

GWTC-2: ΕΝΑΣ ΕΚΤΕΝΗΣ ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΜΕΝΩΝ ΒΑΡΥΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Παρουσιάζουμε έναν αναθεωρημένο κατάλογο (GWTC-2 ή αλλιώς “Gravitational-Wave Transient Catalog 2”) βαρυτικών κυμάτων που ανιχνεύθηκαν από τους [LIGO](#) και [Virgo](#) από την πρώτη παρατήρηση το 2015 έως το τέλος του Ο3α, του πρώτου μισού του τρίτου κύκλου παρατήρησης. Η περίοδος του Ο3α εκτείνεται από την 1η Απριλίου έως την 1η Οκτώβρη, 2019, και προσέθεσε 39 γεγονότα βαρυτικών κυμάτων στα 11 ήδη επιβεβαιωμένα του καταλόγου [GWTC-1](#), ανεβάζοντας το σύνολο των γεγονότων του GWTC-2 σε 50. Οι ανακαλύψεις του Ο3α καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος αστροφυσικών παραμέτρων και εκπροσωπούν πηγές συμβατές με συγχωνεύσεις διπλών συστημάτων, αποτελούμενων από δύο μαύρες τρύπες (BBH), δύο αστέρες νετρονίων (BNS), ή ενός αστέρα νετρονίων με μία μαύρη τρύπα (BNSBH).

Είναι αξιοσημείωτο ότι το Ο3α παρήγαγε περίπου τρεις φορές περισσότερες επιβεβαιωμένες ανιχνεύσεις βαρυτικών κυμάτων από τις δύο προηγούμενες περιόδους παρατήρησης (Ο1 και Ο2) μαζί. Επίσης, ο ανιχνευτής Virgo συμμετείχε μαζί με τους δύο ανιχνευτές LIGO κατά την πλήρη διάρκεια του Ο3α, με τουλάχιστον έναν ανιχνευτή σε λειτουργία παρατήρησης το 97% του χρόνου, και τουλάχιστον δύο το 82% του χρόνου περίπου. Η λίστα των εξαιρετικά ενδιαφέροντων γεγονότων του Ο3α περιλαμβάνει την ανίχνευση του δεύτερου βαρυτικού κύματος που είναι συμβατό με συγχώνευση διπλού συστήματος αστέρα νετρονίων, την πρώτη ανίχνευση γεγονότων με επιβεβαιωμένα άνισες μάζες, και ένα πολύ μαζικό διπλό σύστημα μαύρων τρυπών με ολική μάζα ίση με περίπου 150 φορές τη μάζα του Ήλιου. Στην περιλήψη αυτή, περιγράφουμε τις βελτιώσεις των LIGO και Virgo που έκαναν τις ανακαλύψεις αυτές δυνατές, καθώς και τη σημασία των γεγονότων αυτών στο επιστημονικό πεδίο της αστροφυσικής.

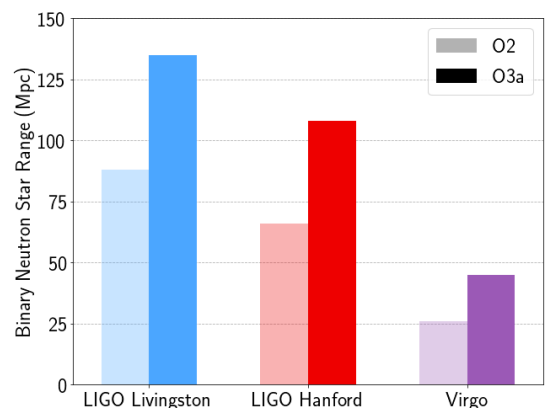
ΑΝΙΧΝΕΥΟΝΤΑΣ ΒΑΡΥΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Οι 39 ανακαλύψεις του Ο3α είναι απόρροια των αναβαθμίσεων στους ανιχνευτές LIGO και Virgo, της ενισχυμένης ποιότητας δεδομένων, και μιας πληθώρας μεθόδων αναζήτησης. Στις [πρόσφατες βελτιώσεις](#) των οργάνων για τη μείωση θορύβου και την αύξηση της ευαισθησίας περιλαμβάνονται πιο ισχυρά laser, νέα βελτιωμένα κάτοπτρα και καλύτερος έλεγχος του σκεδαζόμενου φωτός. Οι αλλαγές αυτές οδήγησαν τόσο στην αύξηση του εύρους των συχνοτήτων όσο και της εμβέλειας των τριών ανιχνευτών, επεκτείνοντας έτσι τη θέα μας στο Σύμπαν. Κατά μέσο όρο μεταξύ των τριών ανιχνευτών, η [μέση](#) εμβέλεια εντός της οποίας μπορούμε να παρατηρήσουμε μια συνήθη συγχώνευση αστέρων νετρονίων στο Ο3α αυξήθηκε κατά περίπου 63% σε σχέση με το Ο2, όπως φαίνεται στην [Εικόνα 1](#).

