

由 小天體的大小分佈 探討 太陽系撞擊史

月球是離地球最近的天體，它是從上古以來就一直不斷繞行地球的美麗天體。人們自古以來幻想月球是神秘的水晶球，這種幻想於1610年被伽利略(Galileo Galilei)所打破，他以望遠鏡對向月球，證明月球是由巨大的岩石塊所構成，它的表面係由他所命名的所謂「環形山(crater)」--似碗狀的地形，以及稱為「海」的暗面平原所組成。

「環形山」是大小不一的隕石撞擊所形成的。月球表面為數眾多的環形山正顯示著一次又一次的天體撞擊過程。

月球的起源，目前以「巨大撞擊」(Giant Impact)的學說最有力--即月球是由一顆火星大小的原始行星撞擊地球後，由地球被剝離的一部份聚積而成。惟在此學說之前眾說紛紜，困擾了科學界好一陣子。對於月球，現今仍有繼續困擾著科學界而未能解決的一個問題，就是「後期重轟炸說」(Late Heavy Bombardment-LHB，或譯為「後期猛烈碰撞」)。在太陽系，一般來說大約在45億年前行星的形成就已經完成，而同時微行星降落在行星上的事件也差不多終了。在數億年後，距今38億年前，因某種原因在類地型行星的表面又發生大規模的天體撞擊，將這些行星的表面撞擊破碎，這個學說因阿波羅探測船從月球表面採到的岩石以及來自月球之隕石的撞擊年代而獲得支

持。另外來自火星的Allan Hills 84001 隕石亦即被視為39.2億年前在火星發生的天體撞擊，而從火星高地飛到地球的隕石：該隕石從火星飛出的時期與後期重轟炸期的年代相一致。因此推論，「後期重轟炸」不僅只發生於月球上而已，也是影響整個內側太陽系的全區域事件。

此一後期重轟炸期到底有何天體降落於內側太陽系呢？要確認撞擊天體的起源非常困難，過去一直有各種模型被提出來討論但都無法確定。依據阿波羅月岩樣本的化學分析、後期重轟炸期的撞擊體並非像彗星一般是富含冰塊的天體，而被認為是比較像岩石質地的小行星天體。但因撞擊天體的起源不明確，以致引起後期重轟炸的原因機制，僅侷限於研究者的推論範疇，有些科學家甚至還懷疑到底是否真的發生過後期重轟炸。「後期重轟炸說」雖已被提出超過三十年，但始終是行星科學上的重大謎團。缺少證據的原因，特別是對於撞擊候選天體的太陽系小天體群，缺乏觀測研究的資料。尤其是對小天體大小的分布不夠瞭解。最近陸續有針對太陽系小天體的調查觀測，特別是利用大口徑的望遠鏡對小天體大小分布的逐步瞭解，使得我們可以將月球表面的環形山大小分布與造成環形山之撞擊體的大小分布作出直接比較。環形山的大小分布反映出撞擊體的大小分布，並包含關於撞擊體的一些

