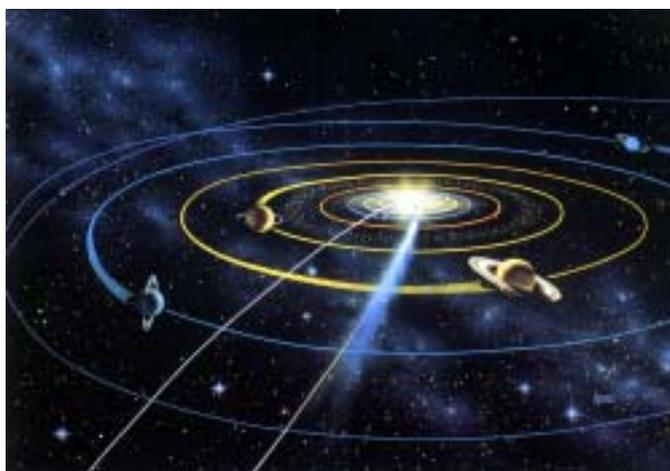


太陽與行星系統之形成

陳文屏（中央大學天文所、物理系）



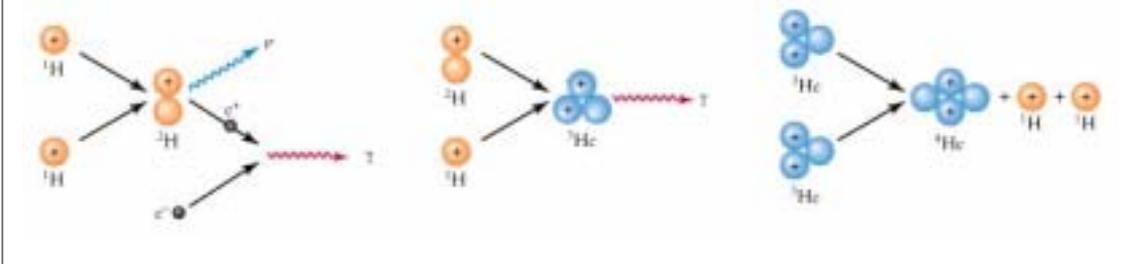
不過是幾年前的天文教科書，雖然基於理論認為其他恆星周圍應該也有行星存在，但觀測上當時卻只知道唯一的行星系統，也就是我們這個太陽系。在太陽系裡存在大小、性質各異的行星，其中地球條件特殊，孕育了生命。時至今日，天文學家已經在超過百來個其他恆星的周圍找到行星，這不但提供很多研究對象，讓我們瞭解行星的起源、演化，也是尋找宇宙其他角落，甚至人類文明永續發展的重要起步。到底行星是如何產生的呢？太陽系當中看似錯綜複雜的各式行星是否有跡可尋？其他恆星周圍的行星也遵循這些規律嗎？它們那些行星當中，哪些有可能也孕育了像我們這種生命？讓我們看看天文學家針對這些問題目前有哪些說法。

太陽與行星的誕生

太陽與周圍行星誕生於一團收縮的星際雲氣。雲氣由於本身萬有引力收縮而溫度升高，同時轉動加快成為扁平形狀，中央部分溫度一旦達到數百萬度，便點燃核子反應，成為自行發光的恆星。恆星發光的能量來自內部的核反應，當簡單的原子核結合成為較複雜的原子核，例如氫原子核（也就是質子）連鎖反應，最後形成氦原子核，同時釋放出能量，這就是「核融合反應」。

恆星內部的核反應

帶正電的原子核若彼此接近會發生相斥效應，這樣如何能產生融合反應呢？關鍵在於高溫。氣體溫度越高，組成的粒子運動速度越快，當溫度達到數百萬度時，粒子運動速度極快，便有機會彼此靠得很近，再加上量子穿隧效應，這時候粒子因為原子核的強作用吸引力，而能夠結合。由於是利用高溫使得原子核結合所以也稱為「熱融合反應」。新的原子核因為緊密吸引在一起，因此釋放出原子核的束縛能，這就是核子反應產生的能量，例如兩個質子融合產生氘，氘再與一個質子融合則形成氦，最後氦若再與一個質子反應則產生氦。整個淨反應相當於 4 個氫結合成 1 個氦，共釋放出 4×10^{-12} 焦耳。這是非常小的能量，只能供應 60 瓦的燈泡差不多 10^{-13} 秒（也就是 10 兆分之一秒）。但是由於太陽包含極多的氫元素，每秒鐘能同時發生極多次核子反應，故能放出約 4×10^{26} W 的能量。會釋放能量的核融合反應直到鐵元素為止，因為鐵是束縛得最緊密的原子核。比鐵重的原子核靠分裂釋放能量，目前核能電廠就是利用核分裂原理產生能量。