Ένα ακόμα σημαντικό βήμα για την ανίχνευση πηγών βαρυτικών κυμάτων είναι η προεπεξεργασία των ακατέργαστων δεδομένων των ανιχνευτών. Στη διαδικασία αυτή [προεπεξεργασίας των δεδομένων](#) περιλαμβάνεται η βαθμονόμηση και η αφαίρεση θορύβου.

Αρχικά βαθμονομούμε τις ακατέργαστες διακυμάνσεις της οπτικής ισχύος στον κάθε ανιχνευτή μεταφράζοντάς τις σε μετρήσεις της αδιάστατης [τάσης](#), σε σχεδόν πραγματικό χρόνο για το πρώτο στάδιο της ανίχνευσης. Αργότερα ξαναβαθμονομούμε τα δεδομένα για να μειώσουμε τα συστηματικά σφάλματα και αφαιρούμε θόρυβο, αυξάνοντας κί' άλλο την εμβέλεια ανίχνευσης των βαρυτικών κυμάτων, αποκαλύπτοντας ακόμα πιο αμυδρά σήματα μέσα στα δεδομένα.

Στην ανάλυση δεδομένων βαρυτικών κυμάτων, το πιο σύνθηος ζήτημα στην ποιότητα δεδομένων έχει να κάνει με παροδικές ανωμαλίες των οργάνων (glitches). Οι ανωμαλίες αυτές προκαλούν βραχύβιους θορύβους, με πηγές όπως ένα μηχανικό κλειστό κάμερα, ή το σκεδαζόμενο φως από τη δέσμη laser. Ωστόσο, κάποιες από τις ανωμαλίες έχουν πιο μυστήρια προέλευση, όπως οι ευρυζωνικές βραχύβιες ανωμαλίες που αποκαλούμε “blips”. Ένας τρόπος με τον οποίο ταξινομούμε ανωμαλίες στα δεδομένα των LIGO και Virgo είναι μέσω της πλατφόρμας Gravity Spy με τη βοήθεια χιλιάδων πολιτών (δες πώς μπορείς να μας βοηθήσεις στην ταξινόμηση ανωμαλιών με το [Gravity Spy](#)). Αφού ταυτοποιήσουμε τις σημαντικές ανωμαλίες στα δεδομένα, εφαρμόζουμε μεθόδους

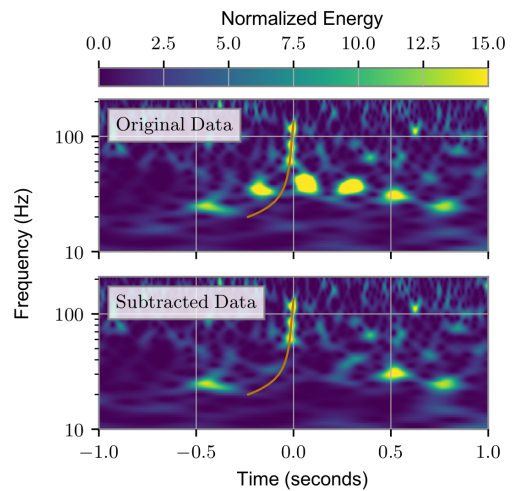


Εικόνα 1: Η μέση εμβέλεια για διπλούς αστέρες νετρονίων για κάθε έναν από τους ανιχνευτές κατά τη δεύτερη περίοδο παρατήρησης (Ο2), σε σύγκριση με το πρώτο μισό της τρίτης περιόδου παρατήρησης (Ο3α).

