

2012 危機解密：隕石撞擊

您擔心隕石撞擊地球嗎？您曾估計撞擊能量和時間嗎？隕石可能是從那兒來的？本文將從物理學、天文學、天體力學的角度帶領讀者認識隕石撞擊地球的部份相關研究和最近的進展與趨勢。

您聽說過 2012 年末日危機可能來自隕石撞擊地球的謠言嗎？「上網查查看」或許是現代人典型的解決之道。您能夠查到謠言最原始的說法嗎？是誰說的？是什麼時候在什麼樣的媒體或刊物發表的？有什麼證據？有其他支持或反對的理由嗎？有任何後續的研究或發展？新的事實是否支持原先的結論？論證是否嚴謹？可信度如何？如果是一篇好的科學報導，第三者應該可以依循脈絡進行同樣的研究，有同樣的發現；但是，如果是八卦小站的謠言，多半都經不起這樣的科學查證。這也是科學方法和道聽塗說的區別：科學工作者要求引用原始的文獻，一方面彰顯原創者的貢獻，另一方面也讓後繼者有所依循。

不過，陰謀論（conspiracy theory）的支持者同樣也可以把他們的理論包上科學的外衣。這顆假想中會與地球相撞的行星還有個名字叫「尼比魯」（Nibiru）或是其他別名。在相關電影大賣時，科學家們甚至得擱下手邊的研究工作，來回答一些似是而非的問題：「天文學家們不是已經拍下了這顆行星的照片，為什麼不讓社會大眾知道？」「你能否認天文學家們已經在南極建造望遠鏡來觀測這顆行星？」筆者無法完整覆述相關的傳言，只能建議有興趣的讀者們看看維基百科（Wikipedia）或美國航空太空總署（NASA）網站針對包含上述共二十道問題的回答（註一）。科學家們總是保守的說明自己的研究結論或預測滿足統計上幾個標準差以內的可靠度；杞人憂天者或陰謀論者卻總是抓著幾個標準差以外的可能性來大做文章。是的，我們相信未來某一天「可能」有一顆相當大小的天體會撞上地球。這樣的災難曾經發生過，未來也沒有理由排除。只是，隨著天文學的進展，我們可以問更多的問題：「這些天體是從那裡來的？」「它們有多大？」「碰撞的機會有多少？」「我們能夠事先預測到嗎？」希望本文能夠藉著相關研究的新發現，帶領讀者了解這許多的「已知」與「未知」、「可能」與「不可能」。

2008 TC₃ 和撞擊能量估計

天文學家將軌道上不起眼的小石頭稱為「流星體」（meteoroid），落入大氣層燃燒的現象稱為「流星」（meteor），如果沒有全部燒毀而有部份掉在地面上才稱為「隕石」（meteorite）。不過，天上掉下來的也有可能是體積更大的彗星、小行星、甚至於最近很熱門的人造衛星。不論是人類短短的歷史上或漫長的史前時代都不乏大小隕石墜落地球的事件。但是，一直到 2008 年十月，職業和業餘天文學家們才第一次觀測到在軌道上即將（於二十小時內）墜落地球的小天體。這顆如房車般大小的小行星編號 2008 TC₃（註二）進入大氣層後在北非努比亞沙漠上空 37

公里處爆炸，放出的能量相當於一兩千噸黃色炸藥。兩個月後，研究人員在墜落地點蘇丹北部找到了約六百個隕石碎塊（註三），讓科學家們有機會進一步用放大鏡來檢視該天體的演化歷史與組成。

以 2008 TC₃ 為例，我們可以簡單的估計一下它相對於地球的動能。假設小天體的體積是 10 立方公尺，密度和水相同，總質量就大約是十公噸。再假設它在軌道上靜止不動，地球繞太陽的公轉速度平均每秒 29 公里，這大致上就是兩天體的相對速度。換算成動能大約是 4.2×10^{19} 耳格，或是 4.2×10^{12} 焦耳。一噸黃色炸藥大約是 4.184×10^9 焦耳，或是 10^9 卡。所以，撞擊前的總動能大約相當於一千噸黃色炸藥，和先前引述的觀測結果差不多。一般彗星的大小是以公里為單位。像馬鈴薯形狀的哈雷彗星大約是 16 公里長，8 公里寬，和台北市大小差不多。考慮一個更簡單的例子：邊長一公里的正立方形狀小天體，和水有相同的密度，總質量就是十億噸。假使相對速度同樣是地球公轉速度，總動能就相當於一千億噸黃色炸藥或 10^{20} 卡。而廣島原子彈的威力約相當於一萬五千噸黃色炸藥。這小小「水立方」的動能就像是幾百萬顆原子彈！體積更大一點的彗星或是上百公里大的小行星就請讀者們自己計算了。 10^{20} 卡的能量其實也不難想像。假使有另一個邊長十公里的「水立方」，它的總質量就是 10^{18} 公克。在標準狀況下將這些液態水從攝氏零度加熱成一百度的熱水，這能量就用完了。

