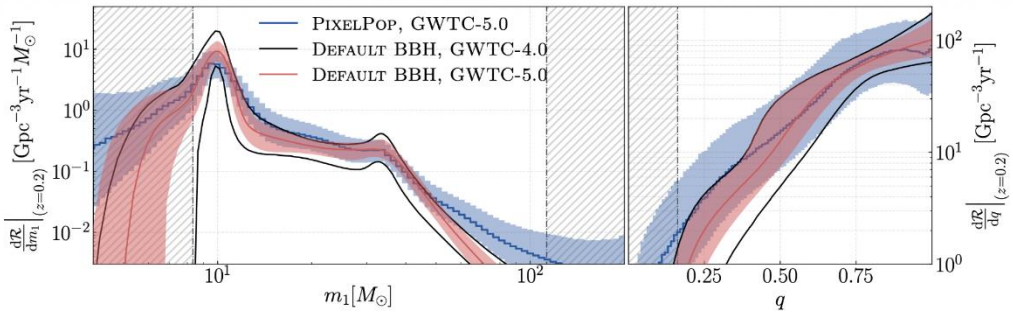
GWTC-5.0: ĐẶC TÍNH QUẦN THỂ CỦA CÁC HỆ ĐÔI ĐẶC SÁP NHẬP

Chúng tôi trình bày những khám phá dựa trên đặc tính quần thể của 267 sự kiện sáp nhập hệ đôi đặc. Các sự kiện này được báo cáo trong danh mục mới nhất của chúng tôi mang tên Danh mục Nguồn Sóng hấp dẫn Thoáng qua GWTC-5.0. Danh mục này được phát triển tiếp nối từ bản GWTC-4.0, bao gồm các dữ liệu mới nhất được thu thập trong giai đoạn từ ngày 10 tháng 4 năm 2024 đến ngày 28 tháng 1 năm 2025. Mặc dù từng sự kiện sáp nhập riêng lẻ có thể mang lại những hiểu biết vô cùng giá trị, nhưng việc nghiên cứu tổng thể toàn bộ một quần thể sẽ cung cấp một bức tranh hoàn thiện hơn về cách mà các hệ đôi đặc hình thành, tiến hóa và sáp nhập.

Vũ trụ của chúng ta chứa đựng những ngôi sao trải dài trên một phạm vi rộng lớn về khối lượng và các giai đoạn tiến hóa. Một số ngôi sao tương đối nhỏ và có thể tồn tại hàng chục tỷ năm. Những ngôi sao khác lại "sống vội và chết trẻ", đốt sạch nhiên liệu hạt nhân của chúng chỉ trong vài triệu năm. Những ngôi sao khối lượng lớn này, với khối lượng gấp từ hàng chục đến thậm chí hàng trăm lần khối lượng Mặt Trời, để lại những tàn dư đặc sau khi chết. Những tàn dư đặc này bao gồm sao nơ-tron và lỗ đen, đôi khi chúng có thể bắt cặp tạo thành các hệ đôi và cuối cùng sáp nhập với nhau. Những vụ sáp nhập như vậy tạo ra sóng hấp dẫn (GWs), rnhững gợn sóng trong kết cấu không-thời gian đã nhanh chóng trở thành một trong những công cụ chính yếu để tìm hiểu về sự hình thành và tiến hóa của các vật thể thiên văn đặc trong suốt chiều dài lịch sử vũ trụ. Sóng hấp dẫn có thể du hành xuyên qua Vũ trụ trong hàng tỷ năm, đi xuyên qua các vùng vật chất và thiên hà cản đường mà hầu như không bị suy suyển gì trước khi cuối cùng được phát hiện tại Trái Đất.

Khi các máy dò của chúng ta vươn tầm quan sát sâu hơn vào Vũ trụ, các nghiên cứu về quần thể hệ đôi đặc sẽ cung cấp một cái nhìn ngày càng chi tiết về cách các lỗ đen và sao nơ-tron hoạt động cũng như cách chúng tương tác với nhau. Những nghiên cứu này cũng mang lại những hiểu biết sâu sắc về bản chất, sự tiến hóa và cái chết của những ngôi sao khối lượng lớn, những yếu tố định hình nên lịch sử vũ trụ của lỗ đen và sao nơ-tron.



