



Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας  
Μεταπτυχιακή Ειδίκευση Καθηγητών Φυσικών Επιστημών

Διπλωματική Εργασία

Βαρυτικά Κύματα

Ειρήνη Λουίζα Δασκάλου

Επιβλέπων καθηγητής: Κεχαγιάς Αλέξανδρος

Πάτρα, Φεβρουάριος 2022

© Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2021

«Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας (« Δασκάλου Ειρήνης Λουίζας ») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο/η συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του/της συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του/της συγγραφέα/δημιουργού. Η συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων».



## Βαρυτικά Κύματα

Ειρήνη Λουίζα Δασκάλου

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Αλέξανδρος Κεχαγιάς

Καθηγητής Ε. Μ. Π.

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Αντώνιος Λεΐσος

Καθηγητής Ε. Α. Π.

Πάτρα, Φεβρουάριος 2022

*«Ευχαριστώ το Ε. Α. Π. που μου έδωσε την ευκαιρία να κάνω το όνειρο μου πραγματικότητα, να σπουδάσω Φυσικές Επιστήμες και τον καθηγητή μου Δρ. Κεχαγιά Αλέξανδρο για την καθοδήγηση και την ενθάρρυνση να μελετήσω ένα σπουδαίο τομέα της Φυσικής όπως είναι τα Βαρυτικά κύματα.»*

## Περίληψη

Από τον Πλάτωνα που πίστευε πως οι πλανήτες είναι ουράνιες θεότητες, οι οποίες έχουν την ικανότητα να κρατούν σε τέλεια κυκλική κίνηση τους εαυτούς τους και να μην επηρεάζουν με άλλο τρόπο τη φυσική εξέλιξη, φτάσαμε στο Νεύτωνα που διατύπωσε το νόμο της Παγκόσμιας έλξης. Ο Αϊνστάιν, όμως διατύπωσε την Ειδική θεωρία της Σχετικότητας, η οποία ορίζει ότι η ταχύτητα του φωτός ως προς κάθε αδρανειακό παρατηρητή, σε οποιαδήποτε κατεύθυνση είναι ίση με  $c = 3 \times 10^8$  m/s (2.1). Ενοποιείται πλέον ο χώρος και ο χρόνος και ονομάζεται χωρόχρονος. Η καμπύλη που διαγράφει ένα σωματίδιο στο χωρόχρονο ονομάζεται κοσμική γραμμή. Η απόσταση μεταξύ των σημείων στη χωροχρονική γεωμετρία είναι αναλλοίωτη και έχει την ίδια μορφή σε κάθε αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Η Γενική θεωρία της Σχετικότητας μας λέει ότι η παρουσία ύλης προκαλεί καμπύλωση του χωρόχρονου και η εξίσωση πεδίου του Einstein είναι :

«(τοπική χωροχρονική καμπυλότητα) = (μέτρο πυκνότητας ύλης – ενέργειας)»

Μια γεωδαισιακή αποτελεί την κοσμική γραμμή ενός αδρανειακού παρατηρητή δηλαδή την ευθύτερη δυνατή (μεταξύ δύο γεγονότων) κοσμική γραμμή. Όταν το βαρυτικό πεδίο είναι η καμπυλότητα της χωροχρονικής γεωμετρίας, τότε η εξίσωση του Einstein για το κενό είναι  $G_{\alpha\beta} = 8\pi G T_{\alpha\beta}$  (3.8). Τα βαρυτικά κύματα είναι οι διακυμάνσεις που διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός και προκαλούνται από την καμπύλωση του χωρόχρονου. Με βάση το είδος της κίνησης του στοιχείου που εκπέμπει τα βαρυτικά κύματα και την κατανομή της μάζας του, χωρίζονται σε συνεχή, σπειροειδή, εκρηκτικά και στοχαστικά. Προκαλούνται από βίαια γεγονότα που συμβαίνουν στο σύμπαν όπως pulsars, συγκρούσεις μελανών οπών, δυαδικά συστήματα αστέρων νετρονίων με μελανές οπές ακόμα και το big bang. Το πρώτο σήμα που ανιχνεύτηκε από τους ανιχνευτές LIGO ήταν στις 14 Σεπτεμβρίου του 2015 από δύο μεσαίου μεγέθους μαύρες τρύπες που συγχωνεύτηκαν. Από τότε έχει ανοίξει ο δρόμος και έχουν ταυτοποιηθεί άλλα 90 γεγονότα που προκάλεσαν την εκπομπή βαρυτικών κυμάτων.

### Λέξεις – Κλειδιά

Βαρυτικά κύματα, Βαρύτητα, καμπυλότητα χωρόχρονου

## Abstract

From Plato who believed that the planets are celestial deities with the ability to maintain themselves in perfect circular motion and not otherwise affect natural evolution, to Newton who formulated the law of Universal Gravitation. Einstein, however, formulated the Theory of Special Relativity, which states that the speed of light, with respect to any non accelerating observer, towards any direction is equal to  $c = 3 \times 10^8 \text{ m / s}$  (2.1). Space and time are now unified and called spacetime. The path of a particle in spacetime is called a world line. The distance between the points in spacetime geometry is unchanged and has the same form in any inertial reference system. According to the Theory of General Relativity, the presence of matter causes the curvature of spacetime and Einstein's field equation is:

$$\text{"(Local spacetime curvature) = (matter-energy density measurement)"}$$

A geodesic is the world line of an inertial observer, meaning the shortest possible path (arc) between two points. When the gravitational field is the curvature of spacetime geometry, then Einstein's equation for the gap is  $G_{\alpha\beta} = 8\pi GT_{\alpha\beta}$  (3.8). Gravitational waves are disturbances in the curvature of spacetime that propagate at the speed of light. According to the type of motion of the element that generates the gravitational waves and the distribution of its mass, they are divided into Continuous, Inspiral, Stochastic and Burst. They are caused by violent events in the universe such as pulsars, black hole collisions, binary neutron star systems with black holes and even the big bang. The first signal detected by LIGO detectors was on September 14, 2015 from two medium-sized black holes that merged. Since then, the road has been opened and another 90 events have been identified that caused the emission of gravitational waves.

## Keywords

Gravitational waves, Gravity, Ripples on Space-time, Spacetime curvature

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract .....	vi
Περιεχόμενα.....	vii
Κατάλογος Εικόνων .....	ix
Κατάλογος Σχημάτων .....	xi
1 Εισαγωγή.....	1
2 Ιστορική Αναδρομή.....	4
2.1 Η Βαρύτητα στην Αρχαιότητα .....	4
2.1.1 Η Κοσμολογία του Πλάτωνα .....	4
2.1.2 Η Κοσμολογία του Αριστοτέλη .....	5
2.1.3 Κλαύδιος Πτολεμαίος .....	6
2.1.4 Κοπερνίκειο πλανητικό σύστημα.....	7
2.1.5 Νόμοι του Κέπλερ.....	8
2.1.6 Γαλιλαίος.....	9
3 Νευτώνεια θεωρία για τη Βαρύτητα .....	10
3.1 Ιστορικά στοιχεία .....	10
3.2 Νευτώνεια Μηχανική .....	10
3.2.1 Ο πρώτος νόμος του Νεύτωνα .....	11
3.2.2 Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα.....	11
3.2.3 Ο τρίτος νόμος του Νεύτωνα .....	11
3.2.4 Νόμος της Παγκόσμιας έλξης .....	11
3.3 Συνέπειες του νόμου της παγκόσμιας έλξης .....	11
3.3.1 Τί είναι η Βαρύτητα .....	12
4 Γενική Θεωρία της Σχετικότητας.....	13
4.1 Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας .....	13
4.1.1 Συνέπειες της ειδικής Σχετικότητας.....	15
4.1.2 Μετασχηματισμοί Lorentz .....	16
4.1.3 Σύνθεση Ταχυτήτων .....	17
4.2 Γενική Σχετικότητα .....	17
4.2.1 Ανταλλοιώτες και συναλλοιώτες συνιστώσες .....	18
4.2.2 Γεωδαισιακές.....	19
4.2.3 Η αρχή της ισοδυναμίας.....	20
5 Θεωρία Βαρυτικών Κυμάτων .....	21
5.1 Παλιρροϊκές Βαρυτικές δυνάμεις.....	21
5.2 Εξίσωση γεωδαιτικής απόκλισης .....	22
5.3 Εξωγενής και εγγενής καμπυλότητα .....	22
5.4 Εξισώσεις πεδίου του Einstein .....	23
6 Πηγές Βαρυτικών Κυμάτων .....	25
6.1 Γραμμικοποιημένα βαρυτικά κύματα.....	25
6.2 Αστροφυσικές πηγές βαρυτικών κυμάτων .....	28
6.2.1 Αστρική εξέλιξη.....	28
6.2.2 Κοσμολογικά γεγονότα .....	30
6.3 Πηγές βαρυτικών κυμάτων με βάση το είδος κίνησης και τη μεταβαλλόμενη κατανομή μάζας .....	31
6.3.1 Συνεχή βαρυτικά κύματα .....	31
6.3.2 Σπειροειδή βαρυτικά κύματα .....	31

6.3.3	Εκρηκτικά βαρυτικά κύματα.....	31
6.3.4	Στοχαστικά βαρυτικά κύματα .....	32
7	Ανιχνευτές Βαρυτικών κυμάτων.....	33
7.1	Συμβολόμετρα βαρυτικών κυμάτων.....	33
7.2	LIGO.....	35
7.3	VIRGO .....	38
7.4	KAGRA.....	40
7.5	GEO 600.....	41
7.6	LISA .....	42
8	Ανακαλύψεις Βαρυτικών Κυμάτων .....	44
8.1	Βραβείο Nobel Φυσικής 2017 .....	44
8.2	GW151226 .....	46
8.3	GW170104 .....	48
8.4	GW170814 .....	49
8.5	GW170608 .....	50
8.6	GW170817 .....	52
8.7	GWTC-1 .....	54
8.8	GW190425 .....	57
8.9	GW190412 .....	58
8.10	GW190814 .....	59
8.11	GW190521 .....	61
8.12	GWTC-2 .....	62
8.13	GW200105_162426 .....	62
8.14	GW200115_042309 .....	63
8.15	GWTC-3 .....	65
9	Μελλοντικές προσδοκίες .....	68
10	Επίλογος.....	70
	Βιβλιογραφία.....	72
	Παράρτημα : «Κατάλογοι ανιχνεύσεων».....	74



## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Κώνος φωτός (Martin, 2020, σ. 26).....	14
Εικόνα 2 Το παράδοξο των διδύμων (Hartle, 2016, σ. 87).....	16
Εικόνα 3 : Κίνηση σωματιδίου σε χωρόχρονο βαρυτικών κυμάτων (Hartle, 2016, σ. 367) .....	27
Εικόνα 4 σχηματικό διάγραμμα του συμβολομετρικού ανιχνευτή Michelson (Hartle, 2016, σ. 371).....	33
Εικόνα 5 απλουστευμένο μοτίβο συμβολής (Hartle, 2016, σ. 372).....	35
Εικόνα 6 «Αεροφωτογραφία του ανιχνευτή LIGO στο Hanford Washington» (LIGO official web site, 2021).....	36
Εικόνα 7 «Αεροφωτογραφία του ανιχνευτή LIGO στο Livingston, LA. » (LIGO official web site, 2021).....	36
Εικόνα 8 «Διάγραμμα βασικού σχεδίου συμβολόμετρου» (LIGO official web site, 2021) .....	37
Εικόνα 9 Ανιχνευτής VIRGO στην Πίζα της Ιταλίας (VIRGO Collaboration official web site, n.d.).....	38
Εικόνα 10 Βασικό σχήμα λειτουργίας ανιχνευτή VIRGO της 3 <sup>ης</sup> περιόδου 2019-1010 (VIRGO Collaboration official web site, n.d.).....	39
Εικόνα 11 η τοποθεσία του KAGRA στην Ιαπωνία, όπου απεικονίζονται οι βραχίονες (KAGRA Observatory official web site, χ.χ.).....	40
Εικόνα 12 το σημείο που ενώνονται οι δύο βραχίονες (KAGRA Observatory official web site, χ.χ.).....	41
Εικόνα 13 GEO 600 φωτογραφία του ανιχνευτή στο Αννόβερο της Γερμανίας (GEO 600 official web site, n.d.).....	42
Εικόνα 14 σχηματική απεικόνιση του GW 150914, της πρώτης παρατήρησης βαρυτικών κυμάτων (Rose, 2017).....	45
Εικόνα 15 η ανίχνευση GW170814 από τους τρεις ανιχνευτές LIGO-Livingston, LIGO-Hanford και στο Virgo. (Abbott, et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration, GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence, 2017).....	50
Εικόνα 16 το διάγραμμα συχνότητας – χρόνου του GW170817 από τους ανιχνευτές LIGO-Hanford, LIGO-Livingston και το Virgo. Βλέπουμε ότι στο Virgo η ανίχνευση δεν ήταν εύκολη λόγω της θέσης που συνέβει το γεγονός στο σύμπαν και της σχετικής θέσης του συγκεκριμένου ανιχνευτή. (Abbott, et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration, GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence, 2017).....	53
Εικόνα 17 το πάνω διάγραμμα είναι συνάρτηση συχνότητας – χρόνου από το LIGO-Livingston τη στιγμή της συνένωσης του GW170817. Το κάτω διάγραμμα αφορά τα ακατέργαστα δεδομένα καταπόνησης LIGO-Livingston της στιγμής της συνένωσης (Abbott, et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration, GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence, 2017).....	54
Εικόνα 18 η καταγραφή της συχνότητας του GW190425 όπως καταγράφηκαν από τους ανιχνευτές LIGO-Livingston και Virgo (Abbott, et al, & LIGO and Virgo Scientific Collaboration, GW190425: Observation of a Compact Binary Coalescence with Total Mass $\sim 3.4M_{\odot}$ , 2020).....	58

Εικόνα 19 η καταγραφή του GW190412 από τους ανιχνευτές LIGO και Virgo (Abbott, et al, & LIGO and Virgo Scientific Collaboration, GW190412: Observation of a binary-black-hole coalescence with asymmetric masses, 2020) .....	59
Εικόνα 20 όπως καταγράφηκε το σήμα του GW190814 από του ανιχνευτές του LIGO και Virgo, διάγραμμα συχνότητας – χρόνου (Abbott, et al, & LIGO and Virgo Scientific Collaboration, GW190814: Gravitational Waves from the Coalescence of a 23 $M_{\odot}$ with a 2.6 $M_{\odot}$ , 2020) .....	60
Εικόνα 21 η κυματομορφή πάνω του GW190521 όπως καταγράφηκε από τους ανιχνευτές των LIGO Hanford, LIGO Livingston, and Virgo και το διάγραμμα συχνότητας – χρόνου κάτω (Abbott, et al, & LIGO and Virgo Scientific Collaboration, GW190521: A Binary Black Hole Merger with a Total Mass of 150 $M_{\odot}$ , 2020). .....	61
Εικόνα 22 το γεγονός GW200105 όπως καταγράφηκε από τους ανιχνευτές στο LIGO Livingston και στο Virgo, το διάγραμμα συχνότητας – χρόνου (Abbott, et al, & The LIGO, VIRGO and KAGRA Scientific Collaboration, Observation of gravitational waves from two neutron star–black hole coalescences, 2021).....	63
Εικόνα 23 το διάγραμμα συχνότητας – χρόνου του GW200115 όπως καταγράφηκε από τους ανιχνευτές LIGO Hanford, LIGO Livingston, και Virgo (Abbott, et al, & The LIGO, VIRGO and KAGRA Scientific Collaboration, Observation of gravitational waves from two neutron star–black hole coalescences, 2021) .....	65
Εικόνα 24 ο κατάλογος GWTC-1 (Abbott, et al, & The LIGO and VIRGO Scientific Collaboration, GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs, 2018) .....	74

## Κατάλογος Σχημάτων

Figure 1 Οι ανιχνεύσεις του GW151226 από το LIGO Hanford and Livingston, αναπαριστούν την καταπόνηση και τη συχνότητα σε σχέση με το χρόνο μετάδοσης του κύματος (Abbott, et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration, Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, 2016) .....	46
Figure 2 Οι ανιχνεύσεις του GW151226 από το LIGO Hanford and Livingston (Abbott & et al LIGO and Virgo Scientific Collaboration, GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary, 2016).....	47
Figure 3 Γραφική παράσταση της συχνότητα του σήματος στους ανιχνευτές του LIGO στο Hanford και το Livingston σε σχέση με το χρόνο ανίχνευσης (Abbott, et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration, GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2, 2017) .....	49
Figure 4 το διάγραμμα συχνότητα – χρόνου του GW170608 όπως καταγράφηκε από τα παρατηρητήρια του LIGO-Hanford, LIGO-Livingston, η χαμηλότερη ευαισθησία του Livingston οφείλεται σε εργασίες συντήρησης που γινόντουσαν τότε στον ανιχνευτή (Abbott, et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration, GW170608: Observation of a 19-solar-mass binary black hole coalescence, 2017) .....	51
Figure 5 παρουσιάζονται τα γραφήματα συχνότητας – χρόνου και για τα δέκα πρώτα συμβάντα ανίχνευσης βαρυτικών κυμάτων από τον ανιχνευτή με μεγαλύτερη ευαισθησία του LIGO που περιλαμβάνονται στο GWTC-1 (The LIGO and The Virgo Scientific Collaboration , 2018) .....	56



Συντομογραφίες & Ακρωνύμια :

π. Χ.            προ Χριστού

ΕΑΠ            Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

μ. Χ.            μετά Χριστόν

$M_{\odot}$             Ηλιακή μάζα =  $(1.98847 \pm 0.00007) \times 10^{30}$  kg

# 1 Εισαγωγή

Η εργασία αυτή είναι μια βιβλιογραφική, δευτερογενής επιστημονική έρευνα. Μια βιβλιογραφική έρευνα που συνίσταται στον εντοπισμό, τη μελέτη, την ανάλυση, την κριτική και τη συνδυαστική παρουσίαση θέσεων από δημοσιευμένα επιστημονικά βιβλία, άρθρα και ιστοσελίδες από τα διεθνή πειράματα που διεξάγονται. Στοχεύει στην κατανόηση βασικών και γενικών φαινομένων και την διατύπωση θεμελιωδών κανονικότητων. Αρχικά καθορίσαμε το θέμα της εργασίας, με τον προσδιορισμό του φαινομένου που διερευνήθηκε και την τοποθέτηση του σε συγκεκριμένο γνωστικό πεδίο. Ξεκινήσαμε με τη μελέτη των πιο πρόσφατων άρθρων που έχουν δημοσιευτεί για τα βαρυτικά κύματα και τα ευρήματα των πειραμάτων που διεξάγονται σε διεθνές επίπεδο και στη συνέχεια εμπλουτίσαμε τη μελέτη μας με επιστημονικά βιβλία που αναλύουν το θεωρητικό υπόβαθρο.

Η εργασία αυτή πραγματεύεται τον τομέα των βαρυτικών κυμάτων. Τα βαρυτικά κύματα εντάσσονται στη θεωρία της βαρύτητας, η οποία είναι κλάδος της Γενικής θεωρίας της Σχετικότητας. Τα βαρυτικά κύματα ανήκουν στον επιστημονικό κλάδο της Αστροφυσικής και δίνουν απαντήσεις σε θέματα Κοσμολογίας.

Με αυτή την εργασία έχουμε σκοπό να εξετάσουμε το θέμα των βαρυτικών κυμάτων. Η επιστήμη των βαρυτικών κυμάτων έχει μπει σε μια νέα εποχή. Οι ανιχνευτές που υπάρχουν είναι μεγάλης ευαισθησίας. Νέα συμβολόμετρα προστίθενται σε διαφορετικά μέρη της Γης, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα καλύτερης παρακολούθησης και επιβεβαίωσης των ανιχνεύσεων. Στην επόμενη δεκαετία αναμένεται να λειτουργήσει ο ανιχνευτής LISA που βρίσκεται στο διάστημα και θα δώσει μια εντελώς νέα τροπή στις παρατηρήσεις.

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει πολλή μεγάλη πρόοδος στις ανιχνεύσεις βαρυτικών κυμάτων, που έχει ως αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό των γνώσεων μας για το σύμπαν. Κάποιες από τις ανακαλύψεις που έχουν γίνει είναι η άμεση παρατήρηση μελανών οπών, συγχωνεύσεων μελανών οπών μεταξύ τους, δυαδικών στοιχείων αστέρων νετρονίων και συστημάτων αστέρων νετρονίων με μελανές οπές. Τα νέα αυτά δεδομένα βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση του σύμπαντος, των μηχανισμών του ακόμα και του τρόπου δημιουργίας του.

Η θεωρία των βαρυτικών κυμάτων άνοιξε το δρόμο στην πειραματική Φυσική και η πειραματική την επιβεβαιώνει και δίνει νέα στοιχεία για περαιτέρω εμβάθυνση και ανάπτυξη της. Το ζήτημα των βαρυτικών κυμάτων είναι επίκαιρο και εξαιρετικά σημαντικό για την επιστήμη και την ανθρωπότητα γενικότερα. Η αστροφυσική των βαρυτικών κυμάτων είναι από τους πιο αναπτυσσόμενους κλάδους της Φυσικής και από τους πιο πολλά υποσχόμενους για το μέλλον, το παρελθόν και την εξέλιξη του σύμπαντος. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε ως θέμα για αυτή τη διπλωματική εργασία.

Ξεκινάμε την εργασία αυτή με μια ιστορική αναδρομή πάνω στην αναζήτηση του ανθρώπου, για απαντήσεις που αφορούν τη βαρύτητα, από την αρχαιότητα και φτάνουμε ως τη σημερινή εποχή. Συνεχίζουμε με τον Ισαάκ Νεύτωνα και το νόμο της Παγκόσμιας έλξης. Αναφέρουμε τους τρεις νόμους του, που αποτελούν τη Νευτώνεια Μηχανική και τις συνέπειες του νόμου της Παγκόσμιας έλξης για την επιστήμη.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφερόμαστε στα βασικά στοιχεία της Ειδικής θεωρίας της Σχετικότητας και εξηγούμε κάποιες γενικές έννοιες της Γενικής θεωρίας της Σχετικότητας. Αναφερθήκαμε στις αρχές που τη διέπουν και τα εργαλεία με τα οποία μπορούμε να την προσεγγίσουμε.

Στο πέμπτο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τη Θεωρία Βαρυτικών Κυμάτων, ποιες δυνάμεις τη διέπουν και ποιες εξισώσεις την ορίζουν. Στη συνέχεια θα δώσουμε μια μορφή της εξίσωσης του Αϊνστάιν για τη βαρύτητα.

Στο έκτο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά των πηγών των βαρυτικών κυμάτων, τα οποία θα διαχωρίσουμε ανάλογα το είδος κίνησης που ανιχνεύεται και τη μεταβαλλόμενη κατανομή μάζας τους. Θα δούμε ότι υπάρχουν τέσσερα είδη κυμάτων τα συνεχή βαρυτικά κύματα, τα σπειροειδή βαρυτικά κύματα, τα εκρηκτικά βαρυτικά κύματα και τα στοχαστικά βαρυτικά κύματα.

Το έβδομο κεφάλαιο είναι η παρουσίαση των ανιχνευτών βαρυτικών κυμάτων, ο τρόπος λειτουργίας τους, ποια είναι τα βασικά τους χαρακτηριστικά και στη συνέχεια η τοποθεσία που βρίσκεται ο καθένας. Δίνουμε κάποιες πληροφορίες για το που διεξάγονται πειράματα αυτή τη στιγμή και που πρόκειται να λειτουργήσουν τα επόμενα χρόνια.

Στο όγδοο κεφάλαιο βρίσκονται οι καταγραφές των βαρυτικών κυμάτων που έχουν επαληθευτεί, μετά το Νόμπελ Φυσικής του 2017, όπως αυτές δημοσιεύονται από τις επιστημονικές ομάδες που διεξάγουν τα πειράματα.

Στο κλείσιμο της εργασίας αυτής γίνεται μια ανασκόπηση των επιτευγμάτων των πειραματικών αποτελεσμάτων των βαρυτικών κυμάτων και δίνονται συμπερασματικές παρατηρήσεις. Κλείνουμε με τις προσδοκίες μας για το μέλλον και το τι ελπίζουμε να πετύχουμε από πλευράς επιστήμης.



## 2 Ιστορική Αναδρομή

Ο άνθρωπος από τα προϊστορικά χρόνια έπρεπε να μάθει να αντιμετωπίζει το φυσικό περιβάλλον για να επιβιώσει. Κατασκεύαζε εργαλεία, άναβε φωτιές, κυνηγούσε, ψάρευε, συνέλλεγε τροφές. Για να τα κάνει όλα αυτά έπρεπε να γνωρίζει τη συμπεριφορά των ζώων, των φυτών, να ξεχωρίζει τα χαρακτηριστικά των θεραπευτικών βοτάνων. Έπρεπε να κατεργαστεί τα ξύλα, τα μέταλλα, να μάθει αγγειοπλαστική. Είχε συνείδηση, των εποχών, των καιρικών φαινομένων και των ουράνιων αντικειμένων. Γνώριζε δηλαδή πολλά πράγματα για το περιβάλλον του. Το ότι γνώριζε να κάνει κάποια πράγματα εμπειρικά όμως, δε σημαίνει όμως ότι γνώριζε και τις θεωρητικές αρχές που βρισκόντουσαν πίσω από την τεχνογνωσία που διέθετε. Για τα προϊστορικά χρόνια δεν υπάρχουν γραπτές πηγές, έχουν διασωθεί όμως προφορικές παραδόσεις, που αναφέρονται στο σύμπαν, όπως το κατανοούσαν τότε, στον ουρανό, τη Γη και σε θεότητες που όριζαν την ύπαρξη γενικότερα. Η επιστήμη είναι ένα σύνολο θεωρητικής γνώσης και πειραματικών διαδικασιών που στοχεύουν στη διερεύνηση των μυστικών της φύσης, των κανόνων που τη διέπουν.

### 2.1 Η Βαρύτητα στην Αρχαιότητα

#### 2.1.1 Η Κοσμολογία του Πλάτωνα

Ξεκινώντας από τον Πλάτωνα, ο οποίος έζησε από το 427 π. Χ. έως το 347 π. Χ. βλέπουμε την προσπάθεια του ανθρώπου να κατανοήσει την κίνηση των πλανητικών σωμάτων. Ο Πλάτων παρόλο που προσπάθησε μέσω των μαθηματικών να δώσει γεωμετρική διάσταση στον κόσμο και τη φύση, όταν έφτασε στην απάντηση του ερωτήματος τί είναι αυτό που κινεί τους πλανήτες, δε μπόρεσε παρά να δώσει θεϊκή υπόσταση σε αυτούς. Υποστήριξε ότι η Γη είναι ακίνητη, έχει σφαιρικό σχήμα και περιβάλλεται από την ουράνια σφαίρα.

Στις παρατηρήσεις του ακόμα συγκαταλέγονται το ότι ο Ήλιος κινείται κυκλικά γύρω από την ουράνια σφαίρα σε ετήσια βάση, η Σελήνη κάνει μία περιστροφή το μήνα στην ίδια τροχιά με τον Ήλιο και ότι η κίνηση των πλανητών είναι ελικοειδής (Lindberg, 1997).

Ο Πλάτων κατέστησε τους πλανήτες ως ουράνιες θεότητες, οι οποίες δεν επηρεάζουν την φυσική εξέλιξη, όπως οι θεότητες των αρχαίων Ελλήνων, αλλά έχουν την τελειότητα να κινούνται σταθερά στις κυκλικές τους κινήσεις και να τηρούν σε τάξη τον κόσμο, κάτι που μόνο μια θεότητα, σύμφωνα με εκείνον μπορούσε να κάνει (Lindberg, 1997).

### **2.1.2 Η Κοσμολογία του Αριστοτέλη**

Ο Αριστοτέλης, ο οποίος έζησε από το 384 π.Χ. έως το 322 π.Χ. θεώρησε το σύμπαν αιώνιο χωρίς να έχει αρχή. Πίστευε ότι είναι μια πολύ μεγάλη σφαίρα, η οποία χωρίζεται σε τρία μέρη. Την ουράνια περιοχή, τη Σελήνη που βρίσκεται στη μέση και την κατώτερη περιοχή, τη γήινη ή υποσελήνια.

Η γήινη περιοχή κατ' αυτόν είναι εκείνη που λαμβάνουν χώρα κάθε είδους μεταβολές, ενώ η ουράνια περιοχή διέπεται από σταθερότητα. (Lindberg, 1997). Η ουράνια περιοχή αποτελείται από ομόκεντρα σφαιρικά κελύφη που περιέχουν τους πλανήτες και τον αιθέρα που καλύπτει πλήρως το χώρο, δίνοντας μια θεϊκή φύση σε αυτήν.

Σύμφωνα με τον Αριστοτέλη όλα τα στοιχεία που υπάρχουν στο γήινο περιβάλλον ακολουθούν τη φύση τους, η οποία είναι να κινούνται προς τα πάνω ή προς τα κάτω με ευθύγραμμες κινήσεις. Οπότε θεωρητικά μπορούμε να προβλέψουμε κάθε μεταβολή και κίνηση των πραγμάτων βάσει της φύσης του καθενός. Για παράδειγμα η πέτρα πέφτει προς τα κάτω, το μάρμαρο θα ενδώσει στο καλέμι και ο σκύλος θα γαβγίσει διότι αυτό είναι που τους καθορίζει η φύση τους. Κάθε στοιχείο επίσης μπορεί να είναι βαρύ ή ελαφρύ, όπου η ελαφρότητα είναι αντίθετη της βαρύτητας. Ένα παράδειγμα για να γίνει κατανοητό, είναι η γη και το νερό που είναι βαριά επειδή η φύση τους είναι να κατευθύνονται προς τα κάτω, ενώ ο αέρας και η φωτιά είναι ελαφριά επειδή η φύση τους είναι να πηγαίνουν προς τα πάνω.

Ίδια ήταν η λογική του Αριστοτέλη και για την κίνηση των σωμάτων. Υπάρχουν, σύμφωνα με εκείνον, δύο είδη κίνησης. Η φυσική κίνηση είναι το πρώτο, όπου η φύση του σώματος είναι το αίτιο που το κινεί και το σώμα σταματά όταν φτάσει στο φυσικό του τόπο. Το δεύτερο είδος κίνησης είναι η εξαναγκασμένη, όπου μια άλλη δύναμη αναγκάζει το σώμα να υπερβεί τη φύση του και να κινηθεί προς άλλη κατεύθυνση, η οποία όταν σταματά να ενεργεί, σταματά και η κίνηση του σώματος. Άρα υπάρχει πάντα κάποιο αίτιο που κινεί ένα σώμα.

Η κίνηση των ουράνιων σφαιρών, οφείλεται στο «Πρώτο κινούν», έναν έμψυχο ακίνητο θεό, ο οποίος δεν καταλαμβάνει χώρο, δεν έχει ανθρώπινη μορφή και στα πλαίσια της τελειότητας του είναι διαρκώς απασχολημένος νοητικά. Οι πλανήτες κινούνται διαρκώς σε ομαλή κυκλική κίνηση, θέλοντας να μοιάσουν στη θεότητα που τους κινεί, η οποία είναι διαφορετική για κάθε ουράνια σφαίρα. (Lindberg, 1997).

### **2.1.3 Κλαύδιος Πτολεμαίος**

Ο Κλαύδιος Πτολεμαίος ήταν Αλεξανδρινός λόγιος ο οποίος είναι γνωστός για τη συμβολή του στην Αστρονομία. Έφτασε στην κορύφωση του έργου του τα έτη 127 με 145 μ. Χ.. Ο Πτολεμαίος συνδύασε τα μαθηματικά με την αστρονομία και έδωσε στην ανθρωπότητα μοντέλα κατανόησης και πρόβλεψης της κίνησης των πλανητών που χρησιμοποιήθηκαν έως και το 17ο αιώνα.

Η Αλμαγέστη είναι το πιο σημαντικό και πιο γνωστό από τα έργα του. Στην οποία περιγράφει την κίνηση των πλανητών ως συνδυασμό κυκλικών κινήσεων. Ο Πτολεμαίος στο έργο αυτό είναι επηρεασμένος από τον Ίππαρχο και το έργο του. Ουσιαστικά εξέλιξε της ιδέες της αρχαίας ελληνικής Αστρονομίας. Δεκατρία βιβλία αποτελούν τη Μεγίστη Μαθηματική Σύνταξη που ήταν το αρχικό όνομα της Αλμαγέστης (Γαβρόγλου, 2003).

Το μοντέλο της κίνησης των πλανητών που προτείνει ο Πτολεμαίος δίνει επακριβώς την περιγραφή της πλατωνικής παράδοσης, που θέλει οι κινήσεις των πλανητών να περιγράφονται από το συνδυασμό ομαλών κυκλικών κινήσεων. Το βασικό σχήμα που χρησιμοποίησε για να περιγράψει τις κινήσεις των πλανητών είναι ο κύκλος. Ο συνδυασμός τριών μοντέλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλεφθεί επιτυχώς η κίνηση των πλανητών. Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν : το Μοντέλο των έκκεντρων κύκλων, το μοντέλο των φέροντων κύκλων και επίκυκλων και το μοντέλο των εξισωτών.

