

# 星團中的黑洞嘉年華

星團一般可分為兩類：疏散星團和球狀星團。疏散星團通常較年輕，成員較少且分布較為分散；而球狀星團則較年老、成員數較多且呈現緊密結構。星團內包含各種不同質量的恆星，其中中小質量恆星在演化末期可能會形成白矮星或中子星，而大質量恆星則可能演化成黑洞。過去，天文學家透過不同波段的電磁輻射來發現星團中的白矮星和中子星，然而對於星團中的黑洞，科學家尚未找到直接觀測的方法，只能透過觀察其他恆星的運動來間接驗證其存在。圖1是藝術家根據想像所繪製星團中的黑洞。

近年來，隨著重力波天文學的發展，重力波成為天文學家新的一種觀測天體的工具。重力波是宇宙中的一種物理現象，當星體進行加速運動時，它們會扭曲時空並產生波動，這些波動會在

宇宙中傳播。不過由於重力波非常微弱，觀測它們一直以來都非常具有挑戰性。隨著雷射干涉儀天文臺的建立，觀測重力波已經從不可能變可能。這些先進的設施可以檢測到重力波訊號，透過

分析這些訊號的特徵，科學家可以推斷出造成重力波的天體，例如黑洞的存在。

目前最知名的重力波天文臺是由LIGO-Virgo-KAGRA組成（圖

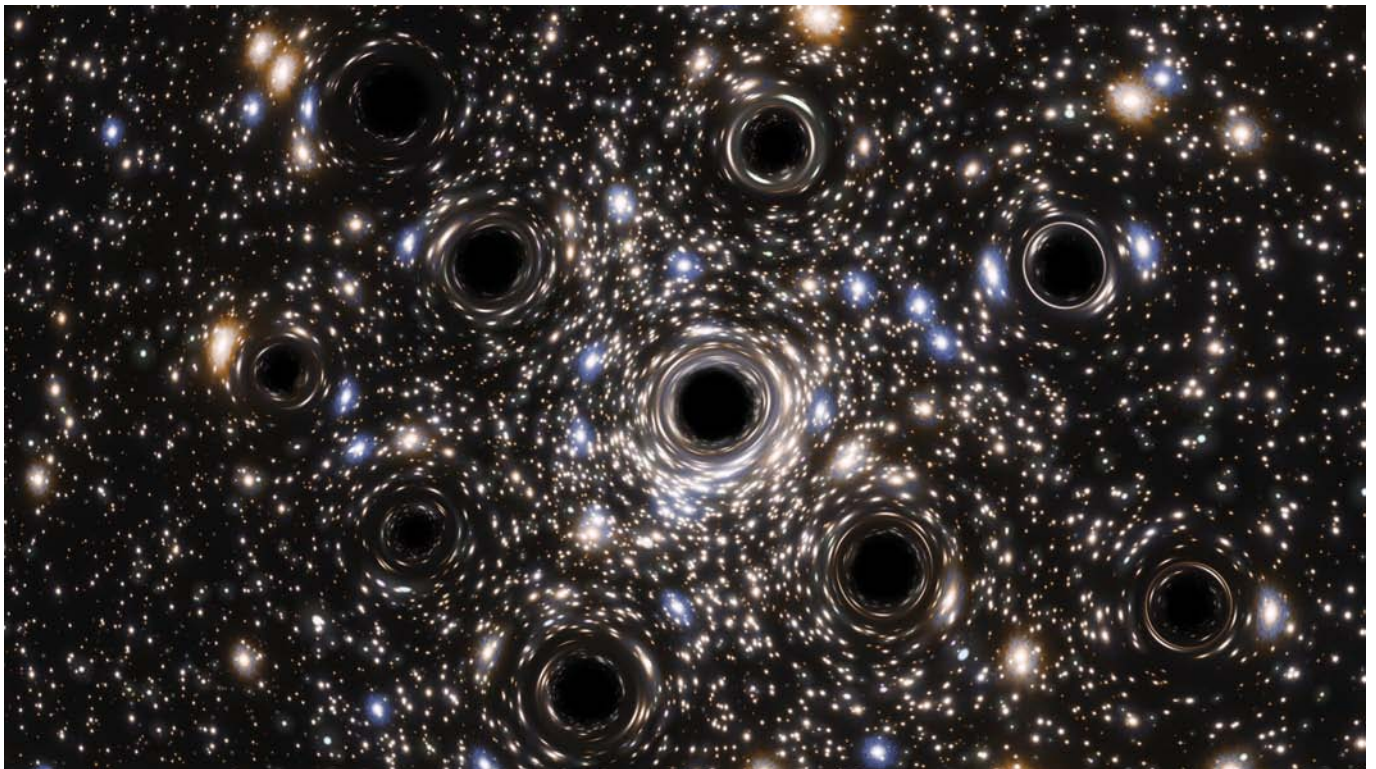


圖1. 藝術家針對球狀星團NGC 6397的中心發現小型黑洞集中的想像圖。實際上，對於任何現有或計畫中的未來望遠鏡都無法直接觀測球狀星團NGC 6397裡的小黑洞，天文學家根據星團成員的運動推測，該球狀星團中心可能擁有20多個黑洞。圖片來源：ESA/Hubble, N. Bartmann

