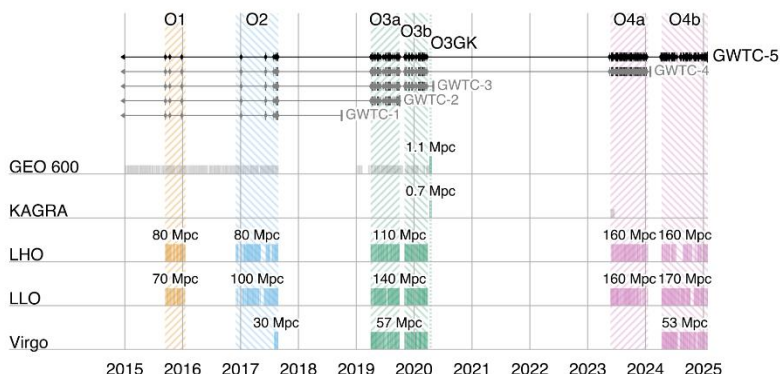


GWTC-5.0: ΑΝΑΝΕΩΣΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΛΟΓΟΥ ΒΑΡΥΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΜΕ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ ΤΗΣ ΤΕΤΑΡΤΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΑΚΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΤΗΣ ΚΟΙΝΟΠΡΑΞΙΑΣ LIGO-VIRGO-KAGRA

Τον Μάιο του 2026, η κοινοπραξία [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) δημοσιοποίησε τις [συμβολομετρικές μετρήσεις βαρυτικής παραμόρφωσης](#) από το δεύτερο μέρος της τέταρτης παρατηρησιακής περιόδου (O4b), το οποίο διήρκεσε από τον Απρίλιο του 2024 έως τον Ιανουάριο του 2025. Σε αυτούς τους εννέα περίπου μήνες, η κοινοπραξία LVK αναζήτησε [βαρυτικά κύματα](#) από συγχωνεύσεις [συμπαγών αντικειμένων](#), όπως [αστέρες νετρονίων](#) και [μελανές οπές](#). Σε αυτά τα δεδομένα ανακαλύψαμε 161 νέα σήματα βαρυτικών κυμάτων, όλα εκ των οποίων είναι συμβατά με προέλευση από συγχωνεύσεις μελανών οπών (κατά την περίοδο O4b δεν καταγράφηκαν νέες ανιχνεύσεις που να περιλαμβάνουν αστέρες νετρονίων). Παράλληλα με τη δημοσιοποίηση των δεδομένων παραμόρφωσης, παρουσιάζουμε την 5η έκδοση του [Καταλόγου Βαρυτικών Κυμάτων](#) (GWTC-5.0), η οποία περιλαμβάνει τα υποψήφια σήματα βαρυτικών κυμάτων καθώς και μετρήσεις των ιδιοτήτων τους. Η νέα έκδοση περιλαμβάνει επίσης μια βελτιωμένη ανάλυση ορισμένων ήδη δημοσιευμένων ανιχνεύσεων. Ο κατάλογος GWTC-5.0 συνοδεύεται από μια σειρά επιστημονικών δημοσιεύσεων και εδώ συνοψίζουμε τις τρεις πρώτες από αυτές, οι οποίες εστιάζουν στην κατάρτιση του καταλόγου και στα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτόν.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πρώτη δημοσίευση, με τίτλο «GWTC-5.0: Εισαγωγή στην 5η έκδοση του Καταλόγου Βαρυτικών Κυμάτων», λειτουργεί ως γενική επισκόπηση του καταλόγου. Περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με την ορολογία, λεπτομέρειες για τη δημοσίευση του καταλόγου και μια σύνοψη των συνοδευτικών δημοσιεύσεων που τον πλαισιώνουν. Στόχος της εργασίας είναι να βοηθήσει τους νέους αναγνώστες να εξοικειωθούν με τον κατάλογο, χωρίς να απαιτείται η μελέτη όλων των προηγούμενων σχετικών δημοσιεύσεων.



Σχήμα 1: Χρονοδιάγραμμα των περιόδων παρατήρησης που δείχνει τις περιόδους συλλογής δεδομένων για τους ανιχνευτές βαρυτικών κυμάτων [GEO 600](#), [KAGRA](#), [LIGO Hanford](#) (LHO), [LIGO Livingston](#) (LLO) και [Virgo](#). Οι αριθμοί πάνω από τα χρωματιστά τμήματα δίνουν ένα μέτρο της ευαισθησίας του κάθε ανιχνευτή και αντιστοιχούν στην κατά προσέγγιση απόσταση (σε [megaparsecs](#), Mpc) στην οποία ο ανιχνευτής μπορεί να «δει» μια [τυπική συγχώνευση δυο ή τριών αστέρων νετρονίων](#). Οι δείκτες στο πάνω μέρος του σχήματος συμβολίζουν τις καταγεγραμμένες ανιχνεύσεις, ενώ οι οριζόντιες μπάρες περιγράφουν το χρονικό εύρος κάθε καταλόγου.

