

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 地球科學科

佳作

040505

有跡可循—C/2004 Q2 (Machholz) 彗星軌道之
研究

國立大里高級中學

作者姓名：

高二 游雅麗 高二 王柏青 高二 劉雅淳
高二 葉竣銘

指導老師：

林士超 黃詩翔

有跡可循 —C/2004 Q2 (Machholz) 彗星軌道之研究

摘 要

適巧 Machholz 在去年 8 月發現新彗星 C/2004 Q2，而 IAU 公佈其軌道根數，言明 Q2 為拋物線軌道，永不回歸。

本研究以 14 次彗星觀測，以 Find_Orb 程式計算 Q2 軌道根數，並分析軌道變動性及可能原因，進一步驗證萬有引力並尋覓可能之擾動因素，同時進行了彗星運動模擬。

結果顯示：Q2 軌道為橢圓而非拋物線。各根數中， a 變動稍大，其餘誤差小於 2 %。軌道形狀雖有不同，但不改變與黃道相對位置。再者，Q2 近、遠日距為 1.2、114AU，回歸週期 438 年，表示它來自歐特雲，屬週期彗星。又因 Q2 與地球軌道相距 0.3AU，並不會造成流星雨。

以星曆表做靈敏度測試，顯示本研究相當準確。在三點軌道計算，若時間取樣適當，根數並無明顯誤差。因 Q2 到訪不久，引力攝動不明顯；由 Q2 亮度對時間作圖可知 Q2 亮度屬規則變化，故 Q2 受非引力影響極微，後續應著重引力攝動項。將來 Q2 軌道會如何呢？有待後續追蹤。

關鍵詞：彗星軌道根數、天體力學攝動理論、二體運動

壹、研究動機

彗星，古人將之視為不祥之星，直到哈雷成功估算 1574、1668、1725 年的彗星是同一顆，並成功預測 1789 年該彗星會再出現天際，於是開啓了天體力學及軌道計算新紀元。而Machholz在 2004 年 8 月 27 日的凌晨發現一顆新彗星C/2004 Q2，當時亮度僅 11.2 等，視直徑 2 角分，IAU隨即在 8 月 28 日快訊中公告其軌道特性，資料顯示其軌道為拋物線，在 2005 年初會最接近地球。

在龍騰版高中基礎地球科學課本的 10-2 提到彗星起源分屬柯伊伯帶及歐特雲。高中物質科學物理篇(上)7-1 也提到行星軌道特性。於是我們想知道Q2 在天際是何運動型態？來自何方？

天體力學常以二體問題做為軌道計算原則。據此，本研究意欲以二次曲線方程式來探究彗星位置變化真相。但從書本得知當彗星過於接近地球時，地球也會對彗星產生引力擾動，而使之發生不規則位置變化。本研究亦期許在天體的軌道特徵與動力學擾動問題有進一步且深入的瞭解。

貳、研究目的

- 一、在 Uranometria 星圖上進行位置比對，取得不同時間的彗星位置。
- 二、將觀測所得彗星位置，以程式分析 C/2004 Q2 之軌道根數；再與 IAU 資料比較，分析軌道變動性並討論其原因。
- 三、利用 Q2 軌道根數求其遠、近日點、公轉週期及來源。
- 四、檢視 Q2 軌道根數變化，重新檢視其軌道特性，並找出可能擾動因素。
- 五、比較 Q2 亮度和經驗亮度公式預測值有差異，並探究其原因。
- 六、模擬並觀察在軌道面的彗星運動，及在黃道面投影的位置變化。

參、研究設備及器材

Uranometria 星圖、電腦、PhotoImpact、軌道分析軟體 FindOrb、The Sky、壓克力、奇異筆、橢圓鐵盤及彈珠。

肆、研究過程及方法

一、取得 C/2004 Q2 影像

- 1.取國內外攝影作品十四幅（2004 年 8 月至 3 月），包含近地及近日點的時段。
- 2.將影像轉為數位檔案反白。
- 3.將彗星影像拍攝時間轉換為世界標準時，以利資料比對。

二、找出 Q2 彗星出現位置與太陽所在位置(黃道)關係

- 1.將該天區的星圖影印拼合。
- 2.取得彗星位置預測圖，配合離子尾方向在星圖找到彗星對應天區。
- 3.估算攝影作品實際大小(FOV 視野)，配合預測位置在星圖比對出彗星正確位置。

