

# Εξερευνώντας το Σύμπαν με τα Κύματα της Βαρύτητας

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΥΛΑΣ

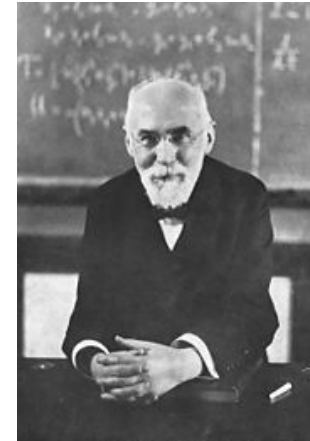
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ  
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



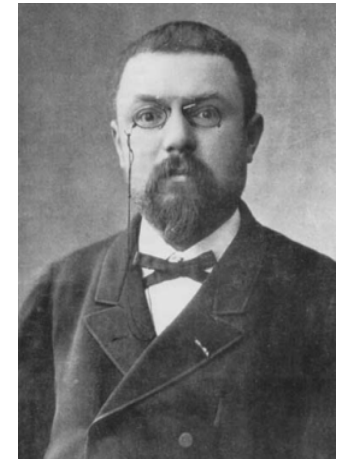
Νάουσα, 28/11/2015

# Πως διαδίδεται η βαρυτική έλξη;

1900: ο Lorentz προτείνει ότι η δύναμη της βαρύτητας δε μεταδίδεται ακαριαία (όπως προβλέπει η Νευτώνεια θεωρία) αλλά με την ταχύτητα του φωτός.

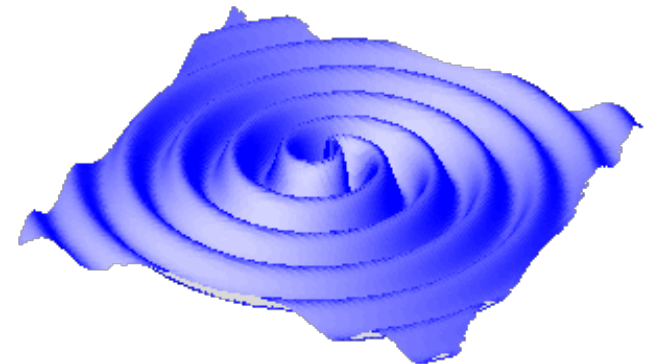


1905: ο Poincaré προτείνει την ύπαρξη βαρυτικών κυμάτων.



Έπρεπε να βρεθεί μια νέα θεωρία για τη βαρύτητα, η οποία να περιγράφεται από κυματικές εξισώσεις της μορφής

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \nabla^2 \Phi = 4\pi G\rho$$



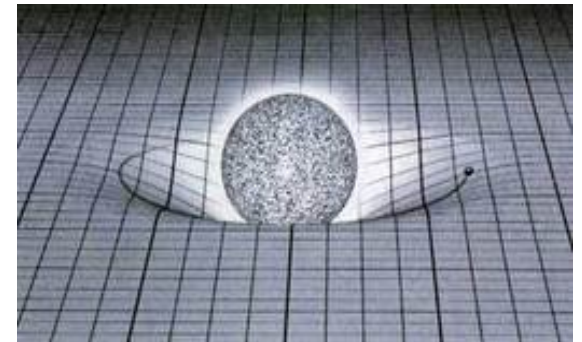
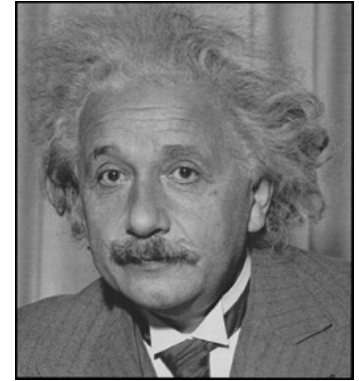
# Γενική Θεωρία Σχετικότητας (ΓΘΣ)

1915: Ο Einstein περιγράφει τη βαρύτητα ως μια *καμπύλωση* του 4-διάστατου *χωροχρόνου*.

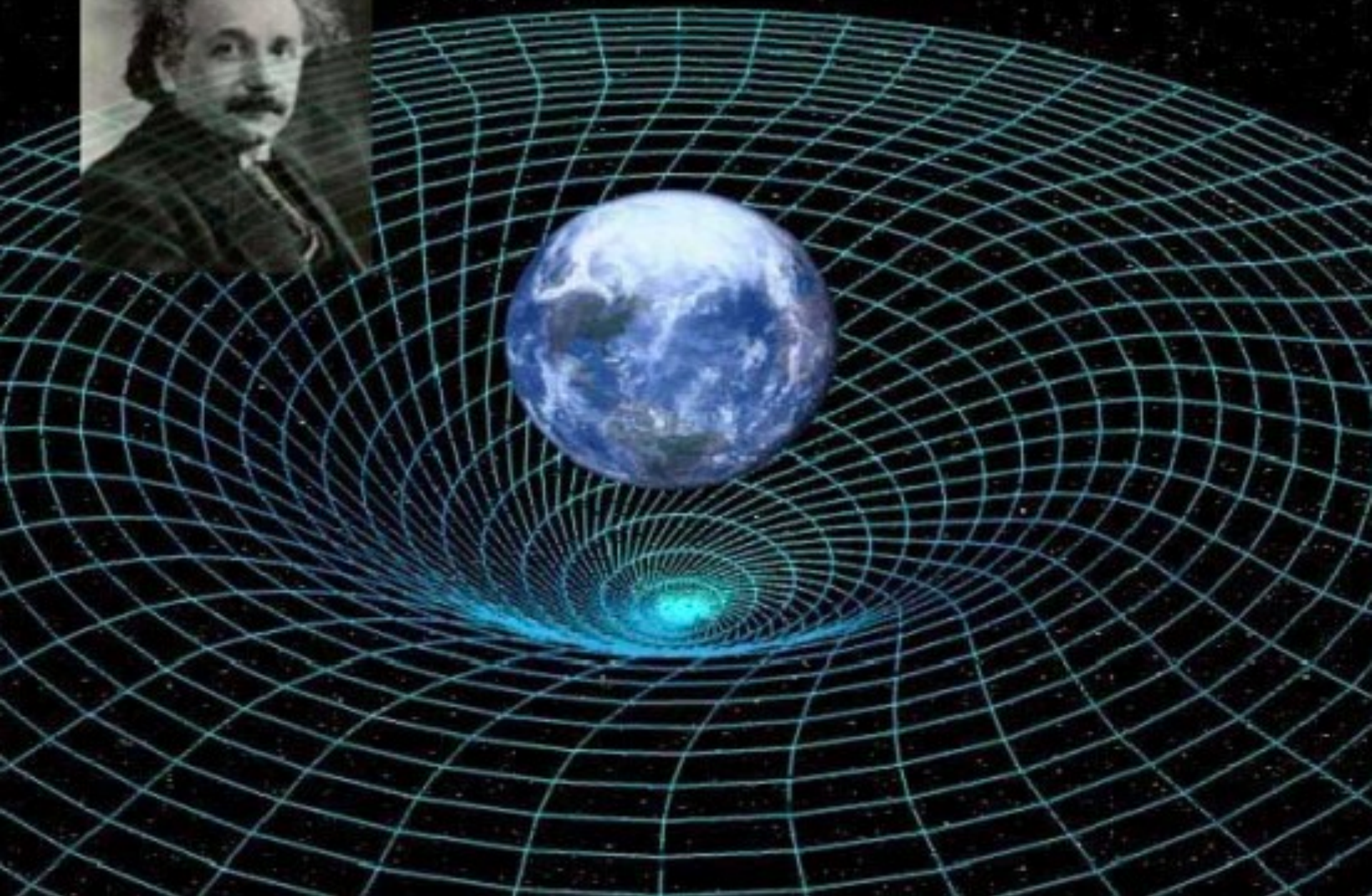
Οι φυσικές αποστάσεις μετρώνται με τη βοήθεια ενός *μετρικού τανυστή*.

$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

Οι εξισώσεις του Einstein πράγματι περιγράφουν τη διάδοση της βαρύτητας ως κύμα, με *ταχύτητα ίση με αυτή του φωτός στο κενό*.

