

ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΗΣ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΜΕ ΒΑΡΥΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Σε μια νέα δημοσίευση της συνεργασίας LIGO-Virgo-KAGRA, χρησιμοποιούμε ένα σύνολο 47 πηγών βαρυτικών κυμάτων από τον πρόσφατα δημοσιευμένο κατάλογο [Gravitational-Wave Transient Catalog GWTC-3](#) για τη μέτρηση του τοπικού ρυθμού διαστολής του Σύμπαντος. Από τις κυματομορφές τους, υπολογίζουμε την απόσταση αυτών των πηγών του GWTC-3, οι οποίες περιλαμβάνουν τις συγχωνεύσεις διπλών συστημάτων μαύρων τρυπών, διπλών συστημάτων αστέρων νετρονίων και συστημάτων αστέρα νετρονίων-μαύρης τρύπας. Στη συνέχεια, αντλούμε πληροφορίες [ερυθρομετάθεσης](#) για αυτά τα διπλά συστήματα από τη μετρημένη κατανομή των μαζών τους ή από την κατανομή ερυθρομεταθέσεων που έχει χαρτογραφηθεί από τον κατάλογο γαλαξιών [GLADE+](#) και συνδυάζουμε αυτές τις μετρήσεις για να εξάγουμε μια νέα και σημαντικά βελτιωμένη εκτίμηση της [σταθεράς Hubble](#). Με την προσδοκώμενη πληθώρα ανιχνεύσεων βαρυτικών κυμάτων (BK) στα επόμενα χρόνια, η νέα μας μέθοδος για την ανίχνευση της κοσμικής διαστολής μπορεί σύντομα να ρίξει φως στην τρέχουσα «[διαφωνία Hubble](#)»: την έντονη και αινιγματική διαφωνία μεταξύ των μετρήσεων της σταθεράς Hubble που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους.

Κοσμολογία και Βαρυτικά Κύματα με λίγα λόγια

Στη δεκαετία του 1920 ο Georges Lemaître και ο Edwin Hubble ανακάλυψαν ότι το σύμπαν μας διαστέλλεται (βλ. [Εικόνα 1](#)). Αυτό το αποτέλεσμα έφερε επανάσταση στην κατανόησή μας για το σύμπαν και είναι η βάση της [Θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης](#), ενός από τους θεμέλιους λίθους της [κοσμολογίας](#) σήμερα.

Ο τοπικός ρυθμός διαστολής μετριέται με τη σταθερά του Hubble, που συμβολίζεται με H_0 και εκφράζεται σε μονάδες χιλιομέτρων ανά δευτερόλεπτο ανά [Megaparsec](#) (Mpc). Ωστόσο, μετά από σχεδόν έναν αιώνα, η τιμή της σταθεράς του Hubble παραμένει ανεπαρκώς προσδιορισμένη.



Εικόνα 1. Σχηματική αναπαράσταση της κοσμικής διαστολής, στην οποία οι γαλαξίες απομακρύνονται ο ένας από τον άλλο στην επιφάνεια ενός διατελλόμενου μπαλονιού. (Credit: Eugenio Bianchi, Carlo Rovelli & Rocky Kolb)

Υπάρχουν σαφείς ασυνέπειες μεταξύ των πιο εξελιγμένων μετρήσεων (κυρίως στην περιοχή 65 έως $80 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$) που χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους. Για παράδειγμα, μπορούμε να εκτιμήσουμε τη σταθερά του Hubble έμμεσα από μετρήσεις του πρώτου φωτός του Σύμπαντος, από όταν η ηλικία του ήταν περίπου 380.000 χρόνια, γνωστό ως κοσμικό υπόβαθρο μικροκυμάτων ή [CMB](#), και αυτή η προσέγγιση δίνει τιμές πολύ κοντά στο $H_0 = 68 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Εναλλακτικά, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη σταθερά του Hubble πιο άμεσα από τη μελέτη της λαμπρότητας των [υπερκαινοφανών τύπου Ia](#) και των παλλόμενων αστέρων γνωστών ως [Κηφειδών](#), η οποία δίνει τιμές πολύ κοντά στο $H_0 = 74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Αυτές οι τιμές βρίσκονται σε σοβαρή διάσταση, δεδομένων των πολύ μικρών αβεβαιότητων τους, και η απόκλιση είναι πολύ μεγάλη για να αποδοθεί απλώς στις αναπόφευκτες τυχαίες διακυμάνσεις που περιμένουμε από διαφορετικές μετρήσεις. Αυτή η αποκαλούμενη «[διαφωνία Hubble](#)» έχει γίνει, επομένως, ένα σημαντικό πρόβλημα για την κοσμολογία.

