

ΕΞΑΚΟΛΟΥΘΕΙ Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΑΪΝΣΤΑΙΝ ΓΙΑ ΤΗ ΒΑΡΥΤΗΤΑ ΝΑ ΙΣΧΥΕΙ ΜΕΤΑ ΤΙΣ ΤΕΛΕΥΤΑΙΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ LIGO/VIRGO/KAGRA;

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα βαρυτικά κύματα παράγονται από μάζες που επιταχύνονται ανομοιόμορφα μεταφέροντας πληροφορίες για τις πηγές τους, και περιγράφονται συνήθως ως κυματισμοί στην καμπυλότητα του χωροχρόνου. Η [Γενική Θεωρία της Σχετικότητας \(ΓΘΣ\) του Αϊνστάιν](#) προβλέπει μετρήσιμες ιδιότητες των βαρυτικών κυμάτων. Σύμφωνα με την ΓΘΣ, αυτά τα κύματα ταξιδεύουν με την [ταχύτητα του φωτός](#), ανεξάρτητα από τη συχνότητα του κύματος. Η θεωρία προβλέπει επίσης ότι τα κύματα θα έχουν δύο ανεξάρτητα [είδη πόλωσης](#) που αναφέρονται ως «κατακόρυφη» και «διαγώνια». Επιπλέον, η ΓΘΣ κάνει προβλέψεις για τη δυναμική του χωροχρόνου που οδηγεί στη δημιουργία βαρυτικών κυμάτων, για παράδειγμα, στην περίπτωση της συγχώνευσης μελανών σπών ή/και αστέρων νετρονίων. Οι ανιχνεύσεις του δικτύου ανιχνευτών advanced LIGO/Virgo βαρυτικών κυμάτων που παράγονται από τη συγχώνευση διπλών συστημάτων που αποτελούνται από μελανές σπές και αστέρια νετρονίων παρέχουν, ως εκ τούτου, μια εκπληκτική ευκαιρία να επαληθεύσουμε τις προβλέψεις της ΓΘΣ και να διερευνήσουμε την πιθανότητα για την ύπαρξη νέας φυσικής πέρα από της ΓΘΣ. Μετά την πρώτη ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων το 2015, έχουμε παρατηρήσει ένα πλήθος γεγονότων εκπομπής βαρυτικών κυμάτων. Το κοινό όλων αυτών των γεγονότων είναι ότι πρόκειται για παροδικά σήματα που προκλούνται κατά τη συγχώνευση συμπαγών αντικειμένων. Τα γεγονότα αυτά περιλαμβάνουν την σπειροειδή προσέγγιση που οδηγεί τελικά στη συγχώνευση ζευγών μαύρων σπών, ζευγών αστέρων νετρονίων ή ενός αστέρα νετρονίων και μιας μαύρης τρύπας. Τα σήματα βαρυτικών κυμάτων από αυτά τα γεγονότα χαρακτηρίζονται από αυξανόμενο πλάτος και συχνότητα που λαμβάνει χώρα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλες μορφές βαρυτικών κυμάτων που ακόμη αναζητούμε. Για παράδειγμα, σήματα που παράγονται από πηγές που εκπέμπουν συνεχώς βαρυτικά κύματα με σχετικά σταθερή συχνότητα και πλάτος.

