

GWTC-3, 第三個重力波訊號源目錄

簡介

GWTC-3 (the 3rd Gravitational-Wave Transient Catalog)是重力波偵測器LIGO, Virgo與KAGRA所收集的第三個重力波訊號源目錄。GWTC-3額外增加了從2019年11月到2020年3月中重力波偵測器在第三次聯合觀測後半段(簡稱O3b)所偵測到的重力波事件。GWTC-3象徵著重力波觀測至今所累積的最完整目錄。

那至今有哪些重力波目錄呢？

- [GWTC-1](#), 包含第一與第二次聯合觀測(O1與O2)總共11次的重力波事件。
- [GWTC-2](#), 比GWTC-1額外再增加39次事件, 讓總事件數增加為50 (包含O1, O2, 與O3前半段, O3a)。
- [GWTC-2.1](#) 重新分析O3a數據進而再發現8個可能事件, 但也移除原本GWTC-2中的三個事件 (因為其為真實天文物理訊號的可能性降為50%以下; 參見下面章節「[偵測重力波](#)」)。總事件數增加為55。
- GWTC-3 (本次論文發表) 再進一步增加O3b的35次重力波事件, 讓總事件數遽增為90 (圖三中可見觀測事件數的遽增)。

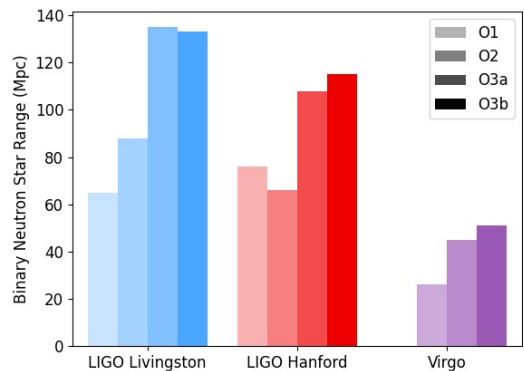
KAGRA在O3b後期加入LIGO與Virgo並在2020年4月與位於德國的[GEO 600](#)一同完成了一次為期兩週的聯合觀測。那次觀測的結果將會在另一篇論文分開探討。

目前我們所有觀測到的重力波事件都來自於黑洞或中子星的合併。我們稱這類星體為**緻密星體**並相信它們來自於大質量恆星演化後的產物。重力波事件包含：**雙黑洞合併**、**雙中子星合併**、**與中子星-黑洞合併**。由於儀器的靈敏度提升, 偵測到事件的速率也跟著加速。過去經過長久的努力才終於在2015年偵測到第一次的重力波事件。

在本次科學摘要中, 讀者們可以學到我們如何收集數據, 如何偵測事件, 如何估計合併事件中的物理特性, 有哪些GWTC-3的亮點, 以及未來觀測的計畫。

重力波偵測器

過去幾年LIGO與Virgo的靈敏度透過一系列的儀器升級而有著顯著的提升, 數據品質也因為分析技術的進步而改善。測量重力波偵測器的靈敏度有許多方法。一種方法是估計重力波偵測器可以觀測到典型雙中子星合併訊號的距離範圍: 越大的範圍代表越遠的訊號可以被偵測到, 也代表可以期待觀測到更多的事件。O3的觀測分為兩個部分(O3a與O3b), 兩段之間在2019年10月中斷了一個月的觀測。許多儀器維修與升級都在那一個月之間完成, 包含[LIGO利文斯頓\(Livingston\)站的鏡片清潔](#)、[LIGO漢福德\(Hanford\)站的真空裝置更換](#)、[以及提升Virgo的雷射輸出功率](#)。這些調整以及平時的維護讓重力波偵測器維持或提升它的靈敏度。圖一表示中子星合併在不同重力波偵測器在不同時期所達到的偵測範圍的**中位數**。在O3a與O3b之間, Virgo在中子星合併偵測範圍的中位數提升了13.3%, LIGO漢福德提升了6.5%, LIGO利文斯頓(靈敏度最高的偵測器)則保持與漢福德相近的靈敏度, 但略降低了1.5%。重力波偵測器的原始數據來自於儀器中雷射干涉儀雷射強度隨時間變化的輸出。這些原始數據需要經過**校準**才能獲得對應的重力波應變振幅。這些校準工作必須非常小心。我們透過雷射精準的推動鏡片來測量干涉輸出的結果改變。最初的校準是接近即時調整的。必要時, 之後的重新校準與去除長時間的背景噪音都可以幫助獲得更佳的應變數來幫助之後的分析。



圖一: 不同重力波偵測器在前兩次的聯合觀測(O1與O2)以及第三次聯合觀測的兩段落(O3a與O3b)中偵測雙中子星合併範圍的**中位數**。距離範圍的單位是百萬秒差距 (Mpc)。圖片來源: LIGO-Virgo-KAGRA Collaborations/Hannah Middleton/OzGrav.

