

捕捉星動的瞬間

臺灣第一個全自動巡天望遠鏡：星瞬望遠鏡 RIFT

文／金若蘭、李君樂



圖 1. 位於鹿林山天文台的五十公分口徑望遠鏡—星瞬望遠鏡 RIFT，由國立成功大學物理系李君樂教授所領軍的多信息研究室團隊設立。

圖片來源：李君樂教授研究團隊

如果你的朋友只告訴你他要遠行旅遊，卻沒告訴你要去哪，請問你要如何知道他去的確切地點呢？也許我們可以根據他在網路社群所發出的蛛絲馬跡，例如打卡地點、分享的照片之類的間接資訊，來推斷他可能前往的地方，就算不是百分之百正確，但是至少可以提供一些方向。同樣的，天文學家也常碰到很難確認所觀測到天體的確切位置，因為有些觀測儀器可以測到的訊號在天空上的定位誤差範圍很大，其中一個就是對於重力波波源的定位。

目前重力波探測最主要的就是使用位於美國的 LIGO (The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)，位於義大利的 Virgo 干涉儀，還有位於日本的 KAGRA (The Kamioka Gravitational Wave Detector) (見圖 2)。這三者未來會進行聯合觀測，簡稱 LVK。但就算三者聯合起來，對於回推重力波源方向的估算準確度仍是很低。將於 2023 年進行的第四期聯合觀測 (簡稱 O4)，研究團隊估算重力波波源位置的不準確度會高達幾十平方度。幾十平方度可是幾百倍月亮的大小，在這樣的大範圍內都可能是重力波的波源位置，這樣實在很難讓我們找出真正重力波的發波所在地。

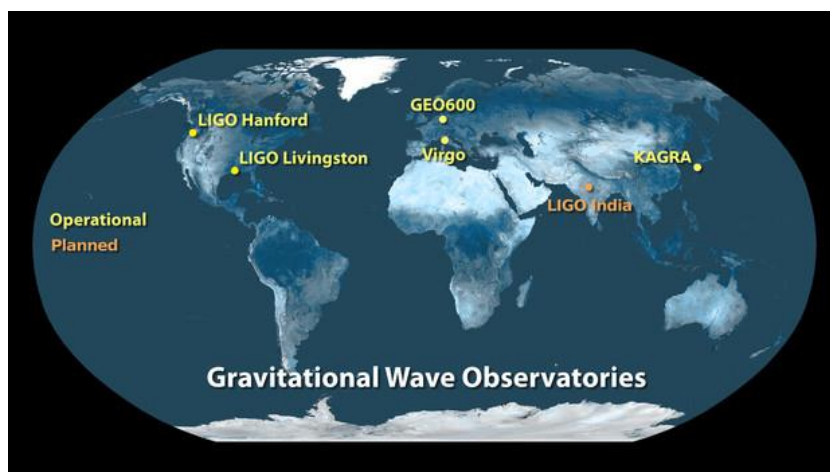


圖 2. 全球重力波觀測儀器分佈圖。LIGO 目前有美國華盛頓州的 Hanford 以及路易斯安那州的 Livingston, Louisiana 兩個場址，以及正在興建中位在印度的基地；VIRGO 位在義大利，位於日本的 KAGRA 以及位於德國的 GEO600。

圖片來源：Caltech/MIT/LIGO Laboratory

最近在臺灣的鹿林山就有一個新的望遠鏡（見圖 1）將要加入這個尋找發出重力波位置的行列。2022 年，中央大學的鹿林天文台基地上有了一个小天文台，這個天文台裡所配備的望遠鏡是全台第二大口徑（50 公分）的研究型望遠鏡一名為『星瞬』，英文全名是 Robotic Imagers For Transients（RIFT）。RIFT 雖然不是臺灣最大的光學望遠鏡，但卻是臺灣本土第一個全自動巡天望遠鏡觀測計畫，其建置的重要目的就是為了重力波的研究。這個望遠鏡是根據成功大學物理系李君樂教授所提出之構想，並且得到國科會（原『科技部』）愛因斯坦計畫的經費支持，設計成機械式的全自動望遠鏡。

