

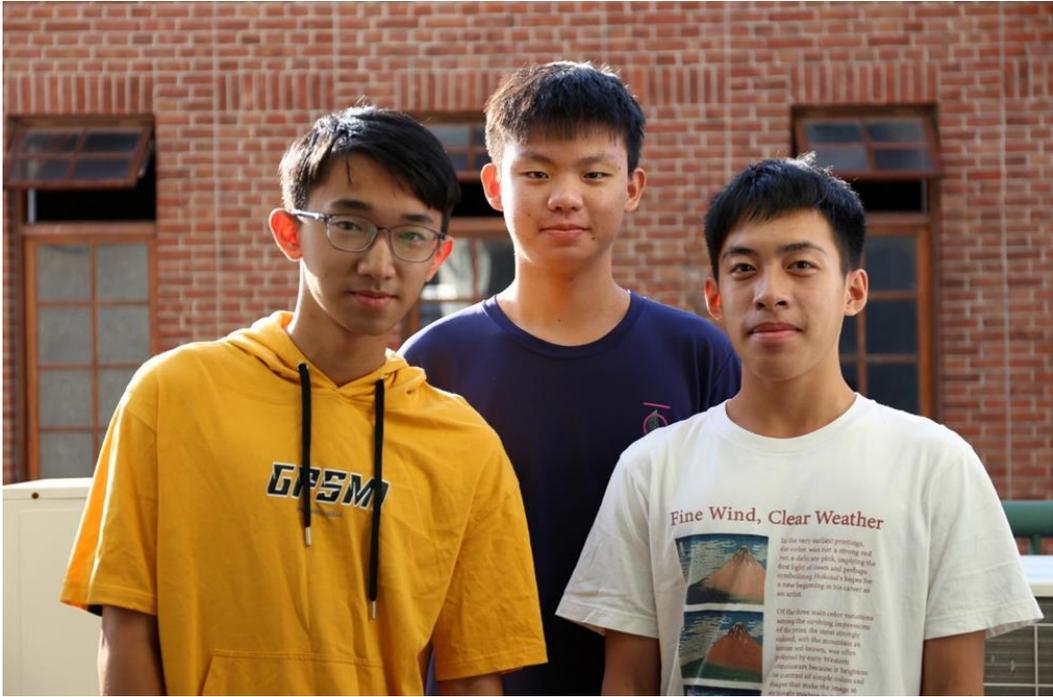
# 2023 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160016  
參展科別 物理與天文學  
作品名稱 搖頭擺尾 離子尾波形週期變化分析與原因探討  
得獎獎項 四等獎

就讀學校 國立新竹高級中學  
指導教師 黃晟庭、鄭妙靜  
作者姓名 王政諺、張哲與、劉裕勝

關鍵詞 離子尾、太陽風、波函數擬合

## 作者簡介



我們是來自國立新竹高級中學高二數資班的王政諺、張哲與和劉裕勝。一開始原本要選擇化學組或生物組，但誤打誤撞地進入了地科組。起步時覺得天文爆炸難，雖然現在還是覺得天文很難。但幸好一路上有老師們的鼓勵和鞭策，讓我們能夠勇敢的持續往前，也逐漸發現天文的美妙與樂趣。感謝一路上陪伴我們成長的大家，還有彼此相伴的夥伴們。

## 摘要

彗星離子尾受太陽風吹拂後，使其帶電粒子受力而改變噴發後的離子尾軌跡。C/2021 A1 Leonard 的影像就可明顯看出它具有波狀的離子尾。我們透過影像軟體擷取彗尾影像的座標並將其代入分析軟體。依序分析 2021 年 12 月 21 日、12 月 31 日與 2022 年 01 月 02 日的彗尾結構，利用不同的波函數擬合彗尾形狀並扣除擬合線，嘗試找出不同的彗尾結構是否具有相同週期或非週期的特徵。同一天內的不同離子尾去除穩定與漸進變化的週期後，發現具有相似形狀的變化區，應該為共同影響的非週期性因素，這個影響因素可能為太陽風的各種物理量(如：風速、磁場強度、質子密度等)。接著利用星圖軟體和數學幾何軟體推算出彗尾與其波結構的實際長度，並與太陽風資料互相比對。將三天的太陽風磁場南北分量( $B_z$ )與各自的最後分析圖進行對照，發現兩者有高度相關性，推論太陽風磁場南北分量( $B_z$ )的非週期變動是影響彗星離子尾不規則變化起伏的主因。

## Abstract

In the C/2021 A1 Leonard image, a wavy plasma tail can be clearly seen because of the solar wind's influence. Trying to find out whether different tail structures have the same periodic or aperiodic features and which events affected them, we fit the structures of the comet tails on December 21, December 31, 2021, and January 2, 2022, with different wave functions. After removing the stable and gradual periodic changes in the comet tail structures on the same day, the wave with similar curve is an aperiodic factor with common influence. We speculate that this factor is the physical quantity in the solar wind. Using the actual length of the comet's tails which were calculated and their wave structures to compare with the solar wind data, we found out that the north-south components( $B_z$ ) of the solar wind magnetic field for three days are highly correlated to the respective final analysis charts. Therefore, we inferred that the aperiodic variation of the north-south components( $B_z$ ) of the solar wind magnetic field is the main factor affecting the irregular fluctuations of the comet plasma tail.

## 壹、前言

### 一、研究動機

彗星 C/2021 A1 Leonard 於 2021 年被觀察到，它有著異常美麗且顯著的離子尾，我們發現其彗尾有波狀的起伏，好奇是什麼原因造成彗尾出現波動變化？和太陽風及彗核旋轉有關嗎？或是有其他原因呢？於是從分析他人拍攝的影像開始並探討形成原因。

C/2021 A1 Leonard 在 2021 年 1 月 3 日由亞利桑那大學研究專員 G. J. Leonard 透過萊蒙山天文台望遠鏡發現，它是一顆長週期彗星，當時距離太陽約 5 AU，於 2021 年底抵達近日點並可用肉眼直接觀測(IAU Minor Planet Center, 2021)。我們尋找彗星在近日點附近這段時間的影像紀錄來分析，發現此時的彗尾波動性最顯著。彗尾的波動性推測可能與三現象有關：彗核旋轉、太陽風磁場與克爾文－亥姆霍茲不穩定性。

由 The complex spin state of 103P/Hartley 2: Kinematics and orientation in space 和 Michael J.S.Belton, et al., 2013 中得知彗核會旋轉甚至有轉速改變的狀態，在旋轉與噴發的狀態下彗尾理應會有波狀的週期變化。我們以 Excel 做出可調整不同平面的夾角和旋轉軸夾角的模型，模擬說明彗尾如何噴發，在彗核旋轉、太陽風的影響下的週期性變化。在最初步階段用簡單的週期函數擬合以找出不具週期的變化量，如太陽風磁場的影響。雖無 C/2021 A1 Leonard 彗星被觀測時的磁場資料，但假設慢速太陽風為平均且穩定地旋轉送出，並假設 ACE 探測器 (Advanced Composition Explorer) 會與彗星處資料除了時間差外，會收到與太陽風相似的數據，我們將資料庫中太陽風的各項數據進行相關性分析，並和非週期性波形比對，尋找太陽風和 C/2021 A1 Leonard 彗尾波動的關聯性。

柯侯德彗星(Comet Kohoutek)彗尾的研究提出噴出不同速度的太陽風後會產生克爾文－亥姆霍茲不穩定性，這現象也影響該彗尾的波動形狀(A. I. Ershkovich, 1976)。但此波動性類似漸進變化的週期波動，所以也會於前述彗核旋轉的波動機制中消除。

本研究第一階段將先從固定週期波函數去除找尋磁場影響，再證實磁場影響極為顯著再採取第二階段試圖將磁場影響先去除，找尋波動的原因並以模型解釋。

### 二、研究目的

藉由分析取得授權之 C/2021 A1 Leonard 影像，以簡單的週期函數解析影響離子尾波動形狀的週期性因素。比對 ACE 探測器資料庫中的太陽風物理參數，尋找非週期性變化的原因。