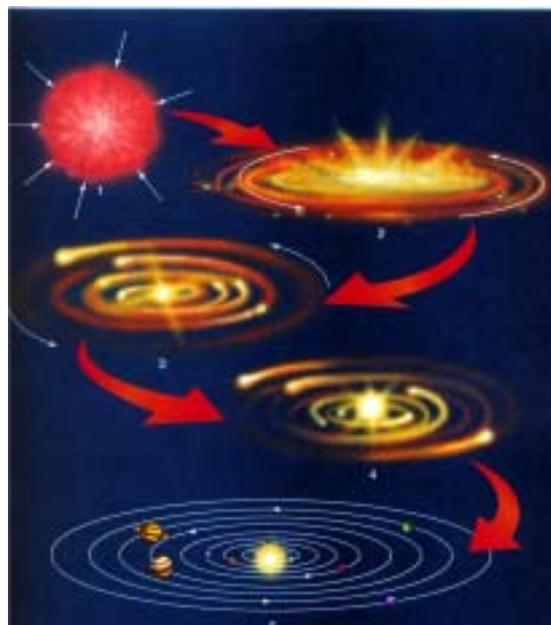
太陽的直徑約 140 萬公里，只有在核心處溫度才高到足以進行核反應，超過半徑 1/4 以外的區域，便不再有核子反應。在核心因為融合反應所產生的射線（能量）向外傳遞，越往外面溫度越低，到太陽表面時溫度約攝氏 5500 度。核心產生的能量傳播到各區域，使氣體得以快速運動，彼此碰撞的支撐力量（這就是氣體壓力）得以平衡向內的萬有引力。太陽就是因為有了這樣平衡，已經存在將近 50 億年，而一旦核心區域核子燃料用罄（例如氫全部變成了氦），提供能量的機制消失，氣體壓力再也無法抵擋萬有引力，於是向內塌縮，恆星開始走向衰亡之路。太陽體積龐大，核心所包含的氫原子核仍足以讓它繼續照耀約 50 億年。



大質量的恆星由於萬有引力強，核心溫度高，核反應快速而大量釋放能量，傳遞到表面，使得大質量恆星表面溫度高、光度強。但正因為大質量恆星消耗核燃料速度快，因此它們的壽命短，像是冬天在天頂附近看到的「昴宿星團」，中國俗稱「七姊妹」，便都是這類大質量恆星，它們的壽命只有千萬年，要比太陽這樣的恆星（表面溫度低、光度弱）短得多。

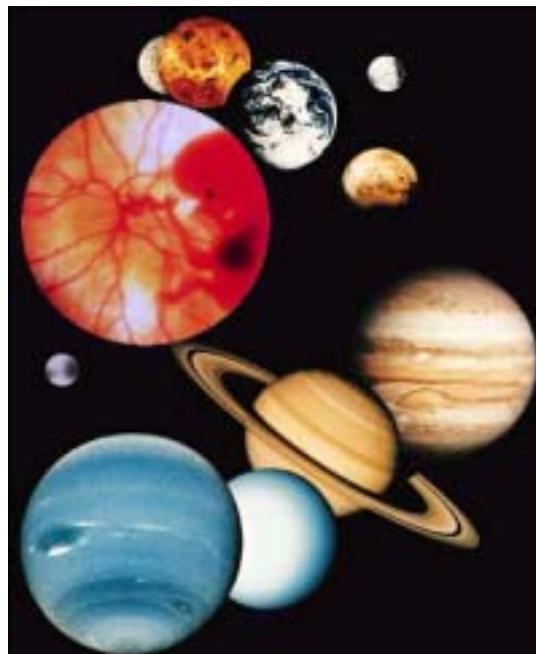


在旋轉的盤狀雲氣中，灰塵彼此凝聚逐漸堆積成越來越大的小行星，越來越強的萬有引力在軌道上吸引更多塵塊，終於在原來的塵埃盤中造就出幾個行星及它們旁邊的衛星，繼續繞著太陽轉動。換句話說，行星與恆星是由同一團雲氣，在幾乎相同的時期形成。現在太陽系中共有 9 個行星，按照距離太陽的遠近分別是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星，以及冥王星。這些的行星以及眾多小行星仍延續當時盤狀結構與運動狀況，軌道面幾乎在同樣平面上，同時公轉的方向也多一致。這些觀測證據多符合理論的推測。