用可見光可以看到重力波？重力波由誰發波？

但是，重力波明明是一種時空的漣漪，並不是電磁波，為什麼我們卻要用可見光的來『觀測』重力波呢？

要回答這個問題，我們要先了解重力波到底是如何產生。根據重力波的理論推論，目前觀測儀器可以測到的夠強的重力波，大多數都是由於兩個緻密星體旋轉合併的過程產生。從 2015 年第一次測到重力波訊號，一直到 2020 年結束的第三期（簡稱 O3）重力波聯合觀測報告，總共觀測到 83 對雙黑洞，3 對黑洞與中子星，2 對雙中子星，以及 2 對不確定是中子或是黑洞與黑洞合併造成的重力波（見圖 3）。黑洞及中子星是恆星演化到最末期，核心的部分塌縮形成一個密度很大，重力場很強的緻密星體。

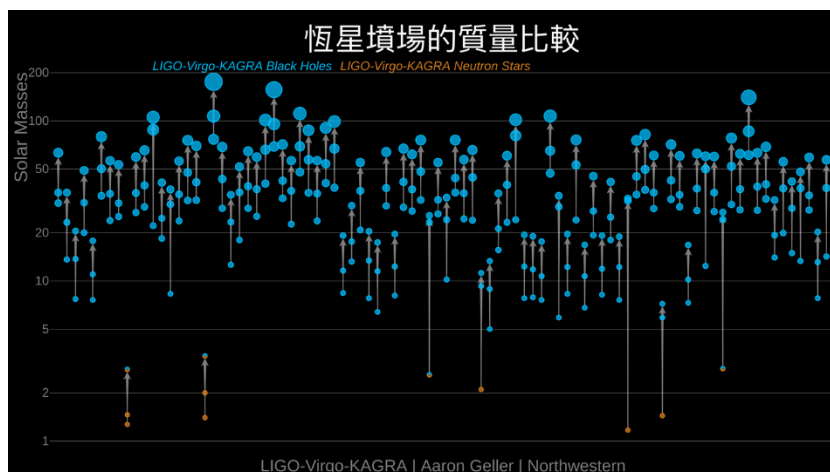


圖 3. LVK (LIGO-Virgo-KAGRA) 重力波聯合觀測到第三期 (O3) 為止所測到的重力波源雙星及其合併後的質量，由左至右根據觀測到的時間先後順序排列。箭頭上方的圓，代表箭頭下方兩兩星體合併後的質量。藍點代表黑洞，橘色代表中子星，藍橘各一半的則是不確定。縱軸的質量以太陽質量為單位。

圖片來源： LIGO-Virgo-KAGRA Collaborations/Frank Elavsky, Aaron Geller/Northwestern

其中當兩個中子星，或者是一個中子星與一個黑洞互相旋轉並合併時，會瞬間發出很亮的光，其最大亮度可以達到一般新星 (Nova) 的一千倍！所以就把這種星體稱作「千新星 (Kilonova)」。因為當中子星或與黑洞這樣的緻密天體合併時，同時也會產生重力波。因此如果可以抓到千新星變亮的瞬間，同時也剛好測到重力波，我們就可以合理的推論那個重力波就是來自那顆千新星，因此也就找到重力波的波源位置。RIFT 的重要任務就是希望可以加入這樣捕捉「千新星 (Kilonova)」爆發所放出的可見光觀測團隊。

國立成功大學的 RIFT 研究團隊，同時也是日本的重力波觀測單位 KAGRA 的成員之一，所以未來一旦 LVK 收到重力波的觀測訊號，RIFT 會立刻接到通知，這時望遠鏡會根據通知自動啟動並快速轉向那個天區進行即時的觀測，迅速的捕捉因為該重力波事件所發出的可見光，以幫助找出重力波的真正位置。

別以為 RIFT 只能用來研究重力波

當然重力波不是隨時都有，這種時候 RIFT 可不是閒閒沒事做。我們可以利用 RIFT 可以快速移動並自動進行觀測的特性，讓它『順便』觀測其他的緻密『瞬變』星 (compact transients)。所謂瞬變星指的是在天空中突然變亮的星體，千新星當然也是其中之一。但是 RIFT 預計可以觀測到的瞬變星不止千新星，還包括黑洞雙星、超大質量黑洞、新星爆炸、以及毫秒脈衝星等發出的可見光。下面就是一些 RIFT 預計要觀測的對象：

伽瑪射線新星爆炸 (Gamma-Ray Emitting Nova Explosions)