Πως ονομάζουμε τις ανιχνεύσεις

Οι ανιχνεύσεις βαρυτικών κυμάτων ονομάζονται με βάση την ημερομηνία και την ώρα που παρατηρήθηκαν, σύμφωνα με τη [Συντονισμένη Παγκόσμια Ώρα](#) (UTC). Για παράδειγμα, η ανίχνευση GW200105_162426 καταγράφηκε στις 5 Ιανουαρίου 2020 και ώρα 16:24:26 UTC. Ορισμένες ανιχνεύσεις, όπως η [GW150914](#) και η [GW250114](#), είναι τόσο ιδιαίτερες ώστε παραλείπουμε τη σήμανση ώρας για λόγους ευκολίας στην αναφορά τους. Το πρόθεμα GW προστίθεται σε όλα τα υποψήφια σήματα που ανιχνεύουμε, ακόμη και όταν υπάρχει πιθανότητα να μην έχουν αστροφυσική προέλευση. Η πρακτική αυτή είναι συνεπής με εκείνη που ακολουθήθηκε στην πιο πρόσφατη έκδοση του καταλόγου ([GWTC-4.0](#)), αλλά διαφέρει από τον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπιζόνταν τα υποψήφια σήματα σε προηγούμενες εκδόσεις του καταλόγου. Αξίζει πάντως να σημειωθεί ότι για να συμπεριληφθεί ένα υποψήφιο σήμα στον κατάλογο, πρέπει να έχει πιθανότητα τουλάχιστον 50% να είναι αστροφυσικής προέλευσης και να περάσει όλους τους ελέγχους ποιότητας δεδομένων και συνέπειας του σήματος.

Ένας και μοναδικός κατάλογος

Όπως και στις προηγούμενες εκδόσεις του καταλόγου GWTC, το περιεχόμενο του GWTC-5.0 είναι συγκεντρωτικό. Αυτό σημαίνει ότι κάθε νέα έκδοση του καταλόγου περιλαμβάνει αφενός τις νέες ανιχνεύσεις που εντοπίστηκαν στα πιο πρόσφατα διαθέσιμα δεδομένα (στην προκειμένη περίπτωση τα δεδομένα της περιόδου O4b) και αφετέρου όλες τις ανιχνεύσεις από τις προηγούμενες περιόδους παρατήρησης. Με άλλα λόγια, η έκδοση GWTC-5.0 αντικαθιστά όλες τις προηγούμενες εκδόσεις του καταλόγου. Επιπλέον, η 5η έκδοση του καταλόγου περιλαμβάνει επικαιροποιημένα αποτελέσματα αναζήτησης και εκτιμήσεις των ιδιοτήτων πηγής για πρόσθετες ανιχνεύσεις από το πρώτο μέρος της τέταρτης παρατηρησιακής περιόδου (O4a). Το συγκεκριμένο υποσύνολο του καταλόγου ονομάζεται GWTC-4.1, σύμφωνα με τη σύμβαση ονοματοδοσίας που υιοθετήθηκε με την προηγούμενη έκδοση του καταλόγου, όπου ο δευτερεύων αριθμός έκδοσης (το .0 ή το .1) αυξάνεται κάθε φορά που τροποποιούνται αποτελέσματα που έχουν ήδη δημοσιευθεί. Συνεπώς, η έκδοση του καταλόγου με τον μεγαλύτερο αριθμό αποτελεί πάντοτε την έκδοση αναφοράς της κοινοπραξίας LVK.

ΑΝΑΚΑΛΥΨΤΕ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ:

Επισκεφθείτε www.ligo.org
τις σελίδες www.virgo-gw.eu
μας: gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



Αυτό σημαίνει ότι ο κατάλογος GWTC-5.0 περιλαμβάνει όλα τα υποψήφια σήματα βαρυτικών κυμάτων υψηλής αξιοπιστίας, από την πρώτη παρατηρησιακή περίοδο (O1, η οποία ξεκίνησε τον Σεπτέμβριο του 2015) έως και το δεύτερο μέρος της τέταρτης παρατηρησιακής περιόδου (O4b). Στο διάστημα αυτό, οι ανιχνευτές μας βελτίωσαν σταδιακά την ευαισθησία τους και η εξέλιξη αυτών των βελτιώσεων παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1** με το χρονοδιάγραμμα των περιόδων παρατήρησης.

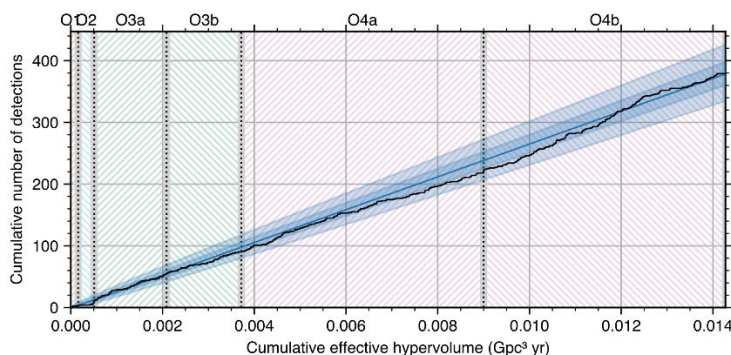
Στο Σχήμα 1 παρατηρούμε επίσης ότι ο ανιχνευτής Virgo συμμετείχε στην περίοδο O4b, το δεύτερο μέρος της περιόδου παρατήρησης O4, με ευαισθησία συγκρίσιμη με εκείνη που είχε επιδείξει κατά την τρίτη παρατηρησιακή περίοδο. Το γεγονός αυτό είναι αξιοσημείωτο όχι μόνο επειδή αυξάνει τη συνολική ευαισθησία του δικτύου ανιχνευτών, αλλά και επειδή βελτιώνει σημαντικά την ικανότητα του δικτύου να εντοπίζει τη θέση κάθε ανίχνευσης στον ουρανό. Θα δούμε ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα στην ενότητα των αποτελεσμάτων.