38億年前 在月球上鑿孔的天體 之真面目

文/ 吉田二美

譯/ 洪汝煌 審校/ 洪景川

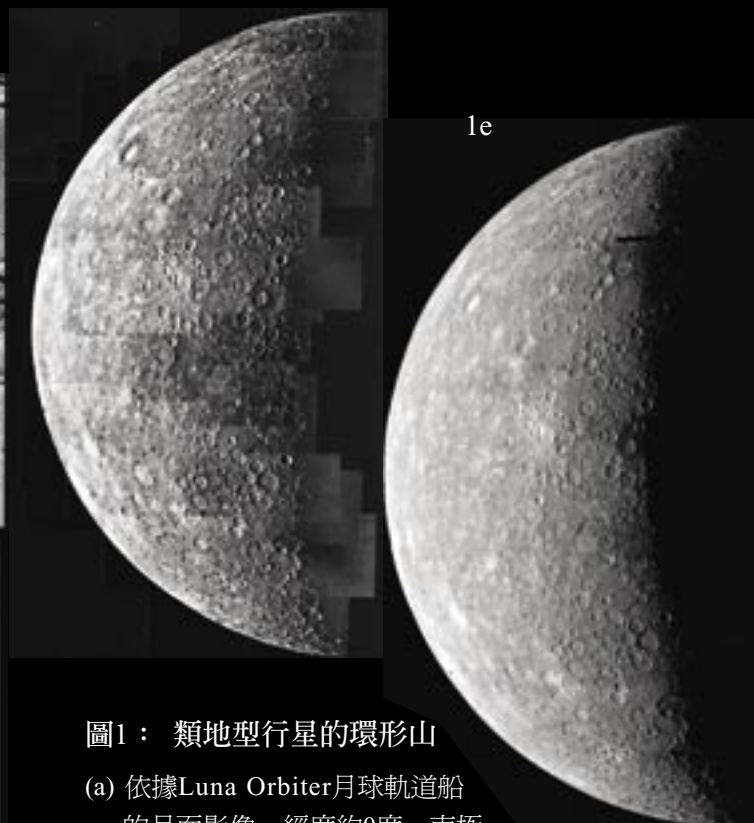
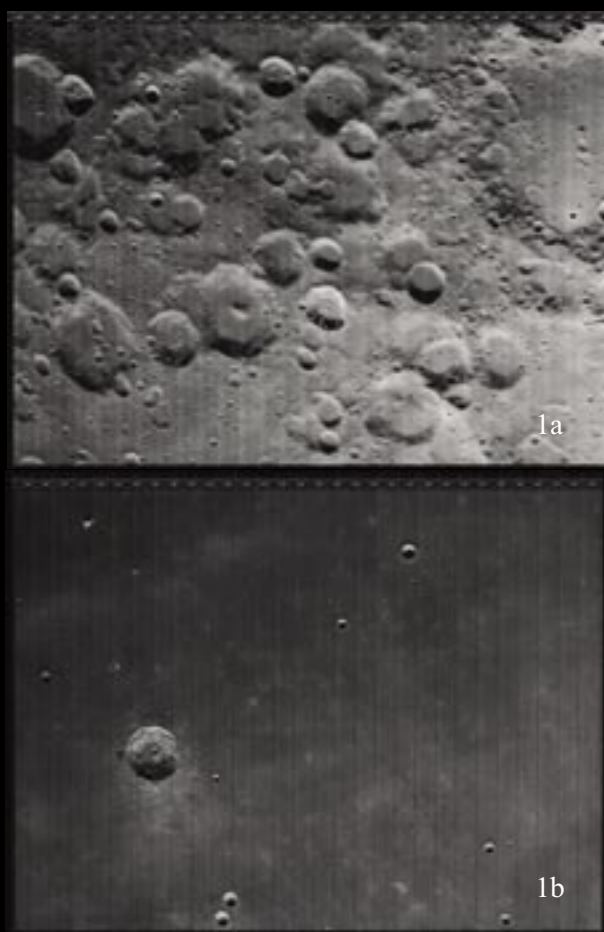
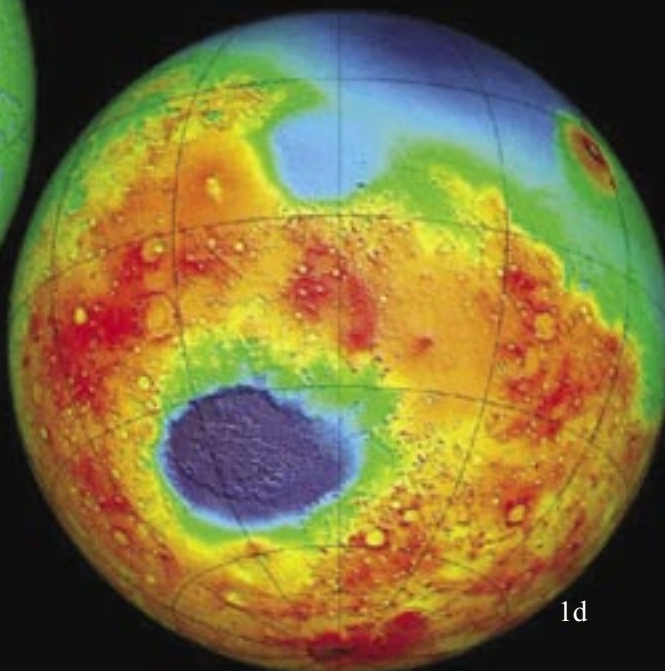
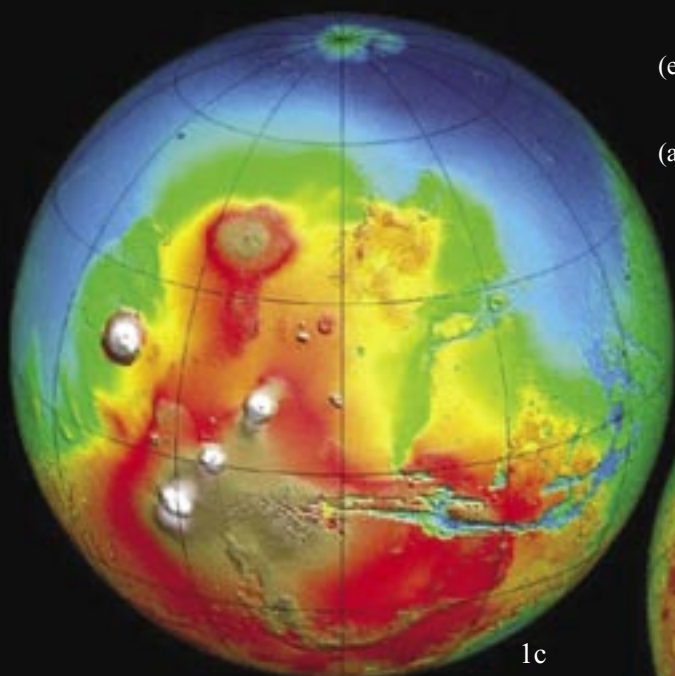


