

TÌM KIẾM CÁC NGUỒN SÓNG HẤP DẪN NGẮN HẠN TRONG BẦU TRỜI TỐI SÂU

GIỚI THIỆU

Đợt quan sát thứ tư (O4) của các máy dò Advanced LIGO, Advanced Virgo, và KAGRA (LVK) bắt đầu vào tháng 5 năm 2023, kết thúc giai đoạn quan sát đầu tiên (O4a) vào tháng 1 năm 2024. Trong thời gian này, nhiều tín hiệu sóng hấp dẫn (GW) phù hợp với đặc trưng của sự hợp nhất hệ hai vật thể đậm đặc (CBC) đã được phát hiện. Tuy nhiên, các vụ hợp nhất này không phải là nguồn sóng hấp dẫn duy nhất có thể tồn tại. Nghiên cứu này tập trung tìm kiếm các tín hiệu GW ngắn hạn (dưới 1 giây), được gọi là “bùng nổ” (bursts). Các nguồn tiềm năng của các bùng nổ này chưa từng được phát hiện trước đây, bao gồm các vụ nổ siêu tân tinh, các hiện tượng quay bất thường (glitch) của pulsar, cũng như những hiện tượng bất ngờ khác. Việc lần đầu tiên phát hiện được sóng hấp dẫn từ các nguồn này sẽ đánh dấu một bước đột phá quan trọng.

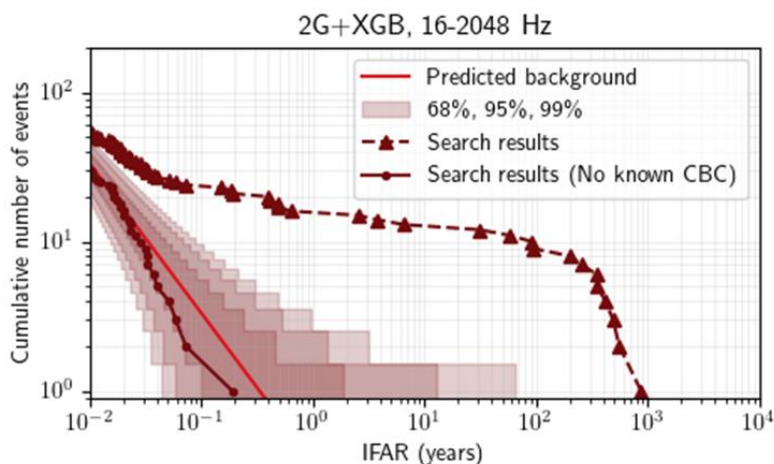
TÌM KIẾM KHÔNG MÔ HÌNH HÓA

Đối với các CBC, mô hình sóng hấp dẫn được hiểu rõ giúp việc tìm kiếm các tín hiệu này trở nên dễ dàng hơn. Ngược lại, đối với nhiều ứng viên nguồn burst ngắn như sao siêu mới, rất khó để mô hình hóa chính xác dạng sóng hấp dẫn. Vì không biết chính xác tín hiệu cần tìm, các nghiên cứu phải dựa vào các “tìm kiếm không mô hình hóa”, tức chỉ dựa vào việc phát hiện năng lượng dư thừa trùng khớp về thời gian giữa nhiều máy dò. Với một sự kiện sóng hấp dẫn thực sự, tín hiệu phải xuất hiện đồng thời trong mỗi máy dò.

Nghiên cứu này sử dụng ba phương pháp tìm kiếm, tất cả đều là biến thể của thuật toán **coherent Waveburst (cWB)**. Kể từ kỳ quan sát trước (O3), các phương pháp này đã được cải thiện bằng cách tích hợp học máy để phân biệt tín hiệu thực sự với nhiễu của máy dò.

