

TÌM KIẾM SÓNG HẤP DẪN LIÊN TỤC TỪ CÁC TÀN DƯ SIÊU TẦN TINH TRONG DỮ LIỆU O4A BAN ĐẦU

Các sao neutron (NSs) là một trong những thiên thể kỳ lạ nhất trong Vũ trụ. Chúng được hình thành khi các sao khối lượng lớn kết thúc vòng đời bằng những vụ nổ mạnh mẽ gọi là [siêu tân tinh suy sụp lõi](#). Những vụ nổ này xé toạc ngôi sao, để lại một tinh vân khuếch tán tuyệt đẹp gọi là tàn dư siêu tân tinh (xem [Hình 1](#)). Khi còn trẻ, NS nằm gần trung tâm của tàn dư [siêu tân tinh](#), và theo thời gian sẽ dần dịch chuyển ra xa khi tàn dư này giãn nở vào môi trường liên sao.

Sao neutron là những thiên thể cực kỳ đặc, với [khối lượng lớn hơn Mặt Trời](#) nhưng bị nén vào kích thước chỉ cỡ một thành phố. Thành phần cấu tạo và các cơ chế vật lý chi phối chúng vẫn là một trong những câu hỏi mở hấp dẫn nhất của khoa học, thu hút sự quan tâm của vật lý thiên văn, vật lý hạt nhân, vật lý hạt và [vật lý chất rắn](#). Chúng cũng là những nam châm mạnh nhất trong Vũ trụ. Sao neutron có thể quay với tốc độ đáng kinh ngạc, có trường hợp quay hàng trăm vòng mỗi giây. Chúng thường được phát hiện dưới dạng [“pulsars”](#), khi các xung ánh sáng phát ra quét qua đường ngắm tới Trái Đất một hoặc hai lần trong mỗi vòng quay quanh trục của chúng. Tuy nhiên, không phải tất cả NSs đều được phát hiện như pulsars, và cấu trúc bên trong của chúng phần lớn vẫn nằm ngoài khả năng quan sát, ngay cả với các kính thiên văn [điện từ](#) nhạy nhất trên mặt đất và trong không gian. [Sóng hấp dẫn liên tục](#) (CWs) mang lại một công cụ mới, giúp phát hiện các pulsar bị bỏ sót và thăm dò cấu trúc nội tại kỳ lạ của chúng. CWs là những gợn sóng ổn định, tồn tại lâu dài trong không-thời gian mà một NS có thể phát ra khi nó quay.



Hình 1. Trái: Tàn dư trẻ nhất trong danh sách mục tiêu của chúng tôi, SN 1987A, nằm trong Đám Mây Magellan Lớn cách khoảng 50 kpc, được quan sát bởi kính thiên văn James Webb (JWST) với thiết bị NIRCam. JWST đã cung cấp bằng chứng ngày càng rõ ràng về sự tồn tại của một sao neutron gần trung tâm, đang làm nóng vật chất bên trong tàn dư. *Nguồn ảnh: NASA, ESA, CSA, Mikako Matsuura (ĐH Cardiff), Richard Arendt (NASA-GSFC, UMB), Claes Fransson (ĐH Stockholm), Josefin Larsson (KTH); Xử lý ảnh: Alyssa Pagan (STScI).* **Phải:** Tàn dư siêu tân tinh Cassiopeia A, một trong những tàn dư siêu tân tinh suy sụp lõi trẻ và sáng nhất trong Ngân Hà, được quan sát bởi Đài quan sát tia X Chandra. Chấm trắng ở trung tâm là một nguồn tia X dạng điểm, được cho là sao neutron còn sót lại sau vụ nổ, còn được gọi là “Central Compact Object” (vật thể cô đặc trung tâm). *Nguồn ảnh: Tia X: NASA/CXC/Meiji Univ./T. Sato et al.; Xử lý ảnh: NASA/CXC/SAO/N. Wolk.*

Các tín hiệu này xuất phát từ những biến dạng rất nhỏ hay các “lumps” trên một sao neutron quay không hoàn toàn đối xứng; độ lệch khỏi tính đối xứng càng lớn thì [biên độ sóng hấp dẫn](#) càng lớn (tức là tín hiệu mạnh hơn). Chúng ta gọi một ngôi sao như vậy là “tam trực” vì nó có dạng như một elip ba chiều, tương tự một quả bóng bầu dục hơi bị biến dạng sau khi đã được sử dụng qua nhiều trận. CWs được kỳ vọng sẽ phát ra ở tần số gấp đôi tần số quay của ngôi sao; do đó, việc phát hiện chúng sẽ giúp hé lộ những pulsar chưa từng được quan sát trước đây.