三、製出彗星軌跡電子檔：

- 1.以內插法讀出彗星的天球座標(R.A.赤經、Dec.赤緯)，並轉換成 FindOrb 所需的時間或角度。
- 2.以 UltraEdit 程式，逐行輸入每次觀測日期及天球座標，存成 ASCII 電子檔。
- 3.以 FindOrb 程式計算出 Q2 六個軌道根數，並嘗試以不同的統計方法做不同的統計分析，且逐一討論軌道根數的變化及近日、近地時刻的日彗距，再討論分析所得方均根並與 IAU 公佈的數據進行比較。

四、模擬彗星運轉軌跡

- 1.開啓 The Sky 模擬畫面，仔細觀察彗星移動快慢。找出彗星近日點軌跡，繞日旋轉的情形，並紀錄之。

- 2.以 AstroArts 所公佈的彗星軌道模擬程式，進行 Q2 運行及在空間上的特性的模擬。
- 3.另再利用橢圓鐵盤及彈珠，模擬天體力學中的二體運動。
- 4.綜合上述三步驟所得，製作具體的立體壓克力模型。

伍、研究結果

一、彗星位置比對結果：

進行比對時，發現有些星點無法判讀，特別是數位相機影像具太多雜訊，反而是傳統底片影像較清晰，或者是以 CCD 拍攝影像（過程中可將雜訊扣除）。

二、彗星位置及亮度變化：

在2004年8月底，Q2出現在波江座逐漸往南；12月之後，Q2迅速北移。05年1月上旬彗星接近太陽且達最大亮度。之後遠離太陽，位置接近天球北極，成為整夜可見的拱極彗星。在三月，彗星距北極星的視角只有5度，亮度已暗至6等以下，仍整夜可見。

三、彗星軌道根數及星曆表：

1. Find_Orb 軟體具有多種推算彗星軌道的功能，軟體使用說明文件建議以程式內設的推論值為出發點，經過數次 Herget 步驟之後，再以 Full Step 運算直到六個軌道參數變動很小為止。

2. 結果如下：

C/2004Q2 軌道根數

Perihelion 2005 Jan 24.98267 TT		Epoch 2005 Jan 10.0 TT = JD _T 2453380.5			
M	359.96633	(2000.0)		P	Q
n	0.002247	Peri.	19.541	-0.323	-0.716090
a	57.734077	Node	93.765	0.764	-0.583088
e	0.979172	Incl.	38.291	0.557	0.383694
P	438.68	<u>H</u>	7.1	G	0.15 q 1.20246
From 14 observations 2004 Aug. 28-2005 Mar. 13; RMS error 522.38 ArcSeconds					

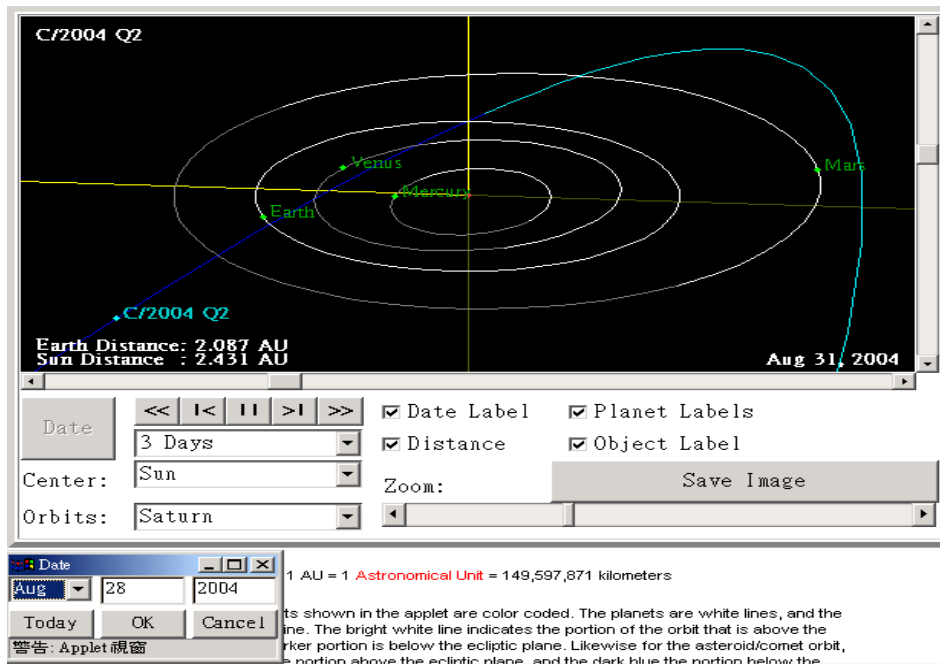
3. Find_Orb 軟體也可以計算星曆表（**Ephemerides**，用已知某天體軌道根素，計算出不同時刻位置，並表列），結果如下：（台中 **E 120.7**、**N 24.1**）

