

GW241011 VÀ GW241110: HAI SỰ KIỆN HỢP NHẤT HỔ ĐEN VỚI TỐC ĐỘ QUAY CAO VÀ CHÊNH LỆCH KHỐI LƯỢNG ĐƯỢC QUAN SÁT BỞI SÓNG HẤP DẪN

Vào những tháng cuối năm 2024, [nhóm cộng tác LIGO-Virgo-KAGRA \(LVK\)](#) đã ghi nhận GW241011 và GW241110: hai sự kiện [sóng hấp dẫn](#) có sự tương đồng đáng kể (không chỉ bởi tên gọi). Sự kiện đầu tiên, GW241011, được phát hiện vào ngày 11 tháng 10 năm 2024 lúc 23:38:34 UTC. GW241110 được phát hiện gần đúng một tháng sau đó, ngày 10 tháng 11 lúc 12:41:23 UTC. Cả hai đều là [hệ hố đen đôi](#) có tốc độ quay cao và có sự chênh lệch khối lượng giữa các hố đen thành phần. Các đặc điểm này được ứng dụng trong việc làm rõ quá trình hình thành và tiến hoá của một cặp hố đen, cũng như các lĩnh vực khác trong vật lý cơ bản.

THU THẬP TÍN HIỆU

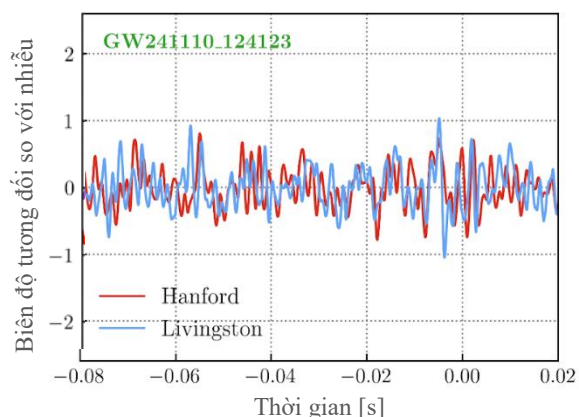
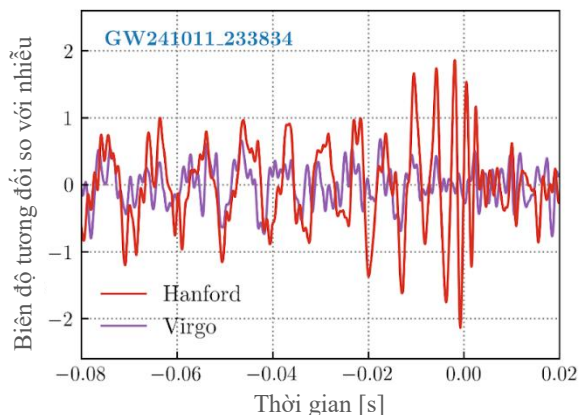
Các máy dò LIGO và Virgo đã phát hiện hai sự kiện trên trong giai đoạn thứ hai của [kỳ quan sát](#) lần thứ tư (Ob4) thuộc chương trình LIGO-Virgo-KAGRA. **Hình 1** minh hoạ biên độ dữ liệu ghi nhận theo thời gian cho các sự kiện này.

Ta quan sát thấy tín hiệu GW241011 nổi bật trên nền [nhiều](#) thường thấy ở cả hai máy dò. Tín hiệu được ghi nhận mạnh hơn nhiều nền tới 35 lần ở máy dò [LIGO Hanford](#), và khoảng 9 lần đối với máy dò [Virgo](#); [LIGO Livingston](#) không hoạt động vào thời điểm đó. Sử dụng các thuật toán tìm kiếm hiện đại và các kỹ thuật thống kê, chúng tôi đã tìm ra được xác suất để một sự nhiễu ngẫu nhiên có thể tạo ra một tín hiệu tương tự là chưa đến một lần trong 10^{26} năm, một con số còn lớn hơn cả số [tuổi vũ trụ](#).

GW241110 được phát hiện một tháng sau đó, lần này, cả ba máy dò đều đang trong chế độ quan sát. Dù tín hiệu lần này yếu hơn so với GW241011, ta vẫn có thể nhận dạng nó trên cả hai thiết bị của LIGO, trong đó Virgo ghi nhận tín hiệu yếu hơn. Ở thời điểm đó, dao động địa chấn tại nơi đặt máy dò Livingston đang ở mức cao, gây ra một số nhiễu loạn tần số thấp; tuy nhiên, điều này không làm ảnh hưởng quá lớn đối với quá trình phát hiện. Sau khi phân tích kỹ lưỡng, chúng tôi ước tính rằng xác suất để tín hiệu này bắt nguồn từ nhiễu ngẫu nhiên là dưới một lần trong 1500 năm.

