

# ΜΙΑ ΝΕΑ ΠΗΓΗ ΒΑΡΥΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ: ΔΙΠΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΤΕΡΑ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ – ΜΑΥΡΗΣ ΤΡΥΠΑΣ

## ΤΙ ΑΝΑΚΑΛΥΨΑΜΕ;

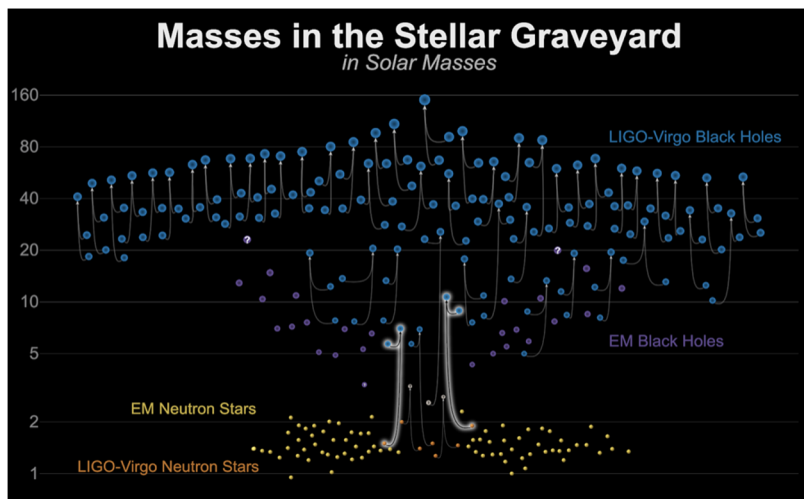
Στις 5 Ιανουαρίου 2020 ο [ανιχνευτής Advanced LIGO](#) στο [Λίβινγκστον](#) της Λουιζιάνα στις ΗΠΑ και ο [ανιχνευτής Advanced Virgo](#) στην Ιταλία, παρατήρησαν κύματα βαρύτητας συμβατά με έναν εντελώς νέο τύπο αστρονομικού συστήματος. Τα βαρυτικά κύματα δημιουργήθηκαν από τη σπείρα θανάτου δύο εκ των πιο ακραίων αντικειμένων στο Σύμπαν: ενός [αστέρα νετρονίων](#) και μιας [μαύρης τρύπας](#). Οι ανιχνευτές LIGO και Virgo παρατήρησαν τις τελευταίες συρρικνούμενες τροχιές ([inspiral](#)), ακολουθούμενες από τη συγχώνευση του αστέρα νετρονίων με τη μαύρη τρύπα. Είναι αξιοσημείωτο, ότι μόλις δέκα ημέρες αργότερα ένα δεύτερο σήμα βαρυτικών κυμάτων ανιχνεύθηκε από τη σπειροειδή προσέγγιση και τη συγχώνευση ενός αστέρα νετρονίων με μια μαύρη τρύπα, αυτή τη φορά και από τους δύο ανιχνευτές του LIGO και από τον ανιχνευτή VIRGO. Αυτή είναι η πρώτη φορά που παρατηρούνται κύματα βαρύτητας από ζευγάρι αστέρα νετρονίων και μαύρης τρύπας (βλ. Σχήμα 1). Πριν από αυτήν τη νέα ανακάλυψη, είχαν παρατηρηθεί βαρυτικά

κύματα μόνο από τη συγχώνευση ζευγών μαύρων τρυπών και ζευγών αστέρων νετρονίων. Οι νέες ανακαλύψεις μας λέγονται **GW200105** και **GW200115**.

