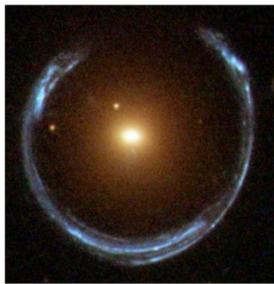
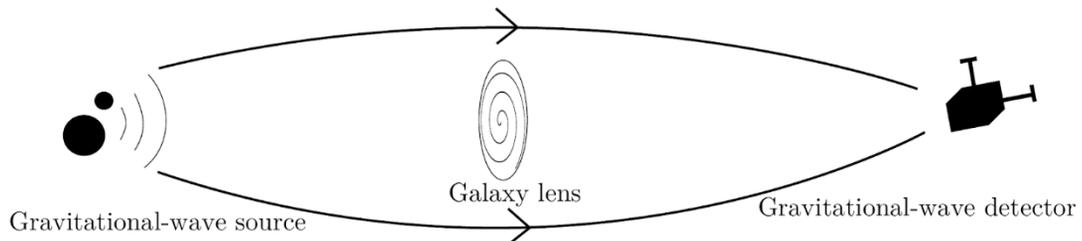


重力彎曲重力：被重力透鏡化的 LIGO-VIRGO O3a 重力波事件？

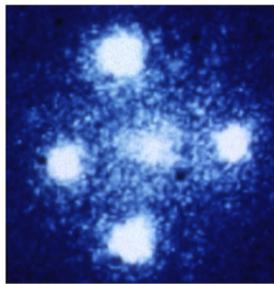
在「重力透鏡」的現象中，巨大質量的天體扮演著巨型透鏡的角色。想像有一個宛如星系般大小的放大鏡對於那些來自宇宙的光波或重力波會帶來什麼影響？在這次的研究中，我們利用了第三次 LIGO-Virgo 觀測的前半部資料（以下簡稱 O3a），嘗試在眾多的重力波信號中找出有被透鏡化的重力波事件。

重力透鏡 - 愛因斯坦的預測與在天文學的應用

根據廣義相對論的假設，巨大質量的天體可以導致周圍的時間與空間彎曲，進而扭曲光的行進。換句話說，它們扮演著重力透鏡。這種透鏡可以讓遠方的天體變得更亮、化成多個「分身」、形變成常弧光或所謂的「愛因斯坦環」。 (圖1)。在電磁波譜上的重力透鏡現象在現今天文觀測中已經相當普遍。在1919年的日食觀測中，重力透鏡也為我們提供了對廣義相對論的第一次驗證。近年，弱透鏡的觀測已被用於繪製宇宙的質量分佈圖，為暗物質的存在提供了新的佐證。系外行星也能作為重力透鏡。系外行星定期移動到主星前方會導致主星的亮度發生週期性變化。因此重力透鏡也成為了天文學家研究系外行星的一大利器。此外，重力透鏡更能揭開一些暗淡無光卻有巨大質量的天體與其結構的神秘面紗。重力透鏡的應用已經成為天文學、天文物理學、宇宙學非常重要的一環。



ESA/Hubble & NASA



NASA, ESA, and STScI



NASA, ESA, Hubble SM4 ERO Team, ST-ECF

圖1：當光來到巨大質量的天體周圍時，其路徑會由於重力而彎曲，從而導致重力透鏡的形成。這種現象會產生愛因斯坦環和愛因斯坦十字、源自其他星系的背景光的統計變形以及許多其他有趣的結果。與光類似的是，重力波也可以被透鏡影響。然而，不只是探測方式，連同在天文中的應用都截然不同的。本研究中我們只關注重力波事件因重力透鏡出現的重複性和在重力波波形中與頻率相依的失真，而不包含圖形失真或恆星的瞬時增亮。