Đối với các máy dò [LIGO](#), [Virgo](#), và [KAGRA](#), NSs nằm trong các tàn dư siêu tân tinh trẻ là những mục tiêu quan trọng trong việc tìm kiếm [CWs](#). Trong một bài báo gần đây, chúng tôi đã tìm kiếm CWs từ 15 tàn dư siêu tân tinh có độ tuổi từ trẻ đến trung bình (trong đó 14 nằm trong Ngân Hà và 1 nằm ở thiên hà lân cận – Đám Mây Magellan Lớn) sử dụng 8 tháng dữ liệu từ tháng 5/2023 đến tháng 1/2024. Khoảng thời gian này tương ứng với phần đầu của [chu kỳ quan sát](#) thứ tư của các máy dò tiên tiến, thường được gọi ngắn gọn là O4a.

Mặc dù các [xung](#) sóng hấp dẫn ngắn hiện nay đã được quan sát thường xuyên, CWs lại khó phát hiện hơn nhiều, vì chúng được dự đoán là yếu hơn rất nhiều so với các tín hiệu từ va chạm sao neutron hay lỗ đen, thường yếu hơn vài bậc độ lớn. SN εύ phát hiện được, đó sẽ là một bước đột phá lớn, vì chúng sẽ giúp chúng ta hiểu rõ hình dạng của sao neutron, cũng như tính chất của vật chất dưới các điều kiện mật độ và từ trường cực đoan nhất trong Vũ trụ. Đồng thời, chúng còn cho phép phát hiện những pulsar chưa từng được quan sát trước đây. Để phát hiện CWs, chúng ta cần kiên nhẫn, thu thập dữ liệu trong thời gian dài và tìm kiếm những biến thiên rất nhỏ nhưng bền bỉ, phù hợp với mô hình tín hiệu. Ngoài ra, việc lựa chọn các mục tiêu quan sát tối ưu cũng đóng vai trò rất quan trọng.

Có rất nhiều tàn dư siêu tân tinh trong Ngân Hà của chúng ta. Chúng tôi đã chọn 15 tàn dư siêu tân tinh có độ tuổi từ rất trẻ (khoảng 40 năm, như [SN 1987A](#)) đến vài chục nghìn năm, và có khả năng chứa các sao neutron trẻ mà tần số quay của chúng vẫn chưa được xác định.

Độ tuổi tương đối trẻ của các tàn dư này cho thấy rằng các ứng viên NS có khả năng có những biến dạng không đồng đều cao hơn so với NSs. Nguyên nhân là do chúng chưa có đủ thời gian để “ổn định”, khiến các biến dạng này chưa bị làm trơn đi. NSs trẻ cũng quay nhanh hơn, từ đó tạo ra biên độ sóng hấp dẫn lớn hơn. Tuy nhiên, vì chúng ta chưa biết chính xác tốc độ quay, nên cần phải tìm kiếm trên một dải rộng các tần số CW khả dĩ, chủ yếu được xác định bởi tuổi của đối tượng và độ nhạy của máy dò. NSs trẻ còn mất dần năng lượng quay và chậm lại theo thời gian (gọi là spin-down), vì vậy chúng ta cũng phải tìm kiếm trên một dải các giá trị spin-down có thể có. Cuối cùng, các quan sát đối với NSs cô lập (những đối tượng mà tần số quay đã được đo) cho thấy có thể tồn tại những dao động nhỏ, mang tính ngẫu nhiên trong tần số quay.

TÌM HIỂU THÊM:

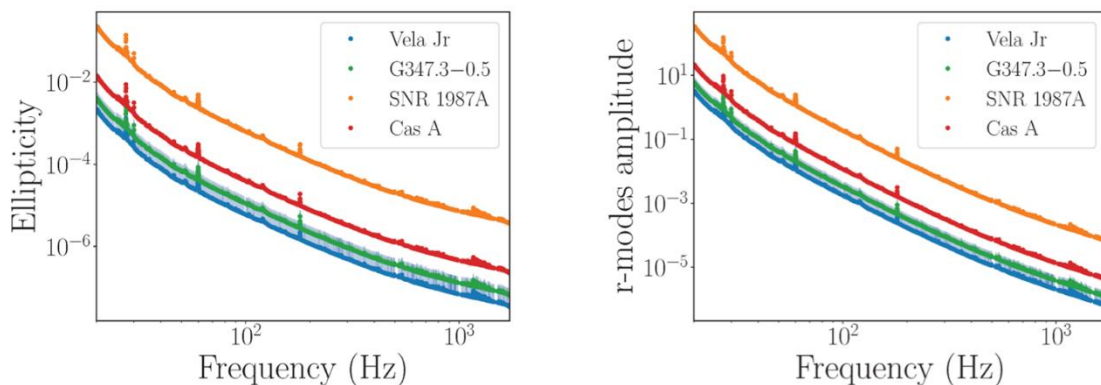
Truy cập www.ligo.org
trang web: www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



Trong một phép tìm kiếm thông thường (gọi là tìm kiếm “coherent” – kết hợp toàn bộ dữ liệu), chúng ta xây dựng các mẫu tín hiệu dự đoán dạng tín hiệu trong suốt thời gian quan sát và so sánh chúng với dữ liệu thực. Nếu sử dụng đúng mẫu tín hiệu và số lượng không quá lớn, phương pháp coherent có độ nhạy rất cao. Tuy nhiên, trong trường hợp này, chúng tôi có 15 đối tượng mục tiêu mà chưa biết tần số quay, và tần số này còn có thể thay đổi theo thời gian hoặc xuất hiện dao động ngẫu nhiên nhỏ. Do đó, một tìm kiếm coherent sẽ trở nên quá tốn kém về mặt tính toán. Thay vào đó, chúng tôi sử dụng bốn phương pháp “semi-coherent” (bán kết hợp) để tìm kiếm hiệu quả trong dữ liệu O4a. Phương pháp này thực hiện tìm kiếm coherent trên các đoạn dữ liệu nhỏ, rồi kết hợp các kết quả lại để bao phủ toàn bộ thời gian quan sát. Vì mỗi đoạn nhỏ cần ít mẫu hơn, nên phương pháp semi-coherent tiết kiệm tài nguyên tính toán hơn nhiều. Ngoài ra, chúng tôi còn sử dụng một pipeline thứ năm gọi là ‘cross-correlation’ (tương quan chéo), trong đó kết hợp và so sánh dữ liệu đã được “gấp” (folded) từ hai máy dò LIGO tại Hanford và Livingston trong dải tần 20–1726 Hz. Pipeline này sử dụng một cách tiếp cận không dựa trên mô hình cụ thể (unmodeled), tức là không giả định trước dạng tín hiệu, và được áp dụng cho dữ liệu từ bốn tần dư siêu tần tinh thể nổi tiếng, bao gồm SN 1987A và Cassiopeia A (xem **Hình 1**).

Unfortunately, none of the searches report any CW signal. Thật không may, không có phép tìm kiếm nào phát hiện được tín hiệu CW. Tuy nhiên, không phát hiện không có nghĩa là không có kết quả. Chúng tôi có thể ước lượng **độ nhạy** của phép tìm kiếm và từ đó suy ra các đặc tính của những sao neutron đã khảo sát. Ví dụ, bằng cách đặt giới hạn trên cho cường độ tín hiệu, chúng ta có thể suy ra giới hạn trên cho mức độ biến dạng của sao neutron. TĐ bắt đối xứng của NS được đo bằng một tham số ký hiệu là ϵ (**độ dẹt**). Các mô hình khác nhau về NSs đưa ra các giá trị giới hạn khác nhau cho ϵ , nhưng phần lớn đều dự đoán $\epsilon < 10^{-6}$. Trong **Hình 2 (biểu đồ bên trái)**, chúng tôi trình bày giới hạn trên của độ dẹt cho một số đối tượng. Trục dọc là **giới hạn trên** 95% của ϵ thu được từ phép tìm kiếm (tức là chúng ta có khoảng 95% độ tin cậy rằng giá trị thực của ϵ không vượt quá mức này). Trục ngang là tần số sóng hấp dẫn (GW), yếu tố ảnh hưởng đến độ dẹt theo hai cách. Thứ nhất, với cùng một tần số, sao có độ dẹt lớn hơn sẽ phát tín hiệu mạnh hơn. Thứ hai, độ nhạy của các máy dò LIGO, Virgo và KAGRA phụ thuộc vào tần số, nên giới hạn trên của tín hiệu cũng thay đổi theo dải tần. Kết quả cho thấy chúng tôi đã giới hạn được độ dẹt xuống dưới mức tối đa lý thuyết ($\epsilon < 10^{-6}$). Khi các giới hạn này tiếp tục được cải thiện, chúng ta sẽ có thể loại trừ dần các mô hình vật lý chưa phù hợp trong việc mô tả tính chất của NS.

