

臺北星空

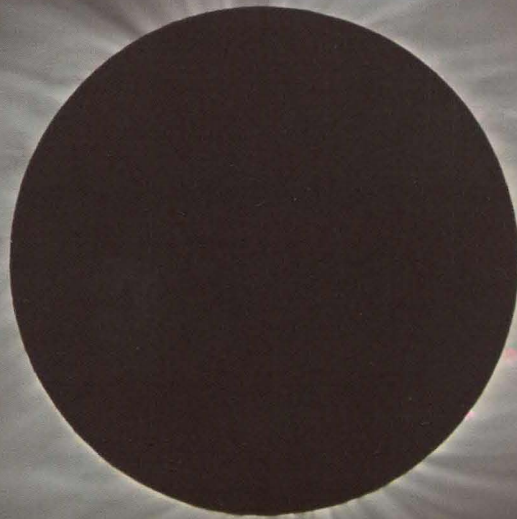
天文館期刊 Taipei Astronomical Museum Magazine

TAIPEI
SKYLIGHT

NO.46 2009.冬

ISSN:1727-0022

從特洛伊群小行星探討太陽系行星形成史。訪尚賢博士/天文學中的跨領域研究。
小行星的故事。2009.07.22日全食系列/好狗運的杭州日全食觀測、我的第一次日全食觀測、
海上日全食觀測之旅。宇宙動物園/天空的大時鐘—北斗七星。天文攝影/折、反射式望遠鏡
之解析度分析。視聽之旅—海豚情緣。冬季星空。2009年獅子座流星雨的展望。
天體映像/木星撞擊事件。美星映像館/日全食專輯