KẾT QUẢ

Hình 1 thể hiện kết quả tìm kiếm. Để tìm các bùng nổ, các ứng viên trùng với tín hiệu CBC từ tìm kiếm chuyên dụng sóng hấp dẫn LVK. Sau đó, chúng tôi so sánh phân bố của các ứng viên còn lại với dự đoán từ nhiễu của máy dò: sự khác biệt rõ rệt sẽ cho thấy khả năng phát hiện một ứng viên burst thực sự. Tuy nhiên, không tìm thấy ứng viên cho bùng nổ GW ngắn hạn nào. Sau đó, chúng tôi có thể so sánh sự phân bố của các ứng viên với dự đoán từ nhiễu của máy dò: sự khác biệt rõ rệt sẽ cho thấy khả năng phát hiện một ứng viên burst thực sự. Tuy nhiên, không tìm thấy ứng viên burst thực sự. Tuy nhiên, không tìm thấy ứng viên cho bùng nổ GW ngắn hạn nào. Sau đó, chúng tôi có thể so sánh sự phân bố của các ứng viên với dự đoán từ nhiễu của máy dò: sự khác biệt rõ rệt sẽ cho thấy khả năng phát hiện một ứng viên burst thực sự. Tuy nhiên, không tìm thấy ứng viên burst thực sự. Tuy nhiên, không tìm thấy ứng viên cho bùng nổ GW ngắn hạn nào.



Hình 1 (hình 3 trong bài báo) Kết quả tìm kiếm từ một biến thể của thuật toán cWB. Số lượng tích lũy các ứng viên sóng hấp dẫn được phát hiện bởi thuật toán được biểu diễn theo tỷ lệ nghịch với tỉ lệ báo động giả (IFAR) – thước đo khả năng một sự kiện là nhiễu ngẫu nhiên. IFAR càng lớn thì xác suất đó là nhiễu càng thấp. Các biểu tượng hình tam giác thể hiện tổng số ứng viên tìm được, còn các biểu tượng hình tròn thể hiện số lượng sau khi đã loại bỏ các tín hiệu CBC đã biết. Đường màu đỏ đậm biểu diễn số lượng trung bình các sự kiện do nhiễu gây ra, cùng vùng bóng mờ thể hiện độ bất định thống kê. Sự trùng khớp giữa tỷ lệ nhiều dự đoán (đường đỏ) và số lượng ứng viên quan sát được sau khi loại CBC (đường đỏ đậm) cho thấy không có sóng hấp dẫn từ bùng nổ mới được phát hiện. Nếu có tín hiệu burst thực sự được phát hiện, nó sẽ xuất hiện dưới dạng chấm tròn nằm lệch về bên phải ngoài vùng bóng mờ.

TÌM HIỂU THÊM:

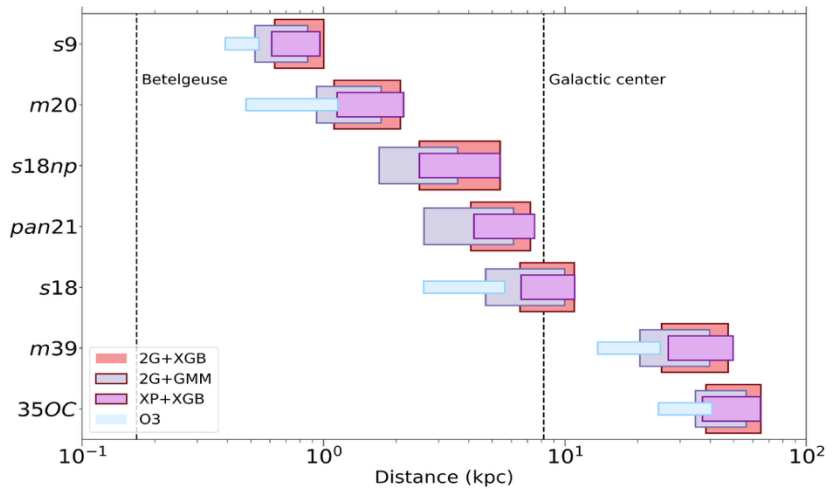
Visit our www.ligo.org
websites: www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