Εν τω μεταξύ, [από το 2015](#) έχουμε ανοίξει ένα εντελώς νέο παράθυρο για την παρατήρηση του Σύμπαντος - βασισμένο όχι σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα (δηλαδή φως, που παράγουν επιταχυνόμενα ηλεκτρικά φορτία) αλλά σε βαρυτικά κύματα (που παράγουν επιταχυνόμενες μάζες). Τα βαρυτικά κύματα είναι «κυματισμοί», ή διαταραχές, του χωροχρόνου. Προβλέφθηκαν από τον Albert Einstein το 1917 και η παρατήρησή τους είναι μια όμορφη επιβεβαίωση της θεωρίας του για τη [γενική σχετικότητα](#). Μεταξύ των ισχυρότερων πηγών βαρυτικών κυμάτων στο Σύμπαν είναι τα ζεύγη εξαιρετικά πυκνών, συμπηγών αντικειμένων όπως οι [μαύρες τρύπες](#) ή οι [αστέρες νετρονίων](#). Καθώς αυτά τα αντικείμενα περιφέρονται το ένα γύρω από το άλλο, δέσμια της βαρύτητας, χάνουν ενέργεια μέσω της εκπομπής BK και η τροχιά τους συρρικνώνεται μέχρι να συγχωνευθούν σε μια ενιαία μαύρη τρύπα.

Αν παρατηρήσουμε την εκπομπή BK από τη συγχώνευση ενός τέτοιου συμπαγούς διπλού συστήματος, η ανάλυση της καταμορφής και του τρόπου με τον οποίο εξελίσσεται, μας επιτρέπει [να μετρήσουμε απευθείας την απόσταση από το διπλό σύστημα](#). Αυτό είναι δραματικά διαφορετικό από άλλες, πιο παραδοσιακές, μεθόδους μέτρησης κοσμολογικών αποστάσεων (συμπεριλαμβανομένων των Κηφειδών και των υπερκαινοφανών τύπου Ia που αναφέρονται παραπάνω), οι οποίες βασίζονται σε πολλαπλά στάδια βαθμονόμησης μέσω της [κοσμικής κλίμακας αποστάσεων](#) όπως την ονομάζουν οι αστρονόμοι.

Αυτή η εξαιρετική ιδιότητα του να είναι [αυτο-βαθμονομημένοι](#) δείκτες απόστασης, ικανοί να παρακάμψουν την κοσμική κλίμακα αποστάσεων, έχει διεγείρει το ενδιαφέρον για αυτές τις πηγές BK, οι οποίες ονομάζονται «[πρότυπες σειρήνες](#)». Εάν η άμεση απόσταση που μετράται από μια πρότυπη σειρήνα μπορεί να συνδυαστεί με ανεξάρτητες πληροφορίες για την ταχύτητα απομάκρυνσης της πηγής από εμάς - την οποία μπορούμε να συμπεράνουμε από την [ερυθρομετάθεση](#) του γαλαξία που φιλοξενεί την πηγή - μπορούμε να μετρήσουμε τη σταθερά του Hubble.

Στροφή στη σκοτεινή πλευρά

Για μια συγχώνευση διπλού συστήματος αστέρων νετρονίων συνοδευόμενη από εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (π.χ. οπτικής), η ερυθρομετάθεση του γαλαξία όπου βρίσκεται η πηγή είναι εύκολο να μετρηθεί. Το πρώτο διπλό σύστημα αστέρων νετρονίων που ανακαλύφθηκε σε BK, το [GW170817](#), είχε μία λαμπρή συνιστώσα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αυτό οδήγησε στον άμεσο εντοπισμό του γαλαξία ([NGC4993](#)) που φιλοξενούσε το σύστημα και η ερυθρομετάθεσή του συνδυάστηκε με την άμεση μέτρηση με BK της απόστασης από το GW170817, για να ληφθεί η πρώτη [μέτρηση της σταθεράς Hubble μέσω πρότυπης σειρήνας βαρυτικών κυμάτων](#).

Δυστυχώς, οι περισσότερες συγχωνεύσεις διπλών συστημάτων, και ειδικότερα οι συγχωνεύσεις διπλών συστημάτων μαύρων τρυπών (ΔΣΜΤ), δεν συνοδεύονται από εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ωστόσο, παρά την έλλειψη μίας τέτοιας συνιστώσας ακτινοβολίας που να υποδεικνύει απευθείας τον γαλαξία όπου βρίσκεται κάθε πηγή, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις παρατηρήσεις μας σε BK, για να αποκτήσουμε πληροφορίες σχετικά με τη ερυθρομετάθεση των πηγών.