Hình 1 (Hình 2 trong bài báo của chúng tôi). Khung bên trái: sự phân bố khối lượng sơ cấp (tức là thành phần có khối lượng lớn hơn) trong quần thể hệ lỗ đen kép. Các kết quả từ danh mục GWTC-5.0 (màu xanh dương và đỏ) vẫn giữ nguyên cấu trúc tổng thể như đã thấy ở GWTC-4.0 (đường liền nét màu đen), với các đặc điểm nổi bật được duy trì quanh mức 10 và 35 khối lượng Mặt Trời. Khung bên phải: sự phân bố của tỷ số khối lượng, q, cho thấy cách các lỗ đen bắt cặp với nhau. Tỷ số khối lượng $q = 1$ chỉ ra rằng một lỗ đen bắt cặp với một thành phần đồng hành có cùng khối lượng.

PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Các hệ đôi đặc sáp nhập được trình bày trong nghiên cứu này bao gồm các hệ sao nơ-tron kép (BNS), hệ sao nơ-tron – lỗ đen (NSBH) và hệ lỗ đen kép (BBH). Bài báo của chúng tôi phác họa một bức tranh về cách các hệ này hình thành, các đặc tính của chúng cũng như cách chúng sáp nhập xuyên suốt thời gian vũ trụ. Chúng được trích xuất từ Danh mục Nguồn Sóng hấp dẫn Thoáng qua GWTC-5.0 catalog mới được công bố, và bao gồm các tín hiệu phát hiện có độ tin cậy cao từ giai đoạn hai của đợt quan trắc khoa học thuộc liên minh LIGO-Virgo-KAGRA's (LVK's) lần thứ tư (O4b). Ngoài ra, do có sự cập nhật kết quả từ giai đoạn một của đợt quan trắc (O4a), 267 ứng cử viên của chúng tôi bao gồm thêm hai sự kiện nữa từ các phân tích quần thể của GWTC-4.0.

TÌM HIỂU THÊM:

Truy cập các web:
www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

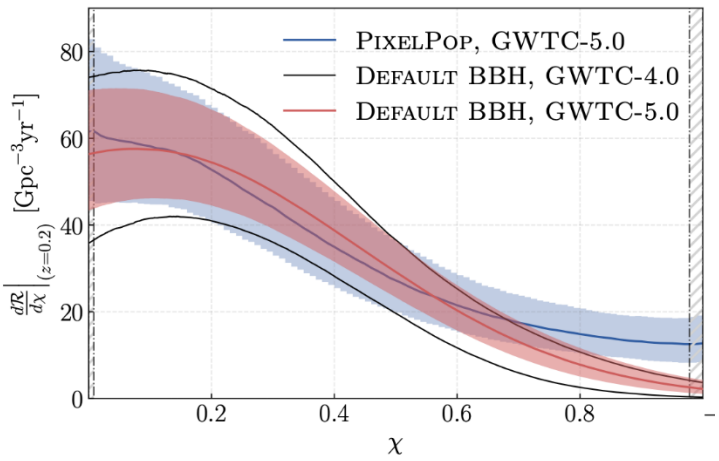
Việc suy luận các đặc tính quần thể đòi hỏi sự hiểu biết kỹ lưỡng về các hiệu ứng chọn lọc, một thách thức phổ biến trong thiên văn học quan trắc. Các máy dò sóng hấp dẫn nhạy cảm hơn đối với các vụ sáp nhập ở gần và có khối lượng lớn so với các hệ thống ở xa và có khối lượng nhỏ, và sự thiên lệch này phải được tính toán thỏa đáng trong quá trình phân tích. Các tín hiệu sóng hấp dẫn từ các hệ đôi đặc được mô tả rất tốt bởi thuyết tương đối tổng quát và chúng tôi sử dụng những dự đoán này để tìm hiểu các tín hiệu dựa trên giả định rằng các quỹ đạo gần như tròn hoàn toàn.

