

## GW190521: Η ΜΑΖΙΚΟΤΕΡΗ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΜΑΥΡΩΝ ΤΡΥΠΩΝ ΠΟΥ ΠΑΡΑΤΗΡΗΘΗΚΕ ΕΩΣ ΤΩΡΑ

### ΤΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΑΜΕ;

Την 21<sup>η</sup> Μαΐου 2019, οι ανιχνευτές [Advanced LIGO](#) και [Advanced Virgo](#) παρατήρησαν ένα σήμα βαρυτικών κυμάτων προερχόμενο από τη συγχώνευση ενός ασυνήθιστου ζεύγους [μαύρων τρυπών](#). Το σήμα αυτό, ονόματι GW190521, ήταν βραχύτερης διάρκειας και κορυφώθηκε σε χαμηλότερη [συχνότητα](#) από οποιοδήποτε άλλο σήμα συγχώνευσης μαύρων τρυπών που έχει παρατηρηθεί μέχρι σήμερα.

Η χρονική διάρκεια που περνάει το σήμα ενός βαρυτικού κύματος στη ζώνη ευαισθησίας των Advanced Virgo και Advanced LIGO είναι αντιστρόφως ανάλογη της συνολικής μάζας του διπλού συστήματος. Στην περίπτωση του GW190521 η διάρκεια αυτή ήταν μόλις 0.1 δευτερόλεπτα περίπου, πολύ συντομότερη από την αντίστοιχη π.χ. του [GW150914](#) – του πρώτου σήματος συγχώνευσης μαύρων τρυπών που ανιχνεύθηκε ποτέ. Ομοίως, η συχνότητα στην οποία το σήμα ενός συγχωνευόμενου διπλού συστήματος μαύρων τρυπών λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του είναι επίσης αντιστρόφως ανάλογη της συνολικής μάζας του συστήματος. Στην περίπτωση του GW190521, η συχνότητα μεγίστου ήταν μόλις 60 Hz, επίσης πολύ χαμηλότερη αυτής του GW150914 που βρισκόταν στα 150 Hz. Επομένως ήταν προφανές εξ αρχής (βλ. Εικ. 1) ότι οι ανιχνευτές LIGO και Virgo είχαν στα χέρια τους ένα πολύ μεγάλο ζεύγος μαύρων τρυπών.

Η Εικόνα 2 δείχνει τις μετρήσεις των μαζών των μαύρων τρυπών που παρήγαγαν το GW190521. Η μεγαλύτερη των δύο μαύρων τρυπών είχε μάζα περίπου ίση με 85 φορές τη [μάζα του Ήλιου](#) (που συμβολίζουμε με  $M_{\odot}$ ) ενώ η μικρότερη μαύρη τρύπα κατεγράφη κοντά στις 66  $M_{\odot}$ . Και τα δύο αυτά σώματα είναι πολύ μαζικότερα από όλες τις συγχωνευόμενες μαύρες τρύπες που [έχουν ανιχνευθεί από τους LIGO και Virgo έως τώρα](#) – ενώ ακόμα και η μικρότερη μαύρη τρύπα είναι ήδη μαζικότερη από πολλές από τις εναπομένουσες μαύρες τρύπες που σχηματίστηκαν κατά τις συγχωνεύσεις αυτές (βλ. Εικόνα 3).

Για το GW190521, η εναπομένουσα μαύρη τρύπα μετά τη συγχώνευση “ζυγίζει” περίπου 142  $M_{\odot}$ , μακράν στην κορυφή της λίστα με τις μεγαλύτερες μαύρες τρύπες των LIGO-Virgo. Η εναπομένουσα μάζα είναι περίπου 8  $M_{\odot}$  ελαφρύτερη από το σύνολο των μαζών των δύο μαύρων τρυπών που συγχωνεύτηκαν. Αυτή η διαφορά μάζας μετετράπη ακαριαία σε ενέργεια βαρυτικών κυμάτων.

