

# 系外行星與地外生命

陳文屏

中央大學 天文所、物理系

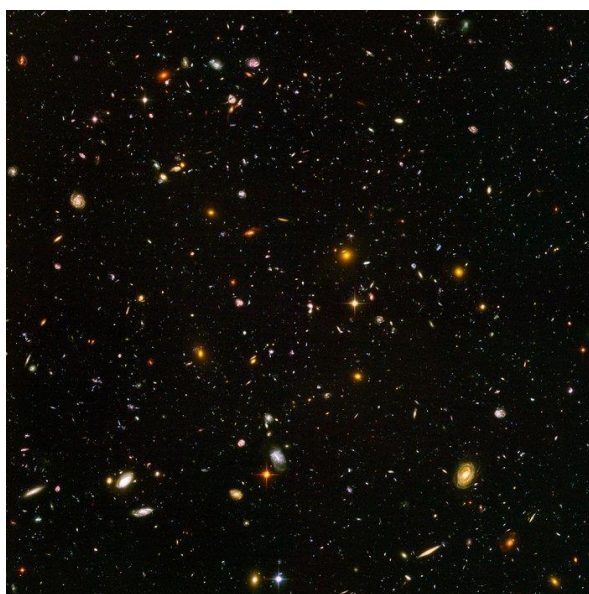
## 宇宙的歷史與地理

面對星空不免好奇，我們是誰、所在何處、怎麼來的、將來會怎麼樣？平常地理課內容跟「人」有關，討論「我們」在哪裡、周圍的山川地形、人土風情。歷史課討論中外朝代更迭、人物風騷、文明進展，也都跟人有關。

天文學也研究歷史、地理，同樣關注我們在哪、有哪些鄰居，但是尺度大得多，包括了地球以及其他天體，例如恆星、星系，甚至整個宇宙的來龍去脈。利用物理與化學的知識，配合數學的手段，了解天體性質，進一步探討它們如何誕生、老化、死亡。

目前我們認知，太空裡包括了自已發光的恆星，以及它們周圍的行星、衛星、彗星等等；此外上千顆恆星互繞組成星團、千億顆恆星則構成星系。人類觀察大自然，所獲得的知識繼續用來更認識大自然，近代科學不僅改善了生活，除了了解身旁的山川、花草，也好奇天體怎麼運動、地球的結構、太陽發光的原理，甚至在我們所居微不足道的時空小隅，大言不慚說嘴宇宙的起源與未來。

我們對於其他世界的奇禽異獸尤其好奇。放眼四周，生命多樣而神奇，但人類目前幾乎已經把太陽系走透透了（有些飛過去、有些繞著觀察、有些甚至登陸研究），卻沒有在任何其他地方發現生命，是我們找錯地方了，還是根本找錯東西？



從地球看太空，我們試圖了解自身何在。這是哈伯太空望遠鏡所拍攝的「極深景」(Hubble Ultra Deep Field) 影像，相當於超過 11 天的曝光時間，視野中包括一萬多個星系，有些誕生於宇宙初期。(影像來源：NASA、ESA)

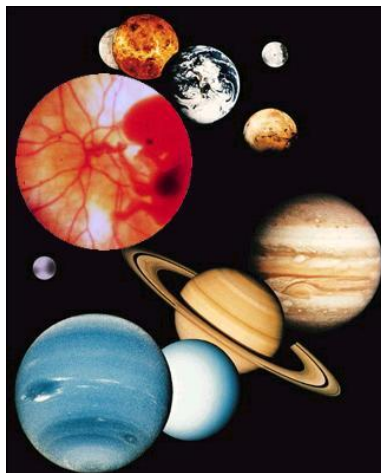
## 行星與生命

地球生物千萬種，但追根究底，它們都具有特定性質，例如營養、生長、感應、生殖，其中有些還會運動，有我們認知的生、老、病、死，似乎「看了就知道！」但不容易定義。例如汽車、電腦，甚至太陽，都有生老病死，但都不算，因此未列入生物科考試範圍（為什麼呢？）。

雖然說不清楚生命到底是什麼，但也不能就不說，讓我們姑且接受某些學者的看法，認為生命有兩個特色：繁衍與突變。這不表示滿足這兩個條件的就算生命，但生命會產生稍有不同的下一代，因此才能適應環境，似乎的確是地球生命的特點。這些對於在別的天體找生物可能也幫助不大（怎樣才認得出來？）。看起來要向外尋找，第一步先是向內認清自己。

如果說生命是連串的化學反應，那麼自然需要能量，以及環境來進行反應，尤其液態化學，跟固態（反應慢）或氣態（不易限定）來比，效率高而穩定。固態行星的表面因此有如實驗室裡的燒瓶、燒杯，讓液態化學穩定進行，其中液態水，不僅在太空中含量豐富，也有很有很多獨特性質，成為你我這種生命之要素。

我們目前僅知的生命型態存在行星表面，而這顆行星（地球）(1) 具有適當大小，這樣才能抓住大氣，有了大氣壓，表面才能長期保有液態水；(2) 具有適當的軌道距離，這樣才不會太冷也不太熱，以圓形軌道（溫度不至於極端變化）；(3) 繞行大小適當的恆星，這樣才能長期穩定提供能量。地球因為滿足一連串的「適當」條件，得以成就蓬勃生氣。