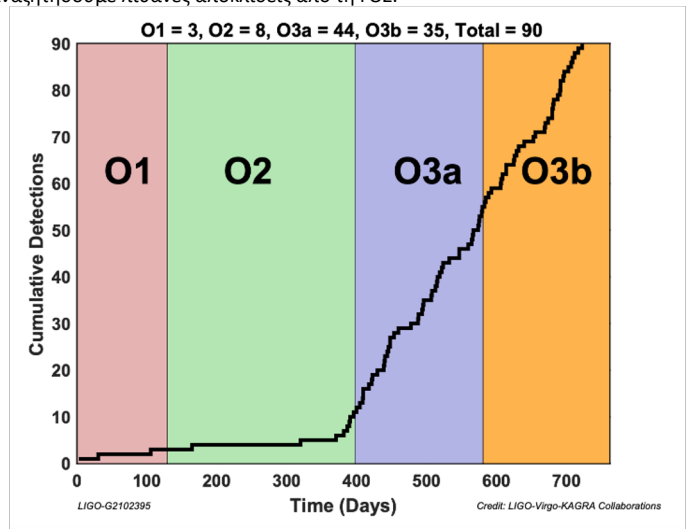
Σύμφωνα με τον πιο πρόσφατο κατάλογο παροδικών βαρυτικών κυμάτων GWTC-3, οι ανιχνευτές LIGO/Virgo έχουν ήδη ανιχνεύσει περίπου 90 συγχωνεύσεις συμπαγών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των ζευγών μελανών σπών, των ζευγών αστέρων νετρονίων και των ζευγών αστέρων νετρονίων-μαύρων τρυπών. Μεταξύ των 90 γεγονότων, [δημοσιεύθηκαν για πρώτη φορά](#) 35 συγχωνεύσεις συμπαγών συστημάτων κατά το δεύτερο μισό της τρίτης περιόδου παρατήρησης (O3b). Σε [αυτή την εργασία](#), συνδυάζουμε τα νέα παρατηρησιακά δεδομένα με τα παλαιότερα δεδομένα, ώστε να αναζητήσουμε πιθανές αποκλίσεις από τη ΓΘΣ.

Κάθε πείραμα εκτελεί μετρήσεις παρουσία θορύβου και οι ανιχνευτές βαρυτικών κυμάτων δεν αποτελούν εξαίρεση. Αναζητώντας αποκλίσεις από τη ΓΘΣ, κινδυνεύουμε, εξαιτίας ορισμένων τύπων θορύβου που υπάρχουν στον ανιχνευτή και μπορούν να τις μιμηθούν, να ισχυριστούμε λανθασμένα την ύπαρξη κάποιας απόκλισης χωρίς αυτή να υπάρχει πραγματικά. Ως εκ τούτου, περιορίζουμε την ανάλυσή μας μόνο σε «τρανταχτά» γεγονότα, των οποίων τα σήματα αναμένεται να μοιάζουν με τον θόρυβο του ανιχνευτή μόνο μία φορά στα 1000 χρόνια ή ακόμη περισσότερο. Αυτό μας δίνει τελικά 15 γεγονότα της περιόδου O3b που αναλύονται και για το καθένα πραγματοποιούμε δέκα διαφορετικούς ελέγχους αναζητώντας αποκλίσεις από την ΓΘΣ. Μια περίληψη των αποτελεσμάτων περιγράφεται παρακάτω.

ΔΟΚΙΜΑΣΙΕΣ ΣΥΝΕΠΕΙΑΣ

Η συνολική συμφωνία του σήματος με τα δεδομένα: Έλεγχος του Υπολείμματος

Χρησιμοποιούμε κυματομορφές στην ΓΘΣ για να ανιχνεύσουμε και να ερμηνεύσουμε γεγονότα βαρυτικών κυμάτων. Ο πιο άμεσος έλεγχος της ΓΘΣ που μπορούμε να εκτελέσουμε είναι να αφαιρέσουμε από τα παρατηρούμενα δεδομένα την [κυματομορφή εκείνη της ΓΘΣ](#) που ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα. Το υπόλειμμα αυτής της διαδικασίας θα πρέπει να είναι σαν το θόρυβο του ανιχνευτή, εάν η ΓΘΣ είναι σωστή. Για όλα τα γεγονότα που μελετήθηκαν, βρίσκουμε ότι το υπόλειμμα ταιριάζει με το θόρυβο του ανιχνευτή, επιβεβαιώνοντας τη συμφωνία των δεδομένων με τις προβλέψεις της ΓΘΣ.



