

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 地球科學科

佳作

最佳創意獎

040501

由數學逆推法解出彗星外形之可行性初探

學校名稱：國立中興大學附屬高級中學

作者： 高二 薛竹珺 高二 林筠皓 高二 何艾玲	指導老師： 林士超
-----------------------------------------------	------------------

關鍵詞：光度曲線(Light curves)、
外形模型(Shape Models)、
19P/ Borrelly

摘 要

本研究從小行星中心 (MPC) 網站取得彗星 19P/Borrelly 的觀測資料，利用天體光度曲線逆推 (lightcurve inversion) 為基礎的 DAMIT 程式繪製彗星的外形模型 (Shape Models)。

若將繪製出的 19P/Borrelly 外形模型與深空一號 (Deep Space 1) 拍攝影像比較，發現彗星外形模型含有大面積的三角形，推測是星等變化受到彗髮的影響。由於 67P/C-G 與 19P/Borrelly 特性相似，本研究以 67P/C-G 為參考，對星等、距離及週期等因素進行人工篩選，以減少彗髮對彗星外形算繪的干擾。

本研究也同時探討彗星自轉方向，對繪製外形模型的影響。結果顯示，自轉軸指向的差異會導致反光面的變化，進而影響彗星的外形模型。

壹、前人研究(動機)

M. Kaasalainen 和 J. Torppa 在 2000 年發表了利用光度變化的曲線來推估天體外形的方法(lightcurve inversion, 參考附錄一), 而 DAMIT(Database of Asteroid Models from Inversion Techniques)就是以此一方法為基礎產生的小行星資料庫。DAMIT 由 The Astronomical Institute of the Charles University 製作與提供, 它包含自轉軸的黃道座標、自轉週期等資料。DAMIT 提供上百顆小行星的 3D 外形圖供人使用, 另外也有指令供人下載, 但即使擁有許多小行星的資料, 卻找不到彗星的相關資訊。

2004 年 3 月歐洲太空總署(ESA)做了一個很大的冒險, 發射羅塞塔號(Rosetta)飛往 67P/ Churyumov - Gerasimenko, 並計畫讓菲萊號 (Philae) 進行有史以來第一次探測器在彗星上受控著陸, 然而由於不清楚彗星的構造, 羅塞塔號在 2014 年接近 67P 後便開始對彗星表面進行為期兩個月的繪圖, 以確定菲萊號可行的著陸位置。科學家得在短時間進行判斷何處為最佳的著陸地點, 是否造成菲萊號著陸的成敗我們無從得知, 但我們希望能將由 DAMIT 所提供、用來繪製小行星外形的方法, 運用來建立彗星外形。

首先, 我們便要了解的是 lightcurve inversion model 的概念與機制(M. Kaasalainen 和 J. Torppa), 以及去比較 DAMIT 裡小行星的特性, 如: 自轉速率、自轉軸指向、形狀、大小與軌道特性等 (參考附錄二逆推方法, 及附錄四 243Ida 小行星外型分析測試)。從擁有與其相近特徵的彗星出發, 初探 lightcurve inversion 解出彗星外形之可行性。DAMIT 採用天體表面反射太陽的亮度, 經過程式的處理可產生出的相對星等的變化曲線, 以此去猜測天體之外形, 因為相對星等變化便是自轉時反照面的改變所造成。我們選定了現今較了解及擁有較多觀測資料的木星族彗星, 去探討 lightcurve inversion 對於彗星所解出的外形模型的限制與要求, 對於其結果所需的修正進行討論, 初探彗星外形模型(Shape Models)的樣貌。

在 2001 年, 太空船深空一號(Deep Space 1)飛越彗星 19P/Borrelly。當時, 19P/Borrelly 位於近日點附近(1.349AU), 太空船近距離探測的結果顯示: 彗星表層的冰大多已揮發 (昇華), 留下裸露的表面顯示其含有台地、山脊等與地表相似的地形。本研究正是以此彗星作為研究的目標。

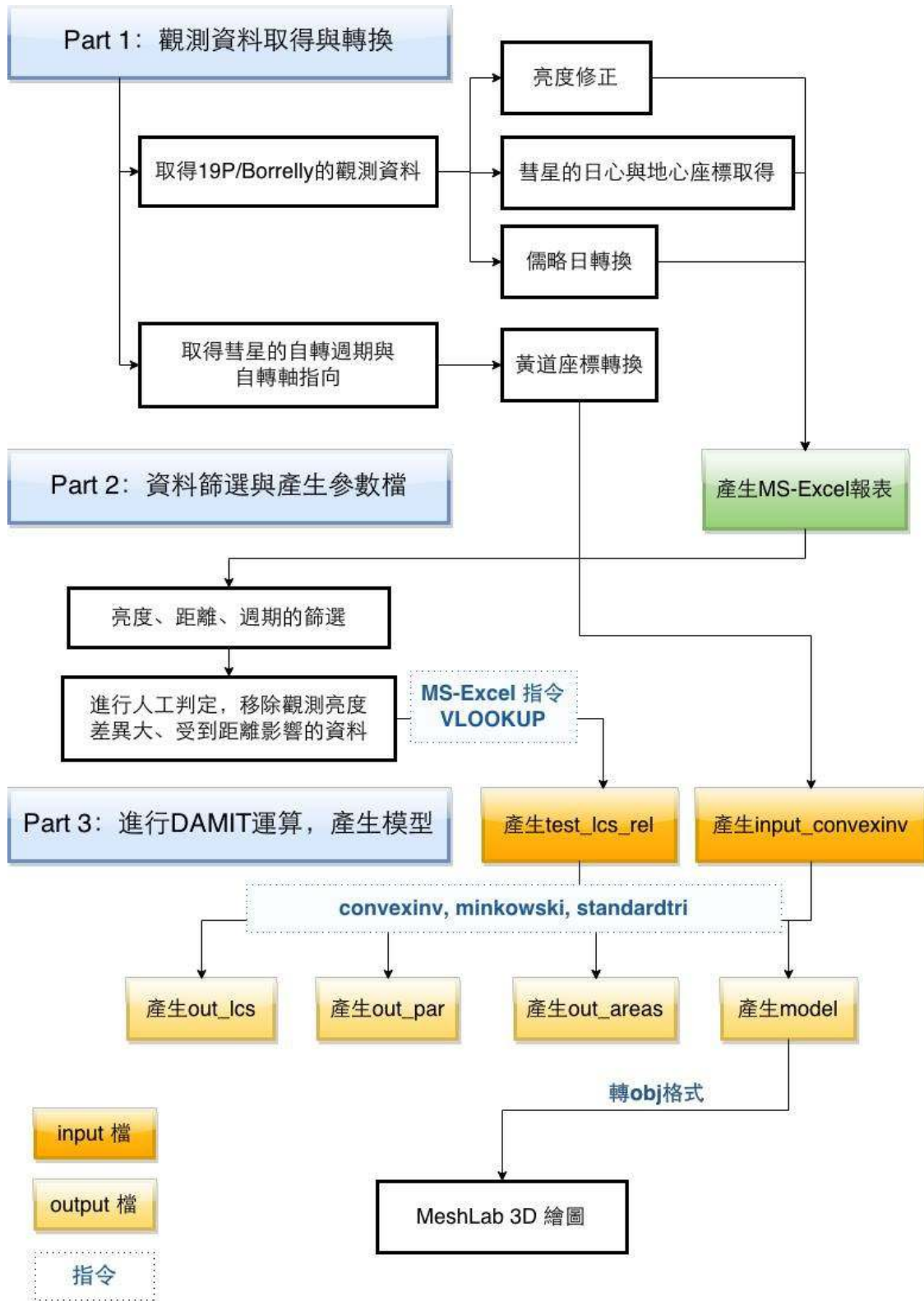
貳、研究目的

- 一、取得彗星觀測資料, 建立由天體光度曲線逆推法繪製彗星外形模型的方法。
- 二、進行 19P/Borrelly 彗星的衛星影像比較, 找出星等、距離及週期等條件對彗髮的影響。
- 三、找出彗星自轉指向對繪製外形模型的影響。

