

文/ 江國興

一顆被黑洞撕裂的恆星，本來不是一件令人感到意外的事，但在事情發生半年後捕獲一顆微中子，今天文學家要重新思考在黑洞附近產生微中子的方式，更印證結合電磁波與非電磁波訊息的多信使天文學 (Multi-messenger astronomy) 的重要性。發現過程也可以體會到人與機器的互動。

恆星被黑洞吞噬產生

微中子是基本粒子，數量遠遠超過宇宙中的所有原子，每秒就有數以兆計的微中子通過我們的身體，但它們很少與其他物質發生相互作用，所以不容易被偵測到，被喻為幽靈粒子。高能微中子的能量比地球上最強大的粒子對撞器產生的能量高1,000倍，因此天文物理學家對高能微中子特別感興趣。他們認為宇宙中最極端的事件，例如劇烈的星體爆發，會使粒子加速到接近光速的速度。這些粒子然後與光或其他粒子碰撞以生成高能微中子。因微中子不容易與其他物質發生相互作用，科學家必需要建造非常巨大的偵測器才有機會捕捉到來

自深空的微中子，然而21世紀前我們只偵測到來自太陽及在大麥哲倫星系的超新星1987A的微中子，所以我們對來自外太空微中子的認知很少。到2018年，天文學家才首次發現一個在40億光年遠的耀變星體 (Blazar) 所產生的高能微中子，成為第一起來自本星系團以外的微中子事件。

耀變星體的微中子事件是非常重要的發現，證明在星系中心的超大質量黑洞能透過噴流將粒子加速而產生大量高能微中子。因此，只要能產生強大的相對論性噴流的天體，即使源自遙遠的星系，

幽靈粒子的

圖1. 當超大質量的黑洞將恆星撕裂之後，大約一半的恆星碎片被拋到太空，而其餘的則在黑洞周圍形成發光的吸積盤。該系統在不同波段發出明亮的光芒，並可能產生垂直於吸積盤的高能噴流狀向外物質流（黑洞風）。圖片來源：DESY, Science Communication Lab

圖像版權：DESY, Science Communication Lab

只要有巨大的微中子探測器，假以時日，我們應該可以捕捉到更多源自宇宙深處的微中子。除耀變星體外，當不幸的恆星離星系中心的黑洞太近時，重力產生強烈的潮汐，會將恆星扯裂，這種罕見的災難性事件被稱為潮汐破壞事件（Tidal disruption event）。在吞噬過程中，有大約一半的恆星碎片會透過吸積盤旋入黑洞裡，一道耀眼的光芒將整個星系照亮（圖1）。在某些情況下，黑洞會發射快速移動的粒子流。科學家認為潮汐破壞事件會在這種粒子噴流中產生高能微中子，他們還期望這些事件將在其演化的早期在極亮時產生微中子。

潮汐破壞事件的理論最早於上世紀七、八十年代提出，至九十年代後期才以X光望遠鏡被發現。因潮汐破壞事件的輻射以X光和紫外光為主，所以早期的發現都有賴X光望遠鏡，但因巡天X光望遠鏡的靈敏度低，新發現的潮汐破壞事件寥寥可數。隨著地面的大視場巡天可見光望遠鏡在2007年後迅速發展，天文學家已發現大概100起潮汐破壞事件。其中，位於加州理工學院的帕洛馬山天文臺的「史維基瞬變設備」（Zwicky Transient Facility, ZTF）更是近年發現潮汐破壞事件的主要望遠鏡。

ZTF是一具1.3米口徑自動望遠鏡，並擁有一臺超廣角(47平方度)的相機，可以在三晚的時間內掃描整個天空並進行自動檢查，尋找新的瞬變天體如超新星、伽瑪射線爆和潮汐破壞事件等。國立清華大學和國立中央大學都是ZTF的創始成員之一，最近國立成功大學也加入成為ZTF的成員。ZTF每晚都會將大量新發現的天體上傳至資料庫，ZTF內的不同工作小組會根據其科學要求，篩選所需要的天體作進一步的分析。由於臺灣與美國的時差關係，臺灣的科學家會協助篩選以及安排在鹿林天文臺的後續觀測，ZTF的成員也會透過通訊平臺Slack分享不同的成果及尋求協助。