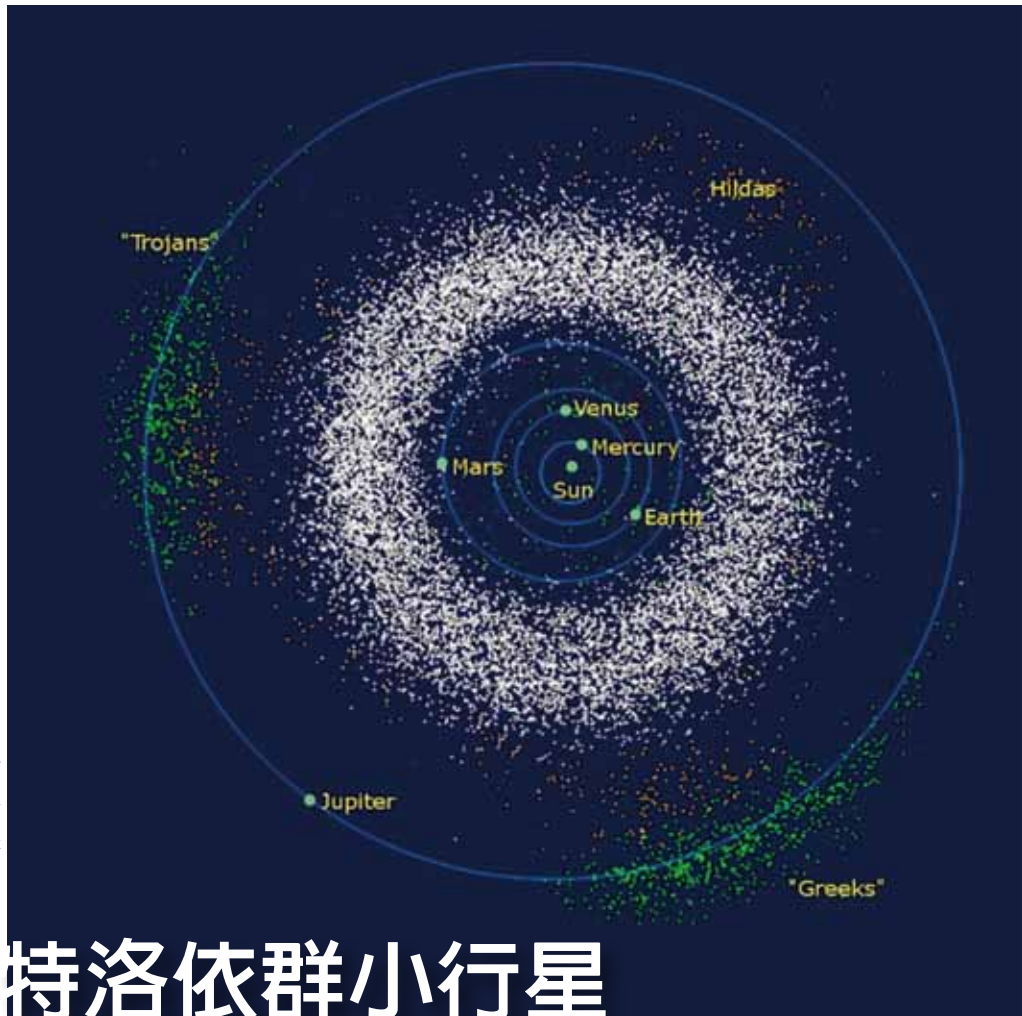


圖1. 太陽系(木星的內側)小天體的分佈，木星特洛伊群在圖中以綠點表示。

從 特洛伊群小行星 探討 太陽系行星形成史

文/ 吉田二美 譯/ 洪汝煌 審校/ 伊藤孝士，洪景川

所謂特洛伊群小行星係指與行星有著相同的公轉軌道，在行星前方60度或後方60度，亦即在拉格朗日點的L4與L5附近的小行星，目前於火星、木星、海王星的軌道上都有發現。

在此以L4群、L5群稱L4、L5附近的小行星。發現最多的是木星的特洛伊群。截至2008年8月10日為止，被確認的有2538個，另外火星有4個，海王星有6個被小行星研究中心所登錄[1]。此種具有特異軌道的小行星，最初發現於1906年，此後由於其特異軌道，引起人們的興趣，做為天體力學的研究對象。但亦因距離太陽太遠而暗淡，難以進行物理上的觀測，並沒有被充分的研究。因此目前雖已經發現百年，對於這類天體的知識仍然很匱乏。其起源或總質量、組成等均多不明瞭(圖1)。

雖然如此，最近由於可說明特洛伊群小行星的起源—新行星形成模型的提出，加上大望遠鏡調查研究的最新觀測資料，對於木星特洛伊群的大小分佈及其數量已被估算出來。此等理論模型與觀測資料中似有機會給我們間接瞭解太陽系初期行星形成的情況。

在此，介紹新行星形成的模型與有關特洛伊群小行星之最新觀測資料，並將糾纏不清，太陽系初期情況的謎底加以解讀。

緒言

科學家，尤其是物理學家，總以為用一種原理能說明世間一切是最美好的事，並期望有一天能發現

此原理。如果有一種方程式，能夠解說宇宙自始至終所發生的現象，那該多好。此事實際上並不可能，我們僅能將片斷的、局部的知識裁剪拼補組合，由個別的現象，進而理解宇宙整體。人們想超越時間瞭解過去時，會從何處開始？他們僅能腳踏實地從觀察現狀開始。時間是從過去不斷地向未來進行，目前發生的現象係發生於過去事象的歸結，又是未來發生的原因。因此，那裡必然包含著過去的足跡與未來的佈局。太陽系的過去亦應由目前太陽系行星或小天體的情況，來仔細加以觀測而逐步得到瞭解。

太陽系的歷史中，雖然大部分的研究者相信「絕對發生過」，但仍有詳情不明的事件，它就是大行星『徑向的移動』(Migration)。原始太陽系星雲中誕生的微行星，由於衝撞與合併而形成行星，這是大家都瞭解的。但對於外側的行星，尤其是天王星與海王星形成的時期發生過哪些事情，則仍待解開。

這些行星如形成於目前存在的軌道附近，由於愈外側的行星其形成需要愈多時間，如此一來，天王星與海王星的形成時間將超過太陽系年齡而發生矛盾。因此認為大行星應形成於目前軌道的稍內側，到了某個時間點才移動到外側的配置點。

此一劃時代的構想(行星移動的過程)，最初提出的是費南德茲和葉永烜(Fernandez & Ip [2])。由於海王星的共振關係，且由於軌道離心率大的太陽系外緣天體的發現，促使可信度提高。