Σημ.: 1 megaparsec (Mpc) ισούται με περίπου 3.26 εκατομμύρια έτη φωτός.
(Credit: LIGO-Virgo Collaboration / Eve Chase / Caitlin Rose / Northwestern / University of Wisconsin-Milwaukee.)

αφαίρεσής τους για να τις διαχωρίσουμε από τα υποψήφια σήματα βαρυτικών κυμάτων, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2**. Οκτώ από τα 39 γεγονότα που παρατηρήσαμε στο O3a επωφελήθηκαν από την αφαίρεση ανωμαλιών ως ένα ακόμη βήμα προεπεξεργασίας πριν την περαιτέρω ανάλυση για την εκτίμηση παραμέτρων.

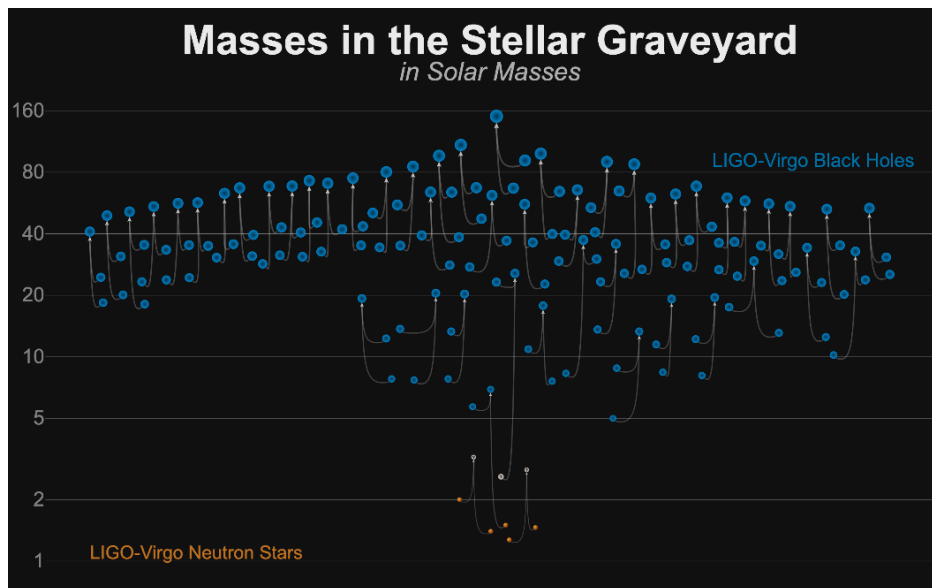
Στην αναζήτηση βαρυτικών κυμάτων, η ταυτοποίηση υποψηφίων σημάτων συμβαίνει σε δύο χρονικές κλίμακες. Αρχικά, πολλαπλές μέθοδοι ανεύρεσης επεξεργάζονται τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο με στόχο την παραγωγή και [δημοσίευση ειδοποιήσεων ανίχνευσης](#) εντός ολίγων λεπτών. Αργότερα, γίνεται επανεπεξεργασία των δεδομένων και η επιμέλεια της λίστας των υποψηφίων σημάτων του παρόντος καταλόγου, χρησιμοποιώντας επικαιροποιημένη βαθμονόμηση και ποιότητα δεδομένων, και βελτιωμένες μεθόδους για τον υπολογισμό της στατιστικής σημαντικότητας. Για να αποφασίσουμε ποιά υποψήφια σήματα επιβιώνουν στην τελική λίστα, επιβάλλουμε ένα κατώφλι για τη συχνότητα ψευδούς ανίχνευσης (false alarm rate) ίσο με δύο ανά έτος. Η τιμή αυτή μας δίνει τη συχνότητα με την οποία αναμένουμε ένα τέτοιο υποψήφιο γεγονός να προκύπτει τυχαία από τον θόρυβο. Από τα 39 γεγονότα του O3a, τα 26 έχουν ήδη αναφερθεί σε ειδοποιήσεις ανίχνευσης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, ενώ τα 13 αναφέρονται στον κατάλογο GWTC-2 για πρώτη φορά. Στο GWTC-2 εισάγουμε μια νέα σύμβαση ονομασίας για τα γεγονότα βαρυτικών κυμάτων που αναφέρουμε. Η παλαιά σύμβαση που χρησιμοποιούσε μόνο την ημερομηνία παρατήρησης συνεχίζει να ισχύει για τα ήδη δημοσιευμένα γεγονότα, συμπεριλαμβανομένων των πρόσφατων GW190412, GW190425, GW190521 και GW190814. Όμως για τα νέα γεγονότα του GWTC-2 προσθέτουμε την ώρα UTC της ανίχνευσής τους στο όνομα, π.χ. το GW190701_203306 (βλ. Εικόνα 2) ανιχνεύθηκε στις 20:33:06 UTC της 1ης Ιουλίου 2019.