宇宙中很多的星星常常相親相愛的成雙成對出現，當中質量比較大的恆星，演化速度比較快，稱為『主星』。如果主星質量與太陽類似，在進入老年階段時，核心會開始停止核融合並且縮小，中心會變成密度很高並且大小與地球差不多的白矮星。這個比伴星先進入白矮星階段密度較大的主星，就很可能把它伴星的物質吸過去。這些被吸過去的氣體塵埃會因為彼此高速旋轉碰撞產生熱能，並且發出從無線電波到 X 光波段的光，因此亮度變亮，讓白矮星表面彷彿如『回春』一樣，再度引發核融合反應並產生爆炸。這就是我們在地上『新』觀測到但實際上已經很老的『新星 (Nova)』(參考註 1)。一波波爆炸的氣體往往會產生震波，把粒子加速到將近光速，因而發射出高能的伽瑪射線，所以稱為伽瑪射線新星爆炸。

李君樂教授於 2017 年協同美國密西根大學團隊還進一步發現，有顆新星 (ASASSN-16ma) 在可見光與伽瑪射線的光度變化一致 (見圖 4)，這支持了新星發出的伽瑪射線是由震波造成的假設 (見參考文獻 1)。RIFT 未來可以在可見光波段進行更多類似的新星觀測，以提供更有力的證據驗證這個理論。

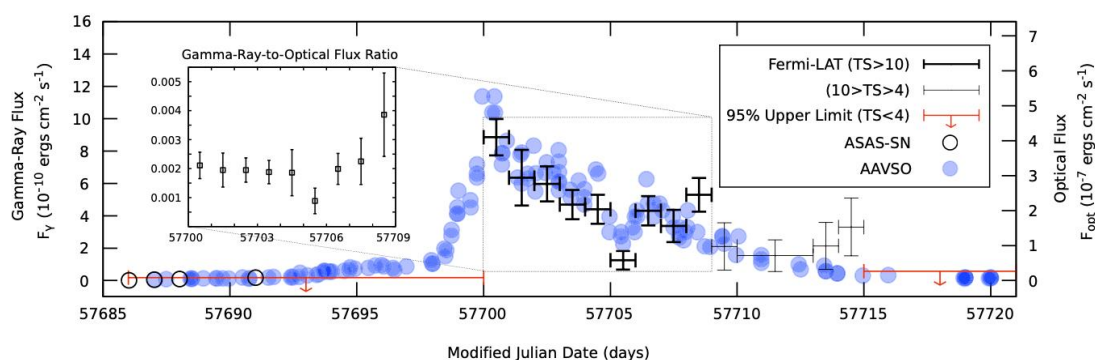


圖 4. V5856 Sgr 新星在伽瑪射線 (黑色線) 與可見光波段 (藍色圓點) 的光度變化圖。橫軸的日期為儒略日，是天文上常用來表示日期的方法，例如橫軸最中央 MJD 57700 相對應的是 2016 年 8 月 11 日。

圖片來源：見參考文獻 1

紅黑雙煞：黑寡婦與紅背蜘蛛脈衝星

前面有提到恆星演化到末期有可能會變成白矮星，質量更大的恆星則會變成中子星。中子星因為是從比太陽還大的星體，塌縮到半徑只剩約十公里，由於角動量守恆，中子星的旋轉速度會變很快。對於帶有磁場的中子星，會從磁極發射出電磁波，隨著中子星的快速旋轉，就像燈塔一樣，當光束轉到地球方向變亮，轉到背對地球方向就變暗。因

為一閃一閃發出有規律的光，所以被稱為『脈衝星』。有一類的脈衝星旋轉速度超級快，是脈衝星界的急驚風，每秒居然可以旋轉千次，所以被叫做『毫秒脈衝星 (Millisecond Pulsar, 簡稱 MSP)』(見圖 5)。這些毫秒脈衝星，往往位於雙星系統。有些雙星彼此靠得很近，有可能一天或幾小時就可以互繞一圈。當其伴星被中子星(雙星中的主星)發出的脈衝星風及輻射摧毀，就像會摧毀掉自己伴侶的黑寡婦蜘蛛一樣，所以被稱為『黑寡婦』。有些類似的毫秒脈衝星，但其伴星質量比較大些，則稱為『紅背蜘蛛』，這也是種會吃掉伴侶的蜘蛛。