在校準與扣除雜訊之後, 數據的品質仍然需要仔細的檢查。最頻繁遇見的困擾是接近中子星合併時的訊號跳針(glitch)了。跳針是一種短時間(數秒到分鐘)的時變雜訊。某些已知的跳針來自光的**散射**, 但也有許多種跳針雜訊的來源不明。跳針偶爾會與重力波訊號重疊, 那時我們可以透過跳針減除的技術來移除數據中的跳針(如圖二)。跳針減除在發現第一次雙中子星合併與GWTC-3的數據分析中扮演著非常重要的一環。GWTC-3新增的35次事件, 其中7次必須仰賴跳針減除。透過一個市民科學計畫 [Gravity Spy](#), 我們可以發現與瞭解更多關於跳針的種種。

偵測重力波

在O3a與O3b的觀測期間我們持續發佈疑似重力波訊號的[公開警報](#)。快速的公開警報可以幫助整個天文社群來即時使用[電磁波望遠鏡與微中子偵測器](#)來搜尋多信使訊號。在O3b中公開發報通常可以在事件開始幾分鐘內即時推播。之後再重新分析重力波數據可以再追溯並發現更多的事件。GWTC-3最終釋出的分析受益於校準、數據品質與數據分析的提升才能評估這些可疑事件是否有興趣。在O3b中共有釋出39次的公開警報，但最後只有18次事件有超過50%的機率是真實的而被收錄在GWTC-3。另外更有17次事件是在後續分析中才初次發現的。

我們使用兩種方法來分析重力波事件的候選者：模板搜尋法以及最小模型搜尋法。模板搜尋法使用一系列挑選的模擬緻密星合併訊號做為模板然後比對部分觀測數據隨時間上是否與模板匹配。最小模型搜尋法不需要尋找任何特定形式的訊號，但需要相同的訊號同時出現在不同的重力波偵測器。模板搜尋法通常在尋找雙星合併訊號的表現上較為出色（因為我們知道他們的訊號長什麼樣）但最小模型搜尋法確保我們並不會因為我們沒有正確的重力波模板而錯失一些事件。當判斷一個可疑事件後選者是否是真實訊號時，我們計算這個訊號其實是隨機雜訊的可能性。通常不同偵測器間的訊號越相近，我們有越大的信心這個訊號是真實的。

在GWTC-3中，我們列出所有超過50%的機會是真實訊號（而非雜訊）的事件作候選者。這個估計除了依賴我們對儀器雜訊的了解，也依賴我們對於重力波訊號應當被觀測到的頻率的認知。由於我們才開始了解緻密星體合併的分佈，這些數字有可能並不準確。隨著未來更多的觀測，我們也會對這些分佈有進一步的理解，也有機會再回來重新驗證這些目前不確定的候選者。

GWTC-3也提供一組訊號較弱真實機率未達50%的清單。如同[GWTC-2.1](#)，GWTC-3中這個低於臨界的清單包含所有候選事件其誤報率低於每天兩次。總共有1,048的低於臨界的候選事件，其中多數候選事件很可能只是雜訊，然而這個清單可以幫助天文學家來辨識可能得多信使事件。

命名重力波事件

重力波的命名取自訊號被觀測到的協調世界時（[Coordinated Universal Time; UTC](#)）的日期與時間。過去許多事件的名字只有包含到日期，但隨著偵測器靈敏度的提升，我們有機會每日偵測到超過一次事件。因此如同GWTC-2與GWTC-2.1，我們在命名中增加了觀測時的時間來方便辨識。譬如說事件GW2008_222617代表是在2020年2月8日22:26:17 UTC時所觀測到的。

重力波訊號源的特性

我們對重力波的觀測包含著雙星系統產生重力波的特性，包含著內在與外在的特性。內在特性描述波源本身，譬如緻密星體的質量與自旋。外在特性則描述我們如何從地球觀測這些事件、波源在天空所在的位置與距離以及雙星旋轉平面的傾角。