可能威脅之一：近地小行星

既然除了 2008 TC₃，沒有人看到隕石撞擊地球前的運行軌道，要找到它們的起源，就只能從我們對太陽系的瞭解來著手了。太陽系的小行星依照它們的軌道可以分成若干不同的族群。雖然，大部分的小行星軌道在火星與木星中間（稱為主帶小行星，main-belt asteroids），有些小行星的運行軌道可以非常接近地球，例如近地小行星。關於小行星的歷史和介紹可以參閱本刊先前的文章（註四）。如果隕石撞擊只是一個機率的問題，那麼，我們可以相信有更多依循類似軌道運行的天體仍然在太陽系內漫遊著。頭號嫌疑犯近地小行星（Near Earth Asteroids，簡稱 NEA），屬於「近地天體」（Near Earth Objects，NEO）的一種，近日點（常用小寫英文字母「*q*」表示）小於 1.3AU（1AU 即一個天文單位，相當於地球到太陽的平均距離）。NEA 主要可以分成三群，即阿登群（Aten）、阿波羅群（Apollo）及阿莫爾群（Amor）。阿登群的軌道半長軸比地球的軌道半長軸略小，阿波羅群的軌道半長軸比地球的軌道半長軸稍大，兩者都有機會穿過地球的軌道。阿莫爾群的近日點則在地球和火星之間。截至 2011 年 10 月底所發現的近地小行星有 668 個屬於阿登群，4488 個屬於阿波羅群，3132 個屬於阿莫爾群（註五）。不過，並非所有的近地小行星都對地球構成威脅。那些有潛在威脅的小行星簡稱為 PHA（Potentially Hazardous Asteroids），共計 1260 個，其中直徑大於一公里的有 151 個，最接近地球的距離小於 0.05AU，大約是七百五十萬公里，是地球到

月球距離的二十倍左右。目前，大約有十分之一的近地小行星直徑超過一公里。先前估計這類「公里級」近地小行星的總數約在一兩千顆左右（註六）。

隨著各類地面或太空大小望遠鏡的巡天觀測，包含此間中央大學等單位積極參與的泛星計畫（PanSTARRS），預計將可大幅提高這類天體被發現的機會和數量，並進行長期的例行觀測和追蹤。近地小行星是最近很熱門的研究題目之一，不僅因為它可能威脅地球的生態，也因為它們的軌道距離地球較近，科學家們可以很容易的進行更仔細的研究，甚至於派太空船登陸小行星採集樣本送回地球。西元 2000 年的情人節那天，美國航太總署的太空船「近地小行星會合號」（Near Earth Asteroid Rendezvous，簡稱 NEAR）進入愛神星（433 Eros）的軌道，並於次年二月底完成任務永久停駐在愛神星表面。日本宇宙航空研究開發機構（JAXA）的隼鳥號則於 2005 年 11 月以猛禽掠食之姿短暫登陸系川小行星（25143 Itokawa）嘗試擷取樣本，並於 2010 年 6 月重返大氣層將樣本艙送回地球。除了透過望遠鏡或太空船的遠距離遙測之外，這類樣本返還分析和隕石研究就像是在犯罪現場蒐集微物證據，在缺乏目擊證人的情況下將墜地的隕石和可能還在天上運行的母體（或是它的近親）聯繫起來，直接或間接推測它們的組成、起源與演化。隕石研究的更多細節可以參閱本刊先前的文章（註七）。