圖1：類地型行星的環形山

- (a) 依據Luna Orbiter月球軌道船的月面影像，經度約0度，南極附近的高地。(b) 同上，雨海之北端，兩圖的比例尺度是相同的。
- (c) 火星的北半球，中央偏左處可見火帶。
- (d) 火星南半球，中央偏左下方可見疑似由大撞擊所造成的大盆地及許多環形山。
- (e) 水手十號(Mariner 10)所拍攝到的水星表面。
- (a)(b)(e)由NASA提供，(c)(d)由MOLA 科學小組 提供。



寶貴資訊，如力學的和物理的起源。拜阿波羅樣本之賜，我們已能充分瞭解月球表面環形山的形成年代。因此，計算已知形成年代的月球表面環形山的數量，就能推測出何時有多少個天體發生撞擊。換言之，後期重轟炸期(約38億年前)到底有多少天體降落也可能被推測出來。至於是多大的天體撞擊則也可依環形山的大小來推定。如此已有線索研究後期重轟炸期撞擊體的真正面目。而且從往昔的撞擊體與現在的太陽系小天體的比較，說不定也可以探知從後期重轟炸期到現在以來太陽系歷史的基本資料。我們利用小天體大小分布的最新研究資料，試著加以挑戰、破解行星科學界的懸案—後期重轟炸說之謎。

首先將覆蓋著環形山的月球、火星、水星表面仔細加以觀察(圖1)。地球與金星雖然也有環形山、但此類行星均有一層大氣層覆蓋，表面風化與侵蝕嚴重，環形山的保存狀態極差，無法做為環形山大小分布討論之用。大約44~38億年前造成的月球高地(圖1a)，與大約38~32億年前形成的月海(圖1b)，兩者上的環形山數目密度之間有明顯的差異。月球高地是40幾億年間的天體撞擊記錄，而月海則是30億年多的天體撞擊記錄，後來形成的月海上的環形山數目當然會比較少。但進一步思考，如果小天體是以一定的比例繼續撞擊，則月海的環形山密度比起高地來似乎過於偏低。以環形山的密度和年代的對比計算，假如天體撞擊率在過去40億年間是一定的，那麼月海也該有目前10倍以上的環形山數量。也就是說，這正表示在某一時期(即月海形成的約38億年前--此時期與後期轟炸期一致)做為界線，月球表面的天體撞擊『因某種理由』而開始銳減。形成環形山的絕對年代，已知的雖然僅限於月球表面，但其他的類地型行星也可以採用月球表面環形山的數量密度，相對地加以推定。火星的北半球(圖1c)環形山稀少、因此年輕；南半球(圖1d)是全面性高地，環形山多，因此古老。水星(圖1e)雖然到目前為止有一半的表面沒被拍攝出來，但全面性覆蓋著環形山、故表面年代古老。

那麼，就來調查月球與這些行星在不同年代表面環形山的大小分布。所謂大小分布就是『多

大的環形山有多少個』的統計。這種統計方法包括(1)『大小頻度分布』：即計算某大小範圍的環形山數目作成直方圖(Histogram)、(2)『累積度數分布』：即取比某大小更大的環形山全部加起來做統計、以及(3)『R plot』統計法：即本文採用的方法等。一般來說，吾人已知環形山或天體的個數大約與其大小的三次方成反比例。例如直徑1公里的環形山大約比直徑2公里的環形山多出8倍。採用R plot的手法，就是將環形山大小頻度分布的統計以直徑的三次方規格化，再由直徑三次方的反比例分布測定詳細的相差值。圖2是月球、水星、火星表面環形山大小分布，按此圖可以解讀出下列事項：

