

用重力波改進宇宙膨脹的量測

在新的 LIGO-Virgo-KAGRA 研究團隊的出版物中，我們利用來自新發布的[瞬間重力波事件目錄\(GWTC-3\)](#)的47個重力波源來測量宇宙的局部膨脹率。從這些事件的波形中，我們推估了這些重力波源發生的距離，包括雙黑洞、雙中子星以及中子星-黑洞系統的合併。然後，我們從測量到的質量分佈或者從星系目錄[GLADE+](#)勘測的紅移分佈中推導出這些雙星的紅移信息，最後我們將這些測量結果整合起來，推斷出一個新的、有顯著改進的[哈伯常數](#)估計值。隨著未來幾年將有更多重力波 (GW) 觀測結果出現，我們用嶄新的重力波方法來探測宇宙膨脹可能很快就會揭示當下的「[哈伯常數衝突](#)」：使用不同方法量測的哈伯常數測量值間存在強烈且令人費解的歧異。

概括論述宇宙學和重力波

1920 年代 Georges Lemaître 和 Edwin Hubble 發現我們的宇宙正在膨脹(請參考圖1的卡通插圖)。這一突破徹底改變了我們對宇宙的理解，並為現代宇宙學的基石之一——[大爆炸理論](#)奠定了基礎。

宇宙的局部膨脹率可由哈伯常數測量，用符號 H_0 表示，單位為幾公里每秒每[百萬秒差距](#) (Mpc)。然而，即使經過近一個世紀，哈伯常數的值仍未被準確確定。



圖 1. 宇宙膨脹的示意圖，其中星系會在膨脹的氣球表面上相互遠離。
(Credits: Eugenio Bianchi, Carlo Rovelli & Rocky Kolb)

使用不同方法的「當前最新技術」測量哈伯常數（大部分分佈在 65 至 $80 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 範圍內），結果間存在明顯的不一致。例如，我們可以從宇宙在年齡約為 38 萬 年所發射第一道光，也被稱為[宇宙微波背景\(CMB\)](#)，透過其測量來間接推斷出哈伯常數，透過這種方法得到的值非常接近 $H_0 = 68 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。或者，我們可以比較直接的通過研究[Ia 型超新星](#)和[造父變星](#)這類光度會產生脈衝變化的恆星來定義哈伯常數，那麼得到的值會很接近 $H_0 = 74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。這些值存在嚴重歧異，因為這些值的不準確度非常小，所以它們的差異大到不能簡單地歸結為我們期望從不同測量方法中所導致不可避免的隨機變化。這種現象即所謂的「哈伯常數衝突」，因此成為宇宙學的一個主要問題。

與此同時，[自 2015 年以來](#)，我們在觀察宇宙上打開了一扇全新的窗口——不是基於電磁波（即光，由電荷位移產生），而是基於重力波（由質量加速產生）。重力波是時空結構中的漣漪或擾動。它們是由愛因斯坦(Albert Einstein)在 1917 年提出理論所預測的現象，而觀察到重力波是對愛因斯坦的[廣義相對論](#)的完美證實。宇宙中已知最強的重力波源是對的極其緻密，緊湊的星體，一般所熟知的有[黑洞](#)或[中子星](#)。當這些恆星受重力束縛相互環繞時，它們會通過發射重力波失去能量，並且它們的軌道會收縮，直到它們合併成一個黑洞。

如果我們觀察這樣一個緻密的雙星系統併合過程中所發射的重力波，分析其併合波形和演變方式可以讓我們直接量測到離該雙星系統的距離。這與許多其他更傳統的測量宇宙距離的方法（包括上面提到的造父變星和 Ia 型超新星）形成鮮明對比，這些傳統方法依賴於參考天文學家稱之為宇宙距離階梯的多個校準步驟。這種白校準距離指示器的精妙特性，能夠繞過宇宙距離階梯的梯級，點燃人們對這些被稱為「標準警報器」的緻密雙星重力波源的極大興趣。如果測量到標準警報器的直接距離可以結合與波源遠離我們的速度——我們可以從波源所在星系的紅移中推斷出來——這樣的獨立訊息，我們就可以測量哈伯常數。