Σχήμα 1: Η διάρκεια των τριών πρώτων περιόδων παρατήρησης των ανιχνευτών advanced LIGO και advanced Virgo και το αθροιστικό πλήθος ανιχνεύσεων που πραγματοποιήθηκαν. Ωστόσο, όπως αναφέρουμε στο κυρίως κείμενο, δεν αναλύθηκαν όλα αυτά τα διπλά συστήματα για τον έλεγχο της ΓΘΣ σε αυτή τη μελέτη.

Αυτοσυνέπεια της κυματομορφής: Ο έλεγχος συμφωνίας κατά τις φάσεις της προσέγγισης, της συγχώνευσης και της απόσβεσης

Τα βαρυτικά κύματα από συγχωνεύσεις αστέρων νετρονίων και μαύρων σπών διακρίνονται σε τρεις φάσεις εξέλιξης: την αργή σπειροειδή προσέγγιση των δύο σωμάτων, τη συγχώνευση των δύο σωμάτων και την απόσβεση των ταλαντώσεων του συμπαγούς τελικού αντικειμένου που δημιουργείται.

Ένας σημαντικός έλεγχος συνέπειας μπορεί να πραγματοποιηθεί θέτοντας το ερώτημα εάν η κυματομορφή κατά τη φάση της σπειροειδούς προσέγγισης βρίσκεται σε συμφωνία με την κυματομορφή στη φάση της απόσβεσης. Η τελική μάζα και στροφορμή της απομείνας μαύρης τρύπας μπορούν να συναχθούν ανεξάρτητα από τις δύο αυτές εξελικτικές φάσεις, χρησιμοποιώντας εμπειρικές σχέσεις που στηρίζονται στις προσομοιώσεις τέτοιων διπλών συστημάτων σύμφωνα με τη ΓΘΣ ακολουθώντας μεθόδους υπολογιστικής σχετικότητας. Η ανάλυσή μας βρήκε ότι οι κυματομορφές στη φάση της προσέγγισης και στη φάση της απόσβεσης ήταν σε καλή συμφωνία μεταξύ τους για όλα τα γεγονότα που αναλύθηκαν (βλ. [σχήμα 2](#)).

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΔΟΚΙΜΑΣΙΕΣ ΤΗΣ ΓΘΣ

Η άκρως μη-γραμμική και πολύπλοκη φυσική της δυναμικής εξέλιξης κοντά στη συγχώνευση του ζεύγους οδηγεί σε διάφορα φυσικά φαινόμενα που αποτυπώνονται στην βαρυτική κυματομορφή. Μια τροποποιημένη θεωρία της βαρύτητας μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετική πρόβλεψη για ένα ή περισσότερα από αυτά τα φαινόμενα. Τα παραμετροποιημένα μοντέλα επιτρέπουν την αναζήτηση πιθανών αποκλίσεων από την ΓΘΣ σε αυτά τα φυσικά αποτελέσματα. Αναζητούμε στοιχεία που να παραπέμπουν σε αποκλίσεις από τη φυσική της ΓΘΣ στις εξελικτικές φάσεις της προσέγγισης και της συγχώνευσης/απόσβεσης.

Έλεγχοι κατά την προσέγγιση

Η φάση της προσέγγισης του ζεύγους περιγράφεται υποθέτοντας αργή κίνηση και ασθενές βαρυτικό πεδίο, σύμφωνα με τη λεγόμενη μετα-Νευτώνεια προσέγγιση της ΓΘΣ. Διαφορετικοί μετα-Νευτώνειοι συντελεστές περιγράφουν ένα ή περισσότερα από τα φυσικά αποτελέσματα κατά τη διάρκεια της δυναμικής εξέλιξης του ζεύγους και ο έλεγχος της συμφωνίας τους με τις προβλέψεις της ΓΘΣ αποτελεί μια πολύ χρήσιμη δοκιμασία της ΓΘΣ. Η ανάλυσή μας, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα από προηγούμενους καταλόγους, μας προσφέρει τα καλύτερα ως σήμερα όρια των συντελεστών απόκλισης. Ωστόσο, σε αυτούς δεν βρίσκουμε στατιστικά σημαντικές ασυμφωνίες με τη ΓΘΣ.