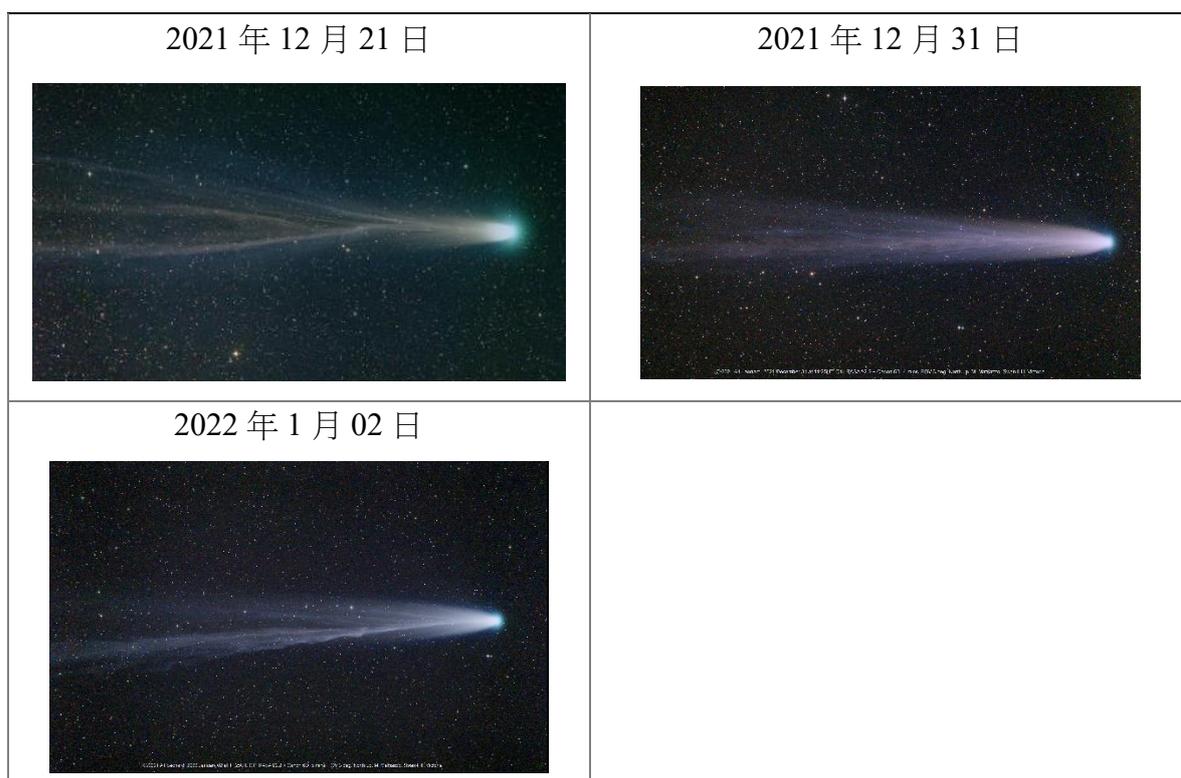
## 貳、研究方法與進行步驟

### 一、研究材料

#### (一) 彗星 C/2021 A1 Leonard 影像

查看網路上 2021 年 12 月至 2022 年 1 月的彗星 C/2021 A1 Leonard 影像，選擇了三張影像並取得作者授權，詳細資訊如表一的影像與資訊，在經過影像的資料處理後，我們取得彗尾影像形狀的數值座標，以做波動週期分析。

表一 本研究採用的授權影像與資訊



以上影像皆為 Michael Mattiazzo 於澳洲維多利亞拍攝

#### (二) ACE 探測器的數據資料(Advanced Composition Explorer)

ACE 是觀測太陽風的人造衛星，位於 L1 拉格朗日點，距地球約一百五十萬公里，而地球磁層頂在面太陽方向，距地球約 15 倍之地球半徑，可知觀測器位於地球磁層外不受地球磁場影響，因此觀測資料可顯示該處太陽風的性質。

本研究利用資料庫中時間解析度一分鐘的資料，資料包括太陽風速度、質子密度、太陽風溫度，及該處磁場各分量，進行太陽風影響彗星離子尾波動因素探討。(ACE readme, 2001)

### 二、研究器材與軟體

我們利用影像分析軟體 ImageJ 對彗尾影像定出座標位置、數據分析軟體 Excel 與程式

語言 python 進行數據分析及曲線的擬合，及星圖軟體 Stellarium 取得彗星、地球與太陽的相對位置與距離，並將影像拍攝的視角帶入 GeoGebra 軟體中進行計算，並將影像中像素換算成彗尾實際大小。

### 三、名詞定義說明

#### (一) 太陽風速度

太陽表面不同位置吹出來的太陽風速度不相同，依太陽風的速度不同可分為高速太陽風(600~1000 km/s)及低速太陽風(300~400 km/s)。ACE 探測器資料庫中的數據經計算後得平均太陽風風速為  $472.9 \pm 109.4$  km/s 為低速太陽風。而低速太陽風狀態穩定較少變化，因此假設太陽自轉時所放出的太陽風為均勻旋轉，則到達彗星與 ACE 的太陽風參數相近而僅有時間差。

#### (二) 行星際磁場(Interplanetary Magnetic Field, IMF)

太陽不斷在行星際空間中吹送太陽風，當太陽風離開太陽表面時，同時也會將表面的磁場帶入行星際空間中，成為行星際磁場。太陽風徑向速度加上太陽本身自轉轉速，使行星際磁場會呈現螺旋狀結構，而在一般太陽風條件下，行星際磁場在地球軌道附近與徑向方向之夾角，大約是 45 度。(畢可為，2016)

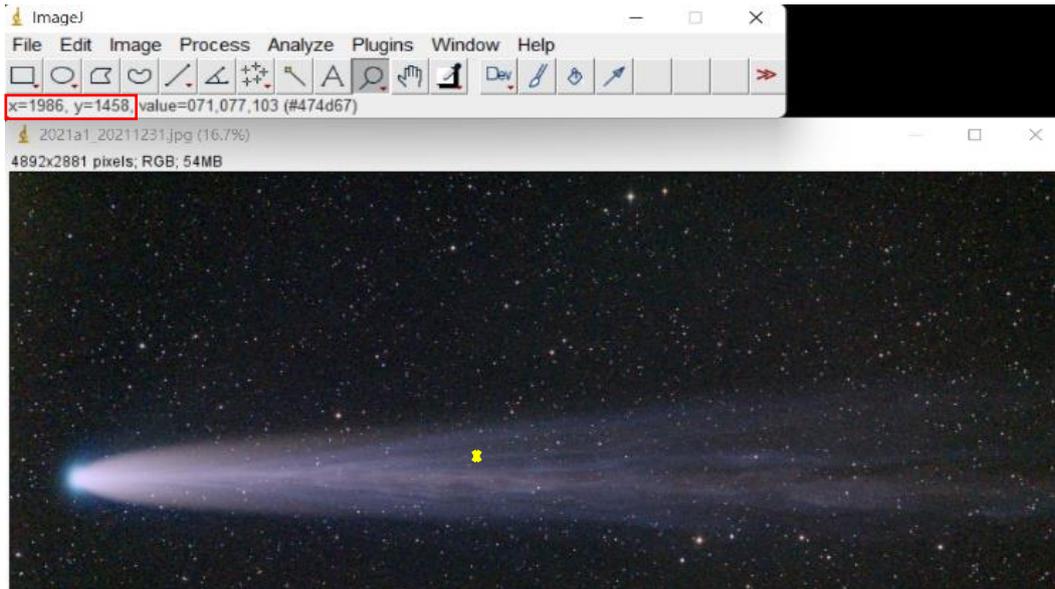
在 GSM 座標系統(Geocentric Solar Magnetospheric Coordinates)中，定義地球為原點，X 軸正向為地球指向太陽，日地連線和地球磁軸兩向量可定出一平面，Z 軸在平面上且垂直於 X 軸，以北方為正向，南方為負向。Y 軸則以右手定則定義出。

### 四、研究方法

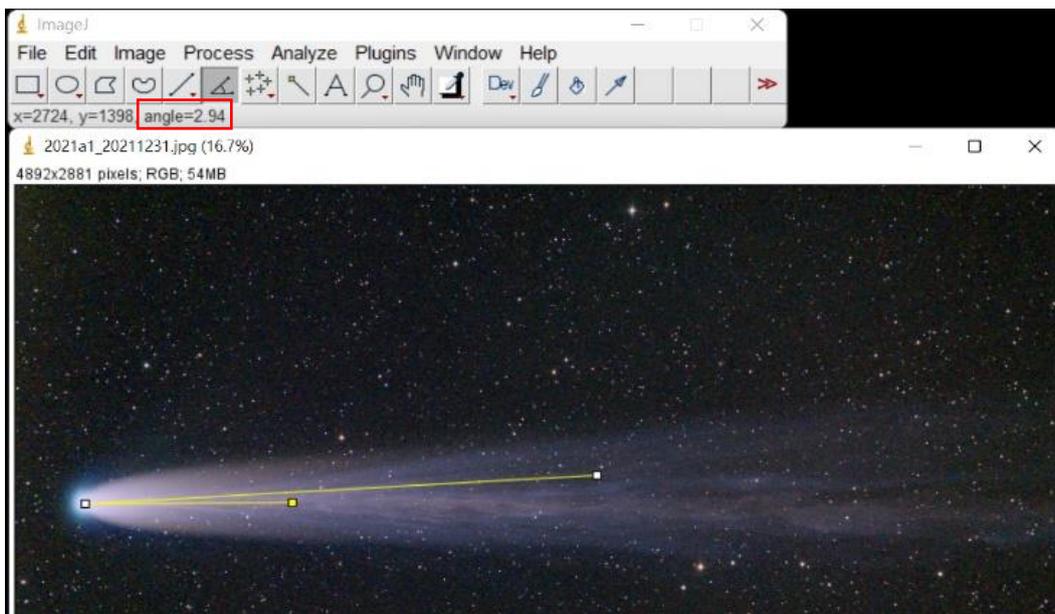
本研究以 ImageJ 軟體開啟彗星影像，紀錄離子尾軌跡影像座標再進行數據分析、Excel 軟體進行數據分析及曲線的擬合，及 Python 程式對太陽風磁場數據以內插法相減扣除影響。分析過程分為兩階段，階段一先移除週期性影響，探討非週期性影響，假設旋轉與克爾文-亥姆霍茲不穩定性可由週期函數擬合離子尾尾軌跡，在扣除影響後取得非週期影響的曲線並找尋主因；階段二則藉由第一階段得知太陽風磁場影響具有高度相關性，先以我們建構的太陽風磁場模型去除影響，嘗試找尋出具有週期性的影響。以下以 2021 年 12 月 31 日的影像作範例進行步驟說明：