Date (UT)	RA	Dec	delta	r	elong	mag
1 Jan 2005	03 51 52.08	+08 53 24.87	0.349	1.258	136.0	6.7
3 Jan 2005	03 47 06.95	+13 03 26.39	0.345	1.249	134.5	6.7
<u>5 Jan</u> 2005	03 42 23.98	+17 19 13.07	0.343	1.241	132.6	6.7
7 Jan 2005	03 37 44.63	+21 37 06.35	0.344	1.234	130.5	6.8
9 Jan 2005	03 33 10.43	+25 53 25.25	0.345	1.227	128.2	6.8
11 Jan 2005	03 28 42.92	+30 04 43.71	0.350	1.228	125.7	6.9
13 Jan 2005	03 24 23.59	+34 08 05.13	0.357	1.216	123.3	7.0
15 Jan 2005	03 20 13.84	+38 01 11.54	0.365	1.212	120.8	7.1
17 Jan 2005	03 16 14.96	+41 42 26.77	0.376	1.208	118.4	7.2
19 Jan 2005	03 12 28.21	+45 10 54.53	0.387	1.206	116.1	7.3
21 Jan 2005	03 08 54.84	+48 26 13.13	0.400	1.204	114.0	7.4
23 Jan 2005	03 05 36.18	+51 28 28.48	0.415	1.203	112.0	7.5
<u>25 Jan</u> 2005	03 02 33.66	+54 18 06.79	0.430	1.202	110.1	7.6
27 Jan 2005	02 59 48.88	+56 55 48.00	0.447	1.203	108.4	7.7
29 Jan 2005	02 57 23.64	+59 22 20.29	0.464	1.204	106.8	7.8