Πρώτον, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι οι μάζες των ΔΣΜΤ που *μετράμε*, στο σύστημα αναφοράς των ανιχνευτών μας LIGO και Virgo, μετατοπίζονται προς το ερυθρό από την κοσμική διαστολή – δηλαδή οι μάζες των ΔΣΜΤ φαίνονται να είναι μεγαλύτερες από ό,τι είναι πραγματικά, ακριβώς όπως το φως από έναν γαλαξία που απομακρύνεται από εμάς «απλώνεται» ομοίως σε μεγαλύτερα (δηλαδή ερυθρότερα) μήκη κύματος. Αυτό σημαίνει ότι η στατιστική κατανομή των μαζών των ΔΣΜΤ που μετράμε μπορεί επίσης, κατ' αρχήν, να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη στατιστική κατανομή των ερυθρομεταθέσεων του πληθυσμού των πηγών μας. Μπορούμε να συνδυάσουμε αυτές τις πληροφορίες με τις μετρημένες αποστάσεις των πηγών για να συμπεράνουμε τη σταθερά Hubble.

Δεύτερον, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις παρατηρήσεις BK για να περιορίσουμε τη θέση της πηγής στον ουρανό - και με αυτόν τον τρόπο να περιορίσουμε τον γαλαξία που φιλοξενεί την πηγή σε ένα σύνολο υποψηφίων γαλαξιών σε αυτήν την περιοχή. Ο συνδυασμός πληροφοριών ερυθρομετάθεσης που μετρήθηκαν απευθείας για όλους αυτούς τους πιθανούς οικοδεσπότες-γαλαξίες μας επιτρέπει στη συνέχεια να συμπεράνουμε το H_0 στατιστικά – όπως περιγράφηκε για πρώτη φορά σε μια [θεμελιώδη εργασία του 1986](#) από τον Bernard Schutz.

Συνεπώς, οι παρατηρήσεις μας των BK, ακόμη και χωρίς ηλεκτρομαγνητικές συνιστώσες, μπορούν να χρησιμεύσουν ως «σκοτεινές πρότυπες σειρήνες».

Πώς γίνεται αυτό;

Για να κατανοήσουμε καλύτερα πώς μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις ερυθρομετατοπισμένες μάζες του πληθυσμού μας από ΔΣΜΤ για να μετρήσουμε τη σταθερά Hubble, ας υποθέσουμε ότι οι μάζες των μαύρων τρυπών στο σύμπαν μας ακολουθούν μια κατανομή με μια ξεκάθαρη κορυφή, λόγω κάποιας φυσικής διαδικασίας που σχετίζεται με το σχηματισμό τους. (Στην πραγματικότητα, υπάρχουν ενδείξεις υπέρ της ύπαρξης μιας τέτοιας κορυφής με βάση τη θεωρητική πρόβλεψη ότι οι αστρικές μάζες μαύρες τρύπες έχουν μία μέγιστη επιτρεπόμενη μάζα, δεδομένου ότι αστέρες μεγαλύτερης μάζας θα εκρήγνυνταν με τόσο βίαιο τρόπο που τίποτα δεν θα απέμεινε – ένα φαινόμενο γνωστό ως [υπερκαινοφανής αστάθειας ζεύγους](#)). Αν και είμαστε σε θέση να μετρήσουμε μόνο τις ερυθρομετατοπισμένες μάζες κάθε ΔΣΜΤ, μπορούμε εντούτοις να αναμενουμε ότι η παρατηρούμενη κατανομή αυτών των μαζών θα φέρει επίσης ένα αποτύπωμα της κορυφής - αν και μετατοπισμένο προς το ερυθρό από την κοσμική διαστολή. Έτσι, η *παρατηρούμενη* κορυφή στην κατανομή μάζας μας πληροφορεί για τις ερυθρομετατοπίσεις των ΔΣΜΤ και μπορούμε να συνδυάσουμε αυτήν την πληροφορία με τις μετρημένες αποστάσεις τους για να συμπεράνουμε τον ρυθμό διαστολής του Σύμπαντος.

Η δεύτερη στατιστική μας μέθοδος για τη μέτρηση του H_0 περιλαμβάνει τη χρήση ενός καταλόγου γαλαξιών, γνωστού ως GLADE+, ο οποίος συγκεντρώνει συστηματικά πληροφορίες σχετικά με την ερυθρομετάθεση, τη λαμπρότητα, το χρώμα και άλλες ιδιότητες για (κυριολεκτικά!) εκατομμύρια γαλαξίες στην περιοχή μας στο Σύμπαν. Εφόσον τα δεδομένα BK μας λένε για τη θέση στον ουρανό και την απόσταση κάθε πρότυπης σειρήνας, μπορούμε να αντιστοιχίσουμε αυτές τις πληροφορίες με τον κατάλογο GLADE+ για να εντοπίσουμε πιθανούς οικοδεσπότες-γαλαξίες στους οποίους θα μπορούσε να βρίσκεται η σειρήνα. Στην πράξη αυτή η συσχέτιση εκφράζεται ως μία πιθανότητα επειδή ο προσδιορισμός μας για τη θέση της σειρήνας στον ουρανό δεν είναι συνήθως πολύ ακριβής, επομένως δεν θα έχει εντοπιστεί μόνο ένας πιθανός οικοδεσπότης-γαλαξίας.