既然宇宙這麼大、時間這麼長，天體環境極端多樣而複雜，生命或許奇怪到我們無法認出。但也不能乾脆就不找了，而該考量最大機率，在適當的恆星周圍指認出適當的行星，然後看是否能偵測到生命的跡象。即使無法目睹「風吹草低見牛羊」，也可以利用望遠鏡收集生物產生的標記訊號來找尋。

所以，找出位於所繞行恆星的適居區內，能夠「腳踏實地」的固態行星，是尋找地外生命的第一步。並非別種不可能（會不會有種生物懸浮在太空），而是先找「我們這種」機會比較大，因為已經發生了。

## 德瑞克公式

這個公式也稱為「德瑞克方程」(Drake equation)，但並非科學定理，而是個估算式，用來判斷銀河系當中目前能夠溝通的文明個數。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，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，以下是我個人的偏好：

$$N = N_* \cdot f_s \cdot f_p \cdot f_e \cdot f_\ell \cdot f_i \cdot f_c \cdot L/L_{MW}$$

其中公式左邊的 $N$ 是個數字，就是我們想估計「現在銀河系當中可以與之通訊的文明個數」。右邊第一項 $N_*$ 是銀河系中的恆星數，也是個數字，其他後面的幾項則都是比例，每項都依照前個條件加以限制。

$f_s$ ：類似太陽的恆星比例；

$f_p$ ：類似太陽的恆星當中，每顆擁有行星系統的比例；

$f_e$ ：每個行星系統當中，適合生命誕生的比例；

$f_\ell$ ：適合的行星當中，能夠實際發展出生命的比例；

$f_i$ ：發展出生命的行星當中，能夠演化出智慧文明的比例；

$f_c$ ：智慧文明發展出電波通訊技術，而且願意對外溝通的比例

以上這些比例相乘，就是「條件機率」，也就是每項因素都要滿足的機率，然後乘上第一項，就成了「銀河系當中有多少智慧文明我們可以偵測得到」。

## 銀河系當中類似太陽的恆星數量

前幾項屬於天文學範疇，我們的知識越來越精確，例如銀河系當中大約有 3000 億顆恆星 ( $N_*$ )，其中大約 30% 類似太陽 ( $f_s$ )。之所以考量跟太陽類似的恆星，來自於對恆星的知識。質量越大的恆星光度越強，雖然提供充足能量，但它們壽命短得多。以太陽來說，它穩定發光發熱的壽命大約為 100 億年，目前過了一半左右，而其他恆星的壽命大致上跟其質量的 2.5 次方成反比。以織女星為例，它的質量為太陽 2 倍多，表面比太陽熱（大約是 1 萬 K，太陽則為 6000 K），發出藍色光芒，其光度是太陽的 40 倍，因此周圍的行星有充足光線，但是織女星的壽命據估計只有太陽的 10%，也就是 10 幾億年。

地球在大約 50 億年前，太陽誕生之初，由小行星轟擊而成。前幾億年處於融融狀態，一旦冷卻後，生命就出現了：從無機物到有機物，進而發展出最簡單的單細胞生物，之後展開漫長的演化，花了幾十億年，成就了大千世界，造就出人類文明。因此在織女星旁邊，就算有大小、距離都適當的行星，也沒有足夠時間發展出「我們這種文明」，也才能與之溝通。這些恆星周圍如果有生命，須得另闢它途。

## 周圍有行星的比例

在某顆恆星周圍，水能夠以液態存在的距離範圍，稱為「適居區」(habitable zone)。質量小的恆星溫度低，適居區範圍小，周圍即使有行星，恰巧位於適居區的機會也小得多。而且小質量恆星，雖然壽命長，但是表面常有磁場爆發，也可能不利原始生命發展。

所以恆星質量太大活得不夠長久，而質量太小則環境不佳，因此類似太陽的恆星機會最大。用我們自己單一的例子來推敲不免偏頗，但勝過盲目猜測，起碼地球成功有了生命還發展出

文明。類似太陽的恆星周圍繞行行星的比例非常高，這結果歸功於近年熱門的「系外行星」課題，目前認為  $f_p \approx 1$ ，也就是太陽是顆典型恆星。

## 適合出現生命的比例

接著考慮  $f_e$ ，也就是行星系統當中有多少比例具有適合生命誕生的環境。這一方面屬於生物學範疇，能說清楚何謂生命，才能討論怎麼樣的環境適合孕育出生命。另一方面則屬於天文學，如何利用觀測來推測出恆星周圍的行星，它們的物理與化學條件。這些當然見仁見智，例如何謂「條件適中」。在太陽系八顆行星當中，除了地球很恰當（我們已經在這啦！）火星也不錯，以前表面也存在大量液態水，所以太陽的適居區  $f_e \approx 2/8 = 0.25$ 。但是（事情總有但是）木星跟土星雖然距離太陽遙遠，不在適居區內，加上本身是氣態行星，不利於生命出現，但它們旁邊的衛星，例如土衛六泰坦有厚重的大氣層，而其他雖然沒有大氣壓，但有陸塊壓著，下方也可能有液態水。這就是為何考量地外生命時，NASA 的指導方針是「循著水找」（“Follow the water.”）。一旦把衛星也考慮進去，機會就大多了。另外適居區或許不僅取決於恆星性質，也該考慮在銀河系中的位置，例如越接近銀心，雲氣越豐富，恆星代代生老病死，複雜元素經由恆星快速的新陳代謝，滋潤了誕生恆星的雲氣，但擁擠而劇變的環境也可能是缺點，換句話說銀河系的盤面，也有個「適區居」，離銀心太近或太遠都不適合「養小孩」。太陽當然在銀河系適居區內，這裡面，質量類似太陽的恆星就夠我們忙了；這個數字我們就暫時樂觀點，用鉛筆寫下  $f_e \approx 1$ 。