Χρησιμοποιώντας έναν έκκεντρο, ως προς τη Γη, φέροντα κύκλο, όπου το κέντρο του κινείται γύρω από τη Γη και προσθέτοντας έναν εξισωτή, που να διανύει σε ίσους χρόνους ίσες γωνίες, έχουμε την προσομοίωση της κίνησης της Σελήνης (Lindberg, 1997). Επίσης για πλανήτες όπως η Αφροδίτη, ο Άρης, ο Δίας και ο Κρόνος χρησιμοποιούμε έναν έκκεντρο φέροντα κύκλο με εξισωτή και τον πλανήτη να κινείται στον επίκυκλο. Την κίνηση αυτή την παρατηρούμε από τη Γη, η οποία βρίσκεται σε ίση απόσταση και αντίθετη κατεύθυνση από τον εξισωτή. Παρόμοιο μοντέλο χρησιμοποιείται και για την πρόβλεψη των θέσεων των υπόλοιπων πλανητών.

Βλέπουμε πώς σε όλα τα μοντέλα το κέντρο είναι η Γη και ότι ο Πτολεμαίος καταφέρνει να ανάγει τις πολύπλοκες κινήσεις των πλανητών στην ομαλή κυκλική κίνηση. Η βάση της ανάλυσης του Πτολεμαίου είναι τα μαθηματικά, αλλά η άποψη ότι η Γη είναι σταθερή και το κέντρο του σύμπαντος, προέρχεται από φυσικά επιχειρήματα. « Άποψη που γι' αυτόν δεν ήταν απλώς μαθηματική υπόθεση, αλλά σημαντική φυσική πεποίθηση» (Lindberg, 1997). Ο Πτολεμαίος « στην Πλανητική Υπόθεση υποστήριξε ότι το πολύπλοκο σύστημα του από κύκλους, αποκαλύπτει τη δομή της φυσικής πραγματικότητας » (Losee, 1972).

#### **2.1.4 Κοπερνίκειο πλανητικό σύστημα**

Ο Νικόλαος Κοπέρνικος γεννήθηκε στις 19 Φεβρουαρίου του 1473 και είναι αυτός που θέτει τον Ήλιο ακίνητο στο κέντρο του σύμπαντος. Αποκαλύπτει τη σφαιρικότητα της Γης και αναλύει τις κινήσεις των πλανητών και τις αποστάσεις τους από τον Ήλιο.

Στο έργο του περιγράφει με μαθηματικό τρόπο την μετάπτωση του άξονα της Γης και την περιστροφική κίνηση της Σελήνης γύρω από τη Γη. Ο Κοπέρνικος αναφέρεται στην ανωμαλία της κίνησης των πλανητών, λόγω της κίνησης της Γης και την περιγράφει με γεωμετρικά μοντέλα. Χωρίζει τους πλανήτες σε εσωτερικούς και εξωτερικούς, της τροχιάς της Γης, γύρω από τον Ήλιο και πετυχαίνει τη μελέτη των κινήσεων όσων από αυτούς μπορούσε να μελετήσει με τα δεδομένα της εποχής που έζησε, δεδομένου ότι δεν είχε εφευρεθεί ακόμα το τηλεσκόπιο.

Γεγονός αποτελεί το ότι καθυστέρησε να εκδώσει το έργο του λόγω των πολιτικών – θρησκευτικών αντιδράσεων, που θα είχαν ως αποτέλεσμα. Αλλά και των αναπάντητων ερωτημάτων που άφηνε η θεωρία του και στον ίδιο τον εαυτό του ακόμα. Ερωτήματα που

αφορούν τα θέματα της βαρύτητας, όπως γιατί ένα σώμα, πάνω στη Γη, πέφτει κατακόρυφα προς τα κάτω, ή γιατί ό, τι βρίσκεται πάνω της δεν εκτινάσσεται με δύναμη προς τα πάνω, ή γιατί δεν αντιλαμβανόμαστε την κίνηση της (Γαβρόγλου, 2003).

### 2.1.5 Νόμοι του Κέπλερ

Ο Johannes Kepler γεννημένος στις 27 Δεκεμβρίου 1571 στη Βυρτεμβέργη έδωσε στην επιστήμη την ελλειπτική τροχιά των πλανητών, με το έργο του « Νέα Αστρονομία », που δημοσιεύτηκε το 1609, περιγράφοντας την τροχιά του πλανήτη Άρη (Γαβρόγλου, 2003). Στη συνέχεια επεκτάθηκε σε όλους τους πλανήτες και διατύπωσε τους νόμους του που αποτελέσαν τη βάση για τη θεωρία της Βαρύτητας του Νεύτωνα.

« Έλλειψη είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων του επιπέδου των οποίων το άθροισμα των αποστάσεων από δύο σταθερά σημεία είναι σταθερό » (Feynman, Leighton, & Sands, 2009).

Ο Κέπλερ παρατήρησε ότι οι πλανήτες που περιστρέφονται γύρω από τον Ήλιο κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα όταν βρίσκονται κοντά του και με χαμηλότερη ταχύτητα όταν βρίσκονται μακριά του.

Επίσης σύγκρινε την περίοδο κίνησης των πλανητών με την τροχιά τους και βρήκε ότι η περίοδος είναι ανάλογη με τη μεγάλη διάμετρο της έλλειψης, υψωμένη στην 2/3.

Συγκεκριμένα οι νόμοι του Κέπλερ είναι :

«Κάθε πλανήτης που κινείται γύρω από τον Ήλιο διανύει ελλειπτική τροχιά, όπου ο Ήλιος βρίσκεται στη μία εστία της έλλειψης». (1ος Νόμος )

«Το διάνυσμα θέσης από τον Ήλιο προς τον πλανήτη σαρώνει ίσα εμβαδά σε ίσα χρονικά διαστήματα». ( 2ος Νόμος )

«Τα τετράγωνα των περιόδων δύο οποιωνδήποτε πλανητών είναι ανάλογα των κύβων του μεγάλου ημιάξονα των τροχιών τους». ( 3ος Νόμος ) (Feynman, Leighton, & Sands, 2009).

### 2.1.6 Γαλιλαίος

Από την αναδρομή αυτή δε μπορεί να παραληφθεί η αναφορά στο Γαλιλαίο, την ιστορική μορφή που έδωσε στην επιστήμη το πείραμα, το τηλεσκόπιο, την ελεύθερη πτώση και το έναυσμα για το νόμο της αδράνειας.

Ο Γαλιλαίος έδωσε τη γεωμετρική απόδειξη του Φυσικού νόμου της ελεύθερης πτώσης. Χρησιμοποιώντας ευκλείδεια γεωμετρία στην απόδειξη του Nicolas Oresme για την κίνηση σε κεκλιμένο επίπεδο, ο Γαλιλαίος μπόρεσε να προβλέψει το ρυθμό με τον οποίο αυξάνεται η ταχύτητα. Επίσης προέβλεψε με μαθηματικό τρόπο ότι «η απόσταση που διανύεται στην ελεύθερη πτώση είναι ανάλογη με το τετράγωνο του χρόνου», κάτι που στη συνέχεια απόδειξε πειραματικά με διάφορες κλίσεις επιπέδων (Γαβρόγλου, 2003).

Ο Γαλιλαίος παρατήρησε το εξής φαινόμενο, κάνοντας ένα πείραμα κατά το οποίο αφήνουμε ένα σώμα που βρίσκεται σε ηρεμία να κυλίσει σε ένα κοίλο επίπεδο, το σώμα δε θα φτάσει ποτέ στο ίδιο ύψος, της απέναντι πλευράς, από το οποίο αφέθηκε να πέσει, όσο κι αν λειάνουμε το επίπεδο. Αν όμως η απέναντι πλευρά του επιπέδου ήταν οριζόντια το σώμα τότε θα κινούνταν επ' άοριστο (Γαβρόγλου, 2003). Στις παρατηρήσεις αυτές βασίστηκε ο Νεύτωνας και διατύπωσε το νόμο της Αδράνειας.

Ο Γαλιλαίος ήταν ο πρώτος που παρατήρησε ότι οι νόμοι της Φυσικής ισχύουν επ' ακριβώς όταν βρισκόμαστε σε διαφορετικά σημεία αναφοράς που κινούνται μεταξύ τους με σταθερή ταχύτητα, Σχετικότητα του Γαλιλαίου (Αποστολάτος & Ιωάννου, 2016).

### 3 Νευτώνεια θεωρία για τη Βαρύτητα

#### 3.1 Ιστορικά στοιχεία

Ο Ισαάκ Νεύτωνας έζησε από το 1642 έως το 1727, παρότι υπήρξε μια αμφιλεγόμενη προσωπικότητα, με το έργο του «Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (Μαθηματικές αρχές της Φυσικής Φιλοσοφίας)» το οποίο εκδόθηκε το 1687, εισήγαγε έναν νέο τομέα των Μαθηματικών το «Λογισμό των ροών» όπως ονόμασε ο ίδιος, ή όπως ονομάζεται σήμερα, Διαφορικός και Απειροστικός Λογισμός. Το έργο αυτό αποτελείται από τρία βιβλία, τα δύο πρώτα αφορούν διάφορες καταστάσεις κίνησης και το τρίτο συμπεράσματα αστρονομίας. Αρχικά χρησιμοποίησε το Διαφορικό Λογισμό και στη συνέχεια αποδείξεις με Γεωμετρία, ώστε να γίνει κατανοητός από τους σύγχρονους του καθώς δεν ήταν ακόμα διαδεδομένος ο Διαφορικός Λογισμός.

Το 1684 παρουσίασε μια πραγματεία με τίτλο «De motu corporum in gyrum (Περί της κινήσεως των σωμάτων σε τροχιά)» όπου αποδείκνυε ότι οδηγούμαστε σε ελλειπτικές τροχιές, λόγω δύναμης που είναι ανάλογη του αντίστροφου τετραγώνου. Ο Νεύτωνας υπήρξε ο θεμελιωτής της σύγχρονης μηχανικής και ενοποίησε την ουράνια και γήινη μηχανική.

Ο Νεύτων διατύπωσε την αρχή της αδράνειας, η οποία ορίζει ότι «όταν ένα σώμα κινείται χωρίς να ασκείται καμία δύναμη πάνω του, αυτό θα κινείται επ' άπειρον σε ευθεία γραμμή και με σταθερή ταχύτητα». Βασίστηκε στο δεύτερο και τον τρίτο νόμο του Κέπλερ για να διατυπώσει το νόμο της παγκόσμιας έλξης. Συμπέρανε ότι πρέπει να υπάρχει μια δύναμη που είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης, στην ευθεία που ενώνει έναν πλανήτη, που περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο (Feynman, Leighton, & Sands, 2009). Την οποία ονόμασε κεντρομόλο. Γενικεύοντας ότι κάθε υλικό σώμα έλκει οποιοδήποτε άλλο υλικό σώμα υπάρχει στο σύμπαν.

#### 3.2 Νευτώνεια Μηχανική

### 3.2.1 Ο πρώτος νόμος του Νεύτωνα

«Αν η συνολική δύναμη που ασκείται σε ένα υλικό σώμα είναι μηδενική, τότε το σώμα κινείται ευθύγραμμα ομαλά με μηδενική επιτάχυνση ή είναι ακίνητο».

### 3.2.2 Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα

«Αν σε ένα υλικό σώμα μάζας  $m$  ασκείται συνολική δύναμη  $F$ , τότε το σώμα θα αποκτήσει επιτάχυνση  $a$  κατά τη διεύθυνση της δύναμης, τέτοια ώστε :

$$F = m \cdot a \quad (1.1)$$

### 3.2.3 Ο τρίτος νόμος του Νεύτωνα

«Σε κάθε δράση υπάρχει πάντα μια ίση και αντίθετη αντίδραση»

### 3.2.4 Νόμος της Παγκόσμιας έλξης

«Αν δύο σώματα  $m_1$  και  $m_2$  βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους  $r$ , τότε έλκονται με δύναμη  $F$ , ίση με :

$$F = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1.2)$$

όπου  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{Nm}^2\text{kg}^{-2}$  »

## 3.3 Συνέπειες του νόμου της παγκόσμιας έλξης

Ο νόμος της παγκόσμιας έλξης εκτός από την κίνηση των ουράνιων σωμάτων μπόρεσε να εξηγήσει τις παλίρροιας. Μας οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η Γη και η Σελήνη περιστρέφονται γύρω από ένα κοινό κέντρο, το οποίο βρίσκεται εντός της γήινης σφαίρας



αλλά όχι στο κέντρο της. Μας οδήγησε να καταλάβουμε ότι η Γη έχει ελλειψοειδές σχήμα λόγω της περιστροφής της. Μπορέσαμε να κατανοήσουμε επακριβώς την κίνηση των φεγγαριών δορυφόρων των πλανητών. Διαπιστώσαμε ότι η κίνηση των πλανητών γύρω από τον Ήλιο δεν είναι μια τέλεια έλλειψη αλλά παρουσιάζουν μετάπτωση στην τροχιά τους από την επίδραση των άλλων πλανητών σε αυτούς.

Ο νόμος της βαρυτικής έλξης έχει εφαρμογή και πέρα από το ηλιακό μας σύστημα, για παράδειγμα στην περίπτωση των διπλών αστέρων που έλκουν το ένα το άλλο. Η βαρύτητα υφίσταται και σε αποστάσεις της τάξης ενός αστρικού σμήνους. Βαρυτική έλξη υπάρχει ακόμα και σε ένα γαλαξιακό σμήνος όπου σχηματίζονται δομές και συσσωματώματα. Το μόνο που μας μένει είναι να αποδειχτεί (Feynman, Leighton, & Sands, 2009).

### 3.3.1 Τί είναι η Βαρύτητα

Η δύναμη της βαρύτητας όπως είδαμε και προηγουμένως είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης. Επίσης είναι ανάλογη της μάζας, η οποία είναι το μέτρο αδράνειας ενός σώματος, δηλαδή του πόσο αντιτίθεται το σώμα στην αλλαγή της κινητικής του κατάστασης. Ουσιαστικά η βαρύτητα έχει την ιδιότητα στην περίπτωση που δύο σώματα περιστρέφονται γύρω από ένα τρίτο βαρύτερο σώμα, με διαφορετικές μάζες μεταξύ τους, να τα διατηρεί στην τροχιά τους. Είναι τόσο ισχυρή όσο χρειάζεται στην κάθε περίπτωση για να τα συγκρατήσει. Ακόμα και όταν ένα σώμα βρίσκεται μέσα σε ένα άλλο σώμα αυτό θα παραμείνει μέσα σε αυτό υπό την επίδραση την κατάλληλης δύναμης της βαρύτητας, σε κατάσταση δηλαδή « τέλειαις ισορροπίας » (Feynman, Leighton, & Sands, 2009).

Η Βαρύτητα είναι μια κινηματική δύναμη που μπορεί να εξηγηθεί μόνο εντάσσοντας την καμπυλότητα του τετραδιάστατου χώρου, δηλαδή του χωρόχρονου. Όταν ο χωρόχρονος δεν παρουσιάζει καμπυλότητα μπορούν να εξηγηθούν όλα τα φαινόμενα που δε σχετίζονται με τη Βαρύτητα και αποτελούν την ειδική θεωρία της σχετικότητας του Einstein (Martin, 2020).

## 4 Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

«Πανομοιότυπα πειράματα που διεξάγονται σε διαφορετικά αδρανειακά συστήματα αναφοράς παράγουν πανομοιότυπα αποτελέσματα». (Hartle, 2016)

Αυτή αποτελεί την Αρχή της Σχετικότητας, η οποία έρχεται σε πλήρη συνέπεια με τους νόμους του Νεύτωνα.

### 4.1 Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

Αδρανειακός παρατηρητής θεωρείται το σύστημα συντεταγμένων το οποίο έχει σταθερή ταχύτητα ως προς κάθε άλλο, δηλαδή έχει μηδενική επιτάχυνση.

Για να χαρακτηριστεί ένα σύστημα συντεταγμένων αδρανειακό θα πρέπει :

«Η απόσταση μεταξύ του σημείου  $P_1$  και  $P_2$  να είναι ανεξάρτητη του χρόνου. Ρολόγια τα οποία βρίσκονται σε οπουδήποτε σημείο και δείχνουν τη χρονική συντεταγμένη  $t$  πρέπει να είναι συγχρονισμένα και να έχουν τον ίδιο ρυθμό λειτουργίας. Σε κάθε χρονική στιγμή  $t$  η γεωμετρία του χώρου είναι Ευκλείδεια» (Schutz, 2007).

Η ταχύτητα του φωτός ως προς κάθε αδρανειακό παρατηρητή, σε οποιαδήποτε κατεύθυνση είναι η ίδια και ίση με :

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2.1)$$

Η τετραδιάστατη ενοποίηση του χώρου και του χρόνου ονομάζεται χωρόχρονος. Ενώ η καμπύλη που διαγράφει ένα σωματίδιο στο χωρόχρονο ονομάζεται κοσμική γραμμή.

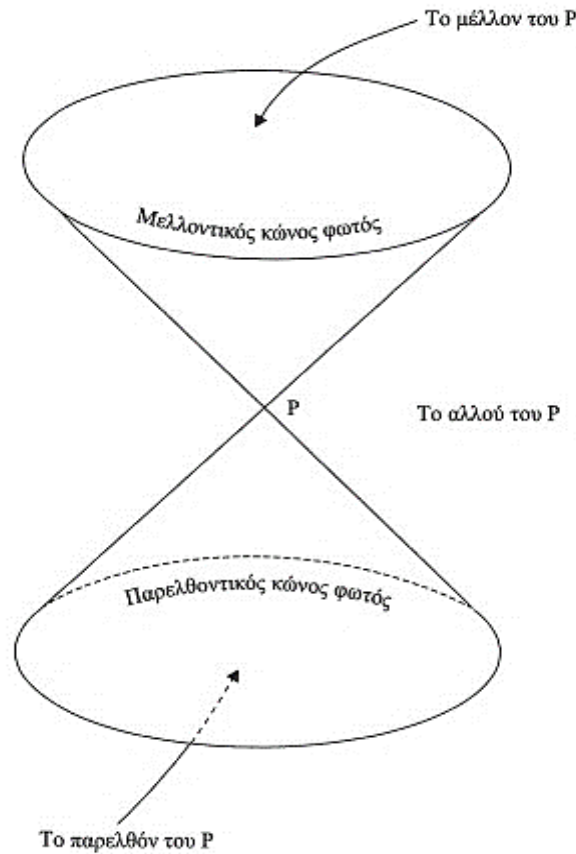
Η αναλοιώτητα της απόστασης μεταξύ των σημείων στη χωροχρονική γεωμετρία εκφράζεται από τον τύπο :

$$ds^2 = -(c dt)^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (2.2)$$

και πρέπει να έχει την ίδια μορφή σε κάθε αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

Η γεωμετρία αυτή δεν είναι ευκλείδεια και το  $ds^2$  μπορεί να είναι θετικό αρνητικό ή μηδενικό. Όταν είναι θετικό τα σημεία είναι χωροειδώς χωρισμένα, όταν είναι αρνητικό είναι χρονοειδώς χωρισμένα και όταν είναι ίσο με μηδέν είναι φωτοειδώς χωρισμένα.

Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που είναι φωτοειδώς χωρισμένα από ένα σημείο P στο χωρόχρονο, ονομάζεται κώνος φωτός. Ο μελλοντικός κώνος φωτός παράγεται από φωτεινές ακτίνες που εξέρχονται από το P, ενώ ο παρελθοντικός κώνος φωτός παράγεται από φωτεινές ακτίνες που συγκλίνουν στο P. (Hartle, 2016).



Εικόνα 1 Κώνος φωτός (Martin, 2020, σ. 26)

Οι κώνοι φωτός ορίζουν το πως μπορεί ένα σημείο να επηρεάσει ένα άλλο. Το μέλλον του P είναι πραγματικό και μπορεί να επηρεαστεί από ένα σημείο Q που βρίσκεται στο παρελθόν του P, το οποίο είναι επίσης πραγματικό. Το αλλού είναι φανταστικό και δε μπορεί να επικοινωνήσει με σημεία που βρίσκονται εντός του κώνου (εικόνα 1).

Για τη μέτρηση της απόστασης, μεταξύ δύο γειτονικών σημείων μιας χρονοειδούς καμπύλης, κατά μήκος της κοσμικής γραμμής ενός σωματιδίου χρησιμοποιούμε τον ιδιόχρονο  $d\tau^2$  όπου :

$$d\tau^2 = - ds^2 / c^2 \quad (2.3)$$

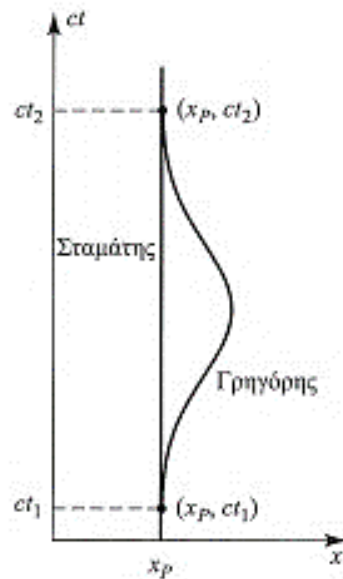
#### 4.1.1 Συνέπειες της ειδικής Σχετικότητας

Το φαινόμενο της διαστολής του χρόνου που προκύπτει από την ειδική Σχετικότητα μπορεί να εκφραστεί από τον τύπο :

$$d\tau = dt \sqrt{1 - \vec{v}^2/c^2} \quad (2.4)$$

το οποίο μας δείχνει ότι ο ιδιόχρονος  $d\tau$ , ενός κινούμενου συστήματος, είναι μικρότερος από τον  $dt$ , γιατί η ποσότητα  $\sqrt{1 - \vec{v}^2/c^2}$  είναι μικρότερη από τη μονάδα.

Από το φαινόμενο αυτό προκύπτει και το παράδοξο των διδύμων όπου δύο δίδυμοι ξεκινούν από την κατάσταση ηρεμίας σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή από συγκεκριμένο σημείο στο χώρο, ο ένας ( ο Γρηγόρης ) απομακρύνεται από το σημείο αυτό και επιστρέφει αργότερα στο ίδιο σημείο και ο άλλος ( ο Σταμάτης ) παραμένει σε ηρεμία στο ίδιο σημείο (εικόνα 2). Ο χρόνος που πέρασε για εκείνον που έμεινε ακίνητος είναι  $dt$ , ενώ για εκείνον που μετακινήθηκε είναι  $d\tau < dt$ . Άρα κατανοούμε ότι ο κινούμενος μεγαλώνει πιο αργά από τον ακίνητο.



Εικόνα 2 Το παράδοξο των διδύμων (Hartle, 2016, σ. 87)

Η ευθεία γραμμή στον τετραδιάστατο χωρόχρονο είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο χρονοειδώς χωρισμένων σημείων, το αντίθετο με τον τρισδιάστατο χώρο που η ευθεία γραμμή είναι η μικρότερη απόσταση, που μπορεί να διαγραφεί ανάμεσα σε δύο σημεία.

#### 4.1.2 Μετασχηματισμοί Lorentz

Οι κανόνες μετασχηματισμού που συνδέουν τα διάφορα αδρανειακά συστήματα αναφοράς ονομάζονται μετασχηματισμοί Lorentz και δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$t' = \gamma (t - ux / c^2) \quad (2.5)$$

$$x' = \gamma (x - ut) \quad (2.6)$$

$$y' = y \quad (2.7)$$

$$z' = z \quad (2.8)$$

όπου :

$$\gamma = (1 - u^2/c^2)^{-1/2} \quad (2.9)$$

Η Σύστολή Lorentz δίνεται από τον τύπο :

$$L^2 = L^{*2} \sqrt{1 - u^2/c^2} \quad (2.10)$$

και ορίζει ότι «το μήκος μιας ράβδου μετρημένο στο δικό της σύστημα αναφοράς είναι  $L^*$ , ενώ μετρημένο σε ένα κινούμενο σύστημα αναφοράς είναι  $L$ ».

Όπως διαφέρει η αντίληψη του ταυτοχρονισμού σε διαφορετικά αδρανειακά συστήματα έτσι διαφέρει και η αντίληψη του μήκους σε διαφορετικά αδρανειακά συστήματα.

#### 4.1.3 Σύνθεση Ταχυτήτων

Ο νόμος σύνθεσης ταχυτήτων κατά τον Einstein, αν υποθέσουμε ότι η κίνηση ενός σωματιδίου σε ένα σύστημα αναφοράς περιγράφεται από τις συντεταγμένες  $x, y, z$ , και σε ένα άλλο σύστημα αναφοράς περιγράφεται από τις  $x', y', z'$ , τότε ισχύει ότι :

$$V_{x'} = \frac{V_x - u}{1 - uV_x/c^2} \quad (2.11)$$

$$V_{y'} = \frac{V_y}{1 - uV_x/c^2} \sqrt{1 - u^2/c^2} \quad (2.12)$$

$$V_{z'} = \frac{V_z}{1 - uV_x/c^2} \sqrt{1 - u^2/c^2} \quad (2.13)$$

## 4.2 Γενική Σχετικότητα

Η παρουσία ύλης προκαλεί καμπύλωση του χωρόχρονου και η εξίσωση πεδίου του Einstein είναι :

$$\langle\langle \text{τοπική χωροχρονική καμπυλότητα} \rangle\rangle = (\text{μέτρο πυκνότητας ύλης} - \text{ενέργειας})$$

Όπου μας δείχνει το συσχετισμό της καμπυλότητας του χωρόχρονου με την πηγή της ύπαρξής του.

#### 4.2.1 Ανταλλοιώτες και συναλλοιώτες συνιστώσες

Σε μια καμπύλη επιφάνεια η μετατόπιση δε μπορεί να αποδοθεί με ένα διάνυσμα με καθορισμένη φορά και μέτρο καθώς δεν υφίσταται η έννοια της γραμμικής διεύθυνσης. Θα πρέπει να θεωρήσουμε απειροστές μετατοπίσεις όπου η καμπυλότητα δεν είναι εύκολα διακριτή.

Σε καμπυλόγραμμες συντεταγμένες για να προσδιορίσουμε ένα διάνυσμα  $V$  που είναι εφαπτόμενο σε ένα σημείο  $P$  εισάγουμε ανταλλοιώτες συνιστώσες που εκφράζονται από τη σχέση:

$$V^\mu = \sum_{\nu=1}^n g^{\mu\nu}(P) V_\nu \quad (2.14)$$

οι άνω δείκτες ονομάζονται ανταλλοιώτοι γιατί μετασχηματίζονται αντίθετα από τα διανύσματα βάσης, δηλαδή παραμένουν ανεξάρτητα από τα συστήματα αναφοράς. Το μήκος  $ds$  μιας μετατόπισης δίνεται από τον τύπο :

$$ds^2 = \sum_{\mu=1}^n \sum_{\nu=1}^n g_{\mu\nu}(P) dx^\mu dx^\nu \quad (2.15)$$

όπου  $g$  είναι ο μετρικός τανυστής στο  $P$ , ο οποίος έχει  $n(n+1)/2$  συνιστώσες που αλλάζουν από τόπο σε τόπο.

Εισάγουμε ακόμα τις συναλλοιώτες συνιστώσες, με την ισοδύναμη αναπαράσταση ενός διανύσματος  $V$  στο  $P$  ως :

$$V_\mu = \sum_{\nu=1}^n g_{\mu\nu}(P) V^\nu \quad (2.16)$$

οι κάτω δείκτες ονομάζονται συναλλοιώτοι γιατί μετασχηματίζονται μαζί με τα διανύσματα βάσης.

Η αλλαγή από το  $V^\mu$  σε  $V_\nu$  ονομάζεται κατέβασμα του άνω δείκτη και δίνεται από την εξίσωση :

$$V^{\mu} = g^{\mu\nu}V_{\nu} \quad (2.17)$$

ενώ η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται ανέβασμα του κάτω δείκτη και δίνεται από την εξίσωση:

$$V_{\mu} = g_{\mu\nu}V^{\nu} \quad (2.18)$$

«Τανυστής είναι μια ανεξάρτητη από συντεταγμένες γεωμετρική οντότητα, που εκφράζεται σε ένα συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων ως μια συλλογή στοιχείων  $T$ , τα οποία δηλώνονται με άνω δείκτες ( τους ανταλλοιώτους ) και κάτω δείκτες ( τους συναλλοιώτους ). Κάθε αλλαγή συντεταγμένων επιφέρει έναν ομογενή γραμμικό μετασχηματισμό όλων των στοιχείων σύμφωνα με έναν επακριβώς προσδιορισμένο νόμο μετασχηματισμού» (Martin, 2020).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε τον ανταλλοιώτο τανυστή  $g^{\mu\nu}$  και τον συναλλοιώτο  $g_{\mu\nu}$ . « Ο μετασχηματισμός μιας βάσης είναι η έκφραση των νέων διανυσμάτων συναρτήσεως των αρχικών, ενώ ο μετασχηματισμός των συνιστωσών είναι η έκφραση του ίδιου αντικειμένου συναρτήσεως της νέας βάσης » (Schutz, 2007) Ακόμα είναι σημαντικό να διασαφηνιστεί ότι οι συνιστώσες αποτελούν μόνο ένα τμήμα της πληροφορίας, οι υπόλοιπη πληροφορία βρίσκεται στη βάση.

#### 4.2.2 Γεωδαισιακές

Την κίνηση που κάνει ένας αδρανειακός παρατηρητής σε καμπύλο χωρόχρονο την περιγράφουν οι γεωδαισιακές.

« Η κοσμική γραμμή ενός αδρανειακού παρατηρητή πρέπει να είναι μια γεωδαισιακή, δηλαδή η ευθύτερη δυνατή (μεταξύ δύο γεγονότων) κοσμική γραμμή» (Martin, 2020)

Για να είναι μια καμπύλη γεωδαισιακή θα πρέπει το μήκος της να είναι στάσιμο για οποιαδήποτε μικρή τροποποίηση της. Οι γεωδαισιακές εξισώσεις στη μορφή Euler :



$$\frac{d}{d\sigma} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}^u} \right) - \frac{\partial L}{\partial x^u} = 0, \mu = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.19)$$

όταν  $L > 0$  η καμπύλη είναι χρονοειδής, το εφαπτόμενο διάνυσμα έχει θετικό τετραγωνισμένο μήκος, το οποίο είναι το τετραδιάνυσμα της ταχύτητας και η γεωδαισιακή είναι η δυνατή κοσμική γραμμή ενός αδρανειακού παρατηρητή.

Όταν  $L = 0$  η καμπύλη είναι μηδενική, το εφαπτόμενο διάνυσμα έχει μηδενικό τετραγωνισμένο μήκος. Η γεωδαισιακή αυτή μπορεί να είναι η κοσμική γραμμή ενός παλμού ραντάρ ή ενός σωματιδίου μηδενικής μάζας.

Όταν  $L < 0$  η γεωδαισιακή είναι χωροειδής, βρίσκεται έξω από τον κώνο φωτός και δε μπορεί να είναι κοσμική γραμμή κάποιου αντικειμένου.

### 4.2.3 Η αρχή της ισοδυναμίας

« Δεν υπάρχει κανένα πείραμα που να μπορεί να διακρίνει μια ομαλή επιτάχυνση από ένα ομοιόμορφο βαρυτικό πεδίο. Είναι μεταξύ τους πλήρως ισοδύναμα » (Hartle, 2016)

Η ισότητα της βαρυτικής με την αδρανειακή μάζα μας δείχνει ότι ένα βαρυτικό πεδίο μπορεί να πάψει να υφίσταται κατά την ελεύθερη πτώση και επίσης ότι μπορεί να δημιουργηθεί μέσω της επιτάχυνσης.

Για να εισάγουμε αδρανειακούς παρατηρητές, στη Γενική Σχετικότητα, θεωρούμε ένα μη περιστρεφόμενο εργαστήριο σε ελεύθερη πτώση, του οποίου η κοσμική γραμμή είναι μια χρονοειδής γεωδαισιακή, ο χρόνος που μετράει είναι το διάστημα κατά μήκος της γεωδαισιακής καμπύλης και οι καρτεσιανοί άξονες μεταφέρονται παράλληλα κατά μήκος της γεωδαισιακής. Τότε μπορούμε να πούμε ότι ισχύουν όλες οι εξισώσεις της Ειδικής Σχετικότητας.

## 5 Θεωρία Βαρυτικών Κυμάτων

Το κύριο χαρακτηριστικό των βαρυτικών φαινομένων είναι η Καμπυλότητα του χωρόχρονου. Για να περιγραφεί η βαρύτητα θα πρέπει να εισάγουμε την καμπυλότητα στον τετραδιάστατο χωρόχρονο του Minkowski, τα γεγονότα μπορούν να παρασταθούν ως σημεία, αλλά οι σχέσεις μεταξύ τους αλλάζουν (Martin, 2020).

Σε ένα βαρυτικό πεδίο δύο παράλληλες αρχικά γεωδαισιακές δε θα παραμείνουν παράλληλες. Δύο αρχικά ακίνητοι, μεταξύ τους, παρατηρητές δε θα παραμείνουν σχετικά ακίνητοι κατά τη διάρκεια ελεύθερης πτώσης σε μη ομογενές βαρυτικό πεδίο. Η χωροχρονική μετρική με τις χρονοειδείς γεωδαισιακές περιγράφει πλήρως το βαρυτικό πεδίο. «Το βαρυτικό πεδίο είναι στην ουσία η καμπυλότητα της χωροχρονικής γεωμετρίας» (Wald, 2007)

Βαρυτικά κύματα ονομάζονται οι διακυμάνσεις που διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός, στον καμπυλωμένο χωρόχρονο και προκαλούνται από μια μη σφαιρική μάζα, η οποία κινείται μη ομαλά. Υπακούει στην παρακάτω εξίσωση :

$$\left(-\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla^2\right) \bar{h}_{\alpha\beta} = -16\pi T_{\alpha\beta} \quad (3.10)$$

### 5.1 Παλιρροϊκές Βαρυτικές δυνάμεις

Οι δυνάμεις οι οποίες τείνουν να διαχωρίσουν ή να φέρουν πιο κοντά γειτονικά σωματίδια, ονομάζονται παλιρροϊκές βαρυτικές δυνάμεις.