(1) 月球、水星、火星古老高地的環形山密度高，大小分布在R plot上呈現波浪狀曲線。

(2) 火星北半球平原，比較年輕(新)的表面環形山密度低、大小分布近似平坦直線。月球表面伴隨白色噴出物的新形成環形山(稱 Class I)，它的大小分布亦如年輕的火星平原，呈現平坦的直線分布。

綜合以上，古老的表面與新生的表面其環形山的大小分布可見有明確的差異。因此我們會注意到下列事項：

1. 古老時代，類地型行星上有很多天體撞擊，造成許多環形山。

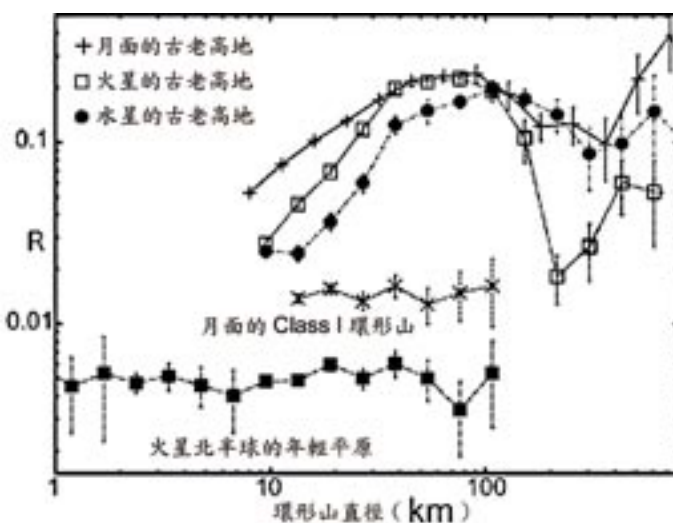


圖2 月球、水星、火星在各種領域的環形山的大小分布，縱軸所對應的是環形山的數量密度。

2. 古老時代造成的環形山的撞擊天體，在R plot上面就是具有波浪狀的大小分布的集團。

3. 新生表面的環形山因其密度低，大量天體撞擊時代應該在月海的形成，約38億年前已經終了。之後僅有少數的天體撞擊。

4. 依推論，新生時代的撞擊天體，在R plot上就是具有平坦大小分佈的集團。新生環形山與古老環形山兩者大小分布的差異正表示其受撞擊的天體群各有不同。

綜觀上述所得的結論是，類地型行星過去一直承受著兩種天體群的撞擊，而該天體群是可依大小分布的差異加以區別的。

撞擊體的候選天體是太陽系內的小天體。過去一直有各種小天體的調查觀測在進行【如葉克-麥克唐納巡天(Yerkes-McDonald Survey, 或譯葉凱士-麥當勞巡天)、帕洛瑪-萊登巡天(Palomar Leiden Survey)、Spacewatch巡天、史隆數位巡天Sloan Digital Sky Survey(SDSS)、昴天文臺主帶小行星巡天(SMBAS)、LINEAR巡天等】，因此以前未明瞭的微小天體的大小分布或空間分布，在目前的研究顯示愈來愈清楚了。直徑10公里以上的小行星，藉由紅外線衛星IRAS熱輻射進行觀測，可以相當正確地求出其直徑。依據這些調查，比較確定大小分布的有主帶小行星(MBAs)、近地小行星(NEAs)、以及特洛伊群(Trojan)小行星，其大小分布如圖3所示。現在試著檢視MBAs(圖3a)與NEAs(圖3b)的大小分布：MBAs的大小分布與古老環形山的大小分布一樣，在R plot上面成為波浪狀曲線，NEAs這邊則像新生環形山的大小分布，呈現較平坦的形狀。在環形山的大小分布所見到的明確的二群性，現在亦顯著表現於小行星的大小分布上。特洛伊群(Trojan)群小行星(圖3c)的大小分布似乎明顯不同於MBAs或NEAs。

且說，為了找出鑿出類地型行星上環形山的元凶，來比較一下類地型行星環形山大小分布與上述小天體大小分布。不過，環形山大小分布是無法直接與小天體的大小分布相比的。因為，天體撞擊的環形山大小除了撞擊天體的大小外，也與它的密度與撞擊速度有關。直徑10公里的天體

