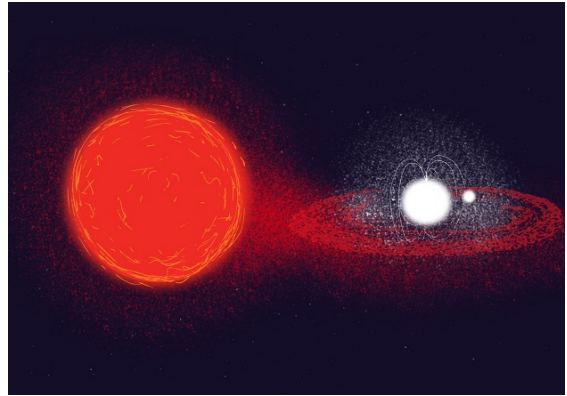


ΧΩΡΙΣ ΒΟΥΝΑ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΝ ΟΙ MILLISECOND ΠΑΛΣΑΡ

Βαρυτικά κύματα (BK) από συστήματα διπλών μαύρων τρυπών και διπλών αστέρων νετρονίων ευθύνονται για τις νέες ανακαλύψεις των ανιχνευτών βαρυτικών κυμάτων. Ωστόσο, τα συγχωνευόμενα διπλά συστήματα δεν είναι οι μόνες πηγές παραγωγής βαρυτικών κυμάτων: μεταξύ άλλων πολλά υποσχόμενων πηγών συμπεριλαμβάνονται και οι περιστρεφόμενοι αστέρες νετρονίων. Είναι γνωστό πως τα σώματα αυτά εκτελούν γρήγορη περιστροφική κίνηση η οποία σταδιακά επιβραδύνεται, εν μέρει λόγω της εκπομπής BK. Το λεγόμενο "spin-down" είναι εξαιρετικά αργό, ώστε η συχνότητα περιστροφής να μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν σταθερή. Επομένως, αναφερόμαστε στα BK αυτά ως "συνεχή κύματα": τα BK εκπέμπονται συνεχώς, και σε σχεδόν σταθερή συχνότητα. Αυστηρά ανώτατα όρια έχουν ήδη τεθεί στο πλάτος BK από ταχέως περιστρεφόμενους αστέρες νετρονίων σε προηγούμενες περιόδους παρατήρησης. Μια καλλιτεχνική αναπαράσταση ενός αστέρα νετρονίων δίνεται στην εικόνα 1.



Εικόνα 1: Καλλιτεχνική αναπαράσταση του millisecond πάλσαρ PSR J1023+0038 (λευκό σώμα στα δεξιά με μαγνητικές δυναμικές γραμμές). Εξάγει ύλη από το συνοδό του αστέρα (κόκκινο σώμα στα αριστερά) μέσω ενός δίσκου προσάυξεσης (κόκκινος δίσκος στα δεξιά).
Πηγή: European Space Agency (ESA).