#### (一) 影像取樣與命名

利用軟體 ImageJ 對影像進行取樣分析。鎖定彗尾中的其中一條沿著軌跡移動游標，此軟體會顯示其在圖中對應的 x-y 座標並列表紀錄(圖一)。為統整資料，以通過核心之中心線做為始邊，彗尾和中心線所夾的角度為彗尾名(圖二)，彗尾和中心線所夾的角度為 +2.94 度，將彗尾命名為「+2.94」。



圖一 ImageJ 操作介面，紅框代表該游標與對應的 x 座標及 y 座標。(研究者自製)

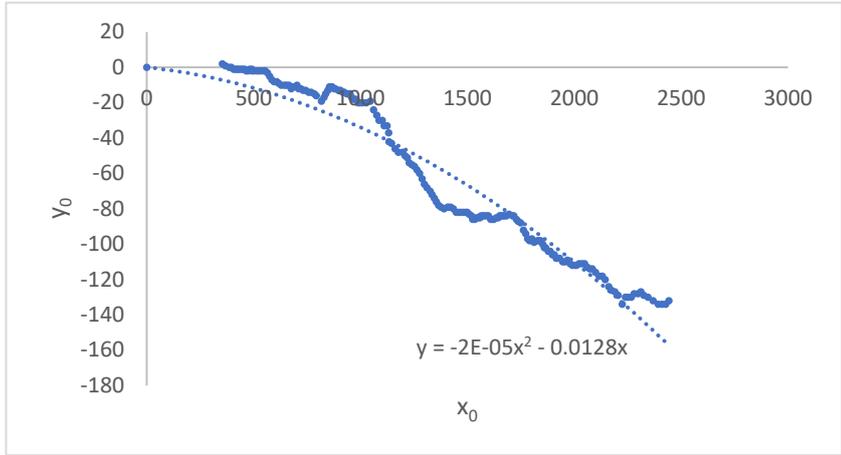


圖二 ImageJ 操作介面，紅框代表彗尾和中心線（兩黃線）間夾角為+2.94 度。(研究者自製)

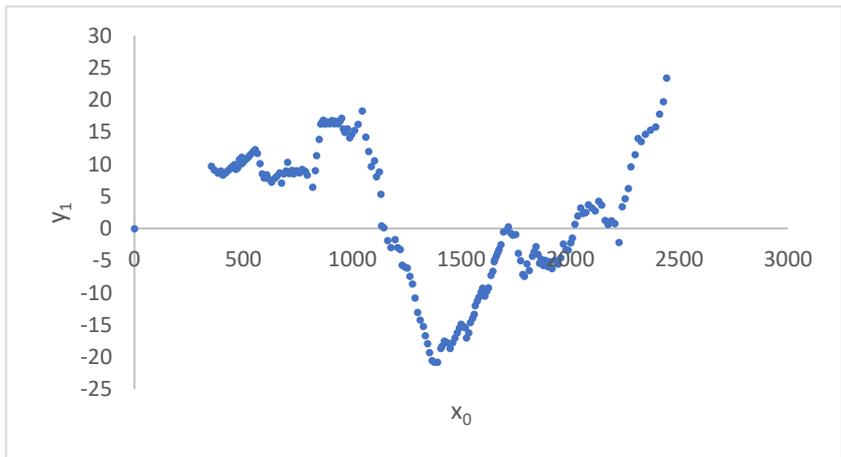
## (二) 週期性變化的曲線擬合

為找出彗尾受哪些不同尺度狀態影響，採用以下步驟擬合分析：

- 1、由於彗尾自彗核噴發，尾跡波動趨勢也同樣地從彗核產生，擬合線也必定通過原點。將原始資料數列(x, y)減去彗核座標後稱為原點校準座標( $x_0, y_0$ )。
- 2、以步驟 1 的方法將尾跡原點校準座標( $x_0, y_0$ )以 XY 散佈圖繪製（圖三），並利用 Excel 軟體的功能做出通過原點趨勢線 L1，再以( $x_0, y_0$ )減去趨勢線 L1 方程式函數值使其成為以 x 為中心軸之波動圖形（圖四），其座標經變換後為( $x_0, y_1$ )。



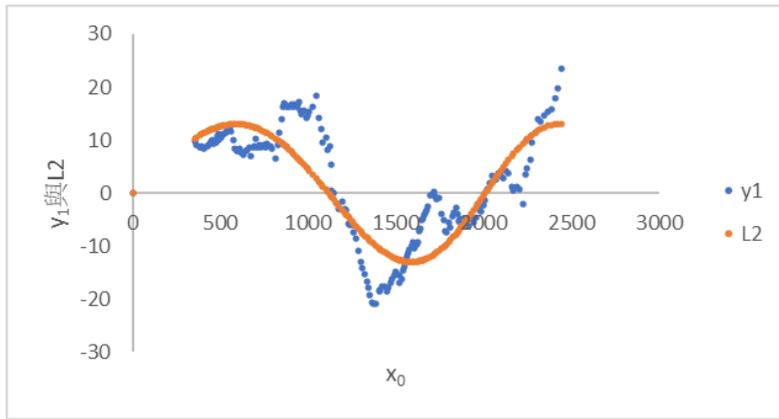
圖三 12月31日距離彗尾中心線+2.94度的彗尾趨勢線（研究者自製）



圖四 12月31日距離彗尾中心線+2.94度的彗尾與趨勢線 L1 差距值(x<sub>0</sub>, y<sub>1</sub>)  
（研究者自製）

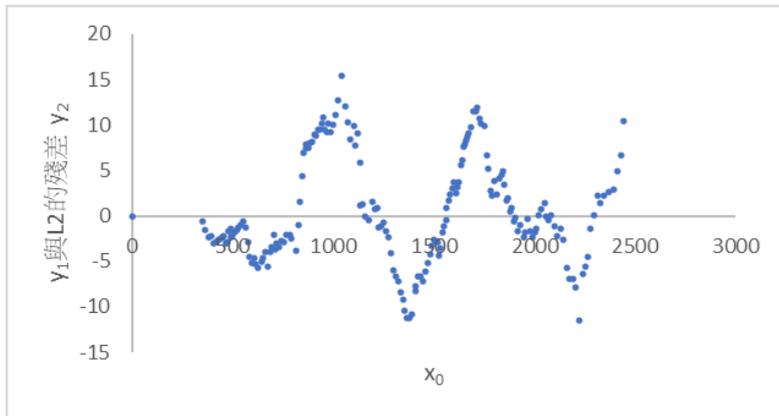
- 3、彗核旋轉與克爾文－亥姆霍茲不穩定性的波形擬合因目前無適合波形擬合參數，此階段以原點起始的正弦函數擬合，如式一， $a$  代表正弦函數之振幅， $T$  代表正弦函數的週期之函數值。我們藉由調整  $a$  和  $T$  之值，使所得之正弦函數圖形與圖五之曲線最相近

$$f(x) = a \times \sin\left(\frac{x \cdot 2\pi}{T}\right) \quad (\text{式一})$$



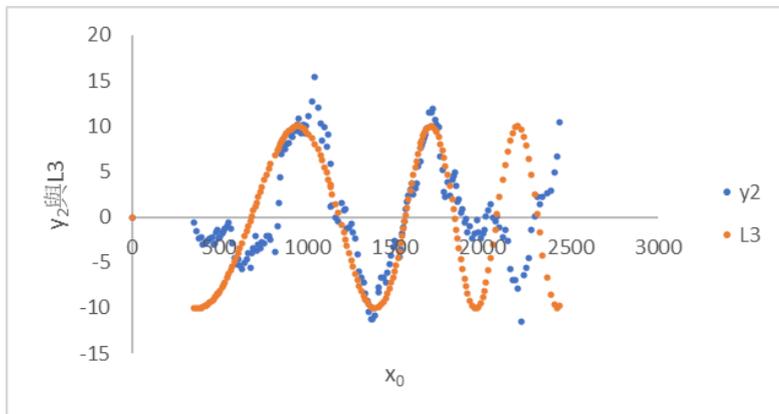
圖五 12月31日距離彗尾中心線+2.94度的修正後彗尾與第二次擬合線 L2  
(研究者自製)

- 4、將資料數列 $(x_0, y_1)$ 減去擬合線 L2，得去除 L2 造成週期變化影響後的資料數列稱為 $(x_0, y_2)$ ，如圖六，而此時仍存在一波狀起伏。



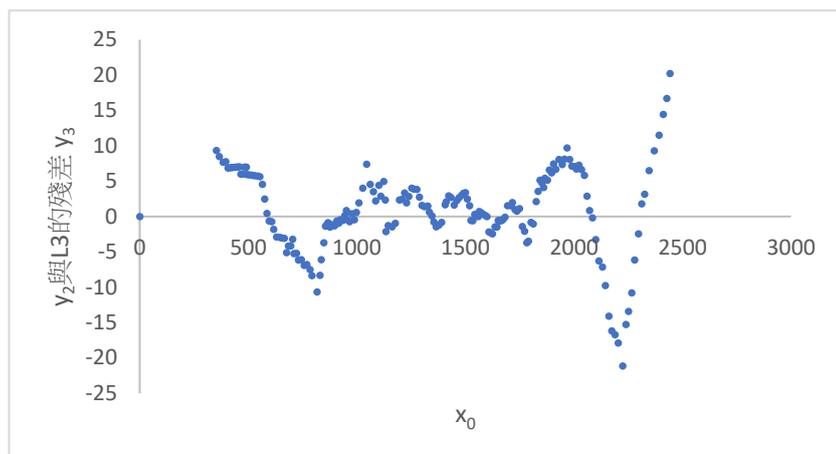
圖六 12月31日距離彗尾中心線+2.94度的彗尾 $(x_0, y_1)$ 與擬合線 L2 相減結果  
(研究者自製)

