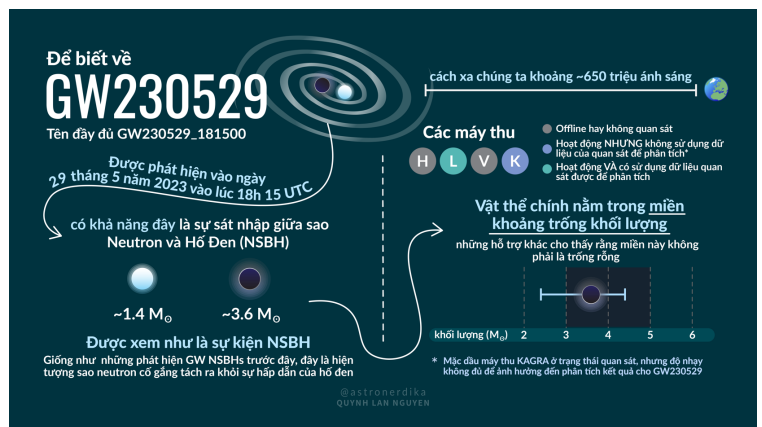


GW230529: QUAN SÁT SỰ HỢP NHẤT CỦA SAO NEUTRON VÀ VẬT THỂ RẮN CHƯA BIẾT

Khám phá đầu tiên về **sóng hấp dẫn** (GWs) năm 2015, với **GW150914**, đã mở ra thời kỳ mới của thiên văn học. Từ đó đã thu nhận được nhiều sóng hấp dẫn đến từ các nguồn khác nhau. Tất cả các phát hiện đó đều từ hệ sao đôi rần hợp nhất với nhau, bao gồm sao neutron (NSs) và/hoặc hố đen (BHs). Trong tóm tắt này, chúng tôi báo cáo phát hiện **GW230529**, sự hợp nhất của hệ sao đôi rần vào ngày 29 tháng 5 năm 2023, trong nửa đầu của lần quan sát thứ tư (O4a) của các máy thu sóng hấp dẫn **LIGO-Virgo-KAGRA**, với một trong những thành phần không chắc chắn mà có khối lượng lớn hơn vùng khối lượng cho NSs và nhỏ hơn vùng khối lượng cho BHs.

LÀM THẾ NÀO CHÚNG TÔI PHÁT HIỆN ĐƯỢC SỰ KIỆN NÀY?

Chúng tôi phân tích dữ liệu thu được từ máy thu khi nó hoạt động bằng việc sử dụng kỹ thuật **lọc phù hợp**. Điều này bao gồm việc so sánh dữ liệu của máy dò với các tín hiệu dự đoán để tìm ra dự đoán phù hợp nhất, trong trường hợp mà tín hiệu thực bị ẩn trong dữ liệu. Điều này dựa trên ước tính cường độ của tín hiệu như là hàm của thời gian, hoặc chuỗi tỉ lệ tín hiệu trên tạp âm theo thời gian. Nếu đó thực sự là tín hiệu vật lý thiên văn trong dữ liệu của máy thu thì tỉ lệ tín hiệu trên tạp âm sẽ cao, nếu không thì nó sẽ thấp. Kỹ thuật này đã được công nhận có hiệu ích với các tín hiệu GW mờ trong dữ liệu của máy thu, nhưng đó không phải là điều có thể hiểu được ngay. Nhiều đến từ các nguồn khác nhau có thể cản trở các phép đo hoặc thậm chí bắt chước tín hiệu GW.



Hình 1: Hình minh họa cho khối lượng của các sự kiện sóng hấp dẫn nằm trong hoặc gần miền khối lượng khoảng 3-5 khối lượng Mặt Trời, còn được gọi là miền “khoảng trống khối lượng bé”. Các vòng tròn màu xanh tương ứng với nguồn là các sao neutron, các vòng tròn màu đen tương ứng với các hố đen, và các đường tròn màu đen với dấu hỏi là những nguồn giống như là hố đen nhưng mà cũng có khả năng là sao neutron. Khối lượng của thành phần chính của GW230529 nằm ở trong miền khoảng trống khối lượng bé này. (Credit: S. Galadage, Observatoire de la Côte d’Azur.)