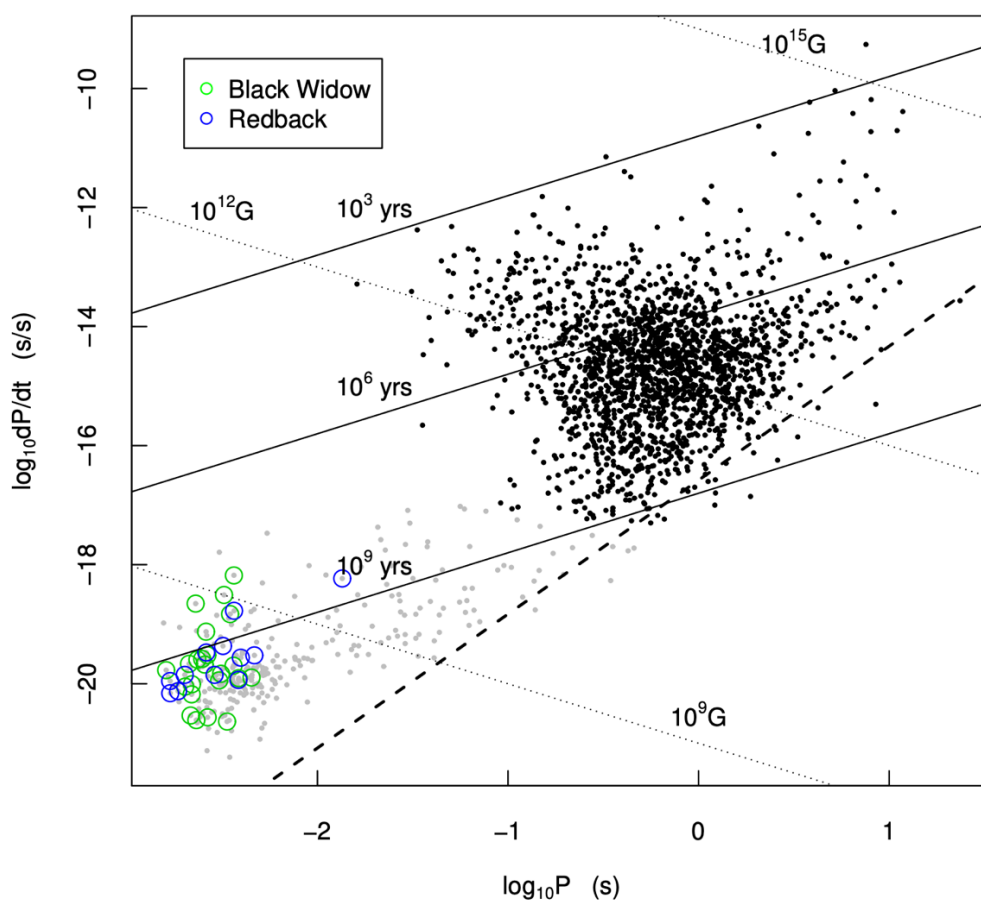


圖 5. 脈衝星在脈衝週期 (橫軸) 及週期變化 (縱軸) 圖上的分佈。左下角的灰點是毫秒脈衝星 (MSP)，其他的黑點則是一般的脈衝星。黑寡婦及紅背蜘蛛脈衝星則分別用綠色及藍色圈出。其中黑實線代表等年紀線，黑點線代表脈衝星表面的磁場強度，黑虛線則代表脈衝星的死亡線。以上等值線都是根據理論公式推出。

圖片來源：見參考文獻 2

此外，這些瘋狂旋轉的毫秒脈衝星，現在一般認為一開始是位在一個雙星系統，然後其中質量比較小的伴星上的物質會被那個已經演化成中子星的主星吸積過去，此時會發出 X 光，稱為低質量 X 光雙星 (Low Mass X-ray Binary)，簡稱 LMXB。在這過程中，那顆中子星因為吸了伴星的物質，能量就轉換成自己旋轉的動能，造成很強的磁場，

使得它周圍的粒子也被加速。這些加速的粒子就會發出很強的風，把它周圍的塵埃吹散，露出中間的快速旋轉的中子星，我們也因此可以測到它的脈衝波。此時這個中子星發出的光就不是由伴星被吸過去的物質被加熱造成，而是自己因為磁場被加速的粒子造成的。而這些天文界的『蜘蛛』們，被認為就是處在從 LMXB 的狀態變到 MSP 的中間過渡帶。RIFT 將會密切觀測這群紅黑雙煞在可見光的亮度變化，如果再配合其他波段的觀測，就可以知道它的光譜，好回推脈衝星的質量，並且也可以根據可見光的光度變化得知雙星系統繞行軌道的傾斜角。這些都對於解答毫秒脈衝星的成因十分重要。