可能威脅之二：彗星

前述「公里級」或是更小的近地小行星其實都是非常暗淡的天體，除非用大望遠鏡或是當它們非常接近地球時才觀察得到。但是如果這類小天體由於某些揮發性物質在靠近太陽時噴發出來形成彗髮甚至彗尾，我們就將之歸類為彗星。彗星核心的部份簡稱彗核，通常只有公里級的大小，像是前面提到的哈雷彗星或是許多短周期彗星。可是大彗星接近太陽時產生的彗髮，有可能和我們的太陽差不多大（約百萬公里級），彗尾可以橫跨行星的軌道，觀測上相對的比較容易。近地天體有一小部分是近地彗星，已經發現的約有 90 個左右（同註五）。和小行星相比，一般彗星的軌道比較接近長橢圓形，也就是說橢圓軌道的離心率比較高。先前大半的彗星大致上可以分成兩種，也就是短周期彗星和長周期彗星，它們應該有不同的來源，譬如說海王星外（約 30 到 50AU 處）較扁平的古柏帶（Kuiper Belt，註八、註九）或是更遙遠球對稱分布的歐特雲（Oort Cloud）。近年來，天文學家們發現主帶小行星中有一小部分偶而也能顯現出彗星的特徵（註十），小行星與彗星之間的分野或許不像以前所認為的那麼明顯。

早年對彗星的研究多半僅限於彗髮和彗尾，因為彗核實在太小，觀測困難。自從 1986 年歐洲太空總署的喬陶號太空船（Giotto）成功拍下哈雷彗星核心影像以來，陸續又有幾艘太空船造訪彗星。除了類似的彗核「飛掠」（flyby）任務之外，還有深擊號（Deep Impact）在 2005 年美國國慶日與譚普一號彗星（9P/Tempel）

硬碰硬的自殺撞擊任務，以及星塵號（Stardust，註十一）在 2006 年 1 月成功的將自威德二號彗星（81P/Wild）彗髮所蒐集到的物質送回美國猶他州沙漠的「樣本返還」（sample return）。而 2004 年成功發射的羅塞塔號（Rosetta）即將於 2014 年進行彗星環繞和登陸的任務。科學家們對彗星的研究已經進展到直接採樣分析的第三類接觸。實驗室分析與觀測或遙測結果相對照，可以揭開更多彗星的秘密。然而，有限的樣本數目是否足以代表各種不同歷史起源的彗星或指引正確的研究方向則有待時間來證明。

從發現到撞擊的時間估計

從它們的相對數目來看，被彗星撞擊的機率應該要少一點。如先前所述，彗核通常也不大，只是超大的彗髮和彗尾在接近地球時很輕易的就嚇壞了對彗星缺乏認識的王公貴族或市井小民。然而從彗星的軌道和與地球遭遇的相對速度來看，它們卻是比較危險的，因為撞擊的相對速度比較高，而且在它們從太陽系未知的角落蹦出來之前，從地面上也很難觀測到，因此預警的時間也較少。舉例來說，著名的百武彗星（Comet Hyakutake，C/1996 B2）在 1996 年 1 月 31 日被發現，同年 3 月 25 日就通過近地點，距離地球只有 0.1AU，無光害處肉眼可見長長的彗尾延伸半個天空！而 1995 年 7 月被發現的另一顆大彗星海爾波普彗星（Comet Hale-Bopp，C/1995 O1）則要到 1997 年 3 月底才通過近地點與近日點。

要怎樣來瞭解這樣的差異呢？假設彗星（或是小行星）繞太陽的運行可以用簡單的橢圓軌道或拋物線軌道來表示，不受其他行星引力或非萬有引力（例如物質噴發或輻射壓）等因素的影響，那麼我們就可以透過克卜勒定律或牛頓萬有引力定律來計算，彗星從距離太陽 r 個天文單位被發現開始到撞擊地球（ $r = 1\text{AU}$ 左右）所需要的時間。熟悉微積分工具的讀者可以自行嘗試附註十二的積分式子，不過，軌道的近日點（ q ）必須小於或等於 1AU，而遠日點（ Q ）必須大於 1AU，和太陽的平均距離（符號 a 表示）則等於 $(q+Q)$ 的一半。我們挑選了幾組特別的遠日點軌道，包含 1.5AU（火星）、3.3AU（主帶小行星）、5.2AU（木星）、30AU（海王星）、50AU（古柏帶）和一去不回的拋物線（ $e = 1$ ）。另外，每組遠日點都分別對應一組近日點 $q = 0$ （比較快撞擊地球）和 $q = 1\text{AU}$ （比較慢撞擊地球）的軌道。結果大致如圖一。如果小天體來自歐特雲（重力位能相對較大），接近拋物線的軌道所花的時間最少。若發現時在遠日點（ $r = Q$ ），當撞擊點恰好是近日點時，所需的時間剛好是軌道周期的一半，如圖中水平線所標示。由於給定一個發現時的日心距離 r ，對應無窮多個通過地球軌道的時間（撞擊時間不是日心距離的函數），圖一只顯示發現與撞擊在同樣半個周期內（以通過近日點的軌道對稱軸為分界）所需的時間。如果彗星或小行星在通過近日點之後或是多繞了太陽幾圈以後才撞上來，所需時間就要分開來計算（註十二中的積分）再相加。