重力透鏡能對重力波產生什麼影響？

就像電磁波一樣，**重力波**可以在行進時，被自身所穿過物體之重力透鏡化，如恆星、**黑洞**、星系和星系團（圖1）。然而，儘管重力波的透鏡化理論與光波的透鏡化理論相當類似，重力波與光波的波源和他們各自的探測器都十分迥異，因此各自的探測方法也截然不同。我們可以理解重力透鏡的放大率為波幅的放大。這種放大會導致**雙星合併信號**的源頭看起來更近，測量的質量也會比實際上更巨大。而「分身」現象也會變成間隔從幾分鐘到幾個月（甚至幾年）且物理性質幾乎完全相同的重複重力波事件。雖然這些重複事件在位置上會有分離，然而分離的距離對於當今探測器來說卻是無法分辨的，因此這些事件看起來幾乎來自天空的同一個位置。另一方面，微透鏡會產生微小的透鏡化時間延遲，這會導致多個透鏡波形在重力波探測器處重疊並產生波形的「規率跳動」。

從觀測透鏡化重力波中，我們能學到什麼？

如果發現重力波的透鏡化，這將引發一系列令人興奮的科學探索。當該透鏡系統足夠獨特，我們可以通過結合重力波和電磁波的透鏡測量來找到傳統望遠鏡所看不到的黑洞。如果對應該透鏡化重力波的電磁波信號也被找到，利用重力波測量的次毫秒時間延遲，精確的宇宙學研究可能變得可行。通過對比透鏡化重力波與其瞬時電磁波之間的時間延遲，人們可以測量重力相對於光的速度。也由於我們可以在不同方位多次測量同一個透鏡化重力波事件，重力波的**偏振**也可以被全面探測，進而測試廣義相對論和其他替代理論。另一方面，微透鏡可能有助於研究原始黑洞和中質量黑洞等等的分佈。一旦被觀測到，透鏡化重力波的觀測將大大推進基礎物理學、天體物理學和宇宙學。

我們在 O3a 數據發現的事

在本研究中，我們嘗試在 [Advanced LIGO](#) 和 [Advanced Virgo](#) O3a 數據中尋找**緻密雙星**重力波信號的透鏡化特徵。在當前探測器的靈敏度下，我們已經預測了透鏡化發生的頻率，並確定即便缺乏可探測的強透鏡化效應也依然能增進我們對**遙遠宇宙**中密致雙星合併率的了解（圖2）。

來自論文的圖表

有關這些圖表及其製作方式的更多資訊，請閱讀免費提供的[預印本](#)。

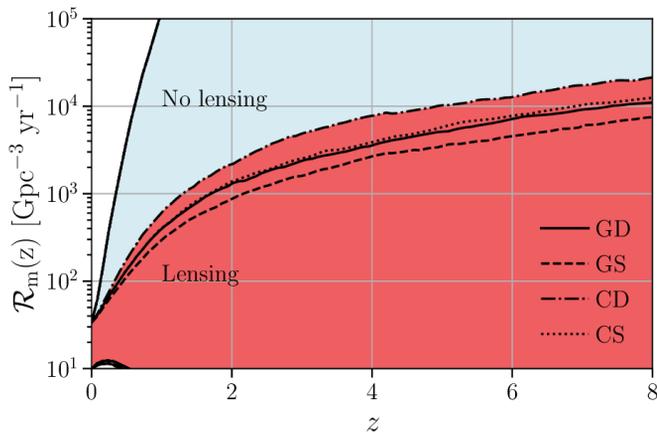


圖2：該圖展示了可探測之透鏡化重力波的存在與否是如何提高我們對整個宇宙歷史中**緻密雙星**合併率（縱軸）的了解，橫軸給出宇宙紅移 z （目前位於 $z=0$ ）。如圖中藍色區域所示，我們已經從我們的**觀測數據**中對合併率有了一些全面的了解（你可以在[這文章](#)中閱讀更多信息）。了解數據中是否存在可檢測的透鏡化效應會限制高紅移（早期宇宙）合併率，如圖中紅色區域所示。這是因為透鏡化可以放大信號，以便我們能夠從更遠的地方檢測到它們。在該圖中，縱軸顯示的數量在技術上是合併率密度，即每年每**十億秒差距**（Gpc）立方空間中的合併事件數。不同的線代表不同的透鏡化結果：星系級透鏡（G）和星團級透鏡（C）以及僅檢測單個（S）或兩個（D）透鏡化重力波事件。