參、研究設備

PC、Linux(Ubuntu 12.04)、MS-Excel、MeshLab 3D 影像軟體、DAMIT 程式、MeshLab@iPad

肆、研究步驟



▲Fig 1 流程圖

一、彗星觀測資料轉換

(一)產生 MS-Excel 觀測資料檔

1. 利用從 IAU 的 MPC 網站 (小行星中心) 取得彗星 19P/Borrelly 的觀測資料, 從 1905 年 1 月~2015 年 2 月, 共 2575 筆, 其中有亮度的可用觀測資料共 1504 筆。
2. 取觀測資料日期中的年、月、日, 輸入 Solar System Calculator(網站)產生報表 (Solar System Calculator 由 Don Cross 製作, 能利用觀測日期計算出天體的位置資訊, 包含日心座標 (x,y,z)、地心座標 (X,Y,Z) 和彗日距與彗地距等資訊, 這些資訊皆以 AU 為單位表示。)
3. 將日期(年月日 K、M、D)用以下公式轉換成儒略日 (JD)。
$$JD=367K - \{7(K+\langle(M+9)/12\rangle)\}/4\} + \langle(275M)/9\rangle + I + 1721013.5 + UT/24 - 0.5\text{sign}(100K+M-190002.5) + 0.5$$
4. 將觀測星等 Mo 用公式轉換成亮度 Brightness(B), 公式為 $B=10^{(-0.4*Mo)}$ 。
5. 將 2~4 點所獲得日心座標 (x,y,z)、地心座標 (X,Y,Z)、JD、Brightness 合併成一個 MS-Excel 的完整報表 (參考附錄三)。

(二)產生參數檔 input_convexinv

從 ROTATIONAL PROPERTIES OF COMETARY NUCLEI 中取得彗星自轉軸指向參數 λ (黃經)、 β (黃緯), 與 P (自轉週期, 小時), 產生參數檔 input_convexinv。

二、將資料篩選, 產生 test_lcs_rel 檔, 以利餵入 DAMIT 計算之用。

- (一) 為探討彗星觀測資料的亮度、距離、公轉週期對 Shape models 的影響, 將 MS-Excel 報表中的完整資料分別進行亮度、距離的篩選, 條件如下:

0. 無篩選

1. 亮度篩選條件: 分別將亮度採用以下標準進行篩選:

- (1) 星等 16 等~18 等(包含 16 等與 18 等)
- (2) 星等 17 等以上(包含 17 等)
- (3) 星等 18 等以上(不含 18 等)

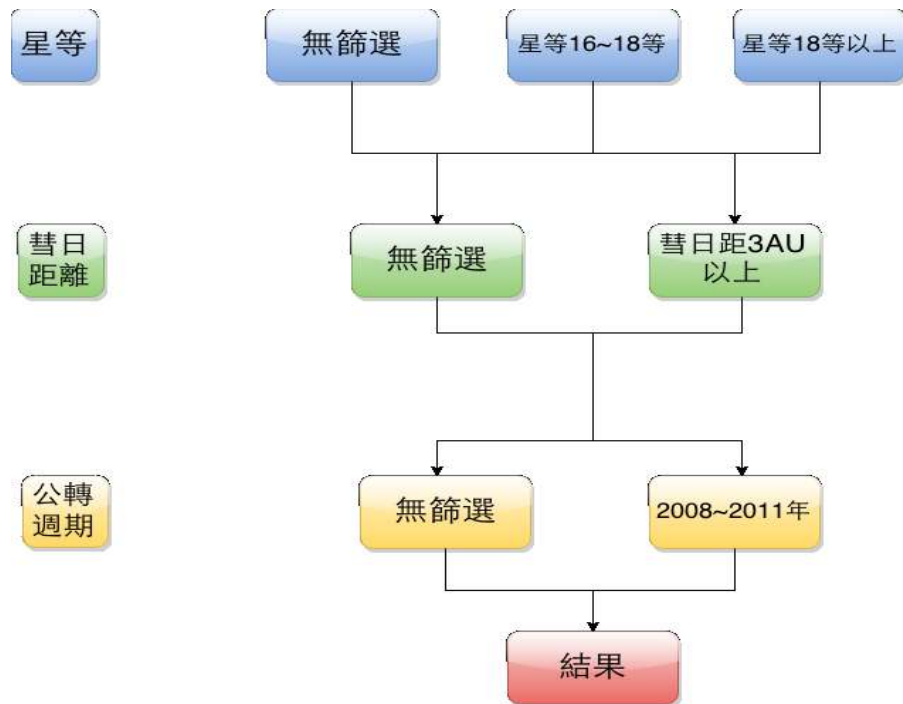
2. 距離篩選條件: 分別將距離採用以下標準進行篩選:

距太陽 3AU 以上(含 3AU)

3. 公轉週期篩選條件，分別將週期採用以下標準進行篩選：

(1) 2008年7月~2011年12月(19P 彗星在2008.7通過近日點，由此遠離太陽，往遠日點方向移動，隔一次的通過近日點2015.5.28)

(2) 無篩選



▲Fig2 篩選流程圖

4. 本研究試著改變彗星自轉軸指向的條件，用來判定其外形模型是否會與原先的外形模型有相似結果？以彗日距3AU以上繪製的模型分別對 λ 及 β 做了旋轉 90° 的調整，依序為：

(1) 原始自轉軸指向之模型 ($\lambda = 225.47^\circ$ 、 $\beta = 6.76^\circ$)

(2) 黃經減 90° ($\lambda = 135.47^\circ$ 、 $\beta = 6.76^\circ$)

(3) 黃緯減 90° ($\lambda = 225.47^\circ$ 、 $\beta = -83.24^\circ$)

(二)以人工判定，將觀測亮度值變化差異大的資料移除。

(三)將篩選出來的檔案利用 MS-Excel 的指令 VLOOKUP 進行轉換，轉換成符合 test_lcs_rel 檔的格式（參考附錄三）。

三、進行 DAMIT 運算

(一)將 test_lcs_rel 檔與 input_convexinv 檔匯入 convexinv、minkowski、standardtri 等三個指令中，匯出 model、out_lcs、out_areas、out_par 四個檔案。

(二)匯出的 model 檔包含點與面的資訊，將 model 檔轉檔成 obj 格式，匯入軟體 MeshLab(以線連成點進而產生面，形成 3D 外形)。判定此顆彗星的 X、Y、Z 三軸，確定產生的 3D 圖為 Y 軸向上，Z 軸垂直向外，再將三軸兩兩互相垂直，繪製出三軸比較圖，以便進行討論。

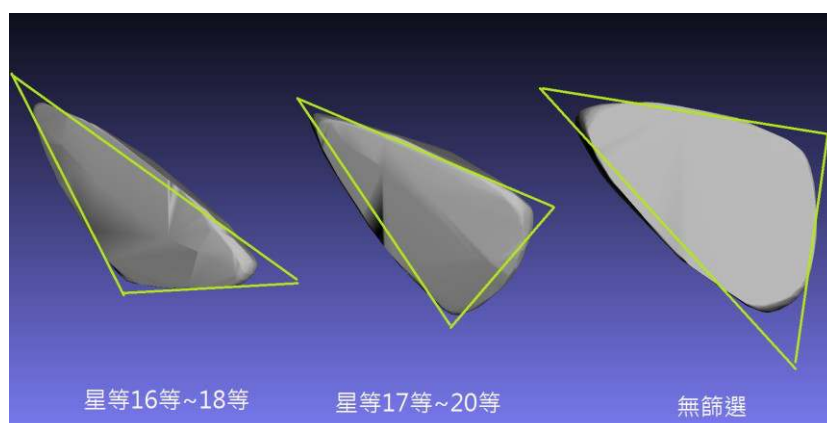
(三)將 out_lcs 檔中的亮度數值對自轉週期進行作圖，用來討論相對亮度與彗星外形的關聯性。

(out_areas 檔包含了面的資訊與 x、y、z 的座標，為 Shape models 檔的轉換過程；out_par 檔中有 λ 、 β 、P 的修正值，可與原始資料作比較)。

