

從 LIGO 和 Virgo 第三次前半段聯合觀測看緻密星體的族群特性

典型的黑洞是什麼樣的？它們數量有多少？黑洞的數量是否隨著宇宙的演化而改變？我們可以利用重力波去了解雙黑洞的形成嗎？

LIGO和Virgo天文台的第三次聯合觀測（O3）已經結束，而第二個重力波觀測目錄（GWTC-2）也隨之發布，其中收集許多在O3前半段（稱為O3a）發現的重力波事件。與之前的目錄GWTC-1比較，重力波事件的數量增加了四倍。我們在第一個目錄發現新穎且獨特的重力波系統，並就我們以電磁波觀測所認識的黑洞，針對其起源提出了新的問題，而第二個目錄則根據重力波族群的特性揭示新觀點，並挑戰我們目前最好的雙黑洞形成理論。

黑洞有兩個物理特徵：質量和自旋。雙黑洞系統的特徵還取決於黑洞自旋相對於雙星軌道平面的方向以及我們與黑洞的距離。因重力波以光速傳送，我們可以從距離得到在黑洞合併時的宇宙年齡。

科學家們提出了三種產生雙黑洞系統的可能性：星野，動態和原始。原始黑洞雙星並不是由恆星產生的黑洞。這些黑洞是在宇宙大爆炸之後的最初幾分鐘內由密度漲落形成的。星野雙星是由恆星在生命的最後階段因自身重力而坍塌形成的黑洞所組成。動態雙星是在一個密集的環境中，本來相距較遠的黑洞因相互作用而演變成緻密系統。

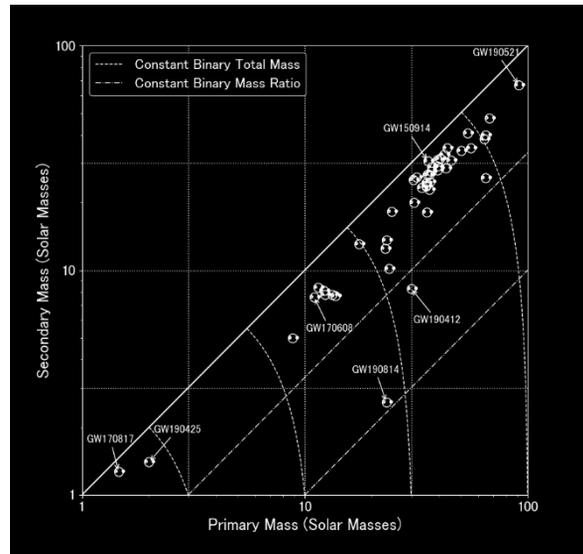


圖 1: 在O1、O2和O3a中偵測到的合併事件的分量質量，本文利用它們研究合併事件的族群特性。部分事件更特別標註。
(Credit: LIGO-Virgo Collaboration / IGF AE / Thomas Dent.)

每種雙黑洞的產生方法與可測量的物理參數相關，這些參數可以幫助我們區分不同種類的雙黑洞系統。例如，動態型式產生的應有不一致的自旋，而在星野產生的雙黑洞系統，其自旋應一致。

在此目錄中找到的雙星系統擴大了先前目錄中報告黑洞的質量範圍。低質量的黑洞彌合了最重的中子星和黑洞之間的“質量間隙” (mass gap)，而高質量的黑洞則超出了所謂的不穩定對 (pair-instability) 超新星爆炸所預測的質量極限。它們的自旋也可測量為非零，並且至少部分與其整體角動量相反，這暗示部分雙黑洞是由動態形成。這個新的目錄將為我們認識宇宙中雙黑洞系統展開重要的一大步。

第二代重力波源目錄 (GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT CATALOG 2)

LIGO和Virgo探測器測量的O3a數據是在2019年4月至10月收集。在此期間，我們觀測到39個新的合併事件：一個雙中子星，36個可靠的雙黑洞和兩個可能的中子星黑洞合併。加上GWTC-1的11個合併系統，在GWTC-2裡總共有50次事件，[誤報率](#)為每年都低於兩個事件。為求保守，在此分析中，我們選擇了每年一個的誤報率。這將樣本限制為47個候選事件。