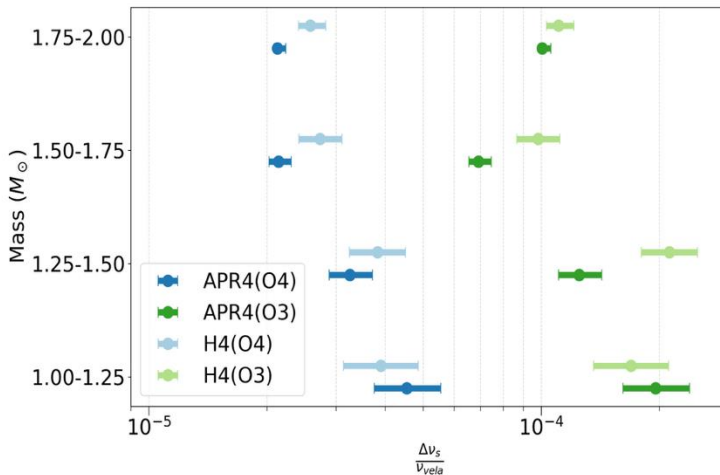
Hình 2 và 3 đều minh họa những cải thiện về độ nhạy so với cùng một phân tích được thực hiện trong giai đoạn O3. Các tìm kiếm có thể phát hiện tín hiệu sóng hấp dẫn từ sao siêu mới, cũng như nhiều bùng nổ GW (xem ví dụ: Bảng II trong bài báo) ở khoảng cách xa hơn bao giờ hết. Những cải thiện về độ nhạy này có thể là nhờ các nâng cấp đáng kể của máy dò và những cải tiến về thuật toán tìm kiếm.

KẾT LUẬN

Cho đến nay, LVC đã phát hiện được nhiều sóng hấp dẫn từ các CBC. Vậy tại sao sóng hấp dẫn từ các nguồn bùng nổ vẫn khó nắm bắt? Một phần vì độ sáng sóng hấp dẫn (tức cường độ của GW) từ CBC thường cao hơn nhiều so với bất thường sao xung hoặc sao siêu mới. Việc không phát hiện được các bùng nổ GW ngăn chặn cho thấy các nguồn này rất hiếm, nằm ngoài tầm với của các máy dò hiện tại, hoặc cả hai. Tuy nhiên, không ai có thể đoán trước được vũ trụ còn ẩn chứa những nguồn sóng hấp dẫn tiềm năng nào, và do đó chúng ta sẽ tiếp tục tìm kiếm trong bầu trời tối sâu.



Hình 2 (Hình 5 trong bài báo): Khoảng cách từ Trái Đất đến các nguồn sao siêu mới mà các phương pháp tìm kiếm có thể phát hiện được sóng hấp dẫn. Các đường đứt đoạn biểu thị vị trí của sao Betelgeuse (một ngôi sao gần có khả năng phát nổ siêu tân tinh trong tương lai gần) và trung tâm Dải Ngân hà (khu vực có tỷ lệ siêu tân tinh cao). Cạnh trái của mỗi hộp biểu thị khoảng cách mà tại đó 10% các tín hiệu mô phỏng được phát hiện, cạnh phải là khoảng cách với xác suất phát hiện 50%. Trục dọc là các dạng mô hình sóng siêu tân tinh khác nhau. Hộp màu xanh nhạt biểu diễn độ nhạy từ kỳ quan sát O3 trước đó, cho thấy sự cải thiện rõ rệt về khoảng cách phát hiện ở O4. Các hộp còn lại tương ứng với các biến thể khác nhau của thuật toán cWB.