LÀM SAO CHÚNG TA BIẾT RẰNG GW230529 LÀ SỰ KIỆN THẬT?

Phần lớn thời gian chúng tôi tìm kiếm các tín hiệu mà phù hợp cả thời gian và thông số của nguồn ở các máy thu khác nhau của chúng tôi. Ngoài những sự kiện trùng hợp của nhiều máy thu ra, chúng tôi cũng đã cải tiến các kỹ thuật phân tích của chúng tôi để với chỉ một máy thu cũng đủ để khẳng định sự phát hiện, và may mắn là nó cho phép phát hiện sự kiện đặc biệt GW230529 chỉ từ dữ liệu của **LIGO-Livingston**. Có ba thuật toán tìm kiếm độc lập giúp phát hiện GW230529. Tất cả các thuật toán tìm kiếm đó đều sử dụng công nghệ lọc phù hợp nhưng triển khai theo các cách khác nhau và sử dụng các cộng cụ đã được phát triển để phân biệt các sự kiện thiên văn với các nguồn nhiễu. Sự chắc chắn của các kỹ thuật này cho phép chúng tôi kiểm tra chéo các kết quả một cách tốt nhất.

Rất hiếm khả năng mà nhiễu của máy dò có thể tạo ra tín hiệu như GW230529. Sự kiện này đã được khám phá trong quá trình phân tích theo thời gian thực và sự phát hiện này đã được kiểm chứng vào cuối giai đoạn quan sát. Sự kiện này đã được báo cáo với tỉ lệ **báo động sai** nhỏ hơn một trong một ngàn năm. Điều này có nghĩa là, sự thiếu vắng của bất kỳ tín hiệu của sự hợp nhất hệ sao đôi rần trong dữ liệu của máy thu, chúng tôi tin rằng tín hiệu như vậy sẽ xảy ra trong nhiều với cơ hội bé hơn một trong một ngàn năm. Chúng tôi chỉ ra trong **Hình 2** làm thế nào sự kiện này có thể nổi bật hơn so với các ứng viên còn lại.

Visit our websites:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



TẠI SAO SỰ KIỆN NÀY LẠI ĐÁNG QUAN TÂM?

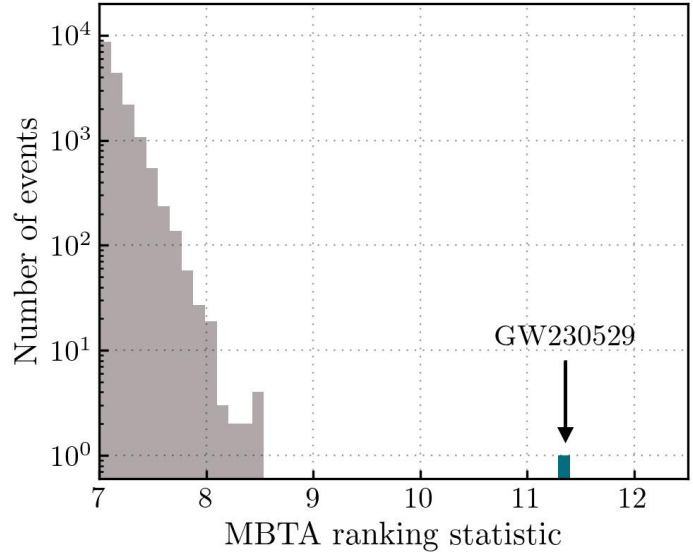
Các nhà khoa học đã đề xuất trong nhiều năm về sự tồn tại của **khoảng trống khối lượng thấp** trong miền phân bố khối lượng của các vật thể rắn từ 3 M_{\odot} đến 5 M_{\odot} (M_{\odot} là khối lượng của **Mặt Trời**), ở đây chúng tôi tin là có vật thể rắn. Tuy nhiên, các quan sát gần đây của các sao đôi bằng phương pháp [sóng điện từ](#) hay là sóng hấp dẫn GWs đã đề xuất các ứng viên cho hệ sao đôi với các thành phần có khối lượng khá lệch nhau. Ví dụ, khối lượng của vật thể thứ hai trong [GW190814](#) đã được ước tính nằm trong khoảng 2.50 M_{\odot} và 2.67 M_{\odot} với xác suất cao – nặng hơn sao NS nặng nhất đã được biết đến tại thời điểm phát hiện nhưng thấp hơn khối lượng dự kiến của BH.