NSs tam trục không phải là cơ chế duy nhất có thể tạo CWs. Sự quay của sao còn có thể kích thích dao động **r-mode** bên trong NS, với biên độ dao động được đặc trưng bởi tham số α . Giới hạn lý thuyết trên của biên độ này là $\alpha < 10^{-3}$. Từ giới hạn trên của strain trong trường hợp NS có độ dẹt, chúng ta có thể chuyển đổi sang giới hạn trên của α , như được thể hiện trong **Hình 2 (biểu đồ bên phải)**. Trục dọc là giới hạn trên 95% của α và trục ngang là tần số sóng hấp dẫn (Hz).



Hình 2: Các 95% **giới hạn trên** của **độ dẹt** ϵ (left) và dao động **r-mode** (bên phải) đối với một số phân tích và đối tượng trong bài báo. Trục ngang là tần số sóng hấp dẫn mà tại đó ta có thể phát hiện tín hiệu; Trục dọc là giới hạn trên 95% của ϵ (biểu đồ trái) hoặc biên độ r-mode (biểu đồ phải). Các đường cong màu: Xanh dương (Vela Jr), Xanh lá (G347.3-0.5), Cam (SNR 1987A), Đỏ (Cas A) biểu diễn giá trị nhỏ nhất của độ dẹt (bên trái) hoặc biên độ dao động (bên phải) mà chúng tôi có thể phát hiện. Đây cũng chính là giới hạn trên cho mức độ biến dạng hoặc cường độ r-mode của sao neutron: Nếu sao neutron dẹt hơn mức này, chúng tôi có khả năng đã phát hiện được. Nếu r-mode mạnh hơn mức này, chúng tôi cũng đã quan sát thấy. Trong hình này, chúng tôi sử dụng kết quả từ pipeline thứ năm dựa trên phương pháp tương quan chéo (đã mô tả ở trên), một phương pháp mới kể từ lần tìm kiếm O3a, và được áp dụng cho tần dư siêu tần tinh thể nổi tiếng SN 1987A.

Tóm lại, chúng tôi không quan sát thấy tín hiệu CW từ tần dư SN 1987A, cũng như từ bất kỳ tần dư nào khác trong nghiên cứu này. Tuy nhiên, việc sử dụng năm phương pháp tìm kiếm bổ sung lẫn nhau trên dữ liệu O4a đã cho phép chúng tôi đặt ra các giới hạn chặt chẽ nhất từ trước đến nay về cường độ của CWs, cải thiện so với kết quả O3a trước đó và nâng độ nhạy đối với CWs từ NSs lên một mức mới.

Giới hạn chặt chẽ nhất đạt được đối với tần dư siêu tần tinh thể nổi tiếng gần chúng ta là Vela Jr, giúp chúng ta hiểu rõ hơn mức độ “gồ ghề” của NS cũng như độ mạnh của các dao động nội tại (r-modes). Cụ thể, các “chỗ gồ” (đối với Vela Jr) phải nhỏ hơn khoảng một phần mười triệu, và các r-mode nhỏ hơn khoảng một phần một trăm nghìn ở các tần số trên 400 Hz. Những kết quả này đại diện cho các phép tìm kiếm dải tần rộng nhạy nhất từ trước đến nay đối với sóng hấp dẫn liên tục phát ra từ các tần dư siêu tần tinh.

Khi việc thu thập dữ liệu tiếp tục và các phương pháp cũng như độ nhạy được cải thiện, xác suất thực hiện được lần phát hiện đầu tiên sẽ ngày càng tăng. Trong thời gian chờ đợi, chúng tôi sẽ tiếp tục đặt ra các ràng buộc chặt chẽ hơn cho các mô hình vật lý dựa trên kết quả không phát hiện, đồng thời không ngừng nâng cao độ nhạy của các phép tìm kiếm.

TÌM HIỂU THÊM:

Truy cập trang web:

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

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

Đọc phần giới thiệu về sóng hấp dẫn [tại đây](#).