Αυτές οι δύο ανακαλύψεις αντιπροσωπεύουν τις πρώτες ανιχνεύσεις συστημάτων αστέρα νετρονίων-μαύρης τρύπας (NSBH). Για αρκετές δεκαετίες, η ύπαρξη των συστημάτων NSBH είχε προβλεφθεί, αλλά χωρίς πειστικά παρατηρησιακά στοιχεία μέχρι τώρα. Με την παρατήρηση των NSBHs, έχουμε δει πλέον και τους τρεις τύπους διπλών συστημάτων που μπορούν να σχηματιστούν από μαύρες τρύπες και αστέρες νετρονίων. Τα συστήματα που αποτελούνται από μαύρες τρύπες και αστέρες νετρονίων λέγονται “[συμπαγή διπλά συστήματα](#)”. Αυτές οι νέες ανακαλύψεις, μαζί με μελλοντικές παρατηρήσεις συμπαγών διπλών συστημάτων, θα ρίξουν φως στη γέννηση, τη ζωή και το θάνατο των αστέρων, καθώς και το περιβάλλον στο οποίο σχηματίζονται.

## ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΩΝ ΒΑΡΥΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Η αναζήτηση σημάτων από κύματα βαρύτητας στα δεδομένα που καταγράφονται από τους ανιχνευτές χρησιμοποιεί την τεχνική “[matched filtering](#)”. Αυτή συγκρίνει τα παρατηρούμενα, θορυβώδη δεδομένα με τα προβλεπόμενα σήματα από τη [Γενική Σχετικότητα](#) του Αϊνστάιν. Η τεχνική αυτή μπορεί να εξάγει σήματα βαρυτικών κυμάτων από θορυβώδη δεδομένα με τρόπο παρόμοιο με το πως μπορούμε να διακρίνουμε μεμονωμένα όργανα σε ένα μουσικό κομμάτι. Το GW200115 είναι αστροφυσικής προέλευσης με υψηλή βεβαιότητα με την πιθανότητα να οφείλεται σε τυχαίο θόρυβο στα δεδομένα να είναι μικρότερη από **1 στα 100.000 χρόνια**. Το GW200105 είναι αστροφυσικής προέλευσης με κάπως χαμηλότερη βεβαιότητα, η πιθανότητα να είναι θόρυβος είναι μικρότερη από **1 στα 2.8 χρόνια**.



**Σχήμα 1:** Οι μάζες των αστέρων νετρονίων και των μαύρων τρυπών που έχουν μετρηθεί μέσω βαρυτικών κυμάτων και ηλεκτρομαγνητικών παρατηρήσεων. Οι κίτρινοι και μοβ δείκτες αντιστοιχούν στις ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις αστέρων νετρονίων και μαύρων τρυπών αντίστοιχα, ενώ οι πορτοκαλί και μπλε δείκτες είναι οι μετρήσεις χρησιμοποιώντας βαρυτικά κύματα. Τα σήματά μας, **GW200105** και **GW200115**, επισημαίνονται ως η συγχώνευση αστέρων νετρονίων με μαύρες τρύπες. (Image credit: LIGO-Virgo & Frank Elavsky, Aaron Geller, Northwestern University)

Επισκεφθείτε τις σελίδες μας:

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)