Malhotra (1993, 1995) [3, 4] 認為當海王星向外側移動時打亂殘存的微行星，做出目前太陽系外緣可見的散亂天體的分佈。隨著費南德茲、葉永烜與Malhotra的研究，很多研究者也從事於有關問題的研究，並提出各種模型，但對於大行星的移動，何時發生？如何發生？仍未明朗。但在此情況下，最近有一個提案是被各界注目與期待的，那就是Nice模型。

太陽系行星形成的 大統一理論是否已完成？

Nice模型是發生於太陽系初期的行星移動模型。原始太陽系星雲消失時，木星、土星、天王星、海王星，各個日心距離為5.45、8.65(木星與土星的1:2平均運動共振稍內側)、13.5-17、11-13AU的位置，行星在吸積過程最後階段打散(亂)了殘存的微行星，此等殘存微行星與大行星的相互作用移動了大行星的軌道。移動時土星因通過與木星的1:2平均運動共振，軌道離心率急速增加。其結果便引起海王星與土星的近距離遭遇而擴大軌道半徑，致使採更遠方的軌道(圖2)。然後殘存於外緣的微行星帶(現在的古柏帶)天體被打散(亂)，於是由這些微行星的反作用將土星送回略呈圓形的穩定軌道。這時被海王星打散的天體，其軌道離心率較大，遂成為與海王星同為3:2平均運動共振位置的離散天體(Scattered Objects)。上述行星移動的過程恰好可以說明目前大行星的軌道離心率以及軌道傾斜角[5]。

上述大行星等的大變動，將使得當時隨從它們的特洛依群小行星的軌道變成不安定。因此，經此行星移動全部過程後應無尚能繼續生存於特洛依群區域的天體。

該區域的軌道變成不安定，通常天體會出走，但也有一些跑進該區域的天體。即所謂特洛依群區

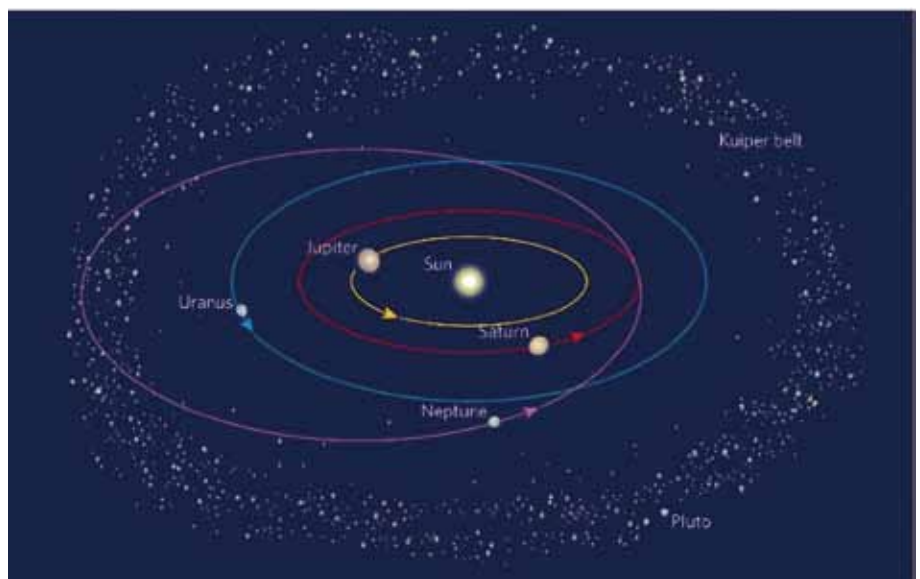


圖2 大行星移動時，土星將海王星散亂地推向靠天王星軌道的另一側，海王星便侵入了古柏帶。(取自: Nature 2005, 435, p433)

域的保護柵欄崩塌後，天體將可自由地出入。木星與土星從1:2運動共振分離後，特洛依群區域再次安定下來，此時仍滯留於特洛依區域的天體將被特洛依軌道捕獲(亦即無法從再度形成的柵欄中走出去)，這就是目前的特洛依群小行星。Nice模型據稱將可完美地再現目前特洛依群小行星的軌道傾斜角的分佈及總數 [6]。