太陽系中的各式天體

太陽系裡只有太陽是恆星，也就是能夠自行發光的天體，其他的天體都靠反射陽光，影響它們亮度的因素包括表面反光率，以及距離地球的遠近。行星當中距離我們近的，像是水星、金星、火星、木星、土星，都很明亮，肉眼可見，所以人類早就知道它們存在，同時注意到相對與「恆星」相對位置不會改變，這些天體則會「行走」於眾恆星之間，故以「行星」名之。至於距離較遠的天王星、海王星以及冥王星由於亮度暗，肉眼不可見，則都是發明望遠鏡以後才被發現。



有些小行星受到外來擾動，因此無法聚集成為單顆比較大的行星，而仍以成群的方式留在原地，例如位於火星與木星之間的一個軌道區域稱為「小行星帶」，因為存在成千上萬顆小行星，咸信是受到木星的擾動而終究未能形成行星。一旦巨型行星（尤其是木星與土星）形成，多了一個引力源，盤中的塵塊與小行星會受到來自太陽以外的力量，使得軌道不規則（兩大之間難為小！）甚至被拋出太陽系，這其中有些被拋離太陽系不再回來，成為太空孤兒，有些則仍受到太陽束縛圍繞在太陽系外圍，當太陽在太空中運行，偶爾經過其他天體，受到擾動，這些外圍天體便可能改變軌道，有些以狹長的橢圓軌道繞行太陽，成為週期彗星。

從以上的討論，我們知道雲氣收縮形成恆星，若是雲氣夠大，局部可能各自收縮形成恆星，若兩顆恆星因為彼此萬有引力吸引而互繞，這就是一對「雙星」，而要是雲氣非常大，就可能同時形成一群質量不同的恆星，稱為「星團」。要是雲

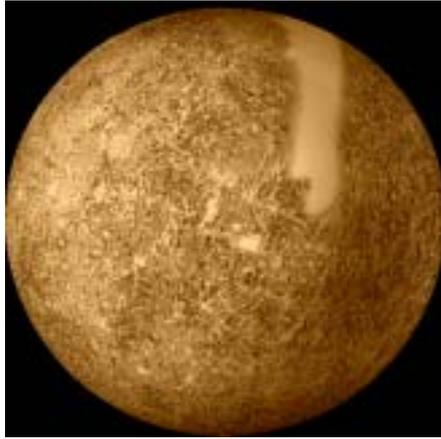
氣不夠大，收縮後溫度無法升高到足以點燃核反應，就無法形成恆星，根據計算能夠形成恆星的最小質量大約是太陽的十分之一。例如木星的質量只有太陽的千分之一，因此雖然木星因為本身萬有引力收縮而自己會發出熱量（木星發出的熱量，是它接收來自太陽的兩倍），但是核心溫度卻無法點燃核反應，因此木星只能「屈居」行星。若是收縮成木星的當時那塊雲氣夠大，以致木星成為恆星，那我們的太陽就成為雙星系統了。

太陽系中製造太陽後剩下的物質，大大（行星）、小小（小行星或彗星）散佈在太空中。同樣的在行星周圍也是一樣，小天體凝聚繞著行星公轉，稱為「衛星」。而未能形成成為衛星的小天體，尤其因為太靠近行星，受到潮汐力的牽引，散佈在行星周圍，同樣呈扁平狀，成為行星環。太陽系靠外的幾顆巨型行星，木星、土星、天王星、海王星都有行星環。環狀或盤狀結構源於天體自轉的結果，除了行星環，太陽系與銀河系外觀皆成呈盤狀。

距離太陽近的天體，只有熔點高、耐高溫的成分（也就是岩石、金屬等）才能存在，這些我們慣稱為「小行星」；而距離遙遠者可能多由冰體組成，也就是「彗星」。但這樣的分類並非絕對，因為彗星的冰體核心只有在靠近太陽時，受了光與熱才衍發出絢爛的彗星景象，否則冰體在低溫的環境中與小行星一樣也屬於堅硬實體。有的長久以為是小行星，卻某天冒出彗尾；而彗星經過長期消耗，也可能只剩下中央的堅硬核心成為小行星。

