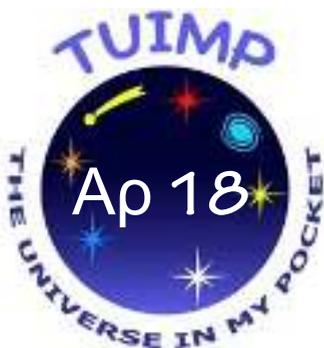


Το Σύμπαν στην τσέπη μου



Βαρυτικά κύματα



Αρ 18

Laura Bernard και
Alexandre Le Tiec
Αστεροσκοπείο Παρισίων

Τι είναι αυτά;

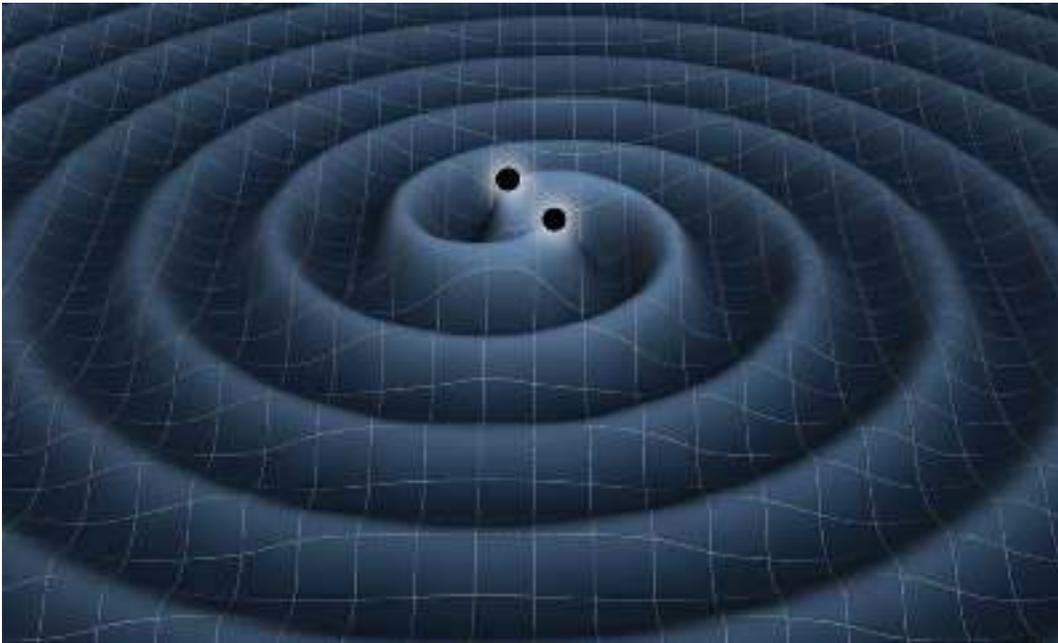
Τα βαρυτικά κύματα είναι **μικρές δονήσεις στη δομή του χωροχρόνου** που διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός. Είναι εγκάρσια κύματα, που σημαίνει ότι η μετατόπιση στο χωροχρόνο είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης.

Είχαν προβλεφθεί από τη **γενική σχετικότητα**, τη θεωρία της βαρύτητας που διατύπωσε ο Άλμπερτ Αϊνστάιν το 1915.

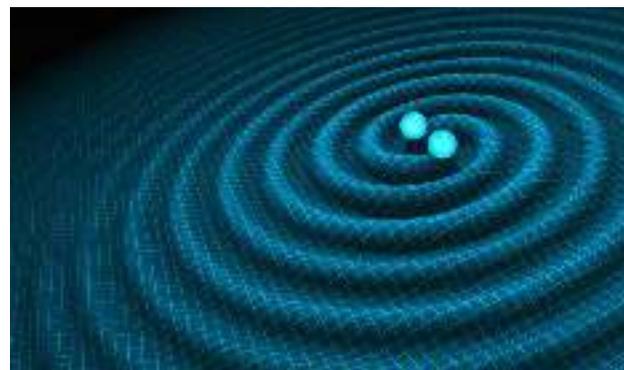
Η πρώτη έμμεση απόδειξη της ύπαρξής τους ήταν η παρατήρηση από τους Hulse και Taylor το 1974 της επίδρασής τους στην τροχιακή περίοδο ενός ζεύγους αστέρων νετρονίων.