Εξερευνώντας ολοένα μεγαλύτερο τμήμα του Σύμπαντος

Η βελτιωμένη γωνιακή ανάλυση στον ουρανό, σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη εμβέλεια των ανιχνευτών καθιστά την περίοδο O4b την πιο ευαίσθητη αναζήτηση βαρυτικών κυμάτων μέχρι σήμερα. Για να ποσοτικοποιήσουμε αυτή τη βελτίωση, συχνά υπολογίζουμε τον τετραδιάστατο όγκο (στο χώρο και στο χρόνο) που έχουν καλύψει οι ανιχνευτές. Όπως και στις προηγούμενες εκδόσεις του καταλόγου, αποκαλούμε αυτήν την ποσότητα «υπερόγκο», επειδή πρόκειται για όγκο σε τέσσερις διαστάσεις. Για τον σκοπό αυτό, προσομοιώνουμε πώς θα καταγράφονταν από τους ανιχνευτές μας σήματα βαρυτικών κυμάτων προερχόμενα από πηγές σε διαφορετικές αποστάσεις και θέσεις στον ουρανό. Στη συνέχεια εισάγουμε τεχνητά στα δεδομένα μας αυτά τα προσομοιωμένα σήματα και εξετάζουμε αν οι αλγόριθμοι αναζήτησης που χρησιμοποιούμε μπορούν να τα ανακτήσουν με επιτυχία. Αφού συνυπολογίσουμε το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο οι ανιχνευτές μας βρίσκονται σε λειτουργία, δηλαδή τον [κύκλο λειτουργίας](#) τους, μπορούμε να κάνουμε μία ρεαλιστική εκτίμηση για τον υπερόγκο του κοινού Σύμπαντος από τον οποίο είναι δυνατή η αξιόπιστη ανίχνευση εκπομπής βαρυτικών κυμάτων.

Στο **Σχήμα 2** απεικονίζουμε αυτόν τον υπερόγκο σε συνάρτηση με το συνολικό αριθμό ανιχνεύσεων. Αυτό μας δείχνει πόσες ανιχνεύσεις καταγράφηκαν σε κάθε παρατηρησιακή περίοδο και καταδεικνύει ότι στην περίοδο O4b έχουμε σχεδόν διπλασιάσει τον αριθμό των παρατηρηθέντων σημάτων!

Απόδειξη της αυξημένης ευαισθησίας που έχει επιτευχθεί στην αναζήτηση βαρυτικών κυμάτων, είναι το γεγονός ότι συγκρίνοντας τα δύο πρώτα μέρη της περιόδου O4 (O4a + O4b) με τις προηγούμενες παρατηρησιακές περιόδους, διαπιστώνουμε ότι τα αποτελέσματα της O4 αντιστοιχούν περίπου στο 75% του συνολικού αριθμού ανιχνεύσεων βαρυτικών κυμάτων μέχρι σήμερα. Το αποτέλεσμα αυτό οπτικοποιείται στο **Σχήμα 3** με έναν εναλλακτικό τρόπο.



Σχήμα 2: Ο συνολικός αριθμός ανιχνεύσεων σε συνάρτηση με τον κατά προσέγγιση χωροχρονικό υπερόγκο που έχει ερευνηθεί από τους ανιχνευτές, δείχνοντας τόσο την αύξηση του αριθμού των ανιχνεύσεων βαρυτικών κυμάτων όσο και το πόσο έχουμε εξερευνήσει το τοπικό Σύμπαν. Η μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στον αριθμό ανιχνεύσεων, ενώ οι σκιασμένες μπλε ζώνες γύρω της δείχνουν διαφορετικά επίπεδα αβεβαιότητας σε αυτή τη μέτρηση. Η αβεβαιότητα προκύπτει από το γεγονός ότι ακόμη και ανιχνεύσεις με υψηλή πιθανότητα αστροφυσικής προέλευσης μπορεί να φεύγονται σε κάτι διαφορετικό (όσο μικρή και αν είναι αυτή η πιθανότητα). Αυτή η αβεβαιότητα αυξάνεται καθώς σημειώνουμε όλο και περισσότερες ανιχνεύσεις βαρυτικών κυμάτων, δίνοντάς μας ένα στατιστικό μέτρο του πόσο καλά κατανοούμε τον συνολικό αριθμό ανιχνεύσεων.