但此波形如從原點出發無法擬合，假設週期會有變化性，故重複步驟 3 但以週期遞減的正弦函數擬合，如圖七擬合線 L3。



圖七 圖六結果 $(x_0, y_2)$ 與第二次擬合線 L3 (研究者自製)

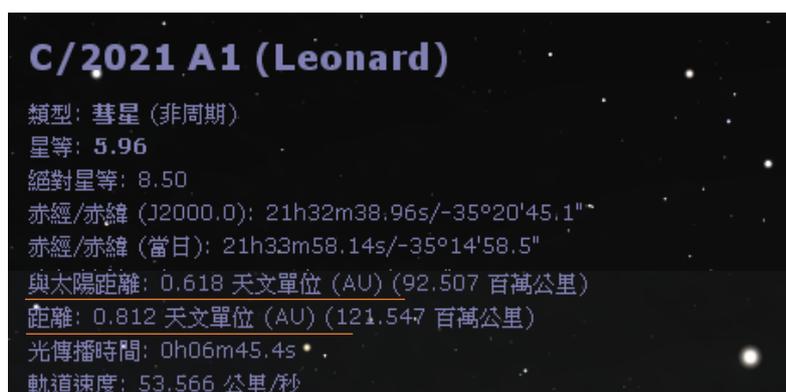
5、同步驟 4 將 $(x_0, y_2)$ 減去擬合線 L3 得新資料數列 $(x_0, y_3)$  (圖八)，已經找不出規律週期性，假設這就與非週期性影響原因相關。



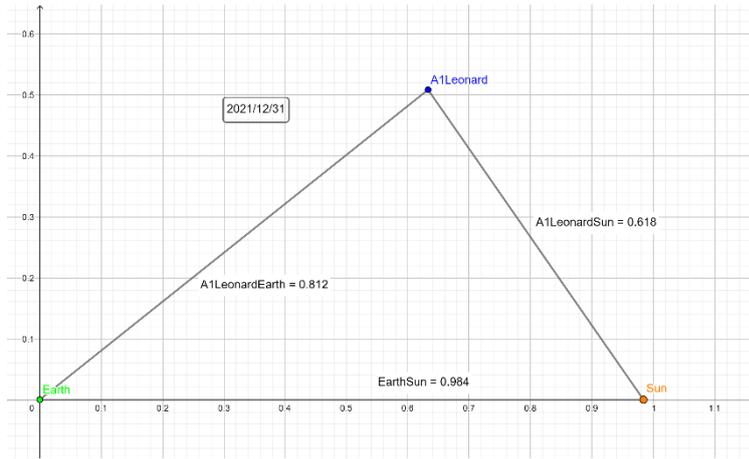
圖八 圖六數列 $(x_0, y_2)$ 與第三次擬合線 L3 相減後數列 $(x_0, y_3)$  (研究者自製)

### (三) 彗尾實際長度還原

為了有效估算太陽風對彗尾影響，需求得影像中投影在天球的彗尾實際長度。利用照片拍攝者提供的視野範圍和 Stellarium 星圖軟體所得之彗星、地球、太陽三者之間的距離與位置關係 (如圖九)，套入 GeoGebra 數學幾何繪圖軟體 (圖十)，以地球為原點，建構出三個天體的相對位置坐標系。

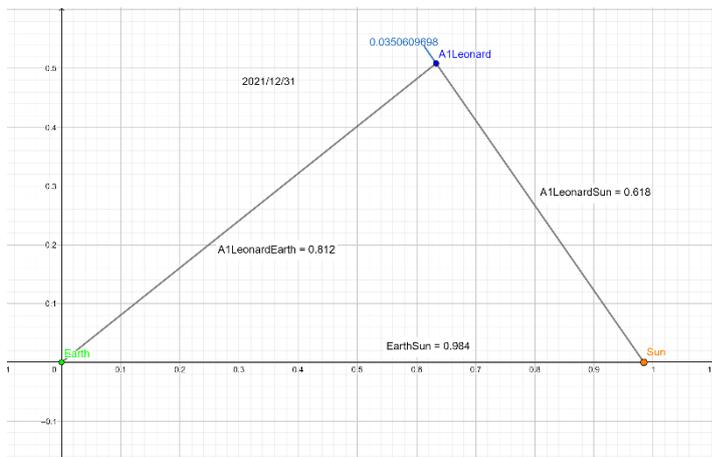


圖九 Stellarium 星圖軟體 C/2021 A1 Leonard 彗星與太陽、地球的距離 (擷取自 Stellarium 星圖軟體)



圖十 2021 年 12 月 31 日 UTC 11:25 彗星、地球、太陽的相對位置（單位：AU）  
（擷取自 GeoGebra 數學幾何繪圖軟體）

假設離子尾皆背向太陽，在圖十中已經得知此三顆天體相對角度即可由影像的投影於天球上視角轉換為拍攝時實際彗尾長度。利用作圖法計算出的彗地距離和彗尾長的比值，結果得出實際彗尾長度 0.035AU（圖十一），詳細數值計算如附件一。由上述所算出的彗尾實際長度，代入先前曲線擬合分析圖，將圖中 x 軸單位由 pixel 換算成實際長度，以利於分析找出何種原因造成波動。

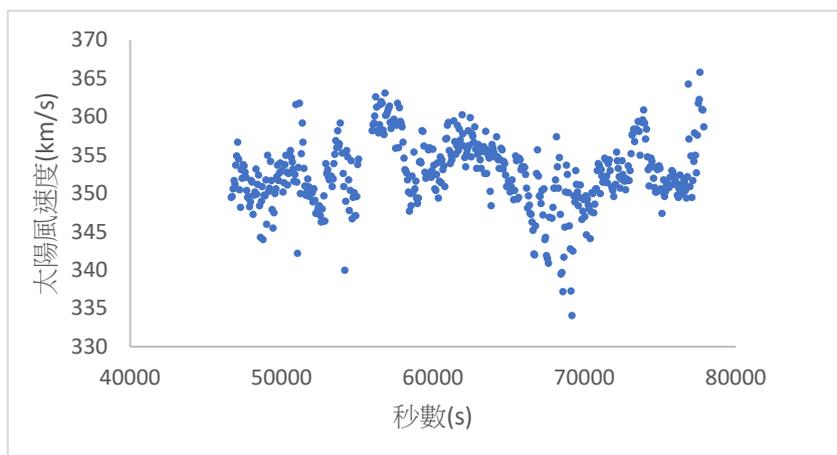


圖十一 代入比值結果得出實際彗尾長度 0.035AU（擷取 GeoGebra 數學幾何繪圖軟體）

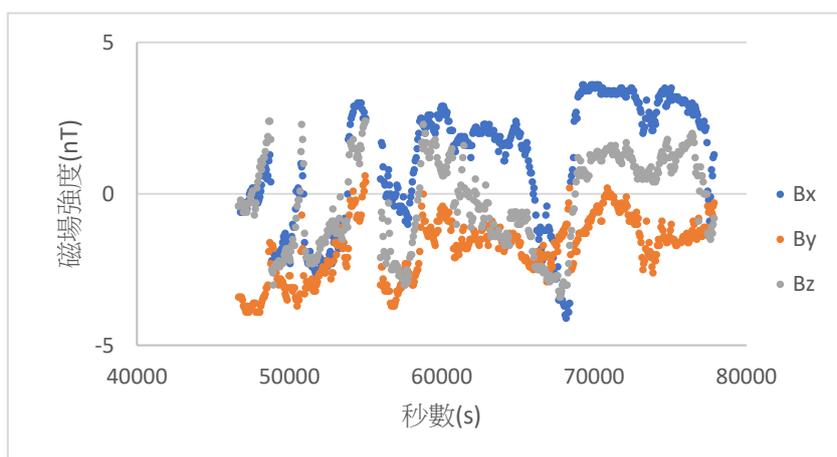
#### （四）彗星的太陽風環境

雖無 C/2021 A1 Leonard 彗星處的太陽風資訊，此時段 ACE 探測器資料庫的平均太陽風風速為  $472.9 \pm 109.4$  km/s 為低速太陽風，因此假設太陽旋轉放出的太陽風如果是均勻旋轉且穩定，到達彗星與 ACE 的太陽風參數相近而僅有時間差。

將 2021 年 12 月 18 日至 2022 年 1 月 4 日之太陽風資料從 ACE 資料庫中下載並將所得資料作圖，選用太陽風速度（如圖十二以 2021 年 12 月 18 日資料為例），IMF 行星際磁場  $B_x$ 、 $B_y$  與  $B_z$  分量（如圖十三以 2021 年 12 月 18 日資料為例）做比對。



圖十二 2021 年 12 月 18 日太陽風速度刪除無效點後的有效資料。將下載的資料刪除無效點作圖，橫軸為在當天以 UTC 標準時間為原點的秒數，縱軸為觀測器測得的太陽風速度。(研究者自製)



圖十三 2021 年 12 月 18 日太陽風磁場強度。將下載的資料刪除無效點作圖，橫軸為當天的秒數，縱軸為觀測器測得的各分量磁場強度 (研究者自製)