Η πρώτη **απευθείας ανίχνευση** ενός βαρυτικού κύματος πραγματοποιήθηκε το 2015 με τη χρήση των ανιχνευτών **LIGO**. Αυτό το βαρυτικό κύμα προήλθε από τη συνένωση δύο μαύρων τρυπών περίπου τριάντα ηλιακών μαζών η καθεμία.

Μια καλλιτεχνική απεικόνιση δύο μαύρων τρυπών που περιφέρονται η μία γύρω από την άλλη υπό την επίδραση της αμοιβαίας βαρυτικής τους έλξης. Η τροχιακή τους κίνηση παράγει βαρυτικά κύματα.

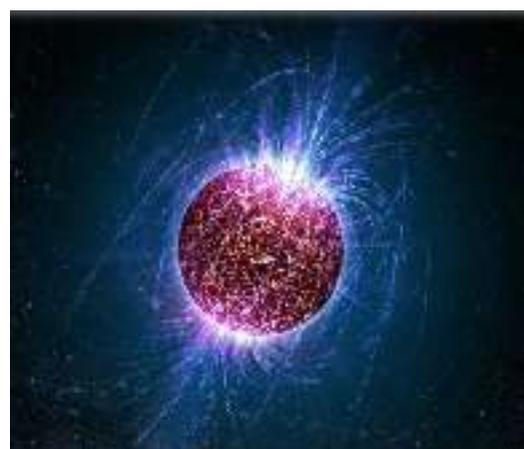


[Πηγή: NASA]



Αναπαράσταση
ενός ζεύγους
αστέρων νετρονίων
[Πηγή: R. Hurt/Caltech-
JPL]

Απεικόνιση ενός
ζεύγους άστρων
λευκών νάνων
από καλλιτέχνη
[Πηγή: ESO]



Καλλιτεχνική άποψη
ενός απομονωμένου
αστέρα νετρονίων [Πηγή:
NASA].



Καλλιτεχνική άποψη
ενός υπερκαινοφανούς
τύπου Ia [Πηγή: ESO].

4

Τοπικές πηγές

Οι κύριες πηγές των βαρυτικών κυμάτων είναι μεγάλης μάζας συμπαγείς αστέρες (βλέπε TUIMP No 9), όπως οι μαύρες τρύπες, οι αστέρες νετρονίων και οι λευκοί νάνοι, είτε μεμονωμένοι είτε σε ζεύγη. Μπορούν να διακριθούν οι ακόλουθες τοπικές πηγές:

- **Ζεύγη συμπαγών αντικειμένων**, όπως συγχωνευόμενες μαύρες τρύπες ή αστέρες νετρονίων (εντός ή εκτός του Γαλαξία μας)
- **Διπλά αστέρια λευκών νάνων** στο Γαλαξία μας,
- **Απομονωμένοι**, ελαφρώς ασύμμετροι, περιστρεφόμενοι **αστέρες νετρονίων** στη γαλαξιακή γειτονιά,
- **Εκρήξεις αστέρων μεγάλης μάζας** (σουπερνόβα) στο γαλαξία μας, που οδηγούν στο σχηματισμό αστέρων νετρονίων ή μαύρων τρυπών.