我們的網站：

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

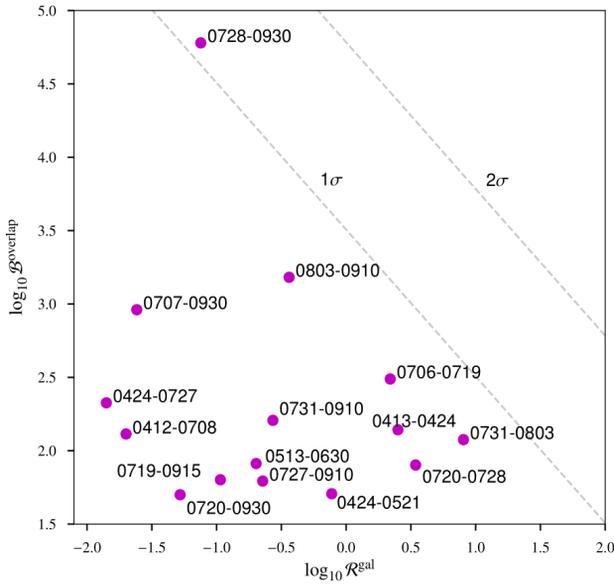


圖 3：在O3a數據中，因為重力透鏡而造成相似屬性的事件對（都包括在第二代重力波瞬變目錄GWTC-2中）。屬性包括例如合併的質量和自旋。縱軸橫軸為相似性的排名，而橫軸則告訴我們該對重力波事件的時間延遲是與透鏡作用（假設一個星系充當透鏡，導致預期的時間延遲較短並排名更高）還是兩個不相關的事件（平均會產生更長的時間，延遲並排名較低）更一致。虛線告訴我們，結合這兩種測量，沒有任何一對顯示出明顯的透鏡效應（以傳統的標準差水平測量）。我們還進行了更詳細的後續分析（還考慮包括族群模型和選擇偏差。最後，所有候選對似乎都只是恰好具有相似屬性的獨立合併事件，它們並不涉及透鏡效應。

我們還展示了沒觀察到隨機重力波背景的事實如何提高我們對重力波透鏡化發生率的了解。此外，重力透鏡帶來的放大效應也許可以解釋一些質量異常高的重力波事件（如GW190425或GW190521）。我們還在探測器的數據中進行重力波「分身」的搜索，分析了所有可能的信號對，比較它們是來自同一來源或完全獨立事件產生的可能性。我們發現了幾個彼此非常相似的候選對（參見圖3），但加入了更現實的考量後，我們發現支持證據還是不足。這些考量包括重力波系統的數量、搜索的選擇偏差以及當前探測器靈敏度下的預期的重力波透鏡化發生率。最後，我們搜索了微透鏡對檢測到的事件波形可能造成的「規率跳動」效應，但在36個測試事件中皆沒有發現相關證據（見圖4）。我們研究的總結是在O3a的數據中沒有發現有關重力透鏡的有力證據。