質量分布

大多數黑洞被認為是恆星的重力坍縮和後續的超新星爆炸的殘骸。由於恆星具有冪次律質量分布，因此我們也可預期黑洞具有冪次律質量分布。

在GWTC-1中，質量分布與一個截斷的冪次律吻合，其指數介於-0.1和3.1之間，質量範圍在 $\sim 7.9M_{\odot}$ 與 $\sim 42.0M_{\odot}$ 之間。低質量臨界值並沒有很好的約束，其成因仍是個謎，但高質量的值可解釋為不穩定對超新星的開端。不穩定對超新星被認為是當一個質量非常大的恆星達到足夠高的密度以產生電子-正電子對時，恆星的內部壓力突然變低，導致坍塌和爆炸，使恆星消失，而不會留下任何黑洞的殘骸。不穩定對超新星被認為可以防止產生質量為50-150 M_{\odot} 的黑洞。

新發表的GWTC-2卻改變了以上的觀點。最輕的黑洞比相信的更小，取決於[GW190814](#)中較低質量的星體是黑洞還是中子星，黑洞的最小質量為2.3 M_{\odot} 或6 M_{\odot} ，而最大的黑洞則可達 $\sim 85M_{\odot}$ 或55 M_{\odot} 。（取決於我們是否包含在[GW190521](#)中的85 M_{\odot} 黑洞）。現在首選的質量分布為指數在2.00和2.73之間的冪次律。其高質量處沒有明顯的截斷，而在28.0至38.0 M_{\odot} 之間更呈現一個「鐘形曲線分布」。到底是什麼原因產生這個峰？答案可能在[球狀星團](#)核心內的高密度恆星環境。當有黑洞經過雙黑洞系統時，會擾亂雙黑洞的[重力勢](#)，從而收緊雙星系統並提高合併率。這類雙星就是通過動態交互合併的。

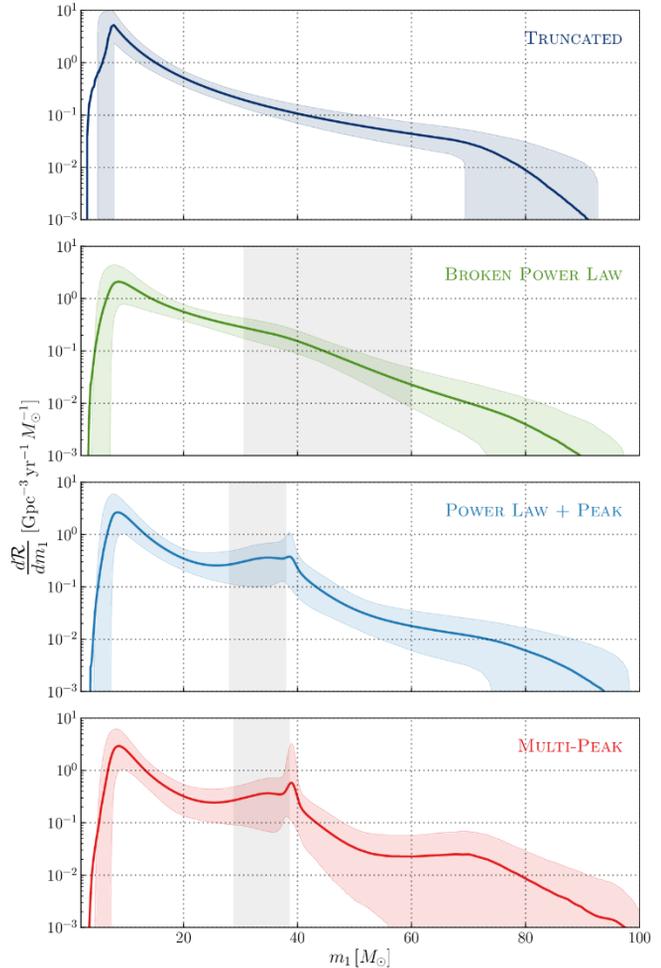


圖 2: 本圖顯示根據四個不同質量分布形狀所得出的黑洞質量的機會。實線是平均預測，而陰影區域顯示了90%可信區間。數據與具有峰值的模型比較吻合。（取自[論文](#)的圖3）