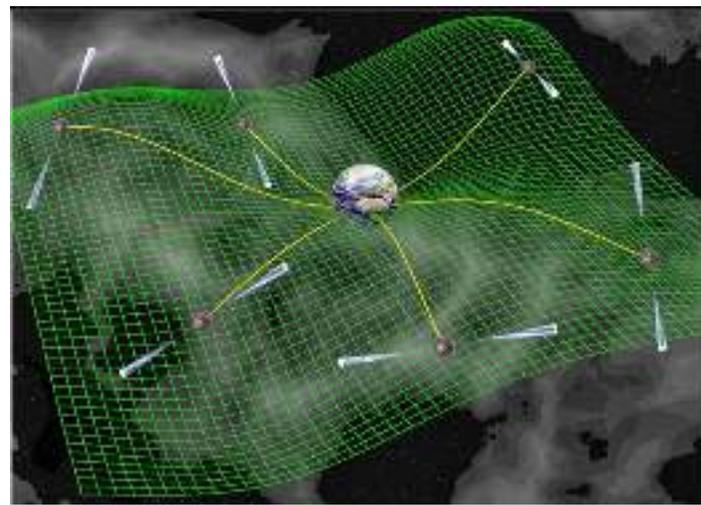
5

Διάχυτες πηγές

Όταν τα βαρυτικά κύματα που παράγονται από έναν πολύ μεγάλο αριθμό τοπικών πηγών συνδυάζονται, δεν μπορούν πλέον να διακριθούν μεταξύ τους. Το αποτέλεσμα είναι ένα **στοχαστικό αστροφυσικό υπόβαθρο**.

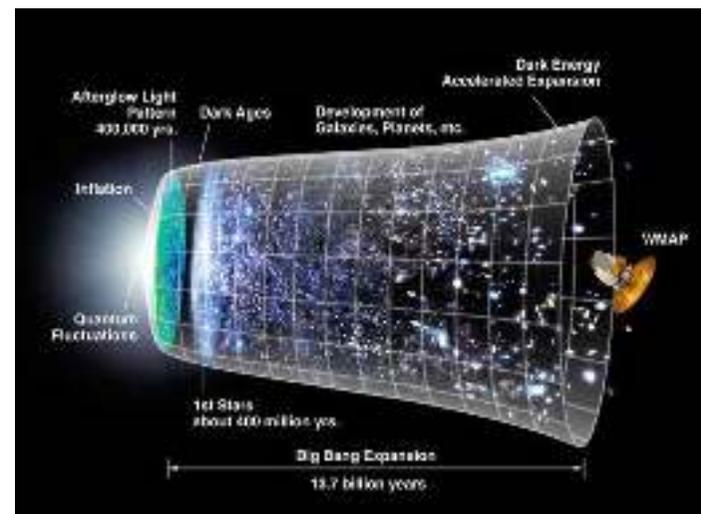
Επιπλέον, διάφορα αβέβαια φυσικά φαινόμενα που δημιουργήθηκαν λίγο μετά τη Μεγάλη Έκρηξη (βλέπε TUIMP n°12) θα μπορούσαν να δημιουργήσουν ένα **κοσμολογικό στοχαστικό υπόβαθρο**. Αυτά περιλαμβάνουν :

- **κοσμικές χορδές**, που προκύπτουν από μια ξαφνική αλλαγή της κατάστασης της ενέργειας και του υλικού περιεχομένου του αρχέγονου Σύμπαντος,
- **αρχέγονες μαύρες τρύπες**, οι οποίες πιστεύεται ότι σχηματίστηκαν ως αποτέλεσμα μεγάλων διακυμάνσεων στην ενεργειακή πυκνότητα του πρώιμου Σύμπαντος,
- **πληθωρισμός**, μια περίοδος ταχείας κοσμικής διαστολής που έλαβε χώρα ένα κλάσμα του δευτερολέπτου μετά τη Μεγάλη Έκρηξη.



[Πηγή: D. J. Champion]

Απεικόνιση μιας συστοιχίας πάλσαρ. Κάθε οπτική επαφή με ένα πάλσαρ λειτουργεί ως ένας βραχίονας του συμβολόμετρου στον οποίο μετράται η διέλευση ενός βαρυτικού κύματος.



[Πηγή: NASA]

Αναπαράσταση της διαστολής του Σύμπαντος από την περίοδο του πληθωρισμού μέχρι σήμερα.

Ανιχνευτές ρεύματος

Οι υπάρχοντες ανιχνευτές βαρυτικών κυμάτων βασίζονται στην αρχή της **οπτικής συμβολομετρίας**: μετρούν μικροσκοπικές μεταβολές του μήκους με την υπέρθεση του φωτός λέιζερ στον εαυτό του.

Αποτελούνται από δύο κάθετους βραχίονες, μήκους περίπου ενός χιλιομέτρου ο καθένας, μέσω των οποίων ταξιδεύει το φως. Όταν ένα βαρυτικό κύμα περνάει από μέσα τους, η διαφορά μήκους μεταξύ των δύο βραχιόνων μεταβάλλεται ελαφρώς. Η διακύμανση αυτή είναι της τάξης του ενός χιλιοστού του μεγέθους ενός ατομικού πυρήνα, ή 0,00000000000000000001 μέτρα.

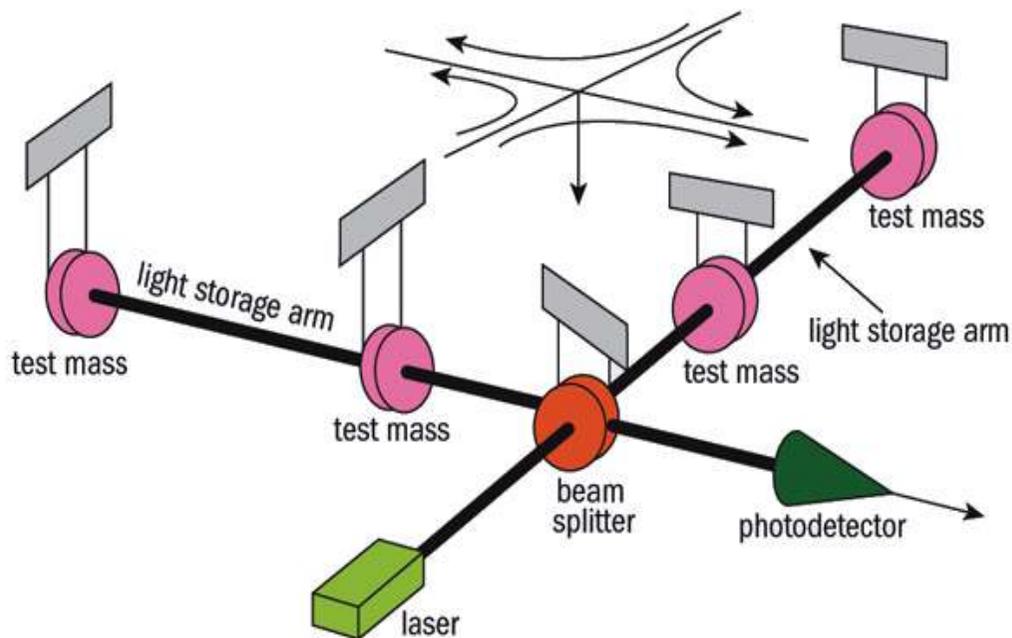
Τέσσερις ανιχνευτές βρίσκονται σε λειτουργία:

- τα δύο όργανα **LIGO** στις Ηνωμένες Πολιτείες (στο Λίβινγκστον και στο Χάνφορντ),
- το γαλλοϊταλικό παρατηρητήριο **Virgo**, κοντά στην Πίζα της Ιταλίας,
- ο ανιχνευτής **KAGRA** στην Ιαπωνία.

Ο ανιχνευτής Virgo στην Cascina, κοντά στην Πίζα (Ιταλία).



Ο ανιχνευτής LIGO στο Λίβινγκστον (Λουιζιάνα, ΗΠΑ).



Διάγραμμα λειτουργίας ενός ανιχνευτή βαρυτικών κυμάτων.

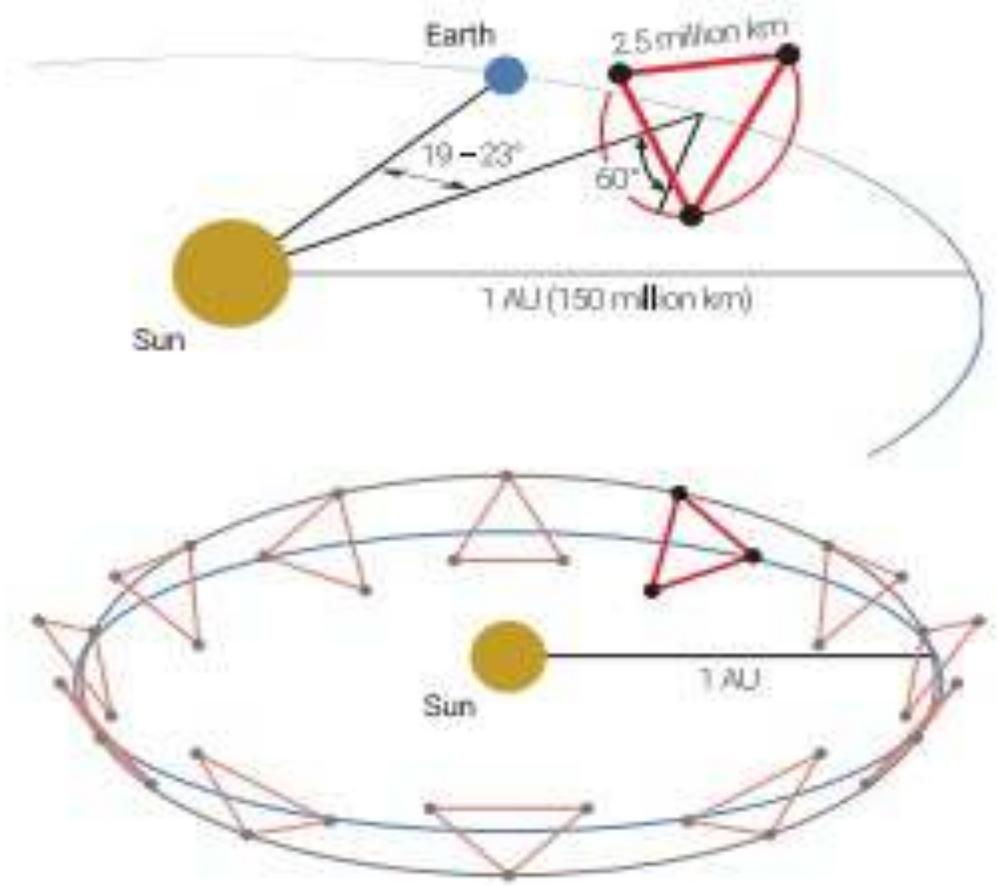


Εικόνα του μελλοντικού ευρωπαϊκού τηλεσκοπίου, του ανιχνευτή Αϊνστάιν.

Μελλοντικοί ανιχνευτές βαρυτικών κυμάτων

Για το μέλλον η Ευρωπαϊκή Ένωση σχεδιάζει να κατασκευάσει το **Τηλεσκόπιο Αϊνστάιν**, ένα νέο παρατηρητήριο βαρυτικών κυμάτων. Θα έχει τριγωνική διαμόρφωση, μεγαλύτερη απομόνωση κραδασμών επειδή θα τοποθετηθεί υπόγεια και τεχνολογία κρυογονικής ψύξης για τα κάτοπτρα.

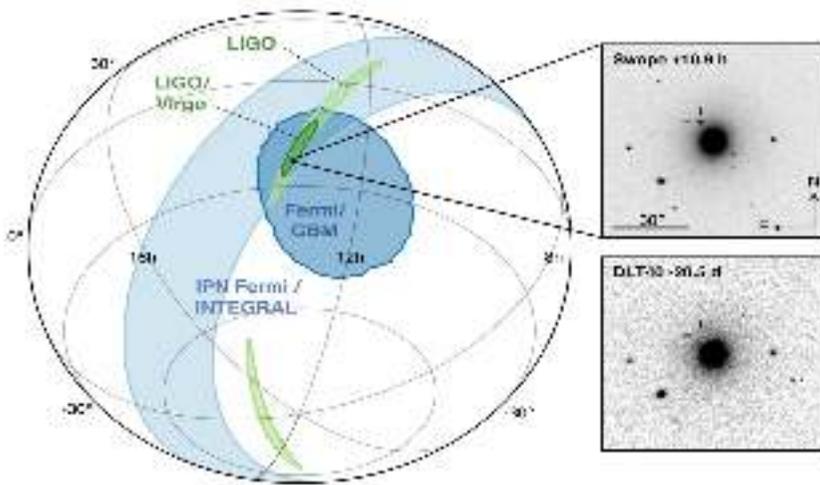
Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος αναπτύσσει το **LISA**, έναν διαστημικό ανιχνευτή βαρυτικών κυμάτων, για να εξαλείψει τις επίγειες διαταραχές, όπως ο σεισμικός θόρυβος. Θα αποτελείται από τρεις δορυφόρους σε απόσταση πολλών εκατομμυρίων χιλιομέτρων μεταξύ τους, γεγονός που θα του επιτρέψει να παρατηρεί ιδιαίτερα ογκώδεις πηγές, συμπληρωματικά με εκείνες που παρατηρούνται από τη Γη.



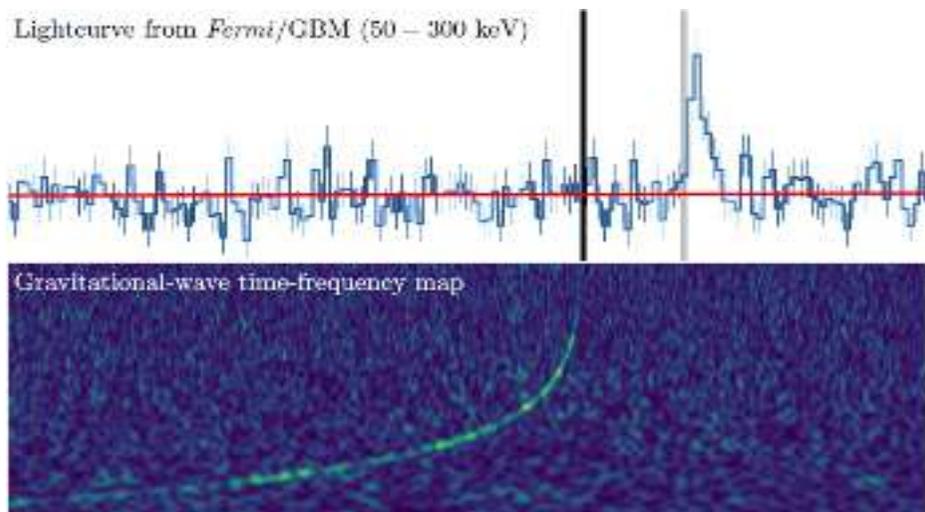
Ο μελλοντικός διαστημικός ανιχνευτής LISA. Οι τρεις δορυφόροι σε τριγωνική διάταξη ακολουθούν την τροχιά της Γης.

Τον Αύγουστο του 2017 παρατηρήθηκε για πρώτη φορά η συγχώνευση δύο αστέρων νετρονίων. Σχεδόν ταυτόχρονα, το **LIGO** και το **Virgo** μέτρησαν το σήμα βαρυτικών κυμάτων που εκπέμφθηκε καθώς τα δύο συμπαγή σώματα περιστρέφονταν όλο και πιο γρήγορα και ο δορυφόρος **FERMI** ανίχνευσε την έκρηξη ακτίνων γάμμα (βλ. TUIMP No 9) που προέκυψε από τη συγχώνευσή τους. Τις ημέρες που ακολούθησαν, πολυάριθμα τηλεσκόπια παρατήρησαν τα διάφορα ηλεκτρομαγνητικά σήματα (ορατά, υπέρυθρα, ραδιοφωνικά κ.λπ.) από αυτό το γεγονός.

Αυτή η ιστορική παρατήρηση εγκαινίασε αυτό που είναι γνωστό ως αστρονομία **πολλαπλών μηνυμάτων**, με την ανίχνευση όχι μόνο ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αλλά και βαρυτικών κυμάτων και σωματιδίων υψηλής ενέργειας. Οδήγησε σε μια σειρά από ανακαλύψεις, επιβεβαιώνοντας τη διάδοση των βαρυτικών κυμάτων με την ταχύτητα του φωτός, τη σχέση μεταξύ των σύντομων εκρήξεων ακτίνων γάμμα και της συνένωσης των αστέρων νετρονίων και τον μηχανισμό της σύνθεσης του χρυσού.



Το σήμα ακτίνων γάμμα που παρατηρήθηκε από το FERMI και η θέση της πηγής που προβλέπεται από το LIGO-Virgo (με πράσινο χρώμα) [Συντελεστές: LIGO-Virgo, FERMI].



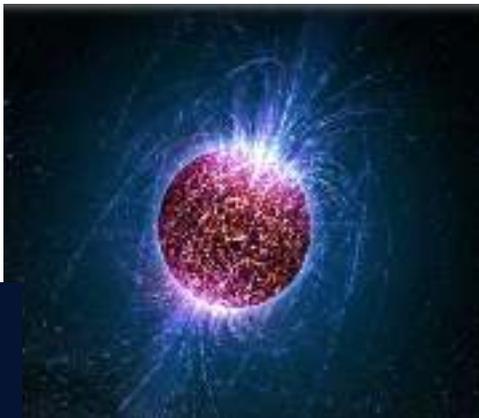
Σήματα από τη συγχώνευση δύο αστέρων νετρονίων: πάνω, ακτίνες γάμμα- κάτω, αύξηση της συχνότητας του βαρυτικού κύματος.

[Συντελεστές: LIGO-Virgo, FERMI]



Quiz

Ποια από αυτά τα αντικείμενα δεν εκπέμπουν βαρυτικά κύματα;



Απαντήσεις στο σπισθόφυλλο

Το πλανητικό νεφέλωμα IC 418

Πίστωση: HST

Απάντηση

Καλλιτεχνική αποτύπωση ενός σουπερνόβα

Όλα αυτά τα αντικείμενα είναι (ή υπήρξαν) πηγές βαρυτικών κυμάτων, με εξαίρεση το πλανητικό νεφέλωμα.

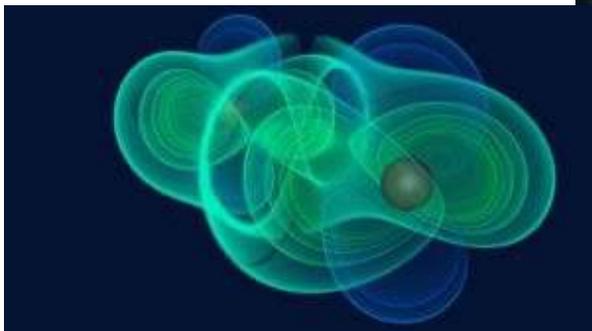
Το νεφέλωμα του Κάβουρα, ένα απομεινάρι υπερκαινοφανούς αστέρα.

Πίστωση: HST

Καλλιτεχνική άποψη ενός αστέρα νετρονίων

Αναπαράσταση ενός δυαδικού συστήματος μελανών οπών

MPI για τη Βαρυτική Φυσική / Ινστιτούτο Θεωρητικής Φυσικής, Φρανκφούρτη / Ινστιτούτο Zuse



Το Σύμπαν στην τσέπη μου Αρ 18

Αυτό το μίνι-βιβλίο γράφτηκε από τους Laura Bernard και Alexandre Le Tiec από το Αστεροσκοπείο του Παρισιού (Γαλλία).

Nr 1

Εικόνα εξωφύλλου: Αριθμητική προσομοίωση ενός ζεύγους μαύρων οπών και οπτικοποίηση των βαρυτικών κυμάτων που δημιουργούνται κατά τη συγχώνευσή τους [πηγή: Michael Koppitz/Albert Einstein Institute].



Για να μάθετε περισσότερα για τη συλλογή αυτή και τα θέματα που παρουσιάζονται σε αυτό το μίνι βιβλίο, επισκεφθείτε τη διεύθυνση <http://www.tuimp.org>.

Μετάφραση: Τζίνα Πανοπούλου
TUIMP Creative Commons

