

2025年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	160008
參展科別	物理與天文學
作品名稱	創神星緻密行星環成因探討

就讀學校	臺北市立麗山高級中學
指導教師	萬義昞
作者姓名	李若綺 金世歲 黃予謙

關鍵詞	<u>創神星、行星環、洛希極限</u>
-----	---------------------

作者簡介



我是金世歲，就讀麗山高中，喜歡透過努力去達成自己想完成的事情，對於天文與物理有興趣，喜歡去探索新事物。

我是黃予謙，喜歡工程和數學，平常沒事喜歡看書跟看電影，以後想當工程師。可能會去華爾街。

我是李若綺，最喜歡物理和地球科學，尤其是天文學，對於未知的事物充滿好奇心，也享受和夥伴一起解決問題的過程。

2025 年臺灣國際科學展覽會

研究報告

區別：北區

科別：物理與天文學科

作品名稱：創神星緻密行星環成因探討

關鍵詞：創神星、行星環、洛希極限（最多三個）

編號：

（編號由國立臺灣科學教育館統一填列）

摘要

本研究旨在探討洛希極限理論的例外：創神星 (Quaoar) 的行星環。穩定的行星環在一般情況下形成於洛希極限內，然而創神星的行星環卻穩定存在於洛希極限外。

因此，我們的研究目的為解釋為何創神星環能夠存在於洛希極限外。專注於探討密度、剛體與流體性質等因素對行星環的影響、軌道共振的原理與比較其他環系統案例，最終利用力圖分析與比較相似環系統以推論行星環穩定之原因。

根據我們的研究，我們認為創神星環是受創衛一 (Weywot) 引力作用影響，軌道共振拉開了環粒子之間的距離，以至於在洛希極限外無法匯聚成衛星。

透過對影響洛希極限和行星環形成的因素深入研究，期望能夠揭示創神星環的形成和穩定性背後的物理機制，進而拓展對行星環形成和天體力學的理解。此外，冀望本研究能為未來對於其他類似例外情況的行星環提供參考。

Abstract

This study aims to explore the exception to the Roche limit theory: the planetary ring of Quaoar. Stable planetary rings typically form within the Roche limit; however, the rings of Quaoar are stably located outside the Roche limit.

Therefore, our research objective is to explain why the Quaoar ring can exist outside the Roche limit. We focus on investigating factors such as density, rigid body and fluid properties, the principles of orbital resonance, and comparing other ring systems.

Ultimately, we will use force analysis and compare similar ring systems to infer the reasons for the stability of the planetary ring.

Based on our research, we believe that the Quaoar ring is influenced by the gravitational effect of its moon Weywot, with orbital resonance increasing the distance between ring particles, preventing them from coalescing into a moon outside the Roche limit.

Through an in-depth study of the factors affecting the Roche limit and the formation of planetary rings, we hope to reveal the physical mechanisms behind the formation and stability of the Quaoar ring, thereby expanding our understanding of planetary ring formation and celestial mechanics. Additionally, we hope this research can provide a reference for future studies on other similar exceptional cases of planetary rings.

壹、前言

一、研究動機

從小學開始，只要遇到自然的科目就會常提到潮汐這個詞，而在專題研究的課程中，我們從月球的對於地球潮汐鎖定的現象產生好奇，慢慢地想去嘗試理解系外行星中，過程中也開始加深地了解了潮汐力以及潮汐鎖定，而在好奇心的驅使下透過潮汐力的延伸，發現洛希極限這個專有名詞，研究後發現洛希極限攸關於行星環的形成，認為洛希極限很有趣且具有研究價值，且本身對行星環很有興趣。

在資料搜尋的過程中，於台北市天文台官網看見了創神星新發現第二個行星環，就聯想到洛希極限是否能解釋創神星能擁有洛希極限外的行星環：2023 年 2 月，天文學家 Bruno Morgado Vik Dhillon 等人在 *Nature* 期刊發表了文章，內容為利用掩星現象發現了創神星 (Quaoar) 在洛希極限外存在緻密行星環，且這現象時都令他們感到出乎意料且不可思議。而同年 5 月份，同樣在創神星的洛希極限外發現了第二個環，這使科學界開始懷疑行星環系統的形成條件，於是就開始了我們的研究。

二、研究目的

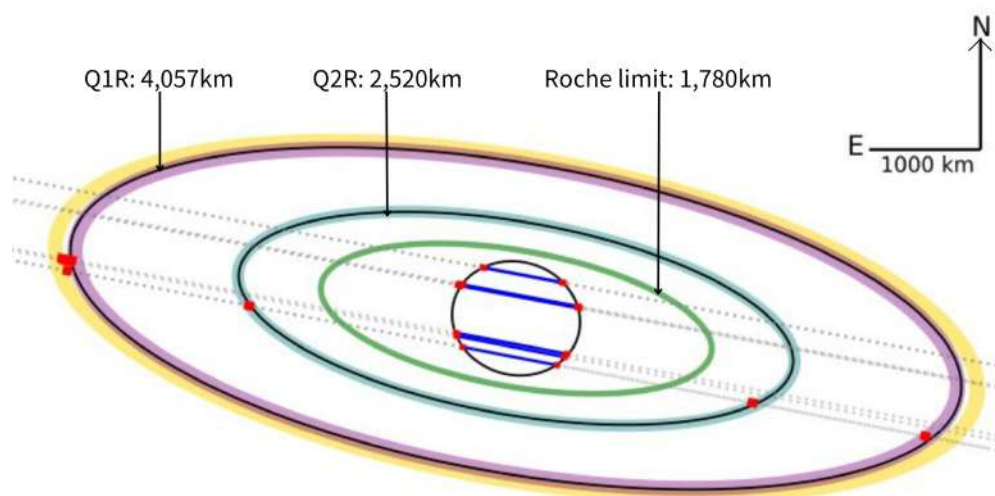
本研究旨在探究創神星 (Quaoar) 擁有洛希極限之外行星環的現象，意在釐清洛希極限理論是否存在例外或誤差。傳統上，洛希極限為一個天體受到另一個較大質量天體之潮汐力撕碎的最遠距離。然而，創神星行星環的存在似乎挑戰了此理普遍適用性，因此引發了我們對洛希極限概念本身的重新審視。

本研究將解答的主要疑問：

(一) 質量、密度對於創神星行星環與洛希極限的影響？

(二) 創神星衛星對於行星環形成的影響？

(三) 為何創神星能夠擁有位於洛希極限之外的行星環？



圖一 創神星的洛希極限與環圖示

(Source : C. L. Pereira, B. Sicardy, B. E. Morgado, et al. 2023)