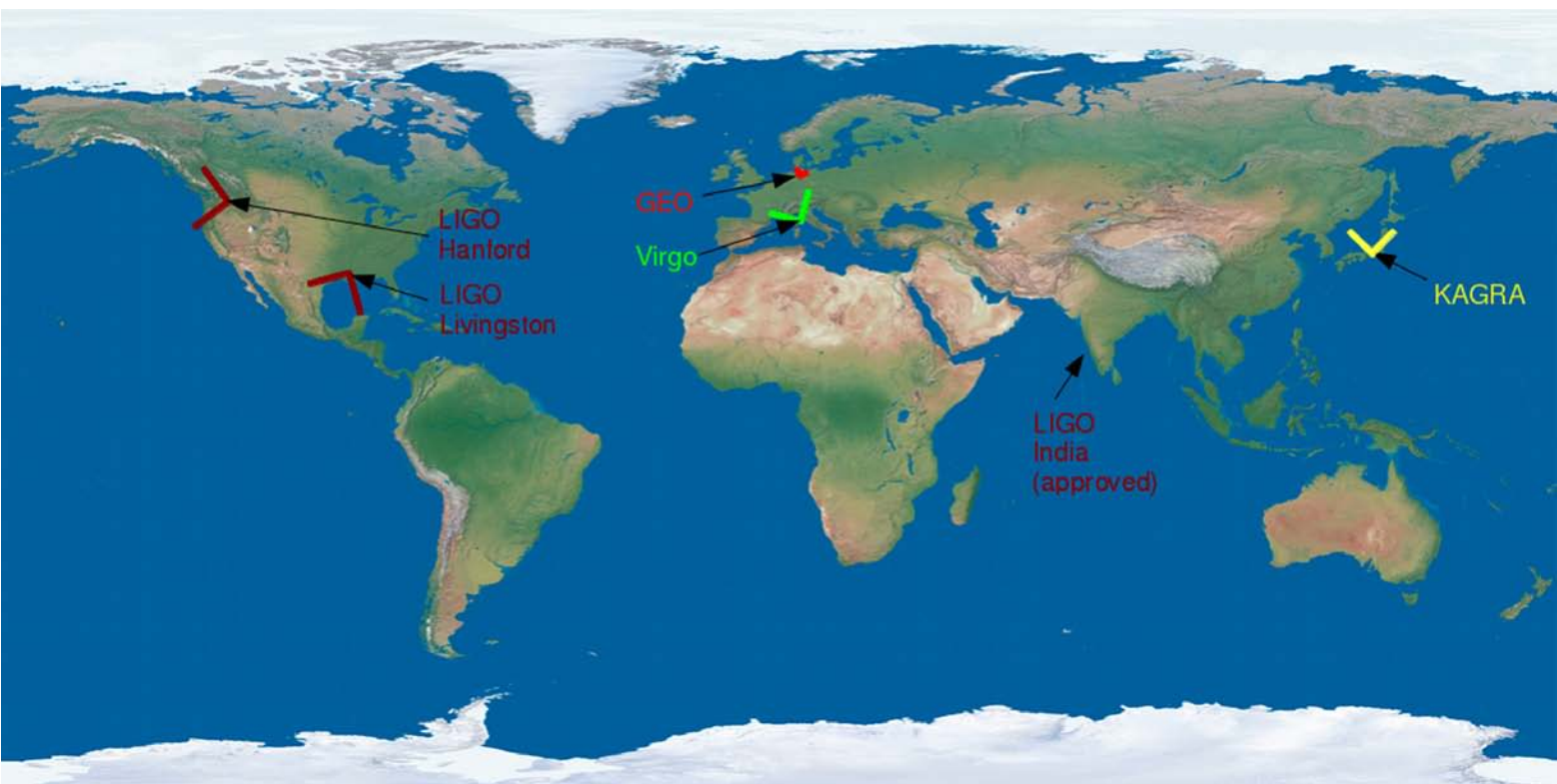


圖2. 自2007年以來，天文學家們已經將LIGO、GEO和Virgo結合成一個大型單一重力波望遠鏡，2020年起新增KAGRA，未來還有LIGO-India加入使得觀測基線延展，提高了重力波觀測的靈敏度。圖片來源：The Virgo Collaboration

2)，其目的在探測和研究時空中的重力波現象。LIGO是美國兩組雷射干涉儀重力波天文臺，一個位於華盛頓漢福德，另一個位於路易斯安那州利文斯頓，兩者相距約3,000公里。此外，Virgo重力波天文臺位於義大利卡西納，而

KAGRA重力波天文臺位於日本神岡的地下。截至2021年底，該合作團隊已經發現了90次的重力波事件（圖3），其中約有80個事件是由雙黑洞系統合併所引起的。這些重力波事件讓科學家改變了對緻密天體的理解，並更深入地