ΜΕΘΟΔΟΙ

Η δεύτερη δημοσίευση, με τίτλο «GWTC-5.0: Μέθοδοι για τον εντοπισμό και τον χαρακτηρισμό σημάτων βαρυτικών κυμάτων», παρουσιάζει λεπτομερώς τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την κατάρτιση του καταλόγου GWTC-5.0. Το αρχικό μέρος της εργασίας καλύπτει τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των σημάτων βαρυτικών κυμάτων που αναζητούμε, καθώς και τους αλγόριθμους ανάλυσης που χρησιμοποιούμε για την ανίχνευσή τους στα δεδομένα. Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζουμε τις διακυμάνσεις του θορύβου που μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα των δεδομένων μας. Η εργασία ολοκληρώνεται με μια επισκόπηση των εργαλείων που χρησιμοποιούμε για τρεις βασικούς σκοπούς: την εκτίμηση των αστροφυσικών παραμέτρων κάθε συστήματος (όπως οι μάζες των συμπαγών αντικειμένων που έχουν συγχωνευθεί), την επαλήθευση της συνέπειας των αποτελεσμάτων μας, και τη διαχείριση των σύνθετων δομών δεδομένων που απαιτούνται για την υλοποίηση της όλης ανάλυσης.

Συνχής βελτίωσης της μεθοδολογίας

Η βασική μεθοδολογία στον GWTC-5.0 παραμένει σε μεγάλο βαθμό αμετάβλητη σε σχέση με την ανάλυση του GWTC-4.0 για τις ανιχνεύσεις της περιόδου O4a. Ωστόσο, εντοπίσαμε και διορθώσαμε ορισμένα μικρά σφάλματα λογισμικού, μεταξύ των οποίων ένα που επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο βαθμονομούμε τα δεδομένα μας, καθώς και ένα άλλο που επηρεάζει τις τεχνικές που χρησιμοποιούμε για την εκτίμηση των αστροφυσικών ιδιοτήτων κάθε ανίχνευσης. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι επιδράσεις αυτών των σφαλμάτων είναι μικρότερες από τις στατιστικές αβεβαιότητες των επιμέρους ανιχνεύσεων και συνεπώς κανένα από τα επιστημονικά συμπεράσματα των προηγούμενων εκδόσεων του καταλόγου δεν επηρεάζεται.

Διατηρώντας τη συνέχεια του καταλόγου

Σύμφωνα με την πρακτική που ακολουθήθηκε και στις προηγούμενες εκδόσεις του καταλόγου, η δημοσίευση σχετικά με τις μεθόδους περιλαμβάνει επίσης και ιστορικές περιγραφές των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν ήδη από την πρώτη παρατηρησιακή περίοδο. Αυτό είναι απαραίτητο, καθώς ο GWTC είναι ένας συγκεντρωτικός κατάλογος: περιλαμβάνει όλα τα προηγούμενα αποτελέσματα, ακόμη και όταν αυτά δεν έχουν αναλυθεί εκ νέου. Συνεπώς, κάποιος που μελετά μία ανίχνευση της πρώτης παρατηρησιακής περιόδου

(π.χ. την πρώτη ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων [GW150914](#)) μέσα από τον κατάλογο GWTC-5.0, πρέπει να έχει στη διάθεσή του το πλήρες πλαίσιο των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση εκείνη την εποχή. Στόχος είναι οι νέοι αναγνώστες του καταλόγου να μπορούν να κατανοήσουν πλήρως το περιεχόμενό του χωρίς να χρειάζεται να ανατρέξουν στις δημοσιεύσεις των προηγούμενων εκδόσεων.

Παράλληλα με αυτό το ιστορικό πλαίσιο, επιδιώκουμε και την ενσωμάτωση νέων και εξελιγμένων τεχνικών, ώστε να βελτιώνουμε συνεχώς τις αναλύσεις μας με κάθε νέα έκδοση του καταλόγου. Στην έκδοση GWTC-5.0 προσθέσαμε αναλύσεις που αξιοποιούν τεχνικές [μηχανικής μάθησης](#) ως ένα επιπλέον μέσο διασταύρωσης και επαλήθευσης των αποτελεσμάτων μας, ενισχύοντας έτσι τη στατιστική αξιοπιστία τους. Οι νέες αυτές προσεγγίσεις βασίζονται στην εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων πάνω σε μεγάλες συλλογές προσομοιωμένων σημάτων. Τα δίκτυα αυτά, μετά την εκπαίδευσή τους, μπορούν να εκτιμήσουν τις ιδιότητες ενός νέου σήματος σε ένα πολύ μικρότερο κλάσμα του χρόνου που απαιτούν οι παραδοσιακές μέθοδοι ανάλυσης. Τα αποτελέσματα αυτά, στη συνέχεια επανασταθμίζονται, βήμα που απαιτείται για τη διόρθωση τυχόν μικρών αποκλίσεων μεταξύ της ταχείας προσέγγισης που προσφέρει το νευρωνικό δίκτυο και ενός αυστηρότερου υπολογισμού.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η τρίτη δημοσίευση, με τίτλο «GWTC-5.0: Παρατηρήσεις από το δεύτερο μέρος της τέταρτης παρατηρησιακής περιόδου των ανιχνευτών LIGO-Virgo-KAGRA και ενημερώσεις του Καταλόγου Βαρυτικών Κυμάτων», παρουσιάζει μια σύνοψη των αστροφυσικών αποτελεσμάτων για τις νέες ανιχνεύσεις που προστέθηκαν στην έκδοση GWTC-5.0. Η εργασία επικεντρώνεται στις βασικές ιδιότητες κάθε ανίχνευσης, συμπεριλαμβανομένων παραμέτρων όπως η μάζα, η [περιστροφή](#) (spin) και η απόσταση. Περαιτέρω αναλύσεις που εξετάζουν τις ευρύτερες αστροφυσικές προεκτάσεις των αποτελεσμάτων θα παρουσιαστούν σε μια σειρά συνοδευτικών εργασιών παράλληλα με τη δημοσιοποίηση των δεδομένων του καταλόγου GWTC-5.0 ή λίγο αργότερα.

