

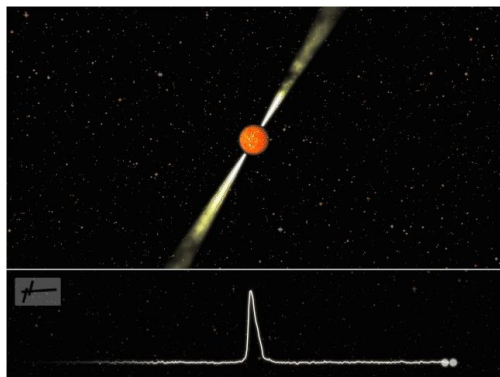
THĂM DÒ CẤU TRÚC BÊN TRONG SAO NEUTRON BẰNG SÓNG HẤP DẪN

Hợp tác LIGO–Virgo–KAGRA (LVK) đã thực hiện một phép tìm kiếm mới nhằm phát hiện các sóng hấp dẫn liên tục (CWs) cực kỳ yếu phát ra từ các sao neutron (NSs), những lõi quay cực kỳ cô đặc còn sót lại sau khi các sao khối lượng lớn phát nổ siêu tân tinh. Sử dụng dữ liệu từ hai giai đoạn đầu của chu kỳ quan sát thứ tư (O4a tháng 5/2023 – tháng 1/2024 và O4b tháng 4/2024 – tháng 1/2025) của các giao thoa kế LIGO, Virgo và KAGRA, nghiên cứu này đánh dấu thêm một cột mốc quan trọng trong nỗ lực phát hiện sóng hấp dẫn không phải từ các va chạm vũ trụ dữ dội, mà từ các nguồn thiên văn ổn định. Những tín hiệu tuần hoàn rất yếu này có thể mở ra một cửa sổ quan sát vào cấu trúc bên trong ẩn giấu của NSs, vốn là những thiên thể cô đặc nhất trong Vũ trụ sau lỗ đen, mặc dù đã có nhiều nỗ lực (xem nghiên cứu trước của chúng tôi tại đây), các tín hiệu này vẫn chưa được phát hiện, cho thấy rằng các NSs gần như là những hình cầu hoàn hảo.

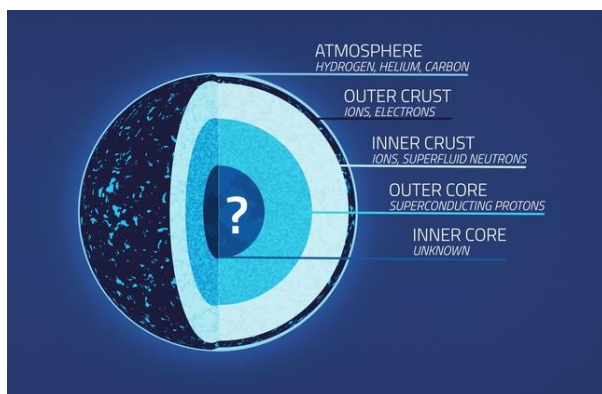
NHỮNG ĐỐI TƯỢNG NÀO PHÁT RA CWS, TẠI SAO LẠI QUAN TRỌNG ĐỐI VỚI CHÚNG TA?

NSs là những thiên thể cực kỳ cô đặc, có khối lượng lớn hơn Mặt Trời nhưng bị nén vào một bán kính chỉ khoảng 10 km. Mật độ cực cao này khiến các hiệu ứng lượng tử đóng vai trò quan trọng trong việc quyết định cấu trúc của những vật thể phi thường này. Không giống như các ngôi sao thông thường, NSs được cho là rất “cứng” và có cấu trúc phân lớp (xem **Hình 1**). Chúng được bao quanh bởi một lớp khí quyển rất mỏng, bên dưới là lớp vỏ ngoài và lõi bên trong, nơi tính chất vật chất trở nên ngày càng kỳ lạ khi tiến gần đến tâm sao. Một số NSs có thể quay hàng trăm vòng mỗi giây, và nếu phân bố khối lượng của chúng chỉ cần lệch đối xứng một chút, sự không hoàn hảo này có thể khiến chúng phát ra CWS yếu và tuần hoàn — những tín hiệu mà cho đến nay vẫn chưa được phát hiện.

NSs sở hữu từ trường cực kỳ mạnh, lớn hơn từ 100 triệu đến một triệu tỷ lần so với từ trường của Trái Đất. Chính từ trường này tạo ra các chùm bức xạ điện từ (xem **Hình 2**) trên một dải tần số rất rộng, từ sóng vô tuyến đến tia X và tia gamma.