瞭解它們的質量限制、旋轉以及合併率等特性。

這80個合併的雙黑洞中，其中一些事件（例如GW190521、GW190929和GW190426）特別引人注目，因為雙黑洞合併系

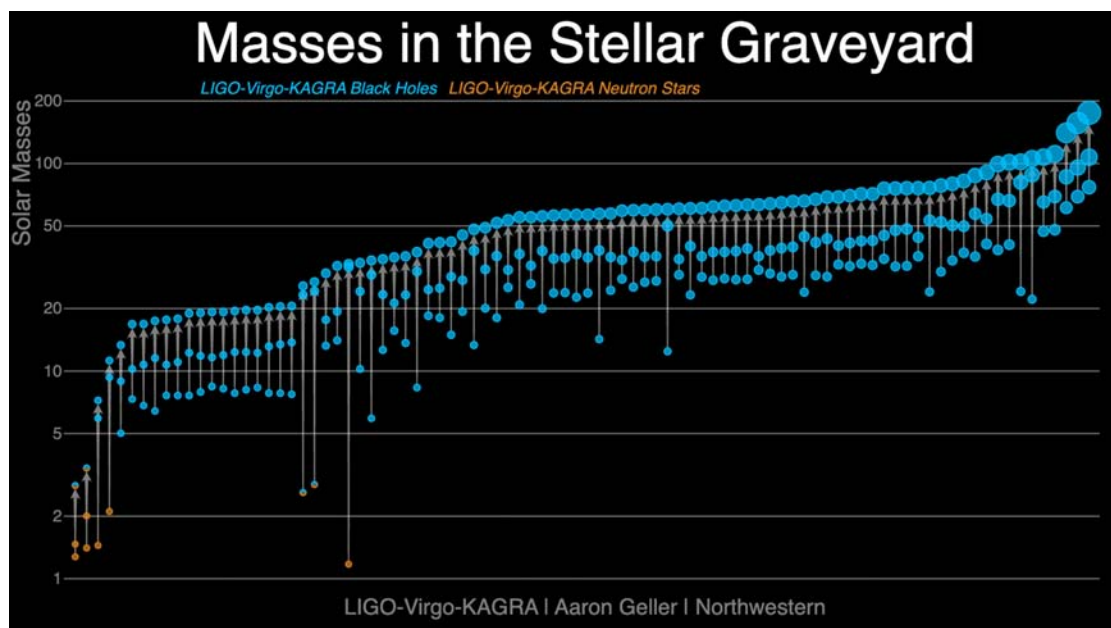


圖3. 從2015年到LIGO/Virgo第3次觀測結束期間發現的所有重力波事件。該圖顯示了LIGO/Virgo探測到的所有緻密雙星的質量，其中藍色為黑洞，橘色為中子星，按質量從小到大排列。圖片來源：LIGO/Virgo/KAGRA/C. Knox/H. Middleton

統中的一個或兩個星體質量超過50個太陽質量，這與目前恆星演化模型的預測不符。根據恆星演化模型理論，超過50個太陽質量的恆星會經歷極端的質量損失，通常以超新星爆發的形式結束它們的演化，而不會形成黑洞。這是因為這些恆星在核心燃料耗盡後，無法維持內部的壓力平衡，導致核心坍縮，最終引發爆炸。然而，觀察到這些更高質量的黑洞表明，有某種我們尚未知曉的物理機制促使它們形成。

最近，來自美國西北大學物理與天文學系Giacomo Fragione的研究團隊進行了一系列模擬研究，探討黑洞在星團中的合併現象，解釋質量超過50個太陽質量的黑洞可能成因。這些研究將這類黑洞歸類為二代以上的黑洞，根據他們的研究，這些黑洞是在緻密星團核心中，由先前一個雙黑洞合併事件所產生的殘餘物（remanent）。如果殘餘物的速度超過局部系統的逃逸速度，它們可能會被拋出星團。不過，由