Εικόνα 2: Τα δεδομένα χρόνου-συχνότητας του γεγονότος GW190701_203306 πριν και μετά την αφαίρεση μιας ανωμαλίας. Στην περίπτωση αυτή, σκεδασμένο φως στον ανιχνευτή LIGO Livingston προκάλεσε μία ανωμαλία σε μορφή υπερβολικού θορύβου στις συχνότητες κάτω των ~40 Hz. (Προσαρμογή από Εικ. 5 του [άρθρου](#) μας.)

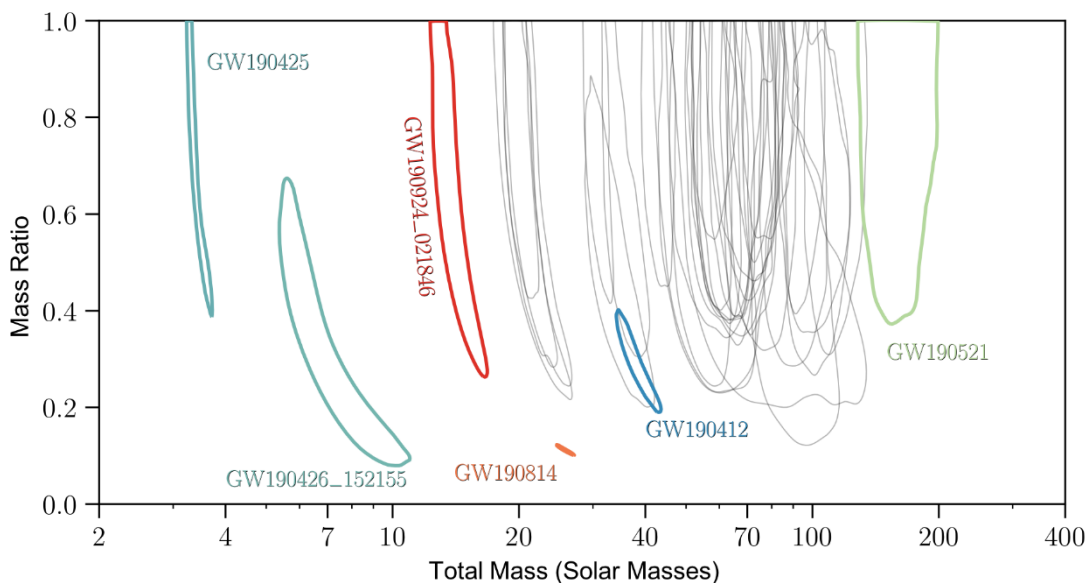
ΜΕΤΡΩΝΤΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ

Εξετάζουμε την αστροφυσική προέλευση κάθε γεγονότος μέσω μιας διαδικασίας που αποκαλούμε εκτίμηση παραμέτρων, η οποία μας αποκαλύπτει τις τιμές διαφόρων αστροφυσικών ιδιοτήτων, μοναδικών για κάθε βαρυτικό κύμα. Μετράμε τις *εξωγενείς παραμέτρους* που περιγράφουν τη γεωμετρική σχέση ενός διπλού συστήματος με εμάς εδώ στη Γη, όπως την απόσταση της πηγής, τη θέση της στον ουράνιο θόλο και τον προσανατολισμό του διπλού συστήματος ως προς την οπτική μας γωνία παρατήρησης. Επιπλέον μετράμε τις *εγγενείς παραμέτρους* που αναφέρονται σε ιδιότητες όπως οι μάζες και οι στροφορμές του κάθε [συμπαγούς αντικειμένου](#) του διπλού συστήματος. Από τις παραμέτρους κάθε γεγονότος υπολογίζουμε τις βαρυτικές [κυματομορφές](#) που αναπαριστούν την παραμόρφωση που προκαλούν τα παραγόμενα βαρυτικά κύματα στους ανιχνευτές μας στο πέρασμα του χρόνου. Κατόπιν, συγκρίνουμε την πρόβλεψη αυτή με τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους LIGO και Virgo, λαμβάνοντας υπόψιν την ύπαρξη θορύβου στους ανιχνευτές. Μέσω τέτοιων τεχνικών εκτίμησης παραμέτρων, εξάγουμε [διαστήματα εμπιστοσύνης](#) 90% που αναπαριστούν το εύρος τιμών που είναι επαρκώς συμβατές με τα δεδομένα.



Εικόνα 3: Μία συλλογή μαζών για ένα εύρος συμπαγών σωμάτων. Στην εικόνα φαίνονται μαύρες τρύπες (μπλε), αστέρες νετρονίων (πορτοκαλί) και συμπαγή σώματα αγνώστου φύσεως (γκρι) που ανιχνεύθηκαν μέσω βαρυτικών κυμάτων. Σε κάθε συγχώνευση αντιστοιχούν τρία συμπαγή σώματα: τα δύο συγχωνευόμενα σώματα και το τελικό απομεινάρι. (Credit: LIGO Virgo Collaboration / Frank Elavsky, Aaron Geller / Northwestern)

Τα 39 νέα γεγονότα καλύπτουν ένα εύρος μαζών, κωδικοποιώντας πλούσιες πληροφορίες για την ιστορία και το σχηματισμό των μαύρων τρυπών και των αστέρων νετρονίων σε ολόκληρο το Σύμπαν. Το σήμα βαρυτικών κυμάτων που παράγεται πολύ πριν τη συγχώνευση εξαρτάται κυρίως από έναν συγκεκριμένο συνδυασμό των δύο μαζών των σωμάτων, τη λεγόμενη “[μάζα chirp](#)” (καθώς προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά ενός “τιτιβίσματος” στην κυματομορφή). Σημαντικές παράμετροι μάζας είναι επίσης η **ολική μάζα** του κάθε διπλού συστήματος (το άθροισμα των μαζών των συμπαγών σωμάτων) και ο [λόγος των μαζών](#), που δίνεται από το κλάσμα της μικρότερης μάζας προς τη μεγαλύτερη.



Εικόνα 4: Εκτιμήσεις για τους λόγους μαζών και τις ολικές μάζες για όλα τα γεγονότα του O3a. Οι καμπύλες αντιστοιχούν σε περιοχές εμπιστοσύνης 90%. Έξι μοναδικά γεγονότα τονίζονται με χρώμα. (Προσαρμογή από Εικ. 6 του [άρθρου](#) μας.)