三、 文獻回顧

B.E Morgado 等人發表之 “A Dense Ring of the Trans-Neptunian Object Quaoar Outside Its Roche limit” 一文為本研究的起源，以下希望能客觀審視此文，並與本研究相連結，提出新研究方向。

(一) 方法評估

1. N 體運動模擬

該文章透過模擬環的動力學行為，並分析粒子碰撞如何影響環的穩定性。這些模擬考慮了創神星的潮汐力、重力作用及與創衛一的軌道共振。第 15 頁處摘述 “since we are only interested in the onset of accretion, not the subsequent growth or mutual evolution of the aggregates”，儘管粒子運動模擬提供了重要見解，但其中卻忽略了演化對環系統形成的影響，這意

味著可能會難以預測環系統長期行為。因此，未來研究應當進一步模擬粒子聚集後的增長與能量耗散過程，輔以觀測，更有助於理解創神星行星環能在洛希極限外長期穩定存在的原因。

2. 數據分析

該文章結合了統計建模、光變曲線分析以及對不確定性的仔細考量，數據分析依賴初始假設和參數設定，這些研究對於解釋創神星的觀測數據至關重要但數據分析依賴初始假設和參數設定，但是依賴附近的參考星進行校正引發了人們對數據分析中潛在偏差的質疑。

（二）貢獻

該研究提出了創新的發現並挑戰了現有的理論，使人們更注意小天體環系統的形成原理以及穩定性，為未來洛希極限公式修正等議題建下了基底。

貳、研究方法或過程

因為創神星的行星環在洛希極限之外，若要了解其原由，首先，我們要先透過參考文獻來取得創神星的各項數據如體積、密度、質量、半徑以及與環的距離，獲得以上的資料後，可以計算出創神星的洛希極限的距離，因為以洛希極限的理論必須要以上數值才可以計算出其洛希極限。當算完後假如其實際數值是符合環該有的位置，那代表有可能是天文學家在當初計算時可能出錯了(可能性不大)，若算完後發現環的位置仍不符和洛希極限，我們會利用假設的方式來去推斷其形成的合理原因，再進行驗證，以下為我們將進行驗證的假設：

一、洛希極限錯誤

(一) 假設創神星質量錯誤：若要符合洛希極限，因為創神星在 21 世紀才被發現，且其數值也經常在修正，所以有可能是其實際質量是錯的，並且可以透過計算可得出一個新的質量，再透過各種方法去驗證 這種情況發生的機會多大。

(二) 假設創神星內部密度分布不均：若創神星不算是全部剛體，那公式就不能用剛體的公式去計算，代表著現在計算出來的洛希極限是有誤的，我們可以透過調整變因去確認在何種情況下這個環的位置是合理的，再透過現有的文獻來去推斷有的可能性多大，況且已經有發現創神星有冰火山這個特徵，讓這個假說的可能性比較大。

二、行星環非受潮汐力撕碎形成

(一) 假設其行星環不夠黏導致無法變成一顆衛星，所以只是個環：要形成環也要能夠讓物質全部聚集在一起，若其無法聚集在一起而是散狀的就會只是個環而已，所以根本不算洛希極限之外。

(二) 假設其行星環的形成與洛希極限無關：到目前為止，行星環的形成原因一直存在著許多的可能，例如土星環的行成原因也尚未被確定，所以也許創神星只是剛好把太空中的一些小碎石吸引住了進入了軌道，而開始以圓周運動方式繞著創神星，就像小行星帶以廣義的角度來說其實可以算太陽的一個環，但明顯不是因為洛希極限造成那個位置的行星分崩離析。

參、研究結果與討論

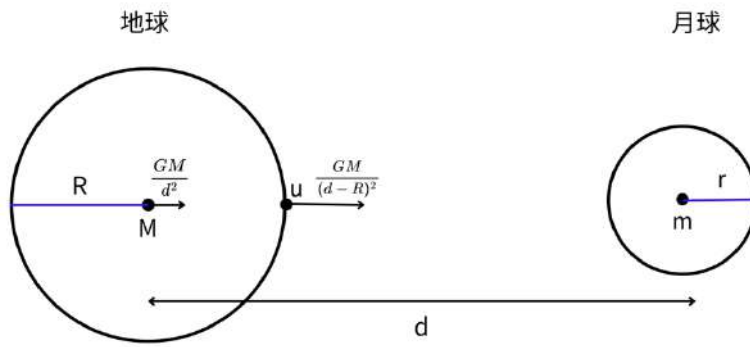
一、研究結果

(一) 計算創神星的洛希極限

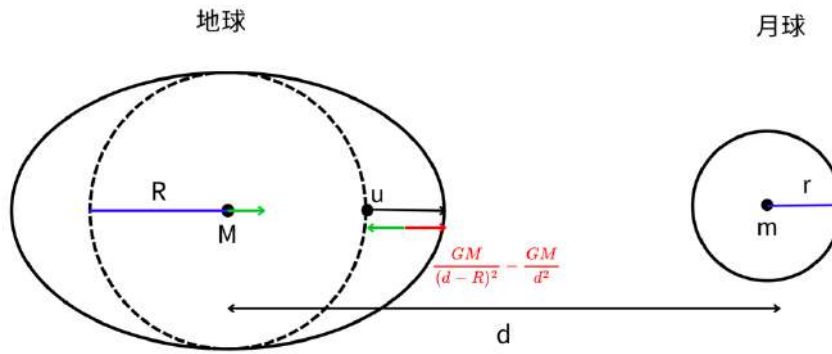
1. 理論公式推導

洛希極限是一個天文上的專有名詞，主要應用在解釋行星環是由潮汐力造成的現象。而用簡單的方法來描述，就是某天體自身的引力小於其他星球對它造成的潮汐力，此時代表著這顆天體無法抓住自身的物質，就會分崩離析，因此洛希極限的公式推導會用到潮汐力公式。

以地球海水潮汐為例，潮汐力公式的推導如下：如圖二，假設地球質量為 M ，半徑為 R ，月球質量為 m ，半徑為 r ，月心與地心距離為 d ，潮汐力可拆解為重力場產生的萬有引力及萬有引力產生的慣性（離心）力（因此潮汐力需要用到萬有引力公式）。而用具體的方式來說明的話，當地球被月球產生的潮汐力影響，此時海洋會受力而拉向月球，同時地球也受月球吸引，所以也會靠近月球。又因為加速度等於力除以質量，所以加速度在這裡可視為地球每單位質量受月球吸引的力。若只看月球吸引到的海洋來看(u 點)，這個加速度為地球質量與重力加速度的乘積 (MG) $\div$ 月心和地球表面的距離平方 $(d-r)^2$ ，而地球移動的加速度為地球質量與重力加速度的乘積 (MG) $\div$ 地心和月心的距離平方 (d^2)，而因為地球也靠近月球，所以海洋受力的影響相對而言會變小，而實際上海洋受到的潮汐力為前者減後者，如圖三，再透過數學的移向和化簡，就可以得出潮汐力的公式 (Chiu-king Ng, (n.d))。