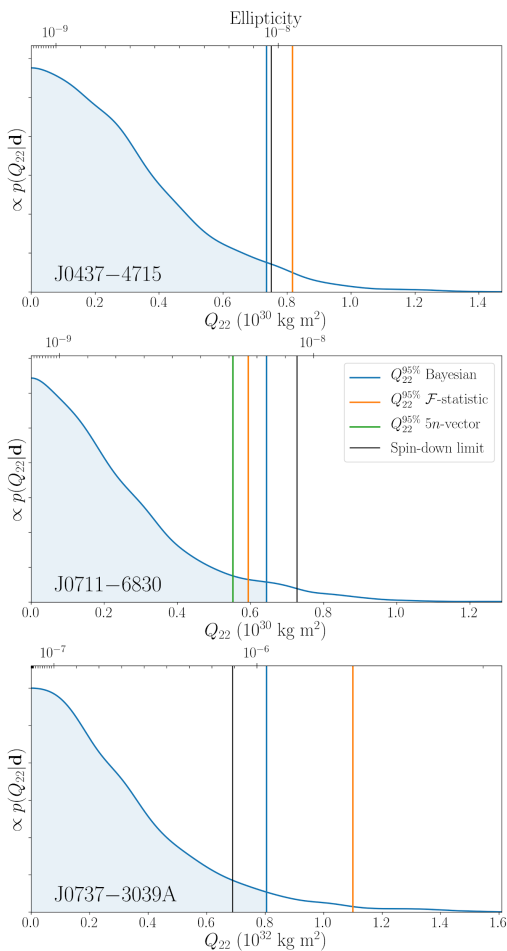
Οι πάλσαρ είναι περιστρεφόμενοι αστέρες νετρονίων και αποτελούν εξαιρετικά ακριβή ρολόγια: παρατηρούμε τους παλμούς ραδιοκυμάτων και ακτίνων X που εκπέμπουν να φτάνουν σε μας με εκπληκτική τακτικότητα. Μετρώντας τους χρόνους άφιξης των παλμών αυτών, μπορούμε να παρακολουθήσουμε την ακριβή περιστροφική κίνηση των πάλσαρ. Όμως αυτό που διαφεύγει της κατανόησής μας είναι οι φυσικοί μηχανισμοί που ευθύνονται για μεταβολές στη συχνότητά τους και στην επιβράδυσή τους, οι οποίες προκαλούν μικρές μεταβολές στους τακτικούς χρόνους άφιξης των παλμών. Τα βαρυτικά κύματα μπορούν να μας βοηθήσουν να ερμηνεύσουμε τις αλλαγές αυτές.

Για να παράξει BK ένας πάλσαρ μέσω της περιστροφής του, χρειάζεται να είναι ασύμμετρος ως προς τον άξονα περιστροφής του. Η ασυμμετρία αυτή θα μπορούσε να είναι απλά ένα "βουναλάκι" που να προεξέχει στην επιφάνειά του. Υπάρχουν πολλά πιθανά αίτια για τέτοιες παραμορφώσεις: θα μπορούσαν να είναι "παγωμένες" μέσα στο φλοιό ή τον πυρήνα του αστέρα μετά τη δημιουργία του σε έναν υπερκαινοφανή (supernova), θα μπορούσαν να σχηματιστούν από υλικό που πέφτει πάνω στον αστέρα, ή να παραχθούν και να συντηρηθούν μέσω των πανίσχυρων μαγνητικών πεδίων του αστέρα. Τα βαρυτικά κύματα που εκπέμπονται θα έχουν συχνότητα ίση ή διπλάσια της συχνότητας περιστροφής του αστέρα, ανάλογα με το μηχανισμό παραγωγής τους. Η πρώτη περίπτωση συμβαίνει όταν ο αστέρας νετρονίων ταλαντώνεται κατά την περιστροφή του, ή όταν έχει έναν υπεραγώγιμο πυρήνα, η κίνηση του οποίου δεν είναι απόλυτα "κλειδωμένη" σε εκείνη του φλοιού, προκαλώντας τις αντίστοιχες κατανομές εσωτερικής πυκνότητας να μην ευθυγραμμίζονται. Η δεύτερη περίπτωση προκαλείται από ασύμμετρες παραμορφώσεις.

Οι μέθοδοι μας για την ανεύρεση των BK αυτών δε στοχεύουν σε ένα συγκεκριμένο μηχανισμό παραγωγής. Αντίθετα, προσπαθούν να ανιχνεύσουν οποιοδήποτε είδους συνεχές σήμα και στη συνέχεια να το καταλογίσουν σε συγκεκριμένη διεργασία. Έχοντας παρατηρήσεις αστρονόμων σε