我們透過[參數預估](#)(parameter estimation)的方式來學習雙星系統的這些特性。參數預估是利用比較已知不同參數的重力波形與觀測數據的一種統計技巧。這種比較告訴我們觀測的數據與哪些訊號源特性吻合（假設是真實訊號）。在我們的研究結果里，我們只挑選在信賴區間符合90%的範圍，也就是說這些雙星的特性有90%的機率是符合在這些參數範圍。

圖四中的等位線代表著雙星系統總質量與質量比90%的信賴區域。總質量告訴我們雙星系統有多重。質量的單位是採用多少倍的太陽質量(M_{\odot})。質量比則告訴我們系統有多不對稱。質量比為1代表兩顆緻密星體的質量接近相等。

學習這些特性的分佈能幫助我們了解這些系統是怎麼形成的。我們也可以用這些觀測來驗證愛因斯坦的廣義相對論，更甚至可以用在測量宇宙膨脹的速率。

在文章後面我們精選幾個重要的O3b事件。

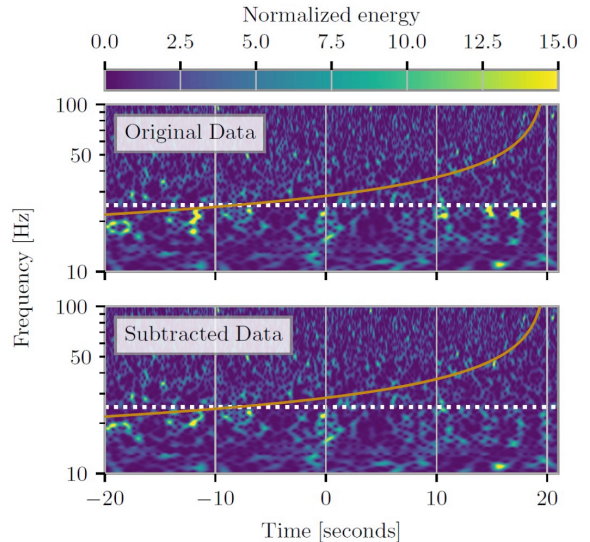
GWTC-3亮點

根據GWTC-3新35個事件的特性，其中32個應當為雙黑洞合併，3個為黑洞-中子星合併。我們認為緻密星體的質量低於 $3 M_{\odot}$ 的應為中子星。在O3b中沒有偵測到雙中子星合併的訊號。圖五總結8個重力波事件中最可能的三個關鍵參數數值。