Hình 2. Minh họa về một pulsar cho thấy sao neutron đang quay cùng với các chùm bức xạ điện từ phát ra, làm nổi bật sự xuất hiện tuần hoàn của các xung tín hiệu tại kính thiên văn. Nguồn ảnh: Joeri van Leeuwen, giấy phép: [CC-BY-AS](#).



Hình 1. Sơ đồ minh họa cấu trúc bên trong phân lớp của một sao neutron. Nguồn: NASA GSFC. (Xem thêm trong [bài tổng quan](#).)

Khi ngôi sao quay, các chùm bức xạ này quét qua không gian như một ngọn hải đăng vũ trụ, tạo ra các xung tín hiệu đều đặn mỗi khi chúng đi qua đường ngắm của chúng ta trên Trái Đất. Các quan sát pulsar bằng nhiều đài quan sát điện từ (EM) khác nhau cung cấp cho chúng ta những phép đo rất chính xác về vị trí của pulsar trên bầu trời, tần số quay, cũng như sự tiến hóa theo thời gian của các tham số mô tả hành vi của chúng (gọi là “spin-down” – sự suy giảm tốc độ quay). Từ các quan sát EM này, chúng ta cũng có thể xác định và mô tả chuyển động quỹ đạo của pulsar nếu nó nằm trong một hệ sao đôi. Những hiểu biết chi tiết này khiến pulsar trở thành mục tiêu lý tưởng cho các phép tìm kiếm sóng hấp dẫn liên tục (CWs), vì chúng cho phép các nhà khoa học tập trung vào những dải tần số cụ thể nơi các tín hiệu như vậy được kỳ vọng sẽ xuất hiện.

Việc phát hiện được các tín hiệu này sẽ đánh dấu một bước đột phá lớn, cho phép các nhà khoa học thăm dò cấu trúc bên trong của NSs và khám phá những hiểu biết mới về vật chất trong các điều kiện cực đoan.

TÌM HIỂU THÊM:

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



Trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung vào 39 [pulsars](#) đã biết (xem **Hình 3**), nhằm tìm kiếm các tín hiệu CWs rất yếu của chúng.

CHÚNG TA TÌM KIẾM TÍN HIỆU CW NHƯ THẾ NÀO?

Nói chung, chúng ta phải điều chỉnh phương pháp tìm kiếm tùy theo cơ chế phát xạ được giả định, hoặc theo độ chính xác mà ta biết các tham số của tín hiệu CW. Trong nghiên cứu này, chúng tôi áp dụng một phương pháp gọi là tìm kiếm dải hẹp, cho phép khảo sát một dải tần số nhỏ, đồng thời được thiết kế để tính đến các sai lệch tiềm tàng giữa EM và tín hiệu CW. Thực vậy, một số mô hình dự đoán rằng lớp vỏ ngoài của sao neutron (xem **Hình 1**) — vốn là nguồn phát xạ điện từ chính — có thể quay chậm hơn lõi, tức là có vận tốc góc hơi khác biệt. Trong kịch bản này, với các tìm kiếm dải hẹp, chúng tôi tìm kiếm các biến dạng của lõi do từ trường mạnh bên trong sao neutron gây ra.

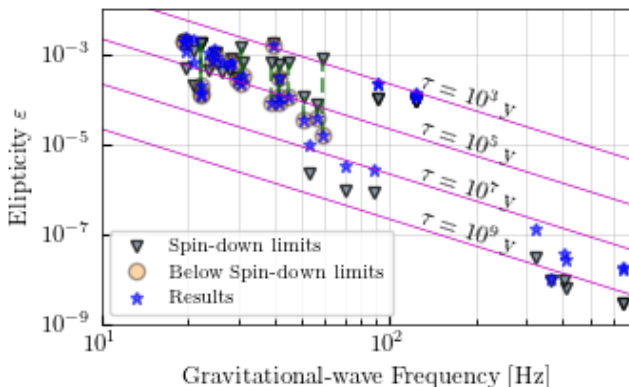
Cũng có thể xảy ra trường hợp EM bị nhiễu, khiến chúng ta không thể xác định chính xác sự tiến hóa tần số theo thời gian của pulsar. Do đó, nếu không được tính đến cẩn thận, các yếu tố này sẽ làm giảm khả năng phát hiện tín hiệu.

CHÚNG TA ĐÃ TÌM THẤY GÌ?