黑洞雙星

至於雙星系統中，如果主星的質量再更大些，最後中間的核心會塌陷變成黑洞。黑洞吸積它的伴星的物質同樣會發出熱能，其中在 X 光波段通常最亮，但如果用可見光波段觀測，往往也可以觀測到其亮度變亮。除此之外，根據現有的黑洞雙星系統的理論模型，X 光與可見光這兩個波段發的光量的比例，與其物理機制有關，所以可以用觀測到這兩個波段的資料來回推並且修正現有的黑洞雙星理論模型。因此當臺灣的 RIFT 接到 X 光望遠鏡觀測到爆發的消息後，可以立刻進行在可見光波段的追蹤觀測，以提供重要資料。此外，別忘了黑洞雙星中還有一顆黑洞的伴星，這個質量比較小的恆星主要發出的就是可見光，RIFT 可以根據所觀測到的伴星資料，推測這個伴星的特性，這對於了解這個伴星系統會有很大助益。

除了被動等待通知，積極進取不偷懶的 RIFT 還會進行巡天的偵測，並且將不同時間觀測的天空影像進行比對，如此就有機會發現天空中突然變亮的天體，甚至有機會比 X 光望遠鏡提早一步呢。

超大質量黑洞

不同於黑洞雙星的質量大約是恆星質量等級的，有一種黑洞的質量是恆星質量的數十萬倍以上，最高甚至可能到達上億倍！不講太遠的，我們銀河系中央就有一個這樣超大質量的黑洞坐鎮。這個黑洞叫做人馬座 A 星 (Sagittarius A*)，也就是 2022 年事件視界望遠鏡 (EHT) 他們觀測到看起來像『甜甜圈』的黑洞影像 (見圖 6)。其實不只我們銀河系，宇宙中其他星系中央也常常透露出有超大質量黑洞存在的證據。其中一類比我們銀河系中央的超大質量黑洞『狂野』，發出的光較強且亮度會變化，因此更容易被觀測到，加上因為位在星系的中央，因此被稱為『活躍星系核 (active galactic nuclei)』，簡稱 AGN。有一些 AGN 的噴流剛好是面對地球的方向，時不時發出很強的伽瑪射線，能量到達 TeV 等級，就可以被觀測到，叫做耀變體 (Blazer) (見圖 7)。

因為目前尚未有 TeV 等級的全天望遠鏡，因此當一個這樣的天體爆發時不見得剛好被觀測到。但是因為在它爆發時，可見光波段也會變亮，所以就有機會被很勤奮一直在對整個天空做巡邏的 RIFT 給逮到。在 TeV 波段的切倫科夫望遠鏡陣列 (Cherenkov Telescope Array, 簡稱 CTA) 逐漸完工並且加入觀測行列後，未來會有越來越多這類的高能天體被發現，此時 RIFT 正好可以與他們進行合作，提供在可見光這部分的資料，好獲得更完整的資訊。

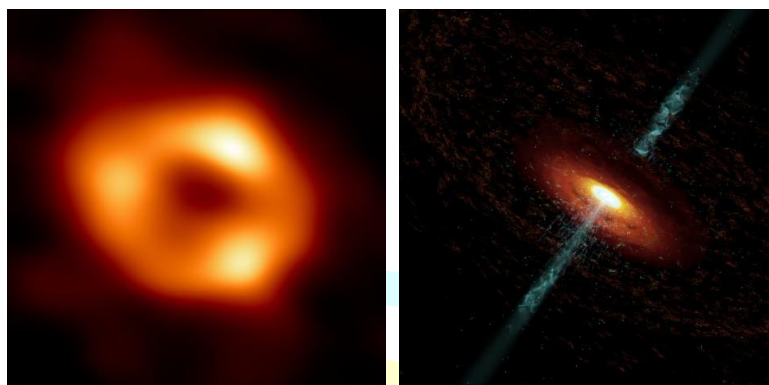


圖 6. 視界地平面望遠鏡『Event Horizon Telescope · EHT』。首次拍攝到位於我們銀河系中央的超大質量黑洞人馬座 A 星。EHT 實際上是由八個電波天文台共同組成一個基線為地球大小的望遠鏡觀測陣列，以獲取高解析度的影像。