於球狀星團與核星團（nuclear star cluster）的逃逸速度通常很高，大多數合併後的殘餘物能夠保留在星團內部。這些殘餘物可以在星團內部形成新的雙黑洞系統，然後透過重力波輻射再次合併，形成下一代更大質量的黑洞。

從圖4可以看出，多代黑洞合併後僅在最大且具有最密集的星團有較高的存活率，因為這類星團的位能較大且有較多的交互作用。在這些巨大且緻密的星團中，多代的黑洞合併事件足以形成一個大於1,000倍太陽質量的超大質量黑洞，這些巨大的黑洞往往從第一代黑洞開始合併，然後隨著與第二代、第三代合併逐漸增長而形成的。不過第二或第三代黑洞合併時對殘餘物的衝擊如果過大，也可能導致它們被拋出星團。

該研究團隊建構了一個新的框架來預測星團裡的黑洞合併率及其屬性，在圖5中他們模擬了不同代黑洞合併率與宇宙紅移關

係的預測，黑洞合併率隨著宇宙紅移越大，合併率越低，此外，研究團隊證實大質量星團對於產生多代的黑洞合併是必要的。他們發現隨著最大星團質量從1,000萬個太陽質量降低到100萬個太陽質量後，多代黑洞合併的合併率下降，這是因為較低質量的星團不太可能保留著合併後的殘餘物，尤其在第三代以後的黑洞合併已經很難存在。他們也將重力波天文臺檢測到的合併黑洞質量的分布與他們的模型預測的分布進行了比較，結果顯示這些觀察到的事件只能通過多代黑洞合併產生，其中一些似乎來自第二代和第三代黑洞的合併。