### ΓΙΑΤΙ ΤΟ GW190521 ΕΙΝΑΙ ΤΟΣΟ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝ;

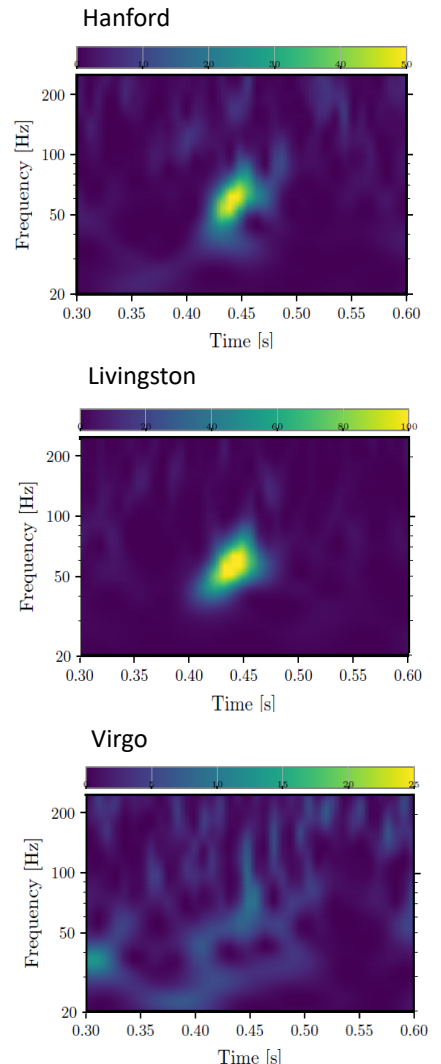
Οι εξαιρετικά μεγάλες μάζες των μαύρων τρυπών που παρήγαγαν το GW190521 δεν είναι σημαντικές μόνο για εντυπωσιασμό. Έρχονται να αμφισβητήσουν την κατανόησή μας σχετικά με το σχηματισμό μαύρων τρυπών και χρησιμεύουν ως μοναδικό φυσικό εργαστήριο για τη θεμελιώδη κατανόηση της βαρύτητας.



### Φτιάχνοντας Μεγάλες Μαύρες Τρύπες

Οι αστρονόμοι κατηγοριοποιούν τις μαύρες τρύπες με βάση τη μάζα τους. Αυτό έχει νόημα γιατί μαύρες τρύπες σε διαφορετικά εύρη μαζών σχηματίζονται με πολύ διαφορετικούς τρόπους.

Στα κέντρα των περισσότερων, αν όχι όλων των, γαλαξιών βρίσκονται “υπερμεγέθεις” μαύρες τρύπες με μάζες από εκατοντάδες χιλιάδες έως δισεκατομμύρια φορές τη μάζα του Ήλιου.



**Εικόνα 1.** Αναπαράσταση χρόνου-συχνότητας των δεδομένων που περιέχουν το σήμα GW190521, όπως παρατηρήθηκε από το LIGO Hanford (επάνω), LIGO Livingston (μέση) και Virgo (κάτω). Οι χρόνοι δίνονται ως προς τις 03:02:29 UTC της 21<sup>ης</sup> Μαΐου 2019. Η ενέργεια ενός στοιχείου χρόνου-συχνότητας δίνεται ως χρώμα όπως αναγράφεται στη χρωματική μπάρα. Προσέξτε την εξαιρετικά σύντομη διάρκεια του σήματος και τη συχνότητα κορυφωσής του περί τα 60 Hz. (Προσαρμογή από Εικ. 1 του δημοσιευμένου [άρθρου για την ανακάλυψη του GW190521](#))

Visit our websites:

<http://www.ligo.org>

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

Ο δικός μας Γαλαξίας έχει μία [μαύρη τρύπα στο κέντρο του](#) με μάζα περίπου ίση με 4 εκατομμύρια φορές τη μάζα του Ήλιου. Το πώς ακριβώς σχηματίζονται αυτές οι κτηνώδεις μαύρες τρύπες παραμένει ένα μυστήριο. Ωστόσο η διαδικασία αυτή πιθανότατα ξεκίνησε όταν το Σύμπαν ήταν πολύ νεότερο δίνοντας χρόνο στις μαύρες τρύπες να μεγαλώσουν σε τέτοια μεγέθη.