Khác với các tín hiệu điện từ như bức xạ vô tuyến, GWs achịu ảnh hưởng rất yếu bởi vật chất cản đường , cho phép các hiệu ứng chọn lọc của chúng được mô hình hóa với độ chính xác cao. Để định lượng những hiệu ứng này, chúng tôi chèn hàng triệu tín hiệu sóng hấp dẫn tổng hợp với các khối lượng, spins, và độ dịch chuyển đỏ ikhác nhau vào dữ liệu thực tế của các máy dò, sau đó đo lường khả năng phát hiện chúng của các hệ thống phân tích. Những phép đo này, đổi lại, cho phép chúng tôi "loại bỏ" các hiệu ứng chọn lọc và xây dựng được phân bố quần thể thực sự của các hệ đôi đặc sáp nhập. Để tính đến các sai số hệ thống khác, ví dụ như do mô hình hóa sai lệch về quần thể , chúng tôi tiến hành xác thực và kiểm tra chéo các kết quả của mình bằng cách sử dụng nhiều bộ mô hình khác nhau cho quần thể hệ đôi đặc.

KẾT QUẢ NỔI BẬT

Phân bố khối lượng: Cấu trúc và các đặc điểm được xác định trong phân tích GWTC-4.0 vẫn duy trì trong nghiên cứu hiện tại. **Hình 1 (khung bên trái)** cho thấy sự phân bố khối lượng lỗ đen, về cơ bản có thể được mô tả như một định luật lũy thừa kép (double power law) với một vùng quá mật độ (overdensity) ở mức khoảng 10 M⊙ (trong đó ký hiệu M⊙ biểu thị khối lượng Mặt Trời) và sự thay đổi độ dốc ở khoảng 35 M⊙. **Hình 1 (khung bên phải)** cho thấy các lỗ đen có nhiều khả năng bắt cặp với các lỗ đen khác có khối lượng tương đương, một xu hướng thậm chí còn rõ rệt hơn đối với các lỗ đen có khối lượng khoảng 35 M⊙. Theo nguyên tắc chung, các ngôi sao cũng có khuynh hướng hình thành hệ sao đôi với những ngôi sao khác có khối lượng tương đương, do đó, sự ưu tiên tương tự đối với các lỗ đen là điều không nằm ngoài dự đoán.

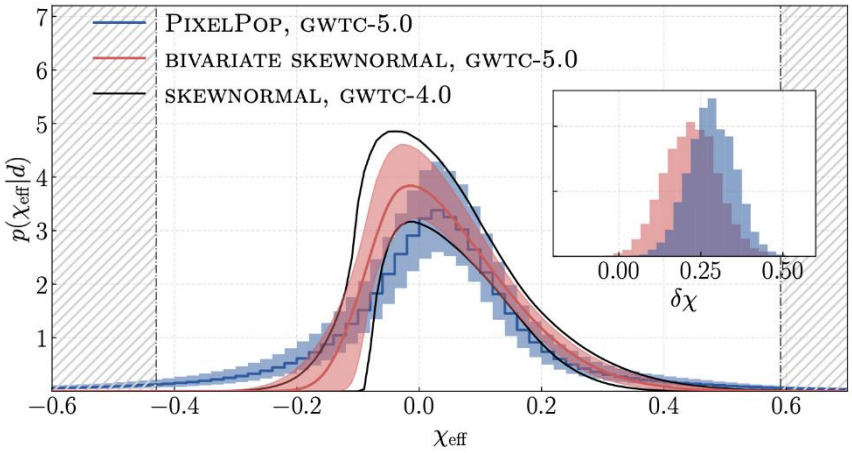
Độ tự quay: Bên cạnh khối lượng , các đặc tính của lỗ đen thiên văn vật lý còn được xác định bởi độ tự quay của chúng. Những độ tự quay này, dù đứng độc lập hay kết hợp cùng khối lượng, đều có thể mã hóa thông tin về môi trường nơi chúng sinh ra, các kênh hình thành, và tiến hóa.



Hình 2 (phỏng theo Hình 3 trong bài báo của chúng tôi): Sự phân bố về tốc độ tự quay của từng lỗ đen riêng lẻ. Chúng tôi biểu thị điều này bằng độ lớn tự quay không thứ nguyên (dimensionless spin magnitude), đại diện cho một phần tỷ lệ của mức tự quay cực đại được cho phép bởi thuyết tương đối tổng quát. Các mô hình từ GWTC-5.0 (các dải màu xanh dương và đỏ) nhất quán với các kết quả GWTC-4.0 trước đó (các đường liền nét màu đen) và bảo toàn được cấu trúc phân bố tổng thể. Hầu hết các lỗ đen đều có độ tự quay không thứ nguyên nhỏ, nhưng một tỷ lệ nhỏ trong số chúng có giá trị lớn.