圖片來源：EHT Collaboration

圖 7. 耀變體 (Blazar) 的想像圖。耀變體中央是密度很大的超大質量黑洞，並且兩側會有噴流噴出，噴流速度可被加速到接近光速。當其對著地球噴發時，我們可以觀測到它的亮度的變化。

圖片來源：Boston University - Cosmovision

RIFT 有何獨特之處？

說了這麼多，你也許會問：『可是地球上觀測可見光的望遠鏡這麼多，臺灣甚至還有一個比 RIFT 大的鹿林一米望遠鏡，為什麼還需要 RIFT 呢？』

第一個原因是，RIFT 動作敏捷。你從前面的說明可以知道，RIFT 設計的目的是希望觀測瞬變天體的可見光。一旦收到在其他波段有突然變亮的星體，望遠鏡需要快速因應。所以整個望遠鏡的系統是採用自動操作，可以根據目前天文台的天候狀況，自動打開天文台觀測圓頂，然後自動轉到要觀測的天區。為了能夠快速對準目標以捕捉他們的光度變化，RIFT 的轉動相當的靈活，最快每秒可以轉 50 度，比其他大型望遠鏡快許多。

第二個原因是，RIFT 具有寬廣的視野。在未收到其他波段亮度變化情報的其他時段，RIFT 會根據事先排定的時程自動進行巡天觀測，好追蹤我們密切關注的幾百個已知的緻密瞬變星，甚至發現新的瞬變星。為了可以看到比較寬廣的天空範圍，RIFT 鏡頭還加了減焦鏡，使得視野大約為 0.48 平方度。

RIFT 預計未來會由兩支望遠鏡組成，甚至可以擴充到四支望遠鏡。不同的望遠鏡可以選擇一起觀測同一個星體，但是使用不同波段的濾鏡，這樣可以同時測到在不同波段的亮度變化。或者也可以選擇看天空不同範圍，好在巡天觀測時可以加快掃過全天的速度。

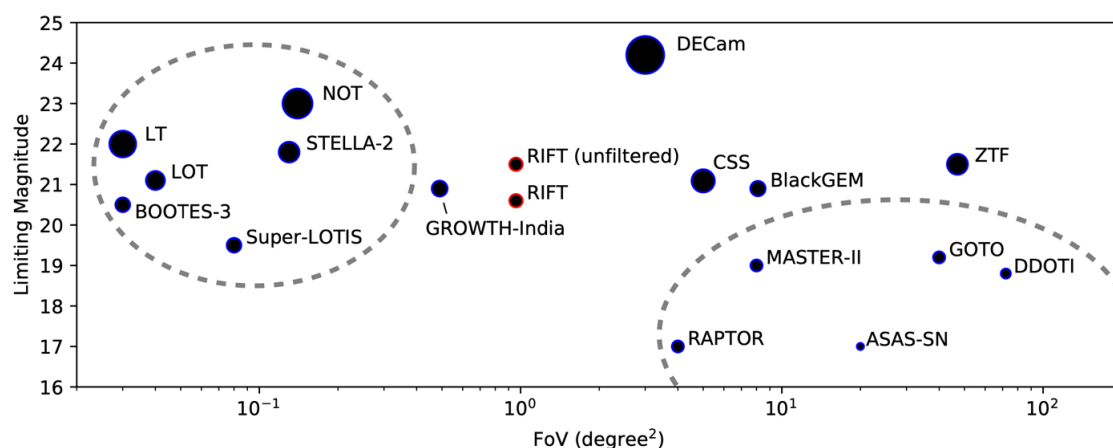


圖 8. RIFT 與世界其他知名的自動化或巡天望遠鏡比較。

圖中左上虛線圈內代表的是可以看到比較暗的星體，但視野範圍小的望遠鏡。而右下角虛線圈內則是光感度雖然較低，但是視野範圍比較大的望遠鏡群。RIFT 的光感度和視野範圍介於這兩大群之中。藍色圓圈的大小是以望遠鏡的口徑大小為比例。