Επισκεφθείτε τις ιστοσελίδες μας:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



Ανακαλύψτε περισσότερα

Διαβάστε την επιστημονική εργασία:

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2100185/public/main>

Δημοσίευση δεδομένων GWTC-3:

<https://www.gw-openscience.org/>

Αντίθετα, μπορεί να υπάρχουν εκατοντάδες, ή ακόμα και χιλιάδες, πιθανοί οικοδεσπότες-γαλαξίες – ο καθένας με διαφορετική πιθανότητα να είναι ο αληθινός. Ο συσχετισμός εξαρτάται επίσης από την τιμή της σταθεράς Hubble, καθώς αυτή καθορίζει τη σχέση μεταξύ απόστασης και ερυθρομετάθεσης. Πρέπει επίσης να λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι οι έρευνες για τους γαλαξίες είναι *ελλιπείς* – δηλαδή δεν περιέχουν όλους τους γαλαξίες στον όγκο που έχει ερευνηθεί, καθώς, για παράδειγμα, οι πιο απομακρυσμένοι γαλαξίες που είναι μικρότεροι ή λιγότερο φωτεινοί μπορεί να είναι πολύ αμυδροί για να ανιχνευθούν. Ωστόσο, υπολογίζοντας προσεκτικά τον μέσο όρο των ερυθρομεταθέσεων των πιθανών οικοδεσποτών-γαλαξιών, μπορούμε να χαρακτηρίσουμε την ερυθρομετάθεση κάθε σειρήνας - και έτσι να συνδυάσουμε αυτές τις πληροφορίες με την απόσταση της σειρήνας μέσω BK για να μετρήσουμε ξανά την τιμή του H_0 .

Πως τα πήγαμε;

Η δημοσίευσή μας παρουσιάζει τα αποτελέσματα της ανάλυσής μας από τις δύο προηγούμενες προσεγγίσεις: την βασισμένη στους πληθυσμούς και την μέθοδο καταλόγου, που εφαρμόστηκε στα γεγονότα BK που επιλέξαμε από τον κατάλογο GWTC-3.

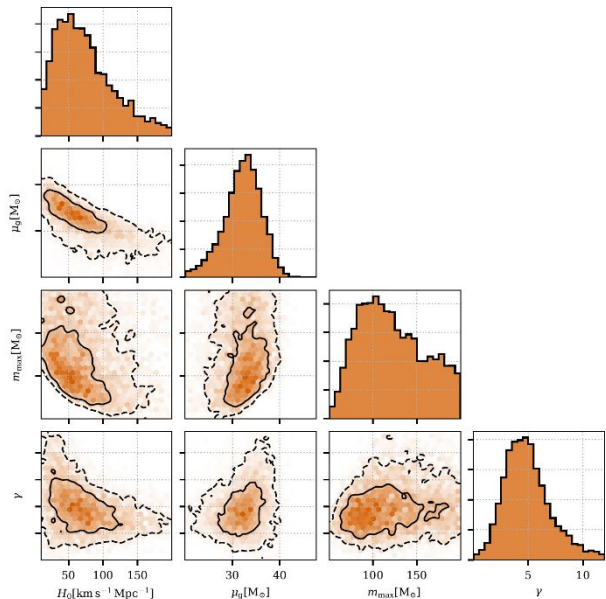
Για την μέθοδο με τους πληθυσμούς, χρησιμοποιώντας την κατανομή ερυθρομετατοπισμένων μαζών ΔΣΜΤ, είναι η πρώτη φορά που μια ανάλυση έχει θέσει ταυτόχρονα περιορισμούς τόσο στις ιδιότητες του πληθυσμού των ΔΣΜΤ όσο και στις κοσμολογικές παραμέτρους της διαστολή του σύμπαντος. Στην πραγματικότητα, στην ανάλυση μας δεν έγινε μόνο προσαρμογή της σταθεράς Hubble αλλά επίσης και των αδιάστατων παραμέτρων που προσδιορίζουν την ποσότητα [σκοτεινής ύλης](#) και [σκοτεινής ενέργειας](#) στο Σύμπαν, συνεισφέροντας σε αυτό που έχει γίνει γνωστό ως «Καθιερωμένο Μοντέλο» στην κοσμολογία – και που συνήθως αναφέρεται ως «[Λάμδα CDM](#)».