備註：RA 為赤經(時分秒)，Dec 為赤緯(度)，delta 表彗地距 (AU)，r 表彗日距(AU)，elong 表日地彗夾角，mag 表彗星星等。

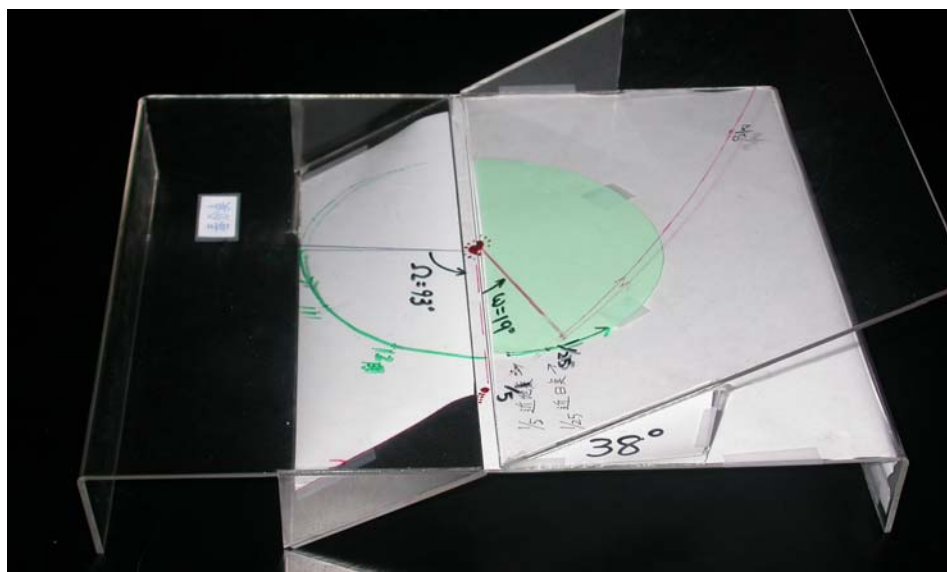
四、模擬彗星運轉軌跡

1. 使用 The Sky 軟體時，折衷地使用網路數據，可瞭解 Q2 實際運行軌跡。
2. 觀察到彗星在近日點之前的移動速度是逐日增快，而在一月下旬繞過近日點之後，彗星移動速度是逐日減慢。
3. 以 Orbit Viewer(NASA, AstroArts)模擬結果如下，Q2 約略在 2003 年 5 月進入木星軌道內，在 2004 年 1 月時進入內太陽系，此時 Q2 與地球分在太陽兩側；到了 2005 年 1 月，Q2 在 1 月 5 日通過近日點；到了 1 月 25 日繞過近日點。之後，Q2 逐漸離開太陽，在五月前後移動到火星軌道之外（皆以 Q2 黃道投影點討論）。



註：往上黃線為黃道法線，另水平黃線為春分點方向；白色軌道表行星，至於藍色暗線代表 Q2 上升至黃道面的軌道，而藍色亮線條表 Q2 遠離黃道面往上的軌道。（本模擬程式所採用軌道根數為 Solution ID = JPL#53）

4. 以橢圓鐵盤及彈珠可以模擬彗星繞日的軌道特性，充份解釋天體力學的概念，而壓克力之立體模型（如下圖）亦有助於瞭解彗星繞日的空間軌道特性。



陸、討論

一、天體力學之軌道根素 (Orbital Elements)

由牛頓力學出發，只考慮太陽與彗星之間引力，不計其他天體影響，稱二體運動。彗星的加速度可表示為太陽至彗星距離 r 對時間 t 的二次微分方程式：

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{G(m_1 + m_2)}{r^3} \cdot r \quad \dots \dots \dots \text{(公式一)}$$

m_1 、 m_2 為太陽、彗星質量， G 為萬有引力常數。方程式的解為六個積分常數。也就是：彗星軌道位置對時間變化可由六個軌道根數表示，

1. 半長軸 a ：即橢圓半長軸 ($a > 0$)，表示軌道的大小。
2. 離心率 e ：焦點到橢圓中心的距離與半長軸 a 之比， a 、 e 用來定義軌道形狀。
3. 軌道面傾角 i ：彗星軌道與黃道面夾角。
4. 升交點黃經 Ω ：彗星軌道與黃道面的交線稱交點線，彗星在交點線的位置稱升交點；自春分點到升交點方向的夾角，稱升交點黃經，它決定彗星軌道面的位置。
5. 近日點角距 ω ：太陽到彗星近日點方向與升交點方向的夾角。
6. 近日點時刻 τ ：彗星運行到近日點位置之時刻。

二、軌道計算與軌道座標轉換：

由天體觀測推算軌道根數，或由軌道根數推算天體某時刻的位置，稱為軌道計算。若將所拍攝影像轉為天球座標的 RA 跟 Dec，再將軌跡投影到黃道面上再以電腦程式『推估計算』出彗星的軌道根數，稱為初軌計算。若假定彗星在天際僅受萬有引力，沒有其他引力來源或非引力因素干擾，那麼彗星軌道應為二次圓錐曲線。英 Peter 及美 Haab 告訴我們 Pluto Project 所寫之 Find_Orb 程式應可滿足計算需求。本研究計算與 IAU 與 NASA 的根數資料比對如下：

編碼	MPEC				
	2004-R21	2004-U31	MPC 53304	JPL#43	本研究
觀測點數	73	332	781	1851	14
觀測時程	~9/4	~10/22	~12/18	~3/19	8/28~3/13
軌道根數					
偏心率 e	1.0	0.9995	0.9994	0.99942	0.9791
半長軸 a	—	2420.1	2114.16	2079.79	57.71
升交點引數 Ω	93.589	93.626	93.6239	93.6243	93.765
軌道傾角 i	38.595	38.589	38.5894	38.5889	38.291
近日點引數 ω	19.571	19.502	19.5064	19.5041	19.541
近日時間 τ	24.849	24.914	24.9127	24.9114	24.983
RMS(ArcSec)	n.a.	0".35	0".5	n.a.	522".27
曆元 Epoch		Jan. 30.0	Jan. 30.0	Dec.12	Jan 10.0
公佈時間	9/6	10/23			3/30