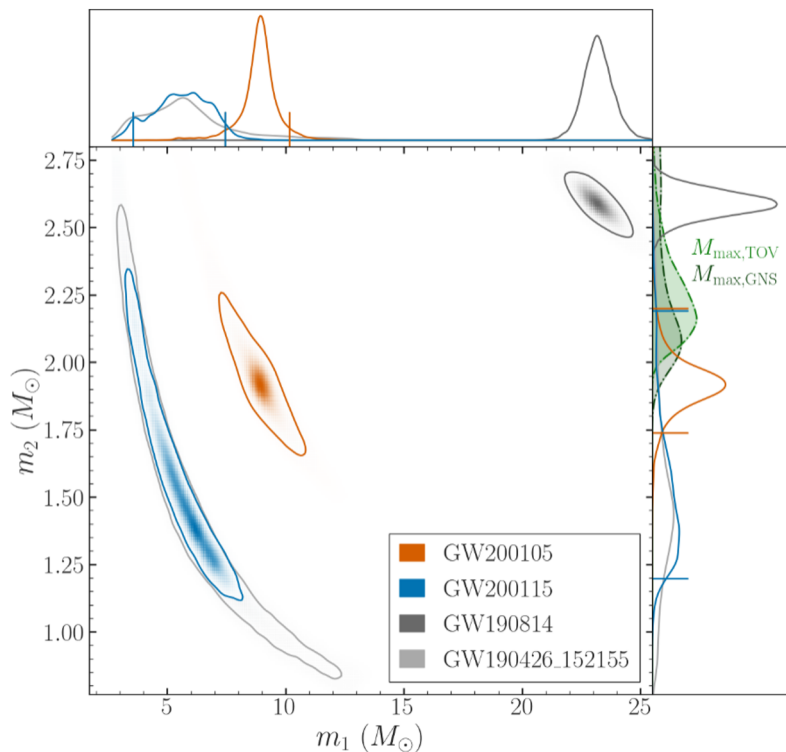
Οι συγχωνεύσεις συστημάτων NSBH μπορούν, κατ' αρχήν, να παράγουν φως σε όλο το [ηλεκτρομαγνητικό φάσμα](#). Δυστυχώς, η θέση των πηγών στον ουρανό μπόρεσε να μετρηθεί με πολύ χαμηλή ακρίβεια, σε μια περιοχή του ουρανού μεταξύ 2.400 και 29.000 φορές το μέγεθος της πανσελλήνου. Αυτό το γεγονός, μαζί με τη μεγάλη απόσταση της πηγής (ακολουθεί λεπτομερής συζήτηση παρακάτω), έκανε την ανίχνευση φωτός απίθανη και δεν υπήρξε τέτοια παρατήρηση. Μελλοντικές συγχωνεύσεις συστημάτων NSBH μπορεί να παράγουν παρατηρήσιμο φως που θα μπορούσε ενδεχομένως να αποκαλύψει την μαύρη τρύπα να «διαταράσσει παλιρροιακά» τον αστέρα νετρονίων, διαλύοντάς τον. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ακραία μορφή της ύλης που απαρτίζει τους αστέρες νετρονίων.

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ

Τα βαρυτικά κύματα κωδικοποιούν έναν πλούτο πληροφοριών σχετικά με την προέλευσή τους, για παράδειγμα, τις μάζες της μαύρης τρύπας και του αστέρα νετρονίων. Η μαύρη τρύπα και ο αστέρας νετρονίων που δημιούργησαν το γεγονός GW200105 έχουν περίπου 8.9 και 1.9 φορές αντίστοιχα περισσότερη μάζα από τον Ήλιο (του οποίου η μάζα συμβολίζεται ως  $M_{\odot}$ ). Το γεγονός GW200105 συνέβη πριν από 800 εκατομμύρια χρόνια περίπου, δηλαδή εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια πριν εμφανιστούν οι πρώτοι δεινόσαυροι στη Γη. Για το γεγονός GW200115, εκτιμούμε ότι η μαύρη τρύπα και ο αστέρας νετρονίων είχαν μάζες περίπου 5.7  $M_{\odot}$  και 1.5  $M_{\odot}$  αντίστοιχα, και η συγχώνυσή τους έγινε σχεδόν πριν από ένα δισεκατομμύριο χρόνια. Οι μάζες συνοψίζονται στο [Σχήμα 2](#).

Βρήκαμε ότι το σπιν της μαύρης τρύπας για το GW200105 θα μπορούσε να βρίσκεται μεταξύ 0 και 30% του μέγιστου σπιν για τις μαύρες τρύπες, ενώ για το GW200115, το σπιν βρίσκεται μεταξύ 0 και 80% του μέγιστου. Δεν έχουμε ισχυρές ενδείξεις περιστροφής των αστέρων νετρονίων επειδή οι μετρήσεις μας δεν είναι ευαίσθητες σε αυτή (βλ. [Σχήμα 3](#)).