Βρήκαμε ότι τα δεδομένα από τον GWTC-3 δεν θέτουν ακόμα κάποιο χρήσιμο περιορισμό στην σκοτεινή ύλη και στην σκοτεινή ενέργεια του Σύμπαντος. Αυτό δεν εκπλήσσει, αφού αυτές οι παράμετροι πρέπει να γίνονται πιο σημαντικές για ΔΣΜΤ σε μεγαλύτερη απόσταση (και ερυθρομετάθεση) από τις πηγές του GWTC-3 που μελετήσαμε. Από την άλλη πλευρά, τα αποτελέσματα μας όντως δείχνουν ότι οι μελλοντικές προοπτικές να μάθουμε περισσότερα σχετικά με την σκοτεινή ύλη και την σκοτεινή ενέργεια από τον πληθυσμό ΔΣΜΤ είναι ενθαρρυντικές, καθώς οι ανιχνευτές μας θα γίνουν πιο ευαίσθητοι και θα παρατηρούμε πιο μακρινές σειρήνες.

Από την άλλη τα αποτελέσματα για την σταθερά του Hubble που προκύπτουν από την μέθοδο βασισμένη σε πληθυσμούς προσφέρουν περισσότερη πληροφορία. Η **Εικόνα 2** δείχνει τους συνδυασμένους περιορισμούς που εξάγουμε για την H_0 και για τις παραμέτρους του μοντέλου πληθυσμού: αυτή η εικόνα δείχνει ότι (σε ότι αφορά το συγκεκριμένο μοντέλο) τα δεδομένα φαίνεται να ευνοούν κάπως χαμηλότερες τιμές της σταθεράς Hubble. Ο συνδυασμός των περιορισμών πληθυσμού με την μέτρηση της H_0 από το [GW170817](#) και την [ηλεκτρομαγνητική του συνιστώσα](#), εκτιμούμε μια τιμή $H_0 = 68^{+13}_{-7}$ km s⁻¹ Mpc⁻¹, που αποτελεί μια βελτίωση κατά 13% του [προηγούμενου αποτελέσματος](#) που χρησιμοποιούσε ΔΣΜΤ από τον πρώτο κατάλογο [GWTC-1](#). (Σημειωτέον ότι εξαιτίας της μεθόδου εκτίμησης αποστάσεων από τα BK ο υπολογισμός μας για την αβεβαιότητα για την H_0 έχει 'μονόπλευρη' κατανομή).

Τα αποτελέσματα από την δεύτερη μέθοδο, που χρησιμοποιούν τον GLADE+ κατάλογο, είναι επίσης

ενθαρρυντικά. Σε αυτή την περίπτωση, πρώτα υποθέτουμε ένα μοντέλο για τις ιδιότητες του πληθυσμού ΔΣΜΤ: υιοθετούμε κατάλληλες παραμέτρους για το μοντέλο (το οποίο αποτελείται από έναν [νόμο δύναμης](#) και μια [Γκαουσιανή κορυφή](#) για να περιγράψει την κατανομή μαζών μελανών σπών) το οποίο δίνει την καλύτερη προσαρμογή στον [παρατηρούμενο πληθυσμό ΔΣΜΤ](#). Συνδυάζοντας την πληροφορία από τον GLADE+ με αυτές τις σταθερές παραμέτρους του μοντέλου για τα ΔΣΜΤ, εκτιμούμε μια τιμή $H_0 = 68^{+8}_{-6}$ km s⁻¹ Mpc⁻¹, που αντιπροσωπεύει μια βελτίωση κατά 41% σε σχέση με την [αντίστοιχη εκτίμηση του GWTC-1](#). Η **Εικόνα 3** δείχνει το καινούριο αποτέλεσμα, όπου βλέπουμε ότι η τιμή της σταθεράς Hubble είναι συνεπής με τις εκτιμήσεις της H_0 , τόσο από το CMB όσο και από τους τύπου Ia υπερκαινοφανείς και τους Κηφείδες (που απεικονίζονται ως κάθετες ζώνες χρώματος magenta και πράσινου αντίστοιχα), αν και δεν είναι ακόμα αρκετά ακριβείς για να βοηθήσει στην επίλυση της «διαφωνίας Hubble» ανάμεσα σε αυτές τις μετρήσεις.