備註一：近日時間 τ 皆在 2005 年一月；而觀測時程都自 8/27 開始(本研究自 8/28)；

曆元 Epoch 皆設定 2005 年(JPL#43 為 2004 年 12 月)。

備註二：因 MPEC2004-R21 的 $e=1$ (拋物線)，無法由此求出半長軸，n.a. 為資料從缺，2004-U31 的資料與 MPC52905 相同。

1. 但可看到 MPEC 2004-R21 的半長軸及離心率是最為特別的。由於 2004-R21 的觀測點數少，時間間距不足，其軌道根數的 a 與 e 和其他的資料產生了差異。
2. 本研究觀測點數較少，僅 12 天(14 個點)，但觀測能橫跨半年的時間；雖 14 個點準確度可能有限（彗髮直徑約 2' ~30'，彗核無法精確標定），以致殘差值居高不下，但除 a 變動較大外，其餘誤差皆在 1% 內(e 為 2%)。雖由相片量取彗核座標的處理程序可能會有很大的偏差，可見本研究有一定的參考性。

三、彗星軌道是橢圓(e<1)或是拋物線(e=1)

由彗星運動方程式來看，二次圓錐曲線型態有橢圓、拋物線和雙曲線。而拋物線、雙曲線常以近日距代替軌道半長軸作為軌道根素。如此，解決了半長軸，但是彗星回歸週期却成了懸案。其實僅以彗星在近地、日點附近的測量記錄來軌道計算，若空間的二次曲線的比例太大，三種圓錐曲線之間可說是幾乎沒有差異。

在 1996 年的彗星軌道表指出 1470 顆彗星的觀測記錄，比較計算所得軌道根素，其中有些是多次重複出現，實際上僅 883 顆彗星。若以二百年週期為準，短、長週期分別為 185 及 698 顆，而長週期彗星之中，拋物線、橢圓、雙曲線分別佔 347、213、138 顆。

我們便想進一步地推論：彗星位置的觀測時程若能拉長，是否就能順利瞭解彗星軌道真實面貌呢？MPEC 2004-R21 是否觀測點數少、又觀測時程太短，故軌道根數 e 與 a 產生了變化。因為彗星軌道是橢圓或拋物線有很大區別。

四、遠日距、近日點距、回歸週期及彗星的故鄉：

1. 在天體軌道計算中，常用另一些數值表示軌道特徵。但，它們皆由上述六個軌道根素計算而來來，例如：

$$q = a (1 - e) \quad \dots \dots \dots \text{(公式二)}$$

$$Q = a (1 + e) \quad \dots \dots \dots \text{(公式三)}$$

$$T = \frac{2\pi a^{3/2}}{G(m_1 + m_2)} \quad \dots \dots \dots \text{(公式四)}$$

$$\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3} = \frac{T_3^2}{a_3^3} = \dots \quad \dots \dots \dots \text{(公式五)}$$

其中，q 為近日距(AU)，Q 為遠日距(AU)，a 為半長軸(AU)，e 為離心率；T 為彗星週期(年)，G 為萬有引力常數，m1 為太陽質量，m2 為彗星質量（因 m1 遠大於 m2，常僅考慮太陽質量，也就是常改寫為公式五，它就是克卜勒行星運動第三定律 Kepler 3rd Law）。

2. 本研究與各單位參數計算結果，如下：

編碼	2004-R21	2004-U31	MPC 53304	JPL#43	本研究
偏心率 e	1.0	0.99950	0.99947	0.99942	0.97916
半長軸 a	—	2420.13	2114.16	2079.79	57.71
近日點距 q	1.2037.	1.205 1	1.2050	1.2050	1.20246
遠日點距 Q	—	4839.066	4227.215	4158.354	114.225
回歸週期 T	—	119,058.2	97,209.4	94,848.85	438.45
彗星起源	—	歐特雲	歐特雲	歐特雲	? 歐特雲?

3. 由 MPEC2004-R21、2004-U31、MPC 53304、JPL#43 計算結果看來，近日距彼此差異不大，皆為 1.2AU（約 1 億 8 千萬公里）。