Chúng tôi mô tả độ tự quay của lỗ đen bằng tham số tự quay không thứ nguyên χ , một con số nằm trong khoảng [0, 1]. Một lỗ đen với $\chi = 0$ hoàn toàn không tự quay, trong khi một lỗ đen với $\chi = 1$ đang tự quay nhanh nhất có thể về mặt lý thuyết theo thuyết tương đối tổng quát. Chúng tôi phát hiện ra rằng trong khi hầu hết các lỗ đen đều có độ tự quay không thứ nguyên nhỏ (xem Hình 2), khoảng 15% trong số chúng có độ tự quay lớn, ở mức $\chi \sim 0.7$.

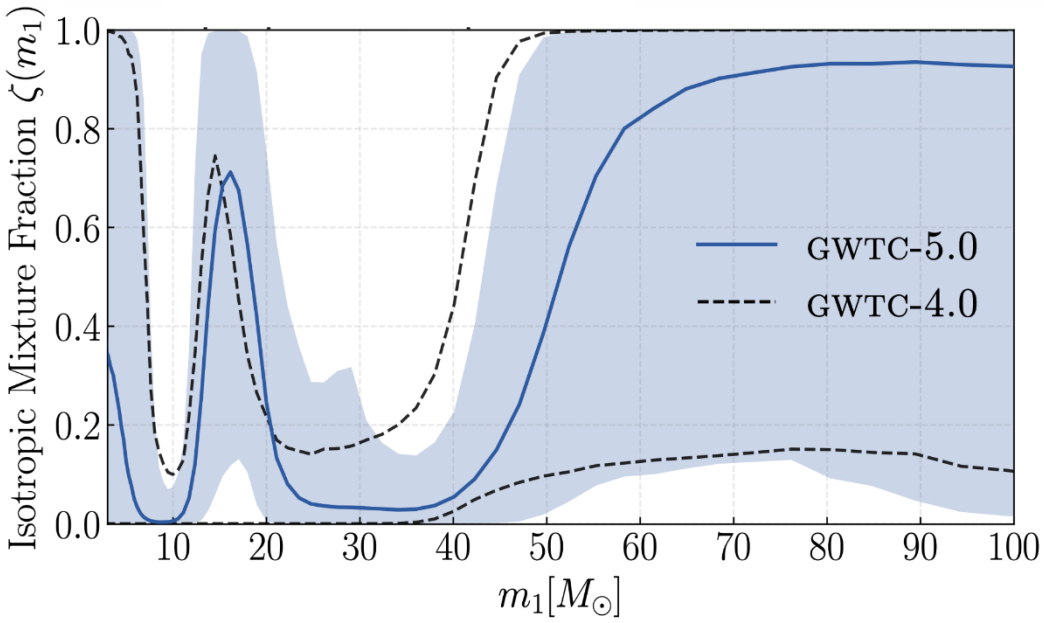
Một cách hữu ích khác để nghiên cứu độ tự quay của các hệ đôi đặc là thông qua độ tự quay hiệu dụng trong giai đoạn xoáy ốc, χ_{eff}, đại lượng đo lường sự thẳng hàng của các độ



Hình 3 (phỏng theo Hình 4 trong bài báo của chúng tôi) : Sự phân bố của tham số tự quay hiệu dụng (χ_{eff}) của các hệ đôi. Khung nhỏ (inset) cho thấy sự bất đối xứng của phân bố này, một đặc điểm có thể đặc biệt nhạy cảm với cách mà các hệ lỗ đen kép hình thành, đối với hai mô hình mà chúng tôi sử dụng trong GWTC-5.