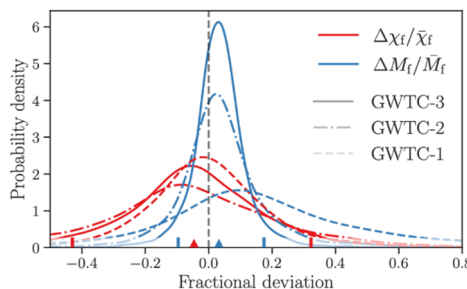
Η σπειροειδής προσέγγιση του ζεύγους μας επιτρέπει επίσης να ελέγξουμε εάν το σήμα είναι σύμφωνο με τη συγχώνευση δύο μαύρων τρυπών Kerr στην ΓΘΣ. Εάν ένα από τα συμπαγή αντικείμενα περιστρέφεται, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε παραμόρφωση - ακριβώς όπως η περιστροφή της Γης οδηγεί σε πλάτυνση των πόλων και διόγκωση του ισημερινού. Αυτό οδηγεί σε μια ευδιάκριτη συμβολή στην εξέλιξη της φάσης του ζεύγους και είναι διαφορετική για μια μελανή σπή Kerr σε σύγκριση με άλλα συμπαγή αντικείμενα. Ελέγχοντας αυτό το φαινόμενο δεν βρίσκουμε κανένα στοιχείο που να δείχνει ότι πρόκειται για εξωτικά συμπαγή αντικείμενα.

Δοκιμές χρησιμοποιώντας τη συγχώνευση και την απόσβεση

Με παρόμοιο τρόπο, ελέγχουμε εάν τα βαρυτικά κύματα που εκπέμπονται κατά τη συγχώνευση και την απόσβεση ακολουθούν τις προβλέψεις της ΓΘΣ. Η διάρκεια της συγχώνευσης και της απόσβεσης είναι πολύ συντομότερη από την σπειροειδή προσέγγιση, εκτός από την περίπτωση των διπλών συστημάτων μεγάλης μάζας. Ως αποτέλεσμα, έχουμε μικρότερη συσσώρευση του λόγου σήματος προς θόρυβο κατά τη φάση αυτή. Αν περιοριστούμε στα γεγονότα εκείνα όπου αποκτάται σημαντική αναλογία σήματος προς θόρυβο κατά τη συγχώνευση και την απόσβεση μπορούμε να λάβουμε ουσιαστικά όρια. Αυτός ο έλεγχος πραγματοποιείται με τρεις μεθόδους που είναι συμπληρωματικές μεταξύ τους ως προς τις λεπτομέρειες της κυματομορφής και τη μεθοδολογία και την παραμετροποίηση. Βρίσκουμε ότι ο έλεγχος να οδηγεί σε συμφωνία με τη ΓΘΣ εντός του εύρους των στατιστικών αβεβαιοτήτων.

Έλεγχοι διάδοσης βαρυτικών κυμάτων

Ενώ τα βαρυτικά κύματα διαδίδονται χωρίς διασπορά σύμφωνα με τη ΓΘΣ, οι τροποποιήσεις της ΓΘΣ μπορούν να οδηγήσουν σε διασπορά. Η διασπορά έχει ως συνέπεια οι συνιστώσες συχνότητας του κύματος να ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες, προκαλώντας διαφορές στους χρόνους άφιξής τους στον ανιχνευτή. Για παράδειγμα, εάν τα κύματα υψηλότερης συχνότητας που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια της συγχώνευσης ταξιδεύουν γρηγορότερα από τα κύματα προσέγγισης που έχουν χαμηλότερη συχνότητα, τότε τα «κύματα συγχώνευσης» θα έφταναν στη Γη νωρίτερα από το αναμενόμενο. Αναζητώντας διασπορά βαρυτικών κυμάτων δεν βρίσκουμε κανένα σχετικό στοιχείο. Ένα συγκεκριμένο και ενδιαφέρον μοντέλο στο οποίο μπορούμε να θέσουμε περιορισμούς εδώ είναι οι θεωρίες βαρυτονίου με μάζα.