再者，Nice模型對於後期重爆炸(行星形成後的7億年，距今約38億年前將撞擊天體大量降落月球表面)的時機亦可加以說明。以前的行星形成模型均無法說明行星形成後7億年，對於微行星再落下的機制。但在Nice模型則可加以推想。亦即行星形成終了以至木星與土星通過1:2平均運動共振，需時7億年。由於此際所發生的大變動，使得微行星軌道不安定，因而在太陽系內側大量落下。依據Gomes (2005) [7]的模擬，伴隨著1:2平均運動共振通過的大行星軌道的錯亂。首先從外緣部份(現在的古柏帶)的大量微行星(彗星)進入內太陽系。大行星軌道的錯亂影響內側的主帶，一部份的小行星亦跟著進入，多數在主帶內慢慢變換軌道離心率，稍後再從主帶飛出去，並與月球或類地型行星衝撞。換句話說，後期重轟炸的開始初期對月球主要的撞擊體是彗星型天體，其後則是從主帶出來的小行星撞擊，其數量凌駕於彗星型天體。大量的小行星從主帶降落於月球，幾乎掩蓋先前彗星撞擊的痕跡。這就合理地解決了為何月球高地殘存的隕坑大小分佈與主帶小行星的大小分佈一致的問題(參照：臺北星空 Vol 35, 2007第7頁)。

如此看來，Nice模型似乎可將太陽系初期發生的現象和目前的樣貌，順利的加以說明。是否已經完成太陽系行星形成統一理論了呢？其實不然！因為近年來不斷觀測到的新結果，說不定將促使Nice模型重新加以修正。

木星特洛伊型小行星的總數與其大小分佈

最近，從SDSS與昴(Subaru)望遠鏡對太陽系天體調查(SMBAS: Subaru Main Belt Asteroid Survey, 因有兩次調查，各稱為SMBAS-I、-II)資料的分析，推算出在L4群與L5群的木星特洛伊小行星數量 [8,9]。另外，也得到了從2公里到100公里廣範圍木星特洛伊小行星的大小分佈 [9,10]。其實很久以前就被指出木星特洛伊群L4群的數量比L5群多。小行星研究中心對於

特洛依群的目錄，每天依據各種不同調查加以登錄，因此L4群與L5群小行星數量的比率隨時會有變化。然而如將小行星大小先加以界定，而從某大小以上較大的特洛依群小行星加以比較，通常L4群的數量比L5群多。以天體力學的圓平面制限三體問題而言，L4周圍與L5周圍其軌道的安定性應無不同。L4群的數目為何比L5群多，理由仍未明瞭。惟如果對L5群的調查更加努力，說不定最後L5群也可發現與L4群相同數目程度的小行星，這是多數研究者的看法。可是問題是，經過全天調查的SDSS發現的860個木星特洛伊群小行星裡面，除去觀測偏差的結果，L4群竟比L5群多了1.6倍[8]。另外，SMBAS雖以7平方度的狹小領域做深度觀察(Pencil Beam Survey)，觀測到110多個木星特洛伊群與特洛依群小行星的空間分佈模型，所得到L4群與L5群數量比是「L4群/L5群」= 1.3-2.5 [9]。

圖3是表示已知的木星特洛伊群小行星與SDSS檢查出的木星特洛伊群大小分佈 [11]。橫軸是特洛伊群小行星的絕對等級，換算成天體的大小，H=8的直徑約170公里，H=12的直徑約25公里。縱軸是亮度比H明亮的小行星究竟有多少的統計(累積個數)。由此圖可知，天體的累積個數(亦即總數)，無論是其亮度大小或是體積大小，L4群這一邊都較多。附帶一提，此種圖稱為累積大小分佈，圖中實際是冪次法則分佈，常以近似值表示。小行星的累積個數與大小的關係亦多如下方式加以近似： $N(>D) = CD^{-b}$ ， $N(>D)$ 是直徑大於D的小行星總數，C是常數，D是直徑，b是累積大小分佈的斜率。對於H而言，如果小型的小行星數目相對較大，則b值變大；另一方面，如果小型的小行星數目較小時，則b值會保持較低。SDSS的研究資料得到的b值是 2.2 ± 0.25 。