## 實際出現生命的比例

然後是  $f_l$ ，也就是環境對了，有多少實際出現生命。這就困難了。適合當樂儀隊指揮的人，不見得就當得了。太陽系的地球是成功的例子，火星則沒有成功，所以  $f_l \approx 1/2$ ，其他恆星呢？對於系外行星的研究，近年的長足進步多仍處於「知道存在」的階段，極少部分開始測量行星是否有大氣層，有哪些可能成分；有些推測是否有海洋（液態水！）等等，但是這些研究才剛起步，新一代的觀測設備與技術將持續提供答案。生命是我們最珍惜的東西了，然而生物體卻主要由氫、氧、碳、氮這些最普通、最常見的元素組成。這表示在宇宙其他地方出現生命，材料無虞匱乏，困難之處也許在於能否建構出複雜結構；就像樂高玩具，能以數種簡單小塊拼排出讓人讚嘆的成品。1950 初期 Miller-Urey 的實驗，發現模擬地球初期的大氣，甲烷、氫氣、阿摩尼亞、水蒸氣等，可以反應產生有機物，例如簡單的胺機酸，這些還不是生命，但卻是關鍵「無中生有」的第一步。之後對於原始大氣的條件有些調整，但似乎結論都是組成生命的基本物質，可以在原始的環境中生成。我們能夠再度樂觀（但開始有些心虛）而認為  $f_l \approx 1$  嗎？

## 發展出文明的比例

再來是  $f_i$ ，這更困難了，怎麼估計文明出現的機率呢？這得先定義何謂文明。這個問題社會學家可以爭論很久，而且沒有結論。以德瑞克公式的思路，文明必須要發展出無線電波通訊的科技，所以人類文明只有百來年，這段期間人類離開了地面（飛機）、脫離了地心引力（太空船），甚至在別的天體登陸，科技以指數方式進步。這樣定義的確狹隘，但才能繼續討論。想像要是目前的地球文明整個消失，那麼還有機會重新來過，再度出現會繁衍、突變的東西，然後發展出手機、電視、免痔馬桶嗎？地球生物史有多次「大滅絕」事件，幸虧沒有完全消失，以致於存活的物種跳躍式進化。有種理論把地球得以好整以暇發展出文明，原因之一是太陽以圓形軌道繞行銀心，所以長期遠離旋臂，免於受大量星球爆發的影響；也有理論認為文明能出現歸功於月球又大，離得又近，因此引發明顯的潮汐，利於潮間帶沖刷，進行

液態化學，而產生原始生命；另一方面月球穩定了地球自轉軌道，環境不至於劇烈變化。或是幸好有木星，像個大掃把，把被太陽吸引來來的小天體擋住，保護了地球初始生命。這些種種應驗了「天生我才必有用，天體亦然」，地球文明得以至今，受了很多庇佑。對於不確定答案，甚至連問題都說不清楚的事情，就可以有很多說法。例如園藝有時先育苗，然後再盆栽，那麼地球生命是否來自別的高等文明，然後放在地球發展。這些都是很好的思辯，一方面把問題考慮清楚，一方面提出可能的答案，而不流於空想。但無論如何，生物演化一路「適者生存，不適者淘汰」，環境要是產生劇變，文明未露曙光就結束了。好像一批人猜拳，還沒結束就解散了。對於生命演化最終能否發展成文明，學者（這屬於什麼學科？）的估計天差地遠，樂觀者認為  $f_i \approx 1$ ，而悲觀者認為以地球 46 億年的歷史，類似人類的祖先在過去幾十萬年才出現，也就是文明出現的機會極低，甚至微乎其微，只有幾億分之一，而就算再度幸運一路猜拳延續下來，所造就的世界也將與目前完全不同。

## 願意聯絡的比例

接著討論  $f_c$ ，也就是有能力而且願意聯絡，這樣的比例如何估計呀？跟同學手機聊不完，但跟家人不願講話，這怎麼算？對於其他文明是否決定獨善其身而不肯對外聯絡，我們當然不曉得，甚至有關地球文明本身將如何發展我們其實也沒有答案（這又屬於哪些學科？）。人類從歷史學到的教訓，似乎就是不會記取教訓，跟比較高等的文明（這怎麼定義呢？）接觸換來了物質（科技）的收穫，但常伴隨的是文化甚至種族滅絕。人類好像有開疆闢土的天性，像是史上有名的「下西洋」、「發現新大陸」，現在則是競相探索太空，除了尋找資源，以及少數天體可以登陸插國旗、宣揚國威以外，有多少純粹是好奇心？而當我們的文明仍有飢荒、疾病、戰爭等等需要擔心，值得花多少資源滿足這樣的好奇？撇開以上文青呢喃，人類文明倒似乎願意向外探尋，就算沒有主動發信號，地球表面廣播、電視、通訊的電波早已光速向外傳遞，充斥在太空中；這表示方圓百光年之內如果有其他文明存在，他們用對了方法，例如電波望遠鏡夠靈敏、知道朝向我們、頻率也符合，就「有機會」找到我們（姑且不論能否相認）。好吧，就  $f_c \approx 1$ 。