Γιατί πιστεύουμε ότι παρατηρήσαμε συστήματα NSBH; Για να παραχθούν τα βαρυτικά κύματα που είδαμε, τα αντικείμενα πρέπει να είναι πολύ συμπαγή και πυκνά σε σύγκριση με τους τυπικούς αστέρες, διαφορετικά θα διαλύονταν πριν συγχωνευθούν. Επειδή η μάζα των βαρύτερων αντικειμένων στα δύο διπλά συστήματα είναι 8.9  $M_{\odot}$  και 5.7  $M_{\odot}$  αντίστοιχα, τα μόνα γνωστά αντικείμενα που θα μπορούσαν να είναι αυτά, είναι μαύρες τρύπες. Οι μάζες των ελαφρύτερων αντικειμένων είναι περίπου 1.9  $M_{\odot}$  και 1.5  $M_{\odot}$ , δηλαδή πολύ ελαφρύτερες από οποιαδήποτε γνωστή μαύρη τρύπα. Αυτές οι μάζες είναι συνεπείς με γνωστούς αστέρες νετρονίων, όπως αυτοί που παρατηρούνται στον [Γαλαξία](#) μας ή με βαρυτικά κύματα (π.χ. [GW170817](#)). Οι μάζες των μαύρων τρυπών είναι σε συμφωνία με τις προβλέψεις από μοντέλα σχηματισμού και εξέλιξης των αστέρων.



**Σχήμα 2** (σχήμα 4 από τη δημοσίευση): Σύνοψη της γνώσης μας για τις συσιστώσες μάζες των αντικειμένων που παρήγαγαν τα GW200105 και GW200115. Ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει τη μάζα του βαρύτερου αντικειμένου (της μαύρης τρύπας), ενώ ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει τη μάζα του ελαφρύτερου αντικειμένου (του αστέρα νετρονίων). Η χρωματική σκίαση υποδηλώνει συνδυασμούς μάζας που συμφωνούν με τα δεδομένα, πορτοκαλί για το πρώτο συμβάν και μπλε για το δεύτερο συμβάν. Η πιο σκοτεινή σκίαση δείχνει καλύτερη συμφωνία, δηλαδή μεγαλύτερη πιθανότητα για τέτοιους συνδυασμούς μάζας. Το επάνω πλαίσιο συνοψίζει τις πληροφορίες για τη μάζα της μαύρης τρύπας, για παράδειγμα, η μπλε καμπύλη δείχνει ότι η μαύρη τρύπα στο GW200115 είχε μάζα κάπου μεταξύ ~3.5  $M_{\odot}$  και ~7.5  $M_{\odot}$ . Το δεξιό πλαίσιο συνοψίζει τις πληροφορίες σχετικά με τη μάζα του αστέρα νετρονίων, για παράδειγμα, η πορτοκαλί καμπύλη σε αυτό το πλαίσιο δείχνει ότι ο αστέρας νετρονίων του GW200105 είχε μάζα μεταξύ 1.75  $M_{\odot}$  και 2.2  $M_{\odot}$ . Οι πράσινες σκιάσεις σε αυτό το δεξί πλαίσιο συνοψίζουν την παρούσα αστρονομική γνώση για την κατανομή μάζας των αστέρων νετρονίων, δείχνοντας ότι τα παρατηρηθέντα αντικείμενά μας έχουν μάζες αρκετά μικρές για να είναι αστέρες νετρονίων. Το σχήμα δείχνει επίσης πληροφορίες σχετικά με δύο προηγούμενες ανακαλύψεις βαρυτικών κυμάτων: το GW190814, το οποίο είναι πιθανώς η συγχώνευση μιας μαύρης τρύπας 23  $M_{\odot}$  με μια μαύρη τρύπα 2.5  $M_{\odot}$  (η πιο ελαφριά που παρατηρήθηκε ποτέ), και το GW190426\_152155, ένα σήμα που μοιάζει με σύστημα NS-BH, αλλά είναι τόσο αδύναμο που δεν είναι σαφές εάν είναι αστροφυσικής προέλευσης.