第三個原因是，RIFT 既獨特又『敏感』。圖 8 列出世界上其他知名的自動化或巡天望遠鏡視野與極限星等（註 2）的比較圖，RIFT 雖然沒有右下角那群望遠鏡的視野大，但是感光度（我們用極限星等表示）卻比較好，可以看到比較暗的星體，所以當要追蹤觀測某一突然爆發星體時，當其亮度慢慢變很暗時 RIFT 都還可以觀測得到。另一方面 RIFT 的視野又比左上角那群高感光度的望遠鏡好，代表巡天可以覆蓋到的天空範圍比較大。也就是 RIFT 在以上兩個條件中可以在觀測的主要目標中取得一個平衡。

目前與 RIFT 一樣位在圖 8 中間這群都是目前最先進的望遠鏡，例如 DECam (Dark Energy Camera) 與 ZTF (Zwicky Transient Facility)。RIFT 和 DECam 是唯二兩個地面望遠鏡其感光度在近紅外線波段很高。近紅外線波段對於觀測一些周圍有很多氣體遮住的星體，例如中子星雙星，黑洞雙星 以及新星都很重要。但 DECam 位於南半球，因此位於北半球的 RIFT 對於觀測近紅外線的瞬變星相對重要並可以補其不足。

此外，RIFT 所在的鹿林後山中央大學天文台的場址，海拔高度 2850 公尺，所以大

氣擾動較地面低很多，大氣擾動會使得太暗的星點糊成一團。但在鹿林，位於中天星體的清晰度（seeing，也有人翻成『視寧度』）約 1.3 角秒，也就是影像在 1.3 角秒以上角度都可以解析出來。這樣的清澈度，加上低城市光害，使得鹿林天文台的天空亮度可以接近地球上最暗天空，例如位於智利的 La Silla 天文台。

第四，RIFT 不孤僻。除了自己的兩支望遠鏡，甚至未來有機會陸續生出的四個兄弟姊妹互相作伴外，RIFT 也會與同樣位在鹿林天文台場址的好鄰居—中央大學的一公尺望遠鏡彼此合作，一起加入一個由美國加州理工學院發起的望遠鏡觀測聯盟— GROWTH (Global Relay of Observatories Watching Transients Happen)。你從它的命名就可以知道，GROWTH 的野心是要慢慢成長為一個很大的合作團隊，主要就是要觀測瞬變星體。這個聯盟目前共有 18 個地面望遠鏡加入，其中一個就是臺灣的鹿林一米望遠鏡。

此外，如同前面提過，RIFT 研究團隊同時也是日本重力波觀測計畫 KAGRA 的合作夥伴，會與 KAGRA 針對重力波觀測繼續合作。新一階段的重力波聯合觀測（O4）將於 2023 年再度啟航，RIFT 也正摩拳擦掌開始作出準備，好在一測到重力波時，立刻啟動追蹤觀測。

前面有提到觀測 TeV 波段由國際合作打造出的 CTA 計畫，RIFT 團隊今年也加入 CTA 合作夥伴計畫，並且已簽訂合作協議。

Go! Go! RIFT

根據即將於 2023 年再度啟動的 LVK O4 及 O5 時段可能觀測到的重力波數量，以及 RIFT 可以觀測到重力波源（以黑洞中子星合併事件為主）估算，大約平均一個月會發生一次。至於不定時會發生的黑洞及新星爆發，平均大約分別每兩個月及每兩週發生一次。根據前文所述，RIFT 在等候隨時有可能發生的重力波或者是瞬變星體爆發的時段時，也不會放空，目前已經挑選了許多要陸續追蹤觀測的口袋名單。我們預計要先監測共計 259 個緻密瞬變星（Compact Object Transient, COT）的亮度變化，其中包括黑洞、黑寡婦或是紅背蜘蛛毫秒脈衝星，以及 AGN。這些名單大約每個月可以觀測 100 個左右（見圖 9）。