Στο άλλο άκρο της κλίμακας μαζών βρίσκουμε [“αστρικές” μαύρες τρύπες](#), που πιστεύουμε ότι σχηματίζονται με την κατάρρευση αστρικού πυρήνα μεγάλης μάζας, κατά την [έκρηξη υπερκαινοφανών](#) (supernova). Το εύρος μαζών τους κυμαίνεται από μερικές έως δεκάδες φορές τη μάζα του Ήλιου, ενώ ζεύγη τέτοιων μαύρων τρυπών ευθύνονται για τις συγχωνεύσεις που έχουμε παρατηρήσει με τους ανιχνευτές Virgo και LIGO μέχρι στιγμής.

Μεταξύ αστρικών και υπερμεγέθων μαύρων τρυπών βρίσκουμε το μυστηριώδες βασίλειο των [“ενδιάμεσων” μαύρων τρυπών](#), με μάζες που κυμαίνονται από 100 έως περίπου 100.000 φορές τη μάζα του Ήλιου. Μέχρι στιγμής δεν υπάρχουν επιβεβαιωμένες παρατηρήσεις ενδιάμεσων μαύρων τρυπών, αλλά υπάρχει πλήθος διαφορετικών σεναρίων για το πώς θα μπορούσαν να σχηματιστούν. Ωστόσο, το κυνήγι ενδιάμεσων μαύρων τρυπών πρόσφατα ξεκίνησε στα σοβαρά, με τη βελτίωση των παρατηρησιακών δυνατοτήτων των τηλεσκοπίων και των ανιχνευτών βαρυτικών κυμάτων.

Βάσει της θεωρητικής μας κατανόησης των διεργασιών στο εσωτερικό αστέρων μεγάλης μάζας, και του πώς σχηματίζονται οι μαύρες τρύπες, πιστεύεται ότι μαύρες τρύπες με μάζες μεταξύ περίπου 65 και 120 ηλιακών μαζών *δε μπορούν* να σχηματιστούν μέσω της κατάρρευσης ενός αστέρα. Εδώ το GW190521 χαλάει την πιάτσα, αφού η μάζα της μεγαλύτερης μαύρης τρύπας από τις δύο που συγχωνεύτηκαν (“πρωτεύουσα” μαύρη τρύπα) *κάθεται* πάνω στο διάστημα στο οποίο η αστρική κατάρρευση δεν προβλέπεται να παράγει άμεσα μαύρες τρύπες — εξάλλου, παρήγαγε μία εναπομένονσα μαύρη τρύπα που επίσης κατατάσσεται στις ενδιάμεσες μαύρες τρύπες.

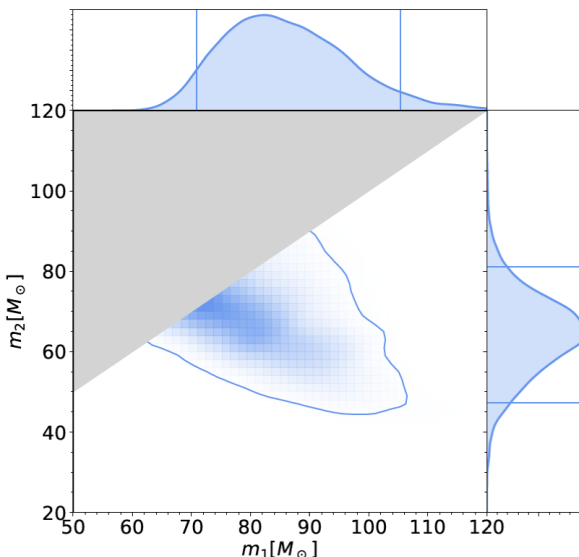
Η παρατήρηση των LIGO-Virgo του GW190521 υποδηλώνει ότι είτε οι αστέρες μπορούν να σχηματίσουν μαύρες τρύπες μεγάλης μάζας, είτε ότι κάποιες από τις μαύρες τρύπες των LIGO-Virgo σχηματίζονται μέσω άλλων διεργασιών — ίσως ως αποτέλεσμα μιας προηγούμενης συγχώνευσης μεταξύ ελαφρότερων μαύρων τρυπών, η οποία ανοίγει ένα δρόμο για το σχηματισμό μιας ακόμα μεγαλύτερης μαύρης τρύπας μέσω *ακόμα μίας* συγχώνευσης. Αυτό το σενάριο πολλαπλών συγχωνεύσεων απαιτεί το σχηματισμό των μαύρων τρυπών κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, σε περιβάλλον όπου υπάρχουν αρκετές μαύρες τρύπες σε κοντινή απόσταση ώστε να προκύψουν πολλαπλές συγχωνεύσεις. Οι Αστρονόμοι έχουν προτείνει τα πυκνά [αστρικά σμήνη](#) και τους [δίσκους ενεργών γαλαξιακών πυρήνων](#) ως πιθανά παραδείγματα τέτοιων ειδικών περιβάλλοντων.