Với khối lượng ban đầu ước tính là 3.6 M_{\odot} , GW230529 là ứng viên của hệ đôi đầu tiên trong miền trống khối lượng, như được chỉ ra trong **Hình 3**. Với hiểu biết của chúng ta hiện nay về số lượng NS và BH, khối lượng ban đầu là phù hợp (với xác suất 99%) với BH có khối lượng nhỏ hơn 5 M_{\odot} . Tuy nhiên, xác suất mà thành phần ban đầu là NS đã được ước tính, với hiểu biết của chúng ta hiện nay về vật lý hạt nhân lý thuyết và thực nghiệm, cũng như từ tập hợp các nguồn vật lý thiên văn. Xác suất này với NS là nhỏ nhưng không phải là không, và theo ước tính nó có thể thậm chí đạt tới vài phần trăm, vì vậy chúng ta không thể bỏ qua trường hợp này hoàn toàn. Mặt khác, thành phần thứ hai của GW230529 có khối lượng nằm trong khoảng 1.2 M_{\odot} và 2.0 M_{\odot} với xác suất 90% thì gần như chắc chắn là NS.

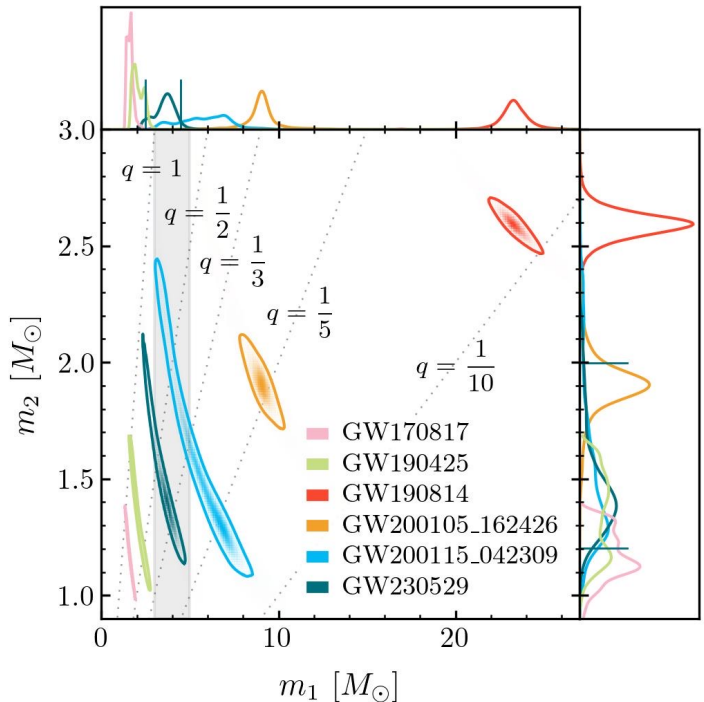
Hình 3: Phân bố xác suất của khối lượng thành phần của một vài hệ sao đôi. Giá trị tương thích cho khối lượng được chỉ ra ở đỉnh của hàm phân bố xác suất. Biểu đồ phía trên là phân bố dự kiến cho khối lượng của thành phần ban đầu và biểu đồ bên phải là phân bố dự kiến cho khối lượng của thành phần thứ hai. Các đường đứt nét có tỉ lệ khối lượng $q = m_2 / m_1$ cũng được vẽ. GW170817 (màu hồng) và GW190425 (màu xanh) đã được xét phù hợp với hệ sao đôi BNS. GW200105_162426 và GW200115_042309 (màu da cam và màu xanh dương tương ứng) đã được xét phù hợp với hệ NSBH. GW190814 (màu đỏ) khối lượng thứ hai có thể là BH hoặc là NS. Khoảng trống khối lượng giữa 3 và 5 M_{\odot} được chỉ ra theo vùng xám bóng mờ. Chúng ta thấy rằng GW230529 (màu xanh dương-lá cây đậm) là ở giữa hệ hai BNS và hai NSBH, với khối lượng ban đầu nằm trong vùng khoảng trống khối lượng.