TÌM HIỂU THÊM:

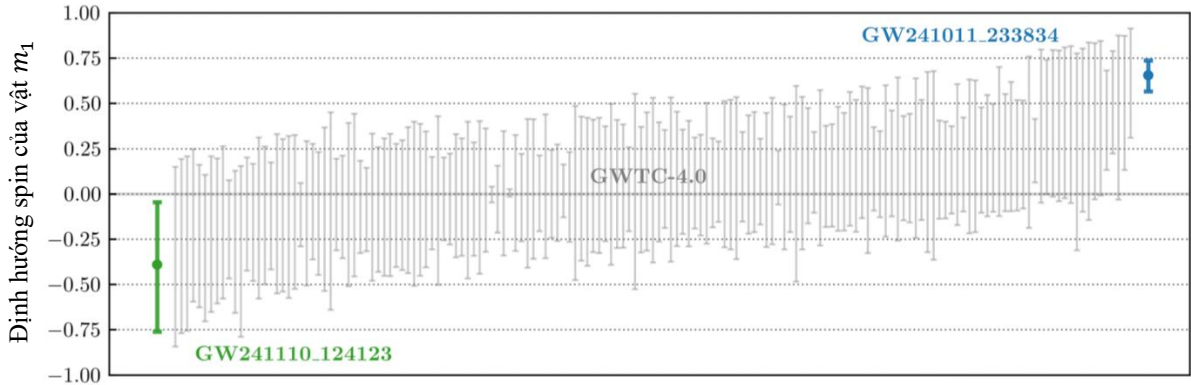
Tại các website: www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



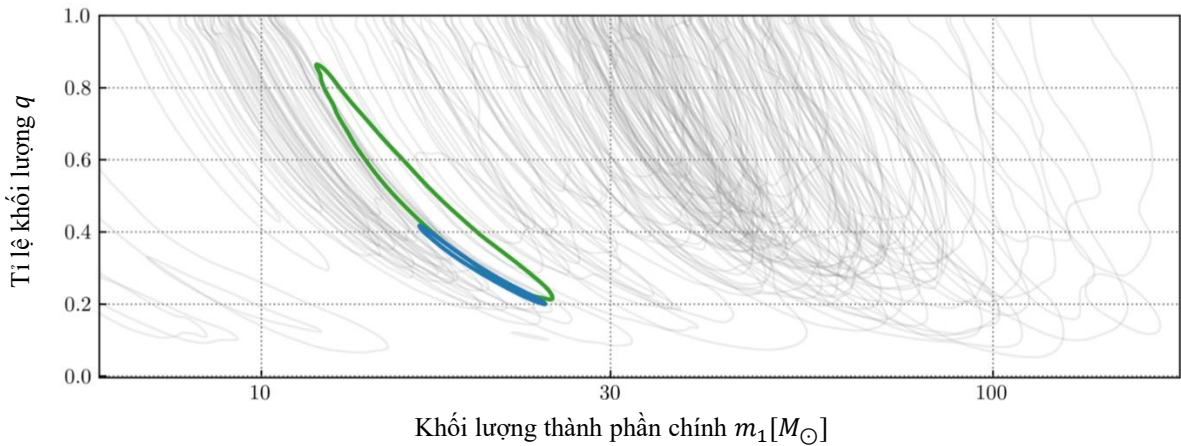
Hình 1: Các biểu đồ minh hoạ biên độ dữ liệu theo thời gian được tổng hợp từ các máy dò LIGO Hanford, LIGO Livingston và Virgo, tương ứng với hai sự kiện: GW241011 (biểu đồ trên) và GW241110 (biểu đồ dưới). Thời điểm hợp nhất được tính từ mốc thời gian = 0.

NHỮNG TÍN HIỆU NÀY TỪ ĐÂU TỚI?

Mỗi sự kiện là kết quả của một sự hợp nhất dữ dội giữa hai [hố đen](#). GW241011 là tín hiệu sóng hấp dẫn tới từ sự va chạm giữa hai hố đen nặng xấp xỉ 20 và 6 lần [khối lượng Mặt Trời](#), trong khi hai hố đen từ sự kiện GW241110 nặng khoảng 17 và 8 lần khối lượng Mặt Trời, một sự tương đồng đáng chú ý! (Xem [Hình 2](#), biểu đồ dưới.) Hố đen trong cả hai hệ đều quay rất nhanh, trong đó spin (moment động lượng quay) của GW241011 được đo đặc chính xác. (Xem [Hình 2](#), biểu đồ dưới.)