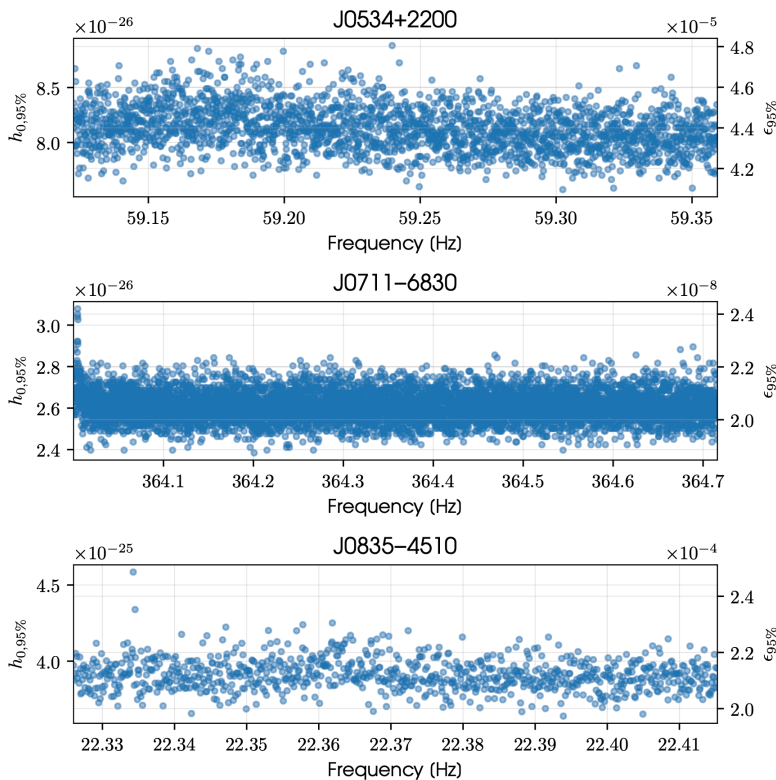
[ραδιοκύματα](#), [ακτίνες X](#), και [ακτίνες γ](#), για πολλούς πάλσαρ γνωρίζουμε τη θέση τους στον ουρανό, τη συχνότητα και την επιβράδυνση της περιστροφής, καθώς και το ρυθμό μεταβολής της επιβράδυνσης αυτής, στοιχεία τα οποία βοηθούν σημαντικά στην αναζήτηση τέτοιων σήματων ΒΚ. Για αυτούς τους πάλσαρ, ένας σημαντικός στόχος μας είναι να ξεπεράσουμε τα "όριο spin-down", δηλαδή να μπορέσουμε να μετρήσουμε ένα πλάτος βαρυτικού κύματος μικρότερο από αυτό που προβλέπεται αν υποθέσουμε ότι ολόκληρη η επιβράδυνση περιστροφής του αστέρα οφείλεται στην παραγωγή ΒΚ. Μόλις μια μέθοδος ανεύρεσης φτάσει αυτό το επίπεδο ευαισθησίας, αποκτούμε πρόσβαση σε εύλογους μηχανισμούς εκπομπής και έχουμε πλέον τη δυνατότητα να ανιχνεύσουμε ΒΚ.

Η παρούσα μελέτη χρησιμοποιεί δεδομένα από την πρώτη, δεύτερη και τρίτη περίοδο παρατήρησης με τους ανιχνευτές Advanced LIGO και Virgo, ώστε να θέσει όρια στην εκπομπή ΒΚ από πέντε γνωστούς πάλσαρ, υποθέτοντας ότι τα παραγόμενα ΒΚ έχουν συχνότητα ίση ή διπλάσια της συχνότητας περιστροφής του κάθε αστέρα. Παρόλο που δεν ανιχνεύσαμε κανένα τέτοιο σήμα, οι ανιχνευτές μας έχουν αρκετά καλή ευαισθησία ώστε να σπρώξουν για πρώτη φορά τη μέτρηση χαμηλότερα από το όριο spin-down, για δύο από τους πάλσαρ. Αξίζει να σημειωθεί ότι πρόκειται για "millisecond πάλσαρ", που περιστρέφονται δηλαδή με μεγάλη ταχύτητα. Και καθώς η εκπομπή ΒΚ είναι πιο αποδοτική σε υψηλότερες συχνότητες, οι ταχέως περιστρεφόμενοι αυτοί αστέρες νετρονίων δε χρειάζονται μεγάλες παραμορφώσεις για να παράξουν ανιχνεύσιμα ΒΚ. Και όντως, βρήκαμε ότι ο ισημερινός του πάλσαρ J0711-6830, σε απόσταση περίπου 358 ετών φωτός, είναι ένας σχεδόν τέλειος κύκλος με τις πιθανές παραμορφώσεις να μην ξεπερνούν το πάχος μιας ανθρώπινης τρίχας!