2019年4月9日，ZTF發現一個名為AT2019dsg的瞬變天體，經後續觀測證實，AT2019dsg是一次發生在距地球7億光年遠的一個名為2MASX J20570298 + 1412165的星系中的潮汐破壞事件。該星系位於海豚座，星系中央有一個超大質量黑洞，質量為太陽的3千萬倍。由於潮汐破壞事件為罕見天文現象，全球多個天文臺攜手合作進行後續多波段（伽瑪射線、X光、紫外光、可見光和電波）觀

測與研究。AT2019dsg在5月進入亮度的峰值，但從電波與X光的觀測，天文學家沒有偵測到強大的噴流，表示AT2019dsg是一次比較普通的潮汐破壞事件。

然而，在半年後的10月1日，美國國家科學基金會位於南極洲的阿蒙森 - 斯科特南極觀測站的冰立方微中子天文臺（IceCube Neutrino Observatory）捕獲到一顆名為IC191001A的高能微中子，並根據其特性判斷是來自外太空，更將其方位立刻通知其他天文臺。ZTF除了固定的巡天觀測，還會針對發的瞬變天體（如伽瑪射線爆、重力波事件和微中子事件）進行快速的後續觀測去尋找可見光的對應星體。由於IC191001A有可能是來自外太空，當ZTF系統收到通知，便知會相關科學家安排觀測（我們經常會在睡夢中收到緊急通知！）。在發現IC191001A大約七個小時後，ZTF開始第一次後續觀測並自動搜尋在IC191001A附近的瞬變天體，而且透過交叉分析確認在四月發現的AT2019dsg也在相同的天區。經分析後，ZTF的微中子團隊認為AT2019dsg與捕獲的微中子僅是巧合的機會只有500分之一。但問題就是，在沒有強大的噴流，高能微中子是怎樣在潮汐破壞事件發生後半年產生？X光觀測可能提供重要的線索。

雖然我並不是ZTF內潮汐破壞事件和微中子工作小組的主要成員，但因之後有很多X光觀測，我也主動幫忙分析X光數據。AT2019dsg是為數不多的已知有X光輻射的潮汐破壞事件之一，更是一個同時在可見光和X光都非常亮的潮汐破壞事件。科學家認為X光可能來自黑洞附近、吸積盤內部，或高速粒子噴流。AT2019dsg的X光以前所未有的速度衰減，因研究小組沒有看到強大的噴流，這暗示吸積盤以高速冷卻，或X光被逐漸增加的外圍氣體迅速吸收。同時，微弱的電波輻射表示這個黑洞系統具有向外發射的物質流（可以想像成風，這裡我稱之為黑洞風），亦可能是因為其相對論性噴流的特殊結構或指向不是朝著地球。這次潮汐破壞事件的高能微中子，有可能是來自吸積盤、黑洞風、吸積盤周遭的冕區，或具特殊結構的相對論性噴流（圖2）。由於需要等待足夠的光子（例如X光）跟特定區域內的粒子互相撞擊才能產生高能微中子，所以微中子數量的最大值會有時間的延遲，這樣可以解釋我們要待潮汐破壞事件發生後半年才捕

獲微中子。我們對天體產生高能微中子的物理機制還有很多未解的謎團，但可以肯定的是，這是與潮汐破壞事件相關的第一顆微中子，並確認潮汐破壞事件能充當巨大的粒子加速器。

何物質有相互作用，所以每一顆來自宇宙深處的微中子都帶著其宿主星體的重要信息。只要搭配其他電磁波或重力波的觀測，我們未來可以更全面了解產生高能微中子的物理機制及追溯其來源。