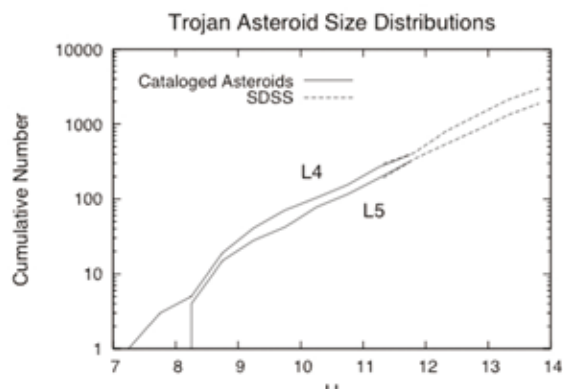


圖3. 取自: O' Brien, D. P. & Morbidelli, A. “小行星, 彗星, 流星” (2008) 文獻摘要

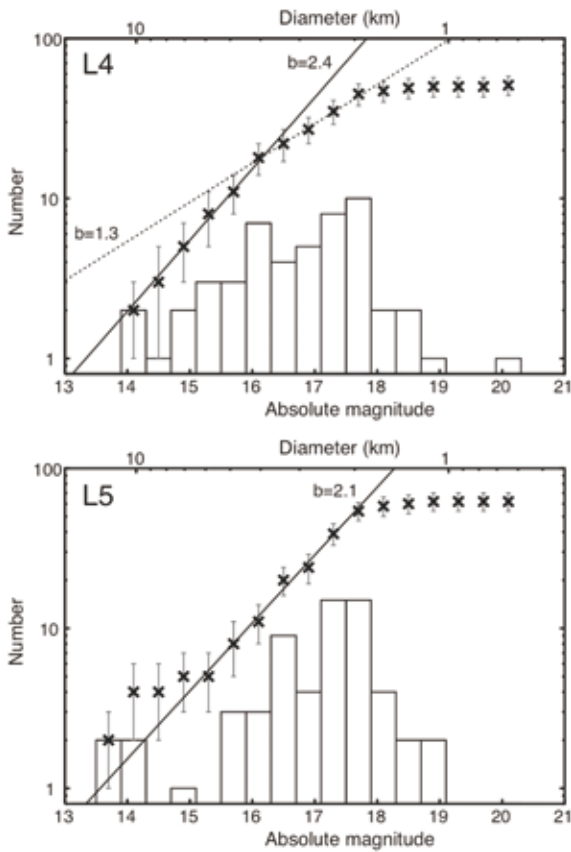


圖4. Subaru(昴)望遠鏡的小天體巡天調查所獲得的木星特洛伊群小行星之大小分佈(上:L4群, 下:L5群) 橫軸(下)為絕對星等, 換算出來的直徑如橫軸(上)所示。縱軸為具該光度的小行星數目, 棒狀圖為差分頻度分佈, ×為累積頻度分佈。b值相當於冪分佈指數的數值。L4群是D~4km的累積大小(實際直徑尺度)分佈, 可以看出斜率變化; 另一方面, L5群是D~4km的累積大小分佈, 其斜率似乎沒有變化。L5群中D>5km的小行星檢出數目甚少, 因此其冪次分佈的近似值未予採用。

其次, 就SMBAS所得到的直徑10公里以下的特洛伊群小行星的大小分佈(圖4)加以檢視 [10]。昴望遠鏡具有8.2米的大口徑, 所以SMBAS可檢測出來的天體大約比SDSS暗3個星等。SMBAS發現直徑5km以下的木星特洛伊群小行星佔去大半。

圖4的橫軸(下)與圖3的橫軸同樣表示絕對星等的等級, 橫軸(上)記有對應絕對等級的直徑。L5群中直徑10km~5km左右的, 因檢出不完全, 擬不加以討論。檢視直徑5km以下的特洛伊群小行星的大小分佈, 顯然小型小行星的數目的增加, 在兩群之間有差異。L4群的直徑在5km以下的小型小行星, 要比L5群的增加緩慢。將直徑大於2km的所有木星特洛伊群小行星, 繪製其累積大小分佈如(圖5) [10], 以獲知大約直徑 ≥ 5 km以上的小型小行星的增加比例, L4群與L5群相同, 僅有直徑 ≤ 5 km以下的有差異。