轉向黑暗面

對於中子星與電磁波（例如光學）所觀測到對應的天體的雙星合併，其宿主星系的紅移很容易測量。在重力波事件中發現的第一個雙中子星合併，[GW170817](#)，伴隨著明亮電磁波可觀測到的對應天體。這導致迅速識別出中子星雙星合併所在的星系（[NGC4993](#)），可將其紅移與測量到 [GW170817](#) 的重力波事件直接發生距離相結合，以獲得哈伯常數的第一個重力波標準警報器測量值。

不幸的是，大多數雙星併和，特別是雙黑洞（BBH）的併合，沒有相關的對應天體可透過電磁波觀測到。然而，即便在缺乏這樣的對應天體來直接指明每個重力波源的宿主星系的情形下，我們依然可以使用我們的重力波觀測來獲取重力波源有關紅移的信息。

首先，我們可以利用這樣一個事實，即在 LIGO 和 Virgo 探測器的參考架構中，我們所測量的雙黑洞的質量會因宇宙膨脹而發生紅移 — 即雙黑洞的質量看起來比實際大，就像光一樣來自遠離我們的星系的光同樣會被拉到更長（更紅）的波長。這意味著我們所測量的雙黑洞質量的統計分佈原則上也可以提供我們有關各群重力波源紅移統計分佈的信息。我們可以將這些信息與它們被測量到的距離結合起來推斷哈伯常數。

其次，我們可以使用重力波觀測來約束並確認重力波源所在的天空位置——這種方式可以將宿主星系的判定縮小到該區域的一組候選星系。結合對所有這些可能的宿主星系所直接量測到的紅移信息，我們可以從統計上推斷 H_0 —正如 Bernard Schutz 在一篇[1986年的開創性論文](#)中首次概述的那樣。

因此，即使沒能透過電磁波觀測到對應天體，我們的重力波觀測也可以作為「暗標準警報器」。

測量方法是如何運作的??

為了更詳細地了解我們如何使用雙黑洞族群的紅移質量來測量哈伯常數，我們假設宇宙中黑洞的質量遵循一個具有明顯高峰值的分佈，這樣的假設基於與它們的形成相關的一些物理過程。（事實上，根據理論預測存在這樣的峰值源自於恆星型黑洞殘餘物具有最大容許質量，因為更大質量的恆星會以更猛烈的方式爆炸，以至於沒有留下任何殘餘物——具有這種現象的被稱為不穩定對超新星）。儘管我們只能測量每組雙黑洞的紅移質量，但我們仍然可以預期，這些紅移質量的觀測值分佈也將帶有該峰值的痕跡——雖然這個峰值也會因宇宙膨脹而發生紅移。因此，觀測質量分佈的峰值告訴我們雙黑洞併合事件的紅移，我們可以將這些信息與我們測量到雙黑洞併合事件的距離結合起來以推定宇宙的膨脹率。

我們用於測量 H_0 的第二種統計方法涉及使用稱為 GLADE+ 的星系目錄，該目錄有系統地整理了有關我們宇宙區域內數百萬個星系的紅移、亮度、顏色和其他屬性(絲毫不誇張!)的信息。由於重力波的數據資料告訴我們每個標準警報器在天空的位置和距離，我們可以將該訊息與我們的 GLADE+ 目錄進行交叉匹配，以確定警報器發生可能的宿主星系。實際上，這種關聯表示僅為概率，因為我們對警報器發生的位置在天空中的定位通常不是很精確，

拜訪我們的網站:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



參考更多的訊息

閱讀完整的科學文章:

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2100185/public/main>

GWTC-3 相關資料發佈:

<https://www.gw-openscience.org/>

因此往往不僅只確定了單一潛在的宿主星系。相反的，一個事件可能有數百個甚至數千個可能的宿主—每個宿主都有不同的概率是真正的宿主星系。這種關聯也取決於哈伯常數的值，因為它決定了距離和紅移之間的關係。我們還需要考慮到一個事實，就是星系調查是不完整的—即它們不包含天區調查區塊中的每個星系，例如，更遠的星系會因為更小或者亮度更低使得它們可能太暗而無法被檢測到。儘管如此，仔細地通過平均事件所發生可能的宿主星系的紅移，我們可以描繪每個警報器的紅移特徵——從而將這些訊息與警報器推估發生的重力波距離結合起來，再次測量 H_0 的值。

我們是如何分析的?