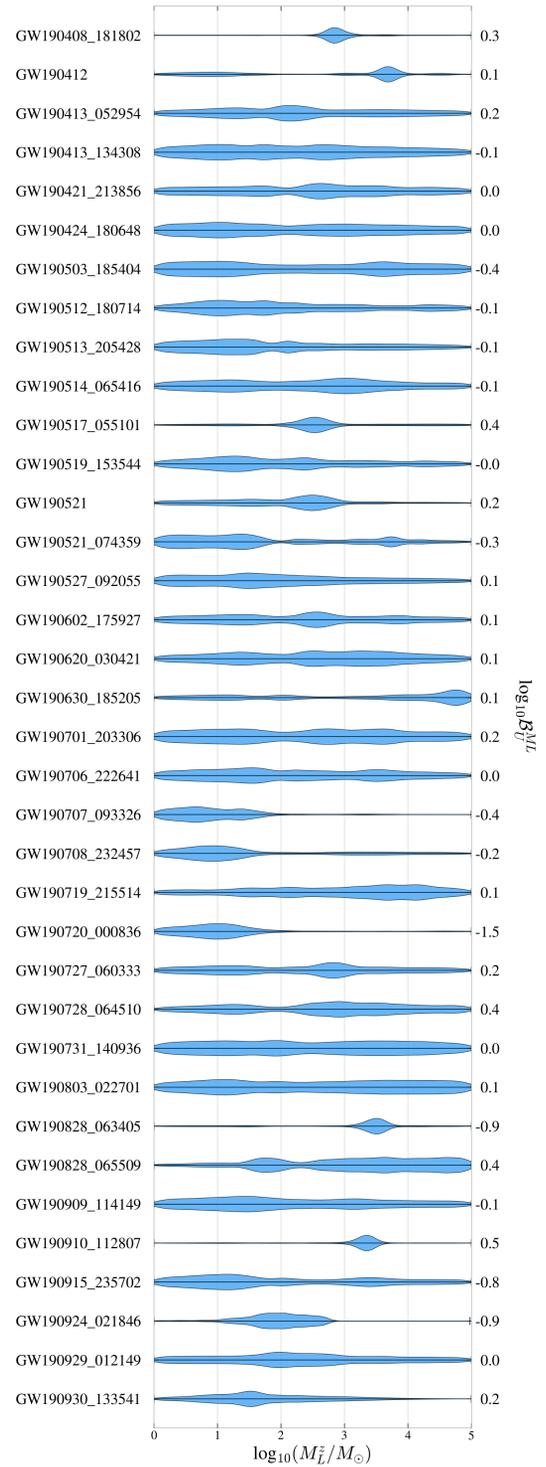


圖 4：測試來自O3a的36個重力波事件的頻率相關微透鏡「規率跳動」的結果。那些等高線顯示了透鏡質量的可能性，當中假設事件都經歷了微透鏡。然而，我們沒有發現任何實際證據支持它們經歷了微透鏡效應。圖中右側列出的值是貝葉斯因子，該統計數據告訴我們使用透鏡或不使用透鏡效應更可能解釋測量數據。由於它們都是負數或接近於零，這告訴我們沒有一個事件需要微透鏡來解釋它們的頻率演變。

未來展望

我們將有可能通過更靈敏的分析方法和更詳細的透鏡建模，更深入地研究重力波的透鏡效應。我們也將對那些透鏡候選者進行電磁波的後續觀測。即使僅基於重力波數據未能提供有力證據，但也有希望在電磁波觀測上識別到可能的宿主星系和透鏡。對當前一代探測器的進一步升級和全球網絡的擴展將繼續提高探測到重力波透鏡特徵的機會。我們也期待第三代和太空重力波探測器（如[愛因斯坦望遠鏡](#)、[宇宙探索者](#)和 [LISA](#)）在2030年代的加入，讓更多其他令人興奮的研究變得可行。

如想知道更多，可以：

瀏覽我們的網站：

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

閱讀本篇的科學文章（[預印本](#)）。

詞彙表

黑洞：由非常緻密的質量引起的時空區域，在該區域中重力非常強烈，以至於阻止任何物體(包括光)離開。

緻密雙星：由兩顆坍塌恆星的殘骸組成的系統，例如一顆中子星和一個黑洞，它們彼此非常緊密地環繞。

遙遠的宇宙：由於光速有限，我們越往遠方看遙遠的宇宙，時間回溯也越遠。因此，遠距離探測到的雙星合併實際上發生在比今天年輕得多的宇宙。由於[宇宙膨脹](#)，更遠的距離也對應於[紅移](#)更高的觀察波長。

廣義相對論：目前公認的重力理論，由愛因斯坦於1916年發表。在該理論中，重力是由質量或能量集中引起的時空彎曲的結果。它同時預測了重力波和重力透鏡效應。

十億秒差距：天文距離的單位，約等於32.6億光年。

重力波形模板：重力波引起的擾動如何隨時間變化的預測模型。

重力波偏振：由重力波移動引起的時空拉伸和擠壓的幾何形狀。廣義相對論只預測一種特定類型，即所謂的張量偏振，而一些替代論也預測了額外的偏振。

紅移：在膨脹的宇宙中傳播的光或重力波波長的拉伸。

選擇偏差：重力波探測器更有可能從天空中的某些區域探測到具有某些固有特性（例如在正確的質量範圍內）的事件。這導致發現比最初預期更多的相似事件對。

自旋：衡量物體繞自身旋轉速度的參數。