Σχήμα 2: Η σχετική διαφορά στη μάζα (μπλε) και τη στροφορμή (κόκκινο) από τη φάση της προσέγγισης και την ακόλουθη φάση της βαρυτικής κυματομορφής, σύμφωνα με τον κατάλογο GWTC-3, συγκρινόμενες με τα αποτελέσματα από τις προηγούμενες αναλύσεις (GWTC-1 και GWTC-2). Η γκρίζα κατακόρυφη γραμμή δείχνει τη μηδενική τιμή της ΓΘΣ ενώ τα αποτελέσματα βρίσκονται σε εξαιρετική συμφωνία με την ΓΘΣ. (Εικ. 4 από [την εργασία μας](#)).

Αυτή είναι μια κατηγορία θεωριών όπου το υποθετικό σωματίδιο βαρυτόνιο θεωρείται ότι έχει μια εξαιρετικά μικρή (αλλά άγνωστη) μάζα. Αυτό οδηγεί σε έναν συγκεκριμένο τύπο διασποράς που μπορεί να ελεγχθεί παρέχοντάς μας ένα χαμηλότερο άνω όριο στη μάζα του βαρυτονίου. Με βάση τα γεγονότα που αναλύθηκαν και από τις τρεις φάσεις παρατήρησης, ο περιορισμός που λαμβάνουμε είναι ότι η μάζα του βαρυτονίου είναι μικρότερη από 1,3 επί 10^{-23} eV/c².

Έλεγχοι πόλωσης βαρυτικών κυμάτων

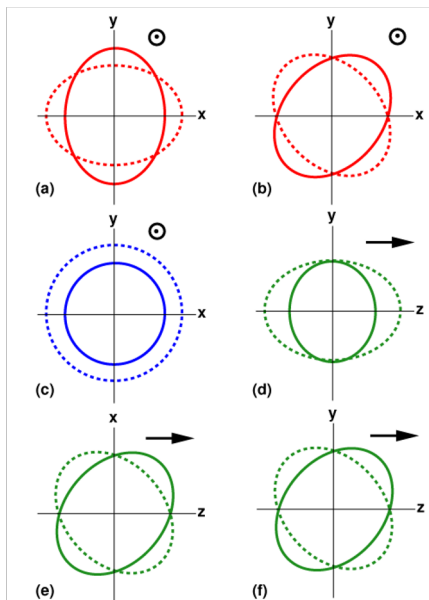
Τα βαρυτικά κύματα στη ΓΘΣ μπορούν να έχουν μόνο δύο καταστάσεις πόλωσης: κακακόρυφη και διαγώνια. Ωστόσο, μια πιο γενική θεωρία βαρύτητας μπορεί να έχει έως και έξι διαφορετικά είδη πόλωσης (βλ. **σχήμα 3**). Χρησιμοποιώντας τρεις ανιχνευτές (τους δύο LIGO και τον Virgo), μπορούμε να θέσουμε ένα μερικό όριο στο περιεχόμενο πόλωσης εκτός ΓΘΣ στα σήματα που παρατηρήσαμε. Η μέθοδος βασίζεται στην κατασκευή μιας ροής δεδομένων ανιχνευτή χωρίς σήματα της ΓΘΣ. Οποιαδήποτε υπολείμματα σε αυτή τη ροή δεδομένων θα υποδείκνυαν την παρουσία πρόσθετων τρόπων πόλωσης. Η ανάλυσή μας δεν έδειξε κάτι τέτοιο και τα δεδομένα συμφωνούν με τις προβλέψεις της ΓΘΣ.