ΕΞΑΙΡΕΤΙΚΕΣ ΑΝΑΚΑΛΥΨΕΙΣ ΤΟΥ O3A

Η **Εικόνα 3** απεικονίζει την ποικιλία μαζών στον GWTC-2, που κυμαίνεται από αστέρες νετρονίων 1.4 ηλιακών μαζών περίπου μέχρι μια μαύρη τρύπα κοντά στις 150 ηλιακές μάζες. Οι **Εικόνες 4 και 5** τονίζουν τα παρακάτω οκτώ γεγονότα, τέσσερα εκ των οποίων έχουν περιγραφεί λεπτομερώς σε ξεχωριστές δημοσιεύσεις:

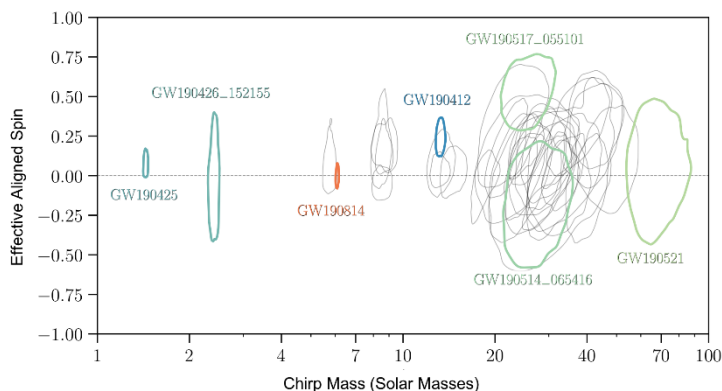
- [GW190412](#): η πρώτη διπλή μαύρη τρύπα (BBH) με επιβεβαιωμένες ασύμμετρες μάζες, που επίσης έχει ενδείξεις για [ανώτερες αρμονικές](#)
- [GW190425](#): το δεύτερο βαρυτικό κύμα συμβατό με BNS, μετά το [GW170817](#)
- GW190426_152155: ένα γεγονός χαμηλής μάζας, συμβατό είτε με NSBH ή με BBH
- GW190514_065416: ένα BBH με το μικρότερο ενεργό παράλληλο σπιν από όλα τα γεγονότα του O3a
- GW190517_055101: ένα BBH με το μεγαλύτερο ενεργό παράλληλο σπιν από όλα τα γεγονότα του O3a
- [GW190521](#): ένα BBH με ολική μάζα πάνω από 150 φορές τη μάζα του Ήλιου
- [GW190814](#): ένα αρκετά ασύμμετρο σύστημα αμφιλεγόμενης φύσεως, που αντιστοιχεί στη συγχώνευση μιας μαύρης τρύπας 23 ηλιακών μαζών με ένα συμπαγές αντικείμενο 2.6 ηλιακών μαζών, κάνοντας το τελευταίο είτε την ελαφρύτερη μαύρη τρύπα ή το βαρύτερο αστέρα νετρονίων που έχει παρατηρηθεί σε διπλό σύστημα
- GW190924_021846: μάλλον το ελαφρύτερο BBH, με κάθε μαύρη τρύπα βαρύτερη των 3 ηλιακών μαζών

Επιπλέον, ο GWTC-2 περιλαμβάνει γεγονότα εντός του “κατώτερου χάσματος μάζας” μεταξύ 2.5 και 5 ηλιακών μαζών. Για πολλά χρόνια, οι αστροφυσικοί μελετούσαν θεωρητικά την ύπαρξη του χάσματος αυτού στις χαμηλές μάζες, εξ’ αιτίας της έλλειψης παρατηρήσεων εντός του εύρους αυτού. Ωστόσο, στο O3a παρατηρήσαμε πιθανά αντικείμενα στο “χάσμα μάζας”, όπως τους ελαφρύτερους συνοδούς των GW190814 και GW190924_021846.

Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4**, το GW190521 περιέχει τη μεγαλύτερη ολική μάζα του O3a, και έχει σχεδόν διπλάσια μάζα από το GW170729, το βαρύτερο BBH του [GWTC-1](#). Επιπλέον, το GW190521 πιθανότατα περιλαμβάνει και τη βαρύτερη συνοδό μαύρη τρύπα που έχει ανιχνευθεί με βαρυτικά κύματα έως τώρα, με μάζα μεγαλύτερη των 90 ηλιακών μαζών. Αρκετά ακόμη γεγονότα ίσως έχουν ολικές μάζες άνω των 100 ηλιακών μαζών, συμπεριλαμβανομένων των GW190519_153544, GW190602_175927, και GW190706_222641.