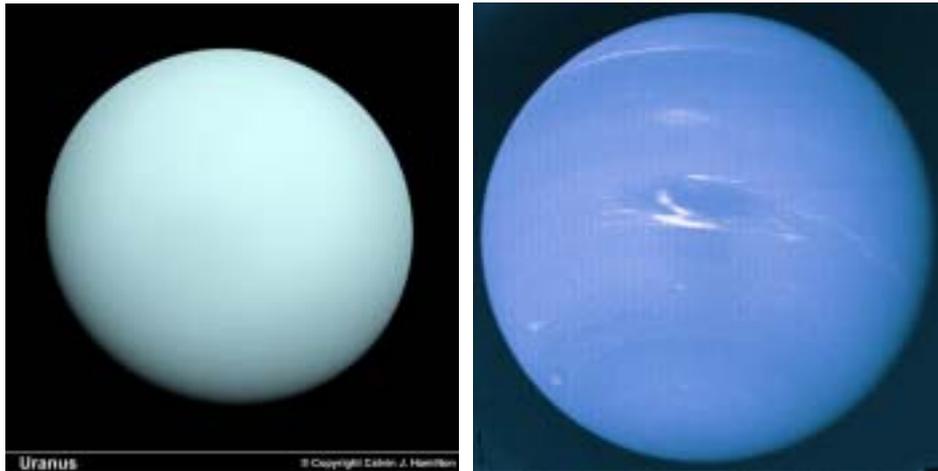


與太陽的距離也同樣影響到行星性質，例如靠近太陽的四顆行星，包括水星、金星、地球以及火星，具備類似的性質，它們體積小、質量小、密度高、以岩石成分為主。這些行星以地球最大，稱為「類地行星」，是有「陸地」的行星。類地行星由於質量小，加上位於太陽系內圍，在行星誕生時期碰撞頻繁，所以周圍不容易有衛星圍繞。四顆類地行星中，水星與金星都沒有衛星，地球有一顆衛星，也就是月球，火星則只有兩個非常小的衛星，大小只有 10 20 公里，差不多相當於一個鄉鎮，一般相信是從鄰近的小行星帶攬獲的小行星。



距離太陽比較遠的四顆行星，分別是木星、土星、天王星、海王星，其性質與類地行星迥然不同，它們體積大、質量大、密度低、以氣體成分為主。這些行星當中，以木星最大，這類行星稱為「類木行星」。類木行星距離太陽遠，溫度低，因此能抓住比較輕的氣體，例如氫與氦，而這些是宇宙中含量最豐富的元素，所以類木行星便有厚重的大氣層。在龐大的大氣壓之下，類木行星很可能沒有陸地，而只有液態核心。類木行星質量大，所以都擁有為數眾多的衛星。





製造太陽、行星，與衛星剩下的塵塊、冰體充斥在太空中，不斷撞擊剛形成的行星與衛星，對這些天體的地質、大氣、海洋，甚至生命的早期演化具有重大影響。以地球而言，由於這些劇烈的轟擊釋放出大量熱能，使得地球形成後前幾億年處於熔融狀態。後來的撞擊可能帶來大量的水，而由於地球溫度適當，而讓水處於液體狀態，造就出目前的生物環境。有些說法認為連演發出生命的複雜分子可能都來自太空，藉由撞擊事件在地球播種。小型天體的數量隨著時間減少，時至今日雖然撞擊次數遠不如早年頻繁，但每天仍有上億個殘渣碎塊墜入地球大氣。



太空中小的流星體數量多，它們通過地球大氣層時，因摩擦生熱激發空氣發光，成為流星現象。如果這些流星體來自彗星，遺留在軌道上，當地球通過這些區域便在幾天內與大量流星體相撞，產生流星雨現象。每年大約有十幾次流星雨，其遺留殘渣的母彗星不盡相同。當母彗星剛通過太陽（也就是地球，因為彗星軌道狹長）的那幾年，殘渣仍集中在軌道附近，因此流星雨規模比較壯觀。即使對於同一個流星雨，例如十一月中旬的獅子座流星雨（其母彗星的回歸週期為 33 年），由於地球公轉軌道每年稍有差異，並非以相同方式通過彗星軌道，所以每年的規模也不相同，前幾年獅子座流星雨燦爛輝煌，但是今年盛況就遠遠不如。