HÌNH VẼ TỪ BÀI BÁO

Để biết thêm thông tin của những hình vẽ này và làm sao chúng được tạo ra, xin hãy đọc bản [trước khi xuất bản](#) miễn phí tại đây.

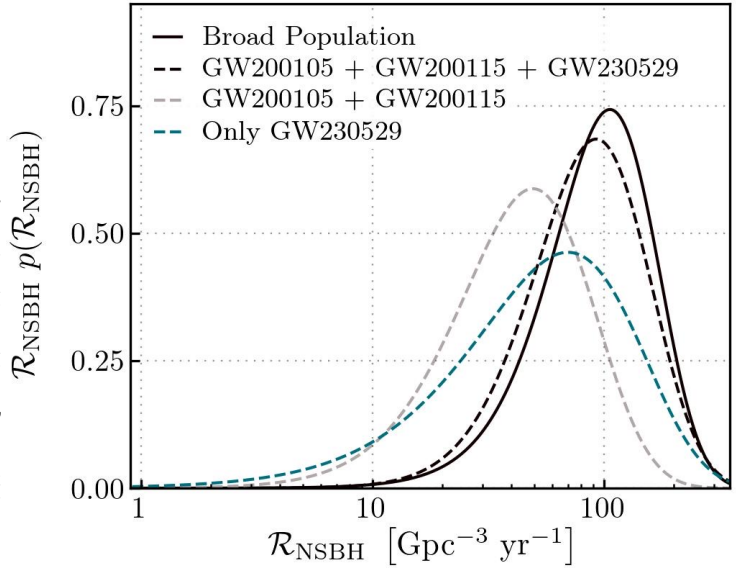


Hình 2: Xếp hạng phân phối thống kê của một trong các thuật toán tìm kiếm (được gọi là MBTA) cho tất cả các ứng của viên của sự kiện ở LIGO Livingston trong 2 tuần đầu tiên của lần quan sát thứ 4 (O4a). Trục ngang cho giá trị của thứ tự thống kê được sử dụng để xếp hạng trong các kênh tìm kiếm cũng như thử nghiệm để phân biệt nhiễu. Thứ tự thống kê thu được từ tỉ lệ tín hiệu-so với-độ nhiễu, thứ tự thống kê càng lớn thì sự kiện càng chắc chắn hơn và phù hợp hơn với các tín hiệu vật lý thiên văn. Miền phân bố màu xám là cho các sự kiện mà không đủ dấu ấn để phân loại như là nguồn gốc vật lý thiên văn. Miền màu xanh là GW230529. Chúng ta thấy rằng phân loại thống kê cho GW230529 thì lớn hơn phần còn lại của sự kiện, và không có sự kiện nào được phát hiện ở miền phân loại thống kê lớn hơn 8.5, ngoại trừ GW230529 với phân loại thống kê là 11.4.



SỰ KIỆN NÀY CHO CHÚNG TA BIẾT ĐIỀU GÌ?