4. 因 MPEC2004-R21 $e = 1$ ，表示彗星軌道為開放性圓錐曲線，無法求出半長軸、遠日距及回歸週期。僅就 MPEC 2004-U31、MPC 53304、JPL#43 的計算結果而言，遠日距、回歸週期差異很小。而本研究所得的近日距與前述相近(亦 1.2AU)，但因 Find_Orb 的計算結果 e 較小，遠日距 Q 僅 114AU。
5. 若將上述遠日距比對歐特雲位置(距太陽約 $3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ AU，參考地科課本)，則 2004-U31、MPC53304、JPL#43 計算皆可確認 Q_2 來自歐特雲。但本研究所得遠日距，雖不能馬上確認 Q_2 來自歐特雲。因彗星的另一起源為柯伊伯帶(距太陽 30 ~ 100 AU)，與本研究有一落差。再者，柯伊伯帶的彗星軌道面對黃道面傾角 i 較小，而本研究 Q_2 傾角為 38.3 度，相當不一致。故可推論 Q_2 來自歐特雲，之後因其他因素而將軌道改變。

五、靈敏度測試：

- 因彗星軌道計算中，缺地球到彗星距離此一重要數據，故從三度空間變為二度空間的研究。只好以觀測彗星位置來進行軌道計算，硬用電腦將答案『猜』出來，這一定會有誤差存在。故一般都會拿星曆表和實際觀測資料比較，以修正並提高軌道計算準確性。
- 義大利 R. Lingustri 在三月 13 日所拍攝的彗星的赤經、赤緯與 MPC53304 及本研究的星曆表比較表如下：

實測	2005 03 14.85	R.A.	08 19 12.8	Dec	+84 31 53.7
53304	2005 03 11	07	12.7	+84	52.1
	2005 03 16	08	59.2	+84	03.6
本研究	2005 Mar 12	07	38 29.2	+84	45 23.1
	2005 Mar 14	08	22 18.0	+84	28 05.3

由上列的表格比較中，可推知本研究與 MPC53304 的軌道計算皆有一定的可信度，可供彗星觀測者做為找尋彗星位置的參考。

- 數學原理常提及：以二點可求一直線，而三點可成一曲線。我們自問若有三個彗星觀測資料是否可算出軌道根數。茲將結果及 2005 年一月份的星曆表條列如下：由表可知，若三點的時間間隔及位置取樣適當，軌道根數並不會有明顯誤差出現。

編碼	MPEC2004-U31	MPC 53304	JPL#43	本研究	研究二
觀測點數	332	781	1851	14	3
觀測時程	~10/22	~12/18	~3/19	8/28~3/13	備註
偏心率 e	0.999502	0.99947	0.99942	0.97917	0.97818
半長軸 a	2420.136	2114.165	2079.799	57.714	55.1027
升交點引數 Ω	93.62688	93.6239	93.62431	93.76567	93.7573
軌道傾角 i	38.58911	38.5894	38.58895	38.29177	38.2368
近日點引數 ω	19.50231	19.5064	19.50419	19.54196	19.6858
近日時間 τ	24.91460	24.9127	24.91148	24.98308	25.1446
RMS(ArcSec)	0".35	0".5	n.a.	522".27	0
曆元 Epoch	Jan. 30.0	Jan. 30.	Dec.12	Jan 10.0	Jan 10.0
公佈時間	10/23			3/30	3/30

備註：觀測僅採用三點，分別是 8/28、03/13 (近日點前後)、01/02(靠近近日點)。

4. 為驗證此論點，將Peter Birtwhistle 16筆觀測紀錄（2004/08/27~28）以程式分析，發現a、e、i三者變化不大，但 ω 由19度降為7度， Ω 由93變99度。因觀測時間太近，結果不令人滿意。列表如下：

C/2004Q2 Orbital elements				
Perihelion 2005 Jan 30.534		Epoch 2004 Aug 23.0 = JDT 2453240.5		
M 359.951	(2000.0)	P	Q	
n 0.0003	Peri. 7.25	-0.258	-0.751	
a 217.952 7	Node 99.25	0.852	-0.472	
e 0.99346	Incl. 37.99	0.454	0.460	
P3217.68	H 8.4	q 1.424		
From 26 observations 2004 Aug. 27-28; RMS error 0.666 ArcSeconds				

六、二體運動與限制性三體運動的攝動理論驗證 (Perturbation)

天體運行中僅考慮太陽對某一天體的引力，純粹討論小天體在大質量的引力作用下運動，稱為二體運動，又稱無攝動問題。若考慮三質點在萬有引力作用下的運動則稱為三體運動。而三體運動中的小天體，質量遠小於另二物體，可將最小質量忽略，稱之為限制性三體運動。在任何因素影響下，天體的位置和速度（或軌道根素）同二體問題理論結果間的偏差，叫作攝動。現階段的天文學或物理學，二體運動可以得到完整解答，但萬有引力無遠弗屆，所以三體運動及攝動理論有其重要性。實例：[勒威耶及加列](#)，利用攝動理論發現了海王星；[湯包](#)發現了冥王星。因空氣阻力及地球的扁率，改變人造衛星的軌道規律性。