Hình 3 (Hình 6 trong bài báo): Kích thước bất thường của sao xung có thể được phát hiện với xác suất 50% bởi phương pháp phân tích hiện tại. Trục ngang biểu thị kích thước bất thường cần thiết để phát hiện được tín hiệu, sử dụng tham chiếu là sao xung Vela (cách Trái Đất 900 năm ánh sáng, tần số quay khoảng 11 vòng/giây). Độ rộng ngang của mỗi hộp thể hiện sự thay đổi trong kích thước bất thường theo các giả định khác nhau về khối lượng của sao neutron (thể hiện trên trục dọc). Hai mô hình phương trình trạng thái cực đoan được xem xét. Vùng màu xanh lá đại diện cho độ nhạy trong kỳ quan sát O4, còn vùng màu xanh lam là từ O3. O4 có thể phát hiện glitch nhỏ hơn so với O3, tức là độ nhạy đã được cải thiện rõ rệt.

TÌM HIỂU THÊM:

Visit our websites:

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

Đọc bản in trước miễn phí của toàn bộ bài báo khoa học [tại đây](#)

GIẢI THÍCH THUẬT NGỮ

Sự hợp nhất hệ hai vật thể đậm đặc (Compact binary coalescence, CBC) – Sự kết hợp của hai lỗ đen, hai sao neutron, hoặc một lỗ đen và một sao neutron. Toàn bộ quá trình tạo ra sóng hấp dẫn làm tăng tần số và biên độ khi hai vật thể tiến gần nhau hơn và tăng tốc. Vật thể cuối cùng của sự hợp nhất có thể là một sao neutron hoặc một lỗ đen, tùy thuộc vào hệ ban đầu. Các vật thể tạo thành hệ đôi được gọi là các thành phần của nó, thành phần chính được định nghĩa là vật thể có khối lượng lớn nhất.

Hiện tượng ngắn hạn (Transient) – Các hiện tượng thiên văn xảy ra trong thời gian ngắn, trái ngược với các sự kiện thiên văn kéo dài từ hàng nghìn đến hàng tỷ năm.

Tìm kiếm bùng nổ – Một cuộc tìm kiếm năng lượng tới hạn trùng hợp trong mạng lưới các máy dò GW hoạt động mà không cần giả định trước một mô hình dạng sóng cụ thể nào.

Sao siêu mới – Là một vụ nổ dữ dội trong vũ trụ, thường quan sát thấy như một vật thể sáng xuất hiện đột ngột trên bầu trời rồi mờ dần theo thời gian. Một sao siêu mới có thể sáng hơn toàn bộ thiên hà chứa nó. Có nhiều loại siêu tân tinh khác nhau: một số bắt nguồn từ sự sụp đổ của các sao có khối lượng lớn, trong khi số khác có thể đến từ sự va chạm của hai sao lùn trắng.

Bất thường sao xung – Một pulsar là sao neutron được quan sát thấy nhờ các xung bức xạ điện từ (thường là sóng vô tuyến). Không phải tất cả sao neutron đều là pulsar – một số không phát ra bức xạ theo hướng Trái Đất, hoặc không phát ra bức xạ quan sát được. Một số nhỏ trong quần thể sao neutron được biết là có hiện tượng bất thường (glitch), tức là các sự thay đổi đột ngột và ngắn hạn trong tần số quay, được phát hiện qua quan sát bức xạ điện từ từ pulsar. Hai cơ chế phổ biến nhất được nêu trong các nghiên cứu là Động đất sao (Star quake) và Tương tác giữa siêu chất lỏng và lớp vỏ (superfluid-crust interactions).

Coherent WaveBurst (cWB) – Là một thuật toán phát hiện sóng hấp dẫn không dựa trên tín hiệu GW dự đoán. Thuật toán này hoạt động bằng cách so sánh tín hiệu được ghi nhận từ nhiều máy dò khác nhau để xác định xem có một sự kiện nào đó vượt qua nền nhiễu một cách nhất quán hay không.

Sao xung Vela – Là một sao xung nằm trong chòm sao Vela, tàn dư từ một vụ nổ siêu tân tinh.