Η εξίσωση Νευτώνειας απόκλισης για το διάνυσμα απόστασης  $x^i$  :

$$\frac{d^2 x^i}{dt^2} = -\delta^{ij} \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^j \partial x^k} \right)_{\vec{x}} x^k \quad (3.1)$$

όπου ο τανυστής  $\left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^j \partial x^k} \right)$  καθορίζει τις παλιρροϊκές δυνάμεις και ονομάζεται παλιρροϊκός τανυστής επιτάχυνσης και ισχύει :

$$\nabla^2 \phi = \delta^{ij} \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^j \partial x^k} \right) = 4\pi G \mu \quad (3.2)$$

όπου  $\mu$  η πυκνότητα μιας κατανομής βαρυτικών μαζών.

## 5.2 Εξίσωση γεωδαιτικής απόκλισης

Η γενίκευση της νευτώνειας εξίσωσης απόκλισης, είναι η εξίσωση γεωδαιτικής απόκλισης, στη γενική σχετικότητα:

$$(\nabla_u \nabla_u x)^\alpha = -R_{b\gamma\delta}^\alpha u^b x^\gamma u^\delta \quad (3.3)$$

εκφράζει το ότι οι παλιρροϊκές βαρυτικές δυνάμεις μπορούν να αναπαρασταθούν από την καμπυλότητα ενός χωρόχρονου, όπου τα σωματίδια κινούνται κατά μήκος των γεωδαισιακών. Το  $x$  είναι το τετράνυσμα διαχωρισμού που συνδέει τα σημεία των δύο γεωδαισιακών, τα  $u^b$  και  $u^\delta$  είναι οι συνιστώσες της τετραταχύτητας της παράλληλης μετατόπισης κατά μήκος ενός βρόχου. Ο τανυστής  $R_{b\gamma\delta}^\alpha$  ονομάζεται τανυστής καμπυλότητας Riemann και μας δίνει τη χωροχρονική καμπυλότητα, όπου:

$$R_{b\gamma\delta}^\alpha = \frac{\partial \Gamma_{\beta\delta}^\alpha}{\partial x^\gamma} - \frac{\partial \Gamma_{\beta\delta}^\alpha}{\partial x^\delta} + \Gamma_{\gamma\epsilon}^\alpha \Gamma_{\beta\delta}^\epsilon - \Gamma_{\delta\epsilon}^\alpha \Gamma_{\beta\gamma}^\epsilon \quad (3.4)$$

όταν ο τανυστής Riemann είναι μη μηδενικός, ο χώρος που μελετάμε δεν είναι επίπεδος και μας δίνει πληροφορίες θεμελιώδους σημασίας για την εγγενή καμπυλότητα.

## 5.3 Εξωγενής και εγγενής καμπυλότητα

Εξωγενής καμπυλότητα είναι η καμπυλότητα μιας κοσμικής γραμμής που σχετίζεται με τον τρόπο που έχει εμβαπτιστεί στο χωρόχρονο.

Εγγενής καμπυλότητα είναι η καμπυλότητα του ίδιου του χωρόχρονου, σχετίζεται με την παράλληλη μεταφορά κατά μήκος της καμπύλης και μελετάει τις κοσμικές γραμμές που παραμένουν μέσα στο χωρόχρονο.

## 5.4 Εξισώσεις πεδίου του Einstein

Η περιγραφή της βαρύτητας και της επίδρασης της στην ύλη γίνεται με τη βοήθεια μιας καμπυλωμένης πολλαπλότητας, μέσω της μετρικής που καθορίζουν οι πηγές του βαρυτικού πεδίου και οι πηγές αυτές σχετίζονται με την πυκνότητα της μάζας.

Ξεκινώντας από τον τανυστή Καμπυλότητας Ricci :

$$R_{\alpha\beta} = \frac{\partial \Gamma_{\alpha\beta}^{\gamma}}{\partial x^{\gamma}} - \frac{\partial \Gamma_{\alpha\gamma}^{\beta}}{\partial x^{\beta}} + \Gamma_{\alpha\beta}^{\gamma} \Gamma_{\gamma\delta}^{\delta} - \Gamma_{\alpha\delta}^{\gamma} \Gamma_{\beta\gamma}^{\delta} \quad (3.5)$$

Η εξίσωση του Einstein που σχετίζει την καμπυλότητα με την πυκνότητα μάζας – ενέργειας είναι :

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} R = 8\pi G T_{\alpha\beta} \quad (3.6)$$

όπου  $R_{\alpha\beta}$  είναι η καμπυλότητα Ricci,  $T_{\alpha\beta}$  είναι το μέτρο της πυκνότητας ύλης - ενέργειας, δηλαδή η τάση – ενέργεια, το  $g_{\alpha\beta}$  αποτελεί το μετρικό τανυστή και το  $G$  είναι η σταθερά του Newton με το  $8\pi G$  να ισχύει όταν :

$$c = 1, \text{ ενώ όταν } c \neq 1, \text{ το } 8\pi G \text{ γίνεται } 8\pi G/c^4.$$

Εισάγοντας τον τανυστή καμπυλότητας του Einstein

$$G_{\alpha\beta} = R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} R \quad (3.7)$$

τότε η εξίσωση του Einstein γίνεται :

$$G_{\alpha\beta} = 8\pi G T_{\alpha\beta} \quad (3.8)$$

όταν :

$$R_{\alpha\beta} = 0 \text{ και } T_{\alpha\beta} = 0 \quad (3.9)$$

έχουμε την εξίσωση του Einstein για το κενό, μια λύση της οποίας είναι ο επίπεδος χωρόχρονος.

Η Γραμμικοποιημένη εξίσωση του Einstein για ασθενείς πηγές, που ισχύει μόνο στην περίπτωση όπου ο τανυστής τάσης – ενέργειας και οι συνιστώσες της μετρικής διαταραχών είναι ορθογώνιες επίσης η μετρική του επιπέδου είναι  $\eta_{\alpha\beta} = \text{diag}(-1,1,1,1)$ , δίνεται από την εξίσωση :

$$\left(-\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla^2\right) \bar{h}_{\alpha\beta} = -16\pi T_{\alpha\beta} \quad (3.10)$$

όπου  $\left(-\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla^2\right)$  είναι ο τελεστής κύματος επίπεδου χώρου,  $\bar{h}_{\alpha\beta}$  είναι το πλάτος του αντίστροφου ίχνους για το οποίο ισχύει :

$$\bar{h}_{\alpha\beta} = h_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}\eta_{\alpha\beta}h \quad (3.11)$$

με  $h = h^\gamma_\gamma$ , το  $|h_{\alpha\beta}| \ll 1$  και η Βαθμίδα Lorentz :

$$\frac{\partial \bar{h}_{\alpha\beta}}{\partial x^\beta} = 0 \quad (3.12)$$

παρουσία πηγής της μορφής :

$$j(x) = \frac{\partial^2 f(x)}{\partial t^2} + \vec{\nabla}^2 \quad (3.13)$$

## 6 Πηγές Βαρυτικών Κυμάτων

Η καμπύλωση του χωρόχρονου προκαλείται από μια μάζα, η οποία όταν κινείται παράγει διακυμάνσεις που διαδίδονται με την ταχύτητα του Φωτός, αυτά είναι τα βαρυτικά κύματα. Τα βαρυτικά κύματα έχουν ασθενή αλληλεπίδραση με την ύλη, γι' αυτό είναι δύσκολα να ανιχνευθούν. Όμως έχουν αμελητέα απορρόφηση από τη στιγμή που θα παραχθούν και αυτό τα καθιστά πολύ σημαντικές πηγές πληροφοριών για τα κατακλυσμιαία γεγονότα του σύμπαντος που άλλες πηγές ακτινοβολίας δε μπορούν να παράσχουν πληροφορίες. Μια έκρηξη υπερκαινοφανούς αστέρα, μια μελανή οπή, διπλά συστήματα αστέρων και η μεγάλη έκρηξη είναι πηγές βαρυτικών κυμάτων.

### 6.1 Γραμμικοποιημένα βαρυτικά κύματα

Τα ασθενή βαρυτικά κύματα που διαδίδονται σε κενό και σχεδόν επίπεδο χωρόχρονο είναι χρήσιμα στη μελέτη τους διότι στην πραγματικότητα μακριά από πηγές, έχουν τη μορφή μικρών κυματώσεων στον καμπυλωμένο χωρόχρονο. Με το βαρυτικό πεδίο να είναι ασθενές αλλά να μην είναι στάσιμο. Αυτά ονομάζονται Γραμμικοποιημένα βαρυτικά κύματα και αποτελούν λύσεις της εξίσωσης του Einstein, όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Με την προϋπόθεση ότι έχουν αφιχθεί στην περιοχή του χωρόχρονου που εξετάζουμε.

Τα βασικά χαρακτηριστικά τα οποία συνιστούν ένα τέτοιο κύμα είναι :

«διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός, είναι εγκάρσια, έχουν δύο ανεξάρτητες πολώσεις, μπορούν να ανιχνευθούν μέσω των επιδράσεων τους στη σχετική κίνηση δοκιμαστικών μαζών και μεταφέρουν ενέργεια » (Hartle, 2016).

Ουσιαστικά η προσέγγιση αυτή γίνεται διότι τα κύματα που θα ανιχνευθούν στη Γη είναι τόσο ασθενή που μπορούν να περιγραφούν από τη Γραμμικοποιημένη θεωρία.

Ένα επίπεδο βαρυτικό κύμα έχει διάδοση προς μια κατεύθυνση, που ονομάζεται διαμήκης και οι άλλες δύο ανεξάρτητες από αυτό κατευθύνσεις ονομάζονται εγκάρσιες.

Οι διαταραχές μετρικής, όπως ονομάζονται οι γεωμετρίες που προσεγγίζουν την επίπεδη μορφή, δίνονται από τον τύπο :

$$g_{\alpha\beta}(x) = \eta_{\alpha\beta} + h_{\alpha\beta}(x) \quad (4.1)$$

όπου  $g_{\alpha\beta}(x)$  είναι οι συντεταγμένες του συστήματος αναφοράς και  $\eta_{\alpha\beta} = \text{diag}(-1,1,1,1)$ ,  $h_{\alpha\beta}(x)$  είναι τα πλάτη που εκφράζουν μικρές διαταραχές του επίπεδου χώρου που εκφράζουν τα βαρυτικά κύματα.

Σύμφωνα με το σύστημα συντεταγμένων που θα επιλεγεί, η γενική μορφή ενός βαρυτικού κύματος που διαδίδεται στην κατεύθυνση  $z$  έχει τη μορφή :

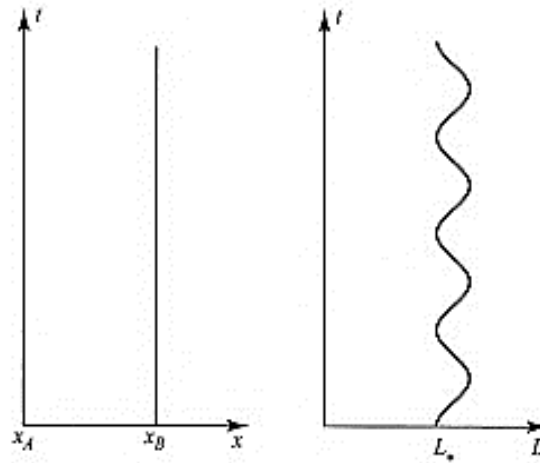
$$h_{\alpha\beta}(t,z) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_+(t-z) & f_x(t-z) & 0 \\ 0 & f_x(t-z) & -f_+(t-z) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

όπου  $f_+(t-z)$  και  $f_x(t-z)$  διαφορετικές συναρτήσεις.

Η υπέρθεση διαταραχών της μετρικής με διαφορετικές διευθύνσεις διάδοσης, διαφορετικές συναρτήσεις, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές πολώσεις, περιγράφονται από την παραπάνω γενική μορφή του γραμμικοποιημένου βαρυτικού κύματος.

Αν υποθέσουμε ότι ένα σωματίδιο που ηρεμεί, βρίσκεται αρχικά σε μια περιοχή του χωρόχρονου που δεν υπάρχουν βαρυτικά κύματα και στη συνέχεια συναντά ένα βαρυτικό κύμα, τότε αυτό θα συνεχίσει να ηρεμεί, οι συντεταγμένες του θα παραμείνουν σταθερές και η επιτάχυνση του θα παραμείνει μηδενική, ανεξάρτητα από το κύμα. Αυτό μπορεί να μας οδηγήσει σε λανθασμένη ερμηνεία. Το σημαντικό είναι η επιλογή των συντεταγμένων, η επίδραση του κύματος φαίνεται από ένα μέγεθος ανεξάρτητο των συντεταγμένων, όπως είναι η ιδιοαπόσταση μεταξύ δύο σωματιδίων που μεταβάλλεται χρονικά. Ενώ η συντεταγμένη απόσταση που εξαρτάται από τις συντεταγμένες δεν επηρεάζεται από το κύμα. «Η επίδραση του κύματος διακρίνεται ολοφάνερα στο ανεξάρτητο των συντεταγμένων μέγεθος» (Schutz, 2007).

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κίνηση δύο σωματιδίων που απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $L$ , με την έλευση του κύματος το διάστημα των συντεταγμένων μεταξύ τους δε μεταβάλλεται, αλλά ταλαντώνεται η απόσταση μεταξύ τους με τη συχνότητα του κύματος.



Εικόνα 3 : Κίνηση σωματιδίου σε χωρόχρονο βαρυτικών κυμάτων (Hartle, 2016, σ. 367)

Η απόσταση δίνεται από τον τύπο:

$$L_*(t) = \int_0^{L_*} dx [1 + h_{xx}(t, 0)]^{1/2} \approx L_* [1 + \frac{1}{2} h_{xx}(t, 0)] \quad (4.3)$$

η μεταβολή της απόστασης  $\delta L(t)$  που μεταβάλλεται με το χρόνο είναι :

$$\frac{\delta L(t)}{L_*} = \frac{1}{2} h_{xx}(t, 0) \quad (4.4)$$

γενικεύοντας, ο λόγος της τάσης που παράγεται από ένα βαρυτικό κύμα όταν η απόσταση μεταξύ δύο μαζών είναι  $L^*$  κατά τη διεύθυνση ενός μοναδιαίου διανύσματος  $\bar{n}_i$  στο κάθετο επίπεδο  $z = 0$ , δίνεται από τον τύπο :

$$\frac{\delta L(t)}{L_*} = \frac{1}{2} h_{ij}(t, 0) n^i n^j \quad (4.5)$$

Η ροή ενέργειας σε ένα γραμμικά πολωμένο επίπεδο κύμα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση :



$$f_{GW} = \frac{\omega^2 \alpha^2}{32\pi} \quad (4.6)$$

« Η πυκνότητα και η ροή ενέργειας σε ένα κύμα, που συνίσταται από την υπέρθεση διαφορετικών πολώσεων, ισούται με το άθροισμα αυτών της κάθε πόλωσης» (Hartle, 2016).

## 6.2 Αστροφυσικές πηγές βαρυτικών κυμάτων

Η θεωρία που αναπτύξαμε βρίσκει εφαρμογή στην ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων από διάφορες κοσμολογικές και αστροφυσικές πηγές.

Μια απλή προσέγγιση που μπορεί να γίνει είναι η εξής : θεωρούμε ότι ένα ισχυρό βαρυτικό κύμα έχει  $h_{\alpha\beta} = 0$  κοντά στην πηγή, όταν το κύμα προσπίπτει στη Γη το πλάτος του είναι μικρό. Για μια πηγή μάζας  $M$  το πλάτος μειώνεται ως προς  $r - 1$  όσο απομακρύνεται από την πηγή. Οπότε αν η Γη απέχει απόσταση  $R$  από την πηγή, τα αναμενόμενα κύματα μέγιστου πλάτους θα είναι  $M / R$ .

### 6.2.1 Αστρική εξέλιξη

Οι πυρηνικές αντιδράσεις και η μετατροπή του υδρογόνου σε ήλιο προσδίδουν τη φωτεινότητα σε έναν αστέρα. Τις πυρηνικές αντιδράσεις τις χρειάζεται, ουσιαστικά, για την αναπλήρωση της ενέργειας που ο ίδιος ακτινοβολεί. Όταν γίνει η πλήρης μετατροπή του υδρογόνου του σε ήλιο, ο πυρήνας του αρχίζει να συρρικνώνεται, διότι παύει να υπάρχει η πηγή ενέργειας που χρησιμοποιούσε. Όταν η θερμοκρασία του γίνει πολύ υψηλή το ήλιο μετατρέπεται σε άνθρακα και οξυγόνο με αποτέλεσμα την έκλυση ενέργειας, η οποία μετατρέπει τον αστέρα σε ερυθρό γίγαντα. Κάποια στιγμή οι ποσότητες του ηλίου θα εξαντληθούν και ο άνθρακας θα μετατραπεί σε πυρίτιο και το πυρίτιο σε σίδηρο. Στη φάση αυτή ο πυρήνας απορροφά ενέργεια αντί να εκλύει προς το περιβάλλον. Αστέρες μικρής μάζας δεν έχουν το απαραίτητο βαρυτικό πεδίο ώστε να υπερνικήσουν τα φαινόμενα και να έχουν μια ταχεία εξέλιξη, αλλά θα εξελιχθούν ομαλά σε ένα λευκό νάνο. Οι αστέρες μεγάλης μάζας χάνουν μεγάλο ποσοστό της μάζας τους, η οποία μεταφέρεται στους αστέρες

– συνοδούς τους. Δεν έχουν όλοι οι αστέρες την ίδια εξέλιξη, αλλά κατά τη διάρκεια των μετατροπών τους εκπέμπουν βαρυτικά κύματα.

#### 6.2.1.1 Διπλό αστρικό σύστημα

Ένα δυαδικό σύστημα αστέρων που αποτελείται από δύο μάζες  $m_1$  και  $m_2$ , με ανοιγμένη μάζα:

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (4.7)$$

και λόγο συμμετρικής μάζας

$$\nu = \frac{\mu}{m_1 + m_2} \quad (4.8)$$

τα οποία είναι διαχωρισμένα και κινούνται σε κυκλικές τροχιές μεταξύ τους, είναι κατάλληλες πηγές βαρυτικών κυμάτων.

#### 6.2.1.2 Pulsar

Τα pulsar, είναι ταχέως περιστρεφόμενοι αστέρες νετρονίων που παράγουν ραδιοφωνικά κύματα και ακτινοβολία σε οπτικά μήκη κύματος, τα οποία έχουν δημιουργηθεί μετά από μια έκρηξη supernova. Τα απομονωμένα pulsar που περιστρέφονται με πολύ μεγάλη ταχύτητα γύρω από τους άξονες τους μπορεί να είναι ηλεκτρομαγνητικά αόρατα, διότι η μονοχρωματική ακτινοβολία που αποστέλλουν επηρεάζεται από την περιστροφή της Γης, αλλά τα βαρυτικά κύματα που παράγουν λόγω της πολύ συμπυκνωμένης μάζας τους μπορούν να δώσουν πολλές πληροφορίες.

#### 6.2.1.3 Σουπερνόβα

Όταν στο κέντρο ενός αστέρα παράγεται σίδηρος, τότε σταματάει να παράγεται ενέργεια λόγω πυρηνικής καύσης και αρχίζει η συστολή του πυρήνα του αστέρα. Μια

έκρηξη υπερκαινοφανούς πυροδοτείται και η κατάρρευση προχωρά εξαιρετικά γρήγορα. Αν ο αρχικός αστέρας είχε μάζα  $M \leq 20 M_{\odot}$  θα δημιουργηθεί ένας αστέρας νετρονίων. Αν  $M \geq 20 M_{\odot}$  δημιουργείται μαύρη τρύπα, αν ο αρχικός αστέρας έχει  $M \geq 40 M_{\odot}$ , τότε δε θα γίνει έκρηξη σουπερνόβα αλλά θα καταρρεύσει απ' ευθείας σε μαύρη τρύπα. Υπάρχει πιθανότητα το υλικό που θα μείνει πίσω μετά από μια έκρηξη υπερκαινοφανούς ή κατάρρευση σε μαύρη τρύπα να δημιουργήσει άλλες δομές που επίσης να παράγουν βαρυτικά κύματα.

### 6.2.2 Κοσμολογικά γεγονότα

Εκτός από τα αστροφυσικά γεγονότα που είναι παράγοντες εκπομπής βαρυτικών κυμάτων, βαρυτικά κύματα παράγονται και από τα κοσμολογικά γεγονότα που συνέβησαν κατά τα πρώτα στάδια δημιουργίας του σύμπαντος. Αν μπορέσουμε να πάρουμε πληροφορίες για τα αρχέγονα συστατικά του σύμπαντος, θα ανοίξουν νέοι δρόμοι άγνωστοι για την ανθρωπότητα μέχρι σήμερα.

Στην κοσμολογία, όταν η πυκνότητα της ύλης είναι ίδια σε κάθε σημείο του χώρου και η ακτίνα  $R$  συνεχώς αυξάνεται, θα αυξάνεται και η μάζα ως  $R^3$ , άρα και ο λόγος  $M/R$  θα αυξάνεται. Έχει παρατηρηθεί ομοιομορφία σε μεγάλη κλίμακα όχι μόνο στην πυκνότητα του σύμπαντος αλλά και στα είδη γαλαξιών, στα γαλαξιακά σμήνη, στη χημική και αστρική σύνθεση τους.

«Ωστόσο η πυκνότητα της ύλης και η καμπυλότητα του χωροχρόνου απειρίζονται τη στιγμή της μεγάλης έκρηξης. Αυτού του είδους η συμπεριφορά αποκαλείται χωροχρονική μοναδικότητα» (Wald, 2007).

Στην κοσμολογία υπάρχουν δύο περιοχές ενδιαφέροντος, αυτές είναι η περιοχή της ύλης, όπου η πυκνότητα ενέργειας οφείλεται στην ύλη των γαλαξιών όπως σήμερα και η εποχή της ακτινοβολίας, όπου η πυκνότητα ενέργειας οφείλεται σε σχετικιστικά σωματίδια και ακτινοβολία, που έλαβε χώρα στο αρχέγονο σύμπαν.

Το σίγουρο είναι ότι η βαρύτητα παίζει μεγάλο ρόλο στην ανακάλυψη των γεγονότων που έλαβαν χώρα στο πρώιμο σύμπαν και όσο οι ανιχνεύσεις συνεχίζονται θα έχουμε περισσότερα στοιχεία γι' αυτό.

### **6.3 Πηγές βαρυτικών κυμάτων με βάση το είδος κίνησης και τη μεταβαλλόμενη κατανομή μάζας**

Τέσσερις είναι οι πηγές βαρυτικών κυμάτων που μπορούμε να καταθέσουμε με βάση το είδος της κίνησης του στοιχείου που εκπέμπει τα βαρυτικά κύματα και την κατανομή της μάζας του.

#### **6.3.1 Συνεχή βαρυτικά κύματα**

Τα συνεχή βαρυτικά κύματα έχουν σταθερή και καθορισμένη συχνότητα, που παράγει συνεχή τόνο και εκτείνεται σε μεγάλη διάρκεια. Αυτό το είδος των βαρυτικών κυμάτων είναι σχετικά ασθενή και προέρχονται από δυαδικά συστήματα που περιστρέφονται μεταξύ τους πολύ πριν τη συγχώνευση τους, όπως αστέρες νετρονίων ή μελανές οπές ή και μοναδικά αστέρια που περιστρέφονται σε πολύ μεγάλες ταχύτητες γύρω από τον άξονά τους.

#### **6.3.2 Σπειροειδή βαρυτικά κύματα**

Τα σπειροειδή βαρυτικά κύματα παράγονται κατά τη διάρκεια της συγχώνευσης των δυαδικών συστημάτων. Ουσιαστικά δημιουργούνται στο τέλος της ζωής των αρχικών μαζών που έχουν έρθει πλέον πολύ κοντά και κινούνται με τεράστια ταχύτητα ώσπου να συγκρουστούν. Αυτά δημιουργούνται είτε από δυο αστέρες νετρονίων που περιστρέφονται μεταξύ τους, είτε από δυο μελανές οπές, είτε από έναν αστέρα νετρονίων και μια μελανή οπή.

#### **6.3.3 Εκρηκτικά βαρυτικά κύματα**

Για τα εκρηκτικά βαρυτικά κύματα γνωρίζουμε πολύ λίγα πράγματα. Πρόκειται για κύματα πολύ μικρής διάρκειας που συμβαίνουν ξαφνικά. Τέτοια μπορεί να είναι μια έκρηξη σούπερ νόβα ή μια έκρηξη ακτινών γάμα. Δεν υπάρχει ακόμα πρόβλεψη της μορφής αυτού του είδους βαρυτικών κυμάτων.

#### 6.3.4 Στοχαστικά βαρυτικά κύματα

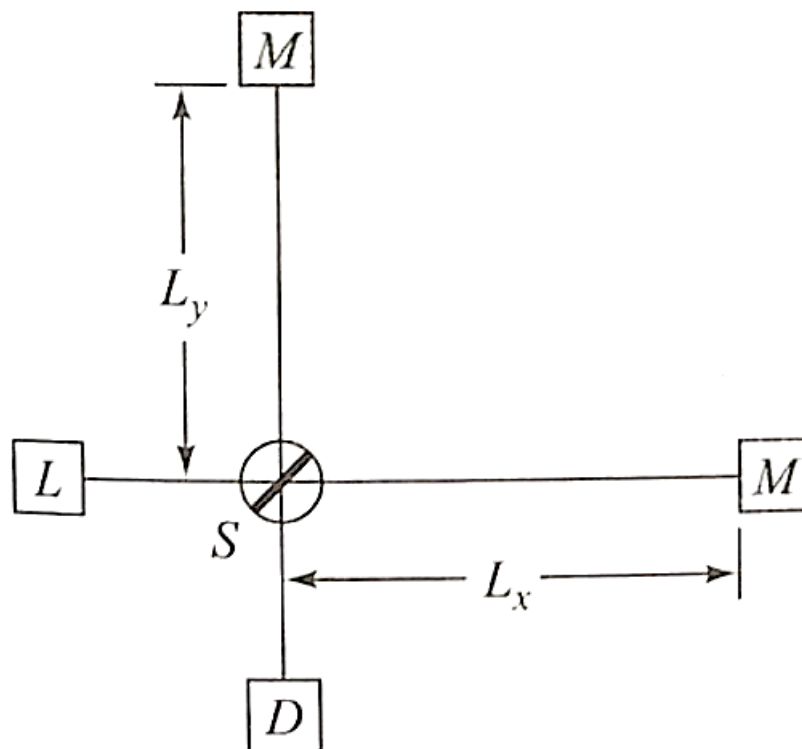
Τα στοχαστικά βαρυτικά κύματα προέρχονται από μεμονωμένα και ανεξάρτητα συμβάντα που προέκυψαν από το big bang. Ουσιαστικά πρόκειται για απομεινάρια της μεγάλης έκρηξης, που δημιουργήθηκαν  $10^{-36}$  έως  $10^{-32}$  δευτερόλεπτα μετά από αυτή. Το φως που απομένει από τη μεγάλη έκρηξη ονομάζεται Κοσμικό Υπόβαθρο Μικροκυμάτων και δημιουργήθηκε 300000 χρόνια μετά το big bang. Επομένως αυτά τα βαρυτικά κύματα μπορούν να δώσουν πολλές πληροφορίες για τη δημιουργία του σύμπαντος, στις οποίες ακόμα δεν έχουμε πρόσβαση με άλλης μορφής ακτινοβολία.

## 7 Ανιχνευτές Βαρυτικών κυμάτων

Τη στιγμή που γράφτηκε αυτή η εργασία γίνονται πειράματα ανίχνευσης βαρυτικών κυμάτων σε διαφορετικές περιοχές της Γης. Όπως έχουμε δει ως τώρα τα βαρυτικά κύματα αλληλοεπιδρούν με την ύλη και για την ανίχνευση τους χρησιμοποιούνται συμβολόμετρα, σχήματος L, τα οποία μετρούν μοτίβα που παράγονται από τη συμβολή δύο πηγών φωτός.

### 7.1 Συμβολόμετρα βαρυτικών κυμάτων

Μια απλουστευμένη προσέγγιση των συμβολόμετρων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των βαρυτικών κυμάτων είναι η παρακάτω:



Εικόνα 4 σχηματικό διάγραμμα του συμβολομετρικού ανιχνευτή Michelson (Hartle, 2016, σ. 371)

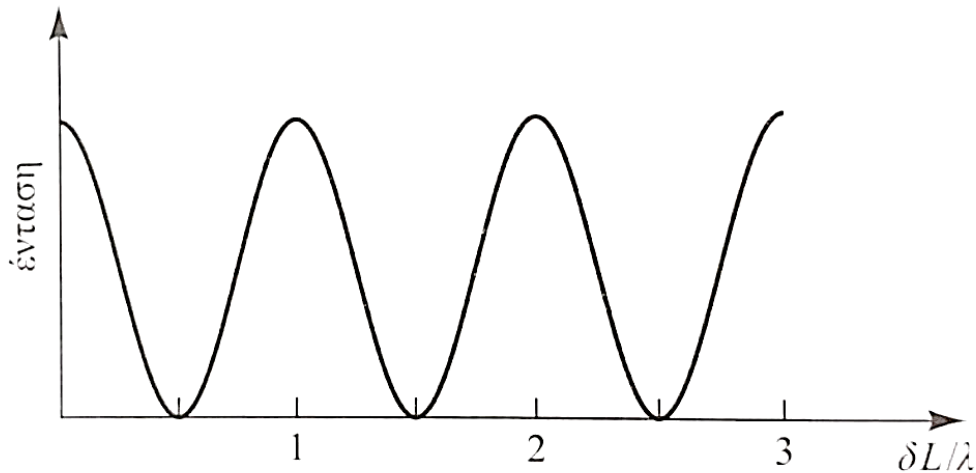
Θεωρούμε τρεις δοκιμαστικές μάζες που κινούνται ελεύθερα στην οριζόντια διεύθυνση ενώ κρέμονται από νήματα. Στη μία από αυτές τοποθετείται ένας διαχωριστής δέσμης και στις άλλες δύο από ένα κάτοπτρο. Ένα λέιζερ εκπέμπει μια δέσμη φωτός, η οποία διαχωρίζεται σε δέσμες κατά μήκος των κάθετων βραχιόνων, οι οποίοι μπορούμε να υποθέσουμε ότι είναι τοποθετημένοι κατά μήκος των αξόνων  $x$  και  $y$  ενός συστήματος που εκτελεί ελεύθερη πτώση μαζί με των διαχωριστή δέσμης. Οι δέσμες αυτές ανακλώνται από τα κάτοπτρα, επανασυνδέονται και εισέρχονται στον ανιχνευτή. Αν τα μήκη των δύο βραχιόνων διαφέρουν κατά ολόκληρο αριθμό μήκους κύματος τότε οι επανασυνδεόμενες δέσμες πραγματοποιούν ενισχυτική συμβολή. Αν η διαφορά του μήκους είναι περιττός αριθμός πραγματοποιείται αποσβεστική συμβολή. Όταν διέρχεται ένα βαρυτικό κύμα, τα μήκη των βραχιόνων θα μεταβάλλονται, άρα θα μεταβάλλεται και το αποτέλεσμα της συμβολής. Θεωρούμε ότι το κύμα διαδίδεται κατά τον άξονα  $z$  με καθορισμένο  $\omega$ , τα μήκη  $L_x$   $L_y$  δίνονται από τους παρακάτω τύπους :

$$\frac{\delta L(x)}{L_x} = +\frac{1}{2} \alpha \sin(\omega t) \quad (5.1)$$

και

$$\frac{\delta L(y)}{L_y} = -\frac{1}{2} \alpha \sin(\omega t) \quad (5.2)$$

όπου το  $\alpha$  είναι το πλάτος και το  $\omega$  η συχνότητα και μπορούν να μετρηθούν από το σχήμα της συμβολής.



Εικόνα 5 απλουστευμένο μοτίβο συμβολής (Hartle, 2016, σ. 372)

Ένα απλουστευμένο μοτίβο συμβολής δίνεται στην παραπάνω εικόνα, όσο πιο μεγάλο είναι το μήκος του συμβολόμετρου τόσο πιο ευαίσθητο είναι το συμβολόμετρο και μεγαλύτερη η μεταβολή της μορφής στη συμβολή.

Στα πραγματικά συμβολόμετρα η διάταξη είναι πιο σύνθετη με περισσότερες κοιλότητες και πιο ευαίσθητα κάτοπτρα που συμπεριφέρονται σα να γίνονται περισσότερες ανακλάσεις και αυξάνεται το ενεργό μήκος του συμβολόμετρου.

Παρακάτω θα αναφερθούμε στα πειράματα που γίνονται αυτή τη στιγμή, στα οποία γίνονται ταυτόχρονες ανιχνεύσεις βαρυτικών κυμάτων σε διαφορετικές τοποθεσίες.

## 7.2 LIGO

Το εργαστήριο LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) στα ελληνικά σημαίνει λέιζερ συμβολομετρικό παρατηρητήριο βαρυτικών κυμάτων βρίσκεται στις ΗΠΑ και αποτελείται από δύο συμβολόμετρα. Το ένα βρίσκεται στο Χάνφορντ της Ουάσιγκτον και το άλλο στο Λίβινγκστον της Λουϊζιάνα. Οι ανιχνευτές αυτοί έχουν βραχίονες με μήκος 4 χιλιόμετρα.