## 文明的長短

最後一項是  $L/L_{MW}$ ，是文明能夠對外通訊的時間，然後跟銀河系的壽命相比。前面幾項就算看法各異，所估計的數字範圍很廣，起碼還可能猜一下，但這一項卻不知從何說起，怎麼知道文明可以持續多久呢？我們具有代表性嗎？古人生活困苦，而且遇到天災、人禍沒有招架餘地。然而文明進展到極致，是越發精緻而永續經營，還是伴隨全面毀滅？這一項非常關鍵，但卻可能永遠沒有答案。

我以前常在演講時舉例，想像桃園跟高雄各有隻螞蟻，都好奇世上是否還有其他螞蟻，如果它們決定出外探尋，就算彼此猜對了對方在哪個方向，一路走去，還沒找到就壽終了。為了這個比喻，我後來試圖了解螞蟻的壽命及行走速度。發現螞蟻已知超過兩萬種，存活期從幾天到幾個月，甚至有些蟻后可活數十年。至於行走速度（它們也會跑），一般黑螞蟻一秒鐘前進數公分，相當於時速數百公尺，可以活一兩年，也就是一輩子直走兩千多公里。網路上查到最快一種撒哈拉銀蟻時速達 3 公里，但壽命只有數天，也可以走好幾百公里。雖然沒看過螞蟻一路向前，但是桃園跟高雄的螞蟻並非無法相遇，我不該因為螞蟻小，就霸凌它們來舉例；從此我就不用這個例子了。

如果把以上的因素乘起來，後面幾項目前比較沒有把握的，只要有一項機率很低，例如出現生命、演化出文明，那麼就得到很小的比例，而要是兩項數字很小，那麼乘起來的條件機率就更低了，就不容易在銀河系中發現可以溝通的文明了。但是要是樂觀些，每一項都接近 1，那麼乘起來就比 1 稍微小一些，就說 0.1 吧，乘以右邊第一項  $N_*$  為 3000 億，就跟最後一項

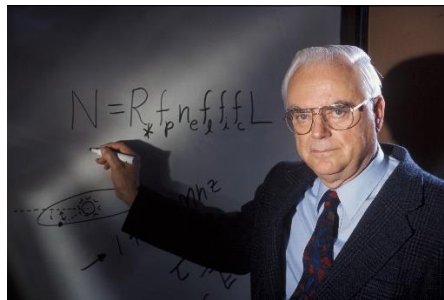
的分母  $L_{MW}$  銀河系的壽命以年為單位約為 150 億，兩者都是大數字，很巧合數量級相當。為了討論方便，就讓  $N \approx L$ ，這表示可接觸的外星文明個數，在數值上相當於文明存活的年數。這當然是其中一種估計，有太多不確定性。你也可以提出不同數字，甚至不同的因素，但無論如何文明持續越久，接觸的機會才會越大。

這引出個有趣的命題。假設文明可以存活  $L$  年，那麼銀河系中存在着  $N \approx L$  個文明，如果把它們平均分佈在銀河盤面 10 萬光年直徑內（這裡好多假設，不管了），那麼個別文明兩兩之間的平均距離大約是

$$d \approx 10 \text{ 萬光年} / \sqrt{L}$$

換句話說，如果文明只能存活 200 年，那麼彼此之間超過  $d \approx 7000$  光年，即使用最快的光速來聯繫單程也要 7000 年，這表示兩者無法聯繫！而要是銀河系充斥了文明，例如 100 萬個，那麼距離便是 100 光年，這樣外星文明就在附近（已經有機會收到我們的無線電訊號了）。沿著這個思路， $d = L$  代表的是文明要維持至少 2000 年，才可以恰好跟其他文明接觸。這真有意思。我們的討論只限於電波通訊，以這樣的定義，人類文明至今一百多年，至於能否延續到 2000 年顯然「盍各言爾志」。

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。值得一提，其中一位是華裔天文學家黃授書 (Su-Shu Huang)，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。這正是本文後半段的內容。



德瑞克 (Frank Drake, 1930~2022) 直到晚年仍積極參與搜尋外星文明的計畫  
<https://www.sciencefriday.com/articles/frank-drake-is-still-searching-for-e-t/>



作者在台北天文館

## 發現系外行星

當太空中的雲氣（包括了氣體與塵埃）因為本身重力收縮，中央溫度如果達到數百萬度，就有機會點燃核融合反應，而形成恆星。收縮的雲氣由於自轉加速而呈扁盤狀，其中的塵埃從塵塊、微行星，而凝聚增大成為小行星，由於重力吸聚軌道中的物質（越大的吸引力越強）不斷長大，最後成為行星，繼續在盤面中繞行。

由此可知行星是恆星誕生的副產品，例如太陽系有八顆行星、五顆矮行星、數以百萬計的小行星，另外可能有上億顆彗星核。目前在別的恆星周圍發現了超過 5000 顆行星，囿於偵測儀器，這些已知的系外行星侷限於太陽附近的系統，據估計銀河系中應該到處都有行星，隨著新的望遠鏡上線，將會發現更多。