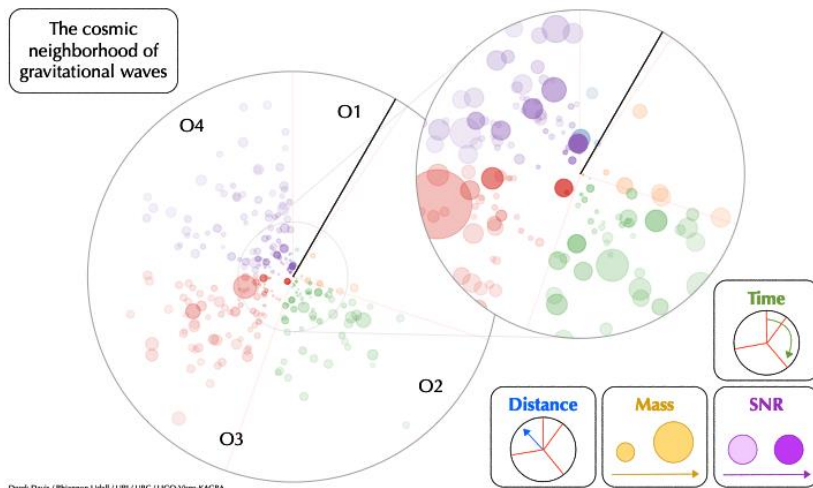
Πλησιάζοντας τις 400 ανιχνεύσεις

Κατά τη διάρκεια της περιόδου O4b, εντοπίσαμε 161 νέες ανιχνεύσεις, οι οποίες είναι πιθανό να έχουν αστροφυσική προέλευση. Όλες οι νέες ανιχνεύσεις φαίνεται να αντιστοιχούν σε συγχωνεύσεις δυτών συστημάτων μελανών οπών, με βάση τις μάζες που προκύπτουν από την ανάλυση των σημάτων βαρυτικών κυμάτων. Σε αντίθεση με την προηγούμενη έκδοση του καταλόγου, κατά την περίοδο O4b δεν παρατηρήθηκαν ανιχνεύσεις που να περιλαμβάνουν αστέρες νετρονίων.

Με την προσθήκη των νέων ανιχνεύσεων, ο συνολικός αριθμός καταγεγραμμένων σημάτων του καταλόγου GWTC ανέρχεται πλέον στα 390 (βλ. [Σχήμα 4](#)). Από το σύνολο των 161 νέων ανιχνεύσεων, οι 104 παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη στατιστική σημαντικότητα και για αυτές παρουσιάζουμε μία αναλυτικότερη μελέτη. Σημειώνουμε ότι η στατιστική σημαντικότητα μιας ανίχνευσης εκφράζεται μέσω του [«ρυθμού ψευδών ανιχνεύσεων»](#), δηλαδή ενός μέτρου του πόσο συχνά θα αναμέναμε τυχαίες διακυμάνσεις του θορύβου να παράγουν ένα σήμα που μοιάζει με βαρυτικό κύμα. Λεπτομερής ανάλυση πραγματοποιείται μόνο για τα σήματα των οποίων ο ρυθμός ψευδών ανιχνεύσεων είναι μικρότερος από μία ανά έτος.

Ανιχνεύσεις ιδιαίτερου ενδιαφέροντος

Ο κατάλογος περιλαμβάνει ορισμένες εξαιρετικά ενδιαφέρουσες ανιχνεύσεις, κάποιες από τις οποίες έχουν ήδη δημοσιευθεί. Ανάμεσά τους είναι η ανίχνευση [GW250114](#), το ισχυρότερο σήμα βαρυτικών κυμάτων που έχει καταγραφεί μέχρι σήμερα, οι ανιχνεύσεις [GW241011](#) και [GW241110](#), οι οποίες προσέφεραν ισχυρές ενδείξεις για την ύπαρξη ιεραρχικών συγχωνεύσεων μελανών οπών, καθώς και η ανίχνευση [GW240925](#), μία από τις δύο ανιχνεύσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην πρώτη εφαρμογή αστροφυσικής βαθμονόμησης. Καθεμία από αυτές τις ανιχνεύσεις έχει αποτελέσει ήδη αντικείμενο ξεχωριστής δημοσίευσης, ωστόσο αξίζει να αναδειχθεί και στο πλαίσιο του καταλόγου ως ένα αξιοσημείωτο παρατηρησιακό δεδομένο. Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζουμε, σε ξεχωριστό πλαίσιο, μια σύνοψη καθεμιάς από αυτές, μαζί με συνδέσμους προς τις αντίστοιχες επιστημονικές περιλήψεις για όσους επιθυμούν να μάθουν περισσότερα.