當然，發現的時間早，彗星距離太陽和地球遠，預警的時間也長。百武彗星被發現時大約是 11 等，距離 2AU；而海爾波普彗星發現時亮度約 10.5 等，距離則有 7.2AU。這是因為百武彗星核心大約只有兩公里大，而海爾波普彗星卻是四十或六十公里大（註十三）的罕見大彗星。一般公里級的小行星或是彗星距離太陽較遠時沒有彗髮彗尾，由於它們本身的亮度是來自天體表面反射的太陽光，所以在不考慮相位（類似月球朔望變化）的情況下，從地面（或太陽）看到的亮度大致和距離的四次方成反比。除了距離的因素，剩下的就是天體本身的大小和它們表面組成反射太陽光的能力（天文學術語稱之為「反照率」，albedo）。測量這些天體的大小和反照率往往包含一些不確定的因素，但是公里級的小行星或是彗星如果位在海王星之外，就算動用最大型的地面或太空望遠鏡，也看不見。目前唯一的辦法就是透過這些暗淡小天體遮掩背景恆星的機會，進行統計上的研究（註十四）。回到 2012 的末日謠言，假設今年冬至左右某個天體會和地球相撞，您能夠估計一下撞擊前一兩年它的大概距離嗎？如果謠言還說明了天體的大小，加上對於反照率的合理假設，我們還可以簡單估計出它的亮度。