Αντηχήσεις μετά τη συγχώνευση

Υπάρχουν θεωρητικές εναλλακτικές λύσεις για τις μελανές οπές που είναι γνωστές ως μιμητές μελανών οπών, επειδή μπορούν να μιμηθούν τις ιδιότητες των μαύρων τρυπών χωρίς να είναι μελανές οπές της ΓΘΣ. Μία από τις πιο ξεχωριστές ιδιότητες μιας μαύρης τρύπας είναι η παρουσία ενός **οριζόντια γεγονότων**. Πρόκειται για μια επιφάνεια που, ό,τι τη διαπερνά δεν επιστρέφει, δηλαδή παρουσιάζει τέλεια απορροφητικότητα. Ωστόσο, στους μιμητές μελανών οπών, το ισοδύναμο ενός οριζόντια γεγονότων μπορεί να είναι μια επιφάνεια η οποία, μπορεί, για παράδειγμα να ανακλά εν μέρει ή πλήρως. Έχει υποστηριχθεί ότι η κυματομορφή μετά τη συγχώνευση τέτοιων αντικειμένων μπορεί να περιέχει επαναλαμβανόμενες αντηχήσεις του σήματος της απόσβεσης. Αναζητήσαμε τέτοιες αντηχήσεις στα δεδομένα και δεν βρήκαμε καμία, γεγονός που υποδεικνύει ότι τα υπολείμματα της συγχώνευσης είναι σε συμφωνία με περιστρεφόμενες μαύρες τρύπες της ΓΘΣ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αναζητήσαμε ενδείξεις πιθανών αποκλίσεων από τη ΓΘΣ με εννέα διαφορετικούς τρόπους. Βρήκαμε ότι, εντός των στατιστικών αβεβαιοτήτων λόγω θορύβου και πιθανών άγνωστων συστηματικών σφαλμάτων λόγω ανακρίβειας στα μοντέλα των κυματομορφών, οι προβλέψεις της ΓΘΣ είναι απολύτως συνεπείς με όλα τα σήματα που ανιχνεύθηκαν. Δεδομένης της σημασίας που θα είχε ο εντοπισμός πιθανών αποκλίσεων από τη ΓΘΣ, θα συνεχίσουμε να θέτουμε υπό αυστηρό έλεγχο τις παρατηρήσεις που θα ακολουθήσουν τα επόμενα χρόνια. Νέοι έλεγχοι θα μπορούσαν να αναζητήσουν πτυχές της βαρύτητας που δεν έχουν διερευνηθεί μέχρι στιγμής, χρησιμοποιώντας τους ακόμη πιο ευαίσθητους ανιχνευτές που θα τεθούν σε λειτουργία τα επόμενα χρόνια.



Εικόνα 3: Αναπαράσταση των έξι τρόπων πόλωσης που επιτρέπονται σε μια γενική θεωρία βαρύτητας. Οι τρεις πρώτοι αντιστοιχούν σε καταστάσεις όπου η διεύθυνση διάδοσης του κύματος είναι κάθετη στο επίπεδο της οθόνης (εγκάρσια) ενώ στους τρεις τελευταίους το θέλος υποδηλώνει την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Οι δύο πρώτοι, στην επάνω σειρά, είναι οι μόνοι τρόποι πόλωσης που επιτρέπονται από τη ΓΘΣ που αναφέρονται ως «+» και «x». (Εικόνα από: Clifford Will, Living Reviews in Relativity.)

ΜΑΘΕΤΕ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ

Διαβάστε μια δωρεάν προ-δημοσίευση του πλήρους επιστημονικού άρθρου [εδώ](#) ή στο [arXiv.org](https://arxiv.org).