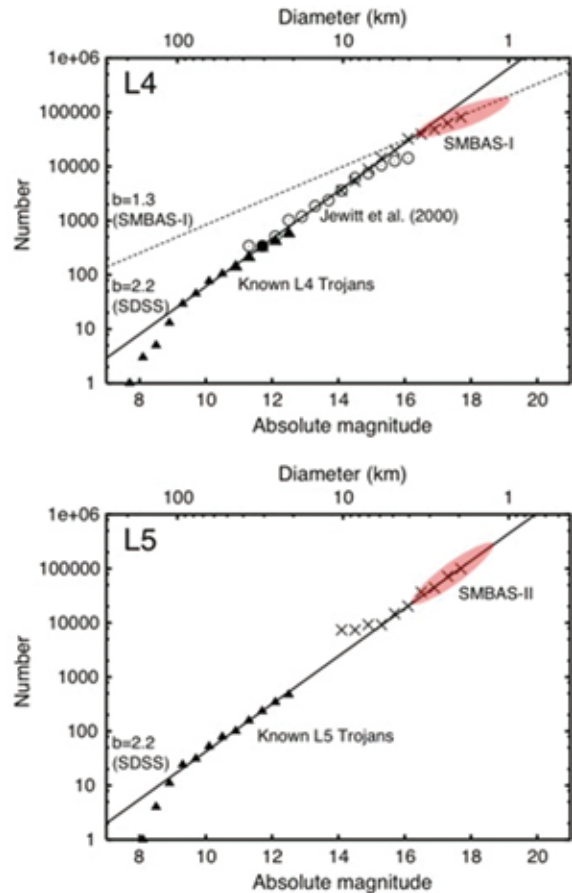


圖5. 表示直徑達2km以上的累積大小分佈, L4群、L5群分開製圖。兩圖均為已知的木星特洛伊群。依據Jewitt, D. et al. (2000, AJ, 120, 1140)、SDSS、SMBAS-I, -II所測得、已知的木星特洛伊群小行星之資料。

茲將SDSS與SMBAS的發現簡述如下：

【1】. 木星特洛伊群小行星L4與L5群小行星數目比(L4/L5)是1.3~2.5。亦即L4群這邊比較多。

【2】. 直徑約200km到直徑5km止的廣範圍而言, 累積大小分佈斜率b值以L4、L5同為 $b=2.2$ 左右, 即兩群大小分佈相似。

【3】. 以直徑5km以下的小型特洛伊群小行星來看, L4、L5兩群有差異。亦即L4群小型小行星累積大小分佈的斜率較小。【1】的L4、L5群的總個數產生非對稱性(L4較多), 其機制是什麼? 經考查先前的研究, 似有兩種可能性, 即: (a) 大行星的移動。(b) 土星等天體的長期重力攝動。

(a) 大行星的移動, 首先由Gomes (1998) [12]提案。他依據費南德茲與葉永烜 (1984, 1996) [2,3]的論文, 假定四個大行星(木、土、天王、海王)的初期位置, 又基於行星附近的殘存微行星為特

洛依群的起源之學說[14,15]，在各行星L4、L5附近設置試驗粒子。最後調查在行星移動終了後，生存於特洛依群區域的粒子。其結果，在L4周圍發現有多數粒子生存的傾向。行星開始移動之初，就有多數試驗粒子脫離特洛依群區域，此時L4群與L5群的總個數的非對稱性亦告確定。之後非對稱性可維持到行星移動終了。

然而，先前介紹的Nice模型中（由於因行星移動而引起太陽系的大變動，使得從古柏帶區域落下的天體被特洛伊群軌道捕獲），L4群與L5群總個數的非對稱性並沒有再出現[11]。這樣的模型計算根據大行星移動的參數，而結果會有大的變化，有必要累積更多的計算資料。

(b) 土星的長時間重力攝動使得特洛依群的安定區域的大小，在L4群與L5群周圍成為非對稱性的數目分佈，這是否意味著關係到L4群與L5群總個數的差異？提出這種看法的是Freistetter (2006) [16]。他利用模擬數值調查特洛依群小行星能夠安定存在的區域大小與形狀，發現因長時間的土星重力攝動，會使得L4周圍的安定區域逐漸增大。他說目前L4群的成員數目比起L5群的數目來得多，這有可能恰恰反映出其安定區域的大小。他的計算結果對Nice模型來講，可能是個好消息。畢竟，在初期假如L4、L5有同數目的小行星，等到它們的軌道進化之後，也可能產生非對稱性的總個數分佈。