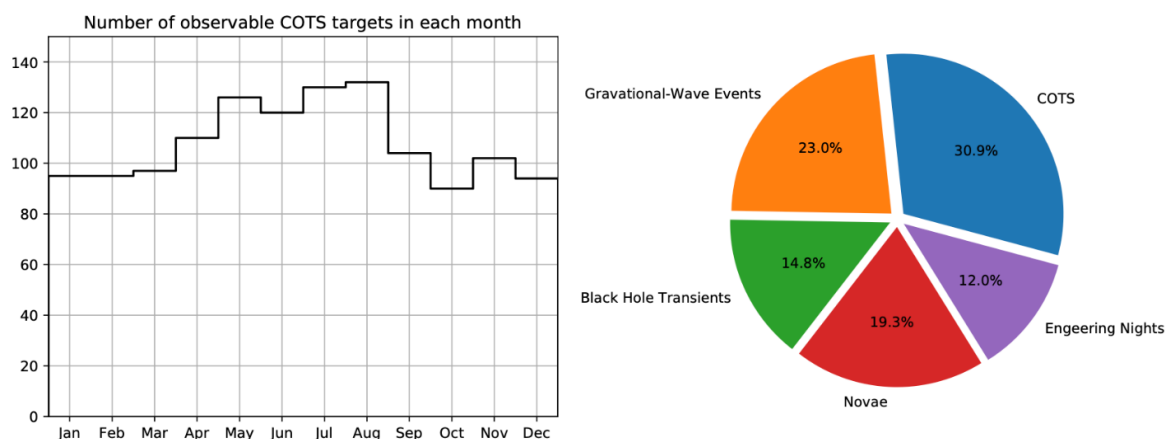


圖 9. 左側為每個月 RIFT 預估可以觀測的緻密瞬星數量圖，右側則為各種觀測目標的時間分配比例估算。

與世界其他更大型的望遠鏡相比，RIFT 雖然口徑小，團隊人數也不如大型國際研究團隊，但也因為如此可以很機動地做應變，搶得先機並做出貢獻。也可以成為臺灣本土天文人才與國際大型計畫合作，與參與重要科學發現的好橋樑。目前 RIFT 已完成建置，並且開始陸續做各種測試，且已經開始進行巡天掃描觀測。我們現在只待宇宙遙遠某處，一對緻密星體開始舞出最後致命的迴旋曲時，放送出讓時空都為之震動的漣漪。到那時，位在太陽系中那顆藍色星球上一個島嶼山頂的 RIFT，已經準備好要接收他們所傳送過來的宇宙密碼了！

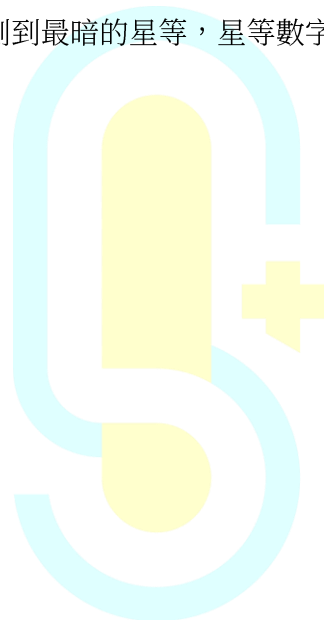
每當日光緩緩褪去
 鹿林後山 一個暗黑的所在
 星瞬望遠鏡從沈睡中被喚醒
 從天文台圓頂中探出頭
 開始一天漫長的等候

他在等候 等候被召喚的時刻
 等候深邃星空某處
 兩顆死亡恆星最後迴旋之舞
 互相毀滅交融時發出的耀眼光芒

在等待的日子 星瞬看著無垠的星空
 看著星起 星落
 他仍忠心守候

然後 當那天 那時刻到來
星瞬已經準備好 他將會迅即轉身
抓住那
星動的瞬間

- [1] 註 1：千歲星會瞬間發出這麼強的光的原因與超新星是因為爆炸變亮的原因不太相同。根據目前理論，千新星變亮是源自一連串的名叫『快中子捕獲過程（Rapid neutron-capture process）』的核反應，簡稱『r-process』。經由這個過程，可以合成出比鐵重的元素。所謂快，是指進行的過程必須要讓原子核在還來不及衰變前就捕獲了下一個中子。因此這個過程要在自由中子密度很高的地方最容易成功。
- [2] 註 2：極限星等：可以觀測到最暗的星等，星等數字越大代表亮度越暗。



金若蘭
國立成功大學物理系博士後研究員
李君樂
國立成功大學物理系助理教授

參考文獻

- [1] Li, K.-L., Metzger, B. D., Chomiuk, L., et al. 2017, *Nature Astronomy*, 1, 697
<https://doi.org/10.1038/s41550-017-0222-1>
- [2] Hui, C.Y.; Li, K.L. High Energy Radiation from Spider Pulsars. *Galaxies* 2019, 7, 93.
<https://doi.org/10.3390/galaxies7040093>