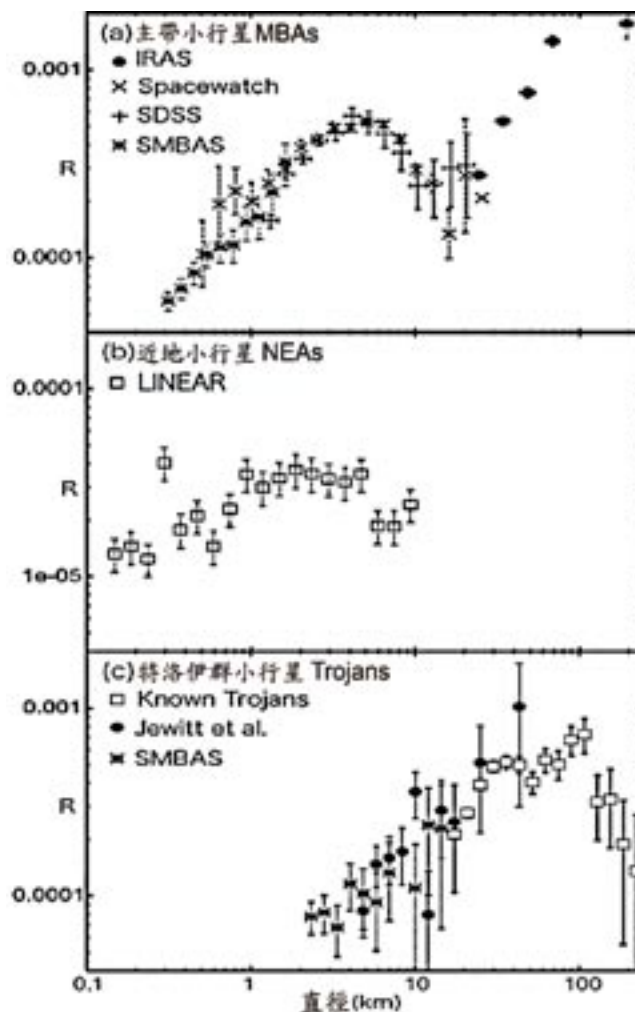


圖3 小行星的大小分布 (a) 主帶小行星(Main Belt)的大小分布 (b) 近地小行星的大小分布 (c) 特洛伊群(Trojan)天體的大小分布(已知的特洛伊群研究資料由MPC提供)

撞擊不必然造成直徑10公里的環形山。我們為了找出形成環形山的撞擊體大小分布，採用了叫做Pi Scaling法則的轉換方法(圖4)。依照Pi Scaling法則換算出的環形山撞擊體大小分布，與現在的MBAs或NEAs使用最新研究資料的最新大小分布做一比較如圖5。我們馬上會注意到下列事項：

(1) 現在的MBAs的大小分布以廣大範圍而言，與造成古老環形山的撞擊體的大小分布約略相等。

(2) 現在的NEAs的大小分布，與造成比較新生的環形山撞擊體的大小分布相當一致。

由上面(1)MBAs與古老環形山大小分布的精確一致性，可以說造成古老環形山後期重轟炸期的撞擊體，應是從小行星帶出來的MBAs。此事與阿波羅樣本的分析結果相調和(後期重轟炸期的衝突

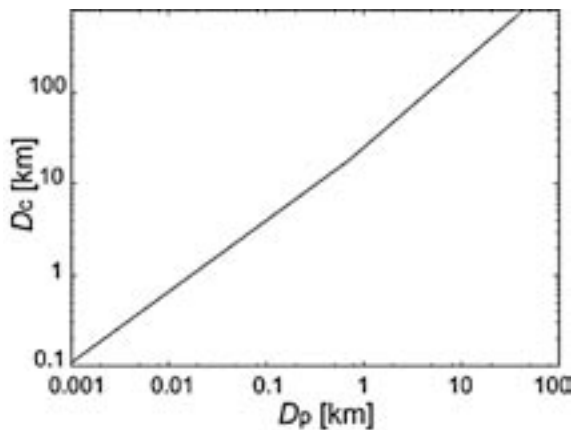


圖4 Pi Scaling的例子：想像月球表面被主帶(Main Belt)小行星撞擊的情形。包括月球表面的密度(2700 kg/m^3)和重力加速度(1.67 m/s^2)，岩石質小行星的密度(3000 kg/m^3)，以及內側主帶(Main Belt)小行星對月球表面施加平均撞擊速度(17 km/s)時的撞擊天體的直徑(橫軸 D_p)，對應到它因而對月球表面造成的環形山直徑(縱軸 D_c)。