雖然微中子像幽靈，但由於微中子幾乎不與任

江國興：清華大學天文所特聘教授

Soft X-ray TDEs
軟X光潮汐破壞事件

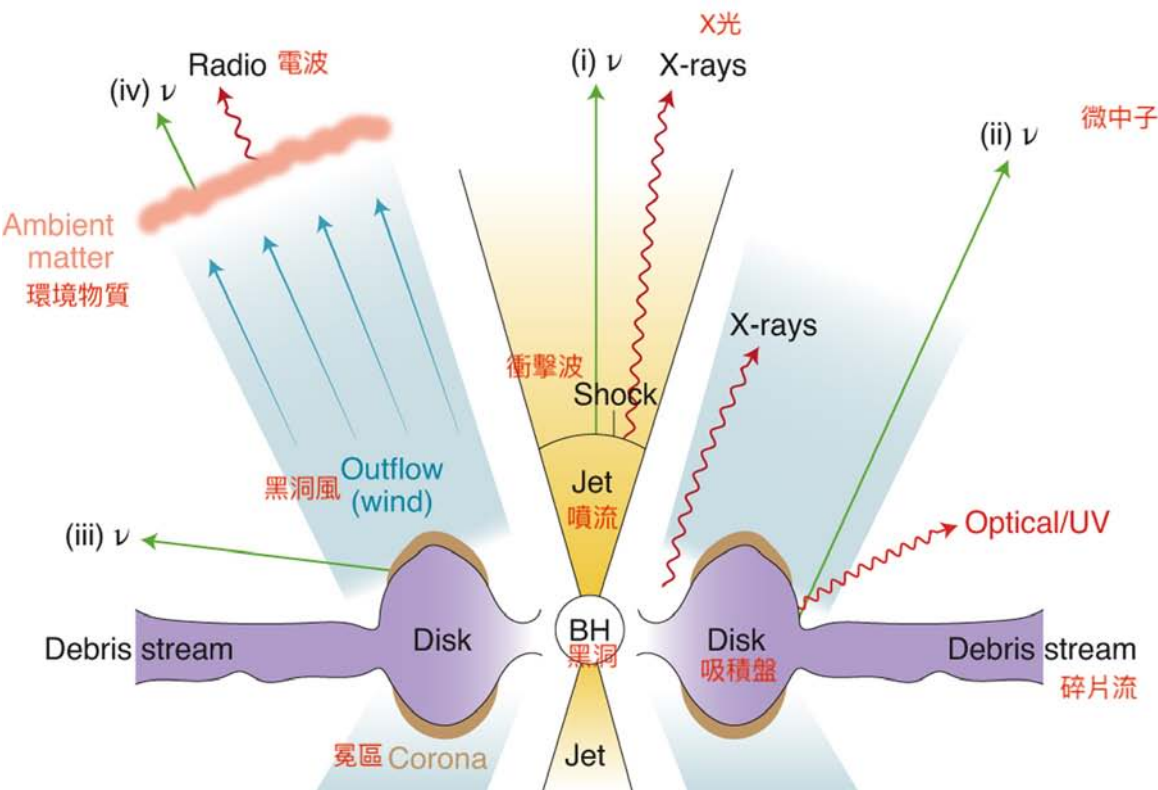
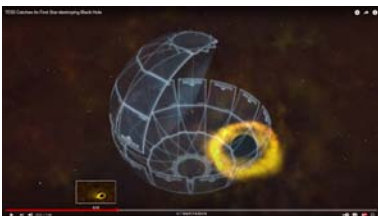


圖2. 潮汐破壞事件的結構圖。中央為超大質量黑洞，外圍紫色區域是吸積盤，內吸積盤以發射X光為主，而外吸積盤則放可見光及紫外光。光子可透過與粒子碰撞產生高能微中子。綠色箭頭為可發射高能微中子的區域，分別是i) 相對論性噴流；ii) 吸積盤；iii) 吸積盤冕區以及 iv) 黑洞風。取自K. Hayasaki, Nature Astronomy, 5, 436 (2021).

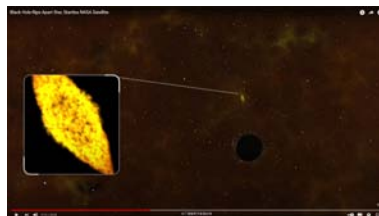
可見光 / 紫外光潮汐破壞事件

Optical/UV TDEs

YouTube相關影片：



TESS Catches its First Star-destroying Black Hole
<https://www.youtube.com/watch?v=85tdoDt1Qh0>



Black Hole Rips Apart Star, Startles NASA Satellite
<https://www.youtube.com/watch?v=UYN-b2bQTDU>



Swift Links Neutrino to Star-destroying Black Hole
https://www.youtube.com/watch?v=-_dFQYQCmqk