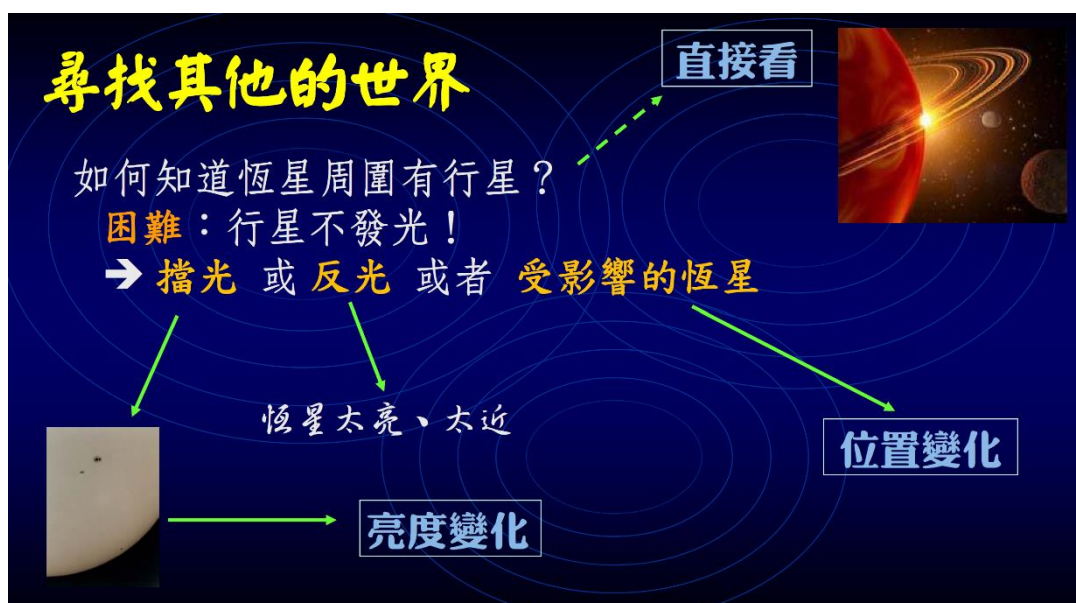
平常能「看到」某樣東西，必須該物體（1）會自行發光，例如電燈、太陽；（2）能夠反射周圍的光，例如牆壁、月球，要是沒有光源，就看不到它們了。還有另種可能，並非直接看到，也能推測出該物體存在，可以是（3）擋住後面發光體（無論自己發光還是反光），例如濃霧、黑暗星雲；或是（4）光源受到擾動，例如搖動吊燈、繞行黑洞的恆星。

行星內部沒有核反應，不像恆星光度耀眼，太陽系當中的行星距離太陽近，也離我們近，我們看到它們反射的陽光（太遠了也不行）。對於繞行其他恆星的行星就不容易「看到」了，這是因為恆星跟行星亮度反差極大，而且隔著遙遠距離，從我們看去，系外行星跟母恆星分離角度非常接近。除了反光，其實行星以引力拉緊自己，也會釋放熱，但這種主要是長波遠紅外輻射。

因此想要偵測系外行星，主要的手段是

- 利用遮光原理：當行星恰好遮住部分母恆星，造成亮度變化。這現象稱為「凌星」(transit)。
- 利用擾動原理：偵測恆星因為與行星互繞，產生特定的運動。
- 利用望遠鏡成像：直接觀察行星，但必須利用技術降低母恆星的亮度。

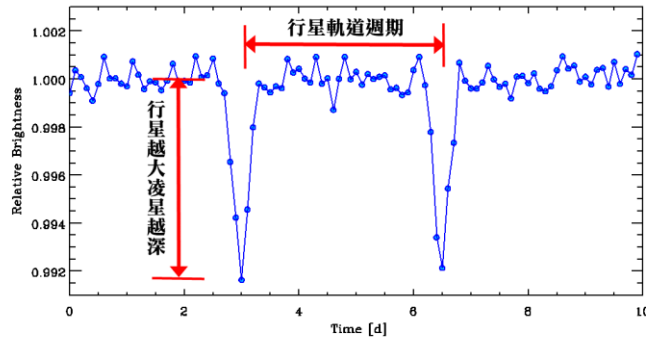
因為行星本身不發光，所以前兩種方法都必須藉助恆星的光。



以下分別說明這些方法的原理以及限制。

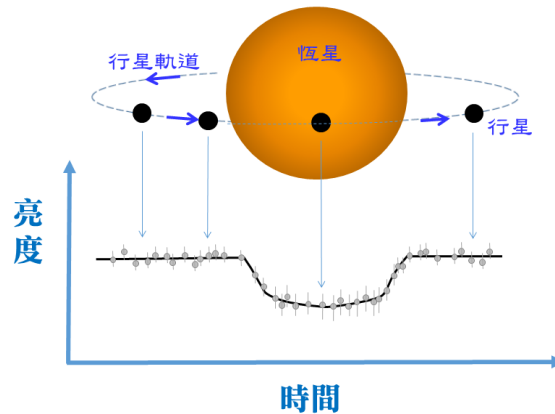
## 凌星法

平常看到日食現象，乃是因為月球遮住太陽，期間太陽的亮度變暗。兩顆恆星互繞也有機會看到「食」的情形。與此類似，當系外行星恰巧繞行在母恆星跟我們的視界之間，部分恆星的發光面積被遮住了，因此亮度逐漸變暗，等到行星不再遮擋，亮度再度恢復。當發生這樣的「凌星事件」，亮度隨時間變化的「光變曲線」如下圖所示。