伍、研究結果

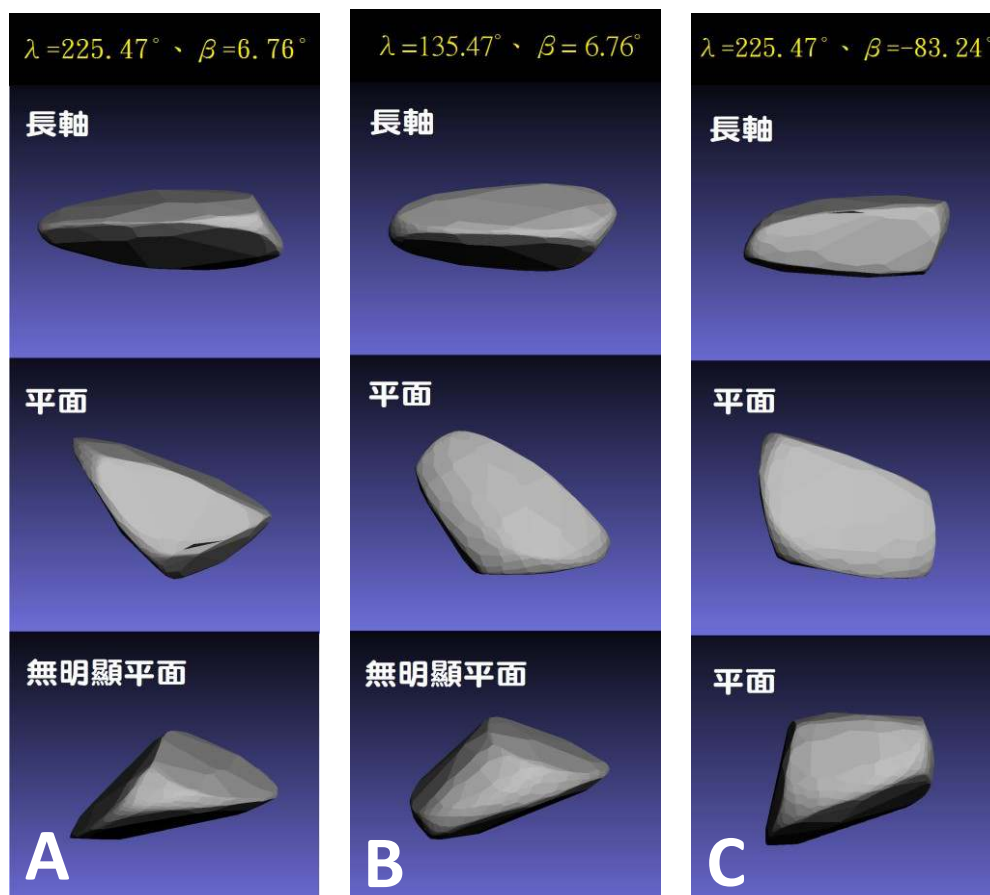
一、從 IAU 的 MPC 網站所得的 19P/Borrelly 觀測資料共有 2575 筆，扣除 1071 筆沒有彗星亮度的觀測資料，再經過人工篩選與判定，在星等 16~18 等，共有 379 筆(95 天)的觀測資料、星等 18 等以上，共有 217 筆(77 天)的觀測資料、星等 17 以上，共有 451 筆(96 天)的觀測資料、彗日距 3AU 以上，共有 128 筆(35 天)的觀測資料、2009 年的週期，共有 105 筆(26 天)的觀測資料。

二、本次研究使用的觀測資料都集中於彗日距在 2AU 以內、19P/Borrelly 星等介於 14~19 等之間，推測是受彗髮影響亮度的資料較多，因此在進行某一些條件篩選時，可能會將含彗髮的觀測資料包含進去，所以造成初步結果的外形含有大面積的三角錐凸面。(如 Fig 3)究竟觀測資料的特性是否影響外形計算的精確度？接下來我們將進行亮度或距離的篩選，避免太多因素影響彗星外形。



▲Fig 3 彗星外形含有三角平面顯示圖

三、在產生外形模型(shape models)的過程中，自轉軸的指向是決定外形的一大要素。當改變自轉軸的指向時，勢必也決定了彗星是用哪些面反射太陽光。彗星外形會因觀測資料的密集度與自轉軸的指向，產生不同程度的差異。在 Fig 4 中，其中 Fig 4A 顯示依原 λ 、 β ($\lambda = 225.47^\circ$ 、 $\beta = 6.76^\circ$)繪製的對照組；Fig 4B 是 λ 轉 90 度的結果，而 Fig 4C 是 β 轉 90 度的結果。Fig 4B 與對照組(Fig 4A)的相似程度較高，Fig 4C 與對照組(Fig 4A)的相似程度相對較低。接下來本研究將分別針對 λ 轉 90 度和對照組、 β 轉 90 度和對照組進行討論。



▲Fig 4 自轉軸（改變 λ 、 β ）影響彗星外形比較圖，三個軸各取

四、觀測資料的亮度&距離&公轉週期對 model 的影響？本研究依上述研究步驟的篩選條件，所繪出的彗星外形如下：

(一) 依亮度篩選：

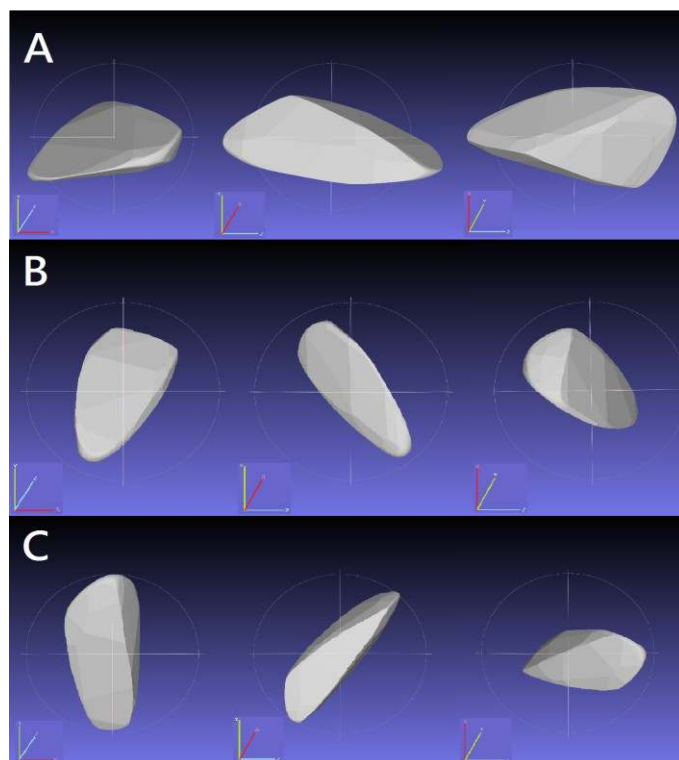
1. 以星等 16 等~18 等繪製的模型，如 Fig 5A，Y 軸方向明顯有三角凸起，推測可能是彗髮影響較為劇烈的面。
2. 以星等 17 等繪製的模型，如 Fig 5B，Y 軸上的三角凸起稍微減少，形狀漸趨狹長。
3. 以星等 18 等繪製的模型，如 Fig 5C，Y 軸上無明顯三角凸起，外觀狹長，接近原始影像。

(二) 依距離篩選：以彗日距 3AU 以上繪製的模型，如 Fig 6，長軸不明顯，外形呈現稻米外形。

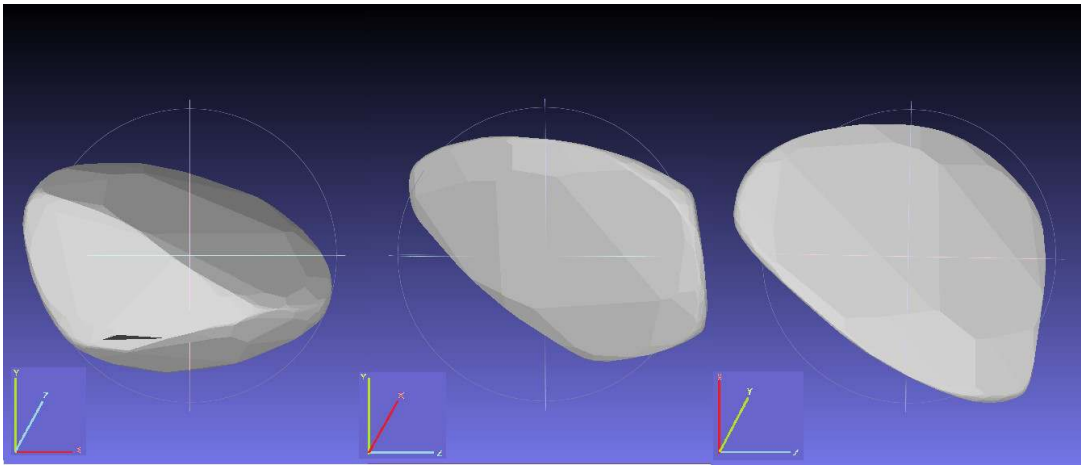
(三) 依亮度&距離篩選：以亮度 18 等以上(含 18 等)、彗日距 2.9AU(含 2.9AU)繪製模型，如 Fig 7，外形的長軸非常明顯。