就【2】之中的L4群與L5群大小分佈相似一事而言，很難使人相信不同起源的天體，可以在個別的獨立軌道上經衝撞進化而達到同一的大小分佈，因此很自然的想法，應是同一起源的天體經過同樣的軌道與衝撞進化而成為現在的大小分佈。特洛依群區域的天體之衝撞速度在L4與L5間並沒有太大的差別[17]，可見同樣條件衝突破壞產生的破片的量與大小應該也相同。另外，依據Dotto (2006) [18]所做的L4、L5群小行星族的可見光與近紅外線光譜觀測，也得知L4群與L5群的特洛依群小行星是非常相似的集團。由此表示L4群天體與L5群天體應來自同一個起源。

【3】之中的L4群可見的小型小行星累積大小分佈的較小斜率：‘b’，可以解釋為僅在L4群區缺少小型特洛依群小行星。此原因可能是原始太陽系星雲的氣體抵抗（磨擦）所致。Peale (1993) [19] 與

Marzari & Scholl (1998) [20] 則認為是在木星的吸積過程中，由原始太陽系星雲氣體尚存時所形成的特洛依群所致。因此他們在氣體抵抗中就L4與L5周邊的軌道安定性，以及天體的捕獲率加以計算，結果是：相對於小型小行星在L4周圍軌道變得不安定，L5周圍的天體軌道則出現相反的情形—傾向於容易存活下來。氣體抵抗僅對小型小行星有效，它的效果在大型的特洛依群小行星上無法見到。上述的情形，對於昴望遠鏡僅能勉強檢出的小天體，為何在L4群的天體變少，是不能做為理論上的印證。

木星特洛依群形成過程的考察

上述各種理論模型和觀測資料，加上一般的「行星形成論」綜合分析結果，木星特洛依群形成的劇本，似可歸結於下列兩種：

劇本（A）：太陽系初期殘存於大型行星附近的小行星就是現在的特洛依群小行星。首先在大行星的吸積期中，周圍的微行星被納入特洛依群軌道內。此時，因原始太陽系星雲尚存在於行星周邊，由於對氣體抵抗（磨擦）小的L4特洛依群會被排除，因此小型L4群的較小斜率（b值較小）累積大小分佈情形（小型的L4群小行星比較少）就被造成。隨著大型行星移動，L5特洛依群小行星的數目全面減少。隨著大型行星移動所造成的小行星數目之減少，起因於特洛依群安定區域1：1共振帶的移動而發生。共振的效應不會因為小行星的大小不同而有差異—對所有的小行星均有同等的效應，因此伴隨著大行星的移動，所造成的特洛依群小行星數目的減少，並不會改變其大小分佈。但是此一腳本（A）中留存著一個問題：這種機制對於用以解釋目前在特洛依群小行星中可以見到高軌道傾斜角天體群的形成，仍有困難。

劇本（B）：大型行星的移動過程中，木星與土星以1：2平均運動共振通過之際，引起全太陽系的大變動，由此大變動遂將古柏帶區域落下的天體捕獲到特洛依群軌道上（基於Nice模型特洛依群小行星之形成）。此時，L4與L5點的周圍將有數目略同的特洛依群小行星被捕獲，但等到大型行星的位置安定之後，由於來自土星的重力攝動，L4與L5群總個數產生非對稱性的變化。

並不像劇本（A）一般，劇本（B）可以解決以

下的問題：對於目前特洛依群小行星中所觀測到的高軌道傾斜角天體群的形成，變為可以解釋了。不過，尚未討論到包含大小分佈的問題，到底能不能據以說明小型L4群之累積大小分佈的較小斜率，則仍未能明瞭。

如上所述，無論何種劇本均有問題存在，對於木星特洛依群形成過程的闡明，現狀下尚有一段距離。再者，想到撞擊演化的過程事態將更複雜化。de ELia & Brunini (2007) [21]對於下述情況表示有其可能：即「特洛依群小行星最初雖依力學處於冰冷狀態（軌道離心率小，軌道傾斜角低），但因撞擊演化，經過大約一億年，可以演變到目前的軌道離心率及軌道傾斜角的分佈」。他們主張是從現在的特洛依群軌道分佈，不能制約初期特洛依群的軌道分佈。如果此說是正確的，那麼先前劇本（A）便有成立的希望。不過因撞擊演化可以改變累積大小分佈的形狀，對於在劇本（A）中評估撞擊演化的效應時，必須要小心慎重！