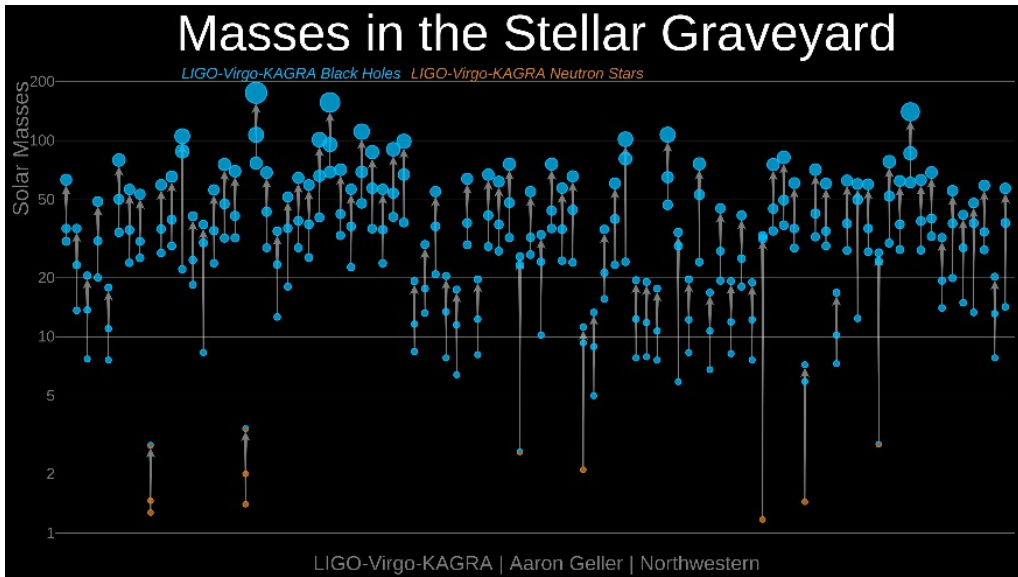
中子星-黑洞合併的亮點

三個可能為中子星-黑洞合併的事件為：

- [GW191219_163120](#) 是一個有著非常不對稱質量的中子星-黑洞系統。黑洞的質量約為 $31 M_{\odot}$ 而中子星的質量為 $1.2 M_{\odot}$ 。這類中子星也是目前觀測到最輕的一顆中子星。
- [GW200115_042309](#) 是明確的中子星-黑洞系統並曾[在這篇論文](#)裡報告過。我們估計黑洞質量約為 $6 M_{\odot}$ ，中子星質量約為 $1.4 M_{\odot}$ 。



圖二: (科學論文內的圖十四) 跳針減除的例子。圖裡顯示重力波事件GW200115_042309裡時間與頻率的關聯數據。顏色則代表在每個時間頻率區間內的能量強度。上圖顯示尚未減除的數據，下圖則是減除雜訊後的結果。橘色線條代表估算的訊號軌跡，可見該軌跡並未因為跳針減除的處理而受影響。



圖三：緻密星體質量。每一個圓圈代表著一個緻密星體。縱軸代表著多少倍的太陽質量。藍色圓圈代表黑洞，橘色圓圈則代表中子星。半藍半橘的圓圈則代表不確定類型的緻密星體。每一次合併包含三個緻密星體：兩個合併前的星體以及合併後的產物。箭頭代表哪兩個星體合併而產生殘存的緻密星體。圖片版權：LIGO Virgo Collaboration/Frank Elavsky, Aaron Geller/Northwestern.

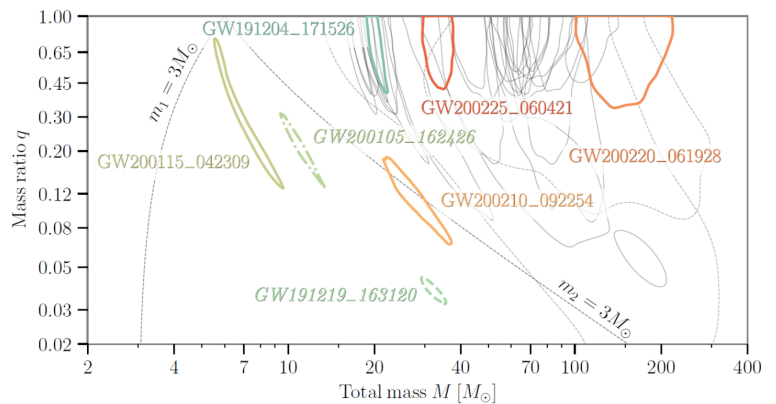
- **GW200210_092254** 是一個可能是中子星-黑洞的雙星系統。較重的星體應當是質量約為 $24 M_{\odot}$ 的黑洞，但較輕的星體（質量為 $2.8 M_{\odot}$ ）則可能是很重的中子星或是很輕的黑洞。這個事件與O3a中的 [GW190814](#) 相似。根據我們對中子星的理解GW200210_092254 有可能是雙黑洞但是我們並沒有把握。

熱衷的人可能會發現GW200105_162426消失了。GW200105_162426最早與GW200115_042309一起在 [前一篇文章](#) 論文中發表。當我們重新檢視所有O3b的事件時，我們發現GW200105_162426是真實訊號的機率只有低於臨界值的36%因此沒有收錄在本目錄裡。文後 [GW200105_162426](#) 的詞條裡有更進一步的資訊。儘管並未收錄於GWTC-3，該事件確實高於背景的雜訊，因此我們仍然認為該事件很有趣。如果GW200105_162426是真實的，該系統可能包含一個 $9 M_{\odot}$ 的黑洞與 $1.9 M_{\odot}$ 的中子星。