(四) 最後，依彗星亮度、距離及公轉週期篩選：依亮度 18 等以上(含 18 等)、彗日距 3AU 以上(含 3AU)、公轉週期有完整資料(2009 年) 繪製模型如 Fig 8，外觀較為扁平，三角平面幾乎不存在。

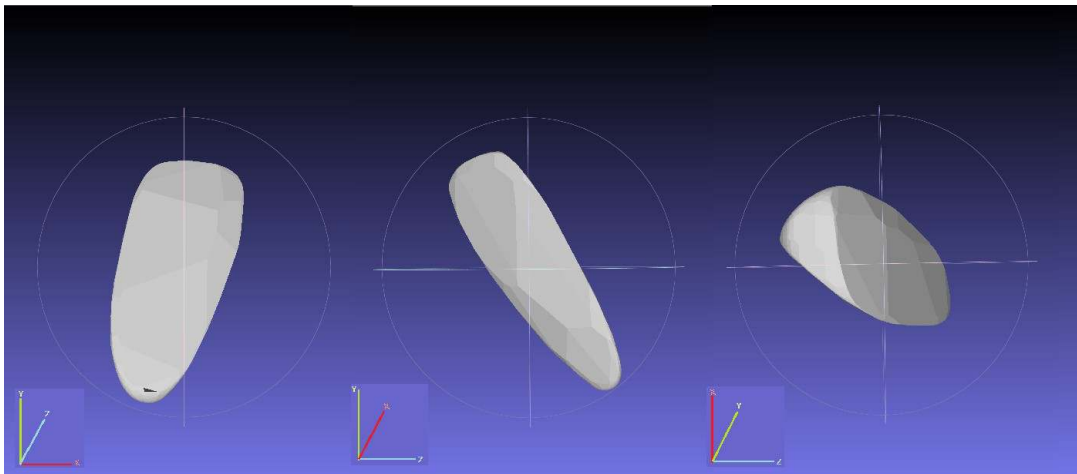
由於亮度真實反映了彗髮噴發的過程，當彗星開始靠近近日點，亮度逐漸開始增加，因此以亮度為篩選條件的方法雖然能直接去除彗髮對於彗星影響的資料，但是未能考慮到彗日距離與彗地距離的相互影響所造成的亮度誤差，以及每一次公轉週期內的彗星軌道變動，因此最好的條件應為亮度&距離&公轉週期同時作為篩選條件，若是如此進行，可以發現彗星的外形更接近真實。



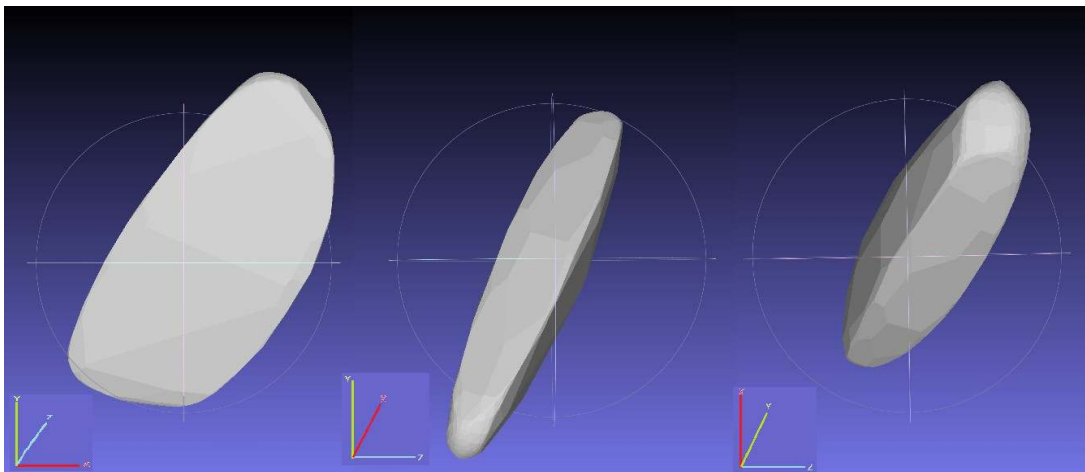
▲Fig 5 19P/Borrelly 的三種亮度條件下，外形結果比較圖



▲Fig 6 篩選條件：彗日距 3AU 以上的彗星外形（左中右三圖分別是不同的軸出紙面）



▲Fig 7 篩選條件：亮度 18 等以上，彗日距 2.9AU 以上的條件計算出之彗星外形。



▲Fig 8 篩選條件：彗星星等₁₈ 等以上、彗日距 3AU 以上、公轉週期為 2009 年的條件計算出之彗星外形，在 Fig 2~Fig 7 的圖中皆無比例尺，僅顯示相對的大小。

陸、討論

一、彗星觀測資料特性分析：

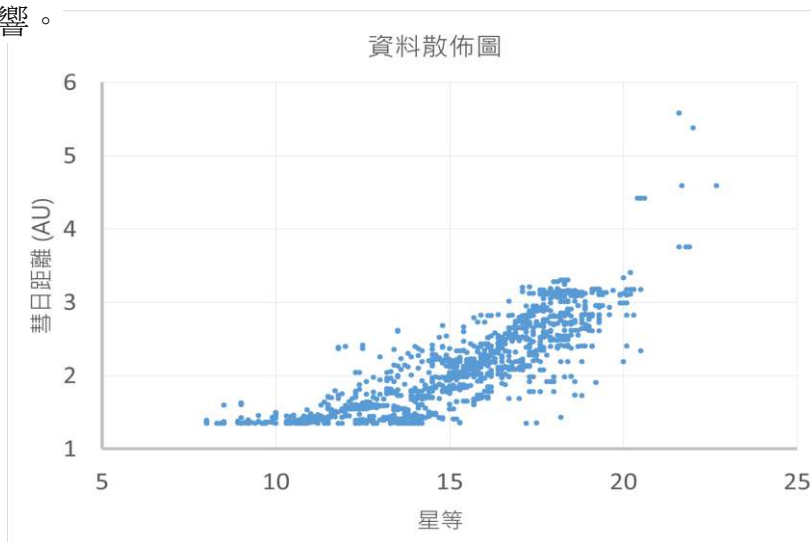
(一)由於亮度的限制，19P/Borrelly 的觀測資料在遠日點附近十分稀少。

(二)相較之下，1504 筆資料有 91%是集中在 3AU 以內(見 Fig 9、Fig 10)。

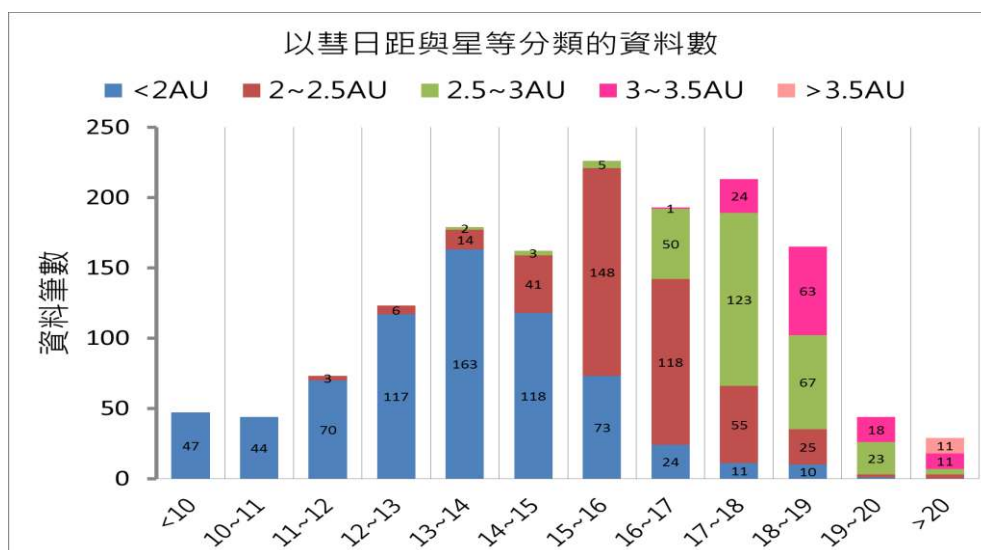
(三)為了看出資料在觀測時間上的密集性，用星等與公轉週期統計分類(見 Fig 11)，
從 2008 年 7 月的近日點，到 2011 年 12 月的遠日點的資料數佔了全體的 53%。