實際上，L4群內存在著不同族型的小行星族 [22]，而在L4群內，過去也確實發生過撞擊演化。O' Brien & Morbidelli (2008) [11]認為以Nice模型而言，假如再構築後，統計學上可以忽略的數目差異存在於大型的小行星上，則在其後撞擊演化中，L4與L5群數目的差異即可能加以清楚說明。然而，僅在L4群發生較大撞擊演化的假定，對於直徑5km以上的小行星在L4與L5群都具有相似大小分佈的情形，可能仍難以說明。

結論

以現有的理論模型和觀測資料來推測特洛依群的形成過程，尚是混沌不明難做決定。要突破瓶頸到底需要什麼？撞擊演化模型實有必要再加檢討，惟因撞擊演化模型是以現在天體的大小分佈做為基礎，木星以外的特洛依群觀測應一併進行，將其他行星的特洛依群天體大小分佈及總數精確計算做為先決條件。就大行星的移動過程而言，行星的初期位置或移動速度有必要用更多種參數加以驗證。但是，料想最重要的決定因素，應該是木星特洛依群小行星和古柏帶天體內部組成的資訊。如果兩者一致，則木星特洛依群小行星就該是Nice Model所描述的，從古柏帶落下的天體。假如兩者不一致，則可認為大行星的移動，是以不伴隨完全破壞的穩定過程，將特洛依群小行星帶領

著移動。古柏帶天體內部組成也許可以從觀測古柏帶起源的彗星得出答案。木星特洛依群小行星不像彗星會接近地球，從地上觀測困難。因此說不定可以藉由太空船來探究其資訊。JAXA/ISAS利用「太陽能電力航行」做為實現外行星領域探查的一環，史上首次進行木星L4點的特洛依群小行星近距離近接航行的觀測探討已經開始了，且讓我們拭目以待。不僅可做天體表面的調查，也希望能夠搭載獲得內部情報的科學儀器。特洛依群天體的問題，相信在將來可預期的一段時間之中，會繼續引發太陽系行星科學界研究人員的濃厚興趣。

參考文獻:

- [1] <http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/JupiterTrojans.html>
- [2] Fernandez, J. A. & Ip, W.-H., 1984, *Icarus*, 58, 109
- [3] Malhotra, R., 1993, *Nature*, 365, 819
- [4] Malhotra, R., 1995, *Astron. J.*, 110, 420
- [5] Tsiganis, K. et al. 2005, *Nature*, 435, 459
- [6] Morbidelli, A. et al. 2005, *Nature*, 435, 462
- [7] Gomes, R. et al. 2005, *Nature*, 435, 466
- [8] Szabo, Gy. M. et al. 2007, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 377, 1393
- [9] Nakamura, T. & Yoshida, F. 2008, *PASJ*, 60, 293
- [10] Yoshida, F. & Nakamura, T. 2008, *PASJ*, 60, 297
- [11] O' Brien, D. P. & Morbidelli, A. Abstract of Asteroids, Comets, Meteors (2008)
- [12] Gomes, R., 1998 *Astron. J.*, 116, 2590
- [13] Fernandez, J. A. & Ip, W.-H., 1996, *Planet. Space Sci.*, 44, 431
- [14] Marzari, F. & Scholl, H., 1998, *Icarus*, 131, 41
- [15] Fleming, H. J. & Hamilton, D. P., 2000, *Icarus*, 148, 479
- [16] Freistetter, F., 2006, *A&A*, 453, 353
- [17] Davis, D. R. et al. in *ASTEROID III*, p.548 (2002)
- [18] Dotto, E. et al., 2006, *Icarus*, 183, 420
- [19] Peale, S. J., 1993, *Icarus*, 106, 308
- [20] Marzari, F. & Scholl, H., 1998, *Icarus* 131, 41
- [21] de ELia, G. C. & Brunini, A., 2007, *A&A*, 475, 375
- [22] Beauge, C. & Roig, F., 2001, *Icarus*, 153, 391

吉田二美:日本自然科學研究機構，國立天文臺，國際連繫室，專門研究職員。

洪汝煌:業餘天文愛好者

伊藤孝士:日本自然科學研究機構，國立天文臺助教