雙黑洞合併的亮點

雙黑洞合併亮點精選：

- **GW200220_061928** 可能是目前O3b中總質量最重的系統（但是低於O3a中的 [GW190521](#) 與 [GW190426_190642](#)）。合併前兩顆黑洞的總質量約為 $148 M_{\odot}$ （原本分別為 $87 M_{\odot}$ 與 $61 M_{\odot}$ ）。合併後的黑洞有著質量 $141 M_{\odot}$ ，大於所謂 [中等質量黑洞](#) $100 M_{\odot}$ 以上的臨界值。
- **GW191204_171526** 是一個黑洞雙星並有正的 **等效旋入自旋**。等效旋入自旋是一個用來方便測量重力波訊號的參數。正的數值代表至少有一個黑洞是在旋轉且整體的自旋方向與軌道旋轉方向相同。這個自旋資訊對於了解雙星如何形成很有幫助。第一個擁有正的等效旋入自旋的系統是 [GW151226](#)。對於GW191204_171526來說，合併前雙黑洞的質量分別為 $12 M_{\odot}$ 與 $8 M_{\odot}$ ，合併後的黑洞質量則為 $19 M_{\odot}$ 。



圖四：(科學論文中的圖八) 所有O3b事件中估算的總量(M) 與質量比(q)。等位線代表每個事件中大於90%機率的參數範圍。部分特別事件根據其獨特性用彩色的線條來彰顯(請參閱論文內文)。

- **GW191129_134029** 有著O3b中最低的雙黑洞質量。合併前的總質量為 $17.5 M_{\odot}$ (每個黑洞分別為 $10.7 M_{\odot}$ 與 $6.7 M_{\odot}$)。合併後的黑洞質量則為 $16.8 M_{\odot}$ 。
- **GW191109_010717** 是一個有著顯著負值等效旋入自旋的雙星系統。這代表此系統的整體自旋與軌道自旋方向相反（代表他們自旋的角動量方向與公轉的角動量方向相反）。負的等效旋入自旋機率達到90%。相比於正的等效旋入自旋，負值的系統相對罕見。GW191109_010717有著較重的來源：約為 $65 M_{\odot}$ 與 $47 M_{\odot}$ ，合併後的總質量則為 $107 M_{\odot}$ 。因為它的質量與GW200220_061928相近，在圖中我們用另一個有著約85%機會是負的等效旋入自旋的事件，GW200225_060421來代表。

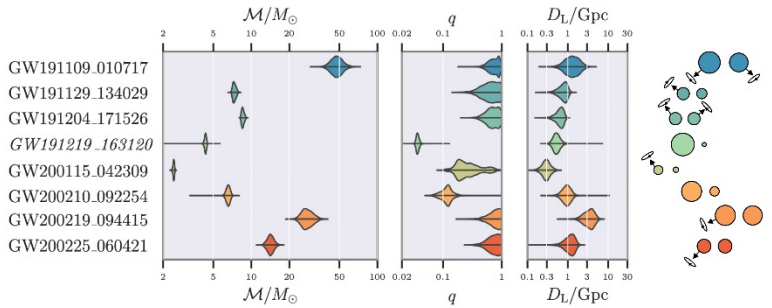
展望未來

LIGO 與 Virgo 團隊揭露了宇宙間許多的重力波訊號。截至目前為止，我們總共發現了90次重力波事件。GWTC-3更新增了35次事件其中包含了相當可靠的中子星-黑洞合併事件。隨著我們發現更多的重力波事件，我們會更了解這些星體的特性與組成分佈。利用這些了解可以更進一步的檢驗廣義相對論。偵測到越多事件也代表我們有更多機會發現一些在分佈中極端或異常的成員。

LIGO與Virgo目前暫停觀測來升級軟體並為預計在2022年的第四次聯合觀測(O4)做準備。座落於日本的KAGRA重力波偵測器也會在O4一起加入完整的觀測。更多的偵測器網路代表著可以更精準的定位重力波訊號。

在這期間，我們持續分析數據，學習觀測中的經驗，並也試著尋找尚未發現的重力波類型，包含連續重力波、隨機重力波、與其他任何可能的驚喜！

正體中文翻譯：潘國全
正體中文校稿：謝和峯、江國興



圖五：圖中表示8組GWTC-3中緻密雙星三種關鍵參數的最可能範圍區間：雙星啁啾質量(M)、質量比(q)以及亮度距離(D_L)。每組雙星顯示在圖的右側。圓圈的大小代表質量，箭頭的方向則表示自旋的方向(非等比例)。圖片版權：LIGO-Virgo-KAGRA Collaborations/Isobel Romero-Shaw/OzGrav.

