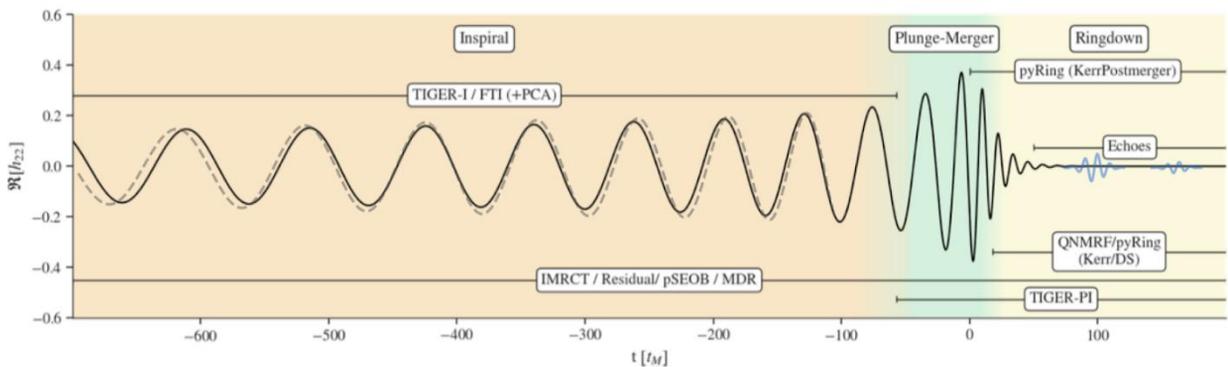


# KIỂM CHỨNG THUYẾT TƯƠNG ĐỐI RỘNG QUA CÁC QUAN SÁT HỢP NHẤT HỆ SAO ĐÔI ĐẶC MỞI NHẤT

[Thuyết Tương Đối Rộng](#) của Einstein chính là lý thuyết về hấp dẫn được công nhận rộng rãi nhất thời điểm hiện tại. Trong suốt 110 năm kể từ khi lý thuyết này ra đời, nó đã được kiểm chứng thành công theo nhiều cách. Tuy vậy, người ta vẫn đặt ra các câu hỏi khắt khe về tính đúng đắn của nó. [Sóng hấp dẫn](#) là một tiên đoán trực tiếp từ Thuyết Tương Đối Rộng, được xác nhận bởi [quan sát đầu tiên về sự hợp nhất hai hố đen vào tháng 9 năm 2015](#). Các quan sát từ quá trình xoắn ốc tiến gần ([inspiral](#)) và hợp nhất của các [hố đen](#) có khối lượng cỡ sao cho ta cơ hội đặc biệt để kiểm tra Thuyết Tương Đối Rộng trong điều kiện hấp dẫn mạnh và đầy biến động.

Trong suốt thế kỷ vừa qua, [nhóm hợp tác LIGO-Virgo-KAGRA \(LVK\)](#) đã thường xuyên sử dụng các dữ liệu quan sát sóng hấp dẫn để kiểm chứng lại Thuyết Tương Đối Rộng. Các phép kiểm nghiệm này đã xác nhận rằng mọi sai lệch so với Thuyết Tương Đối Rộng, nếu có tồn tại, đều cực kỳ nhỏ (nằm dưới ngưỡng các thiết bị có thể phát hiện được). Tuy nhiên, khi ngày càng nhiều số lượng sự kiện sóng hấp dẫn được phát hiện, các phép kiểm nghiệm càng trở nên khắt khe hơn. Với 42 sự kiện hợp nhất hố đen loại “đáng chú ý” (high-significant) được phát hiện trong giai đoạn đầu của [Đợt quan sát](#) hiện tại (O4a), đây là thời điểm thích hợp để xem xét lại sự chính xác của Thuyết Tương Đối Rộng dựa trên tập dữ liệu này.