假設在相同距離處，太陽系各個天體引力的比例關係，木星的引力以 1000 表示，則：

太陽：1047350 海王星：54 火星：0.34 木星：1000
 天王星：46 金星：2.6 土星：299 地球：32 水星：0.17

考慮 Q2 在 2005 年一月後，太陽及地球對彗星的萬有引力比約為 2000：1，可見地球的攝動影響不可忽視。法國[拉格朗日](#)首先推出行星運動的攝動方程式，又可將軌道根數的變化 $f(q,t,P,M)$ 表示如下：

$$f(q,t,P,M) = q_1 t + q_2 t^2 + \dots + g(\sin PM, \cos PM) + \dots \dots \dots \text{(公式六)}$$

其中，q 與 t 為時間項，P 與 M 為週期項。因 Q2 到訪尚屬短時間，彗星受引力攝動研究才剛剛要開始。

七、非引力效應：

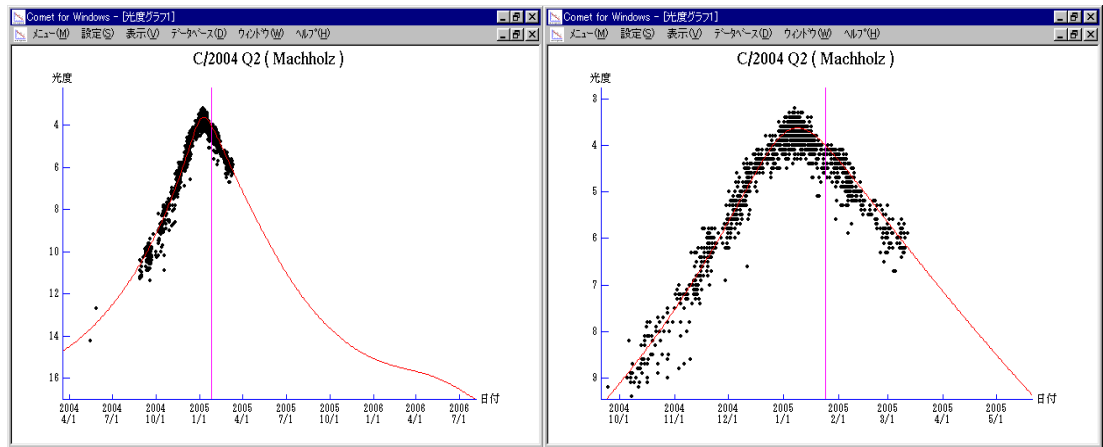
1. 有名的 1P/哈雷及 3P/恩克回歸經天文學家計算與驗證，發現週期有變短的情形，[德貝塞爾](#)認為彗星在靠近太陽時，彗核受到陽光照射，發生冰塵汽化而提高彗星光度，另汽化的拋出物會似火箭反推進作用，使彗星發生噴流或彗核自轉。若彗核噴流方向與彗星公轉方向相反，則公轉週期會增加。
2. 本研究欲推測：若彗星在近日時刻，彗核物質噴發達一定程度，則彗星光度應隨時間經過而激增。若彗星光度的變化與預測值相當而無突然變亮，即可推知彗星軌道的非引力影響是微乎其微。