ΕΠΙΣΚΕΦΘΕΙΤΕ ΤΙΣ ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ ΜΑΣ:

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



Μεταφρασμένο στα Ελληνικά από τους Θ. Αποστολάτο, Ν. Στεργιούλα και Γ. Παπτά (Virgo-AUTH group) από το εξής πρωτότυπο στα Αγγλικά:
<https://www.ligo.org/science/Publication-O3bTGR/>

ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ

Η διασπορά ενός κύματος είναι το φαινόμενο όπου διαφορετικές συνιστώσες συχνότητας ενός κύματος ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες.

Η πόλωση ενός κύματος αναφέρεται στους ανεξάρτητους τρόπους με τους οποίους ένα κύμα μπορεί να ταλαντωθεί. Για τα βαρυτικά κύματα στη ΓΘΣ, υπάρχουν δύο ανεξάρτητοι τρόποι πόλωσης, που ονομάζονται κατακόρυφος και διαγώνιος. Αυτό σημαίνει ότι ένα διερχόμενο βαρυτικό κύμα θα τέντωνε και θα συμπιέζε έναν δακτύλιο σωματιδίων στις κατευθύνσεις ενός + ή ενός x.

Περίοδος Παρατήρησης O3: Η τρίτη περίοδος παρατήρησης στην εποχή των Advanced LIGO και Virgo ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2019. Η O3a, η πρώτη φάση του O3, διήρκεσε από την 1η Απριλίου 2019 έως την 1η Οκτωβρίου 2019, ενώ η O3b, η δεύτερη φάση της O3, διήρκεσε από την 1η Νοεμβρίου 2019 έως την 27η Μαρτίου 2020.

Μαύρη τρύπα: Περιοχή του χωροχρόνου που η βαρύτητα είναι τόσο ισχυρή ώστε ακόμη και το φως δεν μπορεί να διαφύγει από αυτή. Το όριο μη διαφυγής, το οποίο είναι μοναδικό για τις μαύρες τρύπες, ονομάζεται οριζόντια γεγονότων.

Αστέρρες νετρονίων: Απομεινάρια της διαδικασίας υπερκαινοφανούς από την οποία διήλθε ένα αστέρι με μάζα μεταξύ 10 και 25 φορές τη μάζα του Ηλιου μας. Οι τυπικοί αστέρες νετρονίων έχουν μάζα περίπου 1-2 ηλιακές μάζες και ακτίνα 10-15 χιλιομέτρων. Πρόκειται για κάποια από τα πλέον συμπαγή αντικείμενα που έχουν ανακαλυφθεί ποτέ.

Εξωτικά συμπαγή αντικείμενα: Πρόκειται για αντικείμενα που μιμούνται τις ιδιότητες των μαύρων τρυπών, αλλά δεν είναι μαύρες τρύπες. Η διάκρισή τους από τις μαύρες τρύπες αποτελεί μια επιστημονική πρόκληση.

Κυματομορφές ΓΘΣ: Κυματομορφές βαρυτικών κυμάτων που υπολογίζονται με χρήση της ΓΘΣ που χρησιμοποιούνται τόσο για την ανίχνευση όσο και για τον προσδιορισμό του βαρυτικού σήματος από τα δεδομένα.

Μαύρες Τρύπες Kerr: Μαύρες τρύπες της ΓΘΣ που περιγράφονται πλήρως από τη μάζα και την περιστροφή τους.

eV/c²: Το ηλεκτρονιοβόλτ (eV) είναι μονάδα ενέργειας και με τη χρήση της γνωστής ισοδυναμίας μάζας-ενέργειας E=mc², του Αϊνστάιν, το eV/c² είναι μονάδα μάζας. 1 eV/c² ισούται με περίπου 1,8 x 10⁻³⁶ χιλιόγραμμα. Ως εκ τούτου, η μάζα του βαρυτονίου βρέθηκε να είναι μικρότερη από 2,3 x 10⁻⁵⁹ χιλιόγραμμα.