Hình 1: Tín hiệu sóng hấp dẫn từ vụ hợp nhất hệ hố đen đôi. Hình minh hoạ các giai đoạn chính của tín hiệu: xoắn ốc (inspiral), va chạm-hợp nhất (plunge-merger) và tắt dần (ringdown), được sử dụng trong các phép kiểm chứng Thuyết Tương Đối Rộng. Tên của từng phép kiểm và khoảng thời gian áp dụng được thể hiện trong hình. Đường nét đứt mô tả tín hiệu giả định bị biến dạng, lệch khỏi dự đoán của Thuyết Tương Đối Rộng. Ngoài ra, các tín hiệu “đội lại” (echoes), được kỳ vọng xuất hiện nếu tàn dư của vụ hợp nhất không phải là một hố đen, được biểu diễn bằng đường màu xanh.

Làm thế nào để kiểm chứng Thuyết Tương Đối Rộng? Thuyết Tương Đối Rộng cung cấp một khung lý thuyết vững chắc để mô tả lực hấp dẫn. Trong các thập kỷ gần đây, việc mô hình hoá chính xác sóng hấp dẫn từ vụ hợp nhất hệ sao đôi đặc (compact binary merger) có nhiều tiến bộ lớn (cả trong phương pháp giải tích lẫn phương pháp số). Các phép kiểm chứng Thuyết Tương Đối Rộng đều dựa trên (i) đánh giá tính nhất quán của Thuyết qua các giai đoạn của quá trình hợp nhất; hoặc (ii) tìm kiếm các “biến dạng” nhất định trong tín hiệu sóng hấp dẫn, xuất phát từ các vi phạm có thể xảy ra của Thuyết.

Những sai lệch có thể xảy ra so với Thuyết Tương Đối Rộng có thể xuất hiện từ quá trình phát sinh hoặc lan truyền sóng hấp dẫn, hoặc bởi các vật thể hợp nhất không thực sự là hố đen theo như Thuyết Tương Đối Rộng mô tả. Tuy nhiên, các phép kiểm nghiệm này cần được thực hiện một cách cẩn thận: biến động do nhiễu trong thiết bị đo và tính hạn chế trong việc tối ưu hoá mô hình sóng (khi ta đánh đổi sự kém chính xác để lấy hiệu năng cao) có thể “bắt chước” các dấu hiệu tưởng chừng như là các sai lệch so với Thuyết. Do đó, chúng cần được phân tách cẩn thận khỏi các hiệu ứng vật lý thực sự.

## MỘT LOẠT CÁC PHÉP KIỂM NGHIỆM

Số lượng lớn và chất lượng cao các quan sát sóng hấp dẫn cho phép các nhà khoa học trong nhóm LVK thực hiện đa dạng các phép kiểm nghiệm về Thuyết Tương Đối Rộng. Ngoài những phép kiểm được trình bày chi tiết dưới đây, nghiên cứu của nhóm còn bao gồm các bài kiểm tra khác, ví dụ như đánh giá tính nhất quán của các đặc trưng yếu hơn trong tín hiệu sóng hấp dẫn (gọi là *subdominant mode*) hoặc kiểm tra xem các hố đen có thực sự bị biến dạng bởi mô-men quay (*spin*) của chúng như dự đoán. Ngoài ra, chúng tôi cũng kiểm tra các dấu hiệu gia tốc của khối tâm hệ sao đôi—một hiệu ứng có ý nghĩa thiên văn mà nếu không được xem xét, có thể bị hiểu nhầm là một sai lệch so với Thuyết Tương Đối Rộng.

Các phép kiểm nghiệm trước tiên tập trung kiểm tra trực tiếp xem sự tiến hoá của hệ hố đen đôi, cùng với sự phát sinh và lan truyền của sóng hấp dẫn, có phải một sai lệch so với tiên đoán của Einstein. Lấy ví dụ, Thuyết Tương Đối Rộng dự đoán rằng sóng hấp dẫn lan truyền với [tốc độ ánh sáng](#) và tương tác rất yếu với vật chất. Tuy nhiên, một số nghiên cứu về hấp dẫn khác (chẳng hạn như thuyết bao gồm [hạt graviton nặng](#) hay [năng lượng tối](#)) cho rằng sóng hấp dẫn lan truyền với các tốc độ khác nhau và có thể bị *tán sắc*—nghĩa là các tần số khác nhau sẽ tới vào các thời điểm khác nhau, tương tự như hiện tượng sóng vô tuyến bị tán sắc khi truyền qua [plasma](#). Điều này có thể được kiểm tra bằng cách bổ sung thêm tham số vào mô hình tín hiệu sóng để mô phỏng những hiệu ứng mà các lý thuyết khác dự đoán. Nếu dữ liệu cho thấy rằng các tham số này có giá trị bằng không, kết quả kiểm chứng cho thấy lý thuyết của Einstein là đúng. Ngược lại, kết quả gợi ý về một vật lý mới vượt ra ngoài Thuyết Tương Đối Rộng.