Hợp nhất NS-BH là rất hiếm. Vì vậy mọi phát hiện bổ sung có giá trị vô cùng quan trọng cho nghiên cứu của tỉ lệ hợp nhất – cũng như mô tả đặc điểm của tập hợp BHs và NSs, là một trong các mục tiêu của sóng hấp dẫn thiên văn học. Qua suy luận hình dạng của phân bố khối lượng của chúng, suy ra khối lượng tối thiểu và tối đa cho BH và NS cũng như cho biết sự phong phú của các vật thể quay với khối lượng khác nhau. Sử dụng GW230529, tỉ lệ hợp nhất được suy đoán cho sự kiện tương tự là khoảng 39 sự kiện trong một năm trong miền thể tích của 3.5×10^{28} hộp khối **năm ánh sáng**. Phân tích bao gồm các sự kiện của ứng cử viên cho [NSBH](#) được phát hiện trong thời gian quan sát thứ 3 (O3) thu được khoảng 61 sự kiện trong một năm trong vùng thể tích khối hộp khoảng 3.5×10^{28} năm ánh sáng. Phân tích bổ sung của các sự kiện ít chắc chắn hơn đã chỉ ra rằng tỉ lệ hợp nhất khoảng 95 sự kiện trong một năm trong vùng khối hộp 3.5×10^{28} năm ánh sáng. Chúng tôi tìm thấy rằng những phân tích này cho biết tỉ lệ hợp nhất đối hệ sao đôi tương tự như GW230529 là tương đương với tỉ lệ hợp nhất rút ra từ đợt quan sát thứ ba (O3) cho các sự kiện khác mà thành phần thứ nhất chắc chắn là hố đen. Điều này củng cố giả thuyết rằng thành phần thứ nhất của hệ sao đôi GW230529 là hố đen. Phân bố xác suất cho tỉ lệ sáp nhập được thể hiện trong Hình 4

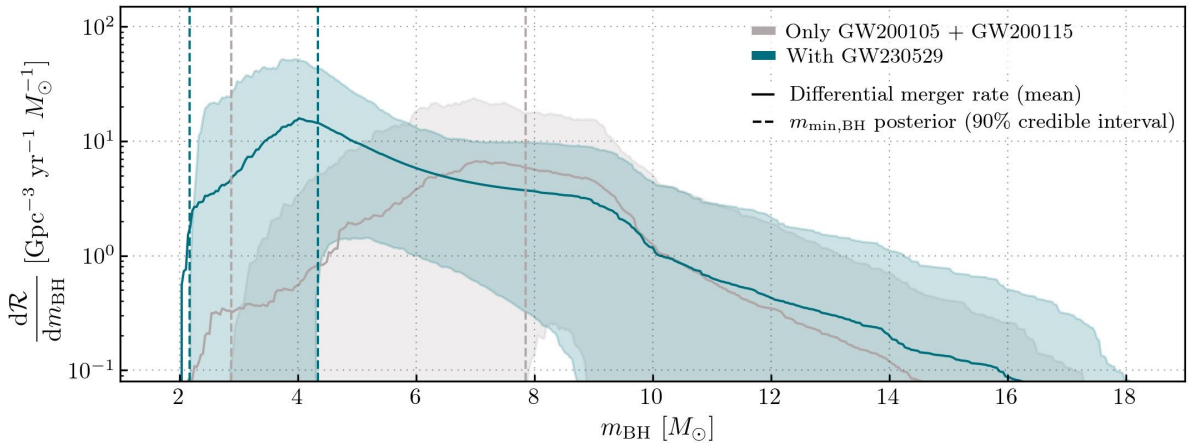


Hình 4: Phân bố xác suất cho tỉ lệ hợp nhất của hệ NSBH. Hàm phân bố xác suất có đỉnh tại giá trị của tỉ lệ hợp nhất được hiển thị trên trục hoành. Đường đứt đoạn thu được khi sử dụng mô hình tập hợp chỉ có NSBH được chỉ ra trong chú thích. Đường liền vạch, được được chỉ ra bởi “quần thể rộng” rút ra từ việc sử dụng mô hình quần thể mà bao gồm cả các sự kiện ít nổi bật hơn như được giải thích trong phần tóm tắt. Chúng ta thấy rằng đỉnh giá trị của các phân bố khác nhau là tương ứng gần nhau với nghĩa là tất cả các quần thể sẽ trùng nhau với một mức độ nào đó. Điều đặc biệt là, đỉnh giá trị được tìm thấy khi sử dụng GW230529 là tương đương với đỉnh giá trị được tìm thấy bao gồm cả các sự kiện NSBH khác.