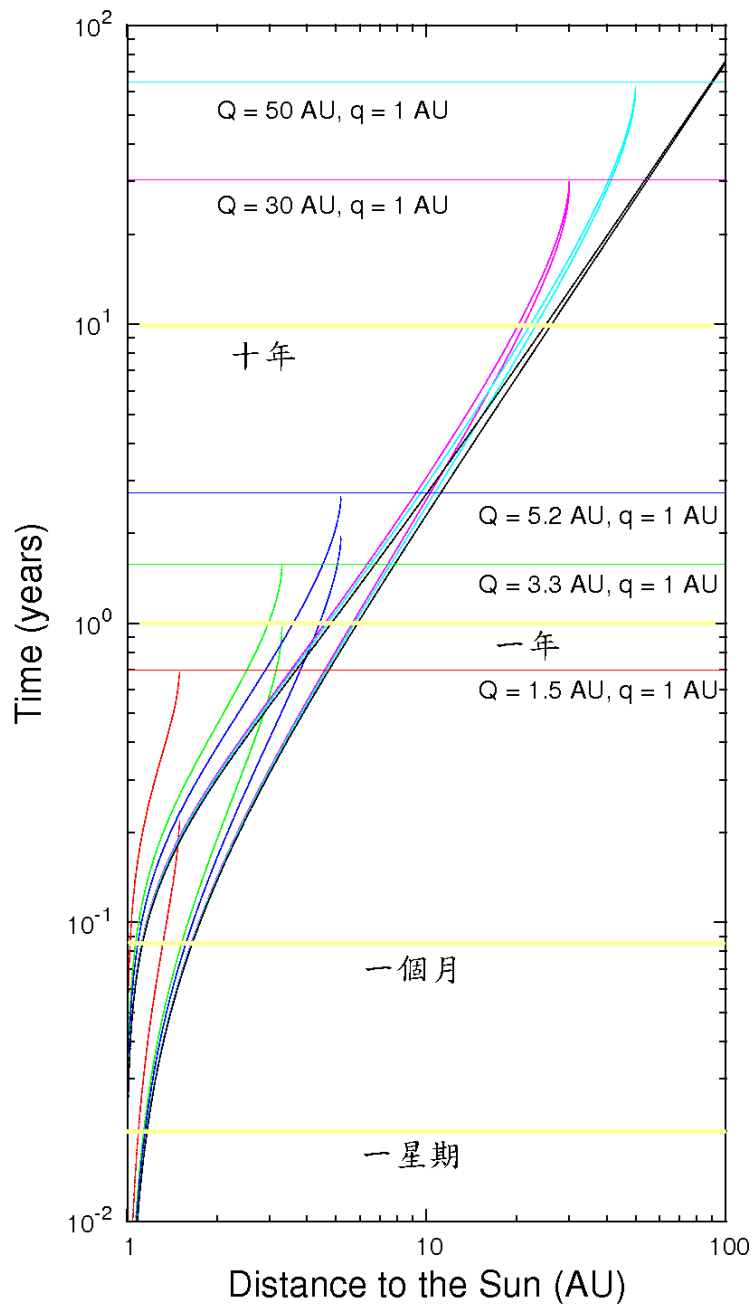
太陽系的過去與未來

近地天體由於距離地球較近，隨著觀測技術的進步，科學家們應該很快就可以掌握大部分天體的軌道。至於那些尚未接近太陽的遙遠彗星，我們還沒有很有效的辦法進行深入的研究，只能從像冥王星這類較大的族群來推估小天體的大概性質、數量和分布。另一方面，太陽系小天體的軌道並不像幾顆主要行星或地球一樣能夠存活幾十億年。從電腦模擬推算，短周期彗星或近地天體的軌道恐怕只能維持幾百萬年的穩定性。換句話說，我們今天還可以看見這些小天體表示太陽系裡一定有其他的來源能夠持續的補充那些因為軌道不穩定或是碰撞而損耗的數目。近地小行星可能來自主帶小行星，短周期彗星可能源自古柏帶。那麼，它們的數量與分布自太陽系誕生以來是保持穩定？緩慢演化？還是可能曾經發生過劇烈變化？造成恐龍滅絕的隕石撞擊（註十五）究竟是太陽系演化過程中的必然還是偶然？

分析阿波羅太空人從月球採集的樣本以及若干來自月球的隕石，科學家們認為或許在太陽系誕生的初期，距今約四十億年前後的兩三億年間，月球曾經遭受猛烈的隕石轟擊，這就是所謂的「後期重轟炸期」（the Late Heavy Bombardment）。當然，樣本是否具有代表性是值得討論的重點之一。另一方面，如果月球發生這樣的災難，太陽系的其他成員像是地球、水星、四大行星的衛星是否能夠獨善其身？在地球的地質研究上，這時期以前地殼可能還在熔融的狀態，也正是「冥古宙」（Hadean Eon）與「太古宙」（Archean Eon）的分野。我們可能需要更廣泛的行星地質研究來分析更多來自月球和其他行星、衛星的樣本才能瞭解這類災難的規模（如果這樣的災難確實發生過）。而從天體力學或動力學的研究模擬中，科學

家們也提出了像是「Nice 模型」(Nice Model, 註十六)等假說,嘗試透過太陽系早期四大行星軌道的遷徙(planet migration)和交互作用,來解釋包括後期重轟炸、天王星與海王星的形成、質量密度不如預期的古柏帶分布等等觀測結果。自然,正確的理论也要能夠解釋類地行星的形成與演化和其他小行星、衛星的組成、分布與歷史。

可以想見,太陽系的歷史演化問題相當的複雜,有賴於更多的地面與太空的觀測結果和理論分析。那麼,有沒有可能威脅是來自太陽系以外?觀測上,雖然有少數彗星軌道比較像是雙曲線,一般認為那是受到行星引力微擾的結果。截至目前為止,科學家們沒有任何可信的證據觀測到來自太陽系以外的彗星。典型銀河系天體與太陽系遭遇的相對速度大致上應該和太陽系環繞銀河中心運行的速度差不多,大約每秒幾百公里左右。如果類似太陽質量的天體闖入,太陽系小天體的軌道可能會受到影響。不過,能夠觀測驗證客觀研究的才是科學;至於那些既不能證明為真,又不能證明為偽的,還是留給小說家或電影劇本來發揮,當做茶餘飯後的閒談材料吧!