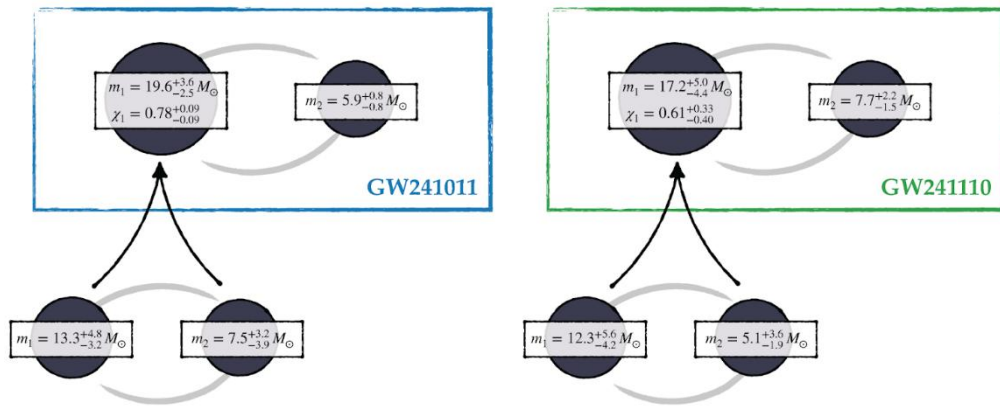
Các phát hiện về Hệ Nhị phân Gọn (Compact Binary)



Hình 2: (Được lấy từ Hình 1 trong bài báo của chúng tôi) Biểu đồ trên cho thấy các sự kiện ghi nhận trong hệ thống dữ liệu GWTC-4 cùng với hai sự kiện mới: GW241011 và GW241110 được sắp xếp theo thành phần spin chiếu theo hướng spin quỹ đạo — nói cách khác, độ song song giữa hướng quay của hố đen nặng hơn và hướng quay quỹ đạo của hệ nhị phân. Các giá trị lớn hơn 0 cho thấy hướng spin của hố đen hướng chiều với hướng quay quỹ đạo, trong khi giá trị bé hơn 0 đồng nghĩa với việc hướng ngược chiều. Biểu đồ bên dưới thể hiện sự phân bố khối lượng thành phần chính (hố đen lớn hơn) tính theo khối lượng Mặt Trời và [tỷ lệ khối lượng](#) của các cặp hố đen của tất cả các sự kiện trong GWTC-4, bao gồm cả hai sự kiện mới của chúng tôi.

CÂU CHUYỆN TIẾN HOÁ

Cả hai sự kiện này đều mang theo một điểm tương đồng thú vị: trong mỗi cặp, ta đều đo được spin của hố đen nặng hơn một cách chính xác. Điểm đặc biệt là spin đo được đều không hoàn toàn cùng hướng với spin quỹ đạo của hệ, và mỗi hệ đều có một hố đen nặng khoảng hai lần hố đen còn lại. Những manh mối này gợi ý rằng hố đen nặng hơn có thể là kết quả của một vụ hợp nhất hố đen trước đó, ta đặt tên chúng là hố đen “thế hệ thứ hai” (xem [Hình 3](#)). Kịch bản này có tên gọi là **hợp nhất thứ bậc (hierarchical merger)**, nó cho ta ý tưởng về việc môi trường hình thành các hệ hố đen như trên có mật độ rất cao, chẳng hạn như [cụm sao](#) — nơi mà hố đen có khả năng va chạm và hợp nhất lần này qua lần khác. Tuy nhiên, ta cũng không thể bác bỏ các kịch bản khác, giả sử như khi mà cả hai hệ trên được hình thành từ một cặp sao tiến hoá độc lập.



Hình 3: (Được lấy từ Hình 3 trong bài báo của chúng tôi.) Thể hiện trên hình là hai cặp hố đen từ sự kiện GW241011 và GW241110, cùng với đó là tiền thân có thể có của hố đen khối lượng lớn hơn trong mỗi cặp. Chúng tôi ghi chú khối lượng ước tính của mỗi hố đen (theo đơn vị khối lượng Mặt Trời), spin của hố đen nặng hơn (χ), cùng với độ bất định tương ứng trong mỗi cặp.