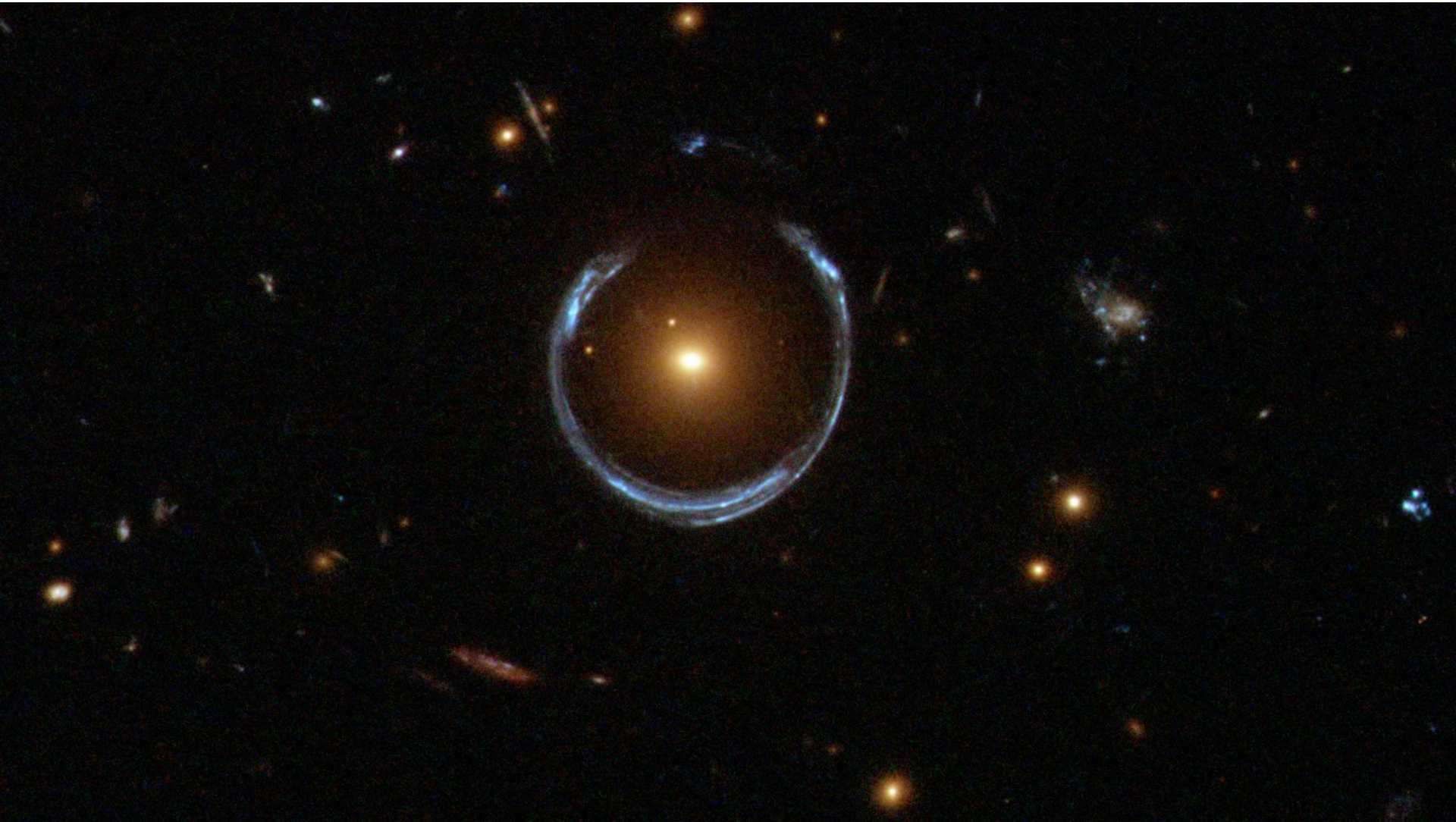








# "Δαχτυλίδι του Einstein" LRG 3-757



# Διαφορές Βαρυτικών/Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

Τα βαρυτικά κύματα έχουν αρκετές διαφορές σε σχέση με τα ηλεκτρομαγνητικά. Οι κυριότερες ιδιότητες είναι:

## Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα

Τουλάχιστον διπολικά

Δημιουργούνται από +/- φορτία

Ισχυρή αλληλεπίδραση με την ύλη

Γραμμική/κυκλική πόλωση

Μπορεί να έχουν μήκος κύματος μικρότερο από τις διαστάσεις της πηγής

## Βαρυτικά Κύματα

Τουλάχιστον τετραπολικά

Δημιουργούνται από + μάζες

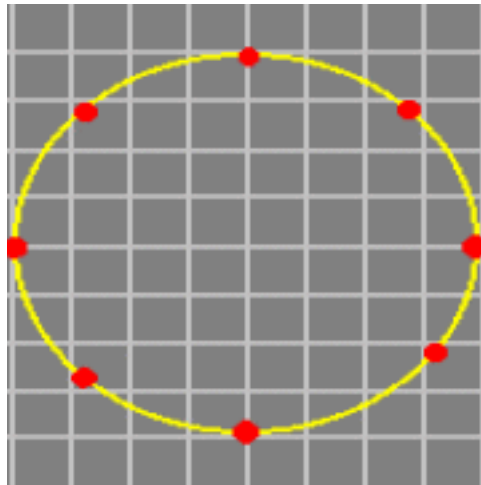
Ασθενής αλληλεπίδραση με την ύλη

Πόλωση + / x

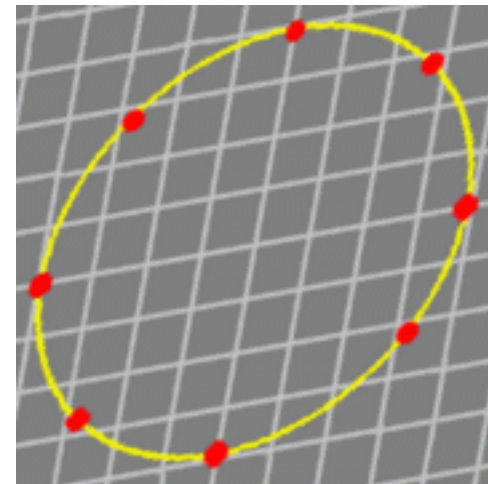
Έχουν μήκος κύματος πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις της πηγής

# Πόλωση των Βαρυτικών Κυμάτων

Τα βαρυτικά κύματα είναι *εγκάρσια* και έχουν δύο ειδών *πολώσεις*:



Πόλωση +

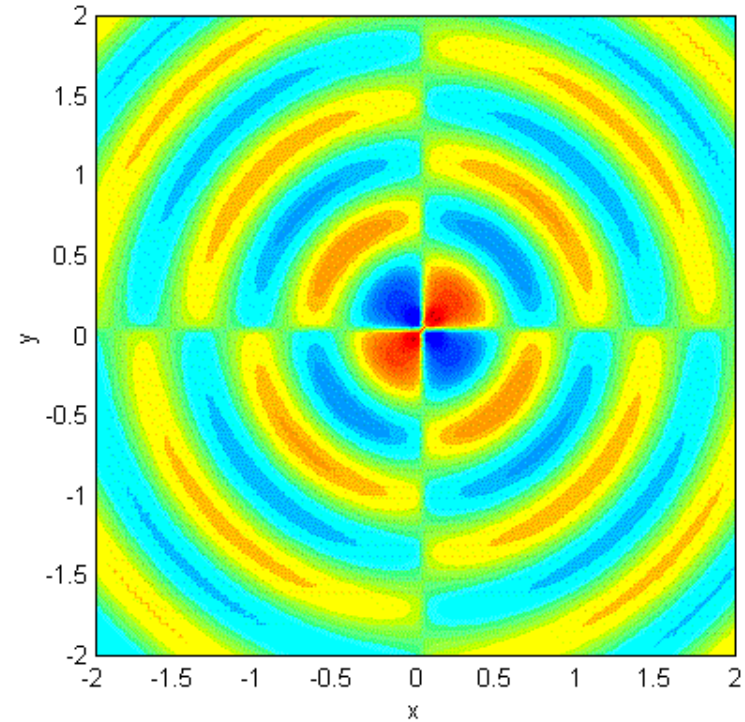
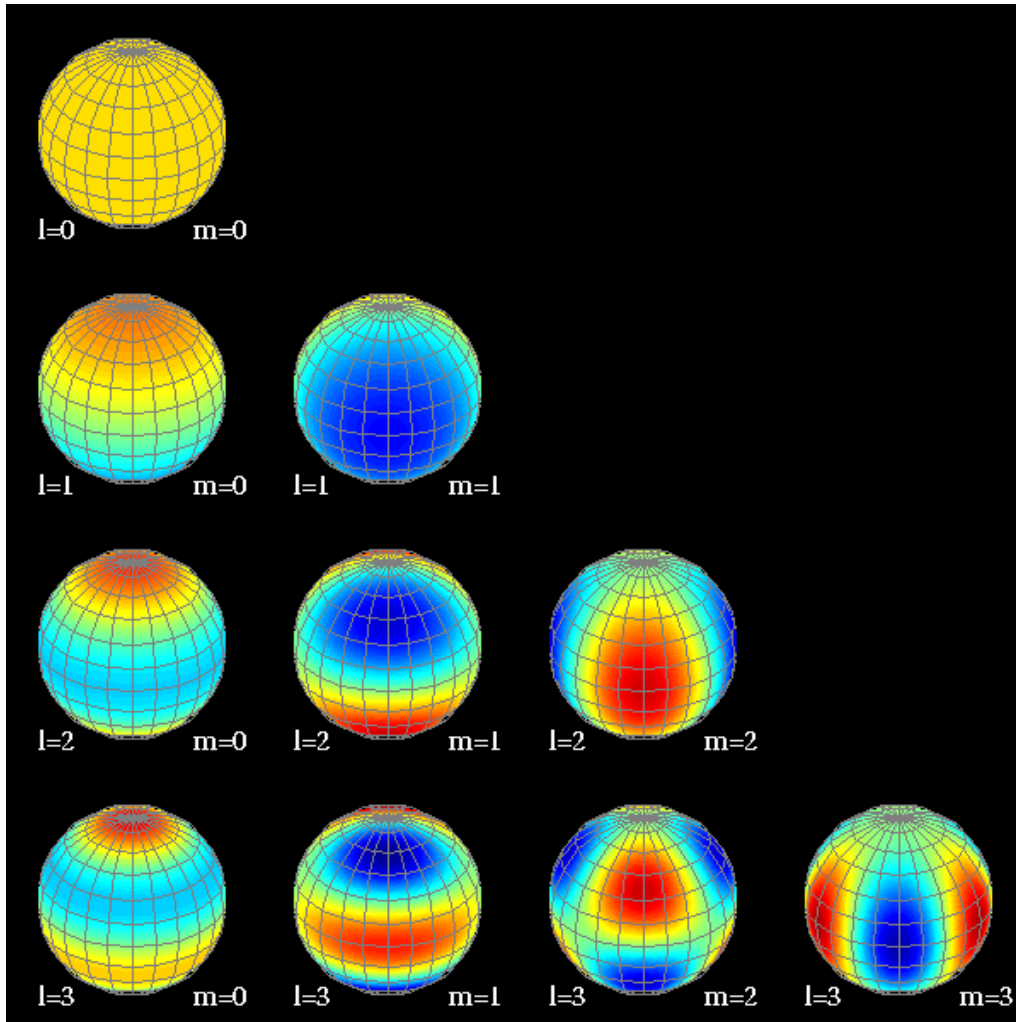


Πόλωση X

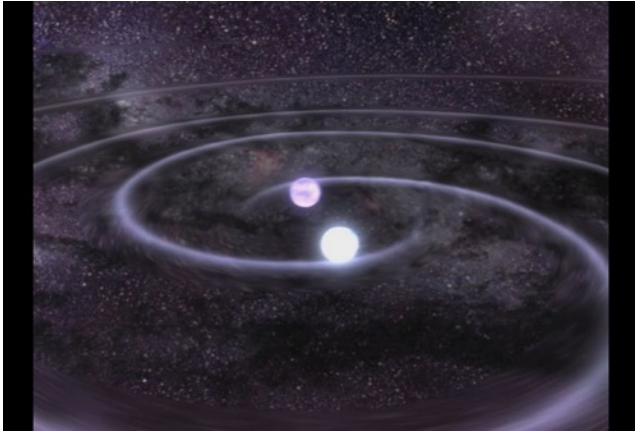


# Παραγωγή Βαρυτικών Κυμάτων

Βαρυτικά κύματα παράγονται από ημι-περιοδικές παραμορφώσεις (με τουλάχιστον τετραπολική παραμόρφωση). Παραδείγματα:



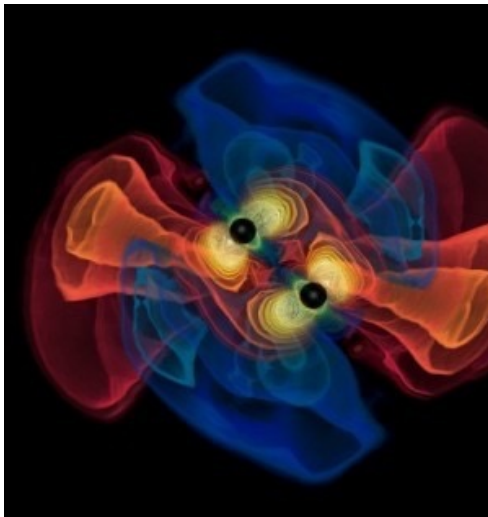
# Κύριες Πηγές Βαρυτικών Κυμάτων



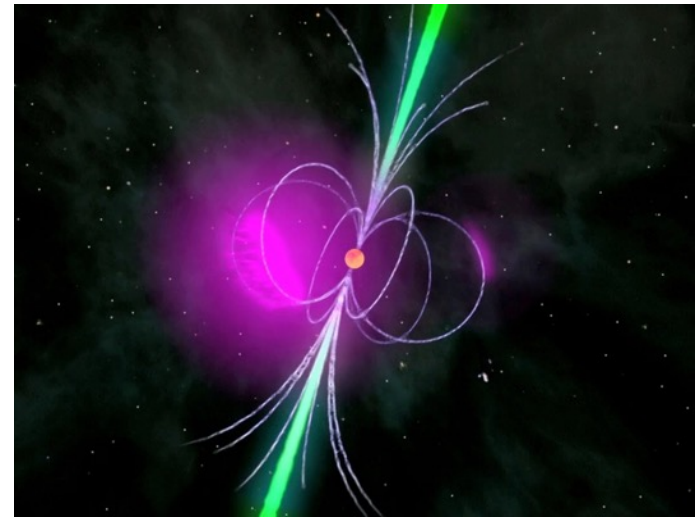
Συγχώνευση Αστέρων Νετρονίων



Κατάρρευση Αστέρων



Συγχώνευση Μελανών Οπών



Περιστρεφόμενοι Αστέρες Νετρονίων

# Πλάτος και Συχνότητα Βαρυτικών Κυμάτων

Εάν υποθέσουμε περιοδική μεταβολή, με κάποια **συχνότητα**  $\Omega$ , βρίσκουμε το **πλάτος**  $h$  των βαρυτικών κυμάτων:

$$h \sim \frac{f^2 \rho \epsilon}{r}$$

όπου:  $r$  η απόσταση της πηγής  
 $f$  η συχνότητα  
 $\rho$  η πυκνότητα  
 $\epsilon$  η παραμόρφωση