(四)尤其是從 2008 年 7 月~2009 年 8 月之間有一連串密集的觀測活動，在這一年的時間裡，共有 714 筆資料，其彗日距離是落於 1.34 AU 到 3.30AU 之間，則亮度大多分布在 14 等到 19 等之間、平均數為 16.65 等。

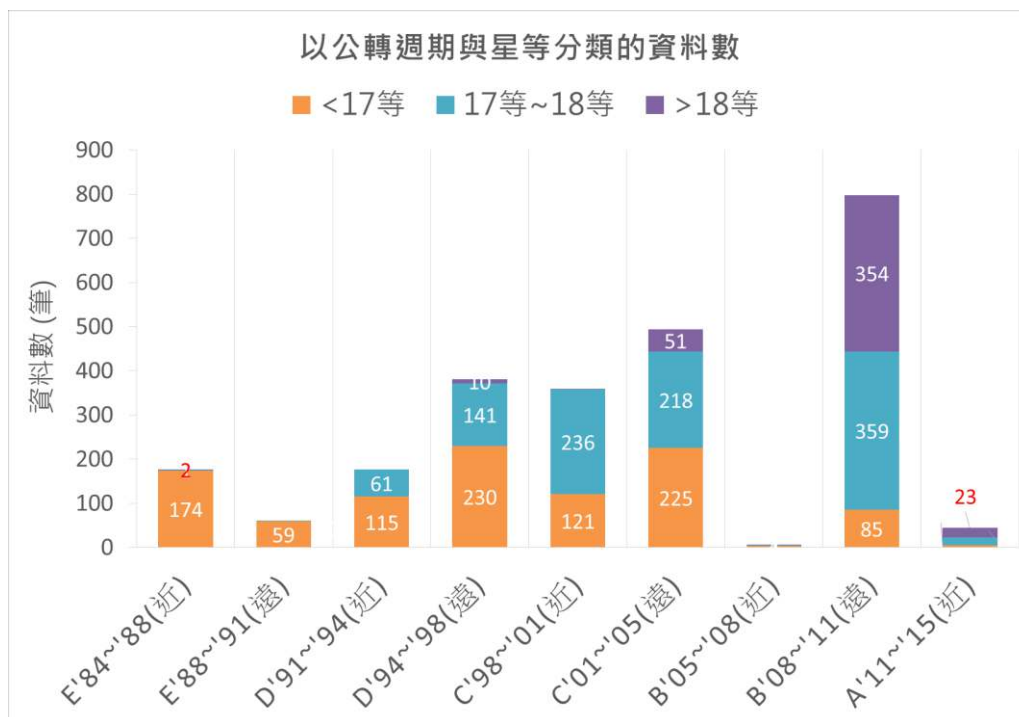
接下去我們會再討論這一連串密集的觀測，對我們繪出的彗星外形 (shape models) 有何影響。



▲Fig 9 彗星 19P 觀測資料散佈圖



▲Fig 10 以彗日距與星等分類的觀測資料筆數統計圖



▲Fig 11 以公轉週期與星等分類的觀測資料筆數統計圖

二、如何篩選合適的彗星觀測資料，進行 DAMIT 計算：

彗星觀測資料的篩選在本研究中占有高度的影響力，我們將資料分別以星等與距離兩個部分進行篩選。根據羅賽塔(Rosetta)搭載的探測器菲萊號(Philae)於去年(2014年11月12日)登陸 67P/C-G 時的實際距離與亮度作為參考，當時 67P 和太陽的距離大約為 3AU，以此亮度與距離為依據，對 19P 的完整觀測資料進行初步劃分：

- (一) NASA 於 1998 年發射深空一號(Deep Space 1)以進行探測小行星與彗星的太空計畫。深空一號於 2001 年 9 月執行飛越 19P/Borrelly 的計畫並拍攝了 19P/Borrelly 的近身照(如 Fig 12)，為計算 19P/Borrelly 自轉軸方向等特性提供良好的參考資料來源。

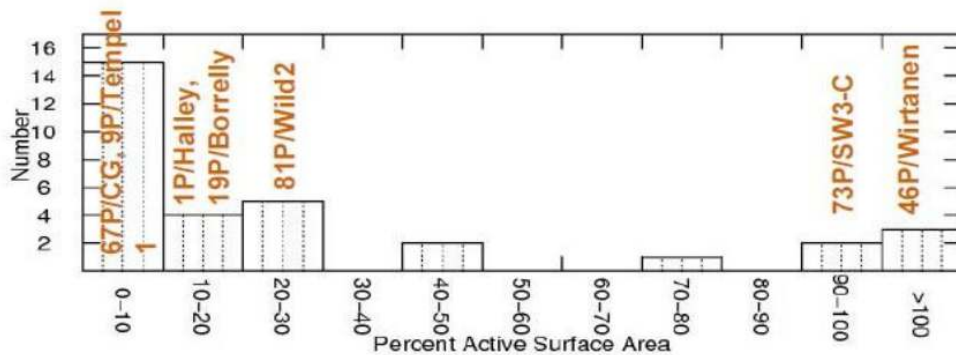


▲Fig 12 深空一號拍攝之 19P/Borrelly (copyright NASA)

由表一與 Fig 13 可知，19P/Borrelly 與 67P/C-G 同屬週期短於 20 年且低傾角的木族彗星，顯示它們有相似的特性，使 67P/C-G 成為這次研究目標 19P/Borrelly 彗星外形的重要參考依據。

表一： 19P/Borrelly 與 67P/ C-G 之各項特性比較

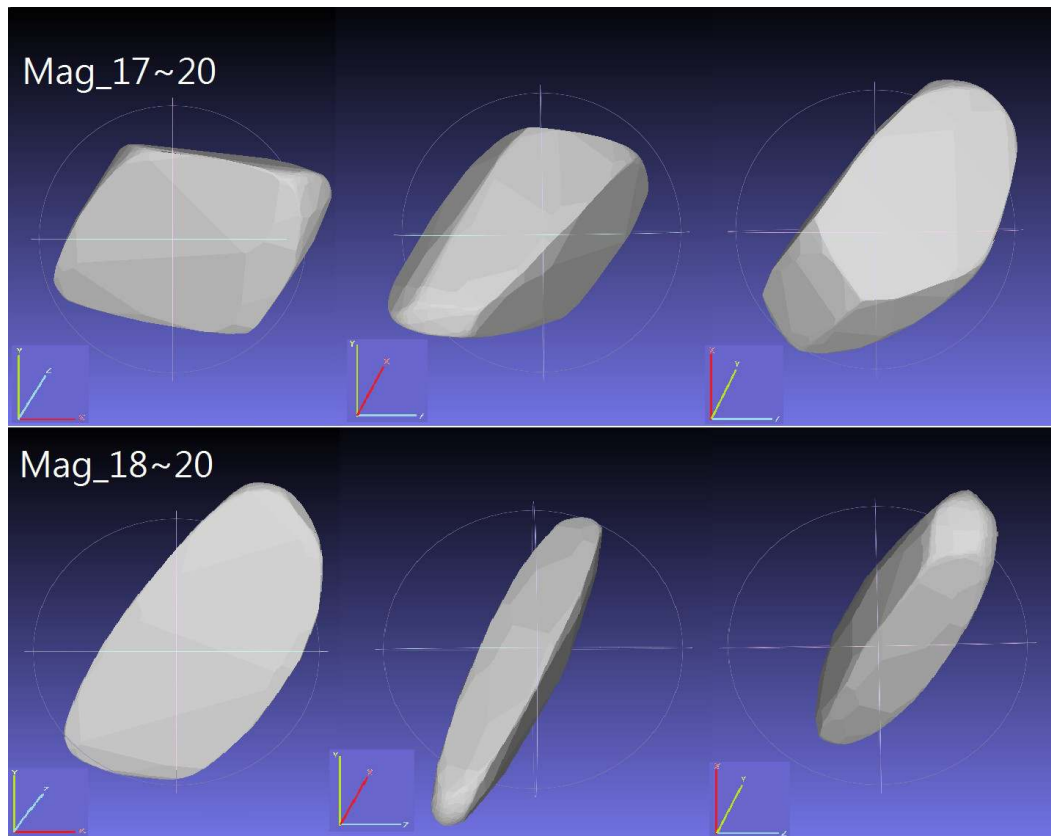
	19P/Borrelly	67P/ C-G
公轉週期(年)	6.84	6.55
近日點距離(AU)	1.349	1.243
遠日點距離(AU)	5.856	5.68
距日 3AU 時亮度	17、18 等	18、19 等
彗核大小(km ³)	8x4x4	小:2.5x2.5x2.0 大:4.1x3.2x1.3