圖二 地球質心與海水 u 點受到月球引力的加速度（作者自繪）

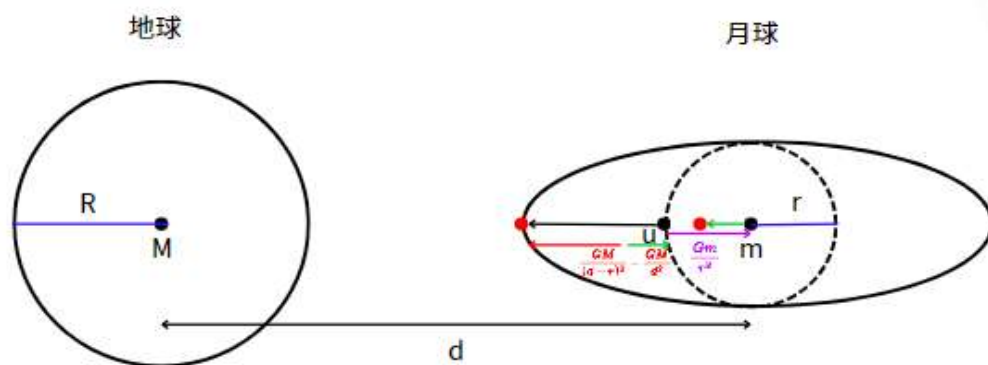


圖三 海洋受到的潮汐力加速度（作者自繪）

$$\begin{aligned}
 F_u &= \frac{GM}{(d-R)^2} - \frac{GM}{d^2} = GM[(d-R)^{-2} - d^{-2}] \\
 &= GM[d^{-2}(1 - \frac{R}{d})^{-2} - d^{-2}] = \frac{GM}{d^2} [1 + \frac{2R}{d} - 1] \\
 &= \frac{2GMR}{d^3}
 \end{aligned}$$

洛希極限公式推導如下：假設地球質量為 M ，半徑為 R ，密度 ρ ， M ，月球質量為 m ，半徑為 r ，密度為 ρ_m ，月球表面有一個離地球最近的點 u ，因為洛希極限主要算的是當月球在某個距離（洛希極限）內，表面的物質受到地球的潮汐力較月球自身對表面物質的萬有引力大時，其物質無法被自身的引力抓住，

而分崩離析。若地月距離數值小於 d (洛希極限)，月球就會分崩離。所以透過這兩力大小的相等可以列一個等式：



圖四 海洋受到的潮汐力加速度 (作者自繪)

$$\frac{2GMr}{d^3} = \frac{Gm}{r^2}$$

$$d = r \left(2 \frac{M}{m} \right)^{\frac{1}{3}}$$

可以把質量換為體積乘密度，並帶入上式，再化簡後即能改寫洛希極限公式。

$$m = \frac{4}{3} \pi \rho_m r^3$$

$$M = \frac{4}{3} \pi \rho_M R^3$$

$$d = r \left(2 \frac{\rho_M R^3}{\rho_m r^3} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = R \left(2 \frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{3}}$$

根據以上公式，洛希極限 d 與兩天體的密度 ρ_m 、 ρ_M ，以及較大天體的半徑 R

相關。

2. 創神星與其衛星的基本數值 (B. E Morgado.2023)

(1) 創神星 (Quaoar)

平均半徑(km)	質量 (10^{21}kg)	自轉週期(hrs)	環半徑 Q1R (km)	環半徑 Q2R (km)
555	1.2	8.8494	4,057	2.520

(2) 創衛一 (Weywot)

赤道半徑 (km)	半長軸 (km)	軌道週期 (days)	偏心率
40 ± 5	13.289	12.4311	0.14

3. 創神星密度計算

將創神星簡化為正球體，即可利用已知平均半徑求球體體積，而後質量除以體積即為創神星密度。

$$V_{\text{Quaoar}} = \frac{4}{3}\pi R^3 = 716,089,917,070,277,000(\text{m}^3)$$

$$\rho_{\text{Quaoar}} = \frac{M}{V_{\text{Quaoar}}} = \frac{1.2 \cdot 10^{21}}{716,089,917,070,277,000} = 1,675.767207(\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$R=555000(\text{m})、M=1.2 \cdot 10^{21}(\text{kg})$$

4. 剛體洛希極限 (ds) 與流體洛希極限 (dl)(公式：Édouard Roche)

$$d_s = R(2 \frac{\rho_{Quaoar}}{\rho_m})^{\frac{1}{3}} = 555 \sqrt[3]{2 \cdot \frac{1,675.767207}{400}} = 1,127.251652(km)$$

$$d_l = 2.44R(\frac{\rho_{Quaoar}}{\rho_m})^{\frac{1}{3}} = 2.44 \cdot 555 \sqrt[3]{\frac{1,675.767207}{400}} = 2,183.068559(km)$$

設較小天體的密度 $\rho_m=400\text{kg/m}^3$ (B. E. Morgado, 2023) ,

由剛體及流體洛希極限的計算，可知創神星的洛希極限約介於 1,127.3km 到 2,183.1km 之間，創神星質量與密度會影響到其洛希極限之值，而創神星已知的兩個環 (Q1、Q2) 確實存在於其洛希極限之外，可推測環可能在形成後受外力影響 (例如軌道共振)，或是形成原因和潮汐力並無關聯。

5. 推算是否能透過調整創神星密度讓創神星環合理

根據我們的調整密度後計算，當創神星平均密度為 $78,120.7 \text{ kg/m}^3$ ，洛希極限約為 4,057km，就是創神星與第一個環的距離，然而目前人類尚未發現任何密度這麼大的物質，因此創神星不可能達到此質量