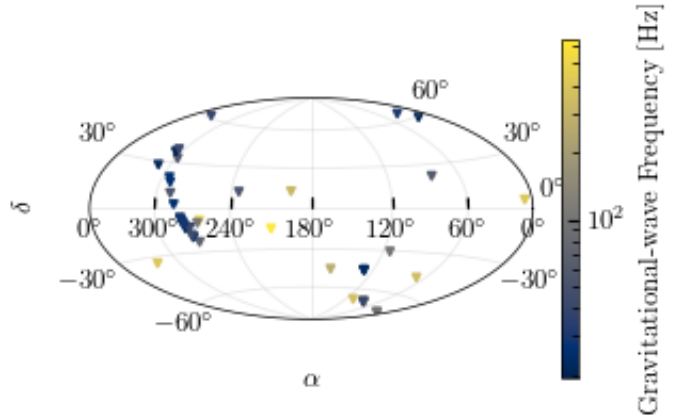
Thật không may, chúng tôi không phát hiện được tín hiệu nào từ các đối tượng mục tiêu khi sử dụng dữ liệu O4ab thu được từ hai đài quan sát [LIGO Hanford](#) và [LIGO Livingston](#).

Độ biến dạng của các sao neutron được đặc trưng bởi một tham số gọi là “**độ dẹt**”, và việc không phát hiện CWs trong O4ab đồng nghĩa với việc độ dẹt của chúng phải nhỏ hơn các giá trị ngưỡng gọi là “**giới hạn trên**” (xem **Hình 4**). Nói cách khác, các nhà khoa học hiện đã có ước lượng chính xác hơn về mức biến dạng tối đa mà các pulsar này có thể có, ngay cả khi các biến dạng đó quá nhỏ để tạo ra tín hiệu có thể phát hiện.

Các kết quả trong **Hình 4** được so sánh với cái gọi là **giới hạn spin-down**, tức là biên độ tối đa về mặt lý thuyết cho từng ngôi sao. Đối với hơn một nửa số đối tượng, chúng tôi thu được giới hạn trên thấp hơn giới hạn spin-down, qua đó ràng buộc phần năng lượng bị mất do phát xạ CWs. Giới hạn chặt chẽ nhất về độ dẹt của NS được tìm thấy đối với J0711-6830 (với tần số CW dự kiến khoảng 364 Hz), tương ứng với độ biến dạng chỉ nhỏ hơn khoảng 100 [microns](#) (1 micromet = 10⁻⁶ mét) đối với một sao có bán kính 10 km. Những giới hạn này cũng kéo theo giới hạn trên về năng lượng phát ra dưới dạng CWs: ví dụ, trong trường hợp [Crab pulsar](#) (khoảng 60 Hz), chúng tôi thấy rằng ngôi sao này mất nhiều nhất chỉ khoảng 0,04% năng lượng của nó thông qua phát xạ sóng hấp dẫn liên tục!



Hình 4. (Hình 6 trong bài báo) Các dấu sao: biểu thị giới hạn trên thực nghiệm của độ dẹt (ellipticity) cho từng pulsar, theo tần số CW dự kiến. ác tam giác: biểu thị giới hạn trên lý thuyết của độ dẹt, trong giả thiết rằng toàn bộ sự [suy giảm tốc độ quay \(spin-down\)](#) của pulsar là do phát xạ sóng hấp dẫn liên tục. Các đường màu tím: biểu diễn các pulsar có cùng độ tuổi đặc trưng (τ trong hình); nếu chúng mất năng lượng thông qua phát xạ sóng hấp dẫn, thì chúng sẽ nằm gần cùng một đường.



Hình 3. (Hình 1 trong bài báo): Vị trí trên bầu trời theo [toạ độ xích đạo](#) của các đối tượng được phân tích.

Mặc dù chúng tôi không phát hiện được sóng hấp dẫn trong phép tìm kiếm này, nhưng chúng tôi đã cải thiện các giới hạn trên trước đây nhờ thời gian thu thập dữ liệu dài hơn và những nâng cấp của các máy dò. Nhìn chung, đây là một kết quả quan trọng, vì nó đặt ra các ràng buộc chặt chẽ hơn đối với các lý thuyết mô tả sao neutron, đồng thời giúp chúng ta tiến gần hơn đến việc hiểu một cách toàn diện các quá trình vật lý phức tạp bên trong những thiên thể này.

TÌM HIỂU THÊM:

Truy cập các trang web của chúng tôi:

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

Đọc bản tiền ấn phẩm miễn phí của toàn bộ bài báo khoa học [tại đây](#) hoặc arxiv.

Đọc bài giới thiệu về sóng hấp dẫn liên tục [tại đây](#).