系外行星的凌星光變曲線。縱軸定義恆星的亮度為1，橫軸時間以天為單位。這裡展示兩次凌星事件，週期為3.5天，行星遮住恆星造成亮度下降到0.992，也就是暗了0.8%，這跟行星相對於恆星的直徑有關。

每次的凌星事件，如果觀測取樣時間快，可以看到凌星過程更精細的亮度變化。




由於行星小得多，凌星期間亮度下降不明顯，而亮度逐漸減弱（以及恢復）的時間長短跟行星直徑有關；行星越大，變化越慢。同顆行星繞行一圈後，下次可能再度發生凌星現象，這就是該行星的軌道週期。有些恆星周圍不止一顆行星，則會各自以不同週期造成不同程度變暗，甚至行星可能彼此干擾，改變了軌道週期，甚至造成凌星現象消失。

應用凌星技術來偵測系外行星的關鍵，就是「把亮度量得準確」，即使是小型望遠鏡也可以進行。而2009年發射的克卜勒望遠鏡，以及後來的TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) 望遠鏡，因為從太空觀測，免於地球大氣干擾，能取得精確數據，尤其有重大貢獻。當然此技術限於行星軌道的傾角側向著地球，否則不會發生凌星現象。雖然凌星的機會小，但因為有計畫專門監測大量恆星，仍然以量取勝，目前大多數的系外行星都是凌星法所發現。




### 克卜勒太空望遠鏡

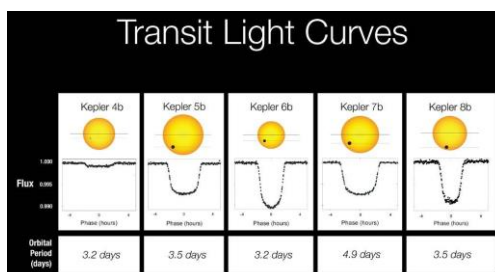


- 利用掩星方式尋找（地球般大小）的系外行星
- 2009.3發射；監測特定天區約14萬顆恆星
- 望遠鏡口徑0.95 m；位於地球 L2 軌道
- 發現數千顆可能的系外行星

### TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)

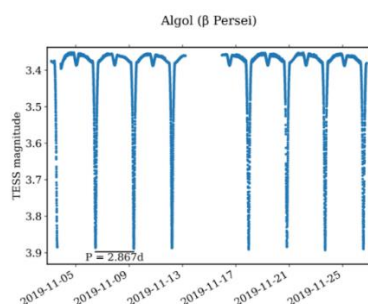


- 利用凌星技術尋找M型恆星周圍的類地系外行星
- 2018.4發射；四個10.5 cm 鏡頭；視野 $24^{\circ} \times 96^{\circ}$  為 *Kepler* 太空望遠鏡的400倍
- 可監測85%天空，主要任務2年，監測20萬顆恆星，預期發現如地球般大小的系外行星。任務持續中



<https://www.nasa.gov/image-article/light-curves-of-keplers-first-5-discoveries/>

### TESS NASA/Kepler Mission



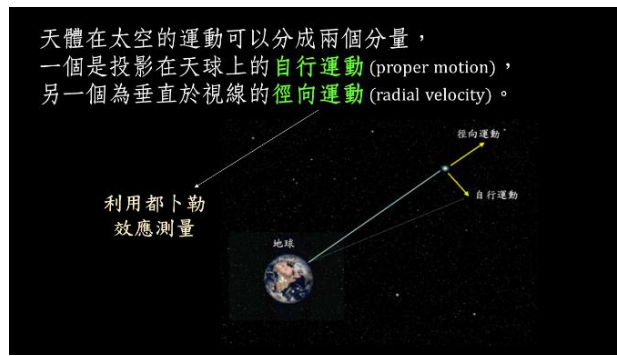
大陵五 (Algol, Beta Persei) 是個三星系統，其中兩星互食，週期為 2.867 天，每次為時大約 10 小時。當比較亮的星運行到後方，而遮住比較暗的那顆星，會發生次級掩星，在 TESS 望遠鏡觀測的光變曲線中，大陵五這個已知食雙星的掩食清晰可見 (圖片來源：TESS/Warrickball)

[https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Algol\\_TESS\\_lightcurve.png](https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Algol_TESS_lightcurve.png)