我們平常看到的流星來自於像沙粒般微小的太空塵埃。像拳頭般大小的流星體通過大氣層未能消蝕殆盡，便成為隕石墜落地面，幸好它們數量少，發生這樣撞擊的機會小，但是造成的毀滅效應卻讓人怵目驚心。如小鎮般的隕石撞擊便足以讓地球花了數十億年發展出來的人類文明完全消逝。地球由於表面活動（例如板塊運動、氣候、水流侵蝕等）抹滅掉數十億年來的隕石坑紀錄，讓我們少了一份警覺，但我們不妨看看鄰近的月亮，其充滿坑疤的表面應該足為殷鑑，證明天體撞擊不但會發生，前幾年彗星可以撞木星，也有可能有一天彗星或小行星也可以撞地球。



尋找其他太陽系

太陽不過是銀河系中眾多恆星之一，那麼其他恆星旁邊是否也像太陽一樣，有行星圍繞呢？如果有，當中是否有類似地球這樣的行星，適合生命發展呢？過去幾年天文學的發展，讓我們知道別的恆星周圍的確有行星存在，下一步當然就是尋找類似地球的行星。到底天文學家如何偵測其他恆星周圍的行星呢？

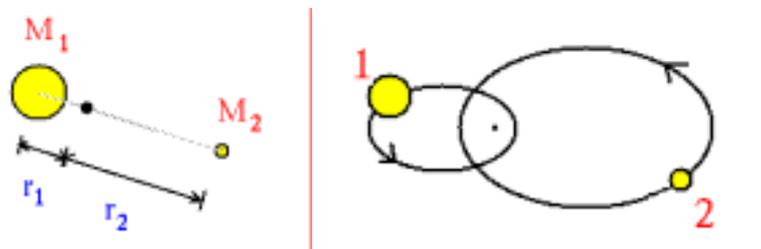
當然，要是能夠直接看到行星最好，然而這卻極為困難。想像一下我們自己的太陽系，我們明明知道有行星系統存在，但如果外星人從離我們最近的恆星（其周圍的行星）朝我們觀察，卻非常不容易看到木星。這是因為離我們最近的恆星也有數光年之遙，因此木星與太陽的分開的角度非常小，最大的時候也只有相當於從數百公尺之外，看一塊錢硬幣的張角。但是這還不算太困難，真正的挑戰在於木星不發光，而只靠反射陽光，所以遠方的觀測者看到木星的亮度要比太陽弱太多，以目前的技術還無法以直接成像的方式「看到」別得恆星周圍的行星。

目前已經發現超過一百多個恆星其周圍有行星存在。所憑藉的原理，就是行星會影響恆星的運動，所以我們雖然看不到行星，卻可以藉由觀測恆星，來推測行星存在。目前主要偵測行星存在，有下列幾種間接方式：

1. 行星與恆星互繞，造成恆星**位置**改變，藉由測量恆星位置改變，可推測行星存在
2. 行星與恆星互繞，造成恆星視線方向**運動**改變，藉由都卜勒效應測量恆星視線方向運動的改變，得知行星存在
3. 行星繞行恆星時，恰巧遮住部分恆星的光線，我們監測恆星的**亮度減弱**，而推測行星存在
4. 行星恰巧擋在我們和恆星之間，因為重力透鏡的效應，造成恆星**亮度增強**，因此推測行星存在
5. 因為行星存在，而造成脈衝星自轉速度改變，藉由精確量測脈衝星自轉**週期改變**，而推知行星存在

如果我們在天平秤兩端放不一樣重的東西，那麼若要保持天平平衡，支點必須比較偏向質量大的物體那一邊，也就是說，支點兩邊力矩相同，以支點來說方向相反（一邊是順時針，另一邊是反時針），所以天平沒有轉動，但是天平兩端都受到向地面的力，要是沒有天平下面的桌子或地面撐住，整個天平會移動。