由於前面 (二) 曲線擬合的圖表由左至右為新到老的現象，為了比對太陽風與曲線關係，將太陽風的資料數值由左至右也排序成新到老，也就是將數值反轉以利比對。

### (五) 旋轉模型

假設彗核自轉而彗尾噴發的方向和轉軸間的夾角大小不同、視平面的夾角，都會造成彗尾有不同的波動形狀。我們利用 Excel 軟體模擬不同的旋轉情況，透過調整參數，找出各條彗尾可能的情形，如圖十四。但由於這樣的波動形式可以由多重函數擬合，如具有週期的波函數與一次或多項式擬合。本研究先以最單純的  $\sin$  函數擬合找出週期性，更精細的擬合將於未來展望的工作完成。

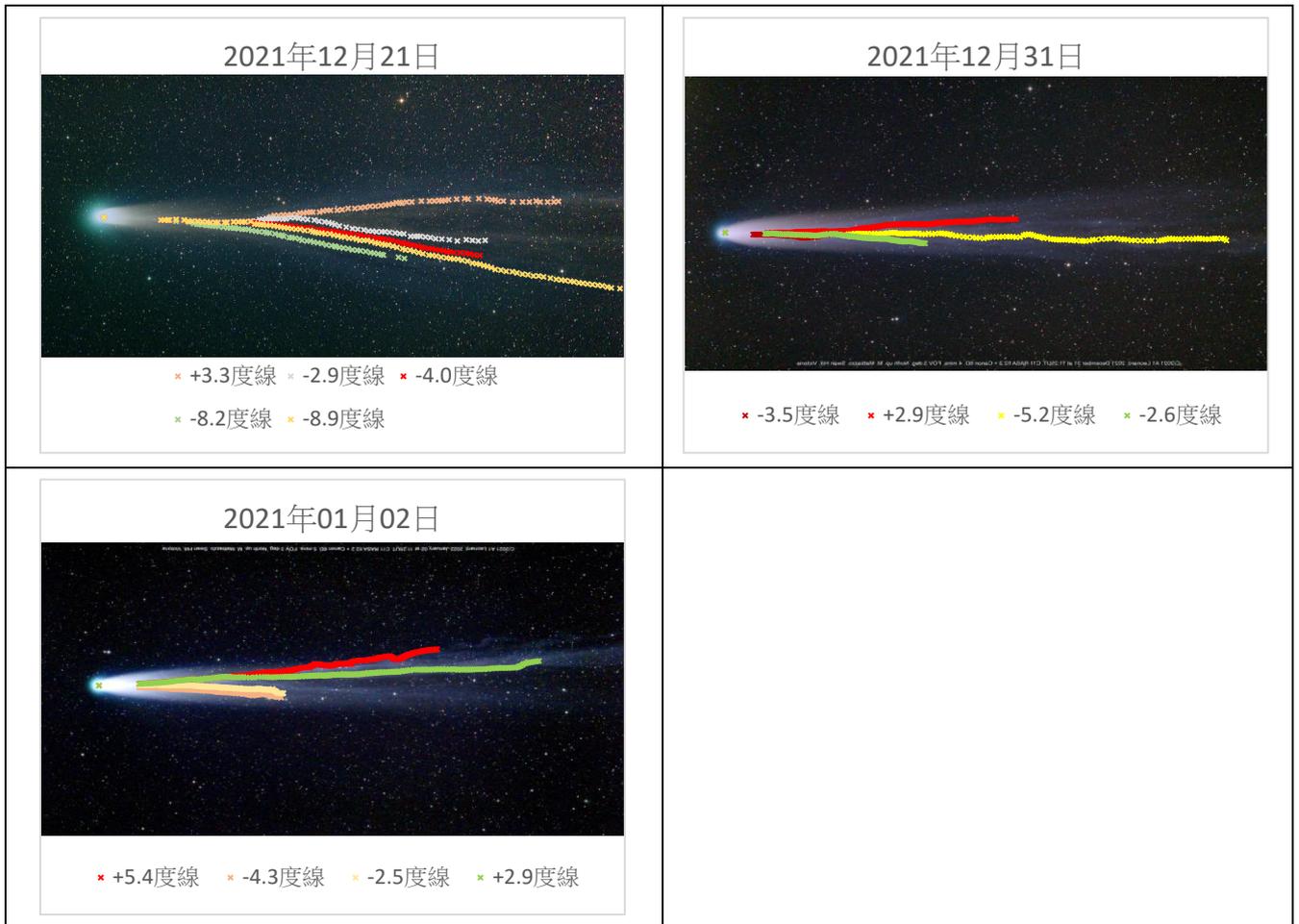


圖十四 旋轉模型的示意圖。透過設定彗星速度  $V_c$ 、彗尾噴發物速度  $V_t$ 、旋轉週期  $T$ ，改變噴發方向：轉軸在  $XY$  平面夾角和  $XZ$  平面夾角，得出不同的波形進而去擬合週期。  
(來源：研究者自製)

### 參、研究分析與結果

依前述研究方法步驟(1)，對研究材料的三影像分析，如表一中的 2021 年 12 月 21 日、12 月 31 日與 2022 年 01 月 02 日三幅影像，對彗尾取樣如表二中的圖表。

表二 2021 年 12 月 21 日、12 月 31 日與 2022 年 01 月 02 日的影像所擷取出的彗尾



(表二來源：研究者自製)

擷取彗尾軌跡資料，用前述研究方法的步驟(二)找出各個彗尾的擬合線，逐一解析得出具有穩定與漸進變化的週期的波形，藉此嘗試找出彗尾波動受自身因素影響或是如太陽風行星際磁場的變因，並以步驟(三)彗尾實際長度還原如表三。

表三 2021 年 12 月 21 日、12 月 31 日與 2022 年 01 月 02 日三天體距離資料（單位：AU）

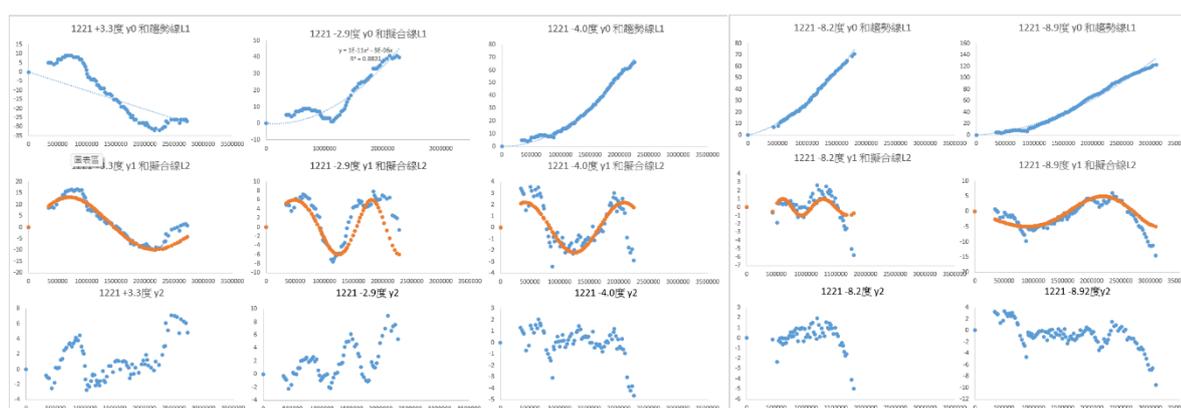
日期	彗星與地球距離	太陽與地球距離	彗星與太陽距離	彗尾實際長度
2021/12/21	0.437	0.984	0.676	0.023
2021/12/31	0.812	0.984	0.618	0.035
2022/01/02	0.888	0.983	0.616	0.038

（表三來源：研究者自製）

轉換成實際空間距離並擬合後的結果如圖十五到圖十七所示，橘線為具有週期的擬合線。2021 年 12 月 21 日的五條彗尾資料如圖十五，2021 年 12 月 31 日的四條彗尾資料如圖十六，2022 年 01 月 02 日的四條彗尾資料如圖十七。

### 一、2021 年 12 月 21 日分析結果

由圖十五的五條彗尾結構分析可看出去除有穩定週期變化(L2)的趨勢後，最後的分析圖都有形狀相似的變化區，推斷應該是太陽風事件對所有彗尾結構造成的影響。



圖十五 2021 年 12 月 21 日+3.3 度、-2.9 度、-4.0 度、-8.2 度與-8.9 度彗尾之數據分析（研究者自製）

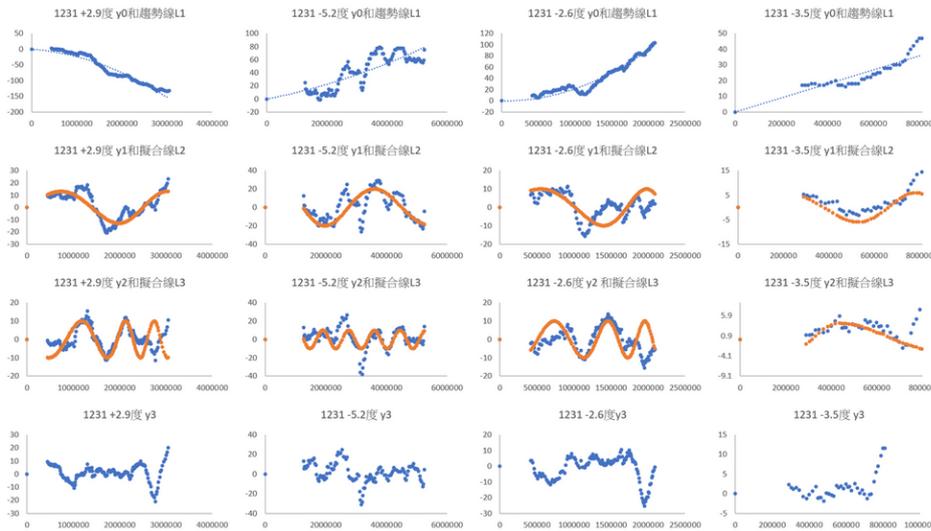
將圖十五的擬合週期與振幅做統計如表四，表內週期 T 與振幅 a 是由擬合式一推得，雖絕對數值不具意義，但相對數值可參考比較，比如數值相近代表可能相似原因影響。