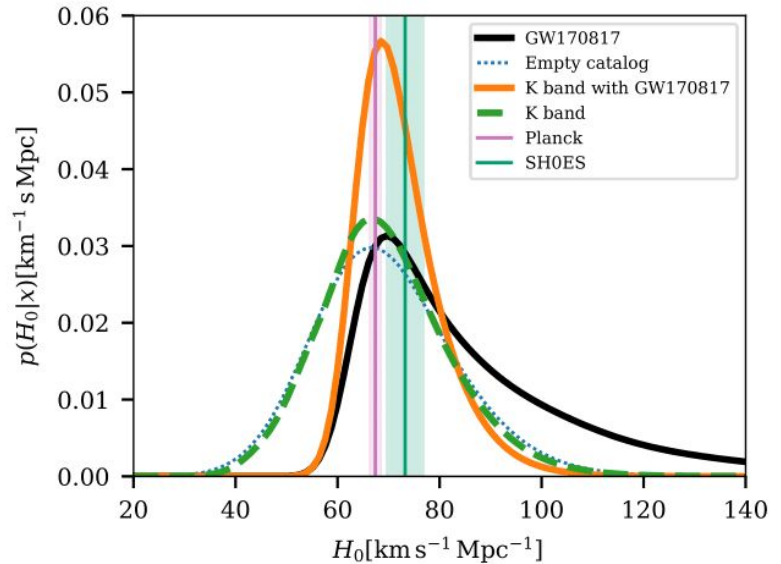


Εικόνα 2. (Εικόνα 5 από την δημοσίευσή. [Εκ των υστέρων κατανομές πιθανοτήτων](#) για τις τιμές της σταθεράς Hubble (H_0) και τις παραμέτρους του μοντέλου μας για την κατανομή των μαζών στον πληθυσμό των ΔΣΜΤ, που βρέθηκαν από κοινού από την ανάλυση βασισμένη σε πληθυσμούς επιλεγμένων πηγών ΔΣΜΤ από τον κατάλογο GWTC-3. Τα δεξιότερα πλαίσια σε κάθε σειρά δείχνουν την κατανομή πιθανότητας για μεμονωμένες παραμέτρους, με την κατανομή της H_0 να φαίνεται πάνω-πάνω στην εικόνα. Τα άλλα πλαίσια δείχνουν την από κοινού πιθανότητα κατανομής για κάθε ζεύγος παραμέτρων. Οι συμπαγείς και διακεκομμένες γραμμές περικλείουν τις περιοχές όπου υπάρχει 90% και 50% εμπιστοσύνη αντίστοιχα, να βρίσκονται οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων.

Περίληψη και μελλοντικές προοπτικές

Αν και οι νέοι περιορισμοί για την σταθερά Hubble βελτιώνουν τα προηγούμενα δημοσιευμένα αποτελέσματα, αναγνωρίζουμε ότι εξαρτώνται από τις λεπτομέρειες του μοντέλου του πληθυσμού ΔΣΜΤ. Για σχεδόν όλα τα γεγονότα του GWTC-3 που αναλύσαμε με τη μέθοδο του καταλόγου, τα αποτελέσματα μας επηρεάζονται ισχυρά από τις υποθέσεις που κάναμε για το μοντέλο πληθυσμού. Το μόνο γεγονός που δεν ενέπιπτε σε αυτή την περίπτωση είναι το [GW190814](#), το οποίο ήταν πολύ καλύτερα εντοπισμένο στον ουρανό σε σχέση με τις άλλες σκοτεινές σειρήνες, που σημαίνει ότι το ταίριασμα ανάμεσα στον όγκο εντοπισμού και στα δεδομένα GLADE+ παρείχε χρήσιμες πληροφορίες για την σταθερά του Hubble.

Στα προσεχή χρόνια οι ανιχνευτές [LIGO](#) και [VIRGO](#) θα αναβαθμιστούν περαιτέρω για να βελτιώσουν την ευαισθησία τους και θα πλαισιωθούν αρχικά από το [KAGRA](#) (κατά την [τέταρτη περίοδο παρατήρησης O4](#), που προγραμματίζεται για το 2022) και κατόπιν αργότερα μέσα στην δεκαετία του 20 το [LIGO India](#). Αυτό το ενισχυμένο δίκτυο ανιχνευτών αναμένεται να δώσει έναν κατά πολύ αυξημένο αριθμό από καλά εντοπισμένες φωτεινές και σκοτεινές σειρήνες, και έτσι προσδοκούμε ότι οι περιορισμοί στη σταθερά Hubble μέσω της μεθόδου καταλόγου θα βελτιωθούν – ειδικότερα αν συμπεριλάβουμε νέους πιο πλήρεις καταλόγους πιο μακρινών γαλαξιών με υψηλότερη ερυθρομετάθεση. Με σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς ανιχνεύσεων ΔΣΜΤ να προσδοκούνται στα προσεχή χρόνια, μπορούμε επίσης να αναμένουμε ότι θα βελτιώσουμε τα αποτελέσματα μελλοντικών εφαρμογών της μεθόδου βασισμένης σε πληθυσμούς. Σε λίγα χρόνια έχουμε να προσβλέπουμε σε αναλύσεις που θα περιορίσουν ταυτόχρονα τόσο τις ιδιότητες του πληθυσμού ΔΣΜΤ (λαμβάνοντας υπόψη περισσότερο γενικά μοντέλα από αυτά της συγκεκριμένης δημοσίευσης) όσο και τις παραμέτρους του κοσμολογικού μας μοντέλου – που θα περιλαμβάνουν όχι μόνο τη σταθερά Hubble αλλά επίσης και την επιρροή της σκοτεινής ύλης και της σκοτεινής ενέργειας στην κοσμική διαστολή. Οι προοπτικές για την κοσμολογία BK φαίνονται λαμπρές.