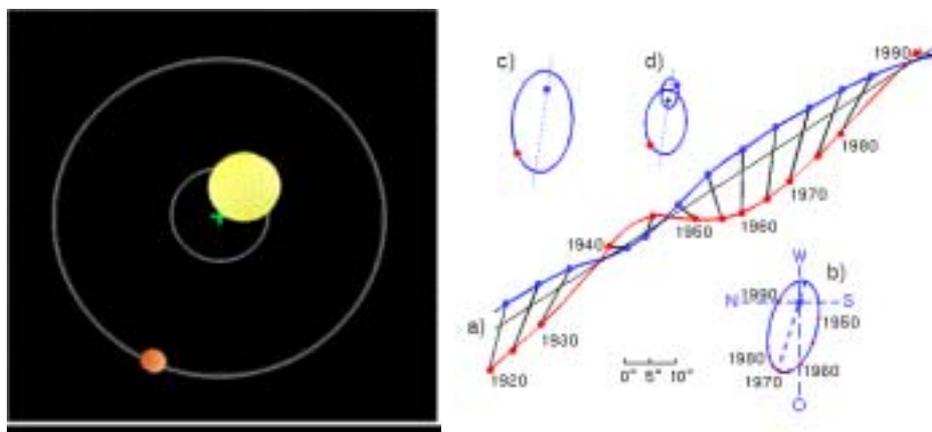
現在考慮兩個飄浮在太空的天體，由於彼此萬有引力牽引而互繞轉動，其轉動的「中心點」乃是兩顆星的質量中心，就相當於天平的支點，也一樣比較接近質量較大的那一端。這時對質量中心來說，兩端的力矩相同（皆是順時針或皆是反時針），因此這對雙星就繞著質心轉動，但受到的淨力為零，所以質心就以直線在太空裡運動。



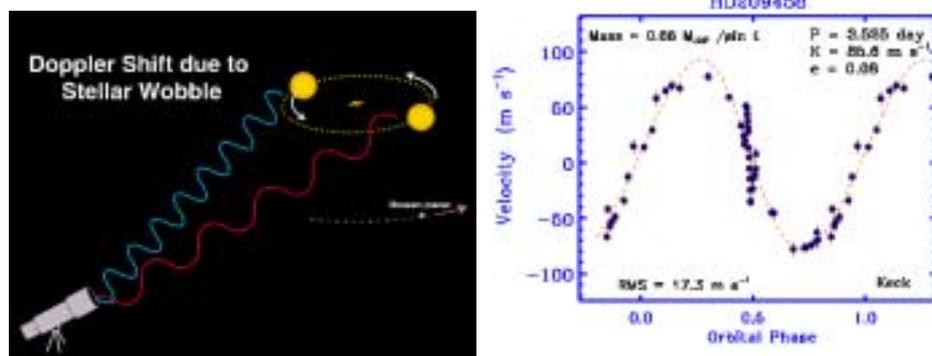
當兩天體質量相差很大時，質心的位置會非常靠近較大質量的天體，例如地球與月球系統的質心，其與地心的距離為地球半徑的 0.75 倍，也就是根本在地表之內。至於地球與太陽的系統，由於質量相差懸殊，質心與太陽中心的距離，只有太陽半徑的萬分之六。若考慮太陽系中最大的行星木星，它與太陽質量比約為千分之一，所以質心與木星的距離，為與太陽距離的約一千倍，質心位於太陽表面之外。當木星與太陽以約 12 年互繞一圈，太陽繞著質心運動了約 150 萬公里。當然，改變太陽運動的不只有木星，還有其他行星的影響，但以木星造成的效應最顯著，雖然只有每秒 12 公尺的速度，但以目前的技術可以偵測得到。

平常某顆恆星在太空運動，其軌跡成直線，但要是它周圍有行星，那麼彼此互繞的結果，因為我們看不到行星，結果就是我們看到恆星似乎彎曲前進。天空中除了太陽以外，最明亮的恆星就是天狼星，早在 1833—1844 年 Fridrich W. Bessel 觀察到天狼星彎曲的運動而推測它有顆亮度很低的伴星，而直到 1862 年才由 Alvan G. Clark 以望遠鏡觀測到這顆伴星，現在我們知道天狼星的伴星是白矮

