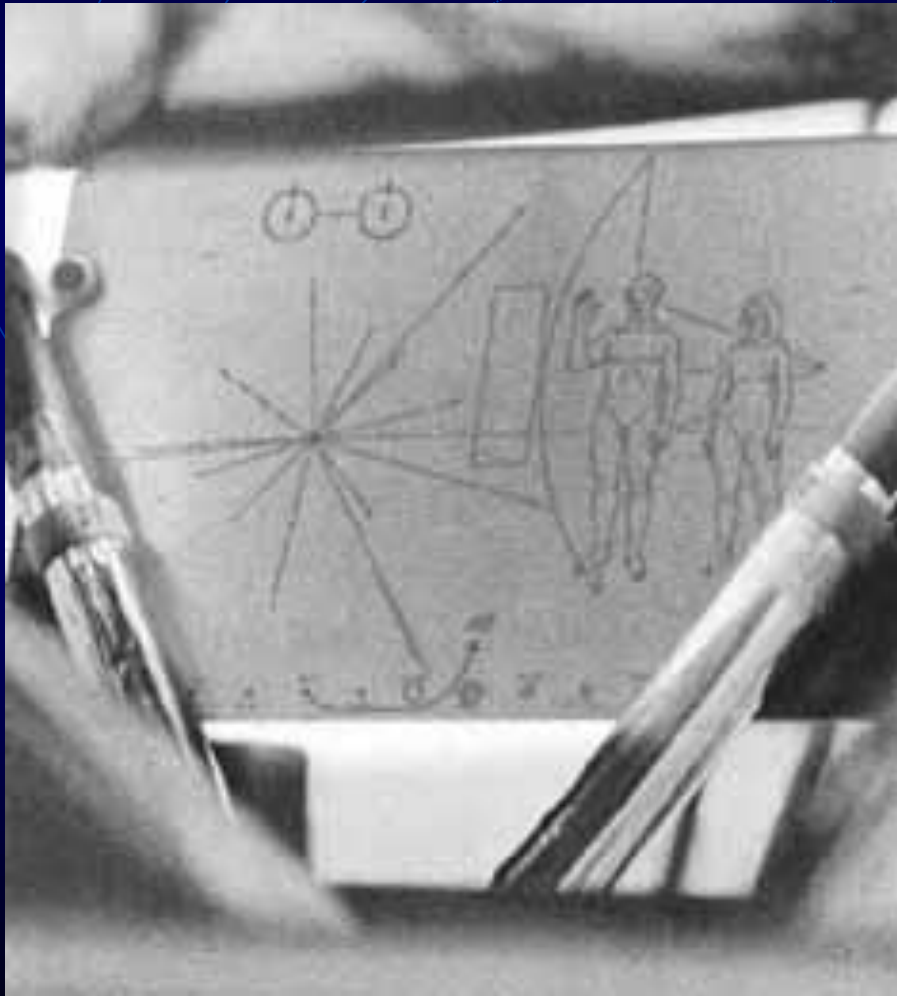
■ Imaging ■ Radial Velocity ■ Transit ■ Microlensing

在我們問  
「你們是誰？」  
之前

其實應該弄清楚  
「我們是誰？」

我們在哪？怎麼來的？將來會如何？  
何謂生命？何謂文明？







# 人類的足跡 III

## ◆ Breakthrough Listen

到2019年6月為止，在160光年之內（1,327顆星）沒有發現任何可能的訊號。  
繼續10年，電波監測一百萬顆星，以及一百個星系，繼續找尋來自文明的訊息

## ◆ Breakthrough Watch

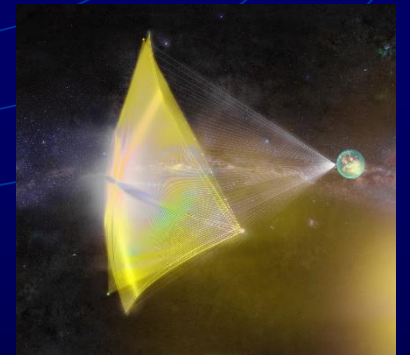
在地球周圍20光年內的恆星尋找有「生物標記」的類地行星

## ◆ Breakthrough Starshot

以雷射加速配有光帆的「超微太空船」，預期數十年內能夠以時速超過一億公里（光時速10億公里），前往南門二星（> 20年）

## ◆ Breakthrough Message

討論如何跟外星文明以數位資訊（數學、物理學、語言學、心理學）溝通（介紹地球、文明）。  
真要嗎（科學、政治、社會、宗教）？



- 除了地球，目前尚未在其他天體發現生命
- 這些有如丟入汪洋中的「瓶中信」，攜帶了我們對自己的瞭解，也攜帶了盼望別人瞭解的期待
  - 地球生命真是多樣呀！
- 只是宇宙這個汪洋大得多得多（得多）
- 象徵的意義大於實質意義，因為被找到的機會微乎其微
  - 花多少資源算合理？
- 該找他們嗎？花多少資源？萬一找到了怎麼辦？



## □ 沒有足夠證據顯示外星人來過地球

「宇宙那麼大、時間那麼長」外星生物有很多種可能，  
即使來了，我們多半認不出來 (生化) 機器人？

□ 不能把目前無法解釋的現象，都推給外星人來地球搞鬼

□ 地球上最早的證據已不復尋 → 向外找

□ 尋找外星生命不只是找高等文明

□ 在其他天體看到「風吹草地見牛羊」的感動

VS

接收到第一筆「外太空訊號」的震撼與恐懼

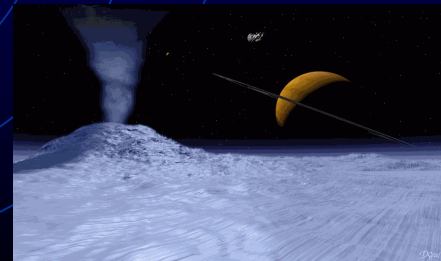
**其他世界最原始的生命一樣動人心弦！**

外星生命當然存在，  
我們就是～



# 結論

- ✓ 科學家從未停止想像，且盡力實踐想法  
科學家想辦法證明自己對  
狂想者等着別人證明他錯
- ✓ 科學以嚴謹手段解決特定問題  
不是萬能，但是科學態度與方法很有用
- ✓ 追求科學真理的過程，其精彩程度絕不下於奇幻小說
- ✓ 連江湖郎中都必须多讀書、多思考！
- ✓ 有外星生物不奇怪；就是因為到目前都沒找到，才讓人納悶！怎麼了？
- ✓ 避免以「未知」解釋「未知」！
- ✓ 學而不思則罔；思而不學則殆



繼續尋找吧！

永保好奇的心 然後理性批判

繼續找吧 ~  
找其他人 找下個家

找了  
不見得找得到

但是不找  
必定找不到