這些結果雖然還屬初步，但研究團隊希望進一步使用統計方法來評估個別重力波事件與多代黑洞合併的可能性。此外，這些研究結果提供了一種解釋中等質量黑洞形成機制的可能性，即通過多代黑洞的合併，這種多代合併的過程可以合理解釋觀測到的中等質量黑洞的存在。

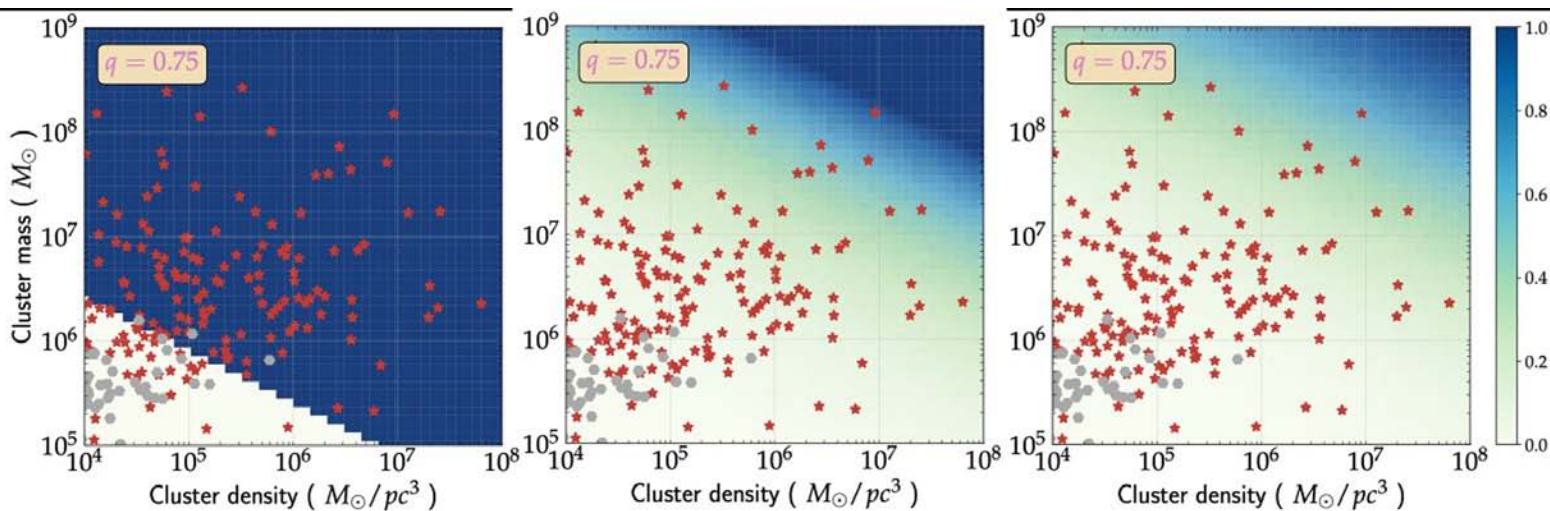


圖4. 雙黑洞合併後的殘餘物在不同質量與密度的星團中存活的機率分布，顏色越深越容易存活。左圖顯示兩個第一代黑洞合併後的存活機率，中間從第一代和第二代黑洞合併後的存活機率，右邊兩個第二代黑洞合併後的存活機率。紅色與灰色點是不同類型的星團。兩個第一代黑洞合併後的殘餘物相對容易保留，但隨著後代引入，黑洞系統存活機率變得越來越低。圖片來源：<https://arxiv.org/abs/2302.11613>