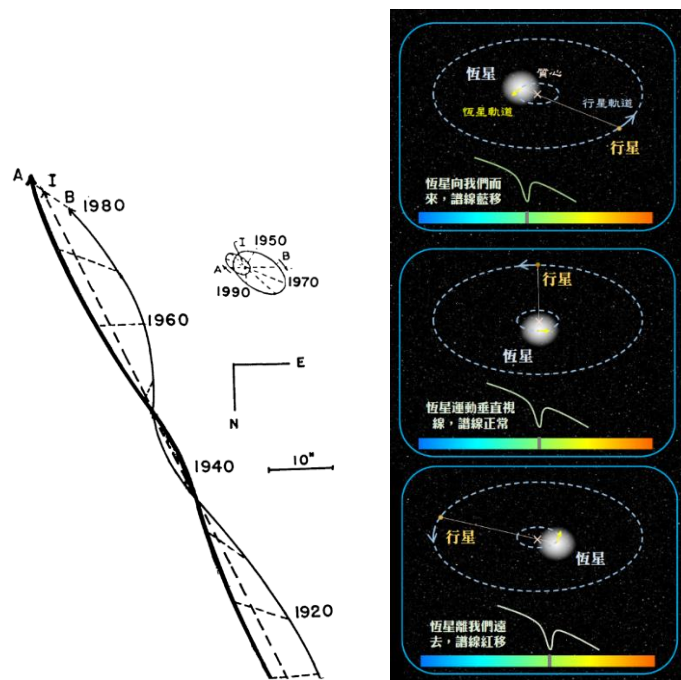
### 擾動法

恆星的位置與運動，會因為周圍有行星繞行而受到影響。天體在太空的三度空間運動，可以分成兩個分量，一個沿著視線方向，稱為「徑向速度」，另一個垂直於視線，也就是投影在天球上，稱為「自行運動」。其中徑向速度可以利用都卜勒效應來測量，例如原來在實驗中量到某條譜線的靜止波長，如果天體遠離我們而去，該譜線的波長會增加，也就是「紅移」；而要是天體向著我們而來，則會有藍移現象。而且波長的改變（紅移或藍移的程度）與徑向速度（例如每秒多少公里）成正比。自行運動造成天體在不同時間的方位改變，由於天體距離遙遠，通常它們看起來運動都非常慢（例如每千年多少角秒），而且距離越遠，對於相同的空間運動（每秒多少公里），自行運動越慢。

恆星與行星彼此的引力強度相同，兩者都繞著質量中心運動，行星因為小，運動比較明顯。但是恆星也受影響，產生兩種效應：(1) 原來應該在太空中的直線（慣性）運動，因為與行星互繞又同時前進，自行運動看起來便呈現規律曲線。但是這個效應需要長時間觀察。



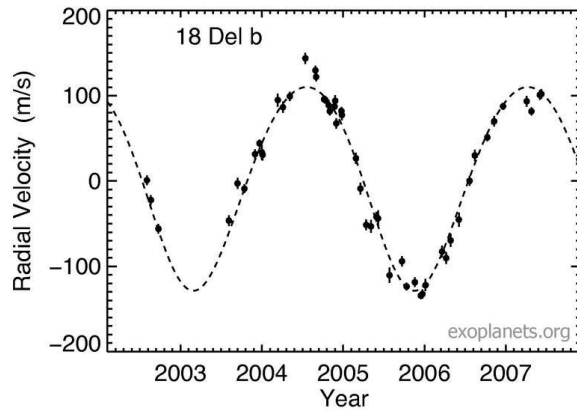
天體在太空中的運動，可以分成沿著視線方向（徑向）  
 以及垂直視線方向（自行）。



（左）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。圖片取自 Lippincott (1961)

（右）恆星與行星互繞時，恆星的視向速度有週期性變化，恆星向著我們而來時，譜線藍移，而離我們遠去時，譜線紅移。圖中 X 標示了恆星與行星的質量中心。

第二種間接推測行星存在的效應則是（2）恆星與行星互繞，在我們視線方向會「前後擺動」。這樣的現象常見於雙星，有些兩星相隔角度很小，看起來只有一顆，但彼此互繞時，來自兩顆成員恆星的光線，各自一來一去，就產生一組紅移與另一組同時藍移的光譜，這些稱為「雙線光譜雙星」。有些雙星系統的光線主要來自其中一顆星，那麼觀察到的就只有一組譜線，單獨來回週期性紅移、藍移，這些就是「單線光譜雙星」。依此藉由測量到的週期，並以都卜勒效應來估計雙星的質量。要注意都卜勒效應測量的是投影在視線方向的運動，所以測量到小的波長變化，有可能是因為伴星質量很小（行星），但也可能伴星其實是小質量恆星，但是因為軌道傾角的關係，造成恆星來回運動不明顯。這個方法的優點是，雖然距離越遠恆星的亮度越暗，但是都卜勒效應跟距離無關。受到的限制則一樣是行星軌道面也要接近我們視線，恆星才會在視線方向產生明顯的反射動作。

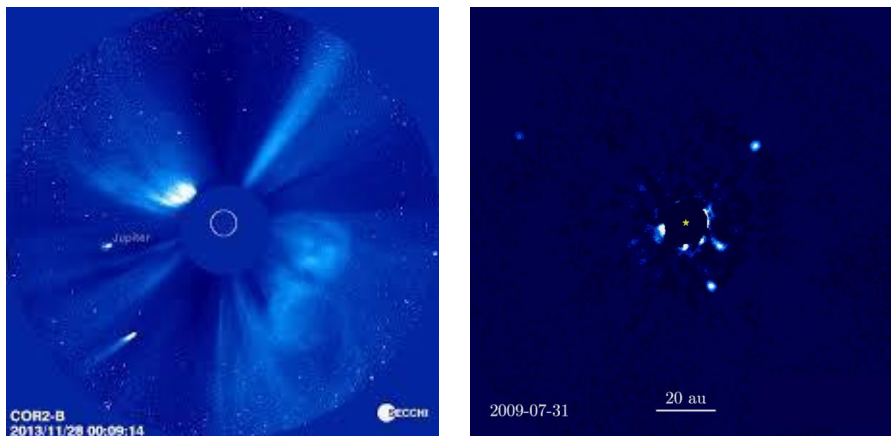


(18 Delphini 恆星因為與行星 18 Del b 繞行而產生徑向速度的週期變化 (圖片來源 James McBride))