Do đó khối lượng ban đầu của nó có thể sẽ nằm trong miền khoảng trống khối lượng, GW230529 là ứng cử viên đầu tiên để có thể cải tiến các **mô hình quần thể**. Ba mô hình quần thể được xem xét, nhằm nghiên cứu cách chúng bị ảnh hưởng bởi việc quan sát của sự kiện GW230529. Hai mô hình đầu tiên bao gồm tất cả các kiểu của hệ sao đôi rắn (BNS+BBH+NSBH) trong khi mô hình thứ ba chỉ đề cập đến chỉ quần thể NSBH. Bao gồm GW230529 trong hai mô hình đầu tiên không làm thay đổi kết quả đáng kể, có nghĩa là GW230529 không phải là một điểm ngoại lai đối với những mô hình này. Tuy nhiên, mô hình thứ ba được biến đổi đáng kể như được chỉ ra trong **Hình 5**. Chúng ta thấy rằng trong trường hợp này độ giàu có của BHs khối lượng thấp là được tăng lên và khối lượng nhỏ nhất của BH thì được đẩy về phía giá trị thấp hơn. Khi bao gồm cả GW230529, chúng tôi tìm thấy rằng khối lượng nhỏ nhất khoảng $3.36 M_{\odot}$ so với khối lượng trước đó khoảng $6.04 M_{\odot}$ cho mô hình này.

Quá trình hình thành dẫn đến GW230529 thì chưa được khẳng định chắc chắn. Kiến thức hiện nay của **sao siêu mới sụp đổ lõi** trong các ngôi sao lớn không được ủng hộ như là kịch bản hình thành của thành phần chính trong hệ sao đôi dựa trên khối lượng của nó. Kịch bản phù hợp hơn là BH được hình thành sau sao siêu mới dựa vào sự bồi tụ của vật chất còn sót lại trong lõi sao. Kết quả gần đây từ mô hình tính toán số chỉ ra bằng chứng sự hình thành của 3 – 6 M_{\odot} BHs là có thể thông qua cơ chế hình thành này. Mô phỏng sự sụp đổ lõi của sao giàu helium đã tiên đoán rằng khối lượng BH BH có thể thấp bằng khối lượng lớn nhất của sao neutron, mặc dù số lượng thấp ở phạm vi khối lượng dưới 5 M_{\odot} . Mô hình sao siêu mới sụp đổ dẫn đến điều không chắc chắn tương ứng với kết quả đầu ra của quá trình làm khó khăn hơn cho việc xác định giới hạn chính xác cho khối lượng của các vật thể rắn. GW230529 sẽ là nguồn kiểm chứng có giá trị cho các mô hình này.

Một kịch bản khác cho việc hình thành của thành phần chính của GW230529 là thông qua việc sáp nhập của hai sao neutron. Trong trường hợp này chúng ta có thể hình dung là thành phần thứ hai là thành viên của hệ ba hay hệ bốn hoặc là nó bị bắt bởi thành phần chính trong khi nó đang đang tiến hóa trong một chùm sao trẻ hoặc là thiên hà hạt nhân hoạt động, Chúng tôi không thể ngoại trừ những nguồn không phải sao như là hố đen nguyên thủy.



Hình 5: Tỷ lệ hợp nhất của hệ đôi NSBH (trục tung) là hàm của khối lượng của BH (trục tung). Đường cong đậm nét mô tả tốc độ sát nhập cho hai mô hình khác nhau và miền chung mô tả độ không chắc chắn tương ứng của các mô hình này. Các đường nét đứt thẳng đứng chỉ ra miền kỳ vọng cho khối lượng nhỏ nhất của BH, với xác suất 90%. Miền màu xám đề cập đến quần thể chỉ có NSBH ngoại trừ GW230529. Miền màu xanh bao gồm cả GW230529 trong mô hình quần thể NSBH. Chúng ta thấy rằng bao gồm cả GW230529 làm tăng lên độ phong phú của hệ sao đôi BHs khối lượng thấp cũng như đẩy khối lượng tối thiểu BHs về phía giá trị nhỏ hơn.