Εικόνα 3. (Εικόνα 8 από την δημοσίευση). [Εκ των υστέρων κατανομές πιθανότητας](#) για την σταθερά (H_0) που αντιστοιχούν σε διαφορετικές αναλύσεις. Κάθε κατανομή πιθανότητας είναι μια καμπύλη που αντιπροσωπεύει την καλύτερη εκτίμηση για την τιμή της H_0 μετά την πραγματοποίηση της ανάλυσης. Στην συμπαγή μαύρη γραμμή σχεδιάζεται το αποτέλεσμα χρησιμοποιώντας μόνο το BNS γεγονός GW170817 και της ηλεκτρομαγνητικής του συνιστώσας. Η μπλε εστιασμένη γραμμή δείχνει το αποτέλεσμα της ανάλυσης χωρίς να χρησιμοποιείται κάποια πληροφορία καταλόγου γαλαξιών. Με συμπληρωμένη πορτοκαλί χρώμα και με διακεκομμένο πράσινο, σχεδιάζουμε τα αποτελέσματα αναλύσεων που λαμβάνουν υπόψη τον κατάλογο γαλαξιών με και χωρίς να συμπεριλάβουμε το BNS γεγονός. (Σημειώστε ότι χρησιμοποιείται ο κατάλογος γαλαξιών της K-ζώνης, που συνενώνει δεδομένα γαλαξιών για ένα συγκεκριμένο εύρος μηκών κύματος με κέντρο το υπέρυθρο). Τέλος, οι δύο κάθετες ζώνες (ματζέντα και σκούρο πράσινο) δείχνουν τους περιορισμούς στην H_0 από το CMB (Planck) και τους υπερκαινοφανείς + Κηφειδες (SHOES) αντίστοιχα.

ΓΛΩΣΣΑΡΙ

GLADE+: νέα, εκτεταμένη συλλογή καταλόγων γαλαξιών, που περιέχει δεδομένα για περίπου 22 εκατομμύρια γαλαξίες και χρησιμοποιείται για να παρέχει πληροφορίες ερυθρομετάθεσης για γαλαξίες που φιλοξενούν γεγονότα BK. Ένα ελεύθερα προσβάσιμο επιστημονικό άρθρο που περιγράφει τον αρχικό GLADE κατάλογο είναι διαθέσιμο [εδώ](#).

Megaresize: μονάδα απόστασης που χρησιμοποιείται στην κοσμολογία. Ένα megarsec είναι ίσο με ένα εκατομμύριο parsecs, όπου ένα parsec είναι ίσο με περίπου τρία και ένα τέταρτο έτη φωτός ή 3.086×10^{16} μέτρα.

Σταθερά Hubble: παράμετρος που χρησιμοποιείται για να μετρήσει ο ρυθμός διαστολής του σύμπαντος. Η σημερινή τιμή της συμβολίζεται με H_0 και έχει μετρηθεί ότι είναι περίπου $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

Θεωρία Μεγάλης Έκρηξης: μοντέλο για την προέλευση και την εξέλιξη του παρατηρήσιμου σύμπαντος η οποία περιγράφει πως ξεκίνησε το σύμπαν περίπου 14 δισεκατομμύρια πριν και έχει διασταλεί από μια αρχικά πολύ θερμή και πυκνή κατάσταση. Η Θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης είναι ευρέως αποδεκτή καθώς εξηγεί πολλές από τις παρατηρούμενες ιδιότητες του σύμπαντος συμπεριλαμβανομένης της [πυρρίνης των υπερασφαιδρών γιγαντιών σπειριών](#) και της ύπαρξης της [κοσμικής μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου](#).

Κοσμικό Μικροκυματικό Υπόβθρο (CMB): Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προέρχεται από ένα αρχικό στάδιο της εξέλιξης του σύμπαντος, όταν ήταν περίπου 380.000 ετών. Η CMB είναι επίσης γνωστή ως "εναπομεινόμενα ακτινοβολία" που έμεινε μετά την Μεγάλη Έκρηξη. Για περισσότερες πληροφορίες δείτε [εδώ](#).

Υπερκαινοφανής Τύπου Ia: Συγκεκριμένος μακρινός έκρηξης ενός λευκού νάνου, που συσσωρεύει υλικό από ένα κόκκινο γίγαντα συνοδού αστέρα, του οποίου η μάζα γίνεται μεγαλύτερη από το [όριο που Chandrasekhar](#), των $1.4 \text{ ηλιακών μάζων}$. Οι αποστάσεις υπερκαινοφανών τύπου Ia μπορούν να εκτιμηθούν αξιόπιστα, καθώς όλοι έχουν βρεθεί ότι εκρήκνυνται με παρόμοια μείωση ενεργη [αυξάνοντας](#) – καθιστώντας τα χρήσιμα [πυλάκια](#).