體，與其說是像冰塊的天體，不如說是岩石般的天體)。撞擊天體其他的有力候選人，被認為是彗星或庫柏帶天體，惟其大小分布至今仍未明朗，雖然尚無法將這些天體群從撞擊體候選名單中剔除，但鑑於圖5大小分布的一致性，除非彗星或庫柏帶天體具有和MBAs同樣的大小分布，否則要成為比MBAs更主要的後期重轟炸期撞擊體是不可能的。

MBAs在38億年前為何大量降臨在類地型行星領域？以目前的見解最有希望的學說是「太陽系初期大行星與太陽間的距離改變(原文：太陽系初期に巨大惑星の動径方向の移動が起こり)，伴隨著小行星帶裡發生共振帶的移動，當時將小行星帶裡的小行星從軌道一端推出，大部分推向太陽方向，而在38億年前巨大行星即定著在目前的位置，共振帶的移動停止，擾動小行星撞擊到內側行星的事件也停止(Giant Planets Orbital Migration)」。此想法根據於：

(1) 後期重轟炸期以後，內部太陽系的環形山記錄裡找不到與後期重轟炸期同樣規模的任何天體撞擊事件的證據。因此認為後期重轟炸期將MBAs送進類地型行星領域的機制是初期太陽系(約38億年前)發生的特有事件。

(2) 後期重轟炸期的撞擊體的大小分布，大約剛好與MBAs的大小分布相一致，因此意味著

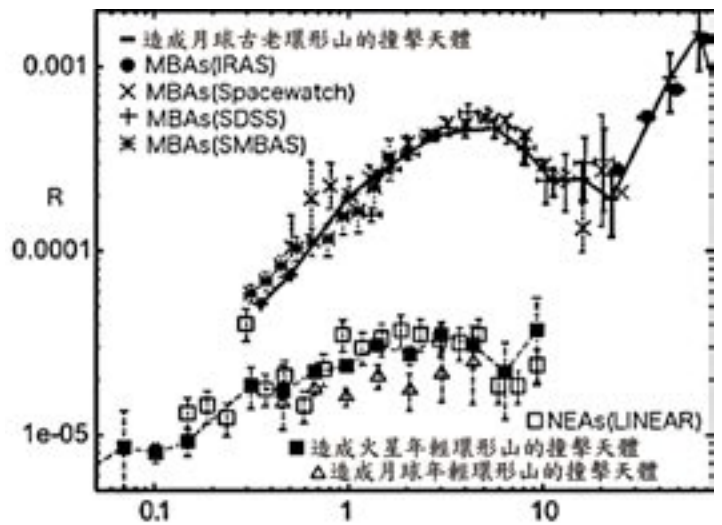


圖5 形成環形山的撞擊天體的大小分布與現在的小行星大小分布比較。橫軸表示天體直徑，縱軸是天體的個數密度。在此假定為小行星的天體，再由環形山推導出撞擊體的大小。

MBAs的輸送機制是不論小行星大小均曾經從小行星帶釋放出去。行星形成方面的幾項理論性研究中所設想的「巨大行星的動徑方向的移動」，應可滿足上述(1)(2)兩方面的機制。

那麼新生環形山的撞擊體到底是何物？由大小分布的一致性看來似以NEAs最有嫌疑。NEAs的起源被認為是MBAs。Yarkovsky效應(小行星自轉時產生的效應，由於小行星吸收太陽能及放出太陽能的非對稱性，小行星軌道能量永續發生變化，小行星的軌道大小也隨著徐徐發生變化)將直徑未滿20公里的MBAs送進木星的強力共振帶，進而把它們送入穿越類地型行星軌道的軌道。又此效應的強度與小行星的大小有關。直徑10公里以上的小行星，其直徑若愈小則所受的效應愈大。此正巧妙地說明了「NEAs是比MBAs小的天體集團」的觀察結果，另外由於新生環形山的數量密度變少，亦說明了後期重轟炸期大約在38億年前就已經完全終了。幸運的是，現在已經進入了「撞擊體進入類地型行星領域的流入頻率低而穩定」的時代。

吉田二美：自然科學研究機構/國立天文台
/夏威夷觀測所研究員。

洪汝煌：前花蓮區農業改良場研究員，業餘天文同好。

洪景川：任職於臺北市立天文科學教育館