Τα ανώτατα αυτά όρια δίνονται σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις εικόνες 2 και 3. Για πιο αργούς πάλσαρ, όπως ο Crab και ο Vela, απαιτούνται πιο σημαντικές παραμορφώσεις για να παράξουν ένα ανιχνεύσιμο σήμα. Μικρές παραμορφώσεις είναι πιο πιθανό να σχηματιστούν και να επιβιώσουν απέναντι στην εξαιρετικά ισχυρή βαρύτητα ενός αστέρα νετρονίων, σε σχέση με μεγαλύτερες παραμορφώσεις, επομένως η υπέρβαση του ορίου spin-down αποτελεί μια σημαντική στιγμή για την αστροφυσική βαρυτικών κυμάτων.

Εικόνα 2: Ανώτατα όρια της τετραπολικής ροπής μάζας Q_{22} και ελλειπτικότητας (βαθμός παραμόρφωσης) τριών ανακυκλωμένων πάλσαρ, βάσει των νέων παρατηρησιακών δεδομένων. Οι καμπύλες είναι εκ των υστέρων κατανομές πιθανότητας κατά Bayes, ώστε η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη μεταξύ δύο τιμών τετραπολικής ροπής ισούται με την πιθανότητα η πραγματική τιμή να βρίσκεται εντός του διαστήματος αυτού, δοθέντων των δεδομένων και των παραδοχών του μοντέλου. Οι κατακόρυφες μαύρες γραμμές αντιστοιχούν στα όρια spin-down για κάθε πάλσαρ, ενώ οι χρωματιστές κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν σε ανώτατο όριο με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% για την τετραπολική ροπή ή την ελλειπτικότητα. Όταν οι μετρήσεις των ανωτάτων ορίων (χρωματιστές κατακόρυφες) βρίσκονται στα αριστερά των αντίστοιχων μαύρων, λέμε ότι το όριο spin-down έχει ξεπεραστεί. Για τον πάλσαρ J0711-6830, που βρίσκεται 358 έτη φωτός μακριά, η παραμόρφωση του ισημερινού του σε σχέση με έναν τέλειο κύκλο περιορίζεται να είναι μικρότερη από το πάχος μιας ανθρώπινης τρίχας!



Εικόνα 3: Ανώτατα όρια σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% για το πλάτος βαρυτικών κυμάτων h_0 και την ελλειπτικότητα ϵ τριών πάλσαρ που εξετάστηκαν στη στενοζωνική ανάλυση. Από πάνω προς τα κάτω δείχνουμε τα ανώτατα όρια για τον Crab, το millisecond πάλσαρ για τον οποίο το όριο spin-down ξεπεράστηκε, και τον Vela.

Μάθετε περισσότερα

- Επισκεφθείτε την ιστοσελίδα μας: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu
- Διαβάστε το πλήρες επιστημονικό άρθρο [εδώ](#).
- Ένα ωραίο περιληπτικό [άρθρο](#) πάνω στους πάλσαρ, του Michael Kramer.
- Η σελίδα "[Imagine the Universe!](#)" της NASA για τους πάλσαρ.
- Σύνδεσμος για την κεντρική σελίδα περίληψης [εδώ](#).

Visit our websites:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>



Γλωσσάριο

LIGO: Laser Interferometric Gravitational-Wave Observatory (LIGO) [Παρατηρητήριο Βαρυτικών Κυμάτων με Συμβολομετρία Λέιζερ] είναι ένα ζεύγος ανιχνευτών βαρυτικών κυμάτων εγκατεστημένο στις ΗΠΑ. Ο ένας βρίσκεται κοντά στο Livingston της Louisiana, και ο άλλος κοντά στο Hanford της Washington. Και οι δύο ανιχνευτές είναι συμβολόμετρα λέιζερ μεγάλης κλίμακας, με δύο κάθετους βραχίονες μήκους 4 χλμ έκαστος, που προσπαθούν να μετρήσουν πιθανές σχετικές μεταβολές μεταξύ των δύο μηκών, που προκαλούνται από ένα διερχόμενο βαρυτικό κύμα.