Những phát hiện tiếp theo của miền trống khối lượng như GW230529 sẽ cho phép chúng ta điều chỉnh lại hiểu biết của chúng ta về quần thể BH và NS. Điều này cho phép chúng ta hiểu hơn về cơ chế hình thành của NSs cũng như cấu trúc bên trong của chúng.

ĐỂ BIẾT THÊM THÔNG TIN:

Hãy truy cập vào websites của chúng tôi:

www.ligo.org, www.virgo-gw.eu,

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

Để đọc bản trước xuất bản miễn phí tại đây.

DANH MỤC CHÚ GIẢI

Sự hợp nhất của hệ sao đôi rắn: viết tắt là CBC, bao gồm hai BHs, hai NSs, hoặc một BH và một NS có quá chuyển động quanh nhau với năng lượng giảm dần cuối cùng hợp nhất với nhau. Toàn bộ quá trình này sẽ tạo ra GWs và làm tăng tần số và biên độ khi hai vật thể tiến gần nhau và tăng tốc. Kết quả của sự hợp nhất có thể, NS hoặc BH, phụ thuộc vào hệ ban đầu. Các vật thể hình thành hệ đôi được gọi là các thành phần, thành phần chính thường là vật thể có khối lượng lớn nhất.

Hố đen: vật thể rắn rất đặc mà vật thể thoát lớn hơn vận tốc ánh sáng. Điều này có nghĩa đó là vùng đen trong không gian mà ánh sáng trong vùng này cũng không thể thoát ra được để lan truyền tới chúng ta.

Sao neutron: vật thể rắn vô cùng đặc gần như toàn bộ là neutrons với phần nhỏ protons và electrons vì nguyên tử không thể chịu được áp suất. Kết quả là chúng sụp đổ thành sao nặng sau quá trình gọi là sao siêu mới sụp đổ. Khối lượng lớn nhất được tính cho NSs vào khoảng 3 M_{\odot} .

Hố đen nguyên thủy: Giả thuyết BH có thể được hình thành với thời kỳ vũ trụ sớm, ngay sau Big Bang. Miền khối lượng tiên đoán vào khoảng 10^{-18} M_{\odot} đến 10^{36} M_{\odot} .

LIGO, Virgo và KAGRA: có vị trí nằm ở USA, Italy và Japan, đây là các thiết bị cho phép phát hiện GWs. Thiết kế cơ bản của máy thu LIGO, Virgo và KAGRA bao gồm 2 cánh tay có độ dài cỡ kilômetr được thiết kế theo hình chữ "L" với các gương đặt ở cuối cánh tay cho phép chùm laser được lưu thông. Chúng tôi sử dụng laser để đo đặc sự thay đổi tương ứng trong độ dài của cánh tay gây nên bởi GWs khi nó đi đến Trái Đất. Khoảng cách giữa các cánh tay của mỗi máy thu được theo dõi thường xuyên và thu thập dữ liệu để chúng tôi có thể tìm kiếm tín hiệu của GW.

Lọc phù hợp: phương pháp mà chúng tôi sử dụng để phân tích dữ liệu từ máy thu và phát hiện các sự kiện hợp nhất hệ sao đôi rắn. Phương pháp này bao gồm so sánh với dữ liệu trong toàn bộ thời gian quan sát của máy thu với tiên đoán lý thuyết của tín hiệu GW tùy thuộc vào tính chất của hệ sao đôi tương ứng. Khi GW thực sự đi đến Trái Đất chúng tôi sẽ tìm thấy sự phù hợp giữa dữ liệu quan sát và tín hiệu tiên đoán.