我們發表的文章中展示了我們使用上一節中所描述的兩種方法的得到的分析結果：包含根基於雙黑洞族群與星系目錄的方法，將其應用在我們從 GWTC-3 中所選擇的重力波事件。

對於基於族群的分析方法，我們使用雙黑洞紅移質量的分佈，這是第一次有分析方法能夠同時限制雙黑洞族群的特性和決定宇宙膨脹的宇宙學參數。事實上，我們的分析不僅擬合了哈伯常數，還擬合了決定宇宙中暗物質和暗能量數量的無量測單位的參數，從而形成了眾所周知的宇宙學「標準模型」—通常被稱為「 Λ -冷暗物質(Lambda CDM)」。

我們發現 GWTC-3 數據尚未對宇宙中的暗物質和暗能量含量給予任何有用的限制。這並不令人驚訝，因為與我們正在研究的GWTC-3所節錄的重力波源相比，對於在更遠距離（和紅移）處觀察到的雙黑洞併合事件而言，這些參數應該會變得更加重要。另一方面，我們的結果確實表明，隨著我們的偵測器變得更加靈敏並且我們能觀察到更遠的警報事件，是可以支持我們從雙黑洞族群中去了解暗物質和暗能量的未來前景。

無論如何，應用我們基於雙黑洞族群的方法所分析推定的哈伯常數其結果會更具信息量。圖 2 顯示了我們在 H_0 和我們的族群模型參數結合得到的限制範圍；這個圖的結果表明（至少針對這個特定的族群模型）我們的數據似乎傾向偏低的哈伯常數值。當我們結合了來自GW170817及電磁波段所能觀測到的對應天體的 H_0 測量值的群體限制，我們估計出 $H_0 = 68^{+13}_{-7} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 這樣的值，代表了與之前發表的結果，也就是透過第一個瞬間重力波事件目錄(GWTC-1)節錄的雙黑洞併合事件所做的分析，有13%的改進。（請注意，我們對重力波距離估計的特性使 H_0 的誤差估計「不對稱」。）

使用 GLADE+ 目錄的第二種方法所得的結果也令人興奮。在這種情況下，我們首先需要假定我們的模型配合雙黑洞併合族群的特性；我們採用的模型參數（包括**冪定律**加上**高斯峰**來描述黑洞質量的分佈），能更最恰當的擬合所觀測到的雙黑洞族群。將來自 GLADE+ 的訊息與這些固定的雙黑洞族群模

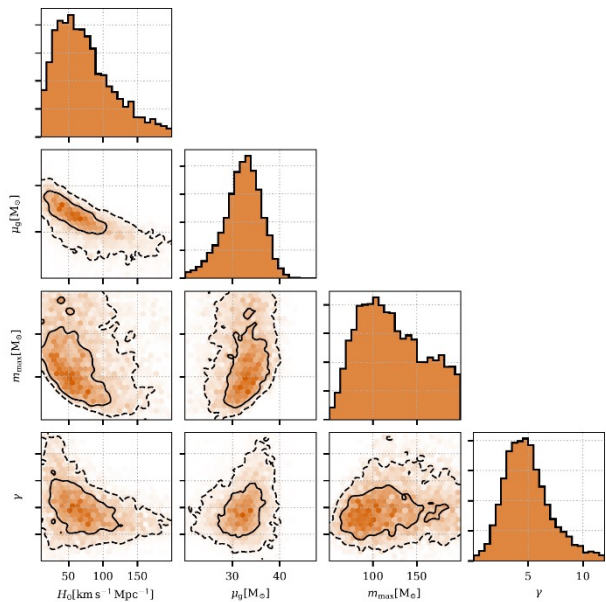


圖 2. (請參考來自發表論文中的圖)。哈伯常數 (H_0) 值的後驗概率分佈和我們的模型參數在雙黑洞族群中的質量分佈，是從我們在 GWTC-3 中選出的雙黑洞併合事件中基於群體的分析而共同推斷出來。每行最右側的方格圖顯示單一參數的概率分佈，而 H_0 如何分佈則顯示在圖的頂部。其他方格圖顯示每對參數其聯合概率的分佈。圖中實線和虛線所包圍的所在區域，分別為參數的真實值其涵蓋範圍達90%和50%的信心水準。