▲Fig 13 彗星表面活躍度分類表（19P/Borrelly 與 67P/ C-G 同屬表面活動面積在 20% 以下的類型。）

(二) 根據表一及 Fig 12 的資料作為推論依據，本研究採二種主要的亮度劃分：

1. 將 19P/Borrelly 的資料先以彗地距 3AU 作為第一次劃分，發現由於彗星的軌道較小行星具有高度的變動性，因此每一次在距太陽 3AU 時並不一定會全部都沒有受到彗髮的影響（如 Fig 6）。
2. 本研究也想了解彗髮對於亮度影響的條件：由上一討論二、（一）知道表面不活躍的彗星可以將亮度以 3AU 為彗髮是否影響亮度的判定標準，所以本研究取彗星亮度 17 等前後做為討論重點，16~18 等、17 等、18 等將觀測資料劃分，完整的觀測資料如果參雜了 17 等以下的觀測資料，將會對彗星的外形產生極大的差異（如 Fig 14），因此參雜了 17 等的 test_lcs_rel 檔與真實外形有一段差距。



▲Fig 14 不同亮度篩選條件下（17等 V.S 18等），彗星外形比較圖

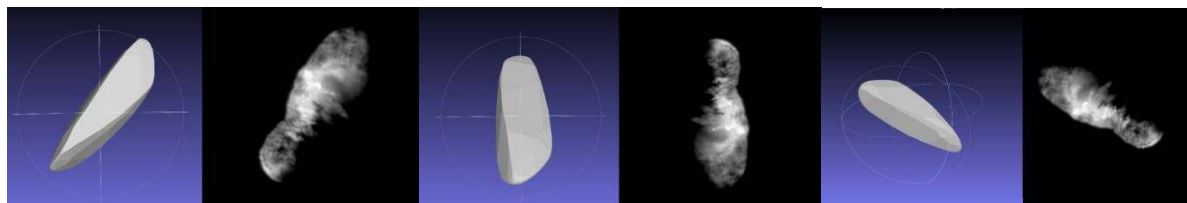
三、彗星表面的物質蒸發／昇華（例如水、氨等等）包覆在彗核周圍，形成一巨大且稀薄的大氣層，稱為彗髮 Coma。當彗星逐漸靠近太陽時，物質噴發愈劇烈，彗髮也較為活躍、明顯；如此一來，彗髮會讓彗星變的更大，星等大幅下降，影響了原有距離應表現出來的星等變化。由於 DAMIT 提供的外形估計方法，原先是使用在不具彗髮構造的小行星。但是，彗星與小行星的主要差異在於彗髮及彗星活動，所以當我們在計算繪彗星外形時，得將彗髮效應除去。

本研究依彗星亮度變化，針對彗星的彗髮做三種區分：

- (一) 受到的彗髮影響：當 19P/Borrelly 星等介於 16~18 等(如 Fig 5A)，此結果顯示某一部分的觀測亮度受到彗星過於靠近太陽而受彗星表面物質噴發的影響，彗星外形呈現了較多三角形的平面，長軸也較不明顯。因此，本研究推測：當彗星外形(Shape Models)有許多類似三角形的平面，即可判定彗星外形受彗髮影響程度仍高。如此一來，彗星的外形在此亮度分佈（介於 16~18 等）會受到的彗髮影響，以至於多於本身反射陽光的亮度。因此，在這個階段的外形與深空一號掠過 19P/Borrelly 所獲得的影像也就相差甚遠。
- (二) 受到部份的彗髮影響：通常，19P/Borrelly 亮度介於 17 等以上(含 17 等) (如 Fig 5B)，也有了星等 16 等~18 等的結果，如上述（一）。為了將彗髮產生的影響排除，所以我們將上述資料進行了更細的劃分：將 19P/Borrelly 星等的分界點切在 17 等，因此 17 等以上(如 Fig 5B)包含的彗髮影響將小於 16~18 等(如 Fig 5A)，長軸變的更加明顯，三角的平面因受到彗髮的影響沒有那麼劇烈，而減少許多。

(三) 幾乎不受彗髮影響：19P/Borrelly 亮度在 18 等以上(不含 18 等)(如 Fig 5C)，此條件下的彗星外形(Shape Models)幾乎完整去除了彗髮的影響，呈現的結果最接近彗星真實的外形。我們將此彗星外形(Shape Models)與深空一號掠過 19P/Borrelly 的影像進行比對(如 Fig 15)，發現在某幾個角度上非常相似。

由於深空一號只是掠過 19P/Borrelly，因此所取得的影像可能只呈現了某一個 19P/Borrelly 的面，因此我們判定「18 等以上(不含 18 等)」的篩選條件下，比較符合 DAMIT 所需要的條件，也就是彗髮就於研究彗星外形(Shape Models)的影響最小。



▲Fig 15 本研究與真實 19P/Borrelly 影像的三軸比較圖

四、在本研究中，彗星亮度的變化主要是彗星自轉軸指向、彗星表面反照率(albedo, 本研究假設彗星與小行星相似，亦為均質表面)、公轉軌道變動(受巨型行星重力的擾動、或非重力擾動)、觀測位置不同。換言之，以上四個因素是分析彗星亮度變化對外形的主要差異所在。

五、在 DAMIT 估算彗星外形(Shape Models)時，都需要給它一個參數檔，裡面包括了自轉軸指向 λ 、 β 、自轉周期 P。本研究試著改變彗星自轉軸指向的條件，用來判定此一參數檔是否與原先的模型(彗星外形, Shape Models)會有相似的結果？

根據深空一號傳送回來的影像圖與日後的觀測，科學家計算出 19P/Borrelly 自轉軸的赤經(RA)= 221°與赤緯(Dec)= -7°，再利用座標轉換成彗星自轉軸指向所須的黃經(λ)=225.47 度與黃緯(β)=6.76 度。

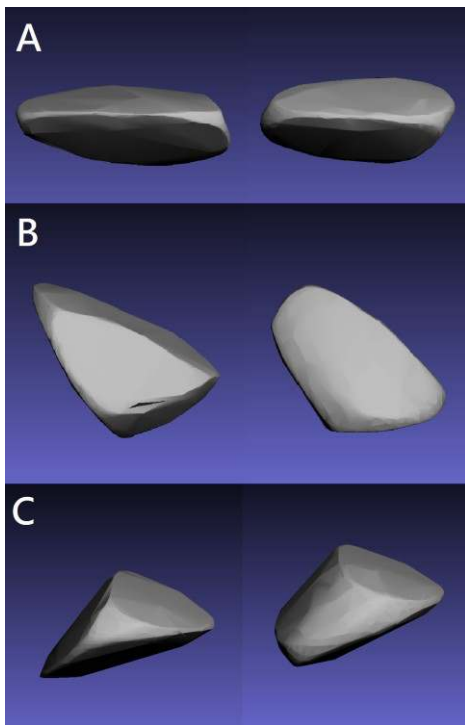
(一)本研究分別對 λ 及 β 做了 90°的調整，依序為黃經減 90 度($\lambda = 135.47^\circ$ 、 $\beta = 6.76^\circ$)，與黃緯減 90 度($\lambda = 225.47^\circ$ 、 $\beta = -83.24^\circ$)，產生出兩組彗星外形(如 Fig 4B、Fig 4C)與結果三，並與彗日距為 3AU 以外的資料產生的原先模型(如 Fig 4A， $\lambda = 225.47^\circ$ 、 $\beta = 6.76^\circ$)比較。