Σχήμα 3: Στην τέταρτη παρατηρησιακή περίοδο αντιστοιχεί περίπου το 75% όλων των ανιχνεύσεων βαρυτικών κυμάτων μέχρι σήμερα, παρόλο που η διάρκειά της αντιπροσωπεύει λιγότερο από το μισό του συνολικού χρόνου παρατήρησης. Στο παραπάνω κυκλικό διάγραμμα, κάθε ανίχνευση συμβολίζεται με έναν κύκλο. Το μέγεθος κάθε κύκλου αντιστοιχεί στη συνολική μάζα του συστήματος που συγχωνεύθηκε. Ο βαθμός της σκίασης κάθε κύκλου υποδηλώνει πόσο «ισχυρό» ήταν το σήμα στους ανιχνευτές, όπως αυτό εκφράζεται από τον λόγο σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio, SNR). Η απόσταση κάθε κύκλου από το κέντρο του διαγράμματος αντιπροσωπεύει την απόσταση από τη Γη στην οποία συνέβη η συγχώνευση. Κάθε κυκλικός τομέας του διαγράμματος αντιπροσωπεύει μία παρατηρησιακή περίοδο (από την O1 έως την O4 και ειδικότερα μέχρι την O4b), ενώ οι ανιχνεύσεις είναι τοποθετημένες με χρονολογική σειρά καθώς κινούμαστε δεξιόστροφα μέσα σε κάθε τομέα.

ΑΝΙΧΝΕΥΣΕΙΣ ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΥ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

GW250114 – το ισχυρότερο σήμα βαρυτικών κυμάτων μέχρι σήμερα

Η ανίχνευση GW250114 προέρχεται από τη συγχώνευση ενός διπλού συστήματος μελανών ωπών και αποτελεί το ισχυρότερο σήμα βαρυτικών κυμάτων που έχει καταγραφεί μέχρι σήμερα. Η «ισχύς» ενός σήματος βαρυτικών κυμάτων εκφράζεται μέσω του λόγου σήματος προς θόρυβο (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR), δηλαδή της έντασης του σήματος διά το τυπικό μέγεθος των διακυμάνσεων του θορύβου στους ανιχνευτές. Το προηγούμενο ρεκόρ κατείχε η ανίχνευση [GW230814](#) με λόγο σήματος προς θόρυβο ίσο με 42,4. Η ανίχνευση [GW250114](#) παρατηρήθηκε με SNR ίσο με 76,9 (σχεδόν διπλάσιο), γεγονός που μας επέτρεψε να πραγματοποιήσουμε αυστηρούς [ελέγχους της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας](#) και να επιβεβαιώσουμε την εγκυρότητα του θεωρήματος επιφάνειας του Hawking. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι δύο μελανές οπές που συγχωνεύθηκαν είχαν μάζες περίπου 34 και 32 φορές αντίστοιχα τη [μάζα του Ήλιου](#), δηλαδή ήταν σχεδόν ίδιες με τις δύο μελανές οπές της πρώτης ανίχνευσης βαρυτικών κυμάτων GW150914 (που είχαν μάζες περίπου 36 και 29 ηλιακές μάζες αντίστοιχα). Επιπλέον, οι δύο αυτές συγχωνεύσεις συνέβησαν σε παρόμοια απόσταση από τη Γη: περίπου 1,3 και 1,4 δισεκατομμύρια έτη φωτός αντίστοιχα για την GW250114 και την GW150914. Αυτό σημαίνει ότι η εντυπωσιακή αύξηση στο λόγο σήματος προς θόρυβο οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στη βελτίωση της ευαισθησίας των ανιχνευτών και όχι σε κάποια ιδιαίτερη ιδιότητα της ίδιας της πηγής.

GW241011 και GW241110 – ενδείξεις για ιεραρχικές συγχωνεύσεις

Όταν οι μελανές οπές ενός διπλού συστήματος προέρχονται από ένα ζεύγος αστέρων που εξελίχθηκαν μαζί, αναμένουμε η περιστροφή (spin) της καθεμιάς να έχει περίπου τον ίδιο προσανατολισμό με την τροχιακή κίνηση του συστήματος. Εδώ με τον όρο «περιστροφή» εννοούμε την *ιδιοπεριστροφή* κάθε μελανής οπής και όχι την κίνηση της γύρω από τη συνοδό της. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και στο Ηλιακό μας Σύστημα, όπου οι περισσότεροι πλανήτες έχουν την ίδια φορά περιστροφής, ως συνέπεια της προέλευσής τους από το ίδιο αρχικό περιστρεφόμενο νέφος αερίου. Από τις ανιχνεύσεις [GW241011](#) και [GW241110](#) προσδιορίσαμε με αρκετή ακρίβεια την ιδιοπεριστροφή της πιο μαζικής μελανής οπής κάθε συστήματος, διαπιστώνοντας ότι δεν ήταν ευθυγραμμισμένη με την τροχιακή κίνηση του συστήματος. Επιπλέον, οι μάζες των μελανών ωπών σε κάθε σύστημα διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά αποτελούν ισχυρές ενδείξεις ότι τα συστήματα αυτά σχηματίστηκαν σε περιβάλλοντα υψηλής αστρικής πυκνότητας, όπως είναι τα πυκνά αστρικά σμήνη, όπου οι μελανές οπές μπορούν να συναντηθούν και να «αιχμαλωτίσουν» η μία την άλλη, σχηματίζοντας [δυναμικά](#) ένα διπλό σύστημα. Σε τέτοια περιβάλλοντα, είναι επίσης πιθανό μία από τις δύο μελανές οπές να αποτελεί το αποτέλεσμα μιας προγενέστερης συγχώνευσης. Οι δύο αυτές ανιχνεύσεις αποτελούν τις ισχυρότερες ενδείξεις μέχρι σήμερα υπέρ της ύπαρξης τέτοιων *ιεραρχικών συγχωνεύσεων*, όπου το προϊόν μιας προηγούμενης συγχώνευσης μελανών ωπών συμμετέχει σε μία νέα συγχώνευση.