## 成像法

最直接偵測系外行星的方式，莫過於取得影像。這適用於行星跟母恆星影像分得開，但有點兩難，因為要是行星離母恆星實際距離遠，我們看到的角度就越分離，但是行星反光則越弱；但要是行星跟恆星角度近，就不容易分辨，尤其困難在於亮度反差極大。另外是行星溫度低，熱輻射集中在長波，所以在長波觀測亮度反差小，但是波長越長，望遠鏡解析力越不好，且偵測器需要特殊工程技術。

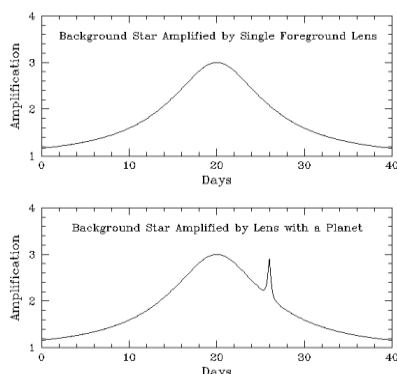
直接觀測系外行星不僅仰賴大型望遠鏡，常用的克服亮度對比的方式是遮住恆星。平常看到太陽極其耀眼，只有發生日全食，當圓形盤面被月球遮住，或是利用光學設計，把亮盤遮住，就能看到外層延伸的大氣，用來觀察日冕，這樣的設備稱為「日冕儀」。利用類似原理，把恆星遮住，便能顯示出周圍的行星，如下圖所示。



(左) 利用太陽望遠鏡的日冕儀遮住太陽發光的盤面，可以顯示出日冕，以及周圍的彗星；(右) 利用類似原理，將原本極度明亮的恆星 (圖中標示 x 處) 遮擋住，便有機會看到周圍的行星。此處顯示 10 米凱克望遠鏡，利用日冕儀遮光技術，所拍攝繞行 HR8799 這顆恆星周圍的行星。結合不同時間點拍攝的影像便能繪製出行星軌道 (<https://www.youtube.com/watch?v=x9EG3gbQ5P0>)

除了以上的方法，還有其他技術可以偵測系外行星。例如遙遠恆星的光線，受到前景天體引力而彎曲，部分因此進入了我們視線，使得恆星變亮，有如透鏡般集光，稱為「重力透鏡」。如果前景的恆星 (透鏡) 還伴隨了行星 (小透鏡)，那麼背後恆星會有特定的變亮方式。另外歷史上發現的第一顆系外行星，是在脈衝星旁邊，這種緻密天體自轉快速，發出的光像燈塔一般，當光束向著地球時，就看到亮光，極度規律，但要是周圍有行星，規律性就稍有改變。還有一種方法，水球拿在手上，會有抖動現象。至於振盪方式則依內含物 (例如水還是

泥)及分布(例如均勻還是比較集中在中央)而異。這原理應用在地震來估計地球內部結構。同樣道理,恆星由氣體構成,雖然結構穩定,也會有振盪的「星震」現象。要是周圍有行星,也有機會影響振盪的方式。行星既然無所不在,隨著儀器與分析技術的精進,加上不同的巧思創意,相信會持續發現數量更多,更加多樣的系外行星(甚至系外月球或彗星、小行星等)。



(上)視線方向恆星的重力透鏡效應造成背後的恆星變亮;(下)要是前景恆星周圍有行星,也可能有額外的變亮效應。

人類的拓荒史開發出了更多棲息地,尋找了更多的資源,後來腳步甚至離開地球表面,踏上太陽系其他天體,而今尋寶的眼光包括了系外行星。增長的不僅止於宇宙地理知識,也不僅止於尋找可能的外星生命(或文明),也在探索人類的下個家鄉。

## 結語

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 幽浮),也就是外星人是否存在的話題,費米突然冒出「他們都到哪去了?」「Where is everybody?」事後對於當時使用的字眼不確定(也有說「Where are they?」),但這就是有名的「費米悖論」(Fermi paradox)。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,但為何並非如此呢?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。

這些年對於尋找外星生命的探討,在行星方面,包括數量、述性有了飛躍進展,另外全方位向外探尋,可以參考 <https://www.seti.org/>。太空旅行時間漫長,人類把太陽系走透透以後,也只能再走一遍,而不知下一步往哪裡去;這個後花園之外,目前我們只能看、聽,而無法親臨。電波通訊是個好主意,但如果要發訊號,要發向哪裡呢,在哪個頻率發射,發什麼樣的訊號他們看得懂呢?要是收到這樣的訊號,我們懂嗎?

德瑞克有次說道,只要想到目前這屋子裡充斥了外星訊號,穿越你我,就讓他起雞皮。德瑞克的公式不是真理,你我都可以有不同數字,甚至不同估計。討論外星生命(或者多半的問題)需要釐清哪些是充分條件,哪些是必要條件。但這些科學家有了創意之後,窮其一生追求答案,讓人感動。

找別人很大的收穫在於認識自己。讓我們為充滿好奇心的地球生命致意。