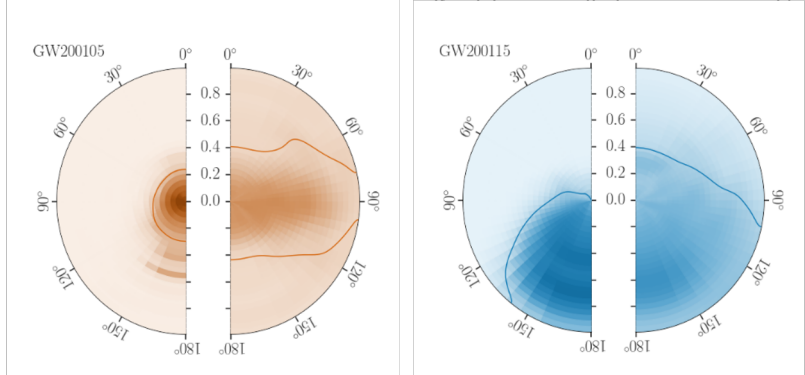
# ΠΩΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΗΘΗΚΑΝ ΚΑΙ ΠΟΣΟ ΣΥΧΝΑ ΣΥΜΒΑΙΝΕΙ ΑΥΤΟ;

Πως σχηματίστηκαν λοιπόν αυτά τα συστήματα NSBH; Υπάρχουν δύο βασικά ενδεχόμενα. Ένα από αυτά ξεκινά με δύο αστέρες που βρίσκονται ήδη σε τροχιά μεταξύ τους. Οι αστέρες έχουν τέτοιες μάζες έτσι ώστε όταν εξελιχθούν, τελικά θα καταλήξουν σε εκρήξεις σουπερνόβα, με τον έναν αστέρα να αφήνει πίσω μια μαύρη τρύπα και τον άλλο να αφήνει έναν αστέρα νετρονίων. Αυτό ονομάζεται «απομονωμένη εξέλιξη διπλού συστήματος». Το άλλο ενδεχόμενο είναι ότι οι αστέρες νετρονίων και οι μαύρες τρύπες σχηματίζονται ξεχωριστά σε άσχετες εκρήξεις σουπερνόβα, και μόνο μετά βρίσκονται μεταξύ τους. Αυτό ονομάζεται «δυναμική αλληλεπίδραση» και μπορεί να συμβεί σε πυκνά αστρικά περιβάλλοντα όπως στα [σφαιρωτά σμήνη](#). Για να γίνει διάκριση μεταξύ αυτών των δύο ενδεχομένων, ο προσανατολισμός του σπίν των μαύρων τρυπών αποτελεί ένα ισχυρό στοιχείο. Στην απομονωμένη εξέλιξη διπλού συστήματος, η κατεύθυνση του σπίν των μαύρων τρυπών τείνει να ευθυγραμμίζεται με την τροχιά του συστήματος, δηλαδή, περιμένουμε ο αστέρας νετρονίων να κινείται στο ισημερινό επίπεδο της μαύρης τρύπας. Αντίθετα, στο σενάριο δυναμικής αλληλεπίδρασης δεν προτιμάται μια συγκεκριμένη κατεύθυνση της περιστροφής και έτσι η τροχιά του αστέρα νετρονίων θα μπορούσε να έχει οποιοδήποτε προσανατολισμό σε σχέση με το ισημερινό επίπεδο της μελανής οπής.

Οι εκτιμήσεις για το σπίν της μαύρης τρύπας του GW200105 δεν μας επιτρέπουν να διακρίνουμε ανάμεσα σε αυτά τα σενάρια σχηματισμού. Ωστόσο, για το GW200115, βρίσκουμε ότι η κατεύθυνση του σπίν της μαύρης τρύπας είναι πιθανό να είναι αντίθετη από την κατεύθυνση της τροχιάς του διπλού συστήματος. Για παράδειγμα, εάν ο αστέρας νετρονίων γυρνάει γύρω από τη μαύρη τρύπα δεξιόστροφα, τότε η μαύρη τρύπα θα περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της αριστερόστροφα. Αυτό υποδηλώνει ότι η πηγή του GW200115 θα μπορούσε να είχε σχηματιστεί σε ένα πυκνό περιβάλλον, όπως ένα σφαιρωτό σμήνος.