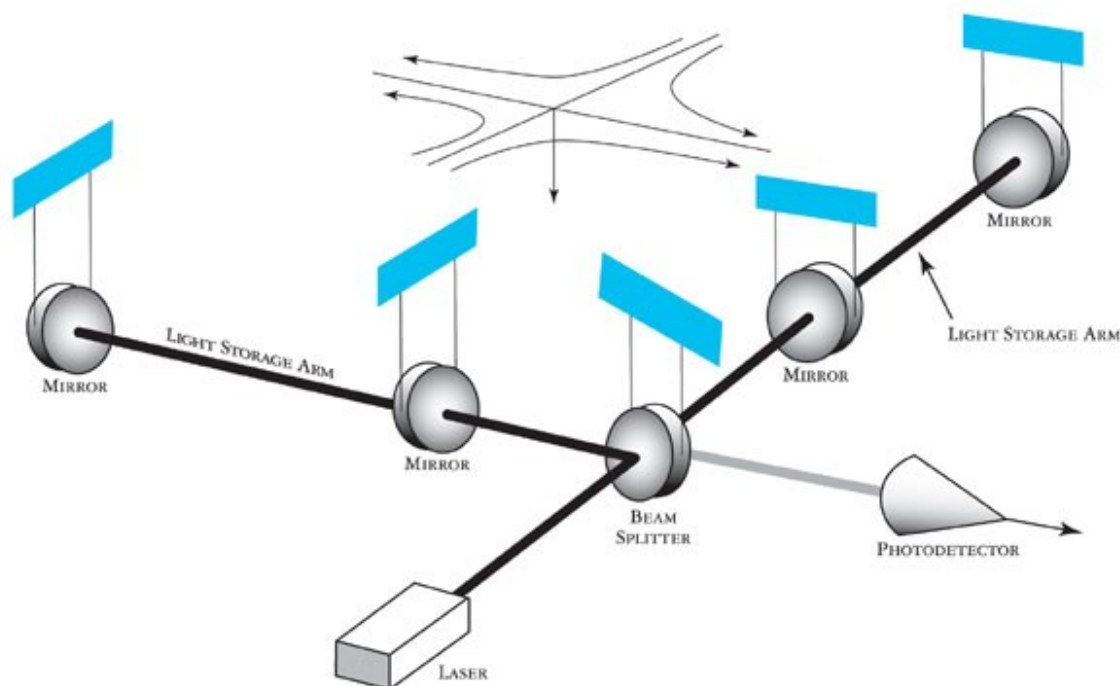




Εικόνα 6 «Αεροφωτογραφία του ανιχνευτή LIGO στο Hanford Washington» (LIGO official web site, 2021)



Εικόνα 7 «Αεροφωτογραφία του ανιχνευτή LIGO στο Livingston, LA.» (LIGO official web site, 2021)



Εικόνα 8 «Διάγραμμα βασικού σχεδίου συμβολόμετρου» (LIGO official web site, 2021)

Στην παραπάνω εικόνα έχουμε το βασικό σχέδιο συμβολόμετρου του ανιχνευτή στο LIGO, μια δέσμη φωτός εκτοξεύεται από το λέιζερ, η οποία διαχωρίζεται από το διαχωριστή που βρίσκεται στο κέντρο των βραχιόνων και η μισή μεταδίδεται στον ένα βραχίονα και η άλλη μισή στον άλλο. Τα κάτοπτρα αιωρούνται στα άκρα των βραχιόνων και επιστρέφουν πίσω το φως, το οποίο επανασυνδυάζεται και στέλνεται πίσω στο κέντρο της διασταύρωσης. Αν τα μήκη των βραχιόνων έχουν παραμείνει αμετάβλητα θα έχουμε καταστρεπτική συμβολή και δε θα ανιχνευτεί φως, αν ένα βαρυτικό κύμα έχει μεταβάλει κάποιον από τους δύο βραχίονες θα έχουμε κάποιο μοτίβο φωτός στον ανιχνευτή, το οποίο μπορούμε να μελετήσουμε.

Υπάρχουν διάφορες άλλες πηγές που μπορεί να δημιουργήσουν θόρυβο στον ανιχνευτή και να οδηγήσουν σε λανθασμένες ανιχνεύσεις, όπως το πέσιμο ενός δέντρου ή ένας σεισμός, γι' αυτό χρησιμοποιούνται πολλοί ανιχνευτές σε διαφορετικά σημεία της Γης ώστε αν ανιχνεύσει κάποιο σήμα ο ένας, να επιβεβαιωθεί και από άλλον, υπολογίζοντας πάντα το χρόνο μετάδοσης του φωτός που θα μεσολαβήσει να φτάσει από τον ένα ανιχνευτή στον άλλο, αλλιώς χαρακτηρίζεται ως θόρυβος και απορρίπτεται.

Το LIGO είναι το μεγαλύτερο υπερύψηλο κενό που υπάρχει στον κόσμο και αυτό γίνεται για να αποφευχθεί η δημιουργία ρευμάτων που θα επηρεάσουν τα κάτοπτρα και για να μπορέσει το φως να διαδοθεί σε ευθεία γραμμή. Ακόμα έχουν τοποθετηθεί συστήματα

σεισμικής απομόνωσης που βασίζονται σε μαγνήτες για να αποφευχθεί και η παραμικρή μετακίνηση των κατόπτρων είτε από σεισμικές δονήσεις είτε από τις παλιρροιακές κινήσεις του Ήλιου και της Σελήνης.

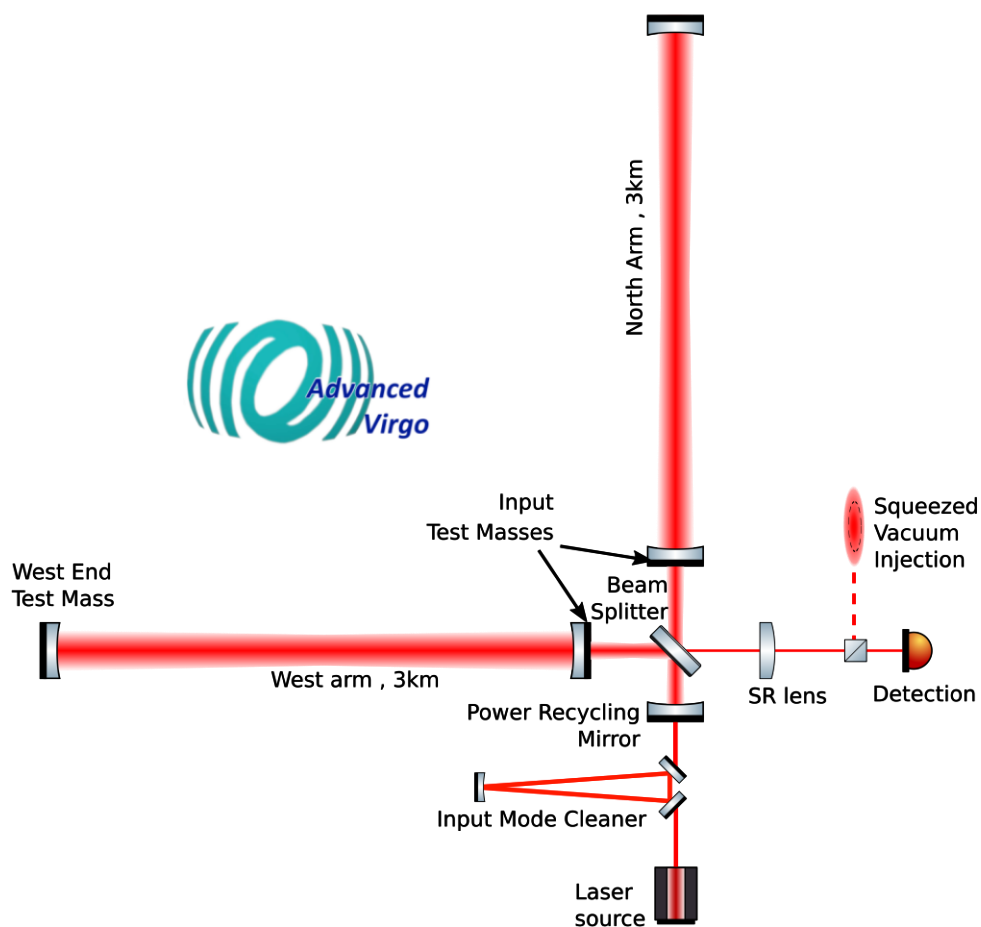
### 7.3 VIRGO

Ο ανιχνευτής VIRGO βρίσκεται στην περιοχή της Πίζας στην Ιταλία, το μήκος των βραχιόνων του είναι 3 χιλιόμετρα.



Εικόνα 9 Ανιχνευτής VIRGO στην Πίζα της Ιταλίας (VIRGO Collaboration official web site, n.d.)

Το βασικό σχήμα του ανιχνευτή φαίνεται στην εικόνα 9 και ακολουθεί τη λογική των ανιχνευτών βαρυτικών κυμάτων που αναπτύξαμε παραπάνω.



**Εικόνα 10** Βασικό σχήμα λειτουργίας ανιχνευτή VIRGO της 3<sup>ης</sup> περιόδου 2019-2020 (VIRGO Collaboration official web site, n.d.)

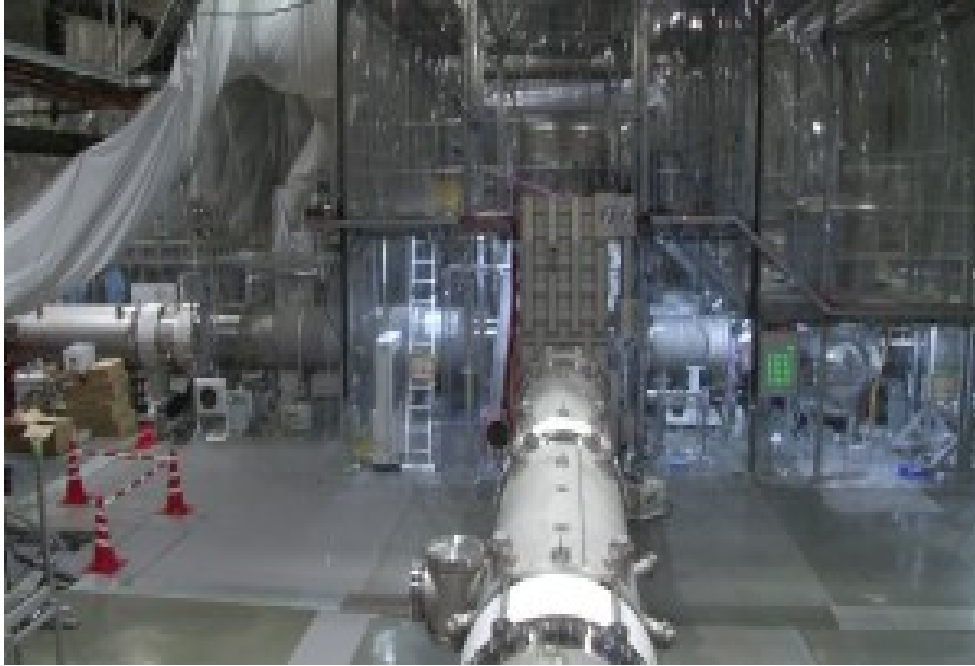
Σε αυτό τον ανιχνευτή πριν από το διαχωριστή έχει τοποθετηθεί ένα κάτοπτρο συντελεστή ανακύκλωσης ισχύος, για να αυξηθεί η ισχύς του λέιζερ και να μειωθεί η αβεβαιότητα της μέτρησης, το κάτοπτρο αυτό επιστρέφει την αντανάκλαση του φωτός στο συμβολόμετρο αντί να την αφήσει να επιστρέψει στο λέιζερ. Στον ανιχνευτή αυτό χρησιμοποιείται μια τεχνική συμπίεσης ώστε να δημιουργείται κενό για τον καθαρισμό του οπτικού πεδίου. Έχουν προγραμματιστεί να γίνουν περαιτέρω βελτιώσεις στον ανιχνευτή με σκοπό να μειωθεί ακόμα περισσότερο ο κβαντικός θόρυβος των φωτονίων από την πίεση στα κάτοπτρα, και να αυξηθεί η ευαισθησία του στις υψηλές αλλά και χαμηλές συχνότητες. Επίσης δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στα κάτοπτρα 35 εκατοστών διαμέτρου, ώστε να χαθεί όσο το δυνατό λιγότερη φωτεινή ακτίνα από το λέιζερ και να υπάρχει μεγαλύτερη ευαισθησία στην ανίχνευση των βαρυτικών κυμάτων.

## 7.4 ΚΑGRA

Ο ανιχνευτής ΚΑGRA βρίσκεται στην επαρχία Kamioka, Hida City της Ιαπωνίας, Κάτω από το όρος Ikenoyama. Ξεκίνησε η κατασκευή του το 2010 και λειτουργεί από το 2019, υπό την ηγεσία του Πανεπιστημίου του Τόκυο και το Ινστιτούτο για την Έρευνα Κοσμικών Ακτίνων (ICRR). Το μήκος των βραχιόνων είναι 3 χιλιόμετρα ο καθένας και η λειτουργία του βασίζεται στην ίδια λογική με τους άλλους. Τα κάτοπτρα από ζαφείρι έχουν διάμετρο 22 εκατοστά, 15 εκατοστά πάχος και ζυγίζουν 23 κιλά. Υπάρχει κρυογονικό σύστημα που κρυώνει τα κάτοπτρα και κόκκινη μπογιά τα προστατεύει από τη σκόνη. Ο διαχωριστής δέσμης βρίσκεται σε δοχείο κενού. Ο τρόπος λειτουργίας του είναι ίδιος με αυτών του LIGO και του VIRGO και η σχηματική του διάταξη δίνεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 11** η τοποθεσία του ΚΑGRA στην Ιαπωνία, όπου απεικονίζονται οι βραχίονες (ΚΑGRA Observatory official web site, χ.χ.)



Εικόνα 12 το σημείο που ενώνονται οι δύο βραχίονες (KAGRA Observatory official web site, χ.χ.)

## 7.5 GEO 600

Ο GEO 600 είναι ένας ανιχνευτής βαρυτικών κυμάτων με μήκος βραχιόνων 600 μέτρα. Βρίσκεται στο Αννόβερο της Γερμανίας και λειτουργεί υπό το Πανεπιστήμιο Μαξ Πλανκ της Γερμανίας και το Συμβούλιο επιστημών και Τεχνολογίας του Ηνωμένου Βασιλείου. Η σχηματική του διάταξη και ο τρόπος λειτουργίας του δεν διαφέρει από αυτές των άλλων πειραμάτων.



**Εικόνα 13 GEO 600 φωτογραφία του ανιχνευτή στο Αννόβερο της Γερμανίας (GEO 600 official web site, n.d.)**

Η κατασκευή του ανιχνευτή ξεκίνησε το 1995 και από το 2002 λειτουργεί συμμετέχοντας στα διεθνή πειράματα ανίχνευσης βαρυτικών κυμάτων. Στην τεχνογνωσία και εμπειρία της επιστημονικής ομάδας του GEO 600 βασίζονται οι προηγμένοι ανιχνευτές του LIGO και του VIRGO.

## 7.6 LISA

Το LISA είναι ένα πρόγραμμα ανίχνευσης βαρυτικών κυμάτων που θα βρίσκεται στο διάστημα υπό την επίβλεψη της NASA και του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος. Αποτελείται από τρία διαστημόπλοια τα οποία θα απέχουν μεταξύ τους εκατομμύρια μίλια σχηματίζοντας ισόπλευρο τρίγωνο. Οι βραχίονες, που θα τον απαρτίζουν, είναι ουσιαστικά λέιζερ που θα αναμεταδίδουν ακτίνες ανάμεσα στα διαστημόπλοια. Ο προγραμματισμός που έχει γίνει είναι η εκτόξευση να επιτευχθεί στις αρχές το 2030.

Το LISA θα λειτουργεί σε περιοχές χαμηλών συχνοτήτων από 0,1 mHz έως 1 Hz, με αποτέλεσμα να μπορούμε να ανιχνεύσουμε μεγάλο εύρος συχνοτήτων καθώς οι

ανιχνευτές που υπάρχουν αυτή τη στιγμή στη Γη, σε λειτουργία, εκπέμπουν μεταξύ 10 Hz και 1000 Hz. Αυτό θα μας δώσει στοιχεία από βαρυτικά κύματα που προέρχονται από πολύ βαρύτερα αντικείμενα που κινούνται σε μεγαλύτερες τροχιές από αυτά που ανιχνεύουν ο LIGO και ο VIRGO.

Το ότι θα βρίσκεται στο διάστημα θα δώσει το πλεονέκτημα να αποφευχθεί ο θόρυβος που προκαλείται στους επίγειους ανιχνευτές, άρα θα δώσει πιο καθαρά αποτελέσματα. Και το εξαιρετικά μεγάλο μέγεθος των βραχιόνων δίνει τη δυνατότητα ανίχνευσης μεγαλύτερου φάσματος παραγωγής βαρυτικών κυμάτων όπως υπερμεγέθεις μελανές οπές και εξαιρετικά συμπαγή δυαδικά στοιχεία.

Ένα βαρυτικό κύμα περιμένουμε να μετατοπίσει ελαφρά τα διαστημόπλοια και να παράγει ένα χαρακτηριστικό μοτίβο στον ανιχνευτή. Οι μετατοπίσεις που περιμένουμε να μετρήσει είναι της τάξης της διαμέτρου ενός πυρήνα ηλίου σε απόσταση ενός εκατομμυρίου μιλίων. Η ακρίβεια του θα είναι πολύ υψηλή.

Μια δοκιμαστική αποστολή έχει γίνει και ονομάστηκε LISA Pathfinder. Το LISA Pathfinder εκτοξεύτηκε το Δεκέμβριο του 2015 και ολοκληρώθηκε τον Ιούλιο του 2017 με μεγάλη επιτυχία. Οι δοκιμές που έγιναν πάνω σε ελεύθερες δοκιμαστικές μάζες ξεπέρασαν τις προσδοκίες και αναπτέρωσαν τις ελπίδες για την επιτυχία του προγράμματος, της τεχνολογίας και του εξοπλισμού που θα χρησιμοποιηθεί.



## 8 Ανακαλύψεις Βαρυτικών Κυμάτων

### 8.1 Βραβείο Nobel Φυσικής 2017

Στις 14 Σεπτεμβρίου του 2015 καταγράφηκαν τα πρώτα Βαρυτικά κύματα από τον ανιχνευτή LIGO. Δύο μεσαίου μεγέθους μαύρες τρύπες συγχωνεύτηκαν και δημιούργησαν μια μεγαλύτερου μεγέθους εκπέμποντας βαρυτικά κύματα. Το γεγονός αυτό συνέβη πάνω από χίλια εκατομμύρια χρόνια πριν φτάσει το βαρυτικό κύμα στη Γη ταξιδεύοντας με την ταχύτητα του φωτός.

Στις 14 Σεπτεμβρίου του 2015 στις 11.15 π.μ. οι δύο ανιχνευτές LIGO στην Αμερική κατέγραψαν μια ταλάντευση στο μοτίβο φωτός, που εκπέμφθηκε από τη συγχώνευση δύο μαύρων τρυπών σε απόσταση 1,3 δισεκατομμύρια έτη φωτός από τη Γη.

Εκατό χρόνια μετά την πρόβλεψη τους από τον Einstein στη Γενική θεωρία της Σχετικότητας, 40 χρόνια μετά από τη σκληρή δουλειά και την επιμονή των τριών επιστημόνων Rainer Weiss, Barry C. Barish και Kip S. Thorne τα πρώτα βαρυτικά κύματα ανιχνεύτηκαν. Για την ανακάλυψη αυτή απονεμήθηκε στους τρεις αυτούς επιστήμονες το 2017 το βραβείο Νόμπελ Φυσικής.

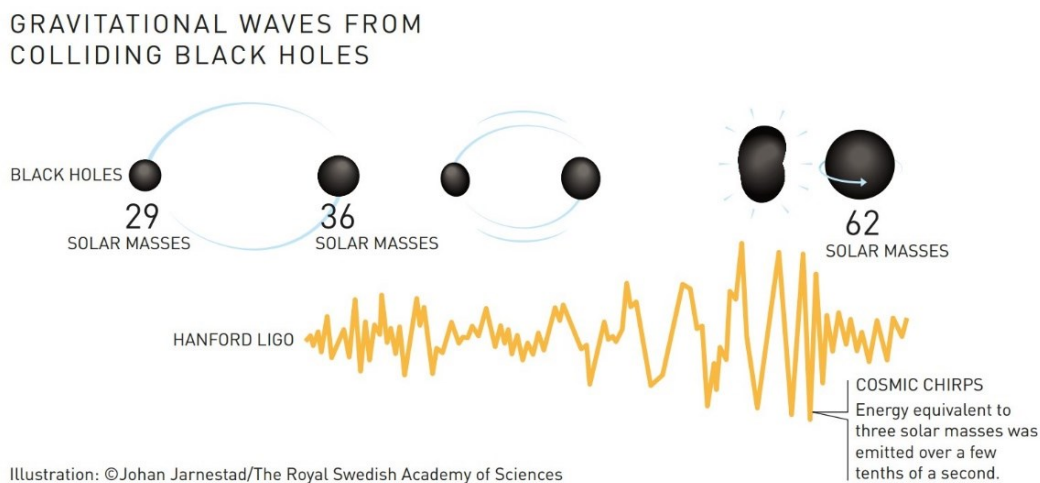
Το σημαντικό σε αυτή την καταγραφή δεν ήταν μόνο η καταγραφή του βαρυτικού κύματος αλλά και η απόδειξη της ύπαρξης των μελανών οπών που μέχρι τότε αποτελούσαν μόνο την λύση των εξισώσεων του Einstein σε θεωρητικό επίπεδο. Σε μια μαύρη τρύπα είναι τόσο έντονη η καμπύλωση του χωρόχρονου, λόγω της εξαιρετικά ισχυρής βαρύτητας, ώστε να μη μπορεί να ξεφύγει ούτε το φως.

Τα βαρυτικά κύματα που καταγράφηκαν το 2015 είχαν δημιουργηθεί από την σύγκρουση δύο μελανών οπών. Ο δύο αυτές μαύρες τρύπες, η μία 29 φορές βαρύτερη από τον Ήλιο και η άλλη 36 φορές υπήρχαν από τις αρχές δημιουργίας του σύμπαντος και κινούνταν κυκλικά η μία γύρω από την άλλη. Η κίνηση αυτή δημιουργούσε σπειροειδή χωροχρονική διαταραχή η οποία έφερνε κάθε φορά και πιο κοντά τις δύο οπές. Η μετακίνηση αυτή απελευθέρωνε ενέργεια, τις έκανε να κινούνται όλο και πιο γρήγορα και εξέπεμπε βαρυτικά κύματα για πολλά εκατομμύρια χρόνια. Μέχρι τη στιγμή που έφτασαν

τόσο κοντά ώστε να συγχωνευτούν σε μια γιγαντιαία μαύρη τρύπα βάρους 62 ηλιακών μαζών, η οποία συνέχιζε να περιστρέφεται.

Βαρυτικά κύματα εκπέμπονται συνέχεια, εδώ στη Γη όμως φθάνουν πολύ εξασθενημένα λόγω της απόστασης από την πηγή τους, με αποτέλεσμα να μπορούμε να καταγράψουμε τα πιο έντονα και καταστροφικά γεγονότα.

Το κύμα πρώτα καταγράφηκε στο Livingston και 7 χιλιστά του δευτερολέπτου αργότερα το κατέγραψε και ο ανιχνευτής που βρισκόταν στο Hanford αυτό συνέβη τις πρώτες πρωινές ώρες στην Αμερική γι' αυτό και ο πρώτος άνθρωπος που αναγνώρισε το κύμα βρισκόταν στο Ανόβερο της Γερμανίας στο Ινστιτούτο Βαρυτικής Φυσικής Μαξ Πλανκ, που ήταν 11.51 πριν το μεσημέρι. Η καταγραφή αυτή ονομάστηκε GW150914 και ανακοινώθηκε το Φεβρουάριο του 2016. Από τότε έχουν καταγραφεί και άλλα περιστατικά παρατήρησης βαρυτικών κυμάτων.



**Εικόνα 14** σχηματική απεικόνιση του GW 150914, της πρώτης παρατήρησης βαρυτικών κυμάτων (Rose, 2017)

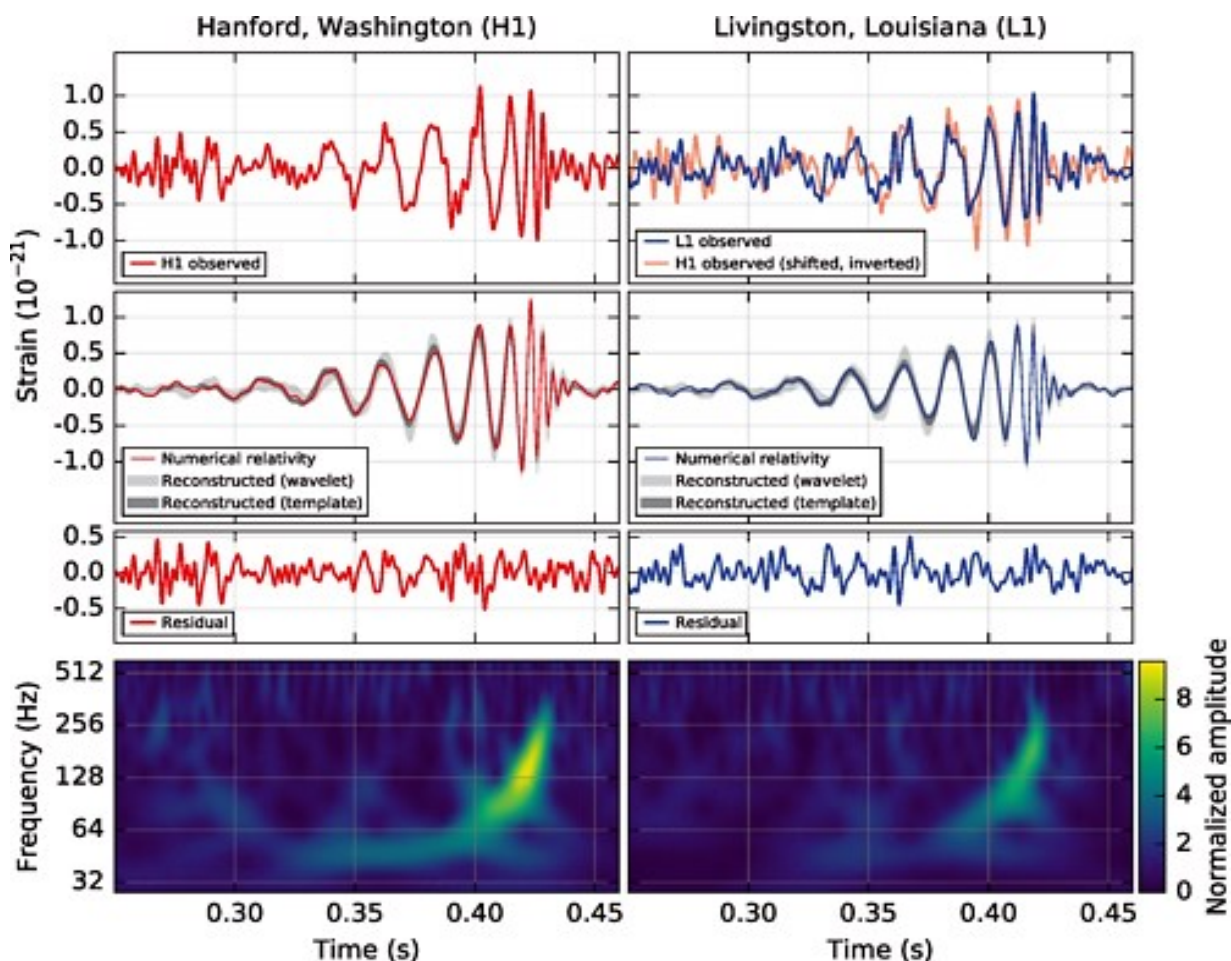


Figure 1 Οι ανιχνεύσεις του GW151226 από το LIGO Hanford and Livingston, αναπαριστούν την καταπόνηση και τη συχνότητα σε σχέση με το χρόνο μετάδοσης του κύματος (Abbott, et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration, Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, 2016)

## 8.2 GW151226

Στις 26 Δεκεμβρίου του 2015 παρατηρήθηκε νέα ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων από συνένωση δύο μελανών οπών, ηλιακής μάζας 14,2 η μία και 7,5 η άλλη σε μια μεγαλύτερη μεγέθους 20,8 ηλιακών μαζών. Η ανίχνευση αυτή ανακοινώθηκε στις 15 Ιουνίου του 2016. Οι ανιχνευτές του LIGO με πρώτο στο Livingston και 1,1 ms αργότερα στο Hanford, κατέγραψαν το σήμα των βαρυτικών κυμάτων που εκπέμφθηκαν. Τα στοιχεία δείχνουν ότι τουλάχιστον η μια από τις δύο αρχικές μαύρες τρύπες είχε spin 0,2. Το γεγονός αυτό υπολογίζεται ότι συνέβη σε απόσταση περίπου 1,4 δισεκατομμύρια έτη φωτός.

Πρόκειται για ένα συμπαγές δυαδικό σύστημα μικρότερο της πρώτης παρατήρησης που μεταφέρει ενέργεια, η οποία κάνει τις δύο οπές να περιστρέφονται σε τροχιά, η μια γύρω από την άλλη. Το αποτέλεσμα είναι να πλησιάζουν η μια την άλλη όλο και πιο πολύ μέχρι τη συνένωση τους, η οποία προκαλεί παραμόρφωση στο χωρόχρονο και την εκπομπή βαρυτικών κυμάτων τα οποία φτάνουν στη συνέχεια σε μας. Η ισχύς του σήματος του GW151226 είναι χαμηλότερη από την ισχύ του GW150914 και επομένως δυσκολότερη η διαπίστωση του. Επίσης η διάρκεια του σήματος ήταν της τάξης του ενός δευτερολέπτου σε σχέση με τα 0,2 δευτερόλεπτα του GW150914, αυτό οφείλεται στη μικρότερη μάζα των αρχικών οπών.

Το δυαδικό αυτό σύστημα μαύρων τρυπών θα μπορούσε να έχει σχηματιστεί με δύο τρόπους, είτε πρόκειται για δυο μεγάλα άστρα που γεννήθηκαν και εξελίχθηκαν μαζί μέχρι να φτάσουν να μετατραπούν σε δύο μελανές οπές, είτε βρίσκονται σε κάποια περιοχή του σύμπαντος όπου είναι πιο πυκνά κατανεμημένα τα μεμονωμένα αστέρια και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση δημιούργησε αυτές τις μελανές οπές. (LIGO official web site, 2021).

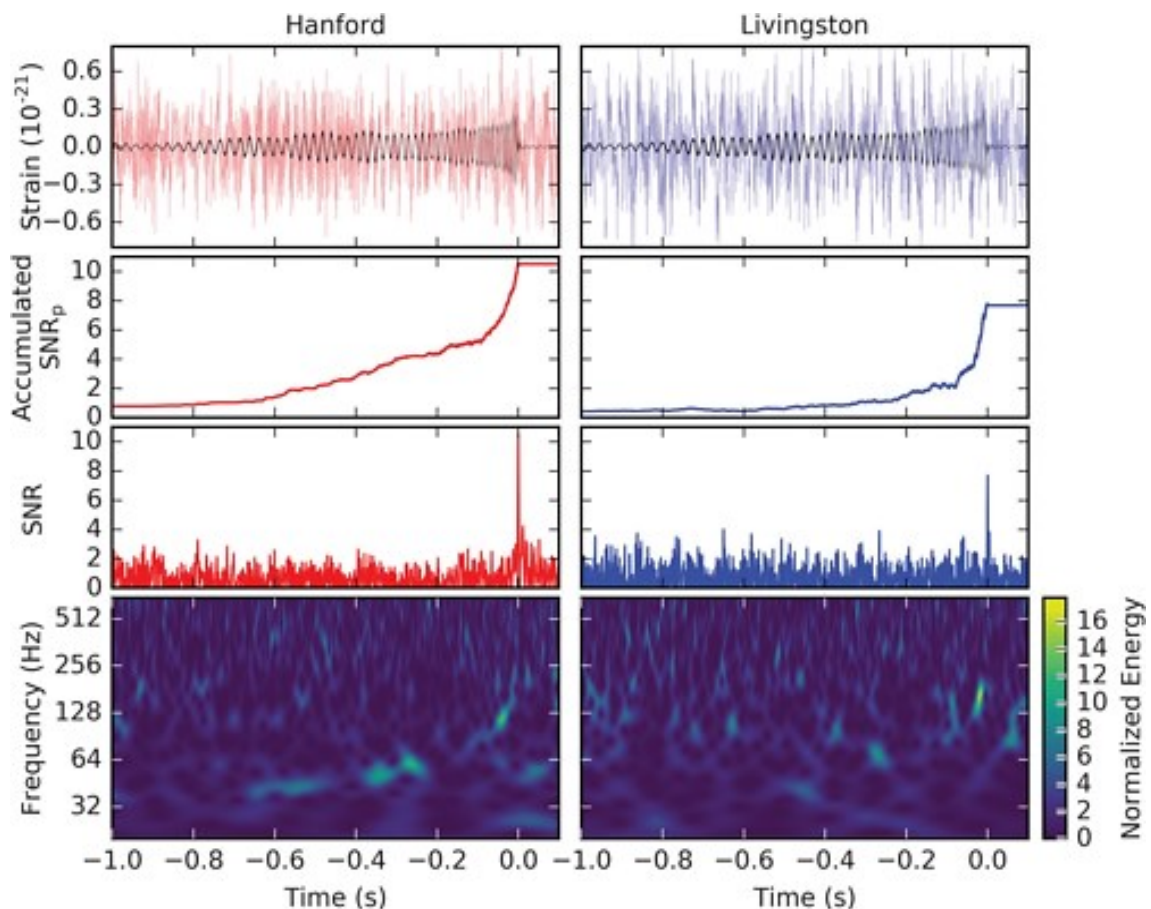


Figure 2 Οι ανιχνεύσεις του GW151226 από το LIGO Hanford and Livingston (Abbott & et al LIGO and Virgo Scientific Collaboration, GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary, 2016)

Παρατηρούμε ότι η πρώτη περίοδος παρατήρησης βαρυτικών κυμάτων χαρακτηρίζεται από παρατηρήσεις συγχώνευσης μικρότερων μελανών οπών σε μια μεγαλύτερη.