表四 2021 年 12 月 21 日+3.3 度、-2.9 度、-4.0 度、-8.2 度與-8.9 度彗尾之擬合週期（研究者自製）

彗尾名稱	第二擬合線 L2	
	週期 T(hr)	振幅 a(pixel)
+3.3 度	15.45	10.5
-2.9 度	10.66~6.87	6.0
-4.0 度	8.74	2.2
-8.2 度	2.45~3.28	1.0
-8.9 度	20.24~13.34	-5.0

## 二、 2021 年 12 月 31 日分析結果

由圖十六的四條彗尾結構分析可看出去除有穩定週期變化(L2)與漸進變化(L3)的趨勢後，可看出最後的分析圖都有形狀相似的變化區，圖十六的擬合週期與振幅統計如表五，推斷為太陽風事件。



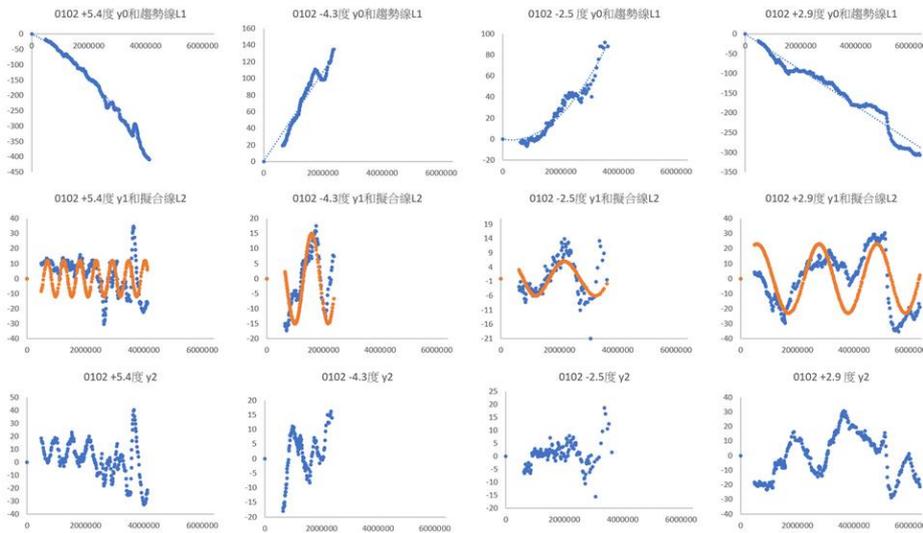
圖十六 2021 年 12 月 31 日+2.9 度、-5.2 度、-2.6 度、-3.5 度彗尾之數據分析（研究者自製）

表五 2021 年 12 月 31 日+2.9 度、-5.2 度、-2.6 度、-3.5 度彗尾之擬合週期（研究者自製）

彗尾名稱	第二擬合線 L2		第三擬合線 L3	
	週期 T(hr)	振幅 a(pixel)	週期 T(hr)	振幅 a(pixel)
+2.9 度	7.87	13.0	5.90~2.93	10.0
-5.2 度	7.88~9.82	20.0	2.68	10.0
-2.6 度	7.08~4.83	10.0	3.27~2.14	10.0
-3.5 度	4.37	16.0	2.36~2.23	13.0

## 三、 2022 年 01 月 02 日分析結果

由圖十七的四條彗尾結構分析，雖穩定週期變化(L2)趨勢落差大，但去除有穩定週期變化(L2)的趨勢後，仍可看出最後的分析圖都有形狀相似的變化區，推斷為太陽風事件。



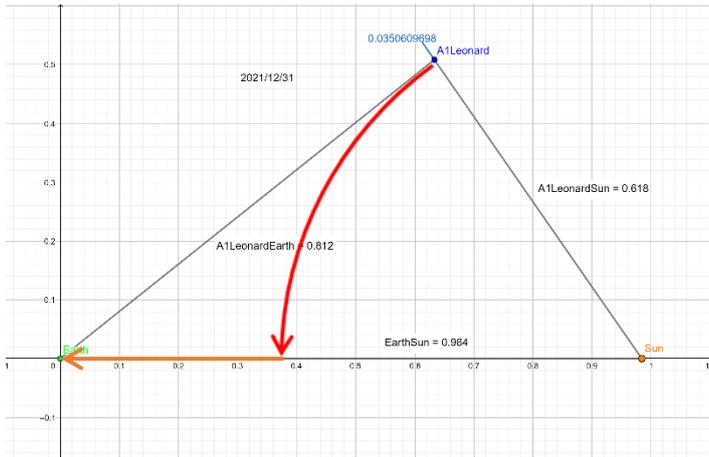
圖十七 2022 年 01 月 02 日+5.4 度、-4.3 度、-2.5 度、+2.9 度彗尾之數據分析（研究者自製）

表六 2022 年 01 月 02 日+5.4 度、-4.3 度、-2.5 度、+2.9 度彗尾之擬合週期（研究者自製）

彗尾名稱	第二擬合線 L2	
	週期 T(hr)	振幅 a(pixel)
+5.4 度	2.92	12.0
-4.3 度	7.11~6.45	17.0
-2.5 度	7.83~9.76	6.0
+2.9 度	12.09~11.00	23.0

#### 四、三日太陽風影響事件相關性分析

隨著太陽自轉太陽風會被扭曲成帕克螺旋(Parker spiral)形狀的太陽圈電流片(Heliospheric current sheet)。假設太陽風狀態穩定保持一致，兩星體的角度差距會因為太陽風旋轉產生延遲；太陽風先掃過距日近的彗星，再掃過 ACE 衛星，兩者與日距離差也會造成延遲。如圖十八說明，延遲效應為上述兩者的時間差加總，利用彗星至日距  $D_{\text{彗日}}$ 、ACE 衛星至日距  $D_{\text{衛日}}$ 、太陽風平均速度和角距計算，方便從 ACE 資料庫中尋找影響非週期因素的太陽風磁場資料，如表七。



$$t_{\text{日距延遲}} = \frac{D_{\text{彗日}} - D_{\text{衛日}}}{V}$$

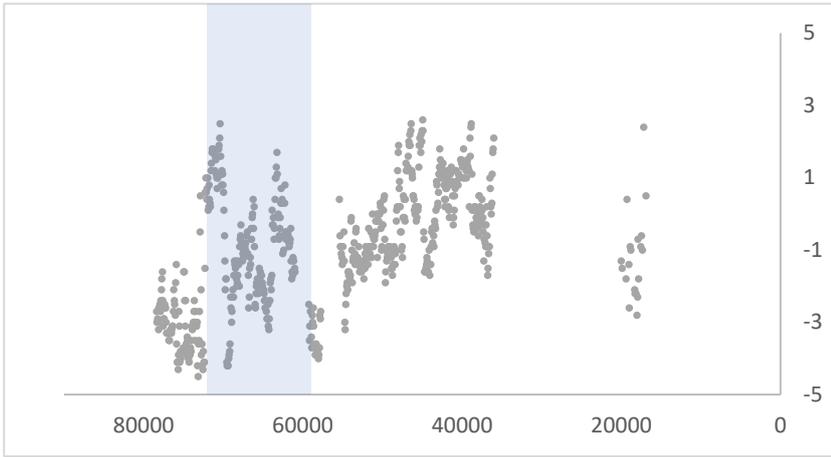
$$t_{\text{旋轉的延遲}} = \frac{\theta}{T} = \frac{55^\circ}{\frac{360^\circ}{27 \text{ day}}}$$