Η παρατήρηση του GW190521 επίσης υποδηλώνει ότι το βασίλειο των ενδιάμεσων μαύρων τρυπών μπορεί να καταλαμβάνεται εν μέρει από απομεινάρια συγχωνεύσεων αστρικών μαύρων τρυπών. Ομοίως, υπερμεγέθεις μαύρες τρύπες θα μπορούσαν επίσης να σχηματίζονται κατ’ αυτόν τον τρόπο.

## Τεστάροντας τη Θεωρία της Βαρύτητας

Η θεωρητική μας κατανόηση σε σχέση με τη βαρύτητα περιγράφεται επακριβώς από τη [Γενική Θεωρία της Σχετικότητας](#) του Αϊνστάιν (ΓΘΣ). Οι φυσικοί χρησιμοποιούν τη ΓΘΣ για να προβλέψουν τα εκπεμπόμενα σήματα βαρυτικών κυμάτων από συγχωνεύσεις μαύρων τρυπών. Κατόπιν, οι προβλέψεις αυτές χρησιμοποιούνται στην ανάλυση δεδομένων από τους ανιχνευτές Virgo και LIGO. Αντιστρόφως, οι παρατηρήσεις βαρυτικών κυμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να τεστάρουμε τις προβλέψεις της ίδιας της θεωρίας, και για να ψάξουμε για ενδείξεις πιθανών αποκλίσεων από τη ΓΘΣ που ίσως μας καθοδηγήσουν προς [εναλλακτικές θεωρίες για τη βαρύτητα](#).

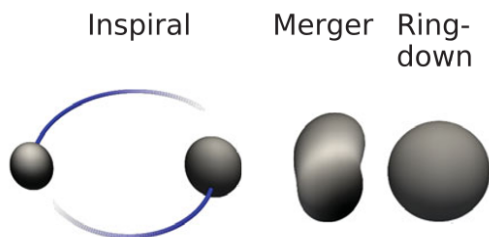
Η χρήση βαρυτικών κυμάτων ως φυσικών εργαστηρίων δεν είναι κάτι το καινούριο: προηγούμενες παρατηρήσεις συγχωνεύσεων μαύρων τρυπών από τους LIGO-Virgo έχουν χρησιμοποιηθεί για να [τεστάρουμε την ΓΘΣ](#). Τι κάνει λοιπόν το GW190512 τόσο ξεχωριστό;



**Εικόνα 2.** Οι μετρήσεις μαζών των συγκρούμενων μαύρων τρυπών που παρήγαγαν το βαρυτικό κύμα GW190521 ως πυκνότητες πιθανότητας. Σύμφωνα με την ανάλυση των LIGO-Virgo, οι πραγματικές τιμές των μαζών έχουν 90% πιθανότητα να κείτονται στο εσωτερικό της μπλε καμπύλης στο κεντρικό γράφημα (που δίνει τη συνδυαστική πιθανότητα για το ζεύγος μαζών). Το ίδιο ισχύει για τις κατακόρυφες και οριζόντιες γραμμές στις κατανομές σχήματος καμπάνας των πάνω και δεξιά γραφικών παραστάσεων της εικόνας, όπου δείχνουμε τις μετρήσεις μάζας για καθεμία από τις μαύρες τρύπες ξεχωριστά. Η γκριζοιασμένη περιοχή του κεντρικού γραφήματος είναι συνέπεια της σύμβασης του LIGO-Virgo ότι η “πρωτεύουσα” μάζα  $m_1$  είναι πάντα ίση ή μεγαλύτερη της “δευτερεύουσας” μάζας  $m_2$ .