更多資訊

在我們的網站閱讀更多新消息：

<https://www.ligo.org/news.php>

<https://www.virgo-gw.eu/#news>

閱讀完整的科學文章：

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2000318/public/main>

GWTC-3 公開數據：

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

拜訪我們的網站

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



詞彙表

黑洞雙星(Binary Black Hole)：一組包含兩顆黑洞近距離互繞的雙星系統 ([見此](#))

中子星雙星(Binary Neutron Star)：一組包含兩顆中子星近距離互繞的雙星系統 ([見此](#))

黑洞(Black hole)：一個被緻密質量極度扭曲的時空。在裡面所有物質皆無法離開，包含光線。

啁啾質量(Chirp mass)：一組數學組合來描述雙星中的質量(公式 [見此](#))。啁啾質量描述低質量雙星中重力波啁啾特徵頻率的增長。

緻密星體(Compact object)：一個密度極端緻密的天體，譬如黑洞、中子星與 [白矮星](#)。

等效旋入自旋(Effective Inspiral Spin)：一個用來描述重力波訊號裡關於自旋的參數。它描述雙星中黑洞各自的自旋與公轉方向的關聯性(譬如說自旋與公轉皆為順時針或逆時針方向)。

誤報率(False Alarm Rate)：這個比率描述偵測器中誤以為雜訊為真實訊號的可能性。越低的誤報率，數據越可能是來自天文物理的現象。

重力波形(Gravitational waveform)：描述重力波訊號隨時間演化的波形。

GW200105_162426：一個在 [之前論文所提及](#) 的中子星-黑洞雙星候選者。這個事件只有36%的機率是來自天文物理現象，也是一個在分析上富有挑戰的數據。原因有二，其一為只有單一偵測器LIGO利文斯頓偵測到。事件的時間，LIGO漢德福沒有在取數據。Virgo雖然有在觀測但是沒有顯著的數據。只有一個偵測器被看到但是另一個偵測器沒有觀測到是罕見的，取決於兩個偵測器間的相對靈敏度以及訊號源在天空的位置(好比過去類似的事件 [GW170817](#))。如果數據只有單一偵測器看到則非常困難來判斷數據的可靠性。第二個原因則是該系統可能是中子星-黑洞雙星，而我們對這類的系統還沒有觀測到夠多的數據，也讓分類的可靠度更為困難。未來當我們有更多的中子星-黑洞雙星觀測，我們可以再用過頭來確認GW200105_162426的真實性。

總質量(Total Mass)：雙星中兩顆緻密星體的質量總和。

光散射(Light scattering)：當雷射光打至光學元件時，部分光線可能被散射(反射到隨機的角度)。被散射的光線可以被其他表面反射並最終回到感應器造成訊號的跳針。可在此處了解更多 [Gravity Spy](#)。

M_{\odot} (太陽質量)：太陽的質量(約為 2×10^{30} 公斤)。太陽質量在天文學中是一個常用的質量單位。

質量比(Mass Ratio)：雙星中較輕質量星體與較重質量星體間的質量比。

中位數(Median)：統計數據中的序列中位數。一半的數值會低於中位數，另一半則高於中位數。

百萬秒差距(Megaparsec)：距離的單位。一百萬秒差距 (1 Mpc) 約為3.26 百萬光年。

中子星(Neutron star)：大質量恆星的遺留產物。當大質量恆星結束完內部的核反應，它會經歷一場超新星爆炸，並可能會形成中子星(或黑洞)。中子星的密度非常高(雖然不及黑洞)，其間的原子無法維持如同在地球上時的結構。中子星的質量接近太陽但是半徑只有約十公里。

中子星-黑洞雙星(Neutron Star-Black Hole binary)：一組包含一顆中子星與一顆黑洞近距離互繞的雙星系統 ([見此](#))

觀測運行(Observing run)：重力波偵測器持續收集天文物理觀測數據的運行時段。

參數預估(Parameter estimation)：用統計的方式來推論重力波訊號中的物理參數。

來自天文物理現象的機率(Probability of being astrophysical)：用定量的方式來分辨重力波訊號是否是真實的訊號而不是雜訊。該機率取決於訊號的強度相對於背景雜訊的強弱以及我們對這類訊號分佈的理解。觀測到更多的黑洞雙星可以讓我們了解更多黑洞雙星的分佈進而提升機率的計算。由於目前我們對中子星-黑洞雙星合併的觀測還不夠多，這個機率還不容易計算。未來等我們有更多觀測後可以再回頭重新計算目前的機率。

自旋(Spin)：黑洞相對於其質心旋轉(也就是角動量)的速度與方向。