(二)彗星自轉軸的黃經轉 90 度與原先模型的比較：如 Fig16 A 所示，它們有較相似的外形結構，兩者皆有斜長的外形(Fig16 A)。而在其長軸的兩端，分別為一平面(Fig16 B)；而另一端則無明顯平面(Fig16C)，卻是呈現了水滴狀角錐。

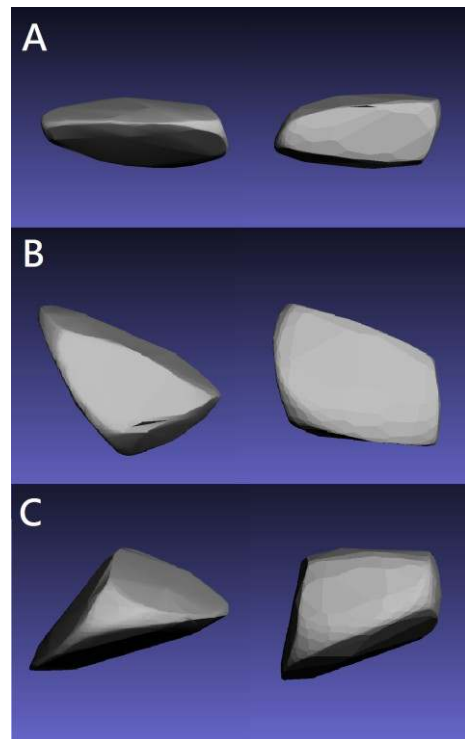
(三)彗星自轉軸的黃緯轉 90 度與原先模型的比較：黃緯轉 90 度有一點明顯不同之處，就是其長軸的兩端，都是由明顯的平面所組成(Fig17 B 與 Fig17 C)，沒有上述的水滴狀角錐，而是呈現長方體。

(四) 之所以存在兩模型差異的原因，推斷是它的軌道位置與自轉軸指向有關。當資料篩在彗日距離為 3AU 之外時，在 2009 年的彗星觀測資料相對密集、提供較完整的光度曲線，此一觀測資料是猜測彗星外形模型的重要依據。而那時觀測資料的彗星位置落在黃經 180°左右。剛好原先模型的自轉軸指向為黃經 225°，與自轉軸指向為黃經 135°有對稱關係，故反射太陽光的彗星表面可以透過自轉，產生與原本的自轉軸指向所建構的反射面較為相似，因而得到接近模型的外形結構。

(五)至於，黃緯轉 90° 的外形模型是呈長方體的原因本研究推論：黃緯的傾斜程度過大，無上述的對稱關係。而反射太陽光的彗星表面有較大程度的改變，導致在 DAMIT 運算上，出現外形結構上較大的差異、變化。從自轉軸轉 90 度的兩組對照模型(Fig16 與 Fig17)可見，自轉軸指向的差異，會導致反射光的面的不同，進而影響外形模型。



▲Fig 16 原始模型 V.S 自轉軸 λ 轉 90 度



▲Fig 17 原始模型 V.S 自轉軸 β 轉 90 度

柒、結論

- 一、自小行星中心網站取得彗星 19P/Borrelly 的觀測資料，由天體光度曲線逆推法成功繪製彗星的外形模型(Shape Models)。
- 二、若將本研究所繪製 19P/Borrelly 的彗星外形與深空一號影像比較，發現彗星外形模型含有大面積的三角形，推測是星等變化受到彗髮的影響。
- 三、本研究利用木族彗星 67P/C-G 與 19P/Borrelly 的特性相似度，以 67P/C-G 為參考，對星等、距離及週期等進行人工篩選，以減少彗髮對彗星外形估算繪製的干擾。
- 四、當 19P/Borrelly 亮度 18 等以上、距離 3AU 以外、完整的同一次公轉週期皆滿足的條件下，最能有效且正確地解出彗星的外形。
- 五、在改變彗星自轉指向研究上，結果顯示自轉軸指向確實會導致反射光面大小的估算而影響彗星的外形模型。

捌、未來展望

- 一、DAMIT 網站上的觀測資料常常是連續性高且資料豐富的，若我們能取得更完整且更密集的觀測資料，所繪出的彗星外形勢必會更貼近真實，因此我們希望未來能用長期的觀測來驗證我們推論的正確性。
- 二、在亮度資料上，會需要在自轉周期裡有連續性佳的亮度資訊，建構完整的星等變化曲線。由於彗星的自轉周期往往超過一個天文台在一天晚上能觀測的範圍。我們所需要的是不同經度的天文台的接力觀測，當一個觀測站快到白天時，另一個觀測站能接下它的棒子，持續的記錄其亮度變化。
- 三、想要更深入了解 DAMIT，就要回歸它所研究的本質～小行星。因此我們希望未來能對幾個小行星做密集觀測，並將數據用 DAMIT 做分析。

玖、參考資料

Durech, J., Sidorin, V., and Kaasalainen, M. , DAMIT: a database of asteroid models, Astronomy and Astrophysics, Volume 513, 2010

H. Weaver, S. Stern, and J. Parker, Hubble Space Telescope STIS Observations Of Comet 19P/Borrelly During The Deep Space 1 Encounter, Astronomical Journal, 126: 444 – 451, 2003

Jorda & Gutierrez, From Rotational Properties Of Cometary Nuclei, Earth, Moon and Planets, 89: 135 – 160, 2002

19P/Borrelly IAU 觀測資料(MPC, Minor Planet Center)

http://www.minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=19P&commit=Show

JPL 19P/Borrelly 軌道(NASA)

<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=19P;old=0;orb=1;cov=0;log=0;cad=0#orb>

DAMIT 網站 (DAMIT: a Database of Asteroid Models from Inversion Techniques)

<http://astro.tro.ja.mff.cuni.cz/projects/asteroids3D/web.php>

座標轉換網站 (天球座標轉成日心及地心座標)

http://lambda.gsfc.nasa.gov/toolbox/tb_coordconv.cfm

Solar System Calculator

http://cosinekitty.com/solar_system.html

彗星 67P C-G 參考資料 <http://sci.esa.int/rosetta/14615-comet-67/>

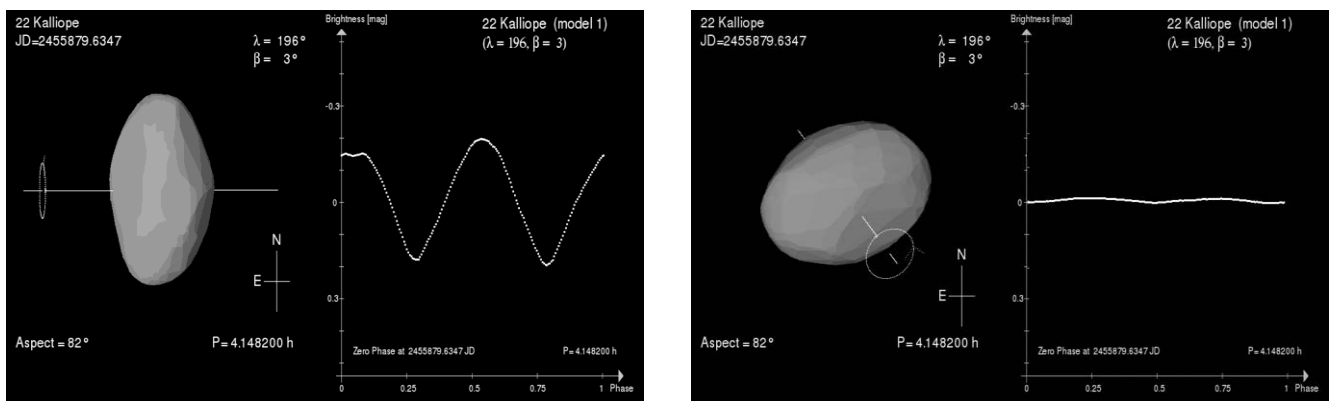
小行星互動模型(Interactive service for asteroid models) , <http://isam.astro.amu.edu.pl/>