Το σήμα βαρυτικών κυμάτων από τη σύγκρουση δύο μαύρων τρυπών παράγεται σε [τρία διαφορετικά στάδια](#) (βλ. Εικόνα 4): πρώτα έχουμε τη “σπειροειδή” τροχιά, κατά την οποία οι δύο μαύρες τρύπες απέχουν αρκετά μεταξύ τους, σε τροχιά η μία γύρω από την άλλη. Μετά έχουμε τη “συγχώνευση”, κατά την οποία οι δύο μαύρες τρύπες συνενώνονται. Τέλος, έχουμε το τελικό “κουδούνισμα”, όταν η εναπομένουσα μαύρη τρύπα “κουδούνίζει” σαν να την έχουν χτυπήσει με ένα γιγάντιο σφυρί, έως ότου ηρεμήσει σε μια ευσταθή τελική κατάσταση.

Όπως αναφέραμε νωρίτερα, τα σήματα μαύρων τρυπών που βρίσκουμε στα δεδομένα των LIGO-Virgo έχουν διαφορετικές χρονικές διάρκειες, ενώ κορυφώνονται σε διαφορετικές συχνότητες, ανάλογα με τις μάζες των μαύρων τρυπών. Έτσι, η ευαισθησία των ανιχνευτών σε διαφορετικά μέρη του βαρυτικού κύματος διαφέρει, ανάλογα με τη μάζα του συστήματος. Σήματα από μαύρες τρύπες μικρότερης μάζας παρατηρούνται πιο καθαρά κατά τα στάδια της σπειροειδούς τροχιάς και συγχώνευσης. Αντιθέτως, οι μεγάλες μάζες των μαύρων τρυπών που παρήγαγαν το GW190521 προσφέρουν την καλύτερη ευκαιρία μέχρι στιγμής για να μελετήσουμε το τελικό στάδιο συγχώνευσης και το τελικό κουδούνισμα, στη βαρυτική κυματομορφή.



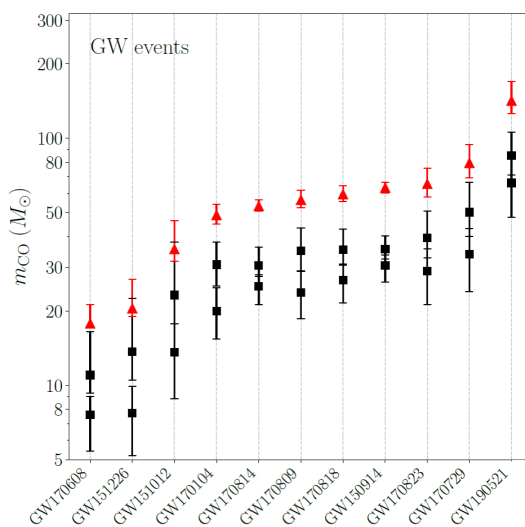
**Figure 4.** Εικονογράφηση που αναπαριστά τα τρία διαφορετικά στάδια παραγωγής βαρυτικού κύματος από τη σύγκρουση δύο μαύρων τρυπών.

Όπως και με όλα τα άλλα σήματα από μαύρες τρύπες που έχουμε παρατηρήσει μέχρι στιγμής, η ΓΩΣ πέρασε όλες τις δοκιμασίες στις οποίες την υποβάλαμε και στην περίπτωση του GW190521. Μία από αυτές τις δοκιμασίες ήταν η ανάλυση μέρους του σήματος από το κουδούνισμα ξεχωριστά από την ανάλυση των σταδίων της σπειροειδούς τροχιάς και συγχώνευσης, όπου ελέγξαμε κατά πόσο οι δύο αναλύσεις συμφωνούν στα μεταξύ τους αποτελέσματα. Επίσης διεξαγάγαμε ελέγχους για πιθανή ύπαρξη χαρακτηριστικών στο σήμα που προβλέπονται από εναλλακτικές θεωρίες βαρύτητας καθώς και για να τεστάρουμε άλλες υποθέσεις (σε αντιπαράθεση με αυτή της συγχώνευσης δύο μαύρων τρυπών) ως προς την ίδια την πηγή του σήματος. Κανένα από αυτά τα τεστ δεν κατάφερε να αμφισβητήσει την ερμηνεία ότι το GW190521 προήλθε από τη συγχώνευση δύο μαύρων τρυπών σε συμφωνία με τη φυσική που περιγράφεται από τη ΓΩΣ.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το GW190521 είναι μία παρατήρηση ρεκόρ που σπρώχνει τα όρια της γνώσης μας ως προς το σχηματισμό μαύρων τρυπών και προσφέρει νέους τρόπους μελέτης της βαρύτητας στις πιο ακραίες συνθήκες. Επίσης υποδεικνύει την ύπαρξη ενός πληθυσμού συγχωνευόμενων μαύρων τρυπών μεγάλης μάζας που ίσως ανακαλυφθεί σε [μελλοντικές εκστρατείες παρατηρήσεων](#) των LIGO (συμπεριλαμβανομένου του [LIGO India](#)), Virgo και του Ιαπωνικού [KAGRA](#).