Một dạng bài kiểm nghiệm nữa được dùng để kiểm tra lại tính nhất quán tổng quát của các tín hiệu sóng hấp dẫn so với dự đoán của Thuyết Tương Đối Rộng, hoặc tính nhất quán từng phần trong từng giai đoạn của tín hiệu.

Sự nhất quán tổng quát được kiểm tra bằng cách trừ đi mô hình sóng Tương Đối Rộng phù hợp nhất (best-fit) khỏi tín hiệu thực và phân tích phần dư, so sánh chúng với nhiễu thiết bị dự kiến. Vì các dữ liệu trong nghiên cứu này đều được phát hiện bởi ít nhất là hai, và đôi khi ba, máy dò; tính nhất quán giữa phần dư của các máy dò (đã tính đến thời gian ánh sáng di chuyển giữa các nơi đặt máy) cung cấp thêm một bài kiểm tra: khi xuất hiện giữa các máy dò, một tín hiệu sóng hấp dẫn thực sự sẽ cho thấy có mối tương quan lẫn nhau, nhưng nhiễu thiết bị giữa các máy thì không.

Sự nhất quán từng phần được kiểm tra bằng cách phân tách tín hiệu thành các phần và phân tích chúng một cách độc lập. Nếu Thuyết Tương Đối Rộng là đúng, các tham số của sóng hấp dẫn suy ra từ các phần khác nhau trong tín hiệu phải tương xứng với nhau. Lấy ví dụ, tín hiệu sóng hấp dẫn phát hiện bởi LVK thường mang theo thông tin về ba giai đoạn trong một vụ hợp nhất hệ hố đen đôi: xoắn ốc tiến gần ([inspiral](#)), hợp nhất, và tắt dần ([ringdown](#)) của hố đen tàn dư. Phép kiểm nghiệm tính nhất quán giữa “xoắn ốc - hợp nhất - tắt dần” sẽ so sánh khối lượng và mô-men quay của hố đen tàn dư được suy ra từ giai đoạn xoắn ốc có tần số thấp với giai đoạn sau hợp nhất có tần số cao.

Giống với trường hợp sóng ánh sáng, Thuyết Tương Đối Rộng chỉ cho phép 2 loại [phân cực](#) ngang: “cộng” (“plus”) và “chéo” (“cross.”) Các bài kiểm nghiệm về phân cực nhằm kiểm tra xem sóng hấp dẫn có thực sự chỉ sở hữu hai trạng thái phân cực theo như dự đoán từ Thuyết, hay trường hấp dẫn của sóng có thể dao động theo một cách tổng quát hơn. Các lý thuyết hấp dẫn khác có thể có tới sáu trạng thái phân cực độc lập. Sự xuất hiện của một trạng thái phân cực mới có thể được kiểm tra sử dụng các dữ liệu quan sát từ nhiều máy dò cùng lúc. (Xem Hình 5 của [phần tóm tắt](#) để tìm hiểu thêm.)