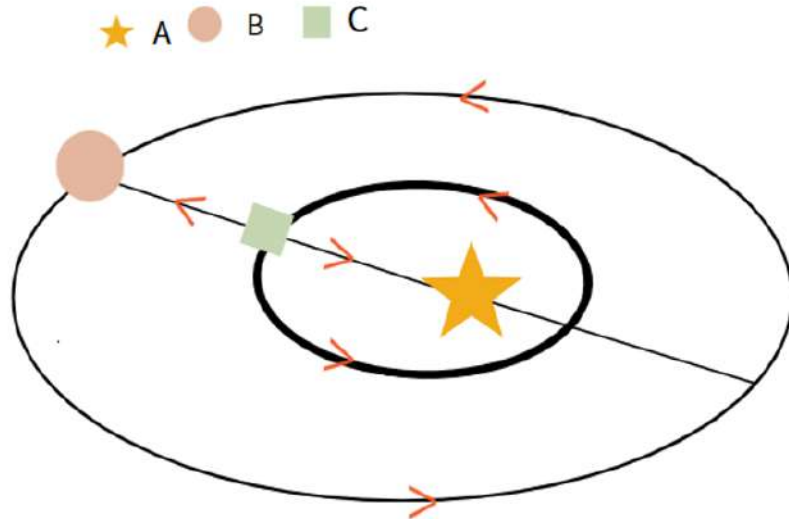
(二) 透過軌道共振解釋

1. 透過軌道共振解釋 (Newton. 2009)

軌道共振就是由於星體之間的互相影響，改變天體的軌道半徑，使星體相遇時機能在對稱軸上，也能讓星體在軌道上運行時能夠更加穩定，以下為我們透過假設的情況來解釋軌道共振的過程。

首先假設有個恆星系統，如圖五，中間的質量較巨大的恆星為 A，外圍有兩個行星 B 和 C，C 質量與體積和軌道半徑都小於 B，代表相較 C 容易受到 B 的影響，且 B 與 C 有不固定週期比例的軌道共振。當三個天體位於圖中的直線上時，由於 B 對於 C 施的力與 A 對 C 的力在同一條線上，計算角動量

($rmv\sin\alpha$) 時需要用到的 $\sin$ 角度為 0 度或 180 度，代表其值為 0，也代表著沒有力臂，因此並不會產生任何角動量，且 B 的質量小於 A，代表 A 對 C 的力大於 B 對 C 的力，因此在此線上上 C 軌道不受到 B 的影響。

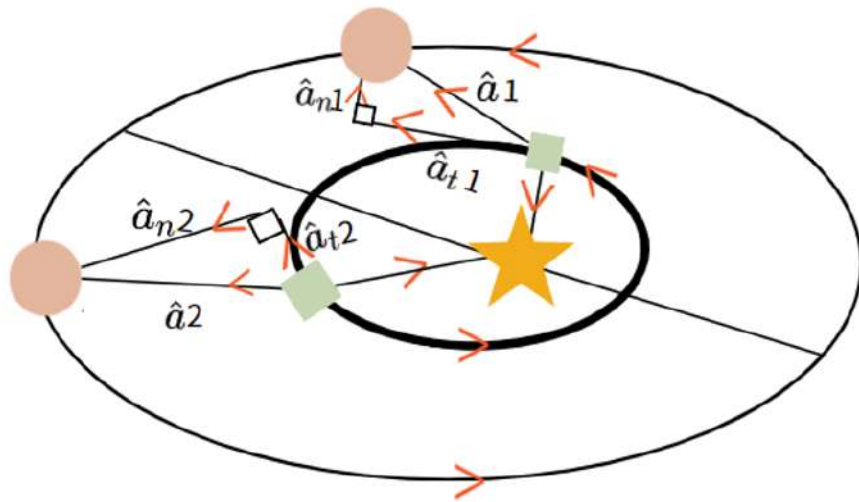


圖五 三星體在同線上角動量為零 (作者自繪)

當三星體並未在同意一條線上，參考圖六，此時 B 對 C 的影響會有力臂，B 的引力就會對 C 產生角動量，會增加 C 在原本軌道上的切線速度。若兩者相對於時機在對稱軸前，會使 C 的軌道半徑會再拉長一些，我們可以將 B 對 C 造成的力轉換成兩個分力 C 的切線方向分力 $\hat{a}_t$ ，以及法線方向的分力 $\hat{a}_n$ ，這兩的向量相加，則是合力 $\hat{a}$ ，而之所以我們以加速度 a 表示，因為 a 就是力除以質量，代表著每單位質量受的力。

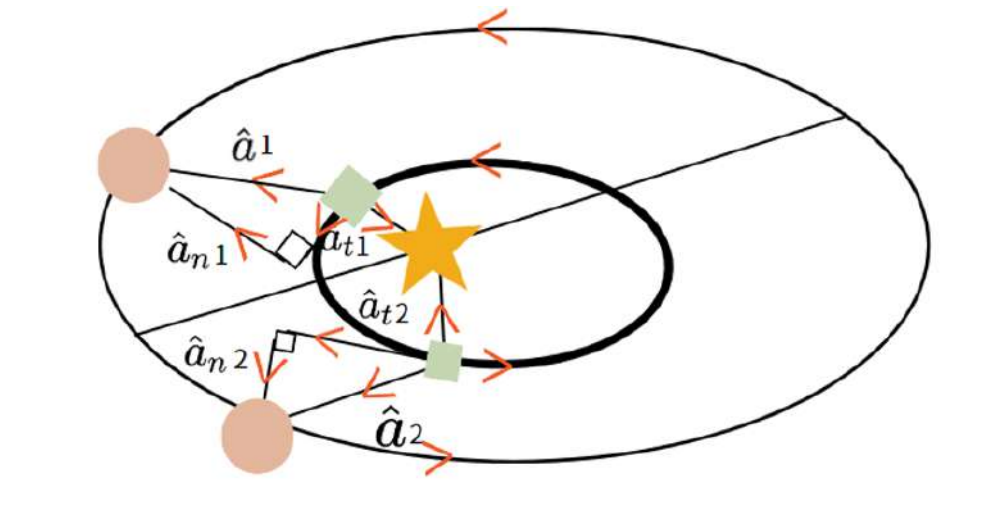
透過分力可以更清楚的表現出 B 對於 C 的軌道會有怎樣的影響，如圖六，我們可以看到 B 的力在線前時，會有與 C 切線加速度同方向的力 $\hat{a}_{t1}$ ，但過了線時會有切線加速度反方向的力 $\hat{a}_{t2}$ ，但 $\hat{a}_{t1}$ 的數值會大於 $\hat{a}_{t2}$ ，這代表著總和下來的力，是會增加 C 的切線方向速度的。

透過角動量公式 $rmv\sin\alpha$ ， r 是軌道半徑， m 是質量， v 是速度，而 α 是 90 度代表 $\sin$ 值為 1 可省略不計。當質量是固定，速度 v 上升時， c 就會往多切線方向多移動一些，這會讓軌道半徑增加，根據克普勒行星運動第二定律，半徑 r 越大，速度 v 就會越小，在這樣相互抵消下，速度 v 其實沒變很多，反而是半徑 r 增加。若是持續發生我們假設的此情形， C 就會明顯的被 B 向外拉出去，代表 C 的軌道半徑和週期逐漸增加。