GW240925 – Η πρώτη εφαρμογή αστροφυσικής βαθμονόμησης

Για την αξιόπιστη ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων απαιτείται η προσεκτική [βαθμονόμηση](#) των ανιχνευτών μας, ώστε η κατάστασή τους να είναι γνωστή όταν καταγράφεται κάποιο σήμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις η βαθμονόμηση έχει προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις που η αβεβαιότητα της είναι μεγαλύτερη, όπως αμέσως μετά από μια αλλαγή στη λειτουργία ενός ανιχνευτή, όταν απαιτείται χρόνος μέχρι να σταθεροποιηθεί. Το Σύμπαν, βέβαια, δεν περιμένει πάντοτε να είμαστε έτοιμοι και αυτό ακριβώς συνέβη στην περίπτωση της ανίχνευσης [GW240925](#). Το σήμα καθεαυτό ήταν αρκετά συνηθισμένο: προερχόταν από τη συγχώνευση δύο μελανών ωπών με μάζες περίπου 9 και 7 φορές τη μάζα του Ήλιου. Ωστόσο, καταγράφηκε σε μια χρονική στιγμή κατά την οποία ο ανιχνευτής LIGO Hanford δεν ήταν σωστά βαθμονομημένος. Ευτυχώς, το σήμα ήταν αρκετά ισχυρό, με λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) ίσο με 31,9. Αυτό μας επέτρεψε –καθώς τα βαρυτικά κύματα από συγχωνεύσεις μελανών ωπών είναι καλά κατανοητά– να συγκρίνουμε τα παρατηρησιακά δεδομένα μας (τα οποία είχαν λανθασμένη βαθμονόμηση) με προβλέψεις από θεωρητικά μοντέλα για τη μορφή που θα έπρεπε να έχει το σήμα στον ανιχνευτή. Έτσι χρησιμοποιήσαμε το ίδιο το σήμα για να ανακατασκευάσουμε τη βαθμονόμηση του ανιχνευτή. Αυτή ήταν η πρώτη φορά που ένα αστροφυσικό γεγονός χρησιμοποιήθηκε άμεσα για τη βαθμονόμηση των ανιχνευτών βαρυτικών κυμάτων. Σημειώνουμε ότι η ίδια τεχνική αστροφυσικής βαθμονόμησης εφαρμόστηκε και σε μία ακόμη ανίχνευση, την GW250207, η οποία δημοσιεύθηκε ταυτόχρονα με την GW240925. Ωστόσο, επειδή η GW250207 καταγράφηκε μετά το τέλος της περιόδου O4b, δεν περιλαμβάνεται στον κατάλογο GWTC-5.0 αλλά θα εμφανιστεί στην επόμενη έκδοση του καταλόγου.

Βελτιωμένος εντοπισμός πηγών στον ουρανό

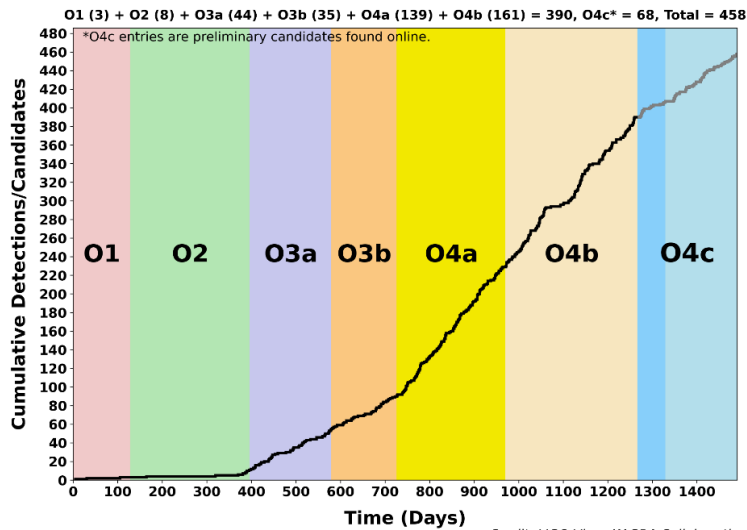
Ο κατάλογος GWTC-5.0 σημειώνει επίσης ένα νέο ρεκόρ ακρίβειας στην αστρονομία βαρυτικών κυμάτων, καθώς βελτιώνει σημαντικά τον εντοπισμό της θέσης αρκετών σημάτων στον ουρανό. Για να κατανοήσουμε τη σημασία αυτού του αποτελέσματος, πρέπει πρώτα να εξετάσουμε πώς οι ανιχνευτές βαρυτικών κυμάτων εντοπίζουν τη θέση ενός σήματος στον ουρανό.