Ο κατάλογος GWTC-2 παρουσιάζει αντικείμενα με μεγαλύτερη ασυμμετρία μαζών από οποιαδήποτε από τις πηγές που παρουσιάστηκαν στον GWTC-1, όπως τα GW190412 και GW190814, τα οποία προήλθαν από τη συγχώνευση μαύρης τρύπας με έναν αρκετά ελαφρύτερο συνοδό. Οι ασύμμετρες συγχωνεύσεις ενισχύουν την ένταση των ανώτερων αρμονικών, όπως μας έδειξε η ανίχνευση του [GW190412](#). Ο επικαιροποιημένος κατάλογος περιλαμβάνει αρκετά ακόμη μοναδικά ευρήματα για την αστρονομία βαρυτικών κυμάτων. Ο Ο3α περιλαμβάνει το πιο απομακρυσμένο γεγονός που ανιχνεύτηκε έως τώρα, καθώς και εννέα γεγονότα που εντοπίζονται σε επιφάνεια μικρότερη του 1% της συνολικής επιφάνειας του ουρανού.

Οι [στροφορμές](#) (σπιν) των συμπαγών σωμάτων στα διπλά συστήματα μπορούν να αναδείξουν επιπλέον πληροφορίες για την εξελικτική τους ιστορία. Κυμαίνονται από μηδενικές για μη περιστρεφόμενα σώματα μέχρι μια μέγιστη τιμή για ακραίως περιστρεφόμενα. Συνήθως μετράμε έναν συγκεκριμένο συνδυασμό των δύο αρχικών σπιν σε μια παράμετρο γνωστή ως “ενεργό ευθυγραμμισμένο σπιν”. Στην **Εικόνα 5** φαίνονται οι μετρήσεις του ενεργού ευθυγραμμισμένου σπιν και της μάζας χιρπ για κάθε γεγονός. Αρνητικές τιμές του ενεργού ευθυγραμμισμένου σπιν σημαίνουν αντίρροπα σπιν, υποδεικνύοντας ότι το σύστημα ίσως σχηματίστηκε σε ένα πυκνό περιβάλλον όπως ένα [σφαιρωτό σμήνος](#). Όπως επισημαίνεται



Εικόνα 5: Εκτιμήσεις του ενεργού ευθυγραμμισμένου σπιν και της μάζας χιρπ για όλα τα γεγονότα του Ο3α. Οι καμπύλες αντιστοιχούν σε περιοχές εμπιστοσύνης 90% (Προσαρμογή από Εικ. 7 του [άρθρου](#) μας.)

στην **Εικόνα 5**, το GW190517_055101 πιθανότατα έχει το μεγαλύτερο ενεργό ευθυγραμμισμένο σπιν. Δεν έχουμε επιβεβαιωμένα αρνητικές τιμές στο GWTC-2, ωστόσο το GW190514_065416 πιθανότατα έχει το μικρότερο ενεργό ευθυγραμμισμένο σπιν. Η μέτρηση των σπιν μπορεί επίσης να φανερώσει ενδείξεις [μεταπτωτικής κίνησης](#); ο GWTC-2 περιέχει γεγονότα που πιθανώς παρουσιάζουν ασθενείς ενδείξεις μετάπτωσης, όπως τα GW190412 και GW190521.

ΕΝΑ ΛΑΜΠΡΟ ΜΕΛΛΟΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ ΒΑΡΥΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Όσο παράξενο και αν ακούγεται, η ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων μας έχει γίνει πλέον συνήθεια, μόλις πέντε χρόνια μετά την [πρώτη ανίχνευση](#) το Σεπτέμβριο του 2015. Με 50 πλέον ανιχνεύσεις βαρυτικών κυμάτων είμαστε πολύ πιο έτοιμοι για να εξερευνήσουμε τον πληθυσμό των μαύρων τρυπών και των αστέρων νετρονίων στα πέρατα του Σύμπαντος (βλ. [σχετική περίληψη](#)). Οι νέες ανιχνεύσεις επίσης εμβαθύνουν την κατανόησή μας της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας (βλ. [σχετική περίληψη](#)).