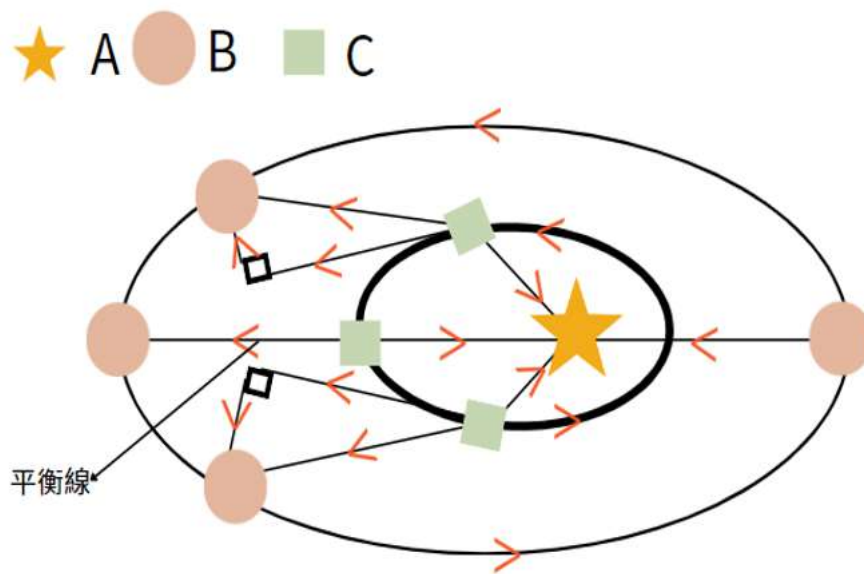
圖六 增加 C 切線方向加速度分力示意圖 (作者自繪)

若是情況剛好相反的情況下，如圖七，與前者相反的是兩者相遇時機在對稱軸後，此時 a_{t1} 會小於 a_{t2} ，對比之下，整體的力主要為與切線加速度反方向的力，變成 C 軌道半徑及週期變小，而天文相關的影響大部分都需要較多的時間，才能有顯著的影響，軌道共振也是。



圖七 減少C切線方向加速度分力示意圖 (作者自繪)

若在此系統不受外力影響的情況，B 會持續對 C 造成不小的影響，且相對人類來講算是一個較長時間的現象，若當兩天體影響的時間足夠長後，天體相遇的時機，就會軌逐漸偏向軌道之對稱軸，在這種情況下，B 和 C 有個穩定的、最簡單整數周期的軌道共振，如圖八，在對稱軸上由於兩天體與 A 連成一線，並不會產生力臂，也就不會有角動量，但在對稱軸之前與之後 B 對 C 產生的角動量會剛好相等，但方向會相反，B 對 C 的影響就會因此互相抵銷，這代表著 B 對 C 不會有任何影響，反之還增加了 C 的穩定度。由於現實會需要加入更多變因，會產生其他現象，這裡就僅先談論假設的情況。



圖八 平衡線前後受力相等方向相反 (作者自繪)

2. 創神星的衛星如何影響環

由於柯伊伯帶的星體材質相去不遠，因此我們假設創衛一的密度也是

400kg/m^3 ，而創衛一的體積約為創神星的 12 分之一，因此質量也是創神星的 12 分之一。

$$10^{20}G \div 14500^2 = 3.175 \times 10^{18}$$

要計算環的環的重量時，可以利用重心以方便計算，而此重心位置與創神星不遠，因此假設環軌道為正圓，那創衛一軌道半徑 r 及為，創衛一與環重心之距離。先假設創衛一質量為 M ，環總質量為 m ，透過萬有引力公式

$$F = \frac{GMm}{r^2} = ma$$

此時的 a 會是創衛一對換造成的加速度。

$$a = \frac{GM}{r^2}$$

$$10^{20}G \div 14500^2 = 3.175 \times 10^{18}$$

而環與創衛一的軌道實際上為橢圓，而橢圓造成的半徑差質，影響引力的
大小，很有可能為造成環由洛希極限內移動到洛希極限外的原因。

而環與創衛一的軌道實際上為橢圓，而橢圓造成的半徑差質，影響引力的
大小，很有可能為造成環由洛希極限內移動到洛希極限外的原因。

創神星衛星 Weywot 對行星環的影響，就是引力所造成的軌道共振，如以
上軌道共振原理解釋，若要細分軌道共振可能造成的影響，在搜尋相關資料
後，我們統計的可分為下列幾種情況：

- (1) 若兩個星球因為，軌道共振造成增加的角動量與減少的角動量能夠互相
抵銷，因此能夠使天體軌道穩定，像天王星與海王星。
- (2) 因為易堆積大量的小的天體粒子或碎片，增加了物體碰撞的機會，因而
增加了不穩定性，如小行星帶的柯克伍德空隙與土星環。
- (3) 還有一種是碎片形成了衛星之類的較大天體，吸走了周圍物體，清空了
軌道，土星環與衛星。

而依照我們查到的資料中 (B. E. Morgado (2023))，發現行星環與衛星有
1/3 自旋軌道共振 (SOR) 和內部 Weywot 6/1 平均運動共振 (MMR)等，
且目前看來這會使行星環碎片能夠待在目前的軌道當中，是由於軌道共振會
增加碎片運動速度，這有可能把原本在洛希極限內的環，因運動速度增加脫

離了原有軌道，逐漸向外接近現有的軌道，而軌道共振的不穩定性，可能造成了原本只有一的行星環被影響逐漸分為兩個行星環產生環縫，或是創神星和 Weywot 之間的引力差異，也能間接增加碎片間的距離，加上加上創神星環之碎片並不大，無法有足夠的近的距離與質量來產生吸積作用，此環碎片無法聚集成為衛星，再加上許多像似案例的比對，更能確定衛星造成的影響。

(三) 比較相似環系統之案例

我們期望透過一些相似之案例，不僅有利於增加我們對於天體運行的的一些相關知識，還能透過相似之處，幫助我們更容易去找出，創神星環能夠在洛希極限外的相關因素，甚至是有利於此研究之的證據。

1. 土星的佛碧環

佛碧環和創神星環都是穩定存在洛希極限外的環。佛碧環最初在土衛九佛碧 (Phoebe) 的軌道平面內側被發現，環的視直徑很大，在土星的洛希極限外，達到兩個滿月的大小，但從地球上幾乎看不見，從觀測上看見整個環的範圍，從土星半徑的 128 倍延伸至 207 倍，從計算上顯示這個環可以向外延展至土星半徑的 300 倍，土衛九佛碧以逆行環繞土星，它的軌道和 E 環附近的衛星都不一樣。



圖九 卡西尼號拍攝的土衛九 (Phoebe)

(Source: NASA / JPL-Caltech / SSI)

它們奇怪的軌道讓天文學家懷疑它們並不是與土星一起形成的，而是被捕獲的流浪天體，半人馬座甚至柯伊伯帶天體。土衛九因其體型而被觀察到，它直徑 215 公里，是唯一被太空船近距離觀測到的。只需看土衛九佛碧一眼就能發現，由於與其他較小天體的多次撞擊，很多東西都被炸飛了。所以基本上就能斷定，就像 土衛五十三埃該翁 (Aegaeon) 的軌道上有物質形成 G 環一樣，土衛九佛碧的軌道上也應該有物質形成環。



圖十 佛碧環範圍示意圖

(Source: NASA / JPL-Caltech / SSI)

Verbiscer 和他的共同作者預測可能存在這樣的環。但佛碧環的軌道大得令人難以置信，以至於這個「環」稀疏得不可思議。如此稀疏的環，導致於卡西尼號的儀器儘管很出色，但無法將環視為黑色空間中的任何物體。但因為史匹哲望遠鏡工作在波長為 3-180 微米的紅外線波段，Verbiscer 和他的同事們得以使用史匹哲太空望遠鏡，的多波段成像光度計(MIPS) 在 24 微米和 70 微米的波長下，沿著土星黃道面從土衛八伊阿珀托斯(Iapetus)軌道一直到 400 倍半徑的幾個不相連的位置對該區域進行成像。(右圖顯示了史匹哲觀測覆蓋了 128 到 180 倍半徑的區域。)

他們發現了一個跨越土星半徑的 128 倍延伸至 207 倍區域的觀測中發現的。

在以外的衛星土衛二十四基維尤克(Kiviuq) (153 半徑) 和土衛二十一特弗斯(Tarvos) (180 半徑) 為中心的小範圍照片中也可以看到它。在以土衛九佛碧(Phoebe)為中心的 220 倍半徑觀察中，它的存在是模稜兩可的。在以 400 倍半徑為中心的觀察中沒有任何存在的證據。結合所有這些觀察結果，可以肯定地識別出 128 到 207 倍半徑之間的環的存在，儘管其範圍可能更大。根據史匹哲望遠鏡的觀測結果，環覆蓋了 128 倍到 180 倍的區域。並且據觀察，環的垂直厚度約為 40 倍半徑，它的強度是一個奇怪的雙峰——也就是說，它並不是在土星赤道上最厚，而是看起來像漂浮在土星赤道上方和下方的兩個環。

所以到底為什麼在洛希極限外形成這麼大的環？並且為什麼這麼少見？為什麼沒有存在月球軌道上的環？主要原因是在這麼大的軌道中，土衛九佛碧的質量太小了，以月球來說，大多撞擊到月球的物質幾乎都會立即返回月球表面，所以月球軌道上沒有這種細小的環。(Lakdawalla , 2009)

2. 土星的 F 環及其牧羊犬衛星

(1) F 環的基本特徵

a. 位置與尺寸

1979 年，NASA 的先鋒 11 號於距離土星 A 環外側約 3400 公里處發現了環，並將其命名為 F 環，位置極其接近土星的洛希極限(半徑約 147,054 公里)，寬度約 30-500 公里，厚度約 100 公里，如此大範圍的寬度也顯示著環的不規則性。

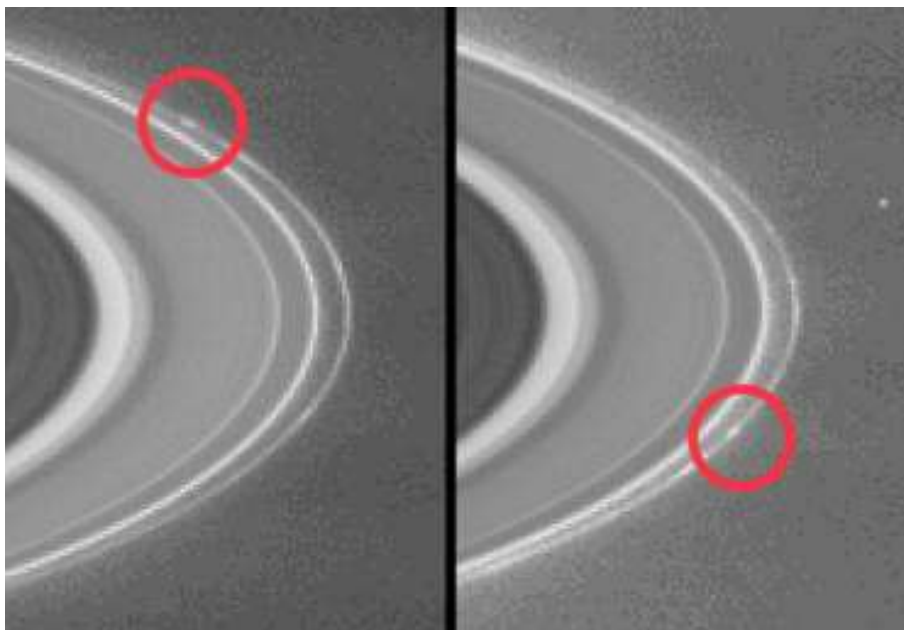
b. 結構特點

圖十一中可見 F 環擁有多條扭曲、相互糾纏的環，其核心的環寬約 50 公里，且其中有「結」(圖十二)，這些像打結一樣的構造是體積較環粒子大的團塊。值得注意的是，根據 NASA 旅行者號在 1980 年和 1981 年飛越土星的數據，這些團塊在 30 天內的變化很小，科學家能夠追蹤其穩定的軌道運動，但在第二艘旅行者號觀測時，發現沒有任何第一次觀測到的團塊存留，這可能表示雖然這些團塊在短時間內相對穩定，但在更長時間的尺度下，會發生顯著的變化，科學家對此尚未有定論，提出的解釋包含流星撞擊和 F 環內粒子碰撞等。



圖十一 不規則的 F 環

(Source: NASA's Cassini-Huygens)



圖十二 F 環中有許多「結」，由結的位置改變可知其運動方向

(source: NASA's Cassini spacecraft)

c. 動態性質

F 環被認為是太陽系中活動最活躍的行星環，主要是因為在他附近的土衛十六 (Prometheus) 和土衛十七 (Pandora)，間歇性的、像個牧羊人一樣守護著 F 環，透過引力作用維持著 F 環內的碎屑，土衛十六有時甚至會穿過 F 環的一部分，在環上留下溝痕與小噴發 (mini-jets)，而這些受到撞擊的環粒子有可能再度撞擊環，形成連鎖反應，造就了如此多變的環結構。



圖十三 Mini-jets

(Source: NASA's Cassini spacecraft)

(2) 創神星環系與 F 環的比較

a. 碰撞動力學

創神星環含有大量大於 $10\text{ }\mu\text{m}$ 且密集的粒子，因此粒子之間經常發生碰撞，使得軌道粒子分布不均且大小不均，這點與土衛十六撞擊環的現象類似，同

樣是透過碰撞在混亂中造成行星環持續的變化，透過持續的影像追蹤也許能找到規律。(Jeffrey n. Cuzzi. (2024))

b. 衛星的軌道共振

創神星已知擁有一顆平均軌道半徑 14,500 公里的衛星，名為創衛一

(Weywot)，此衛星與創神星已知的兩環間有許多類型的軌道共振，如一階林達博共振、外部 Quaoar 1/3 自旋軌道共振 (SOR) 和內部 Weywot 6/1 平均運動共振 (MMR)等，而與 F 環共同的共振類型是一階林達博共振 (Lindblad resonance)，此類共振會對環粒子施加力矩，使環粒子逃逸，形成環縫，我們認為這是創神星之所以有兩個半徑相去不遠的環的原因。此外，一階林達博共振還會使軌道偏心率增加，環粒子與土星的距離發生更大的變化，整體將變得更不穩定，在 F 環上即可見如此混沌的特性，此觀察可作為創神星環演化的推論。

3. 小行星帶與木星軌道

在查找完資料後，我們發現創神星環的例子也跟小行星帶有許多的相似之處。

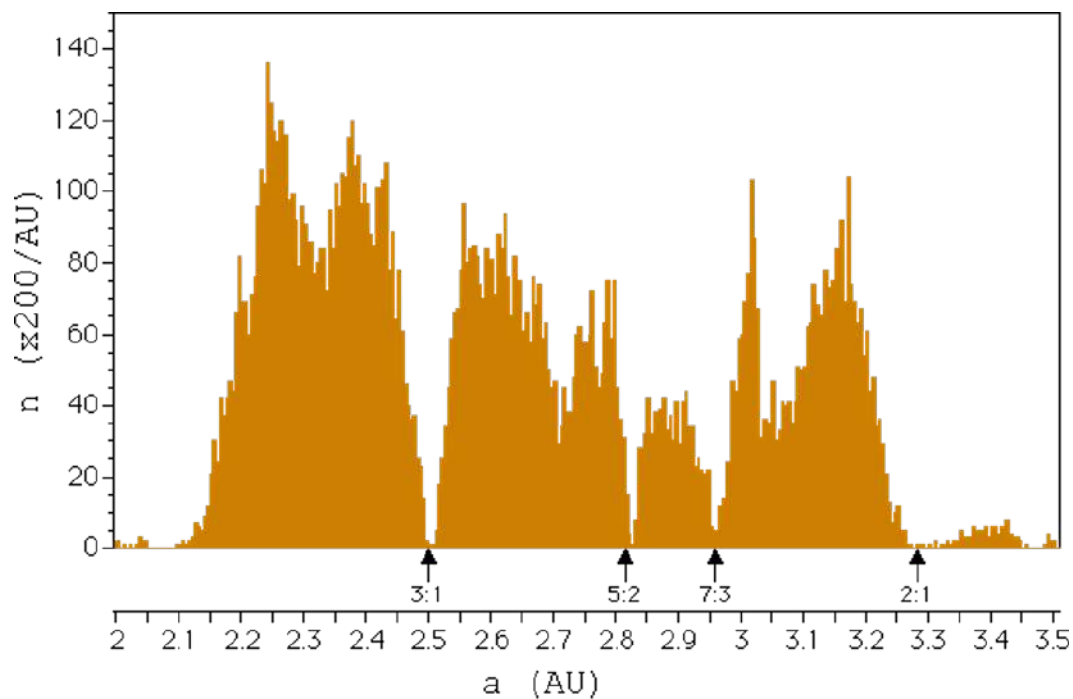
(1) 小行星帶基本資訊

a. 太陽系之位置

小行星帶是位於火星與木星之間的密集區域，主要由岩石與金屬組成，最早在 1802 年被發現首顆小行星，後期因為並未形成一個行星，引發了許多科學家對小行星帶的研究。

b. 主要形成原因及受到的影響

小行星帶主要受到木星影響干擾，產生軌道共振，也由於粒子間會產生碰撞，加上強烈的攝動阻止其成為行星；柯克伍德空隙明顯的將小行星帶分割成三個區域：第一區是 4 : 1 (2.06 天文單位) 和 3 : 1 (2.5 天文單位) 的空隙；第二區接續第一區的終點至 5 : 2 (2.82 天文單位) 的共振空隙；第三區由第二區的外側一直到 2 : 1 (3.28 天文單位) 的共振空隙。



圖十四 軌道共振清空小行星帶

(source: NASA)

(2) 創神星環與小行星帶的比較

a. 粒子與碎片間都有縫隙

創神星環目前已知有兩個環，代表環間有縫，而小行星帶也有著名的柯克伍德空隙，這讓我們可以透過研究柯克伍德空隙，助於我們找到創神星環縫的可能形成原因。

b. 都能成為一個星體

兩者都能因為碎片的堆積，成為一個星體，卻都受到其他天體的影響，最終沒成為一個星體，如小行星帶受到木星影響，若僅看太陽、木星及小行星帶，其實很像把創神星系統放大，因此我們也可以透過此現象，幫助我們的研究。

c. 都受鄰近之天體影響

兩者都與周圍星體有軌道共振，創神星環與創神星和衛星都擁有著軌道共振，而小行星帶也與木星有許多軌道共振，而小行星帶已經確定軌道共振造成的影響，若探究木星對小行星帶的影響，也許對於我們的研究有些益處。

二、 討論

（一）限制與改進空間

1. 變因過多

因為在天文學中本來就存在著許多的變因，可能不止一種原因導致此異常現象，但由於目前能查詢的資料有限，我們人類的天文物理知識可能還不足，加上我們目前能力也有限，也許哪天我們有足夠的能力，或許就能綜合所有變因來解決這難題。

2. 設備限制

由於創神星位於柯伊伯帶，是個較難觀測的星體，因此我們無法透過學校的天文望遠鏡觀測，才去自行計算體積質量相關數據，僅能找尋現有資料來進行我們的研究

3. 題目過新

由於此題目較新，還有許多事情可能是現在我們人類還沒發現，因此未來創神星各種相關問題都還存在著變數。

4. 數據資料取得困難

原本計劃使用 Planetary Data System (PDS) 從頭獲取數據，但分析這些數據需要使用 Python、MATLAB 等軟體，且科學檔案格式如 FITS、PDS3、PDS4，現階段我們資源學習與理解。

(二) 未來可研究之方向

1. 光變曲線分析

光變曲線是天體亮度對時間的函數圖形，是人類從地球上得知衛星與環系統存在的重要工具。透過掩星現象，分析星體亮度變化週期，進而推論變星或小天體的自轉週期。科學家觀察發現，在創神星這個小天體經過恆星正前方的之前和之後，恆星光線變得黯淡，這代表著有星環遮住了光線，可見創神星環也正是透過掩星作用所發現。對於本主題來說，利用創神星表面不規則的特性，它在自轉時反射至地球的亮度會不同，我們可以使用光變曲線來

分析創神星的自轉週期，能更深入的探討創神星 1/3 自旋軌道共振，以及自轉週期對於創神星赤道引力場的影響。

2. 探討柯伊伯帶天體環系的普遍性

一般來說，行星環被認為是大行星的特徵，而在查找創神星資料的過程，看到了與創神星同為柯伊伯帶小天體的 Chariklo 和 Haumea，也擁有著行星環系統，這引發我們思考，我們可以從環可能的形成機制，如較大的撞擊導致表面物質被拋射到軌道上、捕獲外部物質形成環系，以及天體靠近洛希極限導致的分崩離析，推算行星環的穩定性與未來演化。創神星存在洛希極限外的環在目前看來屬於例外，但也許未來能發現更多小天體環系統的案例，證明洛希極限之概念無法成為行星環形成的必要條件，進而找出修正方法。

肆、結論與應用

經過洛希極限計算、軌道共振解釋、相似環系統比較，我們認為創神星環存在於洛希極限外的原因如下：

- 一、創神星環原本是位在洛希極限內的一個環，主要受到了創神星與衛星 Weywot 軌道共振的影響，逐漸受到週期性引力產生的角動量，導致軌道逐漸遠離了創神星。依照目前物理及數學計算方法中，會將環的質量全部放在環的中心點，把環當作一個天體以方便做運算，因此我們透過研究結果中對於軌道共振解釋的方式，再加上把環當作一個在環中心位置的天體，然後畫出創衛一對於環的力臂以及向量，推估創衛一對環造成影響的運行過程。而尚未成為衛星的原因，不僅僅是因為軌道共振拉開碎片間的距離，影響吸積作用，碎片的大小及質量也是影響著變成衛星的關鍵的因素，若碎片的體積與質量不夠大，碎片間的距離太遠，導致沒有足夠的引力，因此減緩吸積作用，進而導致創神星環能待在洛希極限外，若目前軌道共振達到了平衡點，有可能環就會固定在此位子，反之則軌道半徑有可能會再繼續擴大或減少。
- 二、創神星環本來就不在洛希極限內，由於柯伊伯帶本來就存在大量碎片，加上創神星的質量和大多碎片質量差距懸殊，所以現在的環僅為創神星自身吸引過來的碎片塵埃，與洛希極限撕碎的衛星無關，以佛碧環的例子來說，由於其環粒子大部分都只是塵埃而已，其粒子質量小到僅微小的太陽輻射壓力都能干擾環的運行，高機率是環粒子過於小，加上可能存在的軌道共振穩定，使環可以穩定的待在現有軌道並不成為衛星。而這樣的環雖然不常見，但是土星的佛碧環也穩定存在洛希極限外。環的存在位置在洛希極限外並不違反洛希極限，只能證明環的成因和洛希極限理論無關。

伍、參考文獻

一、網頁

Asthenosphere (Ed.). (2019, February 16). 用於計算洛希極限的公式是怎麼推導出來的呢？ 知乎. <https://www.zhihu.com/question/311902759>

二、電子期刊與論文

陳徵. (2016). 利用橢圓限制性三體運動模擬土星 F 環與牧羊犬衛星普羅米修斯的重力與碰撞交互作用.國立中央大學天文研究所

B. e. Morgado. (2023). A Dense Ring of the Trans-Neptunian Object Quaoar Outside Its Roche Limit. *Nature*, 614, 239–243.

<https://www.nature.com/articles/s41586-022-05629-6#citeas>

Bob Yirka. (2023, April 28). Second Ring Found around Dwarf Planet Quaoar. Phys.Org. <https://phys.org/news/2023-04-dwarf-planet-quaoar.html>

Édouard Roche: La figure d'une masse fluide soumise à l'attraction d'un point éloigné, *Acad. des sciences de Montpellier*, Vol.1 (1847-50) p.243

Renu Malhotra. (n.d.). ORBITAL RESONANCES AND CHAOS IN THE SOLAR SYSTEM. *NATURE*.

S. Fornasier. (2013). TNOs Are Cool: A Survey of the TransNeptunian Region.

Astronomy & Astrophysics, 555(7), 22.

<https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2013/07/aa21329-13/aa21329-13.html>

sthenosphere(Ed.).(n.d.).Tidal Forces-Let'er Rip!NASA.<https://spacemath.gsfc.nasa.gov/moon/5Page49.pdf>

Wesley c. Fraser. (n.d.). The Mass, Orbit, and Tidal Evolution of the Quaoar-Weywot System. <https://arxiv.org/pdf/1211.1016.pdf>

Wesley c. Fraser, & Michael e. brown. (2010). QUAOAR: A ROCK IN THE KUIPER BELT. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/714/2/1547/pdf>

Roger G Newton. From Clockwork to Crapshoot: A History of Physics. Harvard University Press. 30 June 2009. ISBN 978-0-674-04149-3.

Jeffrey n. Cuzzi, Essam a. Marouf, Richard g. French, Carl d. Murray carl d. Murray, & Nicholas j. cooper. (2024). Saturn's F Ring Is Intermittently Shepherd by Prometheus. Science Advances, 10.

Lakdawalla, E. (2009, October 14). The Phoebe Ring. The Planetary Society. <https://www.planetary.org/articles/2165>

三、其他

Chiu-king Ng. (n.d.). 海洋潮汐成因. Phy.Hk. <http://www.phy.hk/DSE/tide.pdf>

【評語】160008

本作品探討創神星行星環的成因，討論內容豐富，雖然其中想法均是學界已有，但是有很好的比較歸納。作者對於主題相關物理背景有很好的了解，建議未來能進一步提出區分結論中兩種不同可能性的方法。