註一：

<http://astrobiology.nasa.gov/ask-an-astrobiologist/intro/nibiru-and-doomsday-2012-questions-and-answers>

註二：有興趣的讀者可查閱維基百科關鍵字「2008 TC3」。

註三：Jenniskens, P. et al. 2009, *Nature*, 458, 485

註四：傅學海，〈飄浮在太空中的岩石——小行星〉科學月刊第二十三卷第十一期（1992年11月）；陶蕃麟，〈小行星〉科學月刊第十二卷第十二期（1981年12月）；黃一農，〈小行星〉科學月刊第五卷第六期（1974年6月）

註五：近地天體的統計可以參考美國航太總署噴射推進實驗室的網站：

<http://neo.jpl.nasa.gov>。內文中引述的數據是2011年10月28日的結果。官方正式名單可以參閱國際天文聯合會小行星中心網站

<http://www.minorplanetcenter.net/> 的相關列表。

註六：Rabinowitz, D. et al 2000, *Nature*, 403, 165。

註七：劉名章，〈探索太陽系的起源〉科學月刊第四十卷第六期（2009年6月）；

李太楓，〈什麼是隕石？〉科學月刊第十八卷第十期（1987年10月）

註八：倪簡白，〈宇宙間的流浪家〉科學月刊第三十六卷第九期（2005年9月）

註九：依照中央大學葉永烜教授（同時也是海王星外太陽系研究的先驅）的解釋，「古柏」一詞原指參天的古木，採用「古柏」之名同時也意謂著這兒的天體極可能保存了太陽系誕生初期所形成的最原始材料。

註十：Hsieh, H. H. and Jewitt, D. 2006, *Science*, 312, 561。同樣透過國內中央大學的鹿林山天文台的一米望遠鏡，天文所的研究生鄭宇棋稍後也有相關的發現。

註十一：劉名章、沈君山，〈驚異奇航—星塵號〉科學月刊第四十二卷第十一期（2011年11月）

註十二：克卜勒問題中某質點在橢圓軌道上從 $r = 1 \text{ AU}$ 運行到 r （或反過來）所需要的時間可以用積分式表示：

$$t = \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{GM_{\odot}}} \int_{r=1 \text{ AU}}^r \frac{r dr}{\sqrt{(r-q)(Q-r)}}$$

其中 $a = (q + Q)/2$ 。如果距離以 AU 為單位，時間以年為單位，則 $GM_{\odot} = 4\pi^2$ 。積分結果包含根式和反三角函數。如果是拋物線軌道（沒有遠日點），所需要的時間則是

$$t = \frac{1}{\sqrt{2GM_{\odot}}} \int_{r=1 \text{ AU}}^r \frac{r dr}{\sqrt{r-q}}$$

可以由前式令 Q 趨近於無窮大得出。注意這兩組積分函數都定義在近日點到遠日點（或無窮遠）的半個軌道周期之間。

註十三：Fernandez, Y. R. 2002, *Earth, Moon, and Planets*, 89, 3

註十四：中央研究院與中央大學的國際合作「中美掩星計畫」（TAOS，<http://taos.asiaa.sinica.edu.tw>）就利用了這種技術。

註十五：可參閱許靖華的《大滅絕》（1992年，天下文化出版）或本刊先前的文章：郭兆書，〈猶加敦致命的隕石坑〉科學月刊第二十三卷第七期（1992年7月）；袁尙賢，〈隕石絕種之謎〉科學月刊第二十一卷第十二期（1990年12月）；以及分別由袁尙賢、陳欽溢與李麗芬、李太楓與游鎮烽在科學月刊第十六卷第七期（1985年7月）所發表的〈鈹異，蟻殪矣——隕石滅恐龍說〉、〈飛來橫禍？——彗星與週期性絕種〉、〈『彗星絕種說』質疑——對週期性彗星撞擊造成生物絕種學說之批評〉三篇文章。

註十六：「Nice」是法國的地名，Nice模型源自幾位科學家在當地的研究結果，有三篇文章發表在同一期的《自然》期刊：Gomes, R. et al. 2005, *Nature*, 435, 466；Tsiganis, K. et al. 2005, *Nature*, 435, 459；Morbidelli, A. et al. 2005, *Nature*, 435, 462。