Ban đầu, hố đen được hình thành sau vụ hợp nhất sẽ bị biến dạng bởi động năng dư dội của quá trình va chạm. Tương tự như một chiếc chuông bị gõ phát ra âm thanh khi nó rung, hố đen tàn dư phát ra sóng hấp dẫn. Sóng hấp dẫn có các tần số nhất định và suy yếu theo những khoảng thời gian đặc trưng, cả hai đại lượng được quyết định bởi khối lượng và mô-men quay của hố đen tàn dư. Đây cơ sở cho định lý “no-hair”: mọi biến dạng của hố đen (hay “sợi tóc”) bị bức xạ hết, chỉ để lại trạng thái cuối được mô tả bằng hai tham số duy nhất. Như một dàn hợp xướng dần lắng xuống ở cuối bài hát, những “âm sắc” riêng của hố đen (các thành phần [điều hòa](#) trong giai đoạn tắt dần) mang thông tin chi tiết về nguồn gốc của chúng. Nhờ vậy, ta có thể xác định khối lượng và mô-men quay của hố đen bằng cách phân tích phổ tần số giai đoạn tắt dần và thời gian suy yếu của sóng.

### TÌM HIỂU THÊM

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

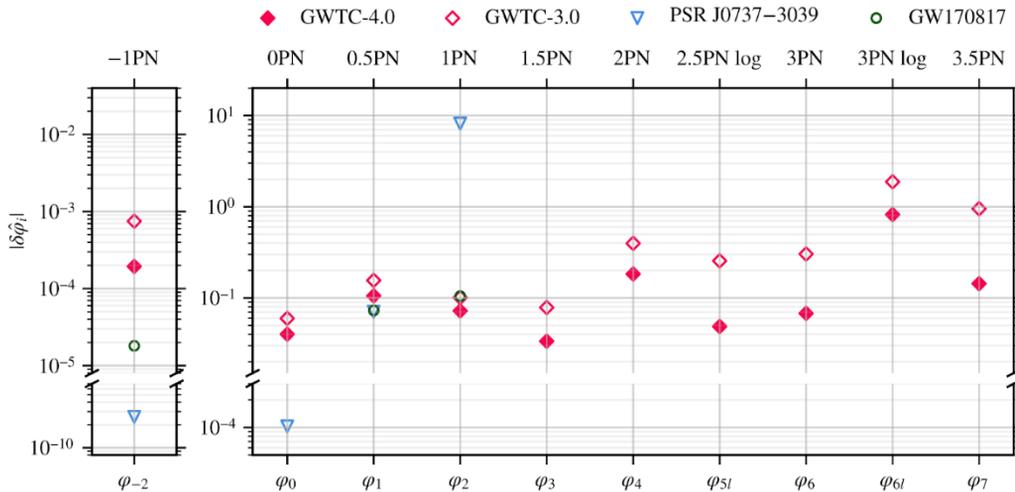


Trong hầu hết trường hợp, việc phát hiện chỉ một thành phần điều hòa là đủ để kiểm tra tính nhất quán của các tham số được xác định trước và trong quá trình hợp nhất. Đặc điểm then chốt của một hố đen chính là chân trời sự kiện (ranh giới mà không tín hiệu nào thoát ra ngoài). Trái lại, nếu tồn tại một bề mặt phản xạ giống như gương, nó có thể tạo ra các “tín hiệu dội lại” (echo signals) sau khi hợp nhất, đây cũng là thứ mà chúng tôi đang tìm kiếm.

## VẬY EINSTEIN CÓ ĐÚNG KHÔNG?

Trong số tất cả các sự kiện được xem xét, phần dư của tín hiệu đều là nhiễu ngẫu nhiên, điều này cho thấy sóng hấp dẫn được miêu tả rất tốt bởi Thuyết Tương Đối Rộng. Khối lượng và mô-men quay của hố đen tàn dư, được suy luận từ phân đoạn tần số thấp và tần số cao của dạng sóng, là nhất quán với nhau.

Ngoài ra, chúng tôi không tìm thấy bất cứ bằng chứng nào cho thấy sai lệch đối với Thuyết Tương Đối Rộng trong quá trình phát sinh và lan truyền sóng hấp dẫn, được thể hiện qua hình thái sóng. Tương tự, không có phát hiện thấy dạng phân cực khác ngoài hai loại được dự đoán bởi Thuyết Tương Đối Rộng. Tuy nhiên, bài phân tích hiện tại đã thiết lập các giới hạn chặt chẽ hơn về khả năng tồn tại của những sai lệch đối với Thuyết, được minh họa trong **Hình 2** dưới đây.