tự quay với mô-men động lượng quỹ đạo và nhìn chung là tham số tự quay được đo lường tốt nhất bằng sóng hấp dẫn. Giống như tất cả các ước tính của chúng tôi, đại lượng này không được đặc trưng bởi một con số duy nhất mà bởi một phân bố xác suất, cho chúng ta biết khả năng xảy ra của các giá trị khác nhau của một biến số vật lý là bao nhiêu, dựa trên dữ liệu hiện có. **Hình 3** cho thấy sự phân bố của các độ tự quay hiệu dụng và hình dạng của nó có thể là một chỉ báo hữu ích về cơ chế hình thành lỗ đen. Chúng tôi phát hiện ra rằng phân bố này bất đối xứng quanh điểm 0, với nhiều hệ đôi có độ tự quay hiệu dụng dương (tức là các độ tự quay cùng chiều với mô-men động lượng quỹ đạo) hơn là âm (ngược chiều với mô-men động lượng quỹ đạo). Dựa trên sự bất đối xứng này, chúng tôi tự tin nhận định rằng ít nhất 6% các hệ lỗ đen kép chắc chắn đã được tạo ra trong các kênh hình thành ưu tiên sinh ra các hệ đôi cùng chiều, có thể do các hiệu ứng như lực thủy triều hoặc sự tương tác của lỗ đen với các ngôi sao.

Đi sâu vào tìm hiểu xem những lỗ đen nào đang tự quay nhanh, chúng tôi phát hiện ra rằng chúng xuất hiện ở hai thang khối lượng riêng biệt, như được thể hiện trong **Hình 4**, với khối lượng nằm trong khoảng xấp xỉ 10-20 M⊙ hoặc trên 45 M⊙. Đối với các thang khối lượng này, những độ tự quay lớn như vậy nhìn chung rất khó để giải thích bằng các mô hình hình thành sao tiêu chuẩn. Điều này cho thấy các cơ chế hình thành thay thế, chẳng hạn như sáp nhập phân cấp (hierarchical mergers – trong đó các lỗ đen hình thành từ sự sáp nhập của các thế hệ lỗ đen trước đó lại tiếp tục sáp nhập với nhau), có thể đã tham gia vào quá trình này! Khả năng này cũng sẽ hoàn toàn nhất quán với các phát hiện gần đây của liên minh LVK đối với sự kiện GW241110 and GW241011, trong đó cả hai hệ thống đều cho thấy những dấu vết tự quay phù hợp với quá trình sáp nhập phân cấp. Mặc dù mối liên hệ này rất hấp dẫn, nhưng chúng ta vẫn chưa thể tự tin loại trừ các cơ chế khả thi khác có thể tạo ra các lỗ đen có độ tự quay cao.



Hình 4 (phỏng theo Hình 10 trong bài báo của chúng tôi): Tỷ lệ các hệ có chứa lỗ đentự quay nhanh theo khối lượng. Các lỗ đen có độ tự quay lớn dường như có khối lượng nằm trong khoảng xấp xỉ 10-20 M⊙ hoặc trên 45 M⊙. Đường liền nét màu xanh dương thể hiện tỷ lệ trung vị được suy luận từ GWTC-5.0 và vùng bóng mờ màu xanh dương thể hiện khoảng tin cậy 90% tương ứng cho tỷ lệ này.

KẾT LUẬN

Tập hợp các tín hiệu phát hiện sóng hấp dẫn mới trong GWTC-5.0 mang đến cho chúng ta cái nhìn sâu sắc nhất từ trước đến nay về phân bố quần thể của các lỗ đen và sao nơ-tron sáp nhập. Một vài đặc điểm thú vị trong các phân bố này đã hiện rõ một cách sắc nét trong phân tích hiện tại, bao gồm sự hiện diện của các lỗ đen có độ tự quay cao. Nhìn chung, tập dữ liệu này cung cấp bằng chứng rõ ràng nhất từ trước đến nay cho thấy các hệ lỗ đen kép có thể hình thành theo nhiều cách khác nhau. Bản cập nhật cuối cùng dựa trên dữ liệu O4, GWTC-6.0 dự kiến ra mắt trong vài tháng tới, sẽ làm sáng tỏ hơn nữa những khám phá mới đầy thú vị này.

TÌM HIỂU THÊM:

Truy cập các trang web:
www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Đọc bản thảo miễn phí của toàn bộ bài báo khoa học tại đây: https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600045/public/
or here: https://arxiv.org/abs/2605.xxxxx

Các bài báo bổ sung trình bày về GWTC-5.0:

- Introductory paper: https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500701/public/
- Methods paper: https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600166/public/
- Results paper: https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600152/public/

Bản công bố dữ liệu của Trung tâm Khoa học Mở về Sóng hấp dẫn cho GWTC-5.0: https://gwosc.org/GWTC-5.0/