圖十八 相同性質太陽風到達彗星與衛星的時間延遲時間預估示意圖（研究者自製）

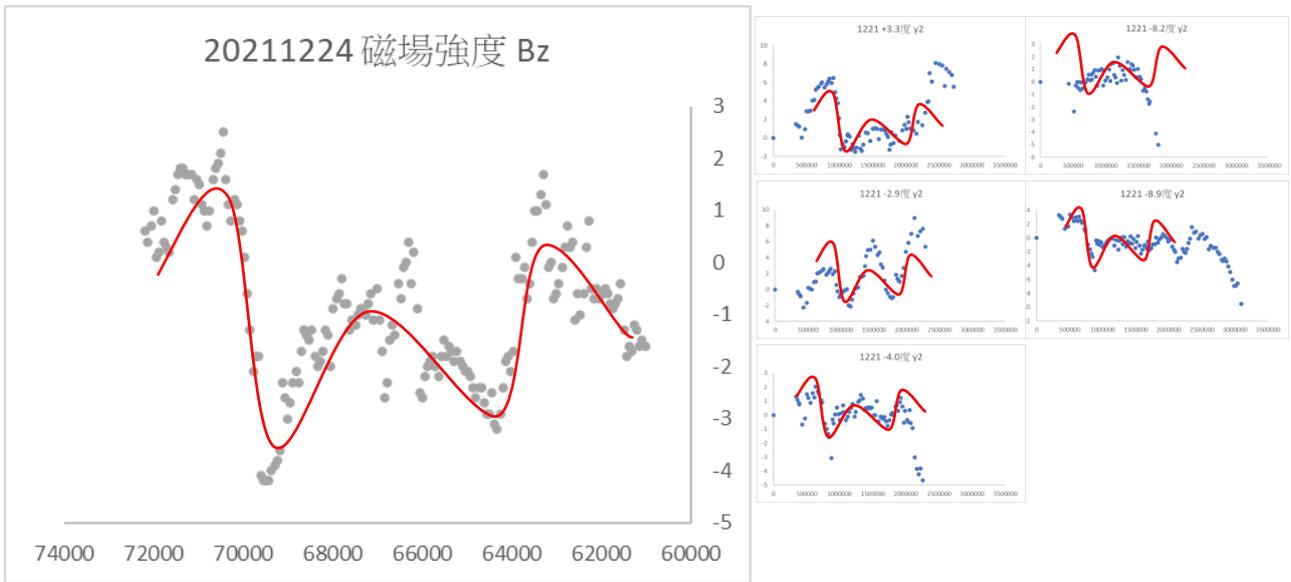
表七：估算太陽風到達彗星與到達地球的時間差（研究者自製）

觀測日期	黃道彗衛角距 $\theta_{\text{彗衛}}$	$D_{\text{彗日}} - D_{\text{衛日}}$	太陽風風速	延後時間差
2021/12/21	33.46	0.298AU	604.443±36.074	約 80 小時 43 分鐘
2021/12/31	34.54	0.356AU	423.625±8.369	約 97 小時 55 分鐘
2022/01/02	31.34	0.357AU	500.987 ±16.544	約 86 小時 13 分鐘

比較太陽風速度和太陽風磁場各分量比較，發現  $B_z$  具有波形相似的變化區，而其他物理量如風速、 $B_x$ 、 $B_y$  則較無關聯性。接著分析 2021 年 12 月 24 日的太陽風參數與彗尾關係，將圖十九選取空間(藍色區塊)局部放大，並橫軸由左至右由新到老排列，以便擬合前述彗尾影像，與 12 月 21 日經擬合後共同非週期因素  $y_2$  比較，比較如圖二十所示，磁場 Z 軸強度圖形( $B_z$ )也與彗尾不同結構形狀相似的變化區具有相似的形狀，如圖二十中紅色趨勢線做標準位置比對此區域，+3.3、-8.9、-4.0 度的彗尾趨勢就具有較高相關性，數值趨勢與彗尾趨勢相似，推論非週期因素可能與磁場強度  $B_z$  較具相關性，而與太陽風速度、磁場 X 軸與磁場 Y 軸較為無關。

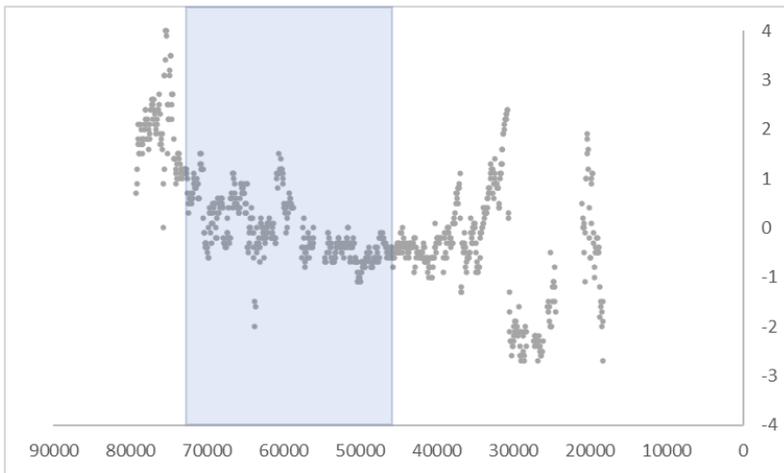


圖十九 2021年12月24日行星際磁場強度Z分量（研究者自製）

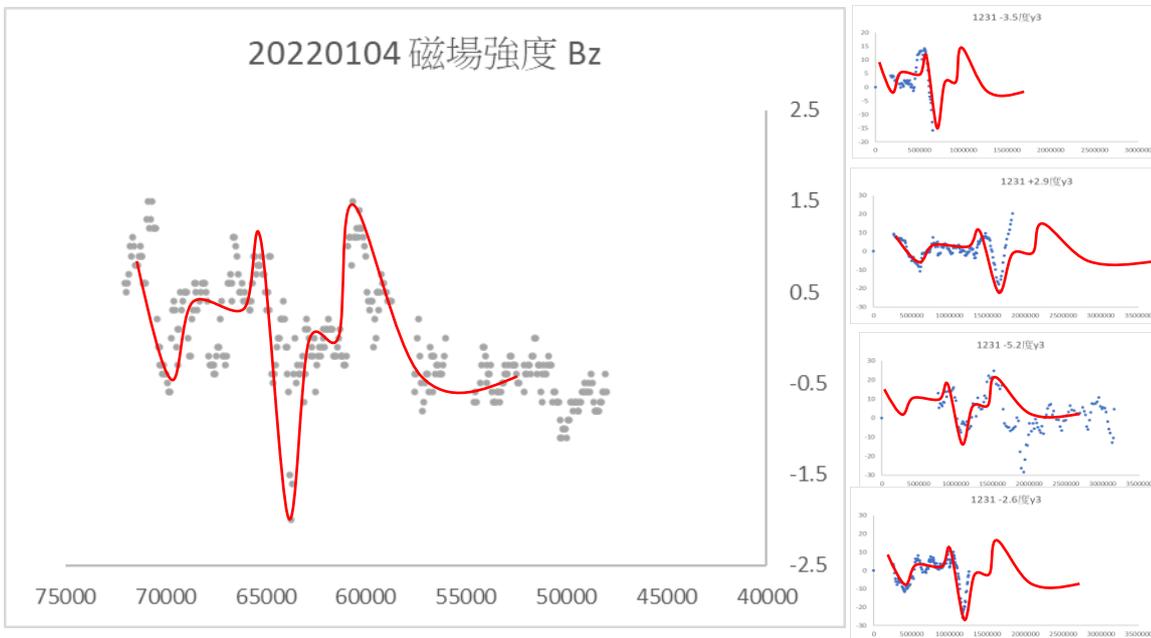


圖二十 2021年12月24日行星際磁場強度Z分量局部放大後與12月21日去除具有周期擬合線趨勢後的y2比對（研究者自製）

分析2022年01月04日的太陽風參數與彗尾關係，如前敘方法處理圖二十三。與2021年12月31日經擬合後的共同非週期因素y3比較，如圖二十四所示磁場強度圖形與彗尾不同結構形狀相似的變化區具有相似的形狀，如圖中-5.2度的彗尾趨勢具有較高相關性，推論非週期因素可能與磁場強度Bz有關。