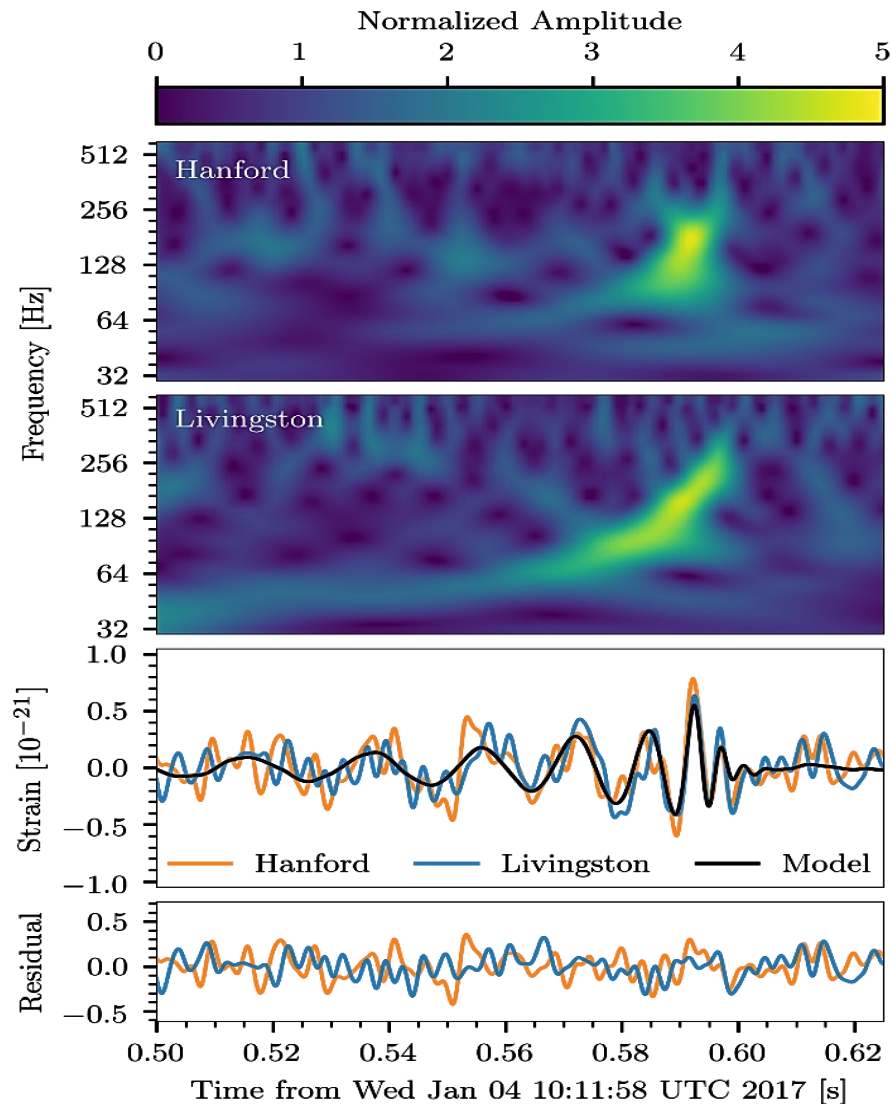
### 8.3 GW170104

Η δεύτερη περίοδος παρατήρησης βαρυτικών κυμάτων ξεκίνησε το Νοέμβριο του 2016 μετά από βελτιώσεις που έγιναν στους ανιχνευτές με στόχο τη μεγαλύτερη ευαισθησία στις ανιχνεύσεις. Τον Ιανουάριο του 2017 οι ανιχνευτές του LIGO στο Hanford και στο Livingston έλαβαν το τρίτο σήμα βαρυτικών κυμάτων, το GW170104, το οποίο δημοσιεύτηκε τον Ιούνιο του 2017. Τα δεδομένα προέρχονται από τη συγχώνευση δύο μελανών οπών, η μία 31,2 ηλιακών μαζών και η άλλη 19,4 ηλιακών μαζών, οι οποίες ενώθηκαν σε μία νέα μάζα, που αριθμούσε 48,7 ηλιακές μαζες. Τα στοιχεία δόθηκαν στις επιστημονικές μονάδες σε όλο τον κόσμο για να ταυτοποιηθούν και υπερυπολογιστές έκαναν αναλύσεις ώστε να ανιχνευτεί τυχόν ποσοστό ψευδούς παρατήρησης, το οποίο ήταν της τάξεως του 1 στα 70000 χρόνια.

Το γεγονός αυτό συνέβη σε απόσταση 3 δισεκατομμυρίων ετών φωτός, στη διπλάσια δηλαδή απόσταση από την πρώτη παρατήρηση του 2016. Υπολογίστηκε ότι από τη στιγμή που έγινε η συγχώνευση αυτή, έως τη στιγμή που λήφθηκε το κύμα είχε απομακρυνθεί από εμάς κατά 20% λόγω της διαστολής του σύμπαντος.

Η ανίχνευση αυτή έδωσε περισσότερα στοιχεία από όσα ξέραμε μέχρι τότε για τα βαρυτικά κύματα. Διαπιστώθηκε ότι τα βαρυτικά κύματα ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός και δεν διασκορπίζονται κατά τη μετάδοσή τους. Επίσης μπορέσαμε να προσδιορίσουμε η μάζα των γκραβιτόνιων κατά ένα ποσοστό 50%, δηλαδή υπολογίζεται στα :

$$m_g \leq 7.7 \times 10^{-23} \text{ eV}/c^2$$

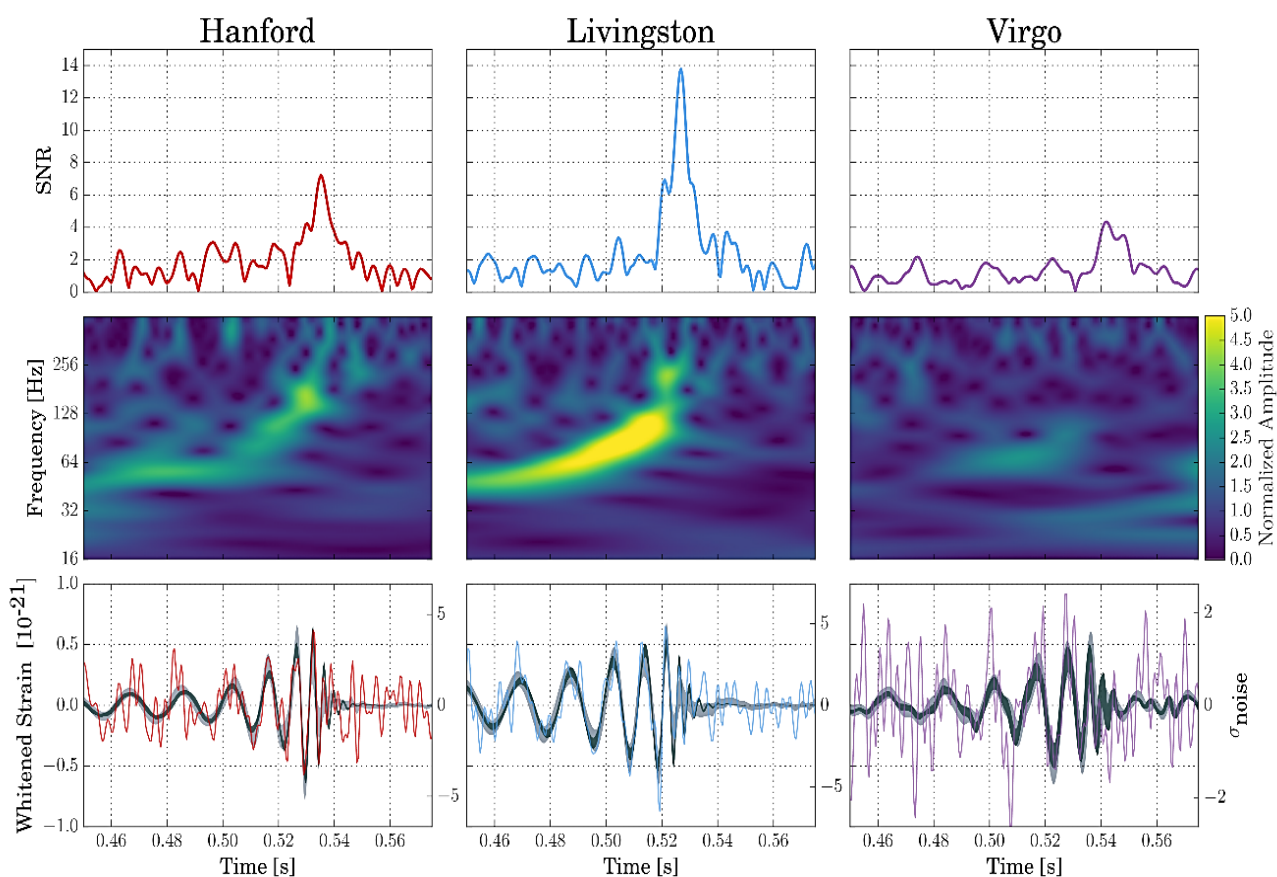


**Figure 3** Γραφική παράσταση της συχνότητα του σήματος στους ανιχνευτές του LIGO στο Hanford και το Livingston σε σχέση με το χρόνο ανίχνευσης (Abbott, et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration, GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2, 2017)

## 8.4 GW170814

Η τέταρτη ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων έρχεται από τρεις ανιχνευτές, τους δύο του LIGO στις ΗΠΑ και τον τρίτο του Virgo στην Ιταλία. Την 1η Αυγούστου του 2017 ο ανιχνευτής Virgo ξεκίνησε τη δοκιμή ανίχνευσης βαρυτικών κυμάτων και στις 14

Αυγούστου του 2017 ανίχνευσε το GW170814. Δύο μαύρες τρύπες που η μία αριθμούσε 30,5 ηλιακές μάζες και η άλλη 25,3 ηλιακές μάζες, ενώθηκαν και δημιούργησαν μια μεγαλύτερη μαύρη τρύπα, συνολικής ηλιακής μάζας 53,2, σε απόσταση 1,8 δισεκατομμύρια έτη φωτός από τη Γη. Η συνένωση αυτή παρήγαγε βαρυτικό κύμα που καταγράφηκε πρώτα από τους ανιχνευτές του LIGO και στη συνέχεια επιβεβαιώθηκε και από τον ανιχνευτή στο VIRGO. Το ποσοστό ψευδούς συναγερού διαμορφώθηκε στα 1 στα 27000 χρόνια, που δίνει μεγάλη βαρύτητα στην ανακάλυψη αυτή.

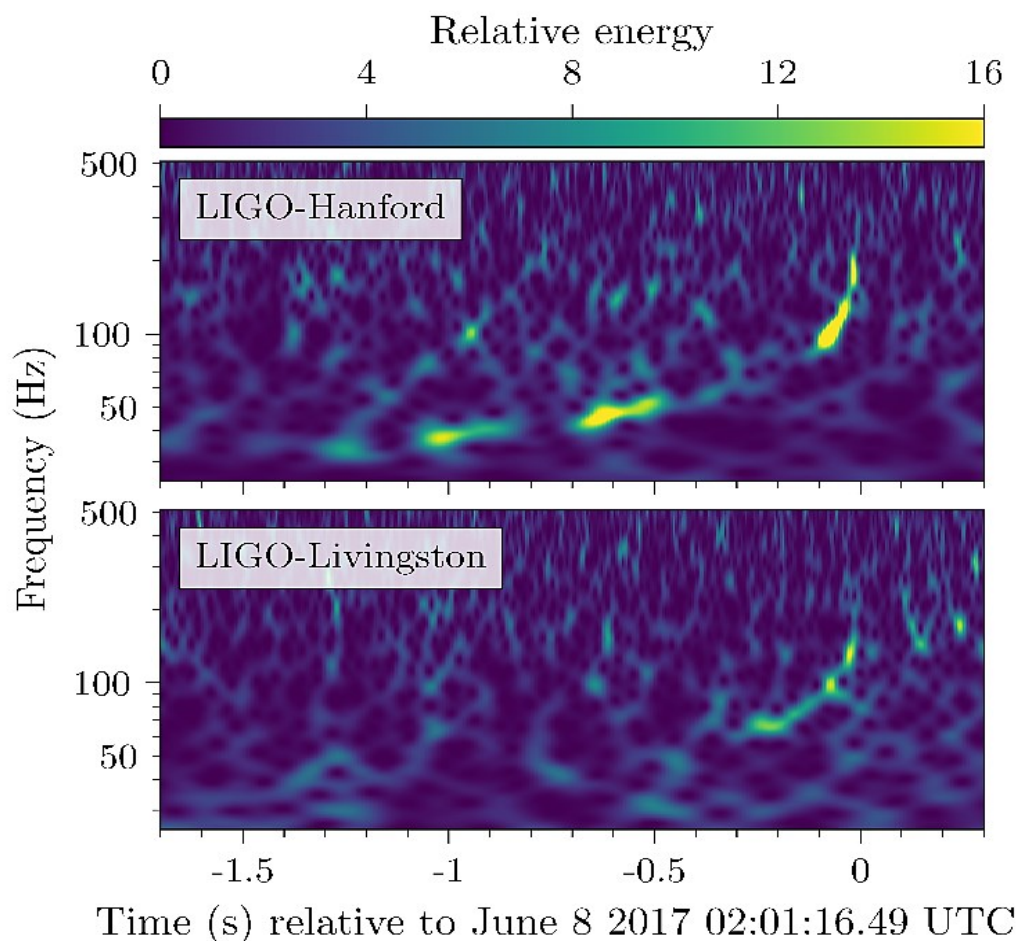


Εικόνα 15 η ανίχνευση GW170814 από τους τρεις ανιχνευτές LIGO-Livingston, LIGO-Hanford και στο Virgo. (Abbott, et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration, GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence, 2017)

## 8.5 GW170608

Στις 8 Ιουνίου 2017 παρατηρήθηκε ακόμα μια συνένωση μελανών οπών από το παρατηρητήριο του LIGO και στις 15 Νοεμβρίου 2017 ανακοινώθηκε επίσημα από την επιστημονική ομάδα του LIGO. Είναι ένα γεγονός που αφορά την ελαφρύτερη ομάδα μελανών οπών που είχαμε παρατηρήσει ότι συνενώθηκε ως τότε, με τη μία μάζα να υπολογίζεται στις 12 ηλιακές μάζες και την άλλη στις 7 ηλιακές μάζες. Αυτό συνέβη γιατί τα άστρα που υπήρχαν πριν τη δημιουργία αυτών των μελανών οπών περιείχαν μεγάλη ποσότητα βαριών στοιχείων, όπως ο άνθρακας και το άζωτο, με αποτέλεσμα να χάσουν μεγάλη ποσότητα μάζας πριν καταρρεύσουν σε μαύρες τρύπες. Μετά από την ελικοειδή κίνηση που διέγραφαν μεταξύ τους ήρθαν τόσο κοντά που συγκρούστηκαν.

Η μελανή οπή που σχηματίστηκε μετά την ένωση τους υπολογίζεται να είναι στις 18 ηλιακές μάζες, ενώ η απόσταση από τη Γη που συνέβη το γεγονός είναι στα 1,1 δισεκατομμύρια έτη φωτός.



**Figure 4** το διάγραμμα συχνότητα – χρόνου του GW170608 όπως καταγράφηκε από τα παρατηρητήρια του LIGO-Hanford, LIGO-Livingston, η χαμηλότερη ευαισθησία του Livingston οφείλεται σε εργασίες συντήρησης που γινόντουσαν τότε στον ανιχνευτή (Abbott, et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration, GW170608: Observation of a 19-solar-mass binary black hole coalescence, 2017)

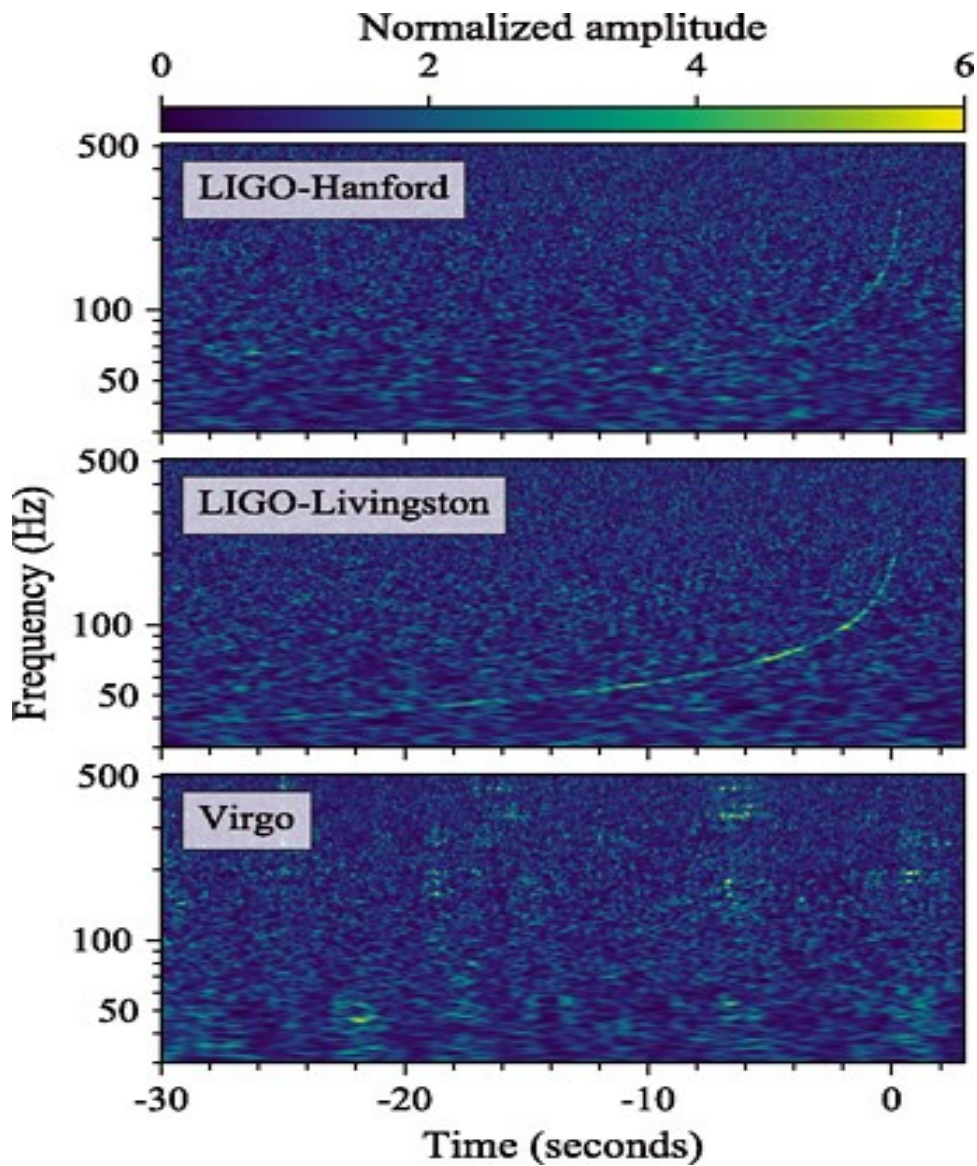


## 8.6 GW170817

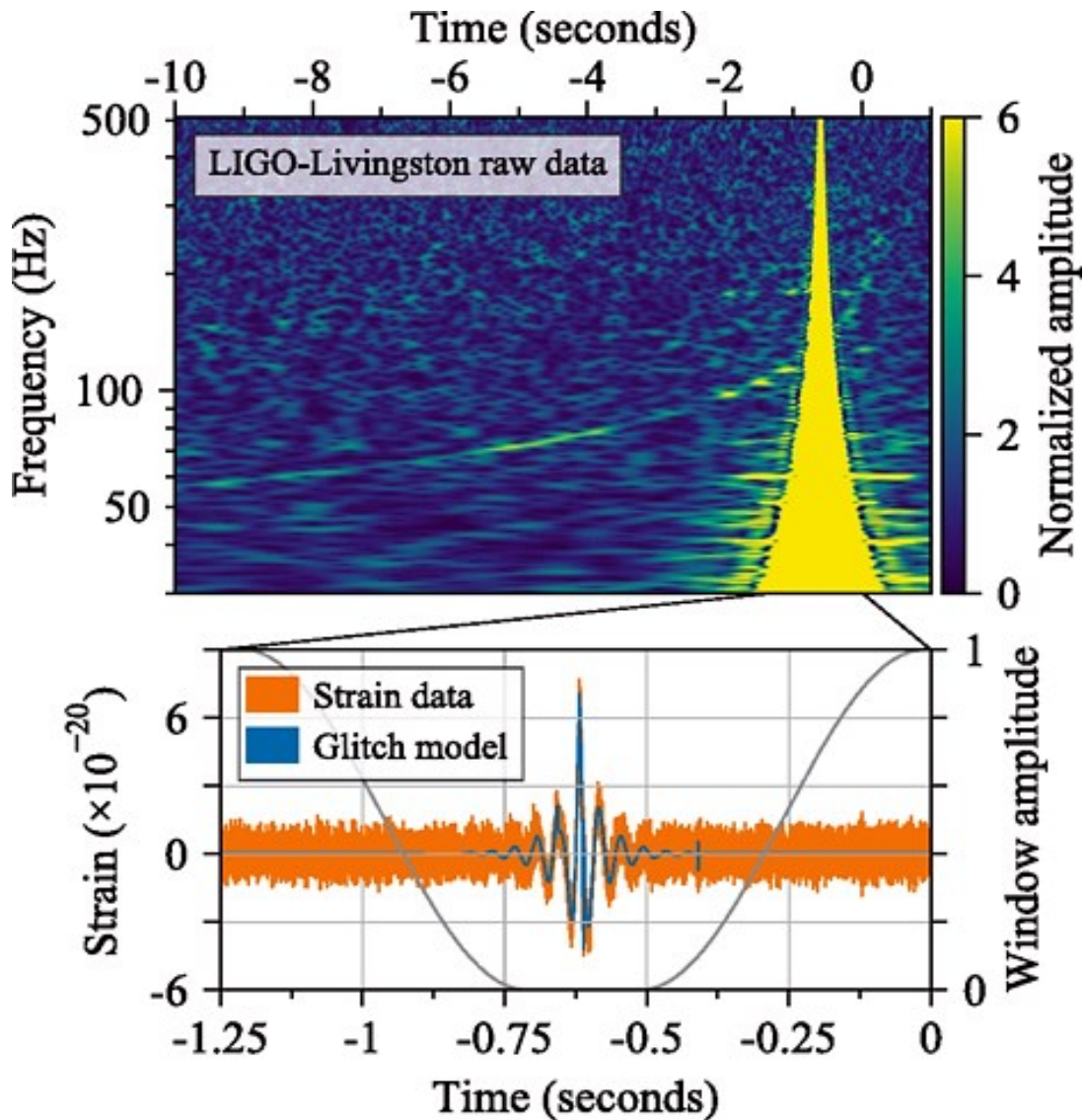
Στις 17 Αυγούστου του 2017 παρατηρήθηκε από τους ανιχνευτές του LIGO-Livingston, LIGO-Hanford και στο Virgo η σύγκρουση δύο (πιθανώς) αστέρων νετρονίων. Η περιοχή που συνέβη αυτό το γεγονός εντοπίστηκε στον αστερισμό της Ύδρας, κοντά στο αστέρι Psi Hydrae. 1,7 δευτερόλεπτα αφού παρατηρήθηκε το βαρυτικό κύμα στους ανιχνευτές καταγράφηκε μια έκρηξη ακτινών γάμα, από το τηλεσκόπιο ακτινών γάμα Fermi-GBM. Πρόκειται δηλαδή για ένα γεγονός που παρατηρήθηκε και με βαρυτικά κύματα αλλά και με κύματα φωτός.

Υπολογίζεται ότι 100 δευτερόλεπτα περίπου πριν συγχωνευτούν τα δύο «άστρα νετρονίων», εκτελούσαν 12 περιστροφές το δευτερόλεπτο και απείχαν μεταξύ τους 400 χιλιόμετρα. Με κάθε περιστροφή το ένα ερχόταν πιο κοντά στο άλλο, η ταχύτητα τους αυξανόταν και η ισχύς των βαρυτικών κυμάτων επίσης. Καθώς οι τροχιές συρρικνώνονται, τα αστέρια κινούνται όλο και πιο γρήγορα και η ισχύς και η συχνότητα των βαρυτικών κυμάτων αυξάνεται. Με αποτέλεσμα τη συνένωση τους και τη δημιουργία μιας μάζας υπέρπυκνης ύλης. Λόγω του ότι δε μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια το spin των αστέρων νετρονίων, από τα βαρυτικά κύματα, υπολογίζεται οι αρχικές τους μάζες να ήταν περίπου 0,86 και 2,26 ηλιακών μαζών. Στην περίπτωση που κινούνταν αργά οι μάζες τους υπολογίζονται στα 1,17 και 1,60 ηλιακών μαζών. Η απόσταση υπολογίστηκε ακριβώς από τα δεδομένα, στα 130 εκατομμύρια έτη φωτός.

Η περίπτωση του GW170817 είναι ιδιαίζουσα καθώς δεν είμαστε σίγουροι ακόμα αν πρόκειται για δύο αστέρες νετρονίων ή έναν αστέρα νετρονίων και μια μαύρη τρύπα πολύ μικρής μάζας. Επίσης δεν είναι ξεκάθαρο τι ακριβώς είναι το νέο αντικείμενο που προέκυψε από αυτή τη συνένωση. Η συνένωση των υπέρπυκνων αυτών μαζών έδωσε ή ένα πολύ μεγάλο αστέρα νετρονίων ή μια μικρή μελανή οπή, η μάζα του νέου σώματος είναι της τάξης των 2,74 ηλιακών μαζών.



Εικόνα 16 το διάγραμμα συχνότητας – χρόνου του GW170817 από τους ανιχνευτές LIGO-Hanford, LIGO-Livingston και το Virgo. Βλέπουμε ότι στο Virgo η ανίχνευση δεν ήταν εύκολη λόγω της θέσης που συνέβει το γεγονός στο σύμπαν και της σχετικής θέσης του συγκεκριμένου ανιχνευτή. (Abbott, et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration, GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence, 2017)



Εικόνα 17 το πάνω διάγραμμα είναι συνάρτηση συχνότητας – χρόνου από το LIGO-Livingston τη στιγμή της συνένωσης του GW170817. Το κάτω διάγραμμα αφορά τα ακατέργαστα δεδομένα καταπόνησης LIGO-Livingston της στιγμής της συνένωσης (Abbott, et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration, GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence, 2017)

## 8.7 GWTC-1

Ο κατάλογος GWTC-1 δημοσιεύτηκε στις 03 Δεκεμβρίου του 2018 και περιλαμβάνει τέσσερις νέες ανιχνεύσεις συγχώνευσης μελανών οπών. Στη δημοσίευση αυτή συμπεριλαμβάνεται επίσης η επανεξέταση μια παλιότερης ανίχνευσης βαρυτικού κύματος του GW151012, που όταν είχε συμβεί στις 12 Οκτωβρίου του 2015 δεν είχε

αποδειχτεί ότι ήταν μεγάλης σημασίας, αλλά με την εξέλιξη των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, επανεξετάστηκε και καταχωρήθηκε ως σημαντική ανακάλυψη συγχώνευσης δύο μελανών οπών σε μια. Οι αρχικές μάζες που δημιούργησαν τη νέα μάζα που είναι της τάξεως των  $35,7 M_{\odot}$ , ήταν  $23,3 M_{\odot}$  η πρώτη και  $13,6$  η δεύτερη, σε απόσταση από τη Γη  $3,5$  δισεκατομμύρια έτη φωτός.

Οι 4 νέες ανακαλύψεις είναι το GW170729 του οποίου έγινε η ανίχνευση στις 29 Ιουλίου του 2017, το GW170809 που ανιχνεύτηκε στις 9 Αυγούστου του 2017, το GW170818 ανιχνεύτηκε στις 18 Αυγούστου του 2017 και από τους τρεις ανιχνευτές του LIGO και του VIRGO και το GW170823 που καταγράφηκε στις 23 Αυγούστου του 2017.

Το GW170729 που ανιχνεύτηκε στις 29 Ιουλίου του 2017 από τους ανιχνευτές του LIGO, οι αρχικές μελανές οπές που το αποτελούσαν είχαν μάζα  $50,6$  και  $34,3$  ηλιακών μαζών και η νέα, που προέκυψε από την ένωση τους, είχε μέγεθος  $80,3$  ηλιακών μαζών. Το γεγονός αυτό εκτυλίχθηκε στα  $8,9$  δισεκατομμύρια έτη φωτός από τη Γη.

Το GW170809 ανιχνεύτηκε στις 9 Αυγούστου του 2017 και παράχθηκε από την κατάρρευση δύο μελανών οπών, μάζας  $35,2 M_{\odot}$  η μία και  $23,8$  ηλιακών μαζών η άλλη, σε μία μεγαλύτερου μεγέθους  $56,4$  ηλιακών μαζών. Σε απόσταση  $3,2$  δισεκατομμύρια έτη φωτός μακριά από τη Γη.

Για το GW170818 έχουμε ανίχνευση στις 18 Αυγούστου του 2017 και από τους δύο ανιχνευτές του LIGO και τον τρίτο του VIRGO. Μία μαύρη τρύπα μάζας  $35,5 M_{\odot}$  και μία  $26,8 M_{\odot}$  σε απόσταση  $3,3$  δισεκατομμύρια έτη φωτός από εμάς, κατέρρευσαν σε μία μεγαλύτερη μελανή οπή, μάζας  $59,8 M_{\odot}$ .

Τέλος το GW170823 ανιχνεύτηκε στις 23 Αυγούστου του 2017 και αφορούσε δύο μαύρες τρύπες  $39,6 M_{\odot}$  και  $29,4 M_{\odot}$  που συγχωνεύτηκαν και δημιούργησαν μια νέα μεγαλύτερη μαύρη τρύπα, η οποία έχει μάζα  $65,6 M_{\odot}$ . Η κατάρρευση αυτή έλαβε χώρα σε απόσταση  $6$  δισεκατομμυρίων ετών φωτός από τη Γη.