Ένας ανιχνευτής μπορεί να καταγράψει ένα σήμα βαρυτικών κυμάτων, δεν μπορεί όμως από μόνος του να προσδιορίσει με ακρίβεια την περιοχή του ουρανού απ' όπου προήλθε. Στην καλύτερη περίπτωση, μπορεί να μας πει από πού *δεν* προήλθε το σήμα, αποκλείοντας τις λίγες κατευθύνσεις στις οποίες ο ανιχνευτής είναι ουσιαστικά «τυφλός». Όταν όμως δύο ανιχνευτές καταγράφουν το ίδιο σήμα, μπορούμε να συγκρίνουμε τον ακριβή χρόνο άφιξης του σήματος σε καθέναν από αυτούς και, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα βαρυτικά κύματα ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός, να εκτιμήσουμε την περιοχή προέλευσής του στον ουρανό μέσω τριγωνισμού. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ παρόμοια με τον τρόπο που το κινητό μας τηλέφωνο χρησιμοποιεί τα σήματα GPS για να εντοπίσει τη θέση μας στη Γη. Όταν τρεις (ή περισσότεροι) ανιχνευτές καταγράφουν δεδομένα, μπορούμε να επαναλάβουμε αυτή τη διαδικασία τριγωνισμού περισσότερες φορές (μία για κάθε μοναδικό ζεύγος ανιχνευτών), βελτιώνοντας έτσι σημαντικά την ικανότητά μας να προσδιορίσουμε από ποιο σημείο του ουρανού προήλθε το σήμα.

Κατά την περίοδο O4a, μόνο οι δύο ανιχνευτές LIGO κατέγραφαν δεδομένα, γεγονός που περιορίζει σημαντικά την ικανότητά μας να προσδιορίζουμε τη θέση των σημάτων στον ουρανό. Ωστόσο, στην περίοδο O4b, το Virgo συμμετείχε στις παρατηρήσεις και η προσθήκη ενός τρίτου ανιχνευτή στο δίκτυο βελτίωσε θεαματικά την ακρίβεια εντοπισμού πηγών. Το καλύτερο παράδειγμα γι' αυτό αποτελεί η ανίχνευση GW240615_113620, η καλύτερα εντοπισμένη πηγή βαρυτικών κυμάτων μέχρι σήμερα, που καλύπτει περιοχή μόλις 6 τετραγωνικών μοιρών στον ουρανό (περίπου η περιοχή του ουρανού που καλύπτει ο αντίχειράς σας όταν τον κρατάτε τεντωμένο στο μήκος του χεριού). Συγκριτικά, ο καλύτερος εντοπισμός θέσης που είχε επιτευχθεί στον κατάλογο GWTC-4.0 ήταν 110 τετραγωνικές μοίρες (δηλαδή σχεδόν είκοσι φορές λιγότερο ακριβής), ενώ η περιοχή προέλευσης για πολλές άλλες ανιχνεύσεις εκτεινόταν σε χιλιάδες (ή ακόμη και δεκάδες χιλιάδες) τετραγωνικές μοίρες στον ουρανό.

Διευρύνοντας τη γνώση μας για το Σύμπαν!

Ο κατάλογος GWTC-5.0 αποτελεί ένα ακόμη σημαντικό ορόσημο στην εξερεύνηση του Σύμπαντος με βαρυτικά κύματα. Περίπου μία δεκαετία αργότερα από την [πρώτη ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων GW150914](#), περάσαμε από το ένα και μοναδικό επιβεβαιωμένο σήμα σε έναν κατάλογο σχεδόν 400 σημάτων. Αυτή η συνεχής αύξηση των ανιχνεύσεων με κάθε νέα παρατηρησιακή περίοδο μας επιτρέπει να κατανοούμε όλο και καλύτερα τους πληθυσμούς μελανών ωπών και αστέρων νετρονίων που υπάρχουν στο Σύμπαν.



Σχήμα 4: Ο κατάλογος GWTC-4.0 είχε αυξήσει εντυπωσιακά το συνολικό αριθμό ανιχνεύσεων, από περίπου 90 (GWTC-3.0) σε πάνω από 200 (GWTC-4.0). Έχοντας, μετά και το τέλος της περιόδου O4b, συνολικά 390 ανιχνεύσεις στον GWTC-5.0, έχουμε σχεδόν διπλασιάσει ξανά το μέγεθος του καταλόγου! Τα σήματα από το τρίτο και τελευταίο τμήμα της παρατηρησιακής περιόδου O4 (O4c) θα αναλυθούν και θα δημοσιευθούν σε επόμενη έκδοση του καταλόγου.

ΑΝΑΚΑΛΥΨΤΕ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ:

Επισκεφθείτε τις σελίδες μας:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/ (KAGRA)

Διαβάστε τα επιστημονικά άρθρα του καταλόγου GWTC-5.0:

- Εισαγωγή: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500701/public/>
ή στο arXiv: <https://arxiv.org/abs/2605.27223>
- Μεθοδολογία: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600166/public/>
ή στο arXiv: <https://arxiv.org/abs/2605.27224>
- Αποτελέσματα: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600152/public/>
ή στο arXiv: <https://arxiv.org/abs/2605.27225>

Τα δεδομένα του καταλόγου GWTC-5.0 είναι διαθέσιμα μέσω του Gravitational-Wave Open Science Center:

<https://gwosc.org/GWTC-5.0/>.

Απόδοση στα Ελληνικά - επιμέλεια: Παναγιώτης Ιωσήφ, Γιώργος Παππάς (από το αγγλικό πρωτότυπο που είναι διαθέσιμο [εδώ](#)).