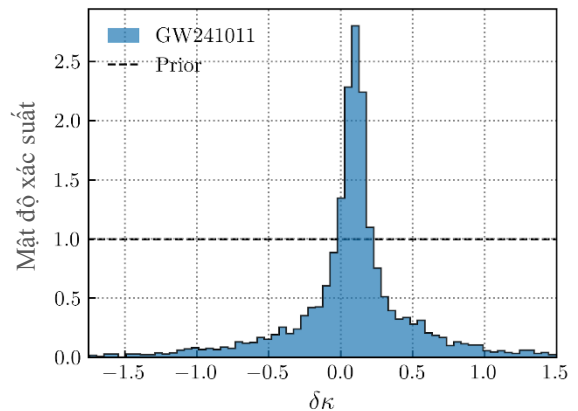
ỨNG DỤNG TRONG VẬT LÝ CƠ BẢN

Phép đo chính xác và tin cậy một cách đáng kinh ngạc về spin của hố đen nặng hơn trong sự kiện GW241011 cho phép chúng tôi kiểm nghiệm một tiên đoán quan trọng trong [thuyết tương đối rộng của Einstein](#), đó là **moment tứ cực gây bởi spin** của hố đen. Hiệu ứng này mô tả cách chuyển động quay nhanh làm biến dạng nhẹ hình dáng của hố đen và thay đổi hình thái sóng hấp dẫn mà nó phát ra. Bằng cách phân tích cẩn thận tín hiệu của GW241011 (xem **Hình 4**), chúng tôi đã chứng thực tiên đoán của Einstein về hiệu ứng này với độ chính xác cao (đúng vậy, ông ấy lại đúng, một lần nữa!), đồng thời siết chặt các điều kiện ràng buộc lên các hố đen quay theo một cách chưa từng có trước đây.

Hố đen quay, chẳng hạn như các hố đen nặng hơn trong GW241011 và GW241110, cho phép ta kiểm chứng sự tồn tại của các hạt chưa được khám phá. Một số lý thuyết dự đoán rằng các hạt [boson](#) siêu nhẹ, những ứng viên tiềm năng cho loại **“vật chất tối”** nhẹ hơn bất kỳ hạt nào trong [Mô hình chuẩn của vật lý hạt](#), có thể làm “rò rỉ” spin của hố đen theo thời gian. Nếu loại hạt có khối lượng trong một khoảng giá trị nhất định như vậy tồn tại, và được tìm thấy trong các đám mây xung quanh các hố đen lớn của GW241011 và GW241110; chúng đã có thể khiến tốc độ quay của các hố đen giảm xuống từ rất lâu trước khi hợp nhất. Nhưng với việc cả hai hố đen lớn quan sát được đều đang quay rất nhanh, chúng giúp loại trừ một phạm vi rộng các giá trị khối lượng có thể có của hạt boson này, qua đó khẳng định một công cụ mạnh mẽ trong việc khảo sát vật lý mới, sự kiện hợp nhất.

KẾT LUẬN

Sự phát hiện GW241011 và GW241110 đánh dấu bước tiến vượt bậc trong ngành thiên văn sóng hấp dẫn trong công cuộc khám phá cuộc sống ẩn giấu của các hố đen hợp nhất. Cả hai hệ trên đều gợi ý khả năng tồn tại của các hố đen “thế hệ thứ hai” được hình thành trong các môi trường mật độ cao, nơi các vụ hợp nhất có thể diễn ra liên tục. Hơn nữa, khả năng đo chính xác các thông số của GW241011 về spin và các moment đa cực bậc cao đã cho phép kiểm nghiệm thuyết tương đối rộng trong các điều kiện cực đoan, với kết quả thu được không sai lệch so với dự đoán của Einstein. Mỗi sự kiện được phát hiện giúp chúng ta có thêm mảnh ghép để hoàn thiện bức tranh tổng thể về vũ trụ. Chúng không chỉ là những phát hiện thuần thiên văn học, mà còn là những phòng thí nghiệm tự nhiên giúp khảo sát các định luật cơ bản của vật lý.



Hình 4: (Được lấy từ Hình 9 trong bài báo của chúng tôi) Sai lệch so với tiên đoán của Thuyết Tương đối Rộng đối với moment tứ cực gây bởi spin của hố đen chính trong GW241011. Sai lệch dường như bằng 0 cho thấy tính nhất quán của kết quả so với tiên đoán của thuyết Einstein.

TÌM HIỂU THÊM:

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

Bạn đọc có thể tìm bản preprint miễn phí hoặc bài báo khoa học ở [đây](#) hoặc trên [arxiv](#).

Trung tâm Dữ liệu Sóng hấp dẫn mở:

Dữ liệu cho GW241011: <https://doi.org/10.7935/3drz-8m81>

Dữ liệu cho GW241110: <https://doi.org/10.7935/46xh-t016>