Khoảng trống khối lượng thấp: miền khối lượng mà được giả thuyết rằng không có hoặc rất ít vật thể rắn. Miền này nằm trong khoảng 3 M_{\odot} cho khối lượng tối đa của NS, 5 M_{\odot} cho khối lượng tối thiểu của BH.

Khối lượng Mặt Trời hay M_{\odot} : khối lượng của Mặt Trời được dùng như đơn vị khối lượng chuẩn trong thiên văn. Nó vào khoảng 2×10^{30} kg.

Năm ánh sáng: đơn vị khoảng cách. 1 năm ánh sáng là khoảng cách mà ánh sáng di chuyển được trong một năm tính dựa trên vận tốc ánh sáng trong chân không vào khoảng 9.5×10^{12} km.

Mô hình quần thể: mô hình lý thuyết cho biết độ phong phú của các vật thể rắn dựa trên hàm của kết hợp các thông số của hệ đôi.

Sao siêu mới sụp đổ lõi: khi ngôi sao ở trạng thái ổn định, áp suất tạo bởi khí của nó thường là cân bằng với hấp dẫn từ lõi. Khi gần chết, áp suất giảm đi và ngôi sao sẽ không ở trạng thái cân bằng được nữa. Nó sẽ bị sụp sụp hấp dẫn vô cùng nhanh. Sự sụp đổ đột ngột có thể tạo nên áp suất vô cùng lớn trong ngôi sao tạo nên vụ nổ sao siêu mới- được đặt tên là "sao siêu mới sụp đổ lõi". Tàn dư sao siêu mới sẽ là NS hoặc BH. Nếu ngôi sao ban đầu vô cùng lớn, nó sẽ sụp sụp thành BH ngay lập tức bỏ qua quá trình của sao siêu mới.

Rơi ngược: trong kịch bản sao siêu mới sụp đổ lõi hình thành NS, vật chất sót lại được gọi là "rơi ngược" về phía NS. Quá trình gia tốc vật chất này có thể dẫn đến khối lượng của NS nằm trên ngưỡng khối lượng tối đa và dẫn đến hình thành BH.

Thuật toán tìm kiếm: chương trình tính toán bằng máy tính bao gồm chuỗi các quy trình. Chúng điều chỉnh dữ liệu để phân tích, lọc dữ liệu và sau đó tính toán các đại lượng khác nhau với mục đích để loại trừ càng nhiều nhiễu càng tốt và ước tính các tín hiệu nổi bật có ứng viên của các sự kiện vật lý thiên văn. Một vài thuật toán tìm kiếm được chạy trên thời gian quan sát thực, một vài thuật toán chạy trên thời gian kết thúc quan sát và một số thì chạy trên cả hai. Thông tin chi tiết hơn có thể tìm thấy ở hướng dẫn sử dụng cảnh báo công cộng của IGWV.

Tìm kiếm ngoại tuyến: phân tích được thực hiện trên dữ liệu của thời gian quan sát trước đó, thông thường trong thời gian không quan sát khi mà máy thu không hoạt động để bảo trì hay nâng cấp. Chúng bổ sung cho các phân tích trong thời gian quan sát thực (còn được gọi là phân tích trực tuyến) trong suốt thời gian quan sát.

Tỷ lệ cảnh báo sai: tỷ lệ này được sử dụng để lượng hoá khả năng sự kiện gây nên bởi nhiễu. Tỷ lệ này được tính dựa trên mô phỏng sự kiện đi đến từ nhiễu và tìm theo cường độ nhiễu để thu được phân bố của tỷ lệ kỳ vọng của sự kiện theo hàm của cường độ tín hiệu. Cụ thể hơn nếu sự kiện có tỷ lệ cảnh báo sai là 1 trong một ngày, thì có nghĩa là chúng ta hy vọng nhiều của máy thu chúng ta cũng tạo ra một sự kiện hàng ngày. Do đó chúng ta có thể tin tưởng là sự kiện này có nguồn gốc vật lý thiên văn.