型的參數相互結合，我們估計出 $H_0 = 68^{+8}_{-6} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 這樣的值，這代表比起從相關於GWTC-1 所測量的值有41%的改進。圖 3 顯示了這個新結果，我們看到我們推估的哈伯常數值與來自宇宙微波背景輻射(CMB)和 Ia 型超新星加上造父變星（分別顯示為粉紅色和綠色垂直帶）的 H_0 估計值一致，儘管它還不夠精確到足以幫助解決這些測量間造成的‘哈伯常數衝突’。

總結及未來展望

我們的研究成果比起先前其他方法的結果對哈伯常數提供更強的限制，但這些結果都很大取決於我們如何對雙黑洞的族群建模。幾乎所有基於目錄方法分析的 GWTC-3 事件都會強烈受到我們對該族群模型所做的假設影響。唯一不是這種情況的事件是 GW190814。原因是我們知道它的天空位置比其他事件要清楚得多，這意味著其定位體積與 GLADE+ 數據之間的關聯可以為了解哈伯常數提供很有用信息。

在未來幾年，LIGO 和 Virgo 探測器將進行進一步升級以提高其靈敏度。而且，KAGRA（計劃於 2022 年末的第四次觀測中加入）和 LIGO India（2030 前）也會逐步加入團隊提升整體運作性能。我們預期各種的升級將大量增加可使用的重力波事件數量，因此將改善我們對哈伯常數的認識——尤其如果我們可以在分析中使用更新、更深入、包括更高的紅移的星系目錄。

預計未來幾年雙黑洞檢測率將顯著提高，因此我們也期望基於雙黑洞族群的研究方法在未來也可以得到改進。在幾年內，我們預期同時限制雙黑洞族群的特性（考慮比我們在這個工作中更全面的族群模型）和宇宙學模型的參數分析——不僅包括哈伯常數，還有暗物質和暗能量對宇宙膨脹的影響。重力波宇宙學的未來前景一片光明！

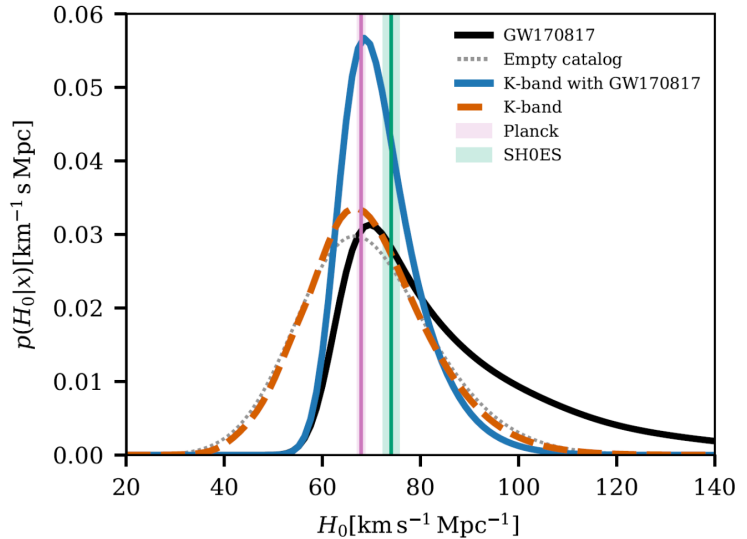


圖 3. (文章中的圖 9) 對應於不同分析的哈伯常數 (H_0) 後驗概率分佈。每個概率分佈都是一條曲線，代表我們在執行分析後對 H_0 值的最佳猜測。黑色實線僅使用雙中子星合併事件 GW170817 及其電磁對應物繪製結果。藍色虛線顯示了我們在不使用任何星系目錄信息的情況下的分析結果。在橙色實線和綠色虛線中，我們分別繪製了考慮星系目錄的分析結果，包括和不包括 GW170817 事件。（注意：這裡使用了 K 波段星系目錄，它整理了以紅外線觀測數據為基礎的星系資料）。最後，兩個垂直帶（洋紅色和深綠色）分別顯示了從 CMB（普朗克）和超新星 + 造父變星（SHOES）獲得的 H_0 的約束。