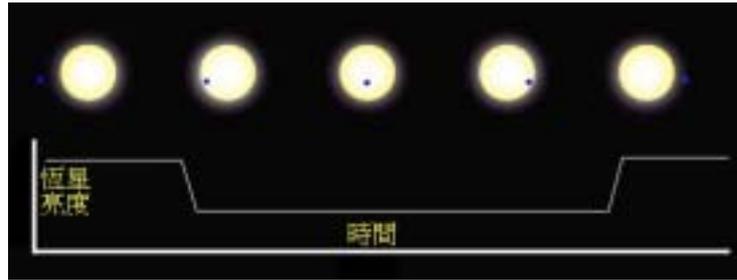
星，是恆星核心用完核子燃料後，緊密壓縮的一種天體。同樣的原理以可以用來偵測行星，但由於質量相差懸殊，恆星所行走的曲線彎曲度不明顯，需利用在太空軌道的望遠鏡進行非常精確的測量。這種方法可以說是測量恆星「位置」的改變。天體位置改變的運動，稱為「自行運動」(proper motion)。



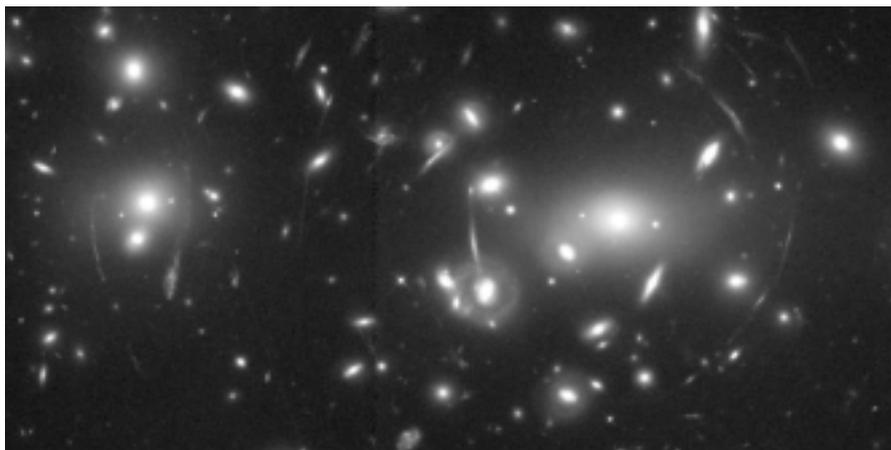
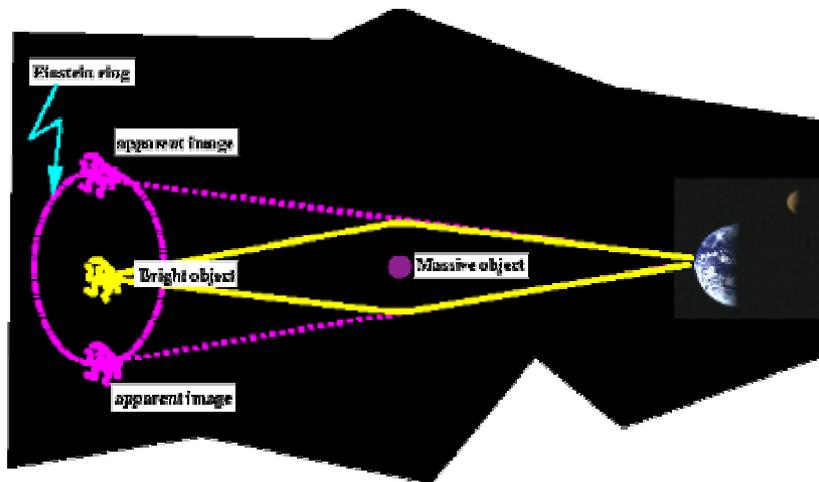
另一個方法也是測量由行星造成恆星的「反作用」運動，但是利用「都卜勒效應」量測沿著視線方向的運動 (radial velocity)，也就是測量恆星「週期性前後擺動」的變化。由於都卜勒效應與距離無關，因此可以有效偵測到行星的存在。目前發現的（太陽）系外行星（稱為 extrasolar planets 或 exoplanets）絕大多數都是利用這種方法找到的。

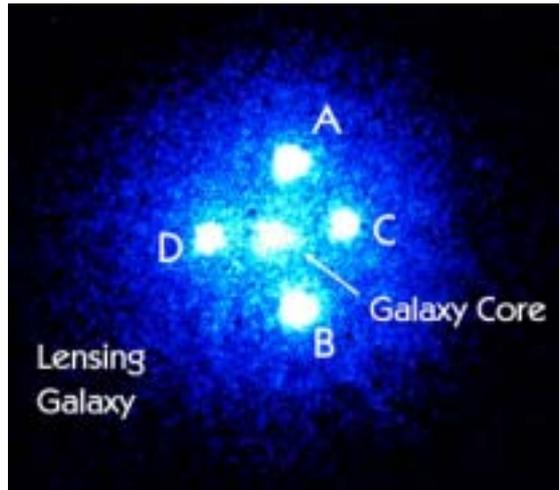


還有一種偵測行星存在的方法，就是行星的公轉軌道恰好在我們視線方向，而當行星走到恆星之前時 (planet transit)，有如日食一般，恆星的亮度會變弱。藉由搜尋這樣的亮度變化也可以推測行星存在。