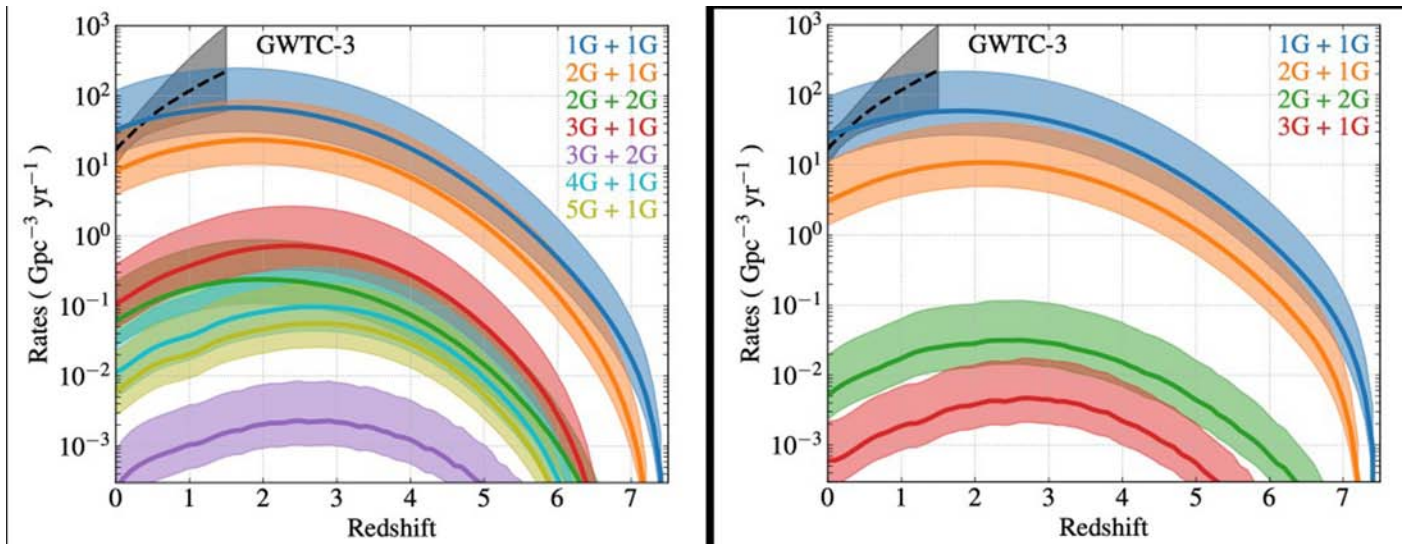


圖5. 不同代黑洞合併率與宇宙紅移的關係（1G指的是第一代）的預測圖。左圖包括質量1,000萬個太陽質量的星團，而右圖包括質量達100萬個太陽質量的星團。右圖沒有超過3G的黑洞合併，表明星團質量要夠大才能承載多代黑洞的合併。圖片來源：<https://arxiv.org/abs/2302.11613>

該研究團隊預計，在下一季重力波望遠鏡的觀測中，將會檢測到數百個額外的雙黑洞合併事件。根據他們的模擬研究，假設檢測到500個雙黑洞合併事件，該團隊預測其中約有50個是二代黑洞合併，約有5個是三代黑洞合併，而最多可能有1個是第四代黑洞合併。這些預測意味著未來重力波天文臺的觀測將提供豐富的資料，並且能夠檢測到更多不同代的黑洞合併事件。這些發現對於我們對宇宙中恆星和星團的演化和形成具有重要意義，並有助於更深入地瞭解中等質量黑洞的形成。

參考資料：

<https://astrobites.org/2023/05/24/juggling-black-holes/>

<https://arxiv.org/abs/2302.11613>

林建爭：美國夏威夷大學天文研所  
泛星計畫博士後研究員

王品方校稿：美國夏威夷專案文物  
修復師

YouTube相關影片：



LIGO Virgo KAGRA Channel  
<https://www.youtube.com/@LIGOVirgo/about>



Simulation Reveals Spiraling  
Supermassive Black Holes  
<https://www.youtube.com/watch?v=i2u-7LMhwvE>



Two Black Holes Merge into  
One  
[https://www.youtube.com/watch?v=I\\_88S8DWbcU](https://www.youtube.com/watch?v=I_88S8DWbcU)