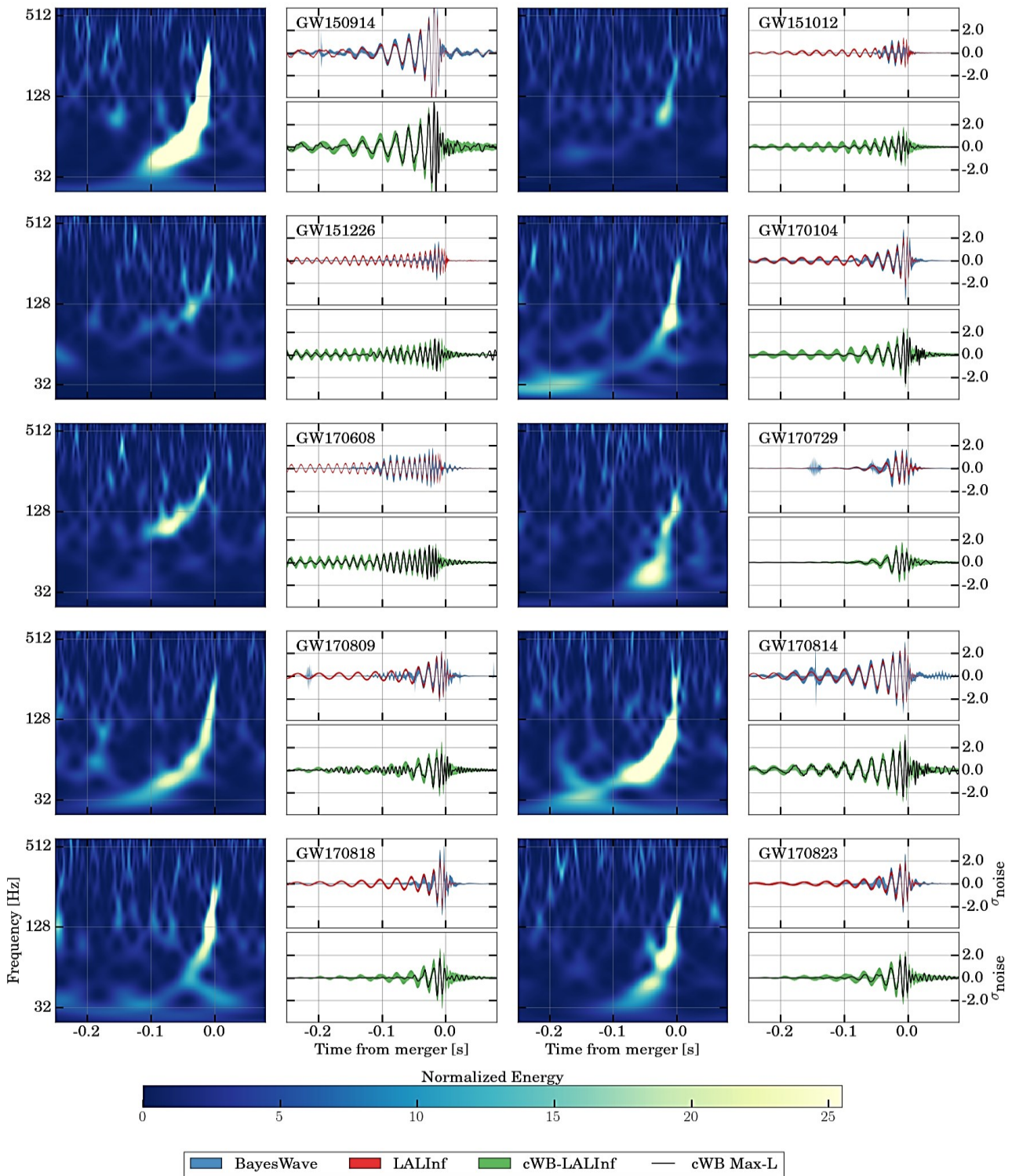


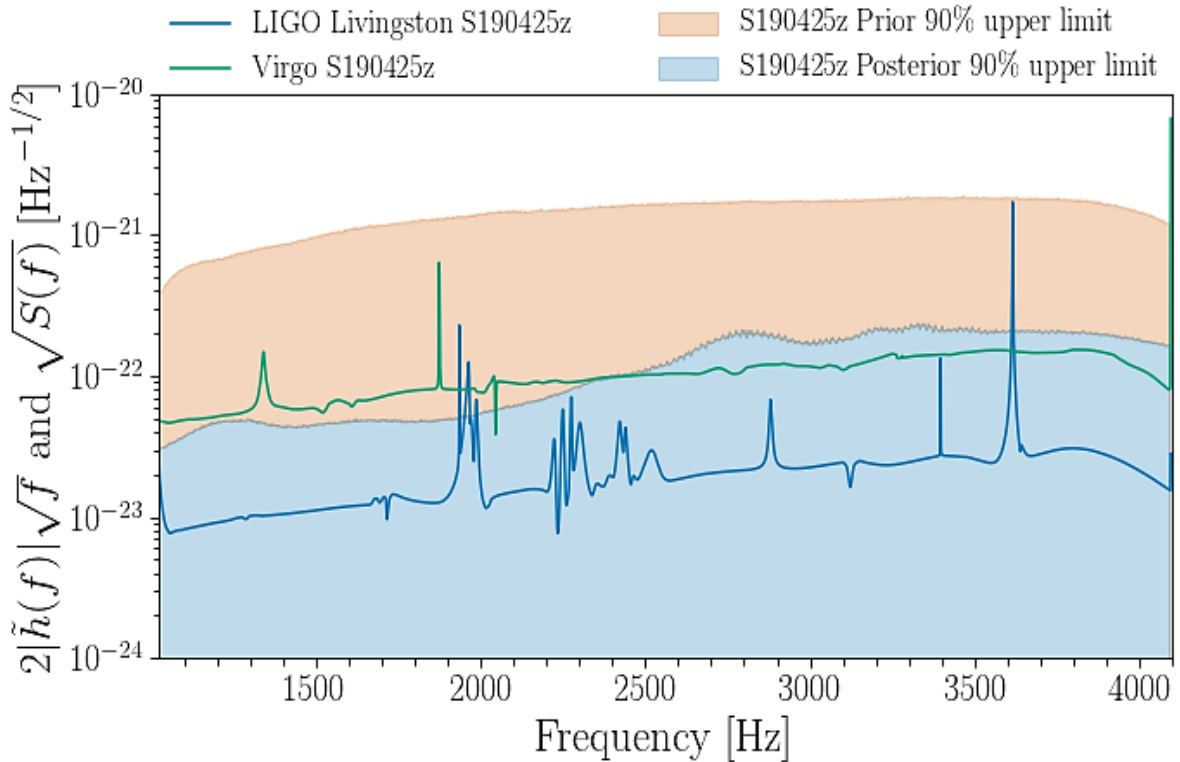
Figure 5 παρουσιάζονται τα γραφήματα συχνότητας – χρόνου και για τα δέκα πρώτα συμβάντα ανίχνευσης βαρυτικών κυμάτων από τον ανιχνευτή με μεγαλύτερη ευαισθησία του LIGO που περιλαμβάνονται στο GWTC-1 (The LIGO and The Virgo Scientific Collaboration , 2018)

## 8.8 GW190425

Στις 6 Ιανουαρίου του 2020 η επιστημονική ομάδα των συνεργατών του LIGO και του VIRGO ανακοίνωσαν ότι, στις 25 Απριλίου του 2019 ο ανιχνευτής LIGO-Livingston κατέγραψε βαρυτικά κύματα από ένα δυαδικό σύστημα συμπαγών αντικειμένων. Ο ανιχνευτής LIGO-Hanford, βρισκόταν εκτός λειτουργίας ενώ ο ανιχνευτής Virgo λειτουργούσε, αλλά ήταν εκτός εμβέλειας και λόγω χαμηλότερης ευαισθησίας δεν κατέγραψε το κύμα, αλλά βοήθησε στον υπολογισμό των παραμέτρων της πηγής εκπομπής βαρυτικών κυμάτων.

Από τις παραμέτρους υπολογίστηκε ότι πρόκειται για δύο αστέρες νετρονίων μάζας 1,4 και 3,4 ηλιακών μαζών που συγχωνεύτηκαν σε απόσταση 520 εκατομμυρίων ετών φωτός μακριά από τη Γη. Το ποσοστό ψευδούς συναγεμμού για το αποτύπωμα αυτό υπολογίζεται περίπου 1 στα 69000 έτη καθιστώντας το ιδιαίτερα σημαντικό. Η συνολική μάζα του δυαδικού αυτό συστήματος εκτιμάται στις 3,4  $M_{\odot}$ , περίπου πέντε φορές μεγαλύτερη από το μέσο όρο των δυαδικών συστημάτων αστέρων νετρονίων που υπολογίζεται ότι υπάρχουν στο σύμπαν.

Δύο είναι οι πιθανοί τρόποι να έχει σχηματιστεί αυτό το σύστημα. Ο πρώτος είναι όταν δυο αστέρια απομονωμένα από άλλα συμπαγή συστήματα υφίστανται έκρηξη σούπερ νόβα και μετατρέπονται σε ένα δυαδικό σύστημα αστέρων νετρονίων. Ο άλλος τρόπος που μπορεί να σχηματίστηκε είναι να προϋπήρχαν ένας αστέρας νετρονίων και ένα άστρο, τα οποία είτε ο αστέρας νετρονίων να απορρόφησε το άστρο και να δημιουργήθηκε ένα βαρύτερο αστέρι νετρονίων, είτε ένα τρίτο άστρο νετρονίων απορρόφησε το αστέρι μικρότερης μάζας και δημιουργήθηκε το δυαδικό σύστημα που παρατηρήσαμε.

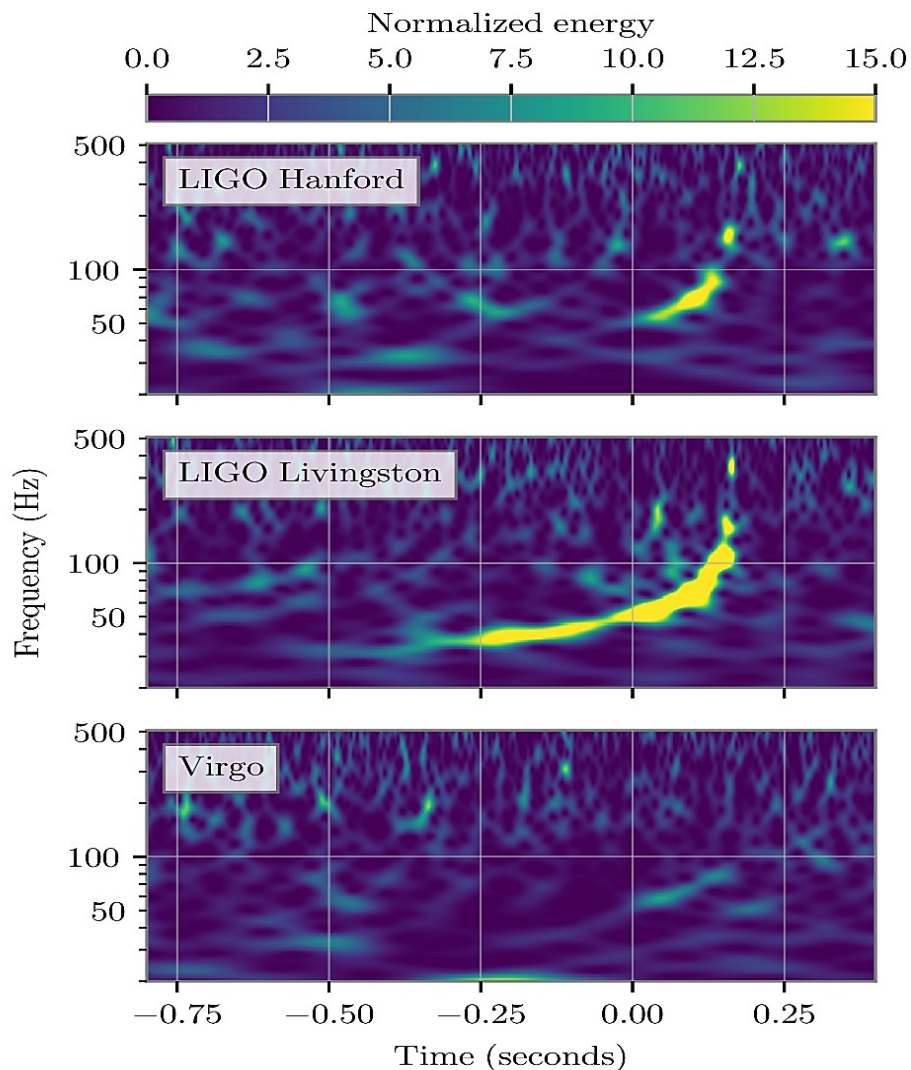


Εικόνα 18 η καταγραφή της συχνότητας του GW190425 όπως καταγράφηκαν από τους ανιχνευτές LIGO-Livingston και Virgo (Abbott, et al, & LIGO and Virgo Scientific Collaboration, GW190425: Observation of a Compact Binary Coalescence with Total Mass  $\sim 3.4M_{\odot}$ , 2020)

## 8.9 GW190412

Στις 20 Απριλίου του 2020 η επιστημονική συνεργασία του LIGO και του VIRGO ανακοίνωσαν, την από τις 12 Απριλίου του 2019, παρατήρηση συγχώνευσης δύο μελανών σπών άνισης μάζας. Η ανίχνευση αυτή καταγράφηκε και στους τρεις ανιχνευτές. Πρόκειται για μια μελανή σπή μάζας  $31,7 M_{\odot}$  και μία άλλη  $8 M_{\odot}$ , που συγχωνεύτηκαν σε μια μεγαλύτερης μάζας  $38,6 M_{\odot}$ . Το εξαιρετικό σε αυτή την παρατήρηση είναι η μεγάλη διαφορά μάζας ανάμεσα στις δύο αρχικές μαύρες τρύπες, κάτι που επιβεβαίωσε την πρόβλεψη της θεωρίας της Σχετικότητας για τα υψηλότερα πολύπολα ή υψηλότερες αρμονικές, κατά τις οποίες αποδεικνύεται ότι το σήμα των βαρυτικών κυμάτων είναι τετραπολικό, δηλαδή ηχεί σε υψηλότερες συχνότητες σε τέτοιες περιπτώσεις, κάτι που δε μπορεί να γίνει αντιληπτό όταν οι μάζες των μελανών σπών είναι παρόμοιες. Η συγχώνευση αυτή έδωσε ένα διαφορετικό σήμα βαρυτικού κύματος που έκανε ευκολότερη την

καταγραφή των άλλων παραμέτρων του συμβάντος. Το ποσοστό ψευδούς συναγεμμού ανέρχεται στο 1 στα 30000 χρόνια και η απόσταση του από τη Γη είναι στα 2,5 δισεκατομμύρια έτη φωτός.



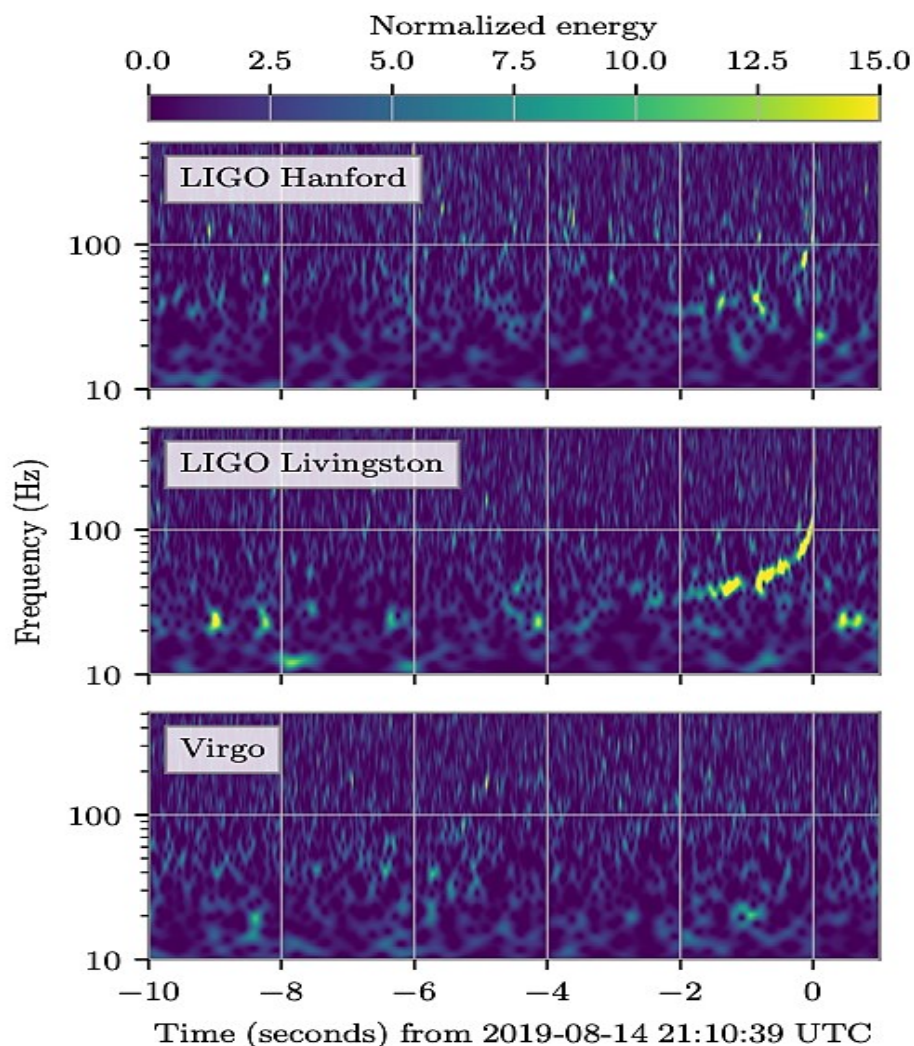
Εικόνα 19 η καταγραφή του GW190412 από τους ανιχνευτές LIGO και Virgo (Abbott, et al, & LIGO and Virgo Scientific Collaboration, GW190412: Observation of a binary-black-hole coalescence with asymmetric masses, 2020)

## 8.10 GW190814

Στις 23 Ιουνίου του 2020 δημοσιεύτηκε η ανίχνευση βαρυτικού κύματος από τους ανιχνευτές του LIGO και του Virgo, οι οποίοι στις 14 Αυγούστου του 2019 κατέγραψαν τη



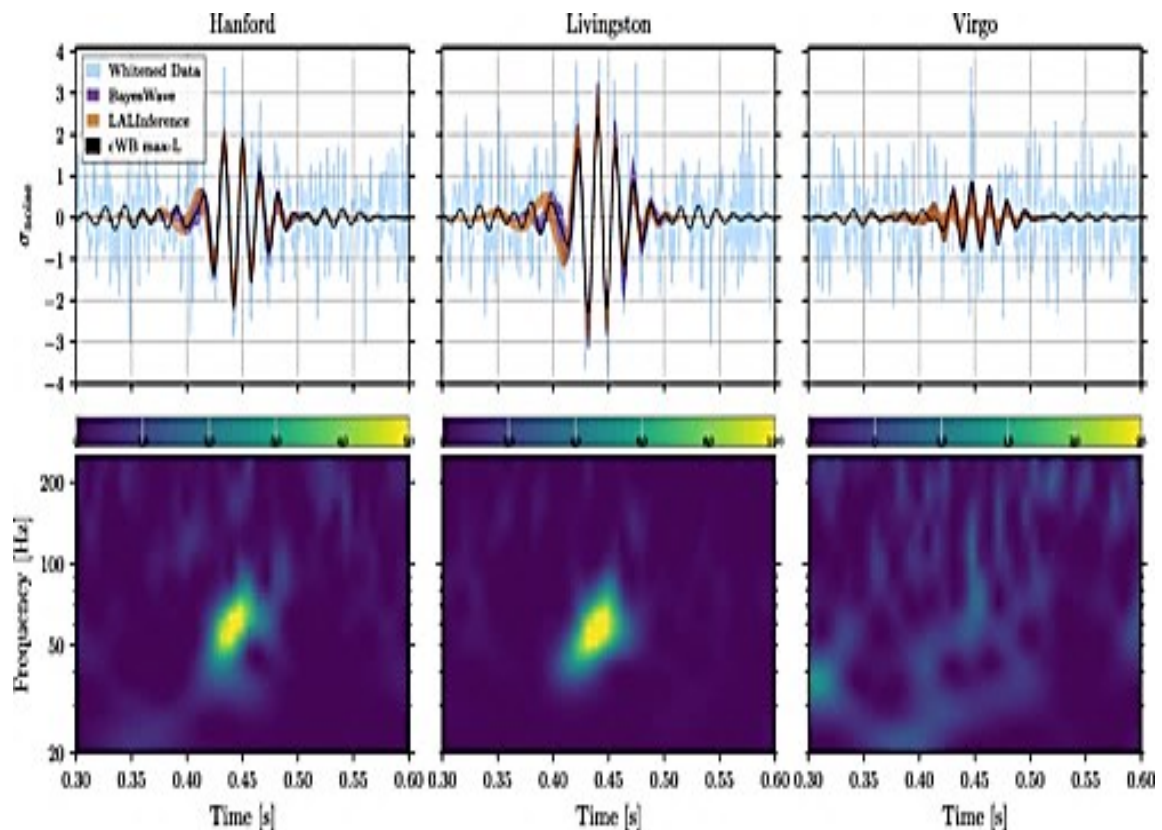
συγχώνευση δύο αντικειμένων. Μιας μαύρης τρύπας μάζας μεγέθους 23,2 ηλιακών μαζών και ενός αντικειμένου μεγέθους 2,59 ηλιακών μαζών. Πιθανότατα πρόκειται είτε για μια μαύρη τρύπα πολύ μικρής μάζας, είτε για έναν αστέρα νετρονίων πολύ μεγάλης μάζας. Η πιθανότητα να πρόκειται για τυχαίο θόρυβο ανέρχεται στα 1 στα 10000 χρόνια. Η μάζα του μεγαλύτερου αντικειμένου είναι περίπου 9 φορές μεγαλύτερη από τη μικρότερη, πρόκειται για την πιο ασύμμετρη καταγραφή έως τότε. Η τελική μάζα του συγχωνευμένου αντικειμένου είναι στα 25,6  $M_{\odot}$  και έχει απόσταση από τη Γη περίπου 800 εκατομμύρια έτη φωτός.



Εικόνα 20 όπως καταγράφηκε το σήμα του GW190814 από του ανιχνευτές του LIGO και Virgo, διάγραμμα συχνότητας – χρόνου (Abbott, et al, & LIGO and Virgo Scientific Collaboration, GW190814: Gravitational Waves from the Coalescence of a 23 M with a 2.6 M, 2020)

## 8.11 GW190521

Στις 2 Σεπτέμβρη του 2020 δημοσιεύτηκε η παρατήρηση GW190521 που καταγράφηκε στις 21 Μαΐου του 2019. Αποτελεί τη μεγαλύτερη μέχρι εκείνη τη στιγμή συγχώνευση μελανών οπών με μάζες  $95 M_{\odot}$  και  $69 M_{\odot}$ . Η προκύπτουσα από τη συγχώνευση μάζα ανέρχεται στα  $156,3 M_{\odot}$  και βρίσκεται σε απόσταση περίπου 12,7 δισεκατομμύρια έτη φωτός από τη Γη. Αυτές οι μελανές οπές συγκαταλέγονται στις μαύρες τρύπες ενδιάμεσης μάζας, που οι γνώσεις μας γι' αυτές και τον τρόπο που σχηματίστηκαν είναι ελάχιστες. Οπότε είναι πολύ σημαντική αυτή η ανακάλυψη. Ανάλογα με τη μάζα των μελανών οπών, που εκπέμπει τα βαρυτικά κύματα, το σήμα που λαμβάνεται στους ανιχνευτές είναι διαφορετικό. Όσο πιο μεγάλης μάζας είναι η μελανή οπή, τόσο πιο σύντομο είναι το ίχνος του κύματος και δίνει την ευκαιρία στους επιστήμονες να μελετήσουν διαφορετική φάση της συγχώνευσης.



Εικόνα 21 η κυματομορφή πάνω του GW190521 όπως καταγράφηκε από τους ανιχνευτές των LIGO Hanford, LIGO Livingston, and Virgo και το διάγραμμα συχνότητας – χρόνου κάτω (Abbott, et al, & LIGO and Virgo Scientific Collaboration, GW190521: A Binary Black Hole Merger with a Total Mass of  $150 M_{\odot}$ , 2020).

## 8.12 GWTC-2

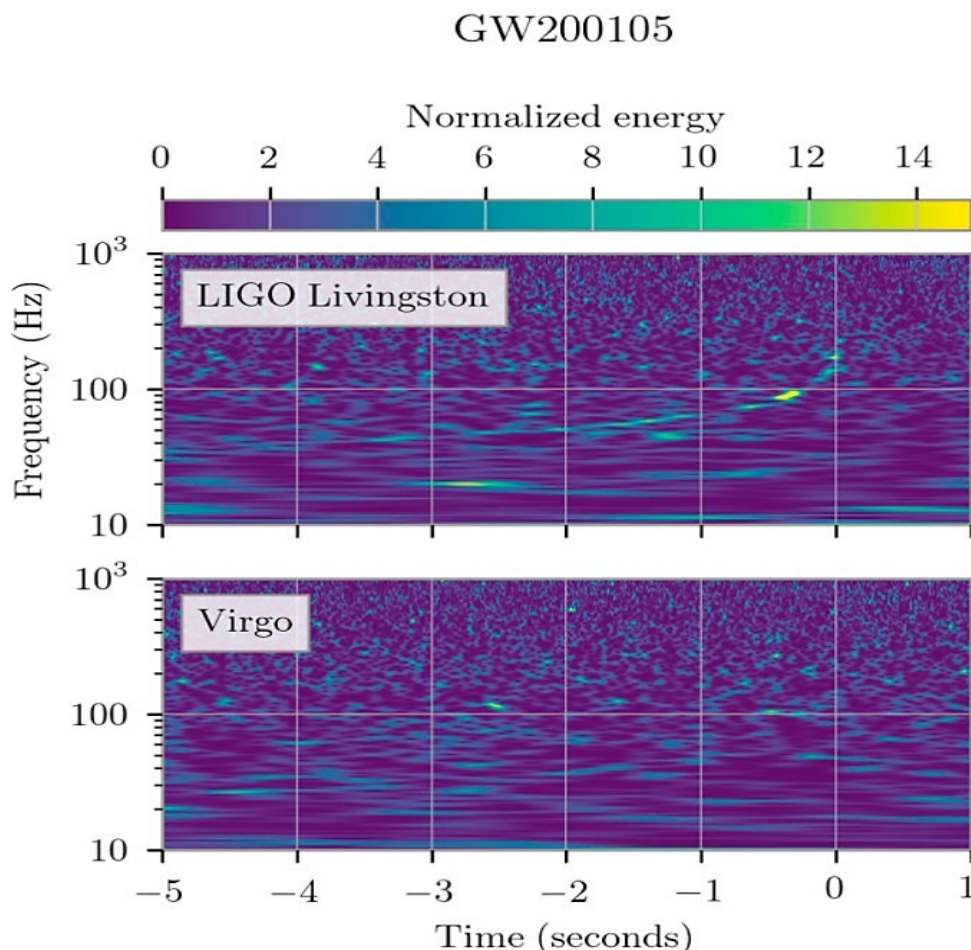
Ο κατάλογος GWTC-2 που εκδόθηκε στις 28 Οκτωβρίου του 2020 περιλαμβάνει όλες τις ανιχνεύσεις που είχαν γίνει ως τότε από την πρώτη παρατήρηση, συνολικά 50 ανιχνεύσεις. Περιλαμβάνει δηλαδή 36 νέες ανιχνεύσεις, που αφορούν είτε συγχωνεύσεις μελανών οπών, είτε δυαδικών συστημάτων αστέρων νετρονίων, είτε αστέρων νετρονίων με μελανές οπές. Ο μεγάλος αυτός αριθμός παρατηρήσεων οφείλεται στην αναβάθμιση των τριών ανιχνευτών οι οποίοι βρίσκονται στην τρίτη φάση ανίχνευσης όπως ονομάζεται, που έχει επιτευχθεί η μείωση θορύβου και η αύξηση της ευαισθησίας τους. Η διαφορά στις νέες ανακαλύψεις είναι στον τρόπο ονομασίας τους, καθώς έχει προστεθεί και η ώρα ανακάλυψής τους μαζί με την ημερομηνία, ώστε να μη συγχέονται παρατηρήσεις της ίδιας ημέρας.

Στον κατάλογο αυτό περιλαμβάνονται ασύμμετρα συμβάντα, δηλαδή με μεγάλη διαφορά μάζας, η μία από την άλλη. Επίσης υπάρχουν παρατηρήσεις δυαδικών συστημάτων μαζών μικρότερων του  $5 M_{\odot}$ , όπως το GW190426\_152155 . Περιλαμβάνεται το πιο μακρινό συμβάν που καταγράφηκε ως τώρα και είναι το GW190706\_222641 σε απόσταση 14,5 δισεκατομμυρίων ετών φωτός από τη Γη. Επίσης υπάρχουν εννέα συμβάντα που έχουν εντοπιστεί σε λιγότερο από το 1% της έκτασης του ουρανού. Στο παράρτημα υπάρχει ο κατάλογος των συμβάντων όπως δημοσιεύτηκε από την επιστημονική συνεργασία των LIGO και VIRGO.

## 8.13 GW200105\_162426

Στις 29 Ιουνίου του 2021 ανακοινώθηκε από την επιστημονική συνεργασία των LIGO, Virgo και KAGRA η ανίχνευση ενός δυαδικού στοιχείου που αποτελείται από μια μαύρη τρύπα μάζας  $8,9 M_{\odot}$  και ενός αστέρα νετρονίων μάζας  $1,9 M_{\odot}$ . Η ανίχνευση έγινε στις 5 Ιανουαρίου του 2020 από τους ανιχνευτές στο LIGO Livingston και στο Virgo. Η σύγκρουση αυτής της μαύρης τρύπας με τον αστέρα νετρονίων έγινε σε απόσταση 900 εκατομμυρίων ετών φωτός από τη Γη. Η μάζα που απέμεινε μετά την απορρόφηση του αστέρα νετρονίων από τη μαύρη τρύπα υπολογίζεται στις  $10,4 M_{\odot}$ . Η πιθανότητα να έχει

δημιουργηθεί το βαρυτικό αυτό κύμα λόγω θορύβου είναι 1 στα 2,8 χρόνια, μικρή πιθανότητα σε σχέση με άλλα συμβάντα, αλλά θεωρείται και πάλι αξιόπιστο.



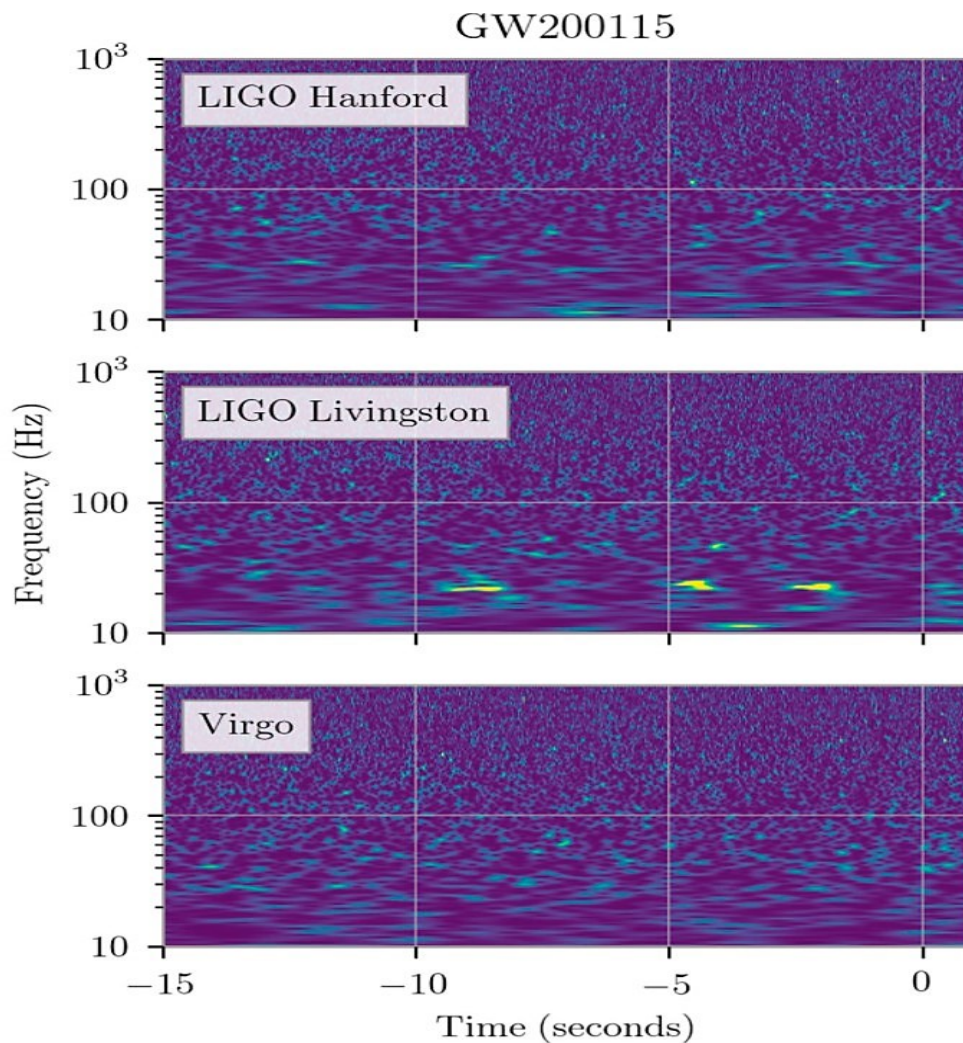
Εικόνα 22 το γεγονός GW200105 όπως καταγράφηκε από τους ανιχνευτές στο LIGO Livingston και στο Virgo, το διάγραμμα συχνότητας – χρόνου (Abbott, et al, & The LIGO, VIRGO and KAGRA Scientific Collaboration, Observation of gravitational waves from two neutron star–black hole coalescences, 2021)

## 8.14 GW200115\_042309

Στις 29 Ιουνίου του 2021 δημοσιεύτηκε ακόμα μια ανακάλυψη βαρυτικών κυμάτων που δημιουργήθηκε από ένα δυαδικό σύστημα που αποτελούνταν από μια μελανή οπή και έναν αστέρα νετρονίων, το GW200115. Η παρατήρηση αυτή έχει πιθανότητα εμφάνισης λόγω τυχαίου θορύβου μία στις 100000 χρόνια, άρα η βεβαιότητα γι' αυτό είναι πολλή

μεγάλη. Πριν τη συγχώνευση αυτή υπήρχε μια μελανή σπή μάζας  $5,7 M_{\odot}$  και ένας αστέρας νετρονίων μάζας  $1,5 M_{\odot}$ . Η συγχώνευση έγινε πριν από 1 δισεκατομμύριο χρόνια και παρήγαγε μια μαύρη τρύπα μεγέθους  $7,8 M_{\odot}$  το βαρυτικό κύμα καταγράφηκε και από τους τρεις ανιχνευτές στο LIGO Hanford, LIGO Livingston, και Virgo στις 15 Ιανουαρίου του 2020.

Το πως σχηματίστηκαν οι δύο αρχικές μάζες δεν είναι σαφές, διότι θα μπορούσαν να είναι αποτέλεσμα απομονωμένης δυαδικής εξέλιξης, δηλαδή να ήταν δύο αστέρια που κινούνταν σε κυκλική τροχιά μεταξύ τους και στη συνέχεια από έκρηξη σουπερνόβα το ένα κατέληξε αστέρας νετρονίων και το άλλο μαύρη τρύπα. Είτε πρόκειται για δυναμική αλληλεπίδραση, δηλαδή να έχει δημιουργηθεί το κάθε ένα ξεχωριστά ως εξέλιξη δύο άστρων, που το ένα κατέρρευσε σε αστέρα νετρονίων και το άλλο να εξελίχθηκε σε μαύρη τρύπα και κάποια στιγμή πλησίασαν τόσο μεταξύ τους που συγκρούστηκαν και εντέλει συγχωνεύτηκαν. Η τροχιά της κίνησης του GW200115 θα μπορούσε να είναι μια ένδειξη ότι προέρχεται από πυκνό περιβάλλον όπως ένα αστρικό σμήνος.