Κηφειδες: τύπος παλλόμενου μεταβλητού αστέρα που υφίσταται περιοδικές αλλαγές στην ακτίνα και στην θερμοκρασία του, οδηγώντας σε κανονικές, περιοδικές αλλαγές στην [αυξανόμενη](#) του. Μετρώντας την περίοδο ταλάντωσης τους, οι αστρονόμοι μπορούν αξιόπιστα να εκτιμήσουν την απόσταση των Κηφειδών μεταβλητών.

Κοσμική κλίμακα αποστάσεων: ο συνδυασμός μεθόδων με τις οποίες οι αστρονόμοι καθορίζουν την απόσταση των αντικειμένων στο σύμπαν. Οι αποστάσεις των απομακρυσμένων αντικειμένων, οι οποίες συνήθως βασίζονται σε εμπειρικές σχέσεις των ιδιοτήτων τους, κατασκευάζονται με περισσότερο απευθείας, γεωμετρικές μετρήσεις αποστάσεων κοντινών αντικειμένων – συνήθως μέσα στον Γαλαξία μας. Για περισσότερες πληροφορίες δείτε [εδώ](#).

Μαύρη τρύπα: Μια περιοχή του χωρόχρονου που δημιουργείται από μια εξαιρετικά συμπυκνωμένη μάζα, όπου η βαρύτητα είναι τόσο ισχυρή που εμποδίζει οτιδήποτε, συμπεριλαμβανομένου του φωτός, να διαφύγει.

Αστέρας νετρονίων: Κατάλοιπο της έκρηξης υπερκαινοφανούς που υπερέχει ένα αστρο με μάζα μεταξύ 10 και 25 φορές την μάζα του ήλιου μας. Οι τυπικοί αστέρες νετρονίων έχουν μάζα περίπου 1-2 ηλιακές μάζες και ακτίνα περίπου 10-15 χιλιόμετρα, κάτι που τους καθιστά ως κάποια από τα πιο συμπυκνωμένα αντικείμενα που έχουν ανακαλυφθεί μέχρι τώρα.

Υπερκαινοφανής αστάθειας ζεύγους (PISN): ένας τύπος υπερκαινοφανούς έκρηξης που έχει προβλεφθεί ότι λαμβάνει χώρα σε ένα αστρο με μάζα μεγαλύτερη από περίπου 130 ηλιακές μάζες. Η παραγωγή [ζευγών ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων](#) στον πυρήνα του αστρού προκαλεί μια δραματική πτώση της πίεσης που συγκρατεί το αστρο, οδηγώντας σε μια ανεξέλεγκτη θερμομητρική έκρηξη η οποία δεν αφήνει πίσω της αστρικό κατάλοιπο.

Ερυθρομετάθεση: Αύξηση του μήκους κύματος (ήχου, φωτός ή βαρυτικών κυμάτων) λόγω της κίνησης της πηγής σε σχέση με τον παρατηρητή. Λόγω της [κοσμολογικής διαστολής του σύμπαντος](#), αντικείμενα όπως οι γαλαξίες απομακρύνονται από εμάς, έτσι το φως και κάθε άλλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προέρχεται από αυτούς έχει μεγαλύτερο μήκος κύματος.

Σκοτεινή ύλη: Μυστηριώδης μορφή ύλης που αποτελεί περίπου το 85% της μάζας του Σύμπαντος. Θεωρείται σκοτεινή διότι δεν εκπέμπει φως ή αλληλεπιδρά με ηλεκτρομαγνητικό τρόπο. Πολλές θεωρίες προβλέπουν ότι πρόκειται για ένα είδος θεμελιώδους σωματίδιου, αλλά είναι επίσης ενδεχόμενο και η πιθανότητα τα σκοτεινότερα αντικείμενα που γνωρίζουμε (οι μαύρες τρύπες) να αποτελούν επίσης μια ανισοστάθια μάζα ανισοστάθια σκοτεινής ύλης.

Σκοτεινή ενέργεια: Μυστηριώδης άγνωστο σωματίδιο της ύλης και του ενεργειακού περιεχομένου του σύμπαντος, που κυριαρχεί στην συμπεριφορά του σύμπαντος στις μεγαλύτερες κλίμακες που και πιστεύεται ότι προκαλεί την [αυξανόμενη διαστολή](#) του. Το απλούστερο μοντέλο για την σκοτεινή ενέργεια είναι αυτό της λεγόμενης κοσμολογικής σταθεράς που ασκεί αρνητική πίεση, κάτι που προκαλεί επιταχυνόμενη διαστολή.

Εκ των υστέρων κατανομή πιθανότητας: φράση για γραφική παράσταση που δείχνει πώς πιθανώς είναι διαφορετικές τιμές μιας δεδομένης φυσικής ποσότητας, μετά την ανάλυση δεδομένων, που έχουν εκτιμηθεί μέσω μια διαδικασίας γνωστή ως [Μπιναύγιου Εκτίμηση](#).