詞彙表

GLADE+：新的、擴展的星系目錄彙編，包含大約 2200 萬個星系的數據，用於為我們的重力波事件的潛在宿主星系提供紅移信息。可在[此處](#)免費獲取描述 GLADE+ 目錄的科學論文。

百萬秒差距：天文距離的單位，約等於 3.26 百萬光年。

哈伯常數：用來衡量宇宙膨脹率的參數。它的當前值用符號 H_0 表示，測量約為 $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。

大爆炸理論：對可觀測宇宙起源和演化的解釋，它描述了宇宙是如何在大約 140 億年前開始並從最初非常熱和密集的狀態膨脹的。大爆炸理論被廣泛接受，因為它解釋了宇宙的許多觀察到的特性，包括[晶核在學子核的豐度](#)和[宇宙微波背景輻射](#)的存在。

宇宙微波背景 (CMB)：來自宇宙演化早期階段的電磁輻射，大約有 380,000 年的歷史。CMB 也被稱為大爆炸遺留下來「遺跡輻射」。有關更多信息，請參見[此處](#)。

Ia 型超新星：白矮星的特殊爆炸機制，吸積來自紅巨星伴星的物質，其質量大於[錢德勒拉上極限](#)，即[太陽質量的 1.4 倍](#)。可以可靠地估計 Ia 型超新星的距離，因為它們都被發現以非常相似的峰值固有亮度或[光度](#)爆炸，使它們成為有用的[標準燭光](#)。

造父變星：一種脈動變星，其半徑和溫度會發生週期性變化，導致其[光度](#)有規律的週期性變化。通過測量它們的脈動週期，天文學家可以可靠地估計造父變星的距離。

宇宙距離階梯：天文學家確定宇宙中物體距離的方法的組合。先建立在太陽系附近天體（通常在銀河系內）直接的幾何距離測量，再基於各種天體中找到關於距離的經驗關係，測量遙遠天體的距離。有關更多信息，請參見[此處](#)。

黑洞：一個由極其緻密的質量形成的時空區域，其引力如此之大，以至於任何東西，包括光，都無法離開。

中子星：一顆質量為太陽質量 10 到 25 倍的恆星經歷的超新星過程的殘餘物。典型的中子星質量約為 1-2 個太陽質量，半徑為 10-15 公里，是迄今為止發現密度最高的天體之一。

對不穩定性超新星 (PISN)：預測發生在質量大於 130 個太陽質量的恆星中的超新星爆炸類型。核心中[正負電子對](#)的產生導致支撐恆星的壓力急劇下降，導致失控的熱核爆炸，沒有留下任何恆星殘骸。

紅移：由於光源相對於觀察者的運動而增加（聲波、光或引力波）的波長。由於[宇宙的宇宙膨脹](#)，星系等物體正在遠離我們，來自它們的光和其他電磁輻射具有更長的波長。

暗物質：神秘的物質形式，約佔宇宙質量的 85%。它們黑暗，不發光或有電磁相互作用。許多暗物質理論預測它是某種類型的基本粒子，但考慮我們所知道的最暗物體（黑洞！）可能是暗物質的一個組成部分的可能性也很有趣。

暗能量：神秘、未知的宇宙組成部分，支配著宇宙的行為，並被認為導致[宇宙加速膨脹](#)。暗能量最簡單的模型是所謂的宇宙常數模型，它施加負壓，導致加速膨脹。

後驗概率分佈：在分析我們的數據後顯示給定物理屬性的不同值的可能性，通過稱為[貝葉斯推斷](#)的過程進行估計。