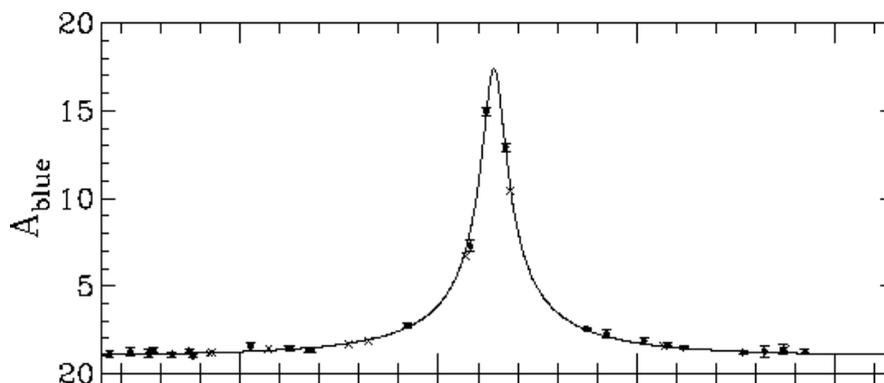


另外一種方式非常特殊，就是利用所謂的「重力透鏡」(gravitational lensing) 效應，原理可以由愛因斯坦的廣義相對論解釋，也就是物質造成空間彎曲，而光線則沿著彎曲的空間前進。這個現象已經由觀測證實，例如遠方的光源(類星體)發出的光線也可以被我們視線方向的星系團(由一群星系組成，每個都有如銀河系般，包含千億顆恆星)所「彎曲」，而造成圓形光弧，或形成多重影像的情形。





在小尺度上，當行星恰好和我們與恆星呈直線排列，那麼由於行星造成周圍空間彎曲，也會產生將恆星光線「聚光」的效應，有如透鏡一般，其結果就是原來無法到達我們這裡的星光由於聚光而被我們接收到，所以恆星的亮度會增強，這稱為「重力微透鏡」(gravitational microlensing) 效應。



還有一種偵測行星的方法，其實是最早宣稱找到系外行星所依據的資料，就是利用一種稱為「脈衝星」的天體，這是中等質量的恆星演化晚期的結果，由於體積小、自轉快、磁場強，有如燈塔般放出脈衝輻射，每秒可達數百甚至數千次。單獨脈衝星自轉的週期非常精確，但要是周圍有伴星（例如行星），則自轉週期會有些微擾動，我們可以據以推測造成擾動的行星有多大。雖然這是最早系外行星存在的證據，但或許因為證據不太直接，加上一般認為脈衝星乃是快速自轉的中子星，而在恆星演化到此階段前，必須經過極為劇烈的超新星爆發事件，因此如何解釋行星如何在此劇烈事件後能存活，是個疑問（即使行星存在大概也沒有生命存活了吧！），所以目前已經少有人討論利用脈衝星週期變化的手段尋找行星。

到目前為止找到的一百多顆行星都屬於巨型行星，也就是像木星般大小，這是因為觀測的選擇效應，因為截至目前為止賴以偵測行星的方法都基於「擾動會發光

的恆星」的原理，所以只有質量大而又離母恆星距離近的行星才能造成足夠的效應。至於有如地球般大小的行星，也就是比較有機會存在像我們這種生命的行星，以目前的技術仍無法偵測到，但是科學家已經規劃好系列研究計畫，包括建構新的地面與太空望遠鏡。或許在 20 年內我們有機會目睹遙遠恆星旁邊也有個藍色地球，而說不定那兒的智慧生物也正在思索宇宙是否有其他生命存在！

有關太陽系行星的影像與資料，可以參考 www.seds.org

有關偵測行星原理可以參考 <http://www.howstuffworks.com/planet-hunting2.htm> 的動畫說明。