Εικόνα 23 το διάγραμμα συχνότητας – χρόνου του GW200115 όπως καταγράφηκε από τους ανιχνευτές LIGO Hanford, LIGO Livingston, και Virgo (Abbott, et al, & The LIGO, VIRGO and KAGRA Scientific Collaboration, Observation of gravitational waves from two neutron star–black hole coalescences, 2021)

## 8.15 GWTC-3

Στις 7 Νοεμβρίου του 2021 δημοσιεύτηκε ο κατάλογος GWTC-3, που περιλαμβάνει το δεύτερο μέρος της Τρίτης περιόδου παρατήρησης Βαρυτικών κυμάτων. Στον κατάλογο αυτό περιλαμβάνονται 35 νέες ανιχνεύσεις βαρυτικών κυμάτων συμπεριλαμβανομένου και του GW200115, ενώ το GW200105 δεν έχει περιληφθεί διότι δε ξεπερνά το 36 % ως πιθανότητα πραγματικού γεγονότος, παρόλα αυτά κρίθηκε σημαντικό να δημοσιευθεί ξεχωριστά. Ο συνολικός αριθμός ανακαλύψεων βαρυτικών κυμάτων φτάνει πλέον τις 90.

Στη φάση αυτή των παρατηρήσεων έχει ξεκινήσει και ο ανιχνευτής KAGRA, στην Ιαπωνία, να λειτουργεί και συμμετέχει στις παρατηρήσεις, επίσης έχει ξεκινήσει μια δοκιμαστική περίοδο παρατηρήσεων και ο ανιχνευτής GEO 600 στη Γερμανία, αλλά οι παρατηρήσεις αυτές δεν είχαν ακόμα δημοσιευτεί όταν γράφτηκε αυτή η εργασία. Πλέον οι ανιχνεύσεις γίνονται πολύ συχνά γιατί οι ανιχνευτές έχουν εξελιχθεί, έχουν γίνει πιο ευαίσθητοι και έχουν προστεθεί σε περισσότερα μέρη της Γης.

Ο κατάλογος αυτός περιλαμβάνει συγχωνεύσεις μελανών οπών με μελανές οπές, μελανές οπές με αστέρες νετρονίων και αστέρων νετρονίων μεταξύ τους. Ο κατάλογος GWTC-3 περιλαμβάνει γεγονότα που έχουν τουλάχιστον 50 % πιθανότητα να συμβούν και ποσοστό ψευδούς συναγερμού μικρότερου από 2 ανά ημέρα. Υπάρχει επίσης μια λίστα που περιλαμβάνει 1048 γεγονότα που έχουν μικρότερη πιθανότητα να συμβούν, αλλά δεν περιλαμβάνονται σε αυτό τον κατάλογο, τα οποία θα επανεξεταστούν στο μέλλον για πιθανή αναβάθμιση τους. Στο παράρτημα υπάρχει ο πλήρης κατάλογος GWTC-3 όπως δημοσιεύτηκε από την επιστημονική επιτροπή των LIGO, VIRGO και KAGRA.

Τα γεγονότα που ξεχωρίζουν στον κατάλογο αυτό είναι μια συνένωση μελανών οπών μεγάλης μάζας, το GW200220\_061928, η οποία όμως δεν ξεπερνά την GW190521. Το GW200220\_061928 δημιουργήθηκε από μια αρχική μελανή οπή μάζας  $87 M_{\odot}$  και μια άλλη μελανή οπή  $61 M_{\odot}$  και η τελική που προέκυψε μετά τη σύγκρουση τους υπολογίστηκε στις  $141 M_{\odot}$ . Το γεγονός αυτό έγινε σε απόσταση περίπου 20 δισεκατομμυρίων ετών φωτός από τη Γη.

Το GW191129\_134029 αποτελεί τη συγχώνευση με τη χαμηλότερη συνολική μάζα μελανών οπών. Οι αρχικές μάζες ήταν στις  $10,7 M_{\odot}$  και  $6,7 M_{\odot}$  ενώ η τελική μάζα υπολογίζεται στις  $16,8 M_{\odot}$  και βρίσκεται σε απόσταση 2,6 δισεκατομμύρια έτη φωτός από εμάς. Πρόκειται για ένα δυαδικό σύστημα μελανών οπών που έχει ανιχνευτεί με μεγάλη βεβαιότητα.

Το GW191219\_163120 είναι βαρυστικό κύμα που ανιχνεύτηκε από ένα δυαδικό σύστημα μιας μελανής οπής μάζας  $31,1 M_{\odot}$  και ενός αστέρα νετρονίων μάζας  $1,17 M_{\odot}$ . Που κατέληξε σε συνολική μάζα  $32,2 M_{\odot}$ . Πρόκειται για μια από τις μεγαλύτερες διαφορές μάζας συστήματος που έχουν ανιχνευτεί. Το γεγονός αυτό έλαβε χώρα σε απόσταση 1,8 δισεκατομμυρίων ετών φωτός από τη Γη.

Πρέπει ακόμα να αναφέρουμε το GW191204\_171526 που πρόκειται για τη συνένωση δύο μελανών οπών για τις οποίες μπορούμε να πούμε ότι έχει βρεθεί με σιγουριά

ότι έχει θετικό inspiral spin, το οποίο σημαίνει ότι «τουλάχιστον μία από τις δύο μελανές οπές περιστρέφεται σε τροχιά που είναι ευθυγραμμισμένη με την κατεύθυνση της τροχιακής περιστροφής» (LIGO Scientific Collaboration, 2021). Αυτό σημαίνει ότι είμαστε βέβαιοι ότι πρόκειται για μελανές οπές που συνενώθηκαν σε μια. Τα χαρακτηριστικά του GW191204\_171526 είναι, δύο αρχικές μελανές οπές μάζας  $11,9 M_{\odot}$  και  $8,2 M_{\odot}$  που κατέληξαν σε μια τελική μάζα  $19,21 M_{\odot}$ , η οποία βρίσκεται σε απόσταση 2,1 δισεκατομμύρια έτη φωτός μακριά από τη Γη.

Τέλος το GW191109\_010717 που επίσης πρόκειται για συνένωση μελανών οπών όμως σε αυτή την περίπτωση έχει καταγραφεί αρνητικό inspiral spin, δηλαδή περιστρέφονται σε τροχιά αντίθετη από την κατεύθυνση της τροχιακής περιστροφής. Το δυαδικό σύστημα αυτό είχε αρχικές μάζες  $65 M_{\odot}$  και  $47 M_{\odot}$ . Η τελική μάζα που προέκυψε από τη συνένωσή τους υπολογίστηκε να είναι  $107 M_{\odot}$ . Το γεγονός αυτό διαδραματίστηκε σε απόσταση 4,2 δισεκατομμύρια έτη φωτός από τη Γη.



## 9 Μελλοντικές προσδοκίες

Η μελέτη της βαρύτητας πέρασε από πολλές διακυμάνσεις. Από την αρχαιότητα που ακόμα οι άνθρωποι δε γνώριζαν τα στοιχειώδη για την επιβίωση τους, είχαν την περιέργεια να δουν τι υπάρχει πίσω από όλα τα θαυμαστά φαινόμενα, όπως η κίνηση των πλανητών, τι μας κρατάει πάνω στη Γη, ο Ήλιος και γενικότερα τα μυστικά του σύμπαντος.

Η ύπαρξη του Αϊνστάιν και τη Γενικής θεωρίας της Σχετικότητας άνοιξε ένα δρόμο στον οποίο δεν υπήρχε γυρισμός. Τα μυστικά της ύπαρξης, του σύμπαντος και της Φυσικής αρχίζουν να αποκαλύπτονται.

Οι επιστήμονες εργάζονται ανελλιπώς πάνω στο κεφάλαιο των βαρυτικών κυμάτων. Οι ανιχνευτές διαρκώς εξελίσσονται και νέοι προστίθενται σε διαφορετικά μέρη της Γης, μα και στο διάστημα, στον αγώνα απόκτησης γνώσεων.

Με κάθε κύμα που καταγράφεται, η Γενική θεωρία της Σχετικότητας δοκιμάζεται, επιβεβαιώνεται και διανθίζεται. Επιβεβαιώθηκε η ύπαρξη των μελανών οπών, παρατηρήθηκαν δυαδικά συστήματα μελανών οπών που συγχωνεύτηκαν μεταξύ τους σε μία μεγαλύτερη. Καταγράφηκαν βαρυτικά κύματα από αστέρες νετρονίων που κατέρρευσαν σε μελανές οπές. Ανακαλύφθηκαν βαρυτικά κύματα από δυαδικά συστήματα αστερών νετρονίων και μελανών οπών. Κάθε ένα από αυτά δίνει στοιχεία για το πως δημιουργήθηκε, πως εξελίχθηκε και πως λειτουργεί το σύμπαν. Μαθαίνουμε τις ιδιότητες του, μια προς μία, την πυκνότητα του, το spin του, τον τρόπο περιστροφής του, τη γέννηση και το θάνατο του. Ανακαλύπτουμε το ρυθμό με τον οποίο διαστέλλεται το σύμπαν.

Οι επιστημονικές συνεργασίες του LIGO και του VIRGO έχουν ως τώρα αποκαλύψει 90 καταγραφές βαρυτικών κυμάτων, που τις έχουν επιβεβαιώσει και επαληθεύσει. Έχουν αποκαλύψει συγχρόνως ότι το σύμπαν αφθονεί σε γεγονότα που παράγουν βαρυτικά κύματα. Όσο συνεχίζονται οι παρατηρήσεις τόσο περισσότερα θα μαθαίνουμε για τα αντικείμενα που απαρτίζουν το σύμπαν και τις ιδιότητες τους. Μπαίνοντας σε λειτουργία οι νέοι ανιχνευτές που είναι έτοιμοι όπως ο KAGRA και ο GEO 600 ή όταν θα προστεθεί και η LISA θα μπορέσουμε να δούμε σπάνια συστήματα που ακόμα δεν έχουμε παρατηρήσει με άλλο τρόπο, κυρίως λόγω της μεγάλης απόστασης μας από αυτά. Ο LIGO και ο VIRGO αυτή τη στιγμή αναβαθμίζονται και ετοιμάζονται να ξεκινήσουν την τέταρτη περίοδο παρατήρησης μαζί με τον KAGRA. Στο διάστημα όμως

αυτό οι επιστημονικές ομάδες συνεχίζουν να αναλύουν τα δεδομένα, να μαθαίνουν από αυτά και να αναζητούν νέους τύπους βαρυτικών κυμάτων.

Μέχρι τώρα ότι γνωρίζαμε για το σύμπαν ήταν μόνο ότι μπορούσαμε να δούμε μέσω του φωτός. Τα βαρυτικά κύματα όμως μπορούν να δώσουν πληροφορίες που είναι ανεξάρτητες του φωτός. Κατά κάποιον τρόπο το σύμπαν είναι «διάφανο» στα βαρυτικά κύματα. Γιατί δε μπορούν να απορροφηθούν, ούτε αντανακλώνται, ούτε καταστρέφονται. Μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες ακόμα και για το big bang και ελάχιστα δευτερόλεπτα μετά από αυτό, πριν γεννηθεί το φως.

Ένας νέος κλάδος της αστροφυσικής των βαρυτικών κυμάτων έχει ήδη ανοίξει, αλλά τι θα φέρει; Τα βαρυτικά κύματα εικάζεται ότι θα δώσουν απαντήσεις για τη σκοτεινή ύλη. Πλησιάζει άραγε η ώρα να αποκαλυφθεί το σκοτεινό σύμπαν;

Αυτή τη στιγμή γνωρίζουμε, όπως έχει υπολογιστεί, το 4,9% του σύμπαντος που αποτελείται από την ύλη που γνωρίζουμε. Το 26,8 % υπολογίζεται ότι είναι σκοτεινή ύλη που δε γνωρίζουμε τίποτα γι' αυτήν. Το υπόλοιπο 69,3 % είναι σκοτεινή ενέργεια.

Σκοτεινή ονομάζεται διότι δεν αλληλεπιδρά με το φως και την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ώστε να τη δούμε, να την εντοπίσουμε. Όμως γνωρίζουμε ότι υπάρχει και πιθανών αλληλεπιδρά με τη βαρύτητα. Αναμένουμε τα βαρυτικά κύματα και οι προσπάθειες της επιστημονικής κοινότητας να δώσουν απαντήσεις, στο μέλλον, σε θεμελιώδη ερωτήματα. Θέλουμε η θεωρία της βαρύτητας να εμπλουτιστεί και να ολοκληρωθεί για να ανοίξει ο δρόμος στις επόμενες θεωρίες που θα συμπληρώσουν το παζλ που συνθέτει το σύμπαν.

## 10 Επίλογος

Στην εργασία αυτή προσεγγίσαμε τα βαρυτικά κύματα με έναν απλό τρόπο και κατανοητό, αλλά συγχρόνως και επιστημονικά τεκμηριωμένο. Προσπαθήσαμε να πιάσουμε το κουβάρι της θεωρίας από την αρχαιότητα και το φτάσαμε μέχρι τις τελευταίες ανακοινώσεις των επιστημονικών επιτροπών του LIGO και του VIRGO το Νοέμβριο του 2021. Ο δρόμος της αποκάλυψης των μυστικών του σύμπαντος έχει ανοίξει και με αυτή την εργασία μάθαμε λίγα από τα επιτεύγματα της επιστήμης πάνω στα βαρυτικά κύματα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο έγινε μια ιστορική αναδρομή πάνω στις προσπάθειες του ανθρώπου να κατανοήσει τον τρόπο που λειτουργούν τα ουράνια σώματα και η Βαρύτητα. Ξεκινήσαμε από τον Πλάτωνα στα 400 π.Χ. και τη γεωμετρική εξήγηση του για τους πλανήτες και συνεχίσαμε με τον Αριστοτέλη στα 300 π. Χ. περίπου με τα αίτια που προκαλούν τις διάφορες κινήσεις, τη φύση των σωμάτων και το θεϊκό στοιχείο πάντα παρόν. Ο Κλαύδιος Πτολεμαίος από την άλλη πλευρά στα 130 μ.Χ. με την Αλμαγέστη συνδύασε τα Μαθηματικά με την Αστρονομία και έδωσε στην ανθρωπότητα μοντέλα κατανόησης και πρόβλεψης της κίνησης των πλανητών. Για να φτάσουμε στον Κοπέρνικο το 1473 που έθεσε τον Ήλιο στο κέντρο, του μέχρι τότε γνωστού σύμπαντος. Ο Κέπλερ το 1609 μας έδωσε τους τρεις νόμους του, που αποτέλεσαν τη βάση για τη θεωρία της Βαρύτητας του Νεύτωνα. Δε θα μπορούσαμε να αφήσουμε εκτός το Γαλιλαίο που εισήγαγε τα πειράματα και θεμελίωσε τη Φυσική και την επιστημονική γνώση.

Στο τρίτο μέρος αναφερθήκαμε στη Νευτώνεια μηχανική. Στους τρεις νόμους του Νεύτωνα και τη θεωρία του για την Παγκόσμια έλξη. Τι συνέπειες μπορεί να έχει ο νόμος της Παγκόσμιας έλξης και τι να σημαίνει βαρύτητα μετά την ανακάλυψη της Νευτώνειας Μηχανικής.

Στο τέταρτο μέρος της εργασίας αναλύσαμε την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας του Αϊνστάιν και τις συνέπειες της. Αναφερθήκαμε στους μετασχηματισμούς Lorentz και τη σύνθεση ταχυτήτων. Από τη Γενική Σχετικότητα διαχωρίσαμε τις ανταλλοίωτες από τις συναλλοίωτες συντεταγμένες. Μιλήσαμε για τις Γεωδαισιακές και την αρχή της ισοδυναμίας.

Το πέμπτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στη θεωρία της Βαρύτητας. Κάναμε μια εισαγωγή στις Παλιρροϊκές Βαρυτικές δυνάμεις. Γράψαμε την εξίσωση γεωδαιτικής

απόκλισης. Εξηγήσαμε τη διαφορά ανάμεσα στην εξωγενή και εγγενή καμπυλότητα. Στη συνέχεια δώσαμε τις εξισώσεις πεδίου του Einstein απ' όπου ξεχωρίσαμε τη λεγόμενη Εξίσωση Einstein.

Το έκτο κεφάλαιο αφορούσε τις πηγές των βαρυτικών κυμάτων. Εξηγήσαμε τι είναι τα Γραμμικοποιημένα βαρυτικά κύματα και ποιες είναι οι Αστροφυσικές πηγές βαρυτικών κυμάτων. Ποια είναι η Αστρική εξέλιξη και ποια Κοσμολογικά γεγονότα εκπέμπουν βαρυτικά κύματα. Στη συνέχεια χωρίσαμε τις πηγές βαρυτικών κυμάτων με βάση το είδος κίνησης και τη μεταβαλλόμενη κατανομή μάζας, σε συνεχή βαρυτικά κύματα σε σπειροειδή βαρυτικά κύματα, σε εκρηκτικά βαρυτικά κύματα και σε στοχαστικά βαρυτικά κύματα.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάσαμε τους ανιχνευτές βαρυτικών κυμάτων. Δώσαμε μια περιγραφή της μορφής και της λειτουργίας των συμβολόμετρων βαρυτικών κυμάτων. Στη συνέχεια αναφέραμε ποιοι ανιχνευτές υπάρχουν αυτή τη στιγμή σε λειτουργία και τα στοιχεία τους, όπως ο LIGO, ο VIRGO, ο KAGRA και ο GEO 600, ενώ αναφέραμε και την κατασκευή του LISA που θα βρίσκεται στο διάστημα.

Το όγδοο κεφάλαιο το ξεκινήσαμε με το Νόμπελ Φυσικής του 2017 στους καθηγητές Rainer Weiss, Barry C. Barish και Kip S. Thorne, που τους δόθηκε για την ανακάλυψη των βαρυτικών κυμάτων και το πρώτο βαρυτικό κύμα που καταγράφηκε επίσημα από τον LIGO. Το GW150914, όπως ονομάστηκε, δημιουργήθηκε μετά την συνένωση δύο μελανών οπών. Στη συνέχεια αναφέραμε τα γεγονότα που έχουν καταγραφεί και έχουν δημοσιευτεί ότι παρήγαγαν βαρυτικά κύματα από τις επιστημονικές ομάδες του LIGO, του VIRGO και του KAGRA. Καθώς και τους καταλόγους ανίχνευσης βαρυτικών κυμάτων που έχουν ανιχνευτεί ως το Νοέμβριο του 2021.

Κλείσαμε με μια ανακεφαλαίωση των όσων ειπώθηκαν σε αυτή την εργασία και μια ελπίδα για το τι θα φέρει στο μέλλον η ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων.

## Βιβλιογραφία

- Abbott, B. P., & et al LIGO and Virgo Scientific Collaboration. (2016). *GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary*. n.c.: PHYSICAL REVIEW LETTERS.
- Abbott, B. P., et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration. (2016). *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*. n.c.: PHYSICAL REVIEW LETTERS.
- Abbott, B. P., et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration. (2017). *GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2*. n.c.: PHYSICAL REVIEW LETTERS.
- Abbott, B. P., et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration. (2017). *GW170608: Observation of a 19-solar-mass binary black hole coalescence*. n.c.: Lvc Publications.
- Abbott, B. P., et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration. (2017). *GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence*. n.c.: PHYSICAL REVIEW LETTERS.
- Abbott, B. P., et al, & Ligo and Virgo Scientific Collaboration. (2017). *GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral*. n.c.: PHYSICAL REVIEW LETTERS.
- Abbott, B. P., et al, & LIGO and Virgo Scientific Collaboration. (2020). *GW190425: Observation of a Compact Binary Coalescence with Total Mass  $\sim 3.4M_{\odot}$* . n.c.: LSC P&P Committee.
- Abbott, R., et al, & LIGO and Virgo Scientific Collaboration. (2020). *GW190412: Observation of a binary-black-hole coalescence with asymmetric masses*. n.c.: Lvc Publications.
- Abbott, R., et al, & LIGO and Virgo Scientific Collaboration. (2020). *GW190521: A Binary Black Hole Merger with a Total Mass of  $150 M_{\odot}$* . n.c.: PHYSICAL REVIEW LETTERS.
- Abbott, R., et al, & LIGO and Virgo Scientific Collaboration. (2020). *GW190814: Gravitational Waves from the Coalescence of a  $23 M_{\odot}$  with a  $2.6 M_{\odot}$* . n.c.: The Astrophysical Journal Letters, Volume 896, Number 2.
- Abbott, R., et al, & LIGO and VIRGO scientific collaboration. (2020). *GWTC-2: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the First Half of the Third Observing Run*. n.c.: LSC P&P Committee.
- Abbott, R., et al, & The LIGO and VIRGO Scientific Collaboration. (2018). *GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs*. n.c.: Lvc Publications.
- Abbott, R., et al, & The LIGO, VIRGO and KAGRA Scientific Collaboration. (2021). *GWTC-3: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the Second Part of the Third Observing Run*. n.c.: Lvc Publications.
- Abbott, R., et al, & The LIGO, VIRGO and KAGRA Scientific Collaboration. (2021). *Observation of gravitational waves from two neutron star–black hole coalescences*. n.c.: The Astrophysical Journal Letters.
- Buonanno, A. (2007). *Gravitational Waves*. Maryland: University of Maryland.

- Chakrabarty, I. (1999). *Gravitational Waves: An Introduction*. Allahabad, INDIA: Mehta Research Institute.
- Feynman, R., Leighton, R., & Sands, M. (2009). *Οι Διαλέξεις Φυσικής Του Feynman I*. Θεσσαλονίκη: Τζιόλας.
- GEO 600 official web site. (χ.χ.). *GEO 600 Organisation*. Ανάκτηση από GEO 600 Organisation: <https://www.geo600.org/>
- Hartle, J. B. (2016). *Βαρύτητα Εισαγωγή στη Γενική Σχετικότητα του Einstein*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- KAGRA Observatory official web site. (χ.χ.). *KAGRA Observatory Web site*. Ανάκτηση από KAGRA Observatory: <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>
- LIGO official web site. (2021). *LIGO Scientific Collaboration*. Ανάκτηση από LIGO Scientific Collaboration: <https://www.ligo.org/science/GW-Detecting.php>
- LIGO Scientific Collaboration. (2021, 12 28). *LIGO Scientific Collaboration Detections*. Ανάκτηση από LIGO Scientific Collaboration: <https://www.ligo.org/science/Publication-O3bCatalog/>
- Lindberg, D. C. (1997). *Οι απαρχές της Δυτικής Επιστήμης, Η Φιλοσοφική, Θρησκευτική και Θεσμική Θεώρηση της Ευρωπαϊκής Επιστημονικής Παράδοσης 600 π.Χ - 1450 μ.Χ*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- Losee, J. (1972). *An Historical Introduction to the Philosophy of Science*. New York: Oxford University Press.
- Maggiore, M. (2008). *Gravitational Waves*. Oxford: Oxford University Press.
- Martin, J. L. (2020). *Γενική Σχετικότητα*. Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Rose, J. (2017). *Cosmic chirps, Popular Science Background*. Stockholm: The Royal Swedish Academy of Sciences.
- Schutz, B. F. (2007). *Γενική Σχετικότητα*. Αθήνα: Εκδοτικός Οίκος Τραυλός.
- The LIGO and The Virgo Scientific Collaboration . (2018). *GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed*. n.c.: Lvc Publications.
- The Nobel Committee for Physics. (2017). *The Laser Interferometer Gravitational-Wave observatory and the first direct observation of gravitational waves*. Stockholm: The Royal Swedish Academy of Sciences.
- VIRGO Collaboration official web site. (χ.χ.). *VIRGO Collaboration*. Ανάκτηση από VIRGO Collaboration: <http://public.virgo-gw.eu/advanced-virgo/>
- Wald, R. M. (2007). *Χώρος Χρόνος και Βαρύτητα, η θεωρία της μεγάλης έκρηξης και των μελανών οπών*. Πειραιάς: Εκδόσεις Πουκαμισάς.
- Αποστολάτος, Θ., & Ιωάννου, Π. (2016). *Οι νόμοι του Νεύτωνα*. repository.kallipos.gr.
- Γαβρόγλου, Κ. (2003). *Ιστορία της φυσικής και της χημείας*. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

## Παράρτημα : «Κατάλογοι ανιχνεύσεων»

Event	$m_1/M_\odot$	$m_2/M_\odot$	$M/M_\odot$	$\chi_{\text{eff}}$	$M_f/M_\odot$	$a_f$	$E_{\text{rad}}/(M_\odot c^2)$	$\ell_{\text{peak}}/(\text{erg s}^{-1})$	$d_L/\text{Mpc}$	$z$	$\Delta\Omega/\text{deg}^2$
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$28.6^{+1.6}_{-1.5}$	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	$63.1^{+3.3}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$3.6^{+0.4}_{-0.4} \times 10^{56}$	$430^{+150}_{-170}$	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	179
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$15.2^{+2.0}_{-1.1}$	$0.04^{+0.28}_{-0.19}$	$35.7^{+9.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	$3.2^{+0.8}_{-1.7} \times 10^{56}$	$1060^{+540}_{-480}$	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1555
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$0.18^{+0.20}_{-0.12}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$3.4^{+0.7}_{-1.7} \times 10^{56}$	$440^{+180}_{-190}$	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$21.5^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.04^{+0.17}_{-0.20}$	$49.1^{+5.2}_{-3.9}$	$0.66^{+0.08}_{-0.10}$	$2.2^{+0.5}_{-0.5}$	$3.3^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	$960^{+430}_{-410}$	$0.19^{+0.07}_{-0.08}$	924
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$7.9^{+0.2}_{-0.2}$	$0.03^{+0.19}_{-0.07}$	$17.8^{+3.2}_{-0.7}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	$0.9^{+0.0}_{-0.1}$	$3.5^{+0.4}_{-1.3} \times 10^{56}$	$320^{+120}_{-110}$	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	396
GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$35.7^{+6.5}_{-4.7}$	$0.36^{+0.21}_{-0.25}$	$80.3^{+14.6}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	$4.8^{+1.7}_{-1.7}$	$4.2^{+0.9}_{-1.5} \times 10^{56}$	$2750^{+1350}_{-1320}$	$0.48^{+0.19}_{-0.20}$	1033
GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$25.0^{+2.1}_{-1.6}$	$0.07^{+0.16}_{-0.16}$	$56.4^{+5.2}_{-3.7}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$3.5^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	$990^{+320}_{-380}$	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	340
GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$24.2^{+1.4}_{-1.1}$	$0.07^{+0.12}_{-0.11}$	$53.4^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$3.7^{+0.4}_{-0.5} \times 10^{56}$	$580^{+160}_{-210}$	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87
GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$1.186^{+0.001}_{-0.001}$	$0.00^{+0.02}_{-0.01}$	$\leq 2.8$	$\leq 0.89$	$\geq 0.04$	$\geq 0.1 \times 10^{56}$	$40^{+10}_{-10}$	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$26.7^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.09^{+0.18}_{-0.21}$	$59.8^{+4.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$3.4^{+0.5}_{-0.7} \times 10^{56}$	$1020^{+430}_{-360}$	$0.20^{+0.07}_{-0.07}$	39
GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$29.3^{+4.2}_{-3.2}$	$0.08^{+0.20}_{-0.22}$	$65.6^{+9.4}_{-6.6}$	$0.71^{+0.08}_{-0.10}$	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	$3.6^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	$1850^{+840}_{-840}$	$0.34^{+0.13}_{-0.14}$	1651

Εικόνα 24 ο κατάλογος GWTC-1 (Abbott, et al, & The LIGO and VIRGO Scientific Collaboration, GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs, 2018)