Virgo: Ανιχνευτής βαρυτικών κυμάτων εγκατεστημένος κοντά στην Πίζα της Ιταλίας. Είναι επίσης ένα συμβολόμετρο λέιζερ, αλλά με βραχίονες μήκους 3 χλμ.

Ευαισθησία: Η ικανότητα ενός ανιχνευτή να ανιχνεύει ένα σήμα. Ανιχνευτές με χαμηλότερα επίπεδα θορύβου μπορούν να ανιχνεύουν πιο ασθενή σήματα, και επομένως λέμε ότι έχουν μεγαλύτερη (ή καλύτερη) ευαισθησία.

Spin-down: Οι πάλσαρ είναι περιστρεφόμενοι (οπτικά παλλόμενοι) αστέρες νετρονίων, των οποίων ο ρυθμός περιστροφής (γνωστός και ως spin) παρατηρείται μειούμενος με το χρόνο (ισοδύναμα με αύξηση της περιόδου περιστροφής).

Όριο spin-down: Η τιμή που παίρνει το πλάτος βαρυτικών κυμάτων από έναν πάλσαρ, υπό την παραδοχή ότι το σύνολο της κινητικής ενέργειας περιστροφής που χάνεται κατά την επιβράδυνση της περιστροφής του αστέρα μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε βαρυτική ακτινοβολία. Ο υπολογισμός της απαιτεί ακριβή γνώση της απόστασης του αστέρα, ενώ στην πραγματικότητα οι μετρήσεις αποστάσεων των πάλσαρ έχουν μια αβεβαιότητα κατά παράγοντα περίπου δύο. Ωστόσο, γνωρίζουμε ότι υπάρχουν άλλοι τρόποι με τους οποίους ένας πάλσαρ χάνει ενέργεια, ιδιαίτερα μέσω ακτινοβολίας μαγνητικού διπόλου, οπότε η τιμή αυτή είναι ένα ανώτατο όριο του αναμενόμενου βαρυτικού σήματος από τον αστέρα.

Περίοδος παρατήρησης: Μια χρονική περίοδος κατά την οποία ανιχνευτές βαρυτικών κυμάτων λαμβάνουν δεδομένα.

Τάση: σχετική μεταβολή στην απόσταση μεταξύ δύο σημείων μέτρησης λόγω της παραμόρφωσης του χωροχρόνου που προκαλείται από τη διέλευση ενός βαρυτικού κύματος. Οι τυπικές τιμές που λαμβάνει η τάση ακόμα και για τα πιο ισχυρά βαρυτικά κύματα που φθάνουν στη Γη είναι πολύ μικρές -- συνήθως μικρότερες του 10^{-21} .

Ανώτατο όριο: ο καθορισμός μιας ανώτατης τιμής την οποία μπορεί να λάβει μία ποσότητα, ώστε να εξακολουθεί να είναι συμβατή με τα διαθέσιμα δεδομένα. Εδώ, η ποσότητα που εξετάζουμε είναι η τετραπολική ροπή του αστέρα που μπορούμε να παρατηρήσουμε (αυτή σχετίζεται με το εγγενές πλάτος της τάσης βαρυτικών κυμάτων ενός συνεχούς σήματος που φτάνει στη Γη). Ορίζουμε το όριο σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, δηλ. βάσει των δεδομένων η τιμή της τετραπολικής ροπής είναι μικρότερη του ορίου αυτού με πιθανότητα 95%.

Millisecond πάλσαρ: ένας ταχέως περιστρεφόμενος πάλσαρ με περίοδο περιστροφής μικρότερη των 30 millisecond και με πολύ αργό ρυθμό επιβράδυνσης (spin-down).

Ανακυκλωμένος πάλσαρ: ένας πάλσαρ που, ακόμα και αν δεν περιστρέφεται αρκετά γρήγορα ώστε να κατηγοριοποιείται ως millisecond πάλσαρ, υπολογίζεται ότι απέκτησε την υψηλή ταχύτητα περιστροφής του απορροφώντας ύλη από έναν συνοδό αστέρα.