動態相互作用產生了合併黑洞的特定質量和自旋分布。動量守恆有利於較大質量的物體以較小的速度結束，而較小質量的物體以較大的速度結束，從而將較高質量的物體限制在更靠近星團中心的軌道上。因此，質量更高的雙星會集中在更密集的環境中，發生動力相互作用的機會也隨之而變大，進而造成更多黑洞出現在合併黑洞質量分布上。如果以動態型式產生的合併黑洞隨後與另一個黑洞（即第二代雙星）合併，則可能會找到黑洞在不穩定對的間隙中合併。其他形成機制如原始黑洞，也可能在質量頻譜中產生一個或多個鐘形曲線特徵。

除此之外，如果可以消除在質量分布上被預測為不穩定對超新星特徵的銳截斷，則可以在無需動力相互作用下解釋高質量雙星的遞增。而不同形成的方式可以透過在冪次律分布的基礎上添加鐘形曲線來認定。如果存在多個世代的族群，我們可以在更高質量端添加額外的鐘形曲線來模擬。圖2顯示了我們用作測試的不同星體族群的模型。

最後，雖然每個在GWTC-1的雙星系統有非常相近的分量質量（即質量比接近1），但是在GWTC-2裡的[GW190814](#)和[GW190412](#)，它們的質量比明顯地不等於1。GW190814的最少分量質量和質量比更是異常值，似乎表明有新的族群。

自旋分布

我們可以利用有效進動自旋和有效自旋來參數化重力波的波形。有效進動自旋是描述由自旋產生在軌道平面的進動，而有效自旋則是指因黑洞自旋與軌道角動量的一致性所造成合併系統的自旋加速或減慢。

我們相信在星野形成的雙黑洞系統，它們各自的自旋與軌道角動量幾乎一致，但動態產生的系統則反之。所以，我們預期動態合併系統會有進動，其中約有一半應呈現反向自旋（有效自旋小於零）。

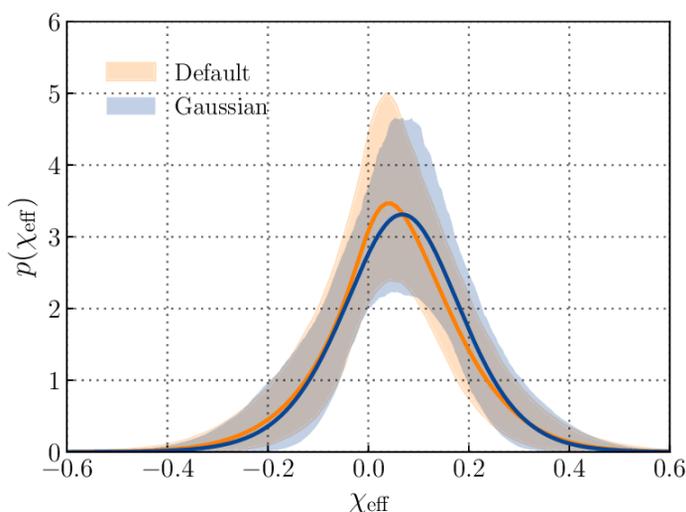


圖 3: 本圖顯示了兩個不同模型的有效自旋參數 χ_{eff} 的分布。雖然大多數自旋與軌道角動量一致 ($\chi_{\text{eff}} > 0$)，但明顯一部分其自旋沿相反方向旋轉。(取自論文的圖11)

儘管GWTC-1中的雙黑洞候選者沒有提供這種相對論自旋進動的證據，但我們在GWTC-2中發現進動的跡象。此外，整體而言，黑洞的自旋偏小且與軌道角動量一致（有效自旋大於零），但目錄同時顯示，即使除去在族群中擁有最大異常值的GW190814，有2%至50%的雙黑洞具有反向自旋。

科學家預期從合併形成的雙黑洞會從前身雙星的軌道角動量繼承大部分的自旋。因此，識別在不同分量質量中的不同自旋分布將會是檢測動態合併最有用的工具。可惜，我們目前還沒有找到相關的證據。

合併速率的紅移演化

自大爆炸以來，我們相信宇宙正在均勻膨脹。這種膨脹會拉伸其中包括電磁波和重力波的所有物體。隨著波的延伸，其頻率會發生變化。對於可見光，這意味著從藍色變為紅色，即“紅移”。物體距離我們越遠，膨脹越大，紅移也越大。因此，紅移是距離的另一種度量，由於光和重力波的速度是固定的，因此也是時間的度量。紅移越高的合併雙星，其年齡也是最大。