Πόσα συστήματα NSBH στο Σύμπαν συγχωνεύονται εντός μιας δεδομένης χρονικής περιόδου; Η παρατήρηση των δύο συστημάτων NSBH μας λέει ότι από 5 έως 15 τέτοια συστήματα συγχωνεύονται ετησίως σε απόσταση ενός δισεκατομμυρίου ετών φωτός.

Επίσης, αυτό το εκτιμώμενο ποσοστό συγχώνευσης θα μπορούσε να εξηγηθεί είτε μέσω του ενδεχόμενου της απομονωμένης εξέλιξης διπλού συστήματος είτε μέσω της δυναμικής αλληλεπίδρασης σε νεαρά αστρικά σμήνη, αλλά δεν μπορούμε να ξεχωρίσουμε ένα συγκεκριμένο σενάριο.



**Σχήμα 3** (σχήμα 6 από τη δημοσίευση): Η εκτιμώμενη τιμή και κατεύθυνση του σπιν των μαύρων τρυπών(αριστερά ημισφαίρια) και των αστέρων νετρονίων (δεξιά ημισφαίρια) των γεγονότων GW200105 και GW200115. Η ακτίνα του δίσκου δείχνει το μέγεθος του σπιν και κυμαίνεται μεταξύ 0 (καθόλου περιστροφή) και 1 (μέγιστο σπιν για τις μαύρες τρύπες). Η κατεύθυνση του σπιν εμφανίζεται ως μία γωνία, η οποία κυμαίνεται από 0° (τα αντικείμενα περιστρέφονται στην ίδια κατεύθυνση με την τροχιά του διπλού συστήματος) έως 180° (τα αντικείμενα περιστρέφονται στην αντίθετη κατεύθυνση της τροχιάς του διπλού συστήματος). Η σκίαση υποδεικνύει πιθανές τιμές για το μέγεθος και την κατεύθυνση του σπιν. Το αριστερότερο ημισφαίριο έχει σκίαση που κορυφώνεται κοντά στο κέντρο, υποδεικνύοντας ότι η μαύρη τρύπα του GW200105 έχει πιθανώς μικρή περιστροφή. Η σκίαση του δεύτερου από δεξιά ημισφαιρίου εκτείνεται προς τα κάτω, υποδηλώνοντας ότι η μαύρη τρύπα του GW200115 μπορεί να περιστρέφεται προς κατεύθυνση αντίθετη από την τροχιακή κίνηση.

## ΑΝΑΚΑΛΥΨΤΕ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ:

Επισκεφθείτε τις σελίδες μας:

[www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu), [gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)

Διαβάστε μία προδημοσίευση του πλήρους επιστημονικού άρθρου [εδώ](#).

## ΓΛΩΣΣΑΡΙ

**Inspiral:** Η τροχιακή κίνηση των αντικειμένων σε ένα διπλό σύστημα, όπως ένα σύστημα αστέρα νετρονίων-μαύρης τρύπας. Καθώς το σύστημα χάνει ενέργεια εκπέμποντας βαρυτικά κύματα, ο αστέρας νετρονίων και η μαύρη τρύπα περιφέρονται όλο και γρηγορότερα, πλησιάζοντας όλο και πιο κοντά μέχρι τελικά να συγχωνευθούν.

**Αστέρας νετρονίων:** Το υπόλειμμα ενός αστέρα μεγάλης μάζας που έχει φτάσει στο τέλος της ζωής του. Όταν ένας αστέρας μεγάλης μάζας έχει εξαντλήσει τα πυρηνικά του καύσιμα, πεθαίνει με καταστροφικό τρόπο - ένα σουπερνόβα - που συχνά οδηγεί στο σχηματισμό ενός αστέρα νετρονίων: ενός αντικείμενου τέτοιας μάζας και πυκνότητας που τα άτομα δεν μπορούν να διατηρήσουν τη δομή τους όπως συνήθως τα αντιλαμβάνομαστε στη Γη. Αυτοί οι αστέρες έχουν μάζα περίπου όση ο ήλιος μας, αλλά έχουν διάμετρο μόνο μερικές δεκάδες χιλιόμετρα.

