

TÌM KIẾM TOÀN BẦU TRỜI ĐỐI VỚI TÍN HIỆU SÓNG HẤP DẪN NGẮN HẠN Kéo DÀI TRONG TÁM THÁNG ĐẦU CỦA ĐỢT QUAN SÁT NÂNG CAO LIGO-VIRGO-KAGRA LẦN THỨ TƯ

Cho tới nay, tất cả tín hiệu Sóng hấp dẫn (GW) thu thập được từ các máy thu sóng hấp dẫn của hợp tác LIGO–Virgo–KAGRA (LVK) đều tới từ các vụ hợp nhất các vật thể đặc trong hệ nhị phân xảy ra khi các cặp sao neutron hoặc hố đen kết hợp với nhau sau một “vũ điệu” kéo dài. Một trong những thành công lớn của Thuyết Tương đối rộng của Einstein là sự tiên đoán chính xác về các tín hiệu GW được hình thành thông qua các sự kiện dữ dội này. Nhưng ta gần như chắc chắn rằng các nguồn phát GW khác vẫn tồn tại ngoài kia mà chưa được hiểu rõ hay phát hiện. Một trong số các nguồn tiềm năng phải kể đến phát ra các “bùng phát sóng hấp dẫn”: tín hiệu GW ngắn hạn mà không thể biết trước dạng sóng.

Bài báo này trình bày một cuộc tìm kiếm những dạng tín hiệu như trên, bắt đầu từ phần đầu của chu kỳ quan sát của LVK mới nhất, O4a, diễn ra từ tháng 5 năm 2023 tới tháng 1 năm 2024. Cụ thể hơn, đây là cuộc tìm kiếm các tín hiệu ngắn hạn kéo dài, thời lượng trong khoảng 1 – 1000 giây. Dù chúng ta không biết chính xác các tín hiệu này bắt nguồn từ đâu, các dự đoán dựa trên lý thuyết cho rằng chúng tới từ các biến dạng không cầu từ các sao neutron mới hình thành, đĩa bồi tụ bất ổn định xung quanh hố đen, hoặc hệ đôi sao neutron hay hệ đôi hố đen trên các quỹ đạo cực kì dẹt. Đặc biệt, các sự bùng phát sóng cho chúng ta một cái nhìn sâu về [những gì xảy ra sau vụ hợp nhất sao neutron](#), chẳng hạn như sự kiện ngoạn mục [GW170817](#): liệu tàn dư là một sao neutron cực kì nặng hay là một hố đen.



Hình 1: Hình ảnh minh họa của một họa sĩ về sao neutron siêu khối lượng (*hypermassive neutron star*) hình thành sau vụ hợp nhất sao neutron. Những vật thể kì lạ này có thể tạo ra các bùng phát sóng hấp dẫn kéo dài.
Nguồn: ESO/L. Calçada/M. Kornmesser

TÌM HIỂU THÊM:

Tại các www.ligo.org
website: www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



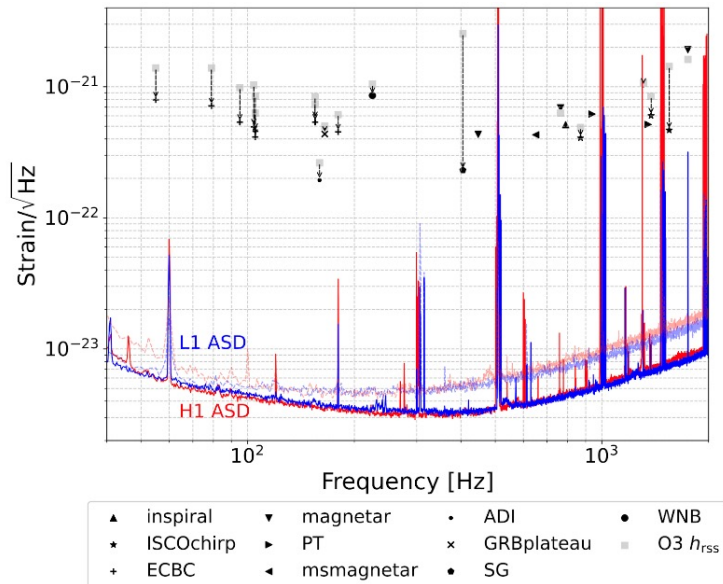
Cuộc tìm kiếm được thực hiện sử dụng hai thuật toán độc lập, xử lý lượng dữ liệu của 120 ngày do cả hai máy dò LIGO Livingston và LIGO Hanford thu thập với chất lượng khoa học cao, một yếu tố quan trọng trong việc phân biệt các tín hiệu có nguồn gốc thiên văn (vốn phải được phát hiện bởi cả hai máy dò) và tín hiệu nhiễu (chỉ có thể xuất hiện ở một máy dò duy nhất). Một trong hai thuật toán tìm kiếm, coherent WaveBurst (cWB), đã được nâng cấp để nhạy hơn với các loại tín hiệu đặc biệt này so với [phiên bản được sử dụng trong chu kỳ quan sát trước đó \(O3\)](#).

Đây là một cải tiến bao gồm việc tích hợp XGBoost, một thuật toán học máy dựa trên thuật toán gradient-boosted decision tree, được sử dụng để phân biệt giữa tín hiệu và nhiễu, từ đó nâng cao độ nhạy của quá trình tìm kiếm.

Đây là lần đầu tiên thuật toán học máy được sử dụng trong cuộc tìm kiếm của LVK. Thuật toán còn lại, PySTAMPAS, cũng thực hiện tìm kiếm toàn bầu trời lần đầu tiên.

Sau khi loại bỏ các ứng viên là các vụ hợp nhất hố đen đã biết, không có sự kiện thiên văn thực tế nào được tìm thấy. Các tín hiệu nổi bật nhất từ cWB và PySTAMPAS có [false alarm rate](#) (tần suất cảnh báo giả) lần lượt khoảng 8 tháng 1 lần và 6 tháng 1 lần, khả năng cao đều là nhiễu.

Dù không thu được nhiều tín hiệu, chúng ta vẫn có thể đưa ra các kết luận thiên văn từ cuộc tìm kiếm này. Sử dụng các tín hiệu mẫu đại diện cho từng loại nguồn phát cụ thể, ta có thể định lượng độ nhạy của mỗi cuộc tìm kiếm và chỉ ra tần suất xuất hiện của mỗi loại nguồn phát trong vũ trụ. Thật vậy, việc không ghi nhận được tín hiệu có thể đồng nghĩa với việc các bùng nổ sóng hấp dẫn kéo dài trên thực tế là hiếm gặp hơn, hoặc yếu hơn “giới hạn trên” được đưa ra. **Hình 1** cho thấy các giới hạn trên của biên độ sóng hấp dẫn (màu đen) so với giới hạn lớn nhất trước đó tới từ cuộc tìm kiếm O3 (màu xám). Đối với hầu hết loại tín hiệu, các giới hạn này nghiêm ngặt hơn khoảng từ 1.2 đến 2 lần, nhờ vào độ nhạy cao hơn của máy dò cũng như các thuật toán tìm kiếm tiên tiến hơn. Các cuộc tìm kiếm tiếp theo trên phần [dữ liệu còn lại của O4 \(dự kiến kéo dài đến cuối năm 2025\)](#) sẽ có độ nhạy cao hơn, giúp siết chặt các giới hạn và giúp chúng ta bước tiếp trên con đường khám phá ra những đột phá mới.



Hình 2: Các giới hạn trên cho biên độ sóng hấp dẫn so với độ nhạy của máy dò LIGO (đường màu xanh và đỏ) về các dạng tín hiệu sóng hấp dẫn bùng phát kéo dài. Biên độ (“strain”) ở trên trục tung, còn tần số sóng hấp dẫn ở trên trục hoành. Mỗi dấu chấm màu đen biểu thị giới hạn trên về biên độ trong chu kỳ quan sát O4 với mỗi loại burst cụ thể, so sánh với các giá trị tương ứng trong chu kỳ quan sát O3 (màu xám). Phần lớn các giới hạn đều được cải thiện từ 1.2 đến 2 lần. Lấy ví dụ, “magnetar” (mũi tên xuống) và “msagnetar” (magnetar mili giây, mũi tên sang trái) đại diện cho các tín hiệu phát ra từ hai loại magnetar khác nhau, trong khi “ECBC” (eccentric compact binary coalescence, ký hiệu dấu +) chỉ các hệ nhị phân có quỹ đạo lệch tâm. Các loại tín hiệu khác bao gồm: “inspiral” (hợp nhất sao neutron trong hệ nhị phân), “ISCOchirp” (sóng tại quỹ đạo tròn ổn định trong cùng quanh lỗ đen quay), “PT” (bồi tụ rơi trở lại lên sao neutron), “ADI” (bất ổn định đĩa bồi tụ), “GRBplateau” (magnetar mới hình thành cung cấp năng lượng cho pha ổn định trong vụ nổ gamma), “SG” (dạng sóng hình sin-Gaussian), và “WNB” (các bùng phát nhiễu trắng).

TÌM HIỂU THÊM:

Tại các website:

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Đọc bản preprint của bài báo khoa học tại [đây](#)

Bảng chú giải

Sự hợp nhất của hai thiên thể rắn – thường được viết tắt là CBC, bao gồm hai hố đen, hai sao neutron, hoặc một hố đen và một sao neutron quay quanh nhau và cuối cùng hợp nhất. Cả quá trình này tạo ra sóng hấp dẫn với tần số và biên độ tăng dần khi hai vật thể tiến gần nhau và gia tốc. Kết quả của sự hợp nhất này có thể là một sao neutron hoặc một hố đen, tùy thuộc vào cấu hình ban đầu của hệ. Các vật thể cấu tạo nên hệ nhị phân được gọi là các thành phần của hệ, trong đó thành phần chính được định nghĩa là vật thể có khối lượng lớn nhất.

Thuyết tương đối – Thuyết về hấp dẫn do Albert Einstein đề xuất năm 1915. Trong thuyết này, không gian và thời gian được xem như một thực thể có thể kéo giãn bao xung quanh vật chất và năng lượng, và vật chất di chuyển theo quỹ đạo được vạch ra bởi không – thời gian cong đó.

Tìm kiếm Burst – Cuộc tìm kiếm nguồn năng lượng được giải phóng do hợp nhất trong mạng lưới các máy dò sóng hấp dẫn, hoạt động mà không giả định trước một dạng sóng cụ thể.

Transient – Hiện tượng thiên văn diễn ra trong thời gian ngắn, trái ngược với các sự kiện thiên văn kéo dài từ hàng ngàn đến hàng tỉ năm.

Chu kỳ quan sát – Chu kỳ quan sát mà các máy dò sóng hấp dẫn đang hoạt động để lấy dữ liệu.

Tần suất cảnh báo giả – Tần suất cảnh báo giả được dùng để định lượng mức độ một sự kiện có khả năng là do nhiễu gây ra. Giá trị này được tính bằng cách mô phỏng các sự kiện phát sinh từ nhiễu và phân tích độ mạnh của tín hiệu, từ đó xây dựng phân bố của tần suất kỳ vọng đối với các sự kiện như vậy theo hàm của độ mạnh tín hiệu. Cụ thể hơn, nếu một sự kiện có tần suất cảnh báo giả là 1 lần mỗi ngày, điều đó có nghĩa là chúng ta kỳ vọng nhiều trong máy dò sẽ tạo ra một sự kiện như vậy khoảng một lần mỗi ngày. Do đó, chúng ta sẽ có rất ít mức độ tin cậy vào sự kiện này.

Giới hạn trên – Giá trị tối đa mà một đại lượng nào đó có thể đạt được trong khi vẫn phù hợp với việc không phát hiện thấy tín hiệu. Ở đây, chúng tôi sử dụng khái niệm này để đặt ra các ràng buộc đối với cường độ của lực do vật chất tối vector mang số baryon trừ lepton gây ra ở các khối lượng hoặc tần số khác nhau. Chúng tôi sử dụng giới hạn với độ tin cậy 95%, tức là dựa trên dữ liệu, có 95% xác suất rằng đại lượng đó nằm dưới giới hạn này.