Hình 2: Giới hạn đối với các hệ số chi phối pha tín hiệu sóng hấp dẫn, gọi là hệ số [post-Newtonian](#), được thể hiện. Các hệ số này cho thấy các khả năng sai lệch so với Thuyết Tương Đối Rộng ở các giai đoạn khác nhau trong quá trình tiến hoá của hệ đôi (giai đoạn cách xa nhau ở phía bên trái tới giai đoạn xoắn ốc và chuẩn bị hợp nhất ở phía bên phải). Kết quả phân tích hiện tại đã thiết lập điều kiện chặt chẽ hơn (các giá trị thấp hơn) so với trước đây.

Tương tự, phân tích về quá trình tắt dần cho ra kết quả nhất quán với khối lượng và mô-men quay của hố đen tàn dư được suy luận từ Thuyết Tương Đối Rộng. Chúng tôi cũng không tìm thấy dấu hiệu của các tín hiệu “dội lại” hậu va chạm, được dự đoán nếu tàn dư vụ hợp nhất không phải là một hố đen.

Gần đây, nhóm LVK đã kiểm nghiệm lại Thuyết Tương Đối Rộng dựa trên hai tín hiệu hợp nhất cực kỳ mạnh nhưng không thuộc nghiên cứu hiện tại: [GW230814](#), từng là tín hiệu mạnh nhất (được quan sát bởi máy dò LIGO Livingston) và [GW250114](#), đạt kỷ lục mới về độ mạnh tín hiệu. Ban đầu, [GW230814](#) được xem là ứng viên tiềm năng, nhưng vì thiếu vắng các dữ liệu đồng thời ở các máy dò khác, ta không thể kiểm tra chéo xem có tồn tại nhiều thiết bị vượt mức hay không, điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc quan sát bằng nhiều máy dò cùng lúc. Ngược lại, [GW250114](#)—được phát hiện bởi cả hai đài quan sát LIGO—cho ta kiểm chứng chính xác Thuyết Tương Đối Rộng, bao gồm cả lý thuyết [Hawking's area](#) cũng như đặt ra các giới hạn chặt chẽ nhất đối với các tham số [post-Newtonian](#) và sai lệch trong giai đoạn tắt dần. Tuy vậy, do thời điểm diễn ra sự kiện nằm cuối Đợt quan sát lần thứ tư, nó không nằm trong bộ dữ liệu được sử dụng trong nghiên cứu này.

Tổng quát lại, kết quả nghiên cứu khẳng định Thuyết Tương Đối Rộng vẫn hoàn toàn phù hợp với các quan sát sóng hấp dẫn, mà không cần đến sự chỉnh sửa hay vật lý mới. Hơn nữa, bằng cách kết hợp 42 sự kiện mới với các phát hiện trước đó, chúng tôi đã thiết lập các điều kiện chặt chẽ hơn cho các sai lệch tiềm năng của Thuyết Tương Đối Rộng.

## TÌM HIỂU THÊM:

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

Bản tóm tắt khoa học được viết dựa trên ba công bố mới từ nhóm hợp tác LVK.

Bạn đọc có thể tìm bản preprint miễn phí của bài báo đầy đủ ở:

**GTWC-4.0: Tests of General Relativity I. Overview and General Tests.** Đọc tại [đây](#) hoặc trên [arxiv](#).

**GWTC-4.0: Tests of General Relativity II. Parametrized Tests.** Đọc tại [đây](#) hoặc trên [arxiv](#).

**GWTC-4.0: Tests of General Relativity III. Tests of the Remnants.** Đọc tại [here](#) hoặc trên [arxiv](#).

Trung tâm Dữ liệu Sóng hấp dẫn mở:

Dữ liệu cho GW230814: <https://doi.org/10.7935/amj3-kd70>

Dữ liệu cho GW250114: <https://doi.org/10.7935/1g4j-2028>

Bản biên dịch bởi Nguyễn Thị Lan Anh (Viện PIAS – Đại học Phenikaa)