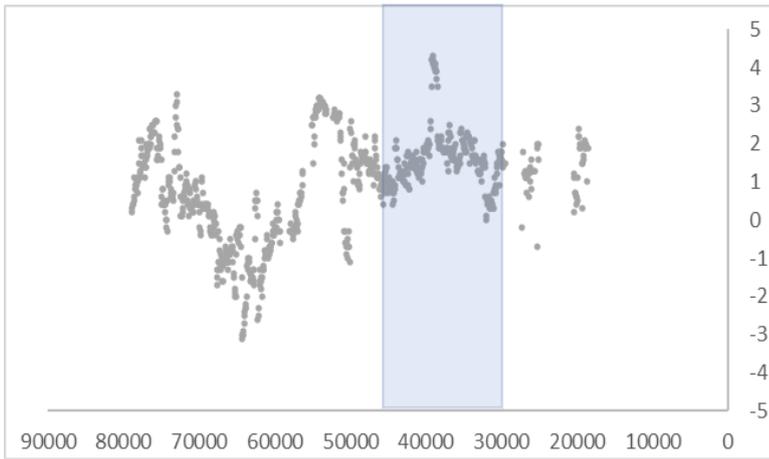


圖二十一 2022年01月04日行星際磁場強度Z分量（研究者自製）

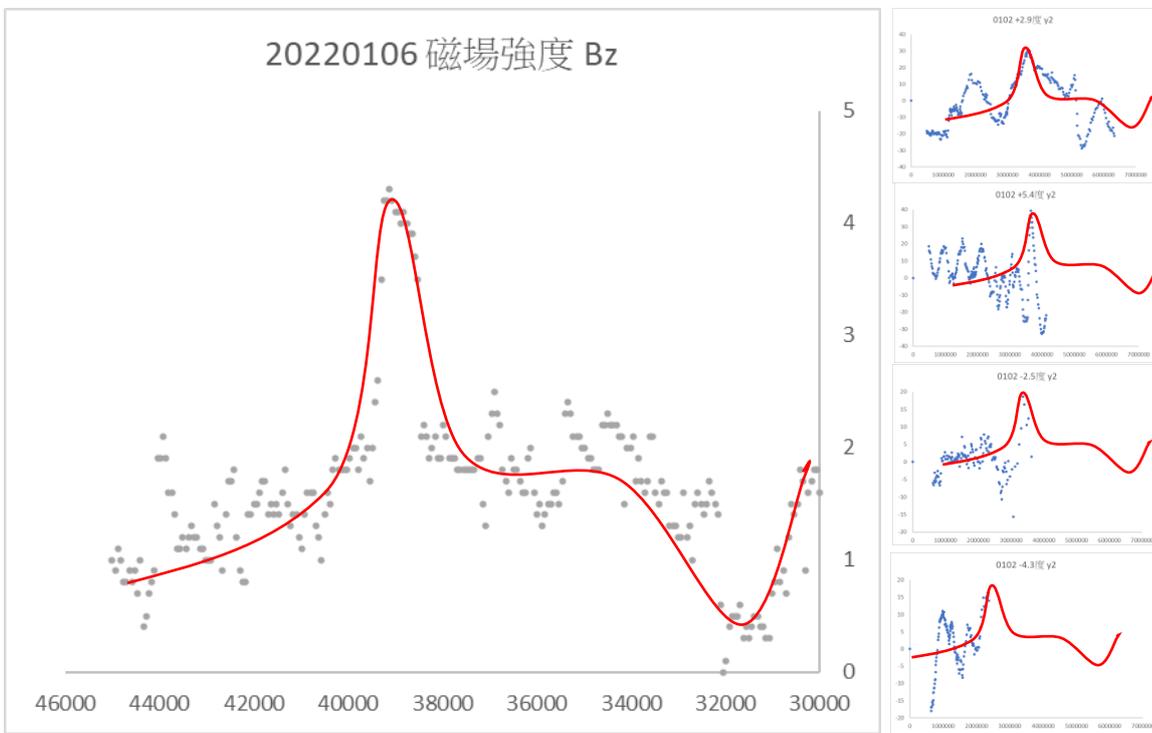


圖二十二 20220104 磁場強度  $B_z$  局部放大後的資料與 12 月 31 日  $y^3$  比對（研究者自製）

分析 2022 年 01 月 04 日的太陽風參數與彗尾關係，如前敘方法處理圖二十五。與 2022 年 01 月 02 日經擬合後的共同非週期因素  $y^2$  比較，如圖二十六所示磁場強度圖形與彗尾不同結構形狀相似的變化區略有相似的形狀，如圖中紅色趨勢線，如 +5.4、-2.5 度的彗尾趨勢具有相關，推論非週期因素可能與磁場強度  $B_z$  有關。



圖二十三 2022年01月06日行星際磁場強度Z分量（研究者自製）



圖二十四 局部放大，X軸翻轉後的20220106磁場強度Bz資料與01月02日的y2比對（研究者自製）

## 肆、研究結論

- 一、分析三張不同日期的彗尾結構波形，發現相似的變化區具有一致性可推論由某些非週期事件共同影響。
- 二、將彗星減去擬合線的圖形分別與太陽風的行星際磁場南北分量( $B_z$ )比較發現，太陽風磁場也具有同樣波形相似的變化區。
- 三、推論太陽風磁場南北分量( $B_z$ )的非週期變動是影響彗星離子尾不規則變化起伏的主因，且與其他磁場分量與太陽風速較無顯著關係。

## 伍、未來展望

- 一、採用相反方法，將原始彗尾資料( $x_0, y_0$ )利用 Python 進行內插法，扣除利用積分法計算出投影在天球上的磁場造成的彗尾粒子移動向量，以進行更準確的擬合。
- 二、依據彗核自轉、彗尾噴發的方向、轉軸間的夾角大小不同，和視平面的夾角，都會造成彗尾有不同的波動形狀。利用 Excel 軟體寫出旋轉模型，試圖模擬扣除磁場強度下各條彗尾不同的旋轉情況，透過調整參數擬合出各條彗尾可能的情形。完成後預期將比第一階段利用  $\sin$  函數擬合更合理且符合物理機制，進而找出其他的影響，如 K-H 不穩定的波動及其波形。

## 陸、參考文獻

IAU Minor Planet Center. (2021, January 10). *MPEC 2021-A99:COMET C/2021 A1 (Leonard)*  
<https://minorplanetcenter.net/iau/mpec/K21/K21A99.html>

Xiaohong Li et al. (2018). *Observing Kelvin–Helmholtz instability in solar blowout jet*  
<https://www.nature.com/articles/s41598-018-26581-4#Abs1>

A. I. Ershkovich. (1976). *Solar wind interaction with the tail of Comet Kohoutek*  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0032063376900258>

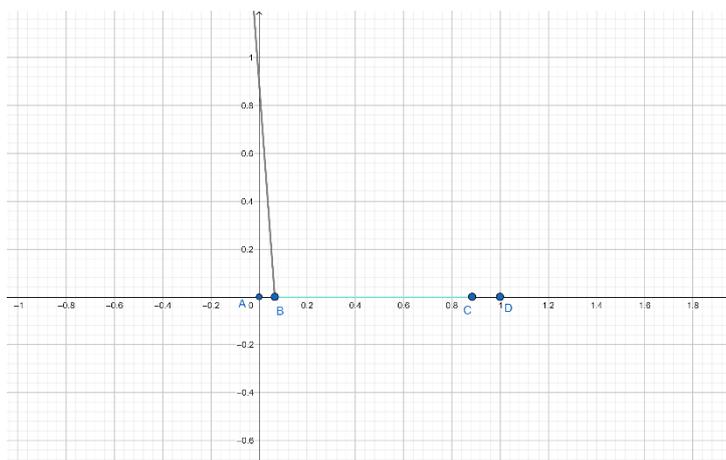
畢可為 (2016) 徑向行星際磁場事件之特性及其對磁層之影響  
<https://hdl.handle.net/11296/ncu7v7>

ACE 探測器(Advanced Composition Explorer)  
<https://sohoftp.nascom.nasa.gov/sdb/goes/ace/daily/README.bck>

Michael J.S.Belton, et al.(2013). The complex spin state of 103P/Hartley 2: Kinematics and orientation in space. *Icarus*, 222(2), 595-609.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019103512002667>

## 附錄一 以 GeoGebra 數學幾何繪圖軟體推算彗尾長度

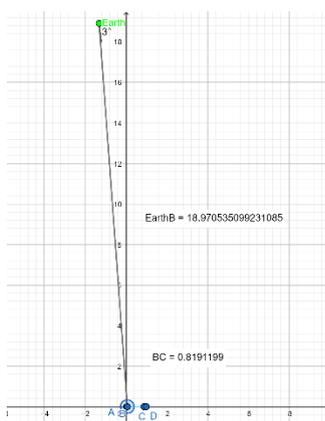
將拍攝者的拍攝可視範圍套入計算，可視範圍為整張影像，須扣除非彗尾部分才可求出正確答案。利用先前使用過的 ImageJ 影像軟體取得座標，另建立一個新座標系進行計算，求出彗尾所佔的部分。



圖二十六 計算彗尾在影像中的長度佔比。將線段 AD 設為整個畫面的寬度，B 點為彗核，BC 則為彗尾（淺藍色線段）（擷取自 GeoGebra 數學幾何繪圖軟體）

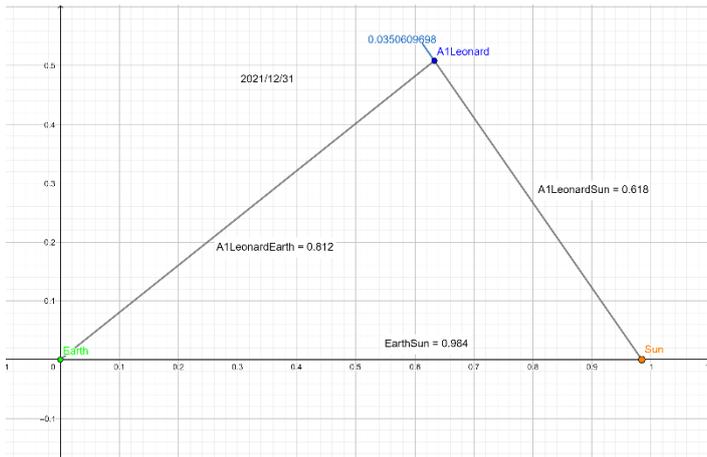
由於彗尾為太陽與彗尾連線的向後延伸，因此可將  $\angle \text{earth A1Leonard sun}$  的補角即為彗星與地球連線與彗尾的夾角

此時須滿足  $\angle \text{A earth D}$  為可視範圍  $= 3^\circ$ ，因此可找出此計算中地球所在的位置，以及彗尾與彗地距離的比值（如圖二十七）。



圖二十七 彗尾與彗地距離比值計算（擷取自 GeoGebra 數學幾何繪圖軟體）

處計算出的彗地距離和彗尾長的比值，應與實際長度的比值相同，因此代入相對位置坐標系，即可求出實際彗尾長度，進一步計算出每單位像素所代表的實際長度，如圖二十八。



圖二十八 代入比值結果得出實際彗尾長度 0.035AU（擷取自 GeoGebra 數學幾何繪圖軟體）

由上述所算出的彗尾實際長度，代入先前曲線擬合分析圖，將圖中 x 軸單位由 pixel 換算成實際長度，以利於分析找出何種原因造成波動。

## 【評語】 160016

本作品探討彗星離子尾波狀結構的成因。作者考量彗核轉動可能的影響之外，利用太陽風的資料佐證太陽風磁場南北分量的非週期變動是影響彗星離子尾不規則變化起伏的主因。這是一個不錯的結果。作者也提出未來可利用這方法來研究彗核的轉動。這是一個新穎的方法。建議作者應增加所研究的彗星樣本數量。