Το μέλλον της αστρονομίας βαρυτικών κυμάτων φαίνεται όλο και πιο ευοίνο μετά την προσθήκη 39 νέων γεγονότων από τους πρώτους 6 μήνες του τρίτου κύκλου παρατήρησης Ο3. Η ανάλυση του δεύτερου μισού του Ο3 (του λεγόμενου Ο3b) είναι σε εξέλιξη και θα επεκτείνει ακόμα περισσότερο τον κατάλογο παροδικών σημάτων βαρυτικών κυμάτων. Με το πέρασμα του Ο3, οι ανιχνευτές θα υποβληθούν σε περαιτέρω μηχανολογικές αναβαθμίσεις ώστε να αυξηθεί κι άλλο η εμπέδεια των αστροφυσικών μας παρατηρήσεων, εγκαίρως πριν τον τέταρτο κύκλο παρατηρήσεων. Όσο αναμένουμε τις βελτιώσεις των οργάνων μας και την κατασκευή νέων ανιχνευτών, η κοινότητα της φυσικής βαρυτικών κυμάτων θα συνεχίσει να εξερευνά τη φύση των μαύρων τρυπών και των αστέρων νετρονίων που ανακαλύπτουμε παντού στο Σύμπαν.

ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ

Μάζα χιρπ: ένας μαθηματικός συνδυασμός των μαζών του κάθε συμπαγούς σώματος σε ένα διπλό σύστημα. Η μάζα χιρπ καθορίζει τον τρόπο αύξησης της συχνότητας, χαρακτηριστικό ενός βαρυτικού “τιτίβισματος” στα διπλά συστήματα.

Συμπαγές σώμα: ένα εξαιρετικά πυκνό αστροφυσικό αντικείμενο όπως μια μαύρη τρύπα, ένας λευκός νάνος ή ένας αστέρας νετρονίων.

Βαρυτική κυματομορφή: αναπαράσταση της εξέλιξης ενός σήματος βαρυτικού κύματος με το χρόνο.

Λόγος μαζών: ο λόγος της μάζας του ελαφρύτερου συμπαγούς σώματος προς τη μάζα του βαρύτερου σώματος.

Μέσος: η τιμή που συναντάμε ακριβώς στη μέση της κατανομής, ώστε η μισή κατανομή να κείται πάνω και η άλλη μισή κάτω από το μέσο.

Εκτίμηση παραμέτρων: στατιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή αστροφυσικών παραμέτρων που αντιστοιχούν σε ένα βαρυτικό κύμα.

Ηλιακή μάζα: η μάζα του Ήλιου. Η ηλιακή μάζα είναι μια συνηθισμένη μονάδα μέτρησης μαζών στην αστρονομία.

Παραμόρφωση: η μεταβολή μήκους στους βραχίονες του ανιχνευτή, λόγω της διαταραχής της γεωμετρίας του χωρόχρονου από ένα διερχόμενο βαρυτικό κύμα, διαφορούμενη με το μήκος του βραχίονα.

ΜΑΘΕΤΕ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ:

Επισκεφθείτε τις ιστοσελίδες μας:

<http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>

Διαβάστε ελεύθερα ένα preprint του επιστημονικού άρθρου στο: <https://dcc.ligo.org/P2000061/public>

Τα δεδομένα των 39 γεγονότων που ανακαλύφθηκαν στο Ο3α είναι διαθέσιμα στο σχετικό portal του GWOSC: <https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/GWTC-2/>

Η σελίδα του GWOSC περιλαμβάνει χρήσιμες οδηγίες, παραδείγματα κώδικα, και tutorials για να σας βοηθήσει να εξερευνήσετε τα δημοσιευμένα δεδομένα.



Visit our websites:

<http://www.ligo.org>

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