**Συχνότητα**  $f$

**Αστρικές πηγές:** 1 έως 1000 Hz

**Γαλαξιακές πηγές:**  $10^{-8}$  έως 0.01 Hz

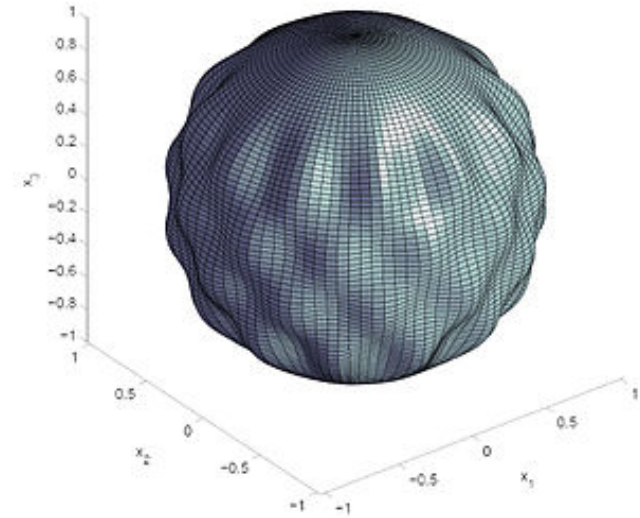


# Παράδειγμα: Ταλάντωση ενός Αστέρων Νετρονίων

Ακτίνα:  $R=10$  km

Συχνότητα:  $f = 2000$  Hz

Απόσταση:  $r = 70$  εκατομμύρια έτη φωτός



*Ροή ενέργειας βαρυτικών κυμάτων στη Γη:*

$$0.6 \text{ W / m}^2$$

*Ροή ενέργειας H/M κυμάτων της Σελήνης στη Γη:*

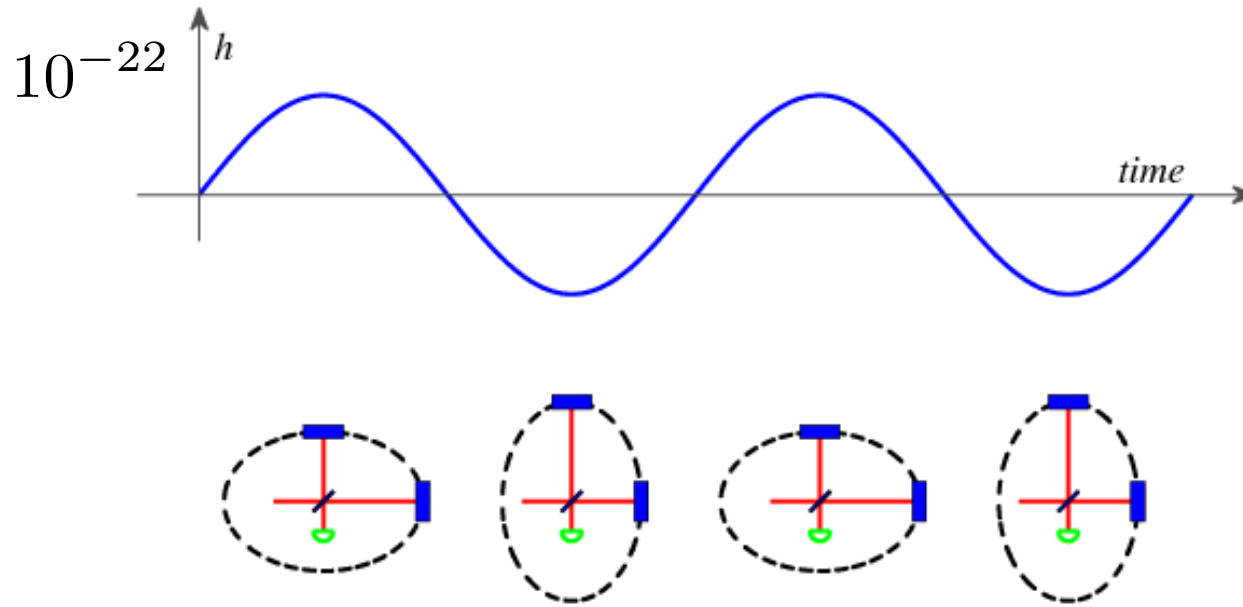
$$0.0015 \text{ W / m}^2$$



*ροή B/K = 400 x ροή H/M Σελήνης !!*

# Σχετική Μεταβολή Μήκους

Λόγω της πολύ ασθενούς αλληλεπίδρασης των βαρυτικών κυμάτων με την ύλη, η σχετική μεταβολή μήκους είναι μόλις  $10^{-22}$  !!



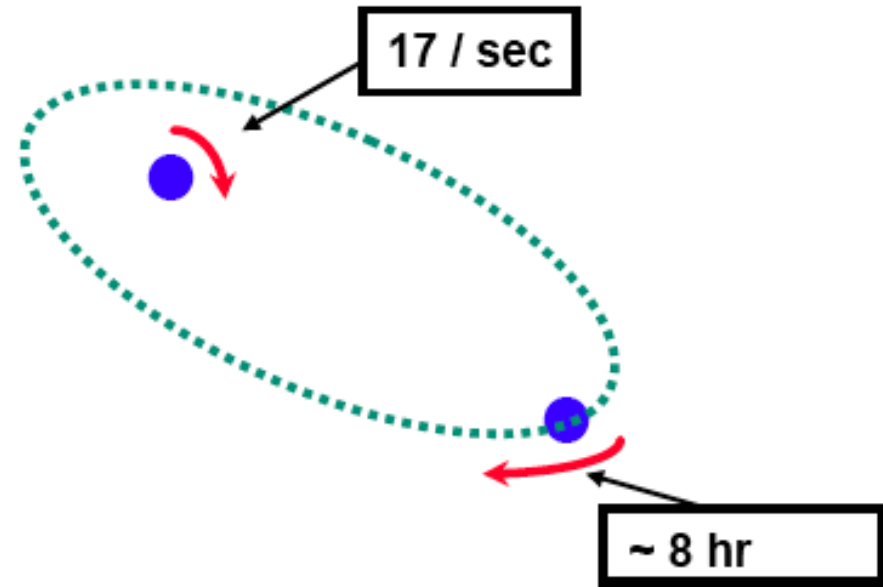
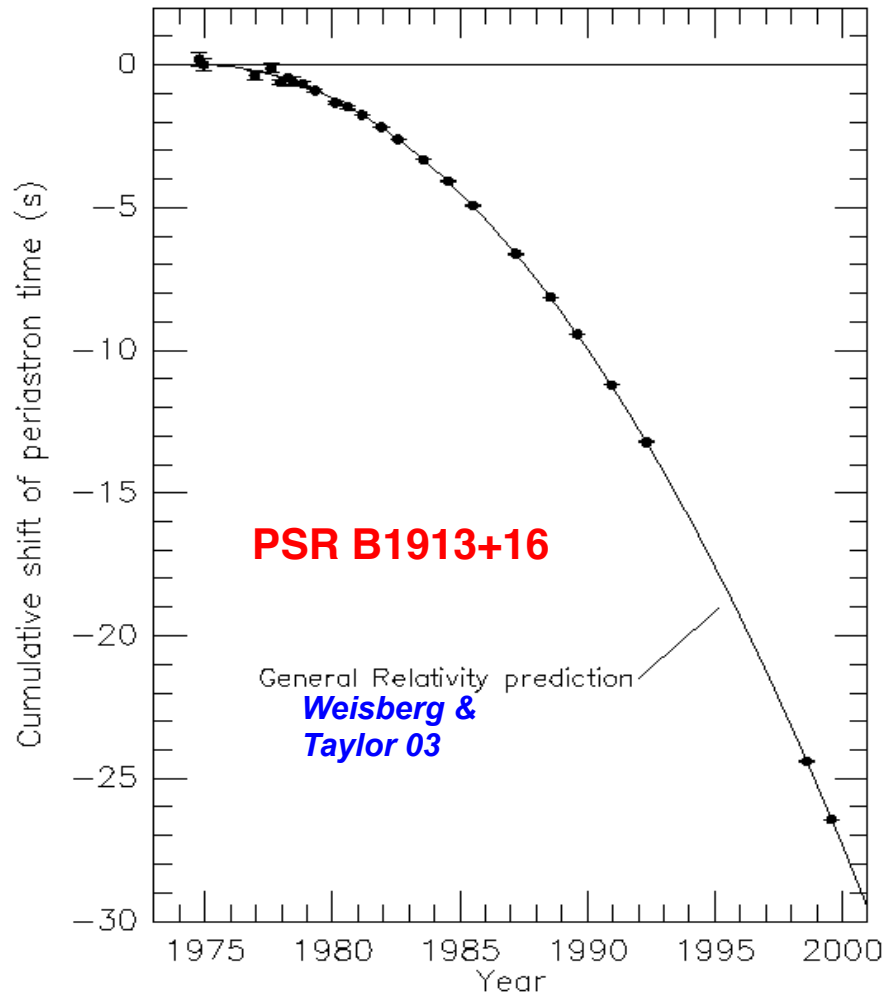
Σε έναν ανιχνευτή μήκους 4 km, αυτό αντιστοιχεί σε:

λιγότερο από το 1% της ακτίνας ενός πρωτονίου (!)

# Διπλά Συστήματα Αστέρων Νετρονίων

Βραβείο Νόμπελ 1993 στους Hulse & Taylor

Η πρώτη έμμεση επιβεβαίωση της ύπαρξης των βαρυτικών κυμάτων!



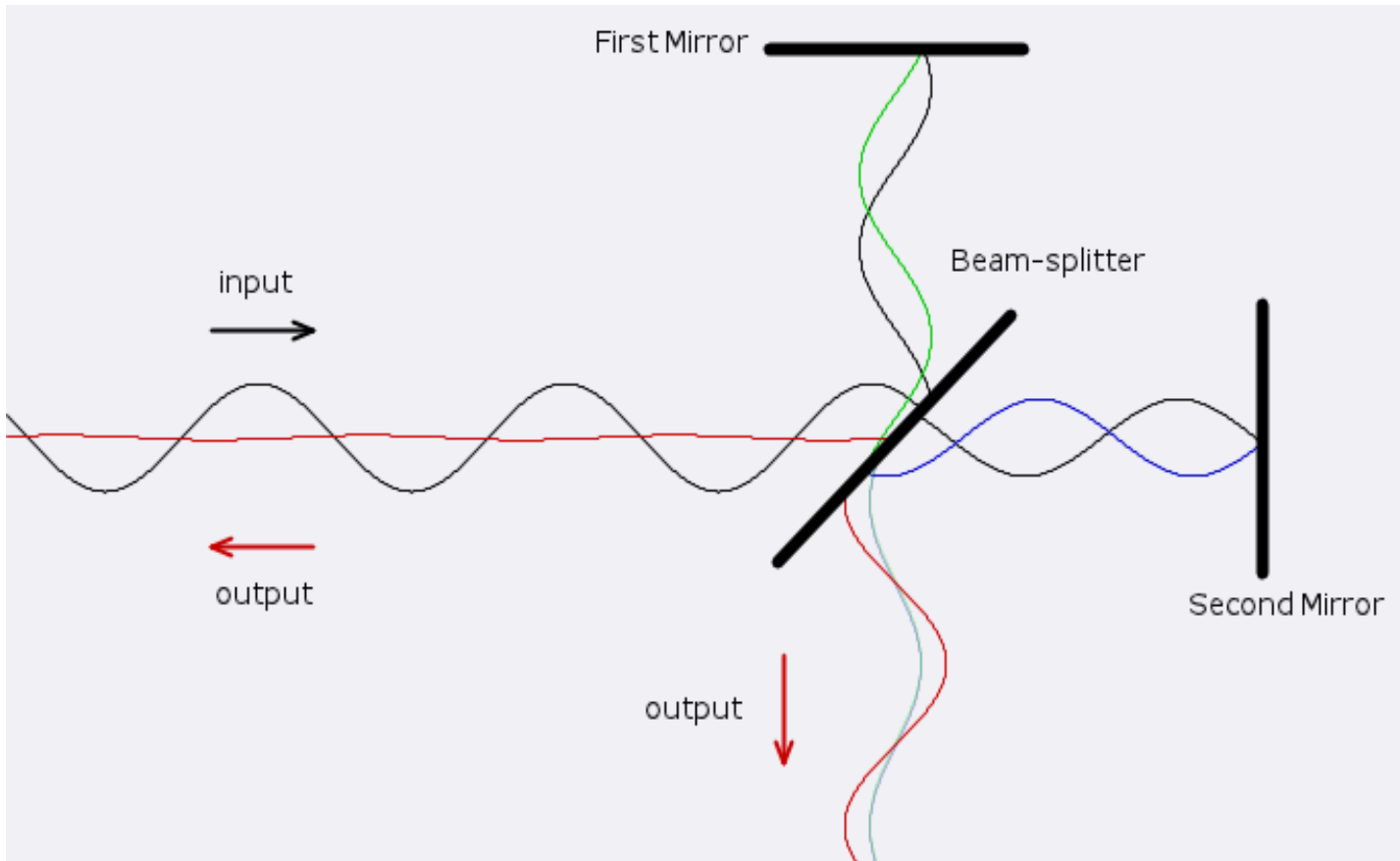
Λόγω εκπομπής βαρυτικών κυμάτων, η τροχιά συρρικνώνεται με ρυθμό που συμφωνεί κατά 99.8% με τη ΓΘΣ.



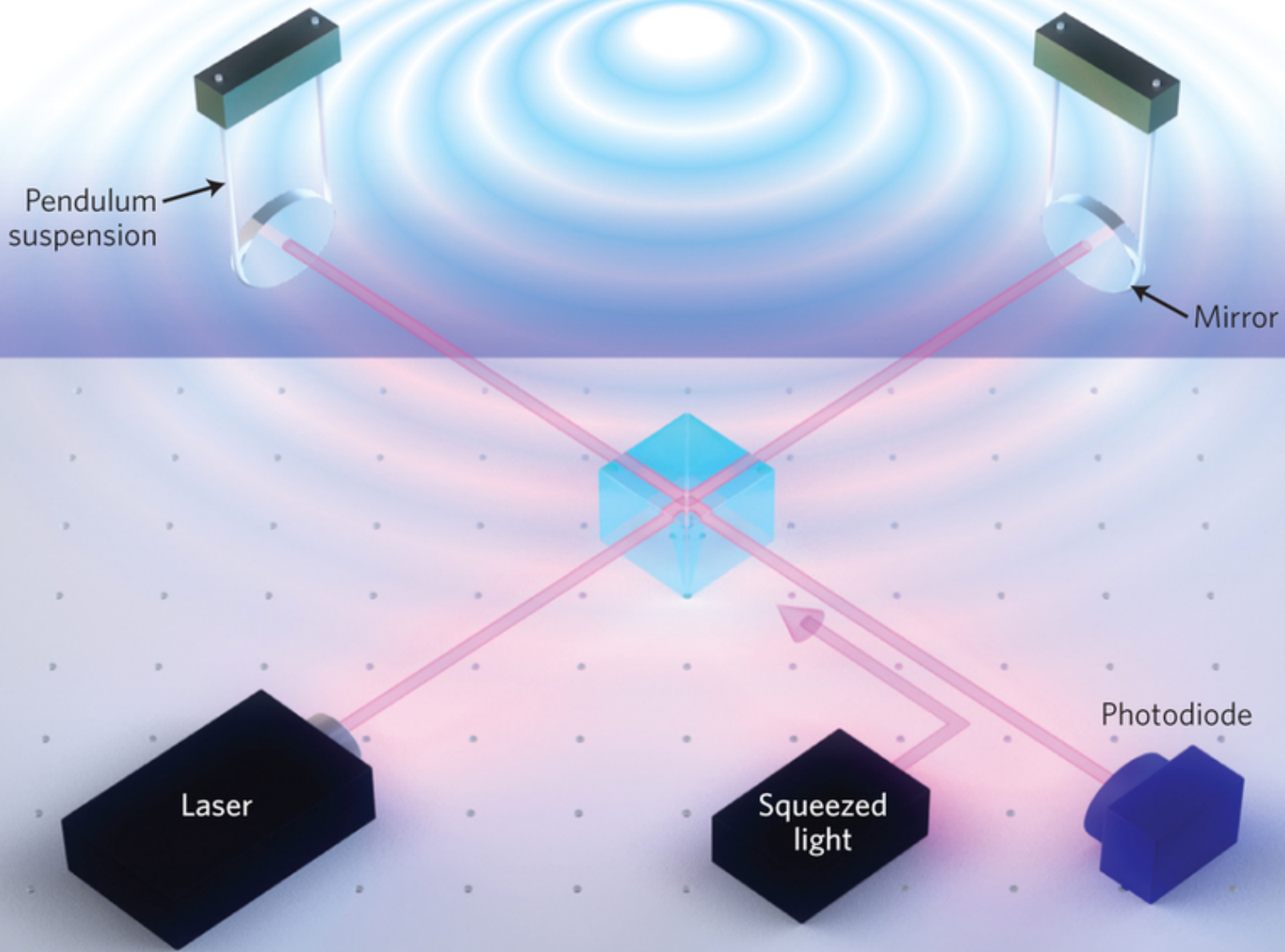
# Συμβολόμετρο Ακτίνων Laser

Μεγάλης κλίμακας διάταξη τύπου *Michelson-Morley*. Επειδή το μήκος κύματος των βαρυτικών κυμάτων είναι μεγαλύτερο από το μήκος των ακτίνων laser, χρησιμοποιείται *πολλαπλή ανάκλαση* (100 με 1000 φορές).

Η ισχύς της πηγής ακτίνων laser είναι της τάξης των **40 kW**.



# Gravitational waves



# Πηγές Πειραματικού Θορύβου

Η ευαισθησία του ανιχνευτή περιορίζεται από διάφορες πηγές θορύβου:

Στις χαμηλές συχνότητες:

Σεισμικές δονήσεις

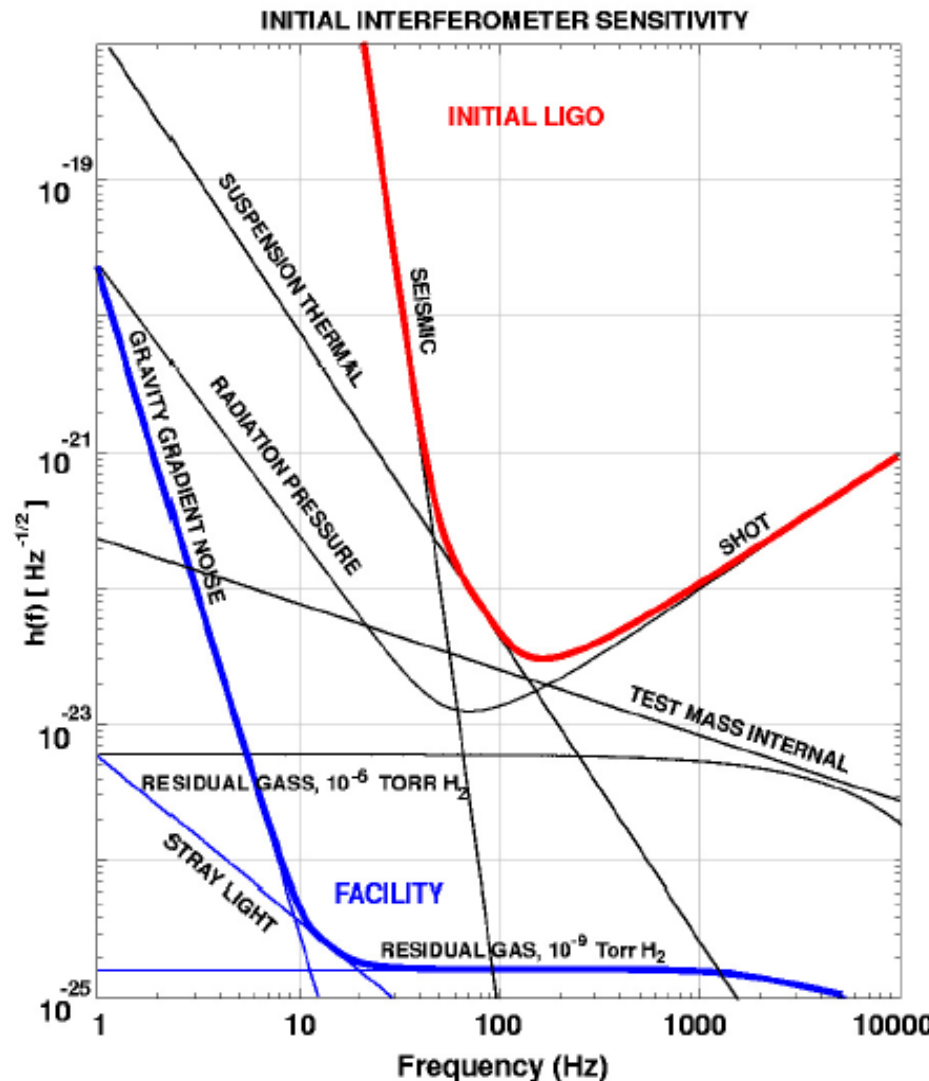
Τοπικές βαρυτικές μεταβολές

Στις μεσαίες συχνότητες:

Θερμικός θόρυβος

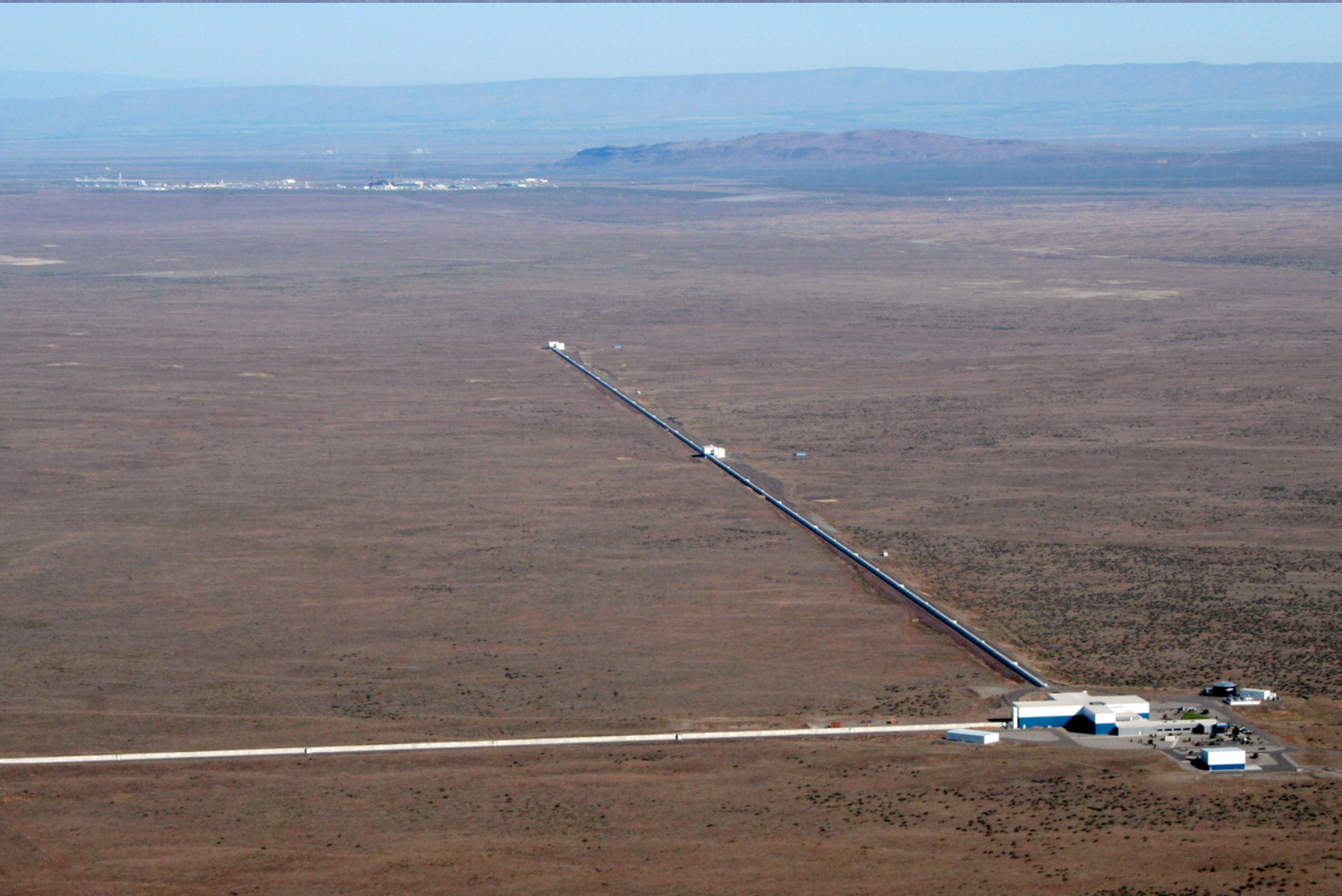
Στις υψηλές συχνότητες:

Κβαντικές διαταραχές της ακτίνας laser





# Advanced LIGO Detector at Hanford, WA









# Advanced VIRGO Detector at Pisa, Italy





# Εργασίες Αναβάθμισης στον Ανιχνευτή VIRGO



Συμμετοχή στο Επιστημονικό  
Συμβούλιο  
Virgo-Ego Scientific Forum (VESF)



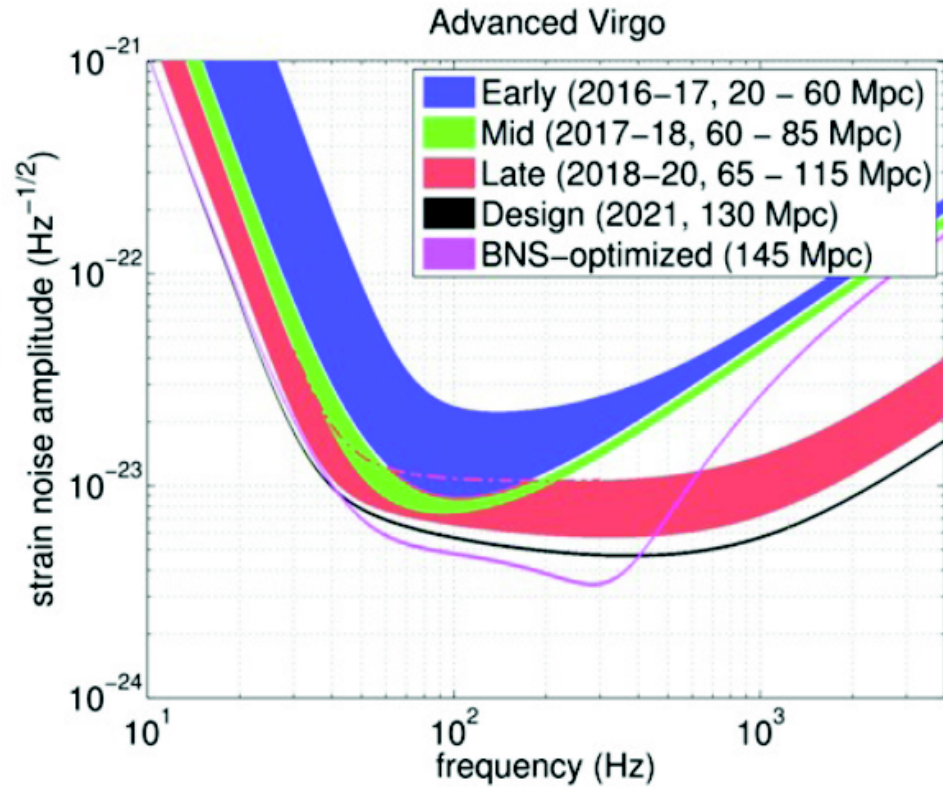
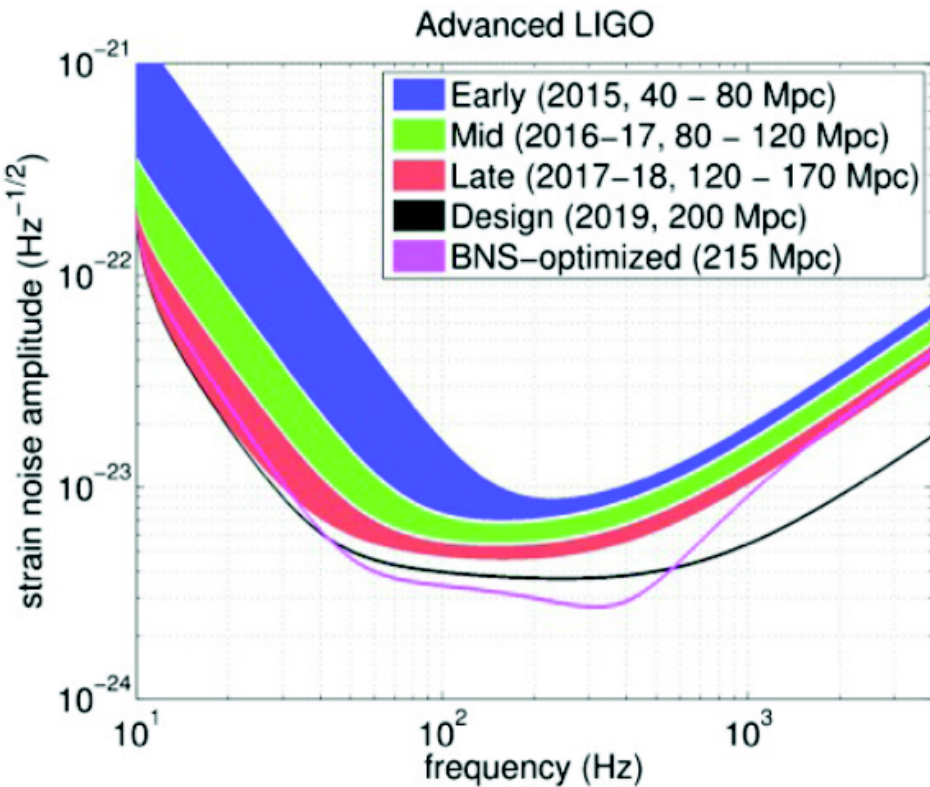
# Παγκόσμιο Δίκτυο Συμβολόμετρων Ακτίνων Laser

Σύντομα, όλοι οι συμβολομετρικοί ανιχνευτές θα λειτουργούν ως ένα *ενιαίο πείραμα*, το οποίο θα επιτρέπει τον *εντοπισμό θέσης* των διαφόρων πηγών.

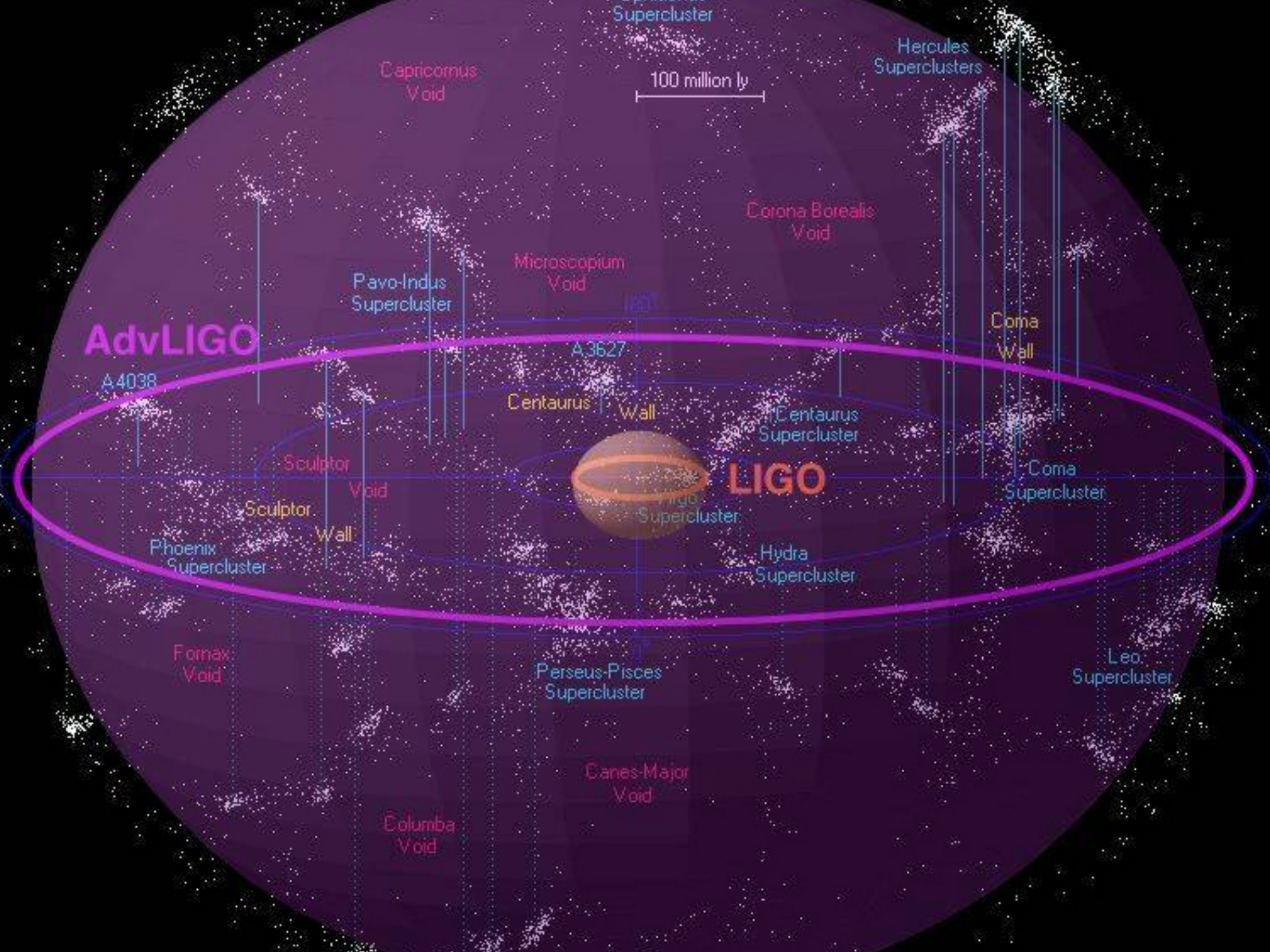


# Συμβολομετρικοί Ανιχνευτές 2ης Γενιάς

Ο 2ης γενιάς ανιχνευτής LIGO ξεκίνησε τη λειτουργία του το Σεπτέμβριο του 2015. Από το τέλος του 2016 θα λειτουργεί και ο 2ης γενιάς ανιχνευτής VIRGO.



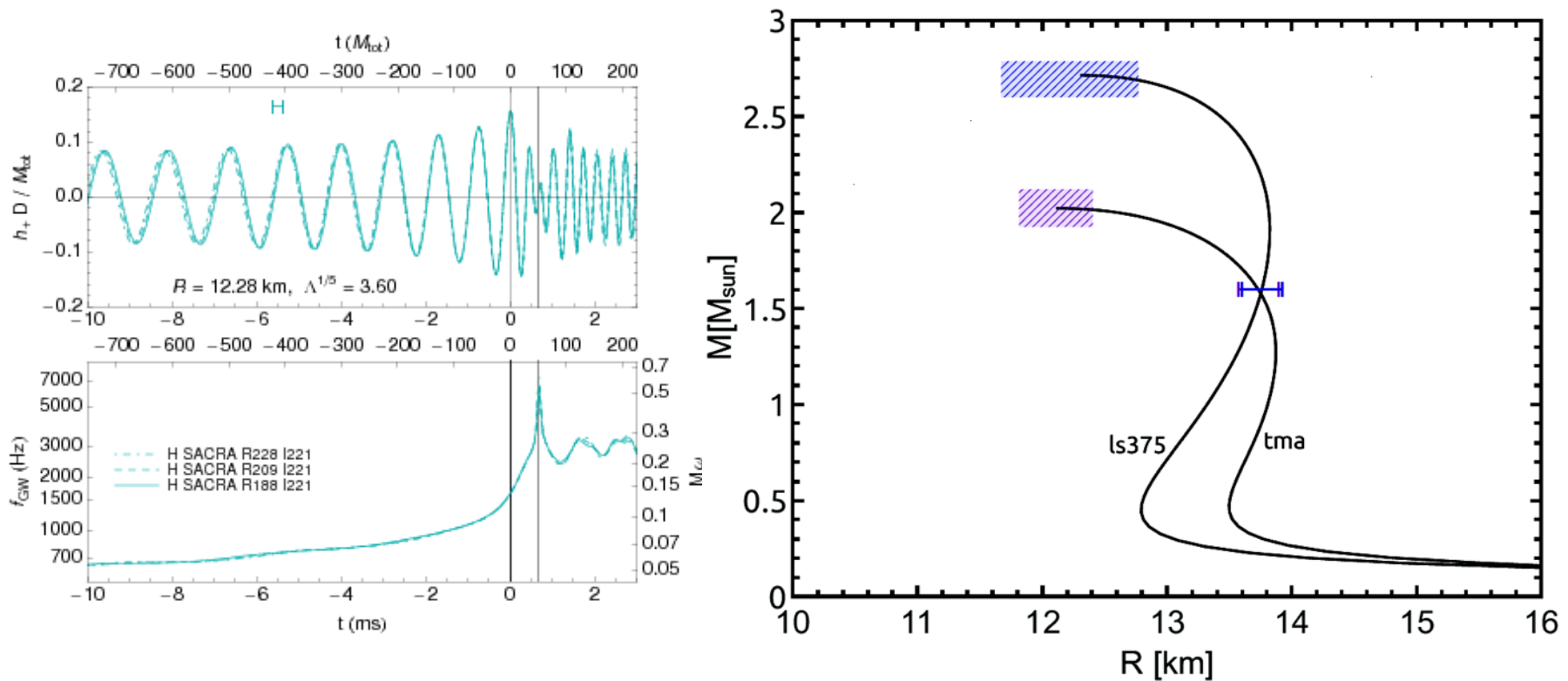




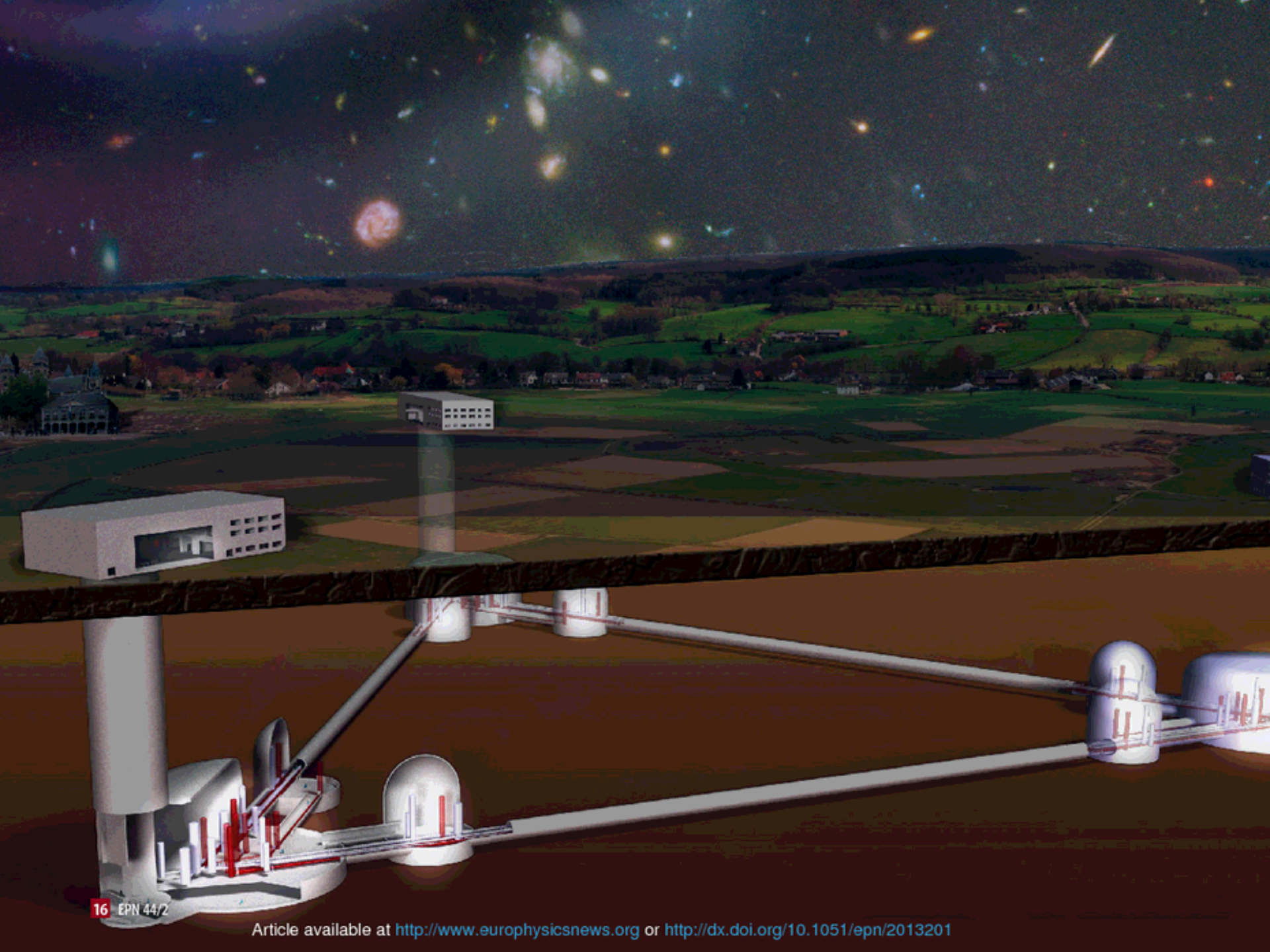


# Ανίχνευση Συγχώνευσης Αστέρων Νετρονίων