Η απογραφή της βαριάς ουράς του πληθυσμού αστρικών μαύρων τρυπών θα μας βοηθήσει να σχηματίσουμε μία πιο καθαρή εικόνα για τις διαδικασίες παραγωγής μαύρων τρυπών, καθώς και για τα περιβάλλοντα στα οποία συναντώνται. Το GW190521 μπορεί να απολαμβάνει το θώκο του ως το μεγαλύτερο ζευγάρι μαύρων τρυπών που παρατηρήθηκε έως τώρα, αλλά ας μην επαναπαύεται. Οι LIGO, Virgo και KAGRA θα συνεχίσουν να ψάχνουν για βαρυτικά κύματα με ακόμα μεγαλύτερη ευαισθησία, ενώ οι μελλοντικοί ανιχνευτές θα είναι πολύ πιο ισχυροί, ειδικά σε χαμηλές συχνότητες, όπου πιστεύουμε ότι κρύβονται πολλές περισσότερες βαριές μαύρες τρύπες. Στους ανιχνευτές που βρίσκονται ήδη στα σκαριά περιλαμβάνονται και τα [Einstein Telescope](#) και [Cosmic Explorer](#) στη Γη, και η [LISA](#) στο διάστημα. Τα ρεκόρ γίνονται για να σπάνε!



**Εικόνα 3.** Γράφημα που δείχνει τις συνιστώσες μάζες (ως μαύρα τετράγωνα) των μαύρων τρυπών του GW190521 σε σύγκριση με μάζες άλλων συγχωνεύσεων μαύρων τρυπών που ανιχνεύθηκαν κατά την [1η και 2η περίοδο παρατήρησης, O1 και O2](#). Για κάθε γεγονός, η μάζα της εναπομένουσας μαύρης τρύπας φαίνεται ως κόκκινο τρίγωνο. Το μήκος της κάθε κατακόρυφης μπάρας δείχνει το μέγεθος της αβεβαιότητας ως προς την εκτίμηση της αντίστοιχης μάζας. Οι μετρήσεις ρεκόρ για τις μάζες του GW190521 φαίνονται καθαρά στο γράφημα. (Προσαρμογή της Εικόνας 10 του άρθρου μας για τις [αστροφυσικές συνέπειες του GW190521](#))

## ΜΑΘΕΤΕ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ:

Στις ιστοσελίδες μας: [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

Διαβάστε τα δελτία τύπου των LIGO και Virgo σχετικά με την ανακάλυψη του GW190521:

[www.ligo.org/detections/GW190521/pr-english.pdf](http://www.ligo.org/detections/GW190521/pr-english.pdf)

<http://www.virgo-gw.eu/GW190521>

Διαβάστε τα ελεύθερα διαθέσιμα επιστημονικά άρθρα για την ανακάλυψη του GW190521:

<https://dcc.ligo.org/P2000020/public>

Διαβάστε το συνοδευτικό επιστημονικό άρθρο που περιγράφει τις αστροφυσικές συνέπειες του GW190521:

<https://dcc.ligo.org/P2000021/public>

Τα δημοσιευμένα δεδομένα του Gravitational-Wave Open Science Centre για το GW190521: διαθέσιμα [εδώ](#).