拾、附錄

(一)附錄一

什麼是光度曲線逆推法？（Method of Lightcurve Inversion）

- 1.以自轉週期為橫軸(單位：小時)，將自轉軸指向指向 Z 軸方向，測量光度的變化，所測得的光度為縱軸，以光度對應時間繪製成光度曲線，通常是有兩個上下起伏的波動。
- 2.觀察繪製出的光度曲線，判斷振幅的高低落差，可初步判定外形的反光面的大小變化。當光度曲線振幅較大，即是反光面差異明顯，具有較大的外形改變；若光度曲線振幅較小，反光面積大小變化不多，形狀變化就會比較小。再者，藉由光度曲線波形(兩個波峰的波形差不多)，亦可看出星體外形有無對稱關係。



▲Fig 18 小行星 22 司賦星 (Kalliope)的光度曲線 (自轉軸具不同的空間角度)，
資料來源：<http://isam.astro.amu.edu.pl/>

(二)附錄二：DAMIT 的程式演算法

本研究採用之 DAMIT (Database of Asteroid Models from Inversion Techniques) 的軟體，其分析流程 (或云程式演算法) 如下：

1. 由光度曲線逆推法做基礎，將觀測的亮度資料進行轉換，先將自轉週期與自轉軸指向進行修正，將每一天的亮度資訊修正為一個光度曲線，得到多條光度曲線後，進行擬合 fitting，獲得最合理的光度曲線。
2. 原始檔(input_convexinv)中，包含了時間、位置、亮度、自轉軸位置等資訊，而 DAMIT 本身有多條亮度參考基準線，根據匯入的亮度曲線資訊，進行光度變化曲線的比較及調整。
3. 將獲得的合理的光度曲線的亮度變化值，代入已設定的小行星模型，找出變異值最小的外型模型。再將此小行星模型為依據，將上述的亮度曲線重新逐一修正，最後即可得到合理的亮度值所轉換出來的 x,y,z 座標 (3D 模型的各頂點的平面)，進行存檔，以利下一步的小行星外形繪製。

資料來源：Durech, J., Sidorin, V., and Kaasalainen, M., DAMIT: a database of asteroid models, Astronomy and Astrophysics, Volume 513, 2010

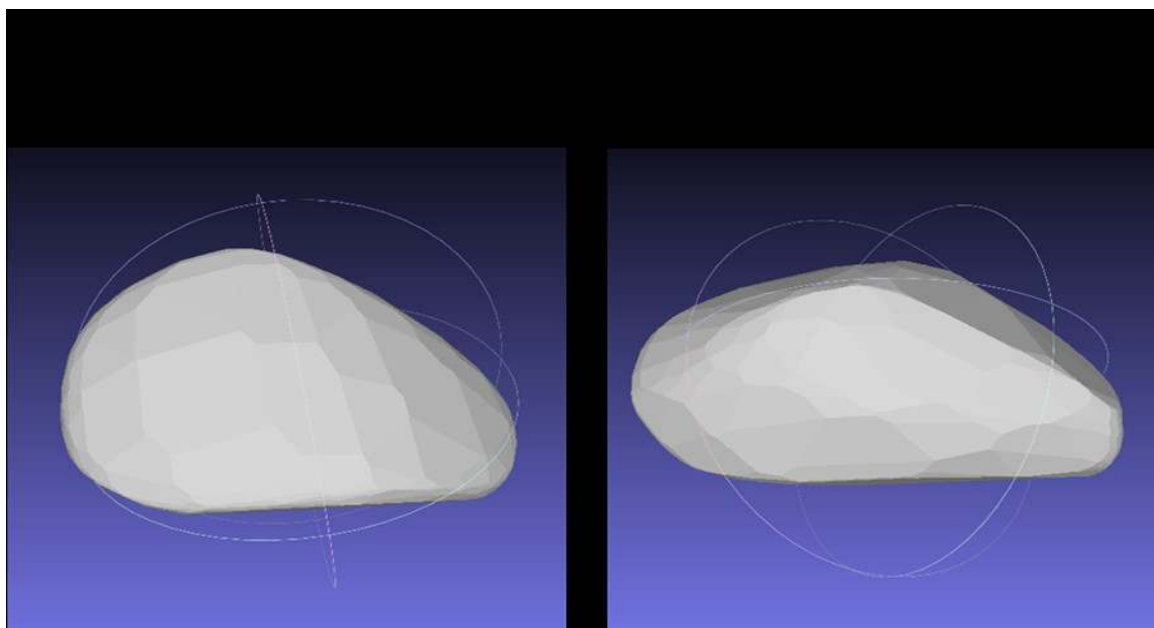
(三)附錄三

Test_lcs_rel 的檔案內容與格式 (原為純文字檔格式)

22					
5	0				
2454952.42894	5.248075E-06	-2.620592E+00	-3.328786E-01	1.436636E+00	-1.853079E+00
2454952.43181	5.248075E-06	-2.620608E+00	-3.329046E-01	1.436641E+00	-1.853125E+00
2454952.43323	4.365158E-06	-2.620615E+00	-3.329175E-01	1.436643E+00	-1.853148E+00
2454952.43825	4.786301E-06	-2.620643E+00	-3.329631E-01	1.436652E+00	-1.853230E+00
2454952.52668	2.754229E-06	-2.621121E+00	-3.337655E-01	1.436805E+00	-1.854671E+00
1	0				
2454953.48630	3.630781E-06	-2.626303E+00	-3.424719E-01	1.438455E+00	-1.870401E+00
1	0				
2454954.34281	4.365158E-06	-2.630906E+00	-3.502399E-01	1.439916E+00	-1.884589E+00
2	0				
2454962.37389	5.248075E-06	-2.673064E+00	-4.229360E-01	1.453071E+00	-2.024021E+00
2454962.39247	5.754399E-06	-2.673160E+00	-4.231038E-01	1.453100E+00	-2.024356E+00
5	0				
2454963.38022	4.786301E-06	-2.678222E+00	-4.320262E-01	1.454650E+00	-2.042254E+00
2454963.40795	3.630781E-06	-2.678363E+00	-4.322766E-01	1.454694E+00	-2.042759E+00
2454963.41742	6.309573E-06	-2.678412E+00	-4.323621E-01	1.454709E+00	-2.042932E+00
2454963.42189	5.248075E-06	-2.678435E+00	-4.324025E-01	1.454716E+00	-2.043013E+00
2454963.42633	5.754399E-06	-2.678457E+00	-4.324426E-01	1.454723E+00	-2.043094E+00
5	0				
2454965.03860	5.248075E-06	-2.686661E+00	-4.469967E-01	1.457222E+00	-2.072645E+00
2454965.04697	6.309573E-06	-2.686703E+00	-4.470722E-01	1.457234E+00	-2.072799E+00
2454965.73831	3.019952E-06	-2.690199E+00	-4.533094E-01	1.458294E+00	-2.085591E+00
2454965.74281	3.981072E-06	-2.690222E+00	-4.533500E-01	1.458301E+00	-2.085675E+00
2454965.74712	3.311311E-06	-2.690243E+00	-4.533889E-01	1.458308E+00	-2.085754E+00
1	0				
2454966.70404	1.096478E-06	-2.695061E+00	-4.620185E-01	1.459763E+00	-2.103577E+00
3	0				
2454967.70660	1.096478E-06	-2.700082E+00	-4.710552E-01	1.461274E+00	-2.122390E+00
2454967.83363	1.905461E-06	-2.700716E+00	-4.721999E-01	1.461464E+00	-2.124783E+00
2454967.83789	1.737801E-06	-2.700737E+00	-4.722383E-01	1.461470E+00	-2.124864E+00

註：完整資料有 8 欄(分別為 JD、Mo、xyz、XYZ)104 列，因版面有限，只列舉前 6 欄 32 列。

(四)附錄四：本研究對小行星 243 Ida 的分析



左圖：本研究自行下載程式及觀測資料（來源 **IAU MPC Report**）自力分析的小行星影像。
右圖：直接下載的小行星影像料（來源 **DAMIT 網站**）
（自轉軸指向皆採用自 **DAMIT 網站**的數值）

【評語】 040501

從分析小行星光度曲線之方法，應用在彗星，主題具學術價值，對原理有深入瞭解，亦具創意。

建議應用於更暗亮度，以獲得彗星核之形狀，能排除彗髮影響。