透過測量雙黑洞合併速率的紅移演化，並將其與恆星形成速率進行比較，我們得更理解緻密雙星的形成方式。假設我們製作一個立方體，其側面是從地球到仙女座大星系距離的1000倍，我們期望在這個立方體中每年大約有11次雙星合併。如圖4所示，該速率與不隨宇宙時間演化的雙星分布和局部恆星形成速率的分布都一致。我們還發現，鑑於更長的觀測時間和只有一個新發現的雙中子星合併事件，在相同大小的立方體中，雙中子星合併的數量為151，比GWTC-1小。

後續問題

儘管我們對緻密雙星的族群性質有相當的理解，但有很多關鍵問題仍有待研究，例如：我們如何將主黑洞(雙星中質量較大的黑洞)質量頻譜與冪次律的偏差特徵化？簡單來說，就是利用數學函數解釋彼此的差異性，而這些新特徵的物理起源又是什麼？高質量間隙的雙黑洞合併是怎樣誕生：透過階層式合併(hierarchical mergers)、恆星的殘骸質量可以超過不穩定對超新星理論的預期、或者其他原因？反向自旋的檢測是否可以作為動態合併的指標？因偏心雙星系統通常是從動態合併中產生，這個假設可以透過觀測偏心雙星得到證實。若果未來可以明確地檢測到高質量和高自旋的事件，這代表在LIGO-Virgo頻寬裡可提供階層式合併的間接證據。

更多資訊:

我們的網站: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu

免費線上閱讀完整的[科學論文](#)

免費線上閱讀GWTC-2的[科學論文](#)

免費線上閱讀利用GWTC-2來驗證廣義相對論的[科學論文](#)

探索GWTC-2目錄在[重力波開放科學中心](#)(Gravitational Wave Open Science Center)的[數據](#)。

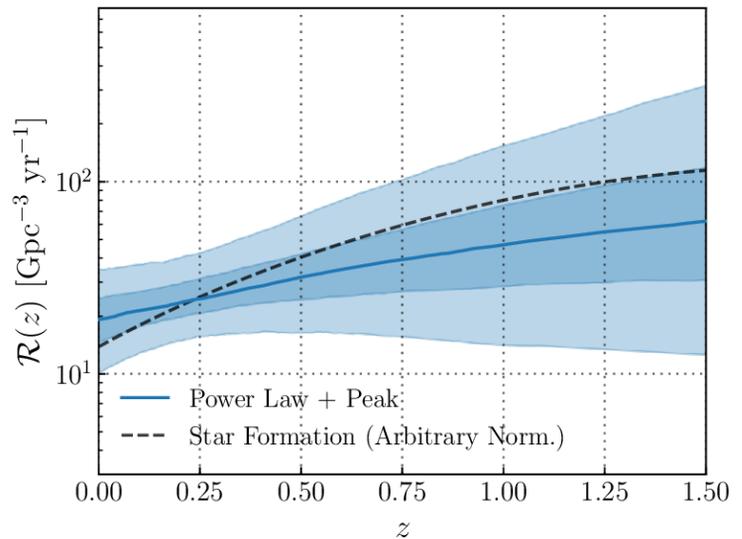


圖 4: 利用冪次律演化模型模擬合併率密度與紅移的關係。實線顯示速率密度的中位數，而深色(淺色)陰影區域顯示“1-sigma”(“2-sigma”)可信區間。數據雖然稍微偏向合併率隨紅移變化，但與平坦分布一致。(取自論文的圖14)

詞彙表

自旋: 黑洞繞其質心的旋轉速度和方向(即角動量)。

超新星爆發: 大質量恆星的最後演化階段所發生的短暫且明亮的爆炸。

冪次律質量分布: 在指定質量下存在黑洞的概率相等於質量的指數: $p(m) \propto m^\alpha$ 其中 α 為冪次律的斜率(即概率隨著質量的增加有多急劇的變化)。

太陽的質量 M_\odot : 太陽的質量，是天文學常用的質量單位。1個太陽的質量 = 1.989×10^{30} kg。



我們的網站:

<http://www.ligo.org>
<http://www.virgo-gw.eu>