Event	$M$ ( $M_{\odot}$ )	$M$ ( $M_{\odot}$ )	$m_1$ ( $M_{\odot}$ )	$m_2$ ( $M_{\odot}$ )	$\chi_{\text{eff}}$	$D_L$ (Gpc)	$z$	$M_f$ ( $M_{\odot}$ )	$\chi_f$	$\Delta\Omega$ (deg $^2$ )	SNR
GW190108_181802	43.0 $^{+4.2}_{-3.0}$	18.3 $^{+1.9}_{-1.2}$	24.6 $^{+5.1}_{-3.4}$	18.4 $^{+3.3}_{-3.6}$	-0.03 $^{+0.14}_{-0.19}$	1.55 $^{+0.40}_{-0.60}$	0.29 $^{+0.06}_{-0.10}$	41.1 $^{+3.9}_{-2.8}$	0.67 $^{+0.06}_{-0.07}$	150	15.3 $^{+0.2}_{-0.3}$
GW190112	38.4 $^{+3.8}_{-3.7}$	13.3 $^{+0.4}_{-0.3}$	30.1 $^{+4.7}_{-8.1}$	8.3 $^{+1.6}_{-0.9}$	0.25 $^{+0.08}_{-0.11}$	0.74 $^{+0.14}_{-0.17}$	0.15 $^{+0.03}_{-0.03}$	37.3 $^{+3.9}_{-3.8}$	0.67 $^{+0.05}_{-0.06}$	21	18.9 $^{+0.2}_{-0.3}$
GW190113_052954	58.6 $^{+13.3}_{-9.7}$	24.6 $^{+5.5}_{-4.1}$	34.7 $^{+12.6}_{-8.1}$	23.7 $^{+7.3}_{-6.7}$	-0.01 $^{+0.29}_{-0.34}$	3.55 $^{+2.27}_{-1.66}$	0.59 $^{+0.29}_{-0.24}$	56.0 $^{+12.5}_{-9.2}$	0.68 $^{+0.12}_{-0.13}$	1500	8.9 $^{+0.4}_{-0.7}$
GW190113_134308	78.8 $^{+17.4}_{-11.9}$	33.0 $^{+8.2}_{-5.4}$	47.5 $^{+13.5}_{-10.7}$	31.8 $^{+11.7}_{-10.8}$	-0.03 $^{+0.25}_{-0.29}$	4.45 $^{+2.48}_{-2.12}$	0.71 $^{+0.31}_{-0.30}$	75.5 $^{+16.4}_{-11.4}$	0.68 $^{+0.10}_{-0.12}$	730	10.0 $^{+0.4}_{-0.5}$
GW190121_213856	72.9 $^{+13.4}_{-9.2}$	31.2 $^{+5.9}_{-4.2}$	41.3 $^{+10.4}_{-6.9}$	31.9 $^{+8.0}_{-8.8}$	-0.06 $^{+0.22}_{-0.27}$	2.88 $^{+1.37}_{-1.38}$	0.49 $^{+0.19}_{-0.21}$	69.7 $^{+12.5}_{-8.7}$	0.67 $^{+0.10}_{-0.11}$	1200	10.7 $^{+0.2}_{-0.4}$
GW190124_180648	72.6 $^{+13.3}_{-10.7}$	31.0 $^{+5.8}_{-4.6}$	40.5 $^{+11.1}_{-7.3}$	31.8 $^{+7.6}_{-7.6}$	0.13 $^{+0.22}_{-0.22}$	2.20 $^{+1.58}_{-1.16}$	0.39 $^{+0.23}_{-0.19}$	68.9 $^{+12.4}_{-10.1}$	0.74 $^{+0.09}_{-0.09}$	28000	10.4 $^{+0.2}_{-0.4}$
GW190125	3.4 $^{+0.3}_{-0.1}$	1.44 $^{+0.02}_{-0.02}$	2.0 $^{+0.6}_{-0.3}$	1.4 $^{+0.3}_{-0.3}$	0.06 $^{+0.11}_{-0.05}$	0.16 $^{+0.07}_{-0.07}$	0.03 $^{+0.01}_{-0.02}$	-	-	10000	12.4 $^{+0.3}_{-0.4}$
GW190126_152155	7.2 $^{+3.5}_{-1.5}$	2.41 $^{+0.08}_{-0.08}$	5.7 $^{+3.9}_{-2.3}$	1.5 $^{+0.8}_{-0.5}$	-0.03 $^{+0.32}_{-0.30}$	0.37 $^{+0.18}_{-0.16}$	0.08 $^{+0.04}_{-0.03}$	-	-	1300	8.7 $^{+0.5}_{-0.6}$
GW190503_185404	71.7 $^{+9.4}_{-8.3}$	30.2 $^{+4.2}_{-4.2}$	43.3 $^{+9.2}_{-8.1}$	28.4 $^{+7.7}_{-8.0}$	-0.03 $^{+0.20}_{-0.26}$	1.45 $^{+0.69}_{-0.63}$	0.27 $^{+0.11}_{-0.11}$	68.6 $^{+8.8}_{-7.7}$	0.66 $^{+0.09}_{-0.12}$	94	12.4 $^{+0.2}_{-0.3}$
GW190512_180714	35.9 $^{+3.8}_{-3.5}$	14.6 $^{+1.3}_{-1.0}$	23.3 $^{+5.3}_{-5.8}$	12.6 $^{+3.6}_{-2.5}$	0.03 $^{+0.12}_{-0.13}$	1.43 $^{+0.55}_{-0.55}$	0.27 $^{+0.09}_{-0.10}$	34.5 $^{+3.5}_{-3.5}$	0.65 $^{+0.07}_{-0.07}$	220	12.2 $^{+0.2}_{-0.4}$
GW190513_205428	53.9 $^{+8.6}_{-5.9}$	21.6 $^{+3.8}_{-3.8}$	35.7 $^{+9.5}_{-9.2}$	18.0 $^{+7.7}_{-7.1}$	0.11 $^{+0.28}_{-0.17}$	2.06 $^{+0.88}_{-0.80}$	0.37 $^{+0.13}_{-0.13}$	51.6 $^{+8.2}_{-5.8}$	0.68 $^{+0.14}_{-0.12}$	520	12.9 $^{+0.3}_{-0.4}$
GW190514_065416	67.2 $^{+18.7}_{-10.8}$	28.5 $^{+7.9}_{-4.8}$	39.0 $^{+14.7}_{-8.2}$	28.4 $^{+9.3}_{-8.8}$	-0.19 $^{+0.29}_{-0.32}$	4.13 $^{+2.65}_{-2.17}$	0.67 $^{+0.33}_{-0.31}$	64.5 $^{+17.9}_{-10.4}$	0.63 $^{+0.11}_{-0.15}$	3000	8.2 $^{+0.3}_{-0.6}$
GW190517_055101	63.5 $^{+9.6}_{-9.6}$	26.6 $^{+4.0}_{-4.0}$	37.4 $^{+11.7}_{-7.6}$	25.3 $^{+7.0}_{-7.3}$	0.52 $^{+0.19}_{-0.19}$	1.86 $^{+1.62}_{-0.84}$	0.34 $^{+0.24}_{-0.14}$	59.3 $^{+9.1}_{-8.9}$	0.87 $^{+0.05}_{-0.07}$	470	10.7 $^{+0.4}_{-0.6}$
GW190519_153544	106.6 $^{+13.5}_{-14.8}$	44.5 $^{+6.4}_{-7.1}$	66.0 $^{+10.7}_{-12.0}$	40.5 $^{+11.0}_{-11.1}$	0.31 $^{+0.20}_{-0.22}$	2.53 $^{+1.83}_{-0.92}$	0.44 $^{+0.25}_{-0.14}$	101.0 $^{+12.4}_{-13.8}$	0.79 $^{+0.07}_{-0.13}$	860	15.6 $^{+0.2}_{-0.3}$
GW190521	163.9 $^{+39.2}_{-23.8}$	69.2 $^{+17.0}_{-10.6}$	95.3 $^{+28.7}_{-18.9}$	69.0 $^{+22.7}_{-23.1}$	0.03 $^{+0.32}_{-0.39}$	3.92 $^{+2.19}_{-1.95}$	0.64 $^{+0.28}_{-0.28}$	156.3 $^{+36.8}_{-22.4}$	0.71 $^{+0.12}_{-0.16}$	1000	14.2 $^{+0.3}_{-0.3}$
GW190521_074359	74.7 $^{+7.0}_{-4.8}$	32.1 $^{+3.2}_{-2.5}$	42.2 $^{+5.9}_{-4.8}$	32.8 $^{+5.4}_{-6.4}$	0.09 $^{+0.10}_{-0.13}$	1.24 $^{+0.40}_{-0.57}$	0.24 $^{+0.07}_{-0.10}$	71.0 $^{+6.5}_{-4.4}$	0.72 $^{+0.05}_{-0.07}$	550	25.8 $^{+0.1}_{-0.2}$
GW190527_092055	59.1 $^{+21.3}_{-9.8}$	24.3 $^{+9.1}_{-4.2}$	36.5 $^{+16.4}_{-9.0}$	22.6 $^{+10.5}_{-8.1}$	0.11 $^{+0.28}_{-0.28}$	2.49 $^{+2.48}_{-1.24}$	0.44 $^{+0.34}_{-0.20}$	56.4 $^{+20.2}_{-9.3}$	0.71 $^{+0.12}_{-0.16}$	3700	8.1 $^{+0.3}_{-0.9}$
GW190602_175927	116.3 $^{+19.0}_{-15.6}$	49.1 $^{+9.1}_{-8.5}$	69.1 $^{+15.7}_{-13.0}$	47.8 $^{+14.3}_{-17.4}$	0.07 $^{+0.25}_{-0.24}$	2.69 $^{+1.79}_{-1.12}$	0.47 $^{+0.25}_{-0.17}$	110.9 $^{+17.7}_{-14.9}$	0.70 $^{+0.10}_{-0.14}$	690	12.8 $^{+0.2}_{-0.3}$
GW190620_030421	92.1 $^{+18.5}_{-13.1}$	38.3 $^{+8.3}_{-6.5}$	57.1 $^{+16.0}_{-12.7}$	35.5 $^{+12.2}_{-12.3}$	0.33 $^{+0.22}_{-0.25}$	2.81 $^{+1.68}_{-1.31}$	0.49 $^{+0.23}_{-0.20}$	87.2 $^{+16.8}_{-12.1}$	0.79 $^{+0.08}_{-0.15}$	7200	12.1 $^{+0.3}_{-0.4}$
GW190630_185205	59.1 $^{+4.6}_{-4.8}$	24.9 $^{+2.1}_{-2.1}$	35.1 $^{+6.9}_{-5.6}$	23.7 $^{+5.2}_{-5.1}$	0.10 $^{+0.12}_{-0.13}$	0.89 $^{+0.56}_{-0.37}$	0.18 $^{+0.10}_{-0.07}$	56.4 $^{+4.4}_{-4.6}$	0.70 $^{+0.05}_{-0.07}$	1200	15.6 $^{+0.2}_{-0.3}$
GW190701_203306	94.3 $^{+12.1}_{-9.5}$	40.3 $^{+5.4}_{-4.9}$	53.9 $^{+11.8}_{-8.0}$	40.8 $^{+8.7}_{-12.0}$	-0.07 $^{+0.23}_{-0.29}$	2.06 $^{+0.76}_{-0.73}$	0.37 $^{+0.11}_{-0.12}$	90.2 $^{+11.3}_{-8.9}$	0.66 $^{+0.09}_{-0.13}$	46	11.3 $^{+0.2}_{-0.3}$
GW190706_222641	104.1 $^{+20.2}_{-13.5}$	42.7 $^{+10.0}_{-7.0}$	67.0 $^{+14.6}_{-16.2}$	38.2 $^{+14.6}_{-13.3}$	0.28 $^{+0.26}_{-0.29}$	4.42 $^{+2.59}_{-1.93}$	0.71 $^{+0.32}_{-0.27}$	99.0 $^{+18.3}_{-13.5}$	0.78 $^{+0.09}_{-0.18}$	650	12.6 $^{+0.2}_{-0.4}$
GW190707_093326	20.1 $^{+1.9}_{-1.3}$	8.5 $^{+0.6}_{-0.5}$	11.6 $^{+3.3}_{-1.7}$	8.4 $^{+1.4}_{-1.7}$	-0.05 $^{+0.10}_{-0.08}$	0.77 $^{+0.38}_{-0.37}$	0.16 $^{+0.07}_{-0.07}$	19.2 $^{+1.9}_{-1.3}$	0.66 $^{+0.03}_{-0.04}$	1300	13.3 $^{+0.2}_{-0.4}$
GW190708_232457	30.9 $^{+2.5}_{-1.8}$	13.2 $^{+0.9}_{-0.6}$	17.6 $^{+4.7}_{-2.3}$	13.2 $^{+2.0}_{-2.7}$	0.02 $^{+0.10}_{-0.08}$	0.88 $^{+0.33}_{-0.39}$	0.18 $^{+0.06}_{-0.07}$	29.5 $^{+2.5}_{-1.8}$	0.69 $^{+0.04}_{-0.04}$	14000	13.1 $^{+0.2}_{-0.3}$
GW190719_215514	57.8 $^{+18.3}_{-10.7}$	23.5 $^{+6.5}_{-4.0}$	36.5 $^{+18.0}_{-10.3}$	20.8 $^{+9.0}_{-7.2}$	0.32 $^{+0.29}_{-0.31}$	3.94 $^{+2.59}_{-2.00}$	0.64 $^{+0.33}_{-0.29}$	54.9 $^{+17.3}_{-10.2}$	0.78 $^{+0.11}_{-0.17}$	2900	8.3 $^{+0.3}_{-0.8}$
GW190720_000836	21.5 $^{+4.3}_{-2.3}$	8.9 $^{+0.5}_{-0.8}$	13.4 $^{+6.7}_{-3.0}$	7.8 $^{+2.3}_{-2.2}$	0.18 $^{+0.14}_{-0.12}$	0.79 $^{+0.69}_{-0.32}$	0.16 $^{+0.12}_{-0.06}$	20.4 $^{+4.5}_{-2.2}$	0.72 $^{+0.06}_{-0.05}$	460	11.0 $^{+0.3}_{-0.7}$
GW190727_060333	67.1 $^{+11.7}_{-8.0}$	28.6 $^{+5.3}_{-3.7}$	38.0 $^{+9.5}_{-6.2}$	29.4 $^{+7.1}_{-8.4}$	0.11 $^{+0.26}_{-0.25}$	3.30 $^{+1.54}_{-1.50}$	0.55 $^{+0.21}_{-0.20}$	63.8 $^{+10.9}_{-7.5}$	0.73 $^{+0.10}_{-0.10}$	830	11.9 $^{+0.3}_{-0.5}$
GW190728_064510	20.6 $^{+4.5}_{-1.3}$	8.6 $^{+0.5}_{-0.3}$	12.3 $^{+7.2}_{-2.2}$	8.1 $^{+1.7}_{-2.6}$	0.12 $^{+0.20}_{-0.07}$	0.87 $^{+0.26}_{-0.37}$	0.18 $^{+0.05}_{-0.07}$	19.6 $^{+4.7}_{-1.3}$	0.71 $^{+0.04}_{-0.04}$	400	13.0 $^{+0.2}_{-0.4}$
GW190731_140936	70.1 $^{+15.8}_{-11.3}$	29.5 $^{+7.1}_{-5.2}$	41.5 $^{+12.2}_{-9.0}$	28.8 $^{+9.7}_{-9.5}$	0.06 $^{+0.24}_{-0.24}$	3.30 $^{+2.39}_{-1.72}$	0.55 $^{+0.31}_{-0.26}$	67.0 $^{+14.6}_{-10.8}$	0.70 $^{+0.10}_{-0.13}$	3400	8.7 $^{+0.2}_{-0.2}$
GW190803_022701	64.5 $^{+12.6}_{-9.0}$	27.3 $^{+5.7}_{-4.1}$	37.3 $^{+10.6}_{-7.0}$	27.3 $^{+7.8}_{-8.2}$	-0.03 $^{+0.24}_{-0.27}$	3.27 $^{+1.95}_{-1.58}$	0.55 $^{+0.26}_{-0.24}$	61.7 $^{+11.8}_{-8.5}$	0.68 $^{+0.10}_{-0.11}$	1500	8.6 $^{+0.3}_{-0.5}$
GW190814	25.8 $^{+1.0}_{-0.9}$	6.09 $^{+0.06}_{-0.06}$	23.2 $^{+1.1}_{-1.0}$	2.59 $^{+0.08}_{-0.09}$	0.00 $^{+0.06}_{-0.06}$	0.24 $^{+0.04}_{-0.05}$	0.05 $^{+0.009}_{-0.010}$	25.6 $^{+1.1}_{-0.9}$	0.28 $^{+0.02}_{-0.02}$	19	24.9 $^{+0.1}_{-0.2}$
GW190828_063405	58.0 $^{+7.7}_{-4.8}$	25.0 $^{+3.1}_{-2.4}$	32.1 $^{+5.8}_{-4.0}$	26.2 $^{+4.6}_{-4.8}$	0.19 $^{+0.15}_{-0.16}$	2.13 $^{+0.66}_{-0.93}$	0.38 $^{+0.10}_{-0.15}$	54.9 $^{+7.2}_{-4.3}$	0.75 $^{+0.06}_{-0.07}$	520	16.2 $^{+0.2}_{-0.3}$
GW190828_065509	34.4 $^{+5.4}_{-4.4}$	13.3 $^{+1.2}_{-1.0}$	24.1 $^{+7.0}_{-7.2}$	10.2 $^{+3.6}_{-2.1}$	0.08 $^{+0.16}_{-0.16}$	1.60 $^{+0.62}_{-0.60}$	0.30 $^{+0.10}_{-0.10}$	33.1 $^{+5.5}_{-4.5}$	0.65 $^{+0.08}_{-0.08}$	660	10.0 $^{+0.3}_{-0.5}$
GW190909_114149	75.0 $^{+55.9}_{-17.6}$	30.9 $^{+17.2}_{-7.5}$	45.8 $^{+52.7}_{-13.3}$	28.3 $^{+13.4}_{-12.7}$	-0.06 $^{+0.37}_{-0.36}$	3.77 $^{+3.27}_{-2.22}$	0.62 $^{+0.41}_{-0.33}$	72.0 $^{+54.9}_{-16.8}$	0.66 $^{+0.15}_{-0.20}$	4700	8.1 $^{+0.4}_{-0.6}$
GW190910_112807	79.6 $^{+9.3}_{-9.1}$	34.3 $^{+4.1}_{-4.1}$	43.9 $^{+7.6}_{-6.1}$	35.6 $^{+6.3}_{-7.2}$	0.02 $^{+0.18}_{-0.18}$	1.46 $^{+1.03}_{-0.58}$	0.28 $^{+0.16}_{-0.10}$	75.8 $^{+8.5}_{-8.6}$	0.70 $^{+0.08}_{-0.07}$	11000	14.1 $^{+0.2}_{-0.3}$
GW190915_235702	59.9 $^{+7.5}_{-6.4}$	25.3 $^{+3.2}_{-2.7}$	35.3 $^{+9.5}_{-6.4}$	24.4 $^{+5.6}_{-6.1}$	0.02 $^{+0.20}_{-0.25}$	1.62 $^{+0.71}_{-0.61}$	0.30 $^{+0.11}_{-0.10}$	57.2 $^{+7.1}_{-6.0}$	0.70 $^{+0.09}_{-0.11}$	400	13.6 $^{+0.2}_{-0.3}$
GW190924_021846	13.9 $^{+5.1}_{-1.0}$	5.8 $^{+0.2}_{-0.2}$	8.9 $^{+7.0}_{-2.0}$	5.0 $^{+1.4}_{-1.9}$	0.03 $^{+0.30}_{-0.09}$	0.57 $^{+0.22}_{-0.22}$	0.12 $^{+0.04}_{-0.04}$	13.3 $^{+5.2}_{-1.0}$	0.67 $^{+0.05}_{-0.05}$	360	11.5 $^{+0.3}_{-0.4}$
GW190929_012149	104.3 $^{+34.9}_{-25.2}$	35.8 $^{+14.9}_{-8.2}$	80.8 $^{+33.0}_{-33.2}$	24.1 $^{+19.3}_{-10.6}$	0.01 $^{+0.34}_{-0.33}$	2.13 $^{+3.65}_{-1.05}$	0.38 $^{+0.49}_{-0.17}$	101.5 $^{+33.6}_{-25.3}$	0.66 $^{+0.20}_{-0.31}$	2200	10.1 $^{+0.6}_{-0.8}$
GW190930_133541	20.3 $^{+8.9}_{-1.5}$	8.5 $^{+0.5}_{-0.5}$	12.3 $^{+12.4}_{-2.3}$	7.8 $^{+1.7}_{-3.3}$	0.14 $^{+0.31}_{-0.15}$	0.76 $^{+0.36}_{-0.32}$	0.15 $^{+0.06}_{-0.06}$	19.4 $^{+9.2}_{-1.5}$	0.72 $^{+0.07}_{-0.06}$	1700	9.5 $^{+0.3}_{-0.5}$

Εικόνα 25 ο κατάλογος GWTC-2 (Abbott, et al, & LIGO and VIRGO scientific collaboration, GWTC-2: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the First Half of the Third Observing Run, 2020)



Event	$M$ ( $M_{\odot}$ )	$M$ ( $M_{\odot}$ )	$m_1$ ( $M_{\odot}$ )	$m_2$ ( $M_{\odot}$ )	$\chi_{\text{eff}}$	$D_L$ (Gpc)	$z$	$M_t$ ( $M_{\odot}$ )	$\chi_t$	$\Delta\Omega$ ( $\text{deg}^2$ )	SNR
GW191103_012549	$20.0^{+3.7}_{-1.8}$	$8.34^{+0.66}_{-0.57}$	$11.8^{+6.2}_{-2.2}$	$7.9^{+1.7}_{-2.4}$	$0.21^{+0.16}_{-0.10}$	$0.99^{+0.50}_{-0.47}$	$0.20^{+0.09}_{-0.09}$	$19.0^{+3.8}_{-1.7}$	$0.75^{+0.06}_{-0.05}$	2500	$8.9^{+0.3}_{-0.5}$
GW191105_143521	$18.5^{+2.1}_{-1.3}$	$7.82^{+0.61}_{-0.45}$	$10.7^{+3.7}_{-1.6}$	$7.7^{+1.4}_{-1.9}$	$-0.02^{+0.13}_{-0.09}$	$1.15^{+0.43}_{-0.48}$	$0.23^{+0.07}_{-0.09}$	$17.6^{+2.1}_{-1.2}$	$0.67^{+0.04}_{-0.05}$	640	$9.7^{+0.3}_{-0.5}$
GW191109_010717	$112^{+20}_{-16}$	$47.5^{+9.6}_{-7.5}$	$65^{+11}_{-11}$	$47^{+15}_{-13}$	$-0.29^{+0.42}_{-0.31}$	$1.29^{+1.13}_{-0.65}$	$0.25^{+0.18}_{-0.12}$	$107^{+18}_{-15}$	$0.61^{+0.18}_{-0.19}$	1600	$17.3^{+0.5}_{-0.5}$
GW191113_071753	$34.5^{+10.5}_{-9.8}$	$10.7^{+1.1}_{-1.0}$	$29^{+12}_{-14}$	$5.9^{+4.4}_{-1.3}$	$0.00^{+0.37}_{-0.29}$	$1.37^{+1.15}_{-0.62}$	$0.26^{+0.18}_{-0.11}$	$34^{+11}_{-10}$	$0.45^{+0.33}_{-0.11}$	3600	$7.9^{+0.5}_{-1.1}$
GW191126_115259	$20.7^{+3.4}_{-2.0}$	$8.65^{+0.95}_{-0.71}$	$12.1^{+5.5}_{-2.2}$	$8.3^{+1.9}_{-2.4}$	$0.21^{+0.15}_{-0.11}$	$1.62^{+0.74}_{-0.74}$	$0.30^{+0.12}_{-0.13}$	$19.6^{+3.5}_{-2.0}$	$0.75^{+0.06}_{-0.05}$	1400	$8.3^{+0.2}_{-0.5}$
GW191127_050227	$80^{+39}_{-22}$	$29.9^{+11.7}_{-9.1}$	$53^{+47}_{-20}$	$24^{+17}_{-14}$	$0.18^{+0.34}_{-0.36}$	$3.4^{+3.1}_{-1.9}$	$0.57^{+0.40}_{-0.29}$	$76^{+39}_{-21}$	$0.75^{+0.13}_{-0.23}$	980	$9.2^{+0.7}_{-0.6}$
GW191129_134029	$17.5^{+2.4}_{-1.2}$	$7.31^{+0.43}_{-0.28}$	$10.7^{+4.1}_{-2.1}$	$6.7^{+1.5}_{-1.7}$	$0.06^{+0.16}_{-0.08}$	$0.79^{+0.26}_{-0.33}$	$0.16^{+0.05}_{-0.06}$	$16.8^{+2.5}_{-1.2}$	$0.69^{+0.03}_{-0.05}$	850	$13.1^{+0.2}_{-0.3}$
GW191204_110529	$47.2^{+9.2}_{-8.0}$	$19.8^{+3.6}_{-3.3}$	$27.3^{+11.0}_{-6.0}$	$19.3^{+5.6}_{-6.0}$	$0.05^{+0.26}_{-0.27}$	$1.8^{+1.7}_{-1.1}$	$0.34^{+0.25}_{-0.18}$	$45.0^{+8.6}_{-7.6}$	$0.71^{+0.12}_{-0.11}$	3700	$8.8^{+0.4}_{-0.6}$
GW191204_171526	$20.21^{+1.70}_{-0.96}$	$8.55^{+0.38}_{-0.27}$	$11.9^{+3.3}_{-1.8}$	$8.2^{+1.4}_{-1.6}$	$0.16^{+0.08}_{-0.05}$	$0.65^{+0.19}_{-0.25}$	$0.13^{+0.04}_{-0.05}$	$19.21^{+1.79}_{-0.95}$	$0.73^{+0.03}_{-0.03}$	350	$17.5^{+0.2}_{-0.2}$
GW191215_223052	$43.3^{+5.3}_{-4.3}$	$18.4^{+2.2}_{-1.7}$	$24.9^{+7.1}_{-4.1}$	$18.1^{+3.8}_{-4.1}$	$-0.04^{+0.17}_{-0.21}$	$1.93^{+0.89}_{-0.86}$	$0.35^{+0.13}_{-0.14}$	$41.4^{+5.1}_{-4.1}$	$0.68^{+0.07}_{-0.07}$	530	$11.2^{+0.3}_{-0.4}$
GW191216_213338	$19.81^{+2.69}_{-0.94}$	$8.33^{+0.22}_{-0.19}$	$12.1^{+4.6}_{-2.3}$	$7.7^{+1.6}_{-1.9}$	$0.11^{+0.13}_{-0.06}$	$0.34^{+0.12}_{-0.13}$	$0.07^{+0.02}_{-0.03}$	$18.87^{+2.80}_{-0.94}$	$0.70^{+0.03}_{-0.04}$	490	$18.6^{+0.2}_{-0.2}$
GW191219_163120	$32.3^{+2.2}_{-1.1}$	$4.32^{+0.12}_{-0.17}$	$31.1^{+2.2}_{-2.8}$	$1.17^{+0.07}_{-0.06}$	$0.00^{+0.07}_{-0.09}$	$0.55^{+0.25}_{-0.16}$	$0.11^{+0.05}_{-0.03}$	$32.2^{+2.2}_{-2.7}$	$0.14^{+0.06}_{-0.06}$	1500	$9.1^{+0.5}_{-0.8}$
GW191222_033537	$79^{+16}_{-12}$	$33.8^{+7.1}_{-5.0}$	$45.1^{+10.9}_{-8.0}$	$34.7^{+9.3}_{-10.5}$	$-0.04^{+0.20}_{-0.25}$	$3.0^{+1.7}_{-1.7}$	$0.51^{+0.23}_{-0.26}$	$75.5^{+15.3}_{-9.9}$	$0.67^{+0.08}_{-0.11}$	2000	$12.5^{+0.2}_{-0.3}$
GW191230_180458	$86^{+19}_{-12}$	$36.5^{+8.2}_{-5.6}$	$49.4^{+14.0}_{-9.6}$	$37^{+11}_{-12}$	$-0.05^{+0.26}_{-0.31}$	$4.3^{+2.1}_{-1.9}$	$0.69^{+0.26}_{-0.27}$	$82^{+17}_{-11}$	$0.68^{+0.11}_{-0.13}$	1100	$10.4^{+0.3}_{-0.4}$
GW200105_162426	$11.0^{+1.5}_{-1.4}$	$3.42^{+0.08}_{-0.08}$	$9.0^{+1.7}_{-1.7}$	$1.91^{+0.33}_{-0.24}$	$0.00^{+0.13}_{-0.18}$	$0.27^{+0.12}_{-0.11}$	$0.06^{+0.02}_{-0.02}$	$10.7^{+1.5}_{-1.4}$	$0.43^{+0.05}_{-0.02}$	7900	$13.7^{+0.4}_{-0.4}$
GW200112_155838	$63.9^{+5.7}_{-4.6}$	$27.4^{+2.6}_{-2.1}$	$35.6^{+6.7}_{-4.5}$	$28.3^{+4.4}_{-5.9}$	$0.06^{+0.15}_{-0.15}$	$1.25^{+0.43}_{-0.46}$	$0.24^{+0.07}_{-0.08}$	$60.8^{+5.3}_{-4.3}$	$0.71^{+0.06}_{-0.06}$	4300	$19.8^{+0.1}_{-0.2}$
GW200115_042309	$7.4^{+1.8}_{-1.7}$	$2.43^{+0.05}_{-0.07}$	$5.9^{+2.0}_{-2.5}$	$1.44^{+0.85}_{-0.29}$	$-0.15^{+0.24}_{-0.42}$	$0.29^{+0.15}_{-0.10}$	$0.06^{+0.03}_{-0.02}$	$7.2^{+1.8}_{-1.7}$	$0.42^{+0.09}_{-0.05}$	370	$11.3^{+0.3}_{-0.5}$
GW200128_022011	$75^{+17}_{-12}$	$32.0^{+7.5}_{-5.5}$	$42.2^{+11.6}_{-8.1}$	$32.6^{+9.5}_{-9.2}$	$0.12^{+0.24}_{-0.25}$	$3.4^{+2.1}_{-1.8}$	$0.56^{+0.28}_{-0.28}$	$71^{+16}_{-11}$	$0.74^{+0.10}_{-0.10}$	2600	$10.6^{+0.3}_{-0.4}$
GW200129_065458	$63.4^{+4.3}_{-3.6}$	$27.2^{+2.1}_{-2.3}$	$34.5^{+9.9}_{-3.2}$	$28.9^{+3.4}_{-9.3}$	$0.11^{+0.11}_{-0.16}$	$0.90^{+0.29}_{-0.38}$	$0.18^{+0.05}_{-0.07}$	$60.3^{+4.0}_{-3.3}$	$0.73^{+0.06}_{-0.05}$	130	$26.8^{+0.2}_{-0.2}$
GW200202_154313	$17.58^{+1.78}_{-0.67}$	$7.49^{+0.24}_{-0.20}$	$10.1^{+3.5}_{-1.4}$	$7.3^{+1.1}_{-1.1}$	$0.04^{+0.13}_{-0.06}$	$0.41^{+0.15}_{-0.16}$	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	$16.76^{+1.87}_{-0.66}$	$0.69^{+0.03}_{-0.04}$	170	$10.8^{+0.2}_{-0.4}$
GW200208_130117	$65.4^{+7.8}_{-6.8}$	$27.7^{+3.6}_{-3.1}$	$37.8^{+9.2}_{-6.2}$	$27.4^{+6.1}_{-7.4}$	$-0.07^{+0.22}_{-0.27}$	$2.23^{+1.00}_{-0.85}$	$0.40^{+0.15}_{-0.14}$	$62.5^{+7.3}_{-6.4}$	$0.66^{+0.09}_{-0.13}$	30	$10.8^{+0.3}_{-0.4}$
GW200208_222617	$63^{+100}_{-25}$	$19.6^{+10.7}_{-5.1}$	$51^{+104}_{-30}$	$12.3^{+9.0}_{-5.7}$	$0.45^{+0.43}_{-0.44}$	$4.1^{+4.4}_{-1.9}$	$0.66^{+0.54}_{-0.28}$	$61^{+100}_{-25}$	$0.83^{+0.14}_{-0.17}$	2000	$7.4^{+1.4}_{-1.2}$
GW200209_085452	$62.6^{+13.9}_{-9.4}$	$26.7^{+6.0}_{-4.2}$	$35.6^{+10.5}_{-6.8}$	$27.1^{+7.8}_{-7.8}$	$-0.12^{+0.24}_{-0.30}$	$3.4^{+1.9}_{-1.8}$	$0.57^{+0.25}_{-0.26}$	$59.9^{+13.1}_{-8.9}$	$0.66^{+0.10}_{-0.12}$	730	$9.6^{+0.4}_{-0.5}$
GW200210_092254	$27.0^{+7.1}_{-4.3}$	$6.56^{+0.38}_{-0.40}$	$24.1^{+7.5}_{-4.6}$	$2.83^{+0.47}_{-0.42}$	$0.02^{+0.22}_{-0.21}$	$0.94^{+0.43}_{-0.34}$	$0.19^{+0.08}_{-0.06}$	$26.7^{+7.2}_{-4.3}$	$0.34^{+0.13}_{-0.08}$	1800	$8.4^{+0.5}_{-0.7}$
GW200216_220804	$81^{+20}_{-14}$	$32.9^{+9.3}_{-8.5}$	$51^{+22}_{-13}$	$30^{+14}_{-16}$	$0.10^{+0.34}_{-0.36}$	$3.8^{+3.0}_{-2.0}$	$0.63^{+0.37}_{-0.29}$	$78^{+19}_{-13}$	$0.70^{+0.14}_{-0.24}$	2900	$8.1^{+0.4}_{-0.5}$
GW200219_094415	$65.0^{+12.6}_{-8.2}$	$27.6^{+5.6}_{-3.8}$	$37.5^{+10.1}_{-6.9}$	$27.9^{+7.4}_{-8.4}$	$-0.08^{+0.23}_{-0.29}$	$3.4^{+1.7}_{-1.5}$	$0.57^{+0.22}_{-0.22}$	$62.2^{+11.7}_{-7.8}$	$0.66^{+0.10}_{-0.13}$	700	$10.7^{+0.3}_{-0.5}$
GW200220_061928	$148^{+55}_{-33}$	$62^{+23}_{-15}$	$87^{+40}_{-23}$	$61^{+26}_{-25}$	$0.06^{+0.40}_{-0.38}$	$6.0^{+4.8}_{-3.1}$	$0.90^{+0.55}_{-0.40}$	$141^{+51}_{-31}$	$0.71^{+0.15}_{-0.17}$	3000	$7.2^{+0.4}_{-0.7}$
GW200220_124850	$67^{+17}_{-12}$	$28.2^{+7.3}_{-5.1}$	$38.9^{+14.1}_{-8.6}$	$27.9^{+9.2}_{-9.0}$	$-0.07^{+0.27}_{-0.33}$	$4.0^{+2.8}_{-2.2}$	$0.66^{+0.36}_{-0.31}$	$64^{+16}_{-11}$	$0.67^{+0.11}_{-0.14}$	3200	$8.5^{+0.3}_{-0.5}$
GW200224_222234	$72.2^{+7.2}_{-5.1}$	$31.1^{+3.2}_{-2.6}$	$40.0^{+6.9}_{-4.5}$	$32.5^{+5.0}_{-7.2}$	$0.10^{+0.15}_{-0.15}$	$1.71^{+0.49}_{-0.64}$	$0.32^{+0.08}_{-0.11}$	$68.6^{+4.7}_{-6.6}$	$0.73^{+0.07}_{-0.07}$	50	$20.0^{+0.2}_{-0.2}$
GW200225_060421	$33.5^{+3.6}_{-3.0}$	$14.2^{+1.5}_{-1.4}$	$19.3^{+5.0}_{-3.0}$	$14.0^{+2.8}_{-3.5}$	$-0.12^{+0.17}_{-0.28}$	$1.15^{+0.51}_{-0.53}$	$0.22^{+0.09}_{-0.10}$	$32.1^{+3.5}_{-2.8}$	$0.66^{+0.07}_{-0.13}$	370	$12.5^{+0.3}_{-0.4}$
GW200302_015811	$57.8^{+9.6}_{-6.9}$	$23.4^{+4.7}_{-3.0}$	$37.8^{+8.7}_{-8.5}$	$20.0^{+8.1}_{-5.7}$	$0.01^{+0.25}_{-0.26}$	$1.48^{+1.02}_{-0.70}$	$0.28^{+0.16}_{-0.12}$	$55.5^{+8.9}_{-6.6}$	$0.66^{+0.13}_{-0.15}$	6000	$10.8^{+0.3}_{-0.4}$
GW200306_093714	$43.9^{+11.8}_{-8.5}$	$17.5^{+3.5}_{-2.8}$	$28.3^{+17.1}_{-7.7}$	$14.8^{+6.5}_{-6.4}$	$0.32^{+0.28}_{-0.46}$	$2.1^{+1.7}_{-1.1}$	$0.38^{+0.24}_{-0.18}$	$41.7^{+12.3}_{-6.9}$	$0.78^{+0.11}_{-0.26}$	4600	$7.8^{+0.4}_{-0.6}$
GW200308_173609*	$50.6^{+10.9}_{-8.5}$	$19.0^{+4.8}_{-2.8}$	$36.4^{+11.2}_{-9.6}$	$13.8^{+7.2}_{-3.3}$	$0.65^{+0.17}_{-0.21}$	$5.4^{+2.7}_{-2.6}$	$0.83^{+0.32}_{-0.35}$	$47.4^{+11.1}_{-7.7}$	$0.91^{+0.03}_{-0.08}$	2000	$7.1^{+0.5}_{-0.5}$
GW200311_115853	$61.9^{+5.3}_{-4.2}$	$26.6^{+2.4}_{-2.0}$	$34.2^{+6.4}_{-3.8}$	$27.7^{+4.1}_{-5.9}$	$-0.02^{+0.16}_{-0.20}$	$1.17^{+0.28}_{-0.40}$	$0.23^{+0.05}_{-0.07}$	$59.0^{+4.8}_{-3.9}$	$0.69^{+0.07}_{-0.08}$	35	$17.8^{+0.2}_{-0.2}$
GW200316_215756	$21.2^{+7.2}_{-2.0}$	$8.75^{+0.62}_{-0.55}$	$13.1^{+10.2}_{-2.9}$	$7.8^{+1.9}_{-2.9}$	$0.13^{+0.27}_{-0.10}$	$1.12^{+0.47}_{-0.44}$	$0.22^{+0.08}_{-0.08}$	$20.2^{+7.4}_{-1.9}$	$0.70^{+0.04}_{-0.04}$	190	$10.3^{+0.4}_{-0.7}$
GW200322_091133*	$55^{+37}_{-27}$	$15.5^{+15.7}_{-3.7}$	$34^{+48}_{-18}$	$14.0^{+16.8}_{-8.7}$	$0.24^{+0.45}_{-0.51}$	$3.6^{+7.0}_{-2.0}$	$0.60^{+0.84}_{-0.30}$	$53^{+38}_{-26}$	$0.78^{+0.16}_{-0.17}$	6500	$6.0^{+1.7}_{-1.2}$

Εικόνα 26 ο κατάλογος GWTC-3 (Abbott, et al, & The LIGO, VIRGO and KAGRA Scientific Collaboration, GWTC-3: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the Second Part of the Third Observing Run, 2021)

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

«Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης».