

文/ 林省文

2I/Borisov的發現影像。彗星是圈圈中間的模糊星體。

© Gennadiy Borisov

影片：<https://in-space.ru/wp-content/uploads/2019/09/gb00234.gif>

星際天體與它們的產地

2019年的八月三十日, 業餘天文學家Gennadiy Borisov利用自製的65公分天文望遠鏡發現了一顆彗星。依據原始發現的影像, 這個彗星看起來平淡無奇。然而, 在接續的追蹤觀測中, 人們很快地發現到它的軌道偏心率異常的高: 大於3.3。

高偏心率代表什麼呢? 根據牛頓的萬有引力定律, 兩個天體因重力互相吸引, 而它們的軌道跟此雙天體系統的總能量 (重力位能加上動能) 有關, 可以是橢圓、拋物線或是雙曲線。如果我們定義兩個天體距離無限遠時的重力位能是零, 那總能量小於零時軌道是橢圓形, 偏心率會介於零 (正圓軌道) 與一之間。若總能大於或等於零, 天體不會走封閉的橢圓軌道。剛好是零的時候會是拋物線軌跡, 偏心率等於一。而在總能大於零的系統中, 天體走雙曲線軌跡, 此時偏心率大於一, 且兩天體無法互相束縛, 所以過了最接近的點之後, 將逐漸遠離而不復返。

Broisov發現的這個彗星的偏心率高達3.3, 是太陽無法束縛的天體, 它注定是源自於太陽系以外的星際過客。國際天文組織 (IAU) 旗下的小行星中心 (Minor Planet Center, MPC) 將其命名為2I/Borisov, 其中的2I是指第二個被命名的星際天體 (Interstellar object), 而第一個星際天體是在2017年發現, 著名的斥候星 (1I/Oumuamua)。

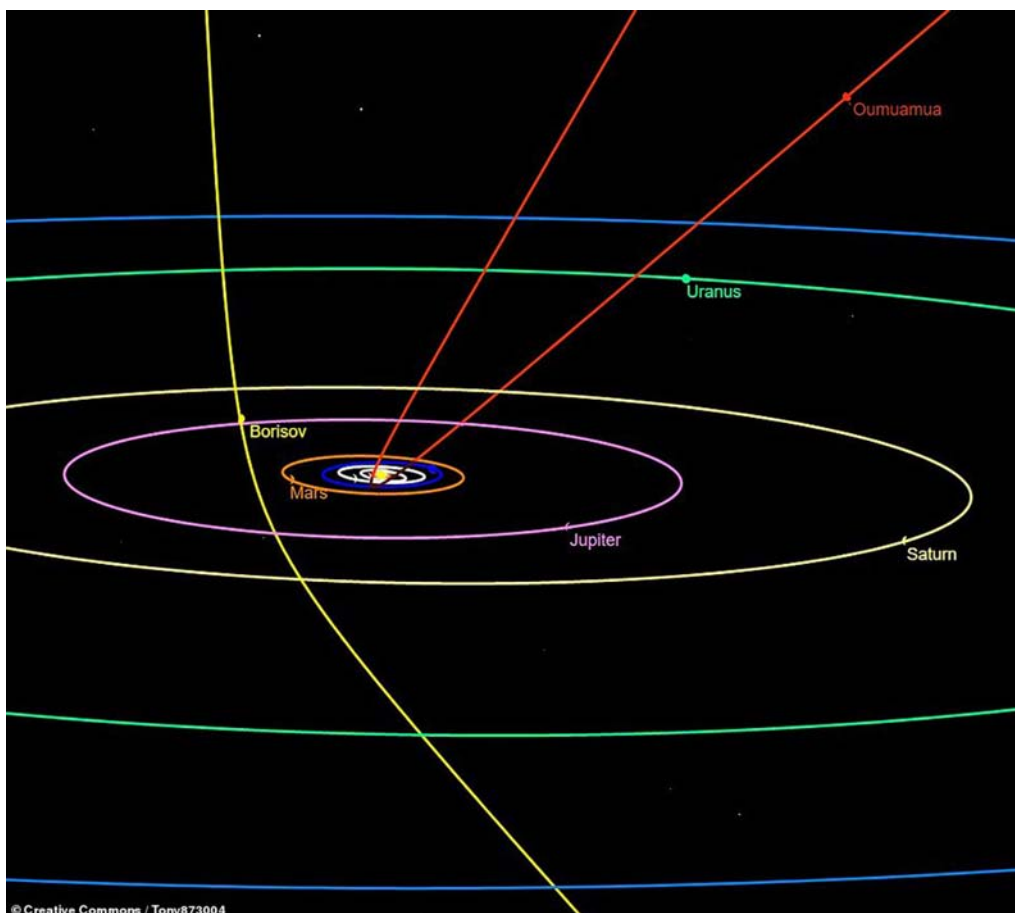
同為星際天體, 兩者參訪太陽系的路徑卻明顯不同。2I/Borisov是擦邊球, 在火星軌道外側通過太陽系。而斥候星則正中紅星, 直挺挺的進到太陽附近 — 最近距離僅0.255AU, 比水星更靠近太陽。前段提到當我們定義兩個天體的距離無限遠時重力位能為零, 雙體系統的軌道偏心率等於一時系統總能為零, 而大於一代表總能大於零。對於斥候星, 它的軌道偏心率是僅稍微大於一的1.2, 表示當斥候星還在距離太陽很遠的星際空間時沒有太多的動能, 比較像是靜靜的在遠處等待, 直到太陽夠接近

將它吸入太陽系。而2I/Borisov超過3.3的偏心率則代表2I/Borisov在進入太陽系以前就有很高的速度，更像是一開始就在星際空間中亂闖而誤入太陽系。

除了軌跡的不同，這兩個星際天體更大的差異在於2I/Borisov有顯著的彗星活動，但是斥候星沒有。這個差異或許跟這兩個天體的來源有關。要進一步了解星際天體的來源，我們必須由彗星與小行星的組成成分談起。

最初的宇宙就只有氫、氦與少量的鋰，我們呼吸所需的氧，組成生物所需的氮、碳，岩石中富含的矽、鐵與其他金屬都不存在。恆星的核融合反應開始大量的將氫氦融合成碳氮氧與原子量更高的矽、鐵之類的元素。而老化的恆星又以各種不同的方式化為氣體與星塵，將剩餘的氫氦與這些重元素釋放到星際空間，氣體與星塵又因重力聚集形成新一代的恆星。歷經了好幾代恆星演化與輪迴形成目前富含各種元素的宇宙。這些好幾代恆星產生的元素存在於各種物體，大至太陽系的行星，我們居住的地球，到生活周遭的花草樹木與你我之中，也包括了在太陽系中遊蕩的彗星與小行星。

彗星與小行星是恆星與行星形成後剩餘的物質，當然也包含了星塵中的元素。這些元素能存在於各種不同的分子中，比如說碳元素能與氫氧氮結合成化合物，形成甲烷、二氧化碳或是有毒的氰化氫（HCN）之類的分子，而氧能夠與氫結合成水，或與矽形成矽酸鹽，成為岩石的主要成分。雖然這些分子在極冷的太空中多以固態存在，但如二氧化碳、甲烷、氰化氫之類的分子沸點很低，只要稍微接近太陽就開始昇華為氣體。反之，矽酸鹽類的輝石橄欖石等礦物沸點極高，就算已經非常近太陽表面都有機會倖存。這些特性解釋了彗星與小行星的不同。太陽系主要的小行星存在於介於木星與火星軌道間的主小行星帶。這個位置已經足夠接近太陽，易揮發的分子無法以固體的型態保存在小行星表面。缺乏易揮發物質導致大部分位於小行星帶的天體沒有彗星活動。然而比木星軌道還遠的地方提供了不同的環境，在木星於海王星之間水能以水冰的型態存在。而在更遠更冷的海王星軌道之外，二氧化碳、一氧化碳、甲烷之類的分子也能以固體存在於小天體之上。如果某些原因使這些天體軌道改變近到溫暖的木星軌道內，這些以固體型態存在的



1I/Oumuamua與2I/Borisov軌跡的比較。 © Tony Dunn

動畫：https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/58/A_comparison_of_two_interstellar_objects_passing_through_our_solar_system.gif

易揮發物質開始昇華為氣體，而氣體帶出天體表面的細小塵埃成為我們所看到的彗星。

根據以上對於太陽系彗星與小行星的認識，我們可以對斥候星跟2I/Borisov的產生環境有些簡單的猜想：斥候星沒有大量的氣體，它在離開原恆星系之前可能處於較熱的環境，例如1. 待在如太陽系小行星帶的地方非常久，以至於易揮發物質消耗殆盡，2. 曾經非常靠近主恆星，3. 主星質量大溫度高。反之2I/Borisov可能來自於冷的環境，如1. 離主星較遠，2. 不曾或是極少接近主星，3. 主星質量小溫度低。

要進一步了解這些猜想是否正確，必須透過天文望遠鏡觀測取得更多的資訊。2I/Borisov有彗星活動，這些易揮發性分子受到陽光照射而光分解（Photodissociation）—分子受到光照射分解成離子，這些離子有可能會重組成新的分子。有些離子或分子受到激發產生電磁輻射，頻率由無線電波到紫外光，因此我們可以透過光譜觀測來了解2I/Borisov中含有的物質。然而斥候星沒有這些氣體分子而缺乏發射光譜，我們只能觀測其反射的太陽光來取得有限的資訊。

2I/Borisov不是個氣體豐富且活躍明亮的彗星，其彗核大小應不超過五百公尺。雖然如此，天文學家們透過大型望遠鏡還是有所收穫。最先被觀測到的分子光譜是位於近紫外光波段氰（CN）。後續又觀測找到了少量發綠光的雙原子碳（C₂，由碳氫化合物分解後組成。）、氨根（NH₂）與水存在的證據—離子態的氫氧根（OH⁻），都是太陽系彗星常見分子。就可見光與紫外光波段的觀測而言，2I/Borisov就像一個平凡無奇的太陽系彗星。但透過無線電波望遠鏡ALMA與哈伯太空望遠鏡觀測更高能量的紫外光後的觀測，天文學家們終於發現2I/Borisov與眾不同之處，含有比一般太陽系彗星更大量的一氧化碳（CO）。一氧化碳是一個極易揮發的分子。在太陽系裡，大概在海王星的軌道以內，固態的一氧化碳便開始昇華為氣態。

斥候星比2I/Borisov更小，雖然沒有彗星活動，觀測它表面反射光譜看來與彗星的彗核有些類似。而根據斥候星的自轉光變曲線，它有著很可能是細長的雪茄型或是扁平的鬆餅型，而且與其說自轉，更像是在太空中翻滾。不論是形狀或是旋轉

狀態，斥候星與一般的太陽系天體皆明顯不同。更離奇的是它離開太陽系的速度比預期的快，顯然有重力之外的作用力在影響。然而斥候星沒有彗星活動，沒辦法用氣體噴發來解釋重力之外的加速度。此外斥候星在遠離地球沒多久後已經沒辦法被紅外太空望遠鏡Spitzer偵測。與可見光反射太陽光不同，紅外輻射主要來自於斥候星本身，與它的大小與溫度有關，因此推測斥候星可能更比預期的更小，如此一來必須有更高的表面返照率使它能夠在接近地球的時候被可見光望遠鏡發現。

斥候星的怪異的形狀、高返照率與非重力加速確實使其來源難以解釋。因此天文物理學家Shmuel



藝術家想像的1I/ʻOumuamua，呈現天文學家認為的狹長雪茄狀。© ESO/M.Kommesser

Bialy與Avi Loeb提出了一個非常有趣的想法：或許斥候星是一個（外星）人造的太陽光帆，一個利用陽光推進的探測器。在沒有氣體噴出的狀況下，利用陽光加速似乎是唯一的方式。考慮斥候星的可能形狀之一—扁平鬆餅型，高返照率，以及之前提到的斥候星像是靜靜地待在星際空間中等著太陽吸引，或許探測器光帆真有幾分道理。然而SETI研究所（SETI是Search for Extraterrestrial Intelligence尋找外星智慧的意思）利用無線電波望遠鏡探測斥候星，並未發現任何的無線電訊號，且其表面顏色看起來像是一般小行星或彗星似乎否決的這個探測器的假說。

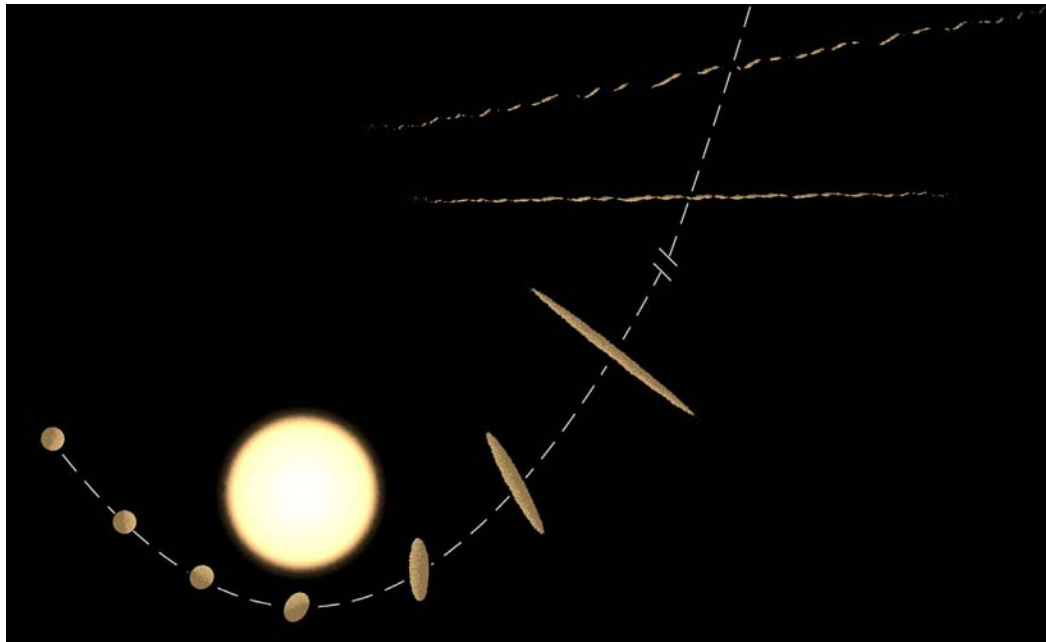
多數天文學家沒接受這個太陽光帆的點子，仍認為斥候星是個自然的天體。Yun Zhang與Douglas N.C. Lin在自然天文學期刊發表了斥候星可能的來源—被恆星的潮汐力分裂且拋離原恆星系統。在這個過程中斥候星的母天體，可能是個小行星或是彗

星，必須非常接近恆星才有足夠的潮汐力將其分解並塑造成狹長雪茄狀，而在如此接近的狀況下揮發性物質也消耗殆盡。

這個理論解釋斥候星的型狀，但沒有解釋為什麼會有非重力加速。天文學家們一般認為雖然斥候星看起來沒有彗星活動，但仍有少量氣體離開表面產生額外的加速，最有可能是水，因為水相較之下不容易汽化而在高溫的形成環境中保存。然而經過計算，斥候星的非重力加速率似乎與水汽化不符。

因此天文物理學家Darryl Seligman 和 Gregory Laughlin提出了一個截然不同的形成模型。斥候星含有豐富的固態分子氫（化學式H₂，可想像為結冰的氫氣），而固態分子氫的汽化剛好可以解釋我們看到的非重力加速現象。固態分子氫必須在極冷的環境下形成，像是巨大分子雲中最冷最緻密的核心。在拜訪太陽系的過程中因固態分子氫的汽化斥候星逐漸變小，也巧妙的解釋了Spitzer望遠鏡無法偵測的疑點。根據這個理論，斥候星不是一般的彗星或小行星，其來源也不是恆星系統，而且我們會預期未來還有更多的類斥候星天體進到太陽系。

回到之前我們對兩個星際天體來源的猜想：斥候星來自高溫，而2I/Borisov來自於低溫環境，是不是符合上述的觀測與理論模擬結果呢？2I/Borisov看來沒有太大的爭議，它具有類似太陽系彗星的分子與含量更豐富的一氧化碳，天文學家們認為它來自於一個主星比太陽質量低而溫度較低的恆星系統。而斥候星是在恆星系統中形成？在分子雲中形成？還是非自然物體？在有限的觀測資訊下或許永遠沒有解答。當斥候星與2I/Borisov遠離太陽系而去時，天文學家們已經在期待下一個到來的星際天體。究竟它是如2I/Borisov一般的星際彗星，還是像斥候星一樣的怪異小行星，亦或是另一種超出我們想像的天體？我們就等待下一個星際過客來敲門吧！



小天體因恆星潮汐力裂解成爲長條形。 © NAOC/Y. Zhang

林省文 密西根大學助理研究學者

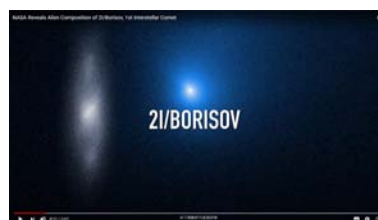
YouTube相關影片：



The story of 'Oumuamua, the first visitor from another star system | Karen J. Meech
<https://www.youtube.com/watch?v=rfl3w9Bzwick>



Is 'Oumuamua an Interstellar Asteroid or Comet?
<https://www.youtube.com/watch?v=PYxhxUik5PY>



NASA Reveals Alien Composition of 2I/Borisov, 1st Interstellar Comet
<https://www.youtube.com/watch?v=NNOb3xrjOhE>