**Μαύρη τρύπα:** Μία περιοχή του χωροχρόνου με τόσο έντονη βαρύτητα που δεν επιτρέπει σε οτιδήποτε, συμπεριλαμβανομένου του φωτός, να διαφύγει. Οι [μαύρες τρύπες](#) διακρίνονται σε διαφορετικά μεγέθη: οι [αστρικές μαύρες τρύπες](#) προέρχονται από αστρικές καταρρευσεις και οι μάζες τους κυμαίνονται από μερικές ηλιακές μάζες έως περίπου 65 ηλιακές μάζες. Οι [μαύρες τρύπες ενδιάμεσης μάζας](#) κυμαίνονται από περίπου 100 ηλιακές μάζες έως 10<sup>5</sup> ηλιακές μάζες. Τέλος, οι [υπερευκείμενες μαύρες τρύπες](#) κυμαίνονται από άνω του 10<sup>5</sup> ηλιακές μάζες έως άνω των 10<sup>9</sup> ηλιακές μάζες.

**Συμπαγές διπλό σύστημα:** Ένα σύστημα αποτελούμενο από δύο συμπαγή αστρικά υπολείμματα, π.χ. αστέρες νετρονίων ή μαύρες τρύπες που περιφέρονται πολύ κοντά το ένα γύρω από το άλλο.

**Matched filtering:** Μια τεχνική για τον εντοπισμό σημάτων θαμμένων σε θορυβώδη δεδομένα. Πρότυπα βαρυτικών κυματομορφών που υπολογίζονται από τη γενική σχετικότητα αραώνονται πάνω σε όλα τα δεδομένα και επιλέγονται όταν βρεθούν μοτίβα που ταιριάζουν στα δεδομένα.

**Γενική Σχετικότητα:** Η θεωρία της βαρύτητας που διατύπωσε ο Αλμπερτ Αϊνστάιν το 1915. Σε αυτήν τη θεωρία, ο χώρος και ο χρόνος είναι σαν ένα ελαστικό μέσο που καμπυλώνεται παρουσία της ύλης και της ενέργειας, και τα αντικείμενα ακολουθούν τροχιές μέσω αυτού του καμπυλωμένου χώρου.

**Σφαιρωτό σμήνος:** Μια πολύ πυκνή ομάδα αστέρων που συνδέονται μεταξύ τους με τη βαρύτητα.

**Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα:** Το ορατό φως εκτείνεται από το κόκκινο έως το ιώδες, αλλά εκτός του εύρους που βλέπουν τα μάτια μας, αυτό το φάσμα συνεχίζεται. Πέρα από το κόκκινο φως υπάρχει το υπέρυθρο, τα μικροκύματα και τα ραδιοκύματα, και πέρα από το ιώδες υπάρχει το υπεριώδες, οι ακτίνες X και οι ακτίνες γάμμα. Αυτό είναι το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και οι αστρονόμοι χρησιμοποιούν κάθε μέρος του φάσματος για να μάθουν περισσότερα για το Σύμπαν. Όλες οι ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες έχουν τη μορφή κυματισμών σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία και διαφέρουν ως προς τη συχνότητά ή το μήκος κύματός τους (το μήκος ενός κυματισμού).

**Έτος φωτός:** Μια μονάδα απόστασης ισοδύναμη με την απόσταση που ταξιδεύει το φως σε ένα έτος. Ένα έτος φωτός είναι περίπου ίσο με 9.46 τρισεκατομμύρια χιλιόμετρα (ή περίπου 5.88 τρισεκατομμύρια μίλια).

**Μ8 (ηλιακή μάζα):** Η μάζα του Ήλιου (περίπου 2x10<sup>30</sup> χιλιόγραμμα). Η ηλιακή μάζα είναι μια κοινή μονάδα για την αναπαράσταση μαζών στην αστρονομία.