3. 一般而言，彗星光度估算經驗公式如下：

$$m_1 = m_2 + 5 \log \Delta + 10.0 \log r$$

其中， m_1 表示某時間的彗星星等， m_2 是第一次觀測星等，為 5.5，

Δ 為彗地距， r 為彗日距，兩者單位為 AU



由上面二張圖片（[吉田誠一繪](#)）看出彗星光度變化符合經驗法則，看不出非引力效應，接下來工作還是應該著重在引力攝動。

柒、結論

- 一、以 14 點觀測記錄進行 C/2004 Q2 軌道計算，得知 Q2 為橢圓形軌道而非拋物線。因觀測時程取樣得當，軌道根數中 a 值變動稍大，其餘誤差在 2% 內。雖軌道形狀有少許變化，但不會改變軌道與黃道面相對位置。
- 二、在 2004 年 8 月，Q2 出現在波江座，逐漸往南通過天兔座。同年 12 月，從金牛座迅速北移，彗尾日漸明亮、拉長。在 1 月，達最大亮度。2 月起，經仙后、仙王座，向北極星前進。3 月後，因近天球北極，整夜可見，亮度降至六等。
- 三、本研究成功以程式模擬小天體移動情形。Q2 在 2003 年 5 月通過木星軌道，04 年進入太陽系內側；到了 05 年 1 月，通過近地點、近日點。同年 5 月，在火星軌道之外，繼之穿越木、土星軌道，但與它們始終保有距離。
- 四、計算得知 Q2 近日距僅 1.2AU，遠日距為 114AU，回歸週期 438 年，顯示 Q2 來自歐特雲，為週期性彗星。因彗星與地球軌道有 0.3AU 差距，應不會造成流星雨。
- 五、以星曆表進行靈敏度測試，初步具有準確性。另，進行三點分析軌道，若時間取樣適當，軌道根數並不會因點數太少而有明顯誤差出現。
- 六、一般可由天體運動的攝動方程式瞭解軌道變化之長期項和長、短週期項，但 Q2 到訪尚屬短期，受引力攝動不明顯。假以時日，可推尋各個軌道根數的變化率。
- 七、前人發現有彗星因非引力因素而週期變短，由 Q2 之星等對時間變化圖可知，彗星亮度屬規則變化。推測 Q2 非引力影響極微，後續應重引力攝動項；地球為最可能之攝動來源。

捌、參考資料及其他

一、書面

- (一)毛松霖等人，高中地球科學上冊，第一版，台中，康熙圖書，p.209，民 92
- (二)王執明等人，高中基礎地球科學(全)，第一版，台北縣，龍騰文化事業，p.206，民 93
- (三)包舜華，民 89，地球的運動與座標系統，台北天文館季刊，第 10 期，p.29~P34
- (四)胡中爲及蕭耐圓，天文學教程(上)，2 版，北京，高等教育出版，p.465，2003
- (五)褚德三主編，高中物質科學物理篇(上)，第一版，台北，龍騰文化事業，p.224，民 92
- (六)劉步林，數學在天文學中之應用，初版，新竹，凡異出版，p.284，民 88
- (七)W. Tirion, B. Rappaport, and G. Lovi, URANOMETRIA 2000.0, United States, Willmann – Bell Press, p.473, 1993.
- (八)C. D. Murray and S. F. Dermott, Solar System Dynamics, New York, Cambridge University Press, p.592, 1999.

二、網路

- (一)美 NASA 彗星觀測網 <http://encke.jpl.nasa.gov/>
- (二)國際天文聯合會 IAU 小行星中心電子報 (MPEC)
<http://cfa-www.harvard.edu/iau/mpec/K04/K04R21.html> & [K04U31.html](http://cfa-www.harvard.edu/iau/mpec/K04/K04U31.html)
- (二)國際彗星季刊 (ICQ)
<http://cfa-www.harvard.edu/iau/Ephemerides/Comets/2004Q2.html>
[MPC53304 ~/Comets/Soft00Cmt.txt](http://cfa-www.harvard.edu/iau/Ephemerides/Comets/2004Q2.html)
- (四)吉田誠一彗星網 <http://www.aerith.net/comet/catalog/2004Q2/pictures.html>
- (五)Royal Astronomy Society of Canada
<http://www.rasc.ca/observing/comet/q2machholz1.pdf>
- (六)British Astronomy Associate
<http://www.britastro.org/circulars/pdf/baac796.pdf> & [baac798.pdf](http://www.britastro.org/circulars/pdf/baac798.pdf)
- (七)台北天文館 <http://www.tam.gov.tw/>
- (八)FindOrb (Project Pluto) http://www.projectpluto.com/find_orb.htm
- (九)<http://www.astroarts.co.jp/products/orbitviewer/index.html>
- (十)美 NASA 近地物體中心 NEO
<http://neo.jpl.nasa.gov/2004q2>

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
評 語

高中組 地球科學科

佳作

040505

有跡可循—C/2004 Q2 (Machholz)彗星軌道之
研究

國立大里高級中學

評語：

1. 可以由網路資料分析流行之議題，掌握最新資料。
2. 可惜缺乏自己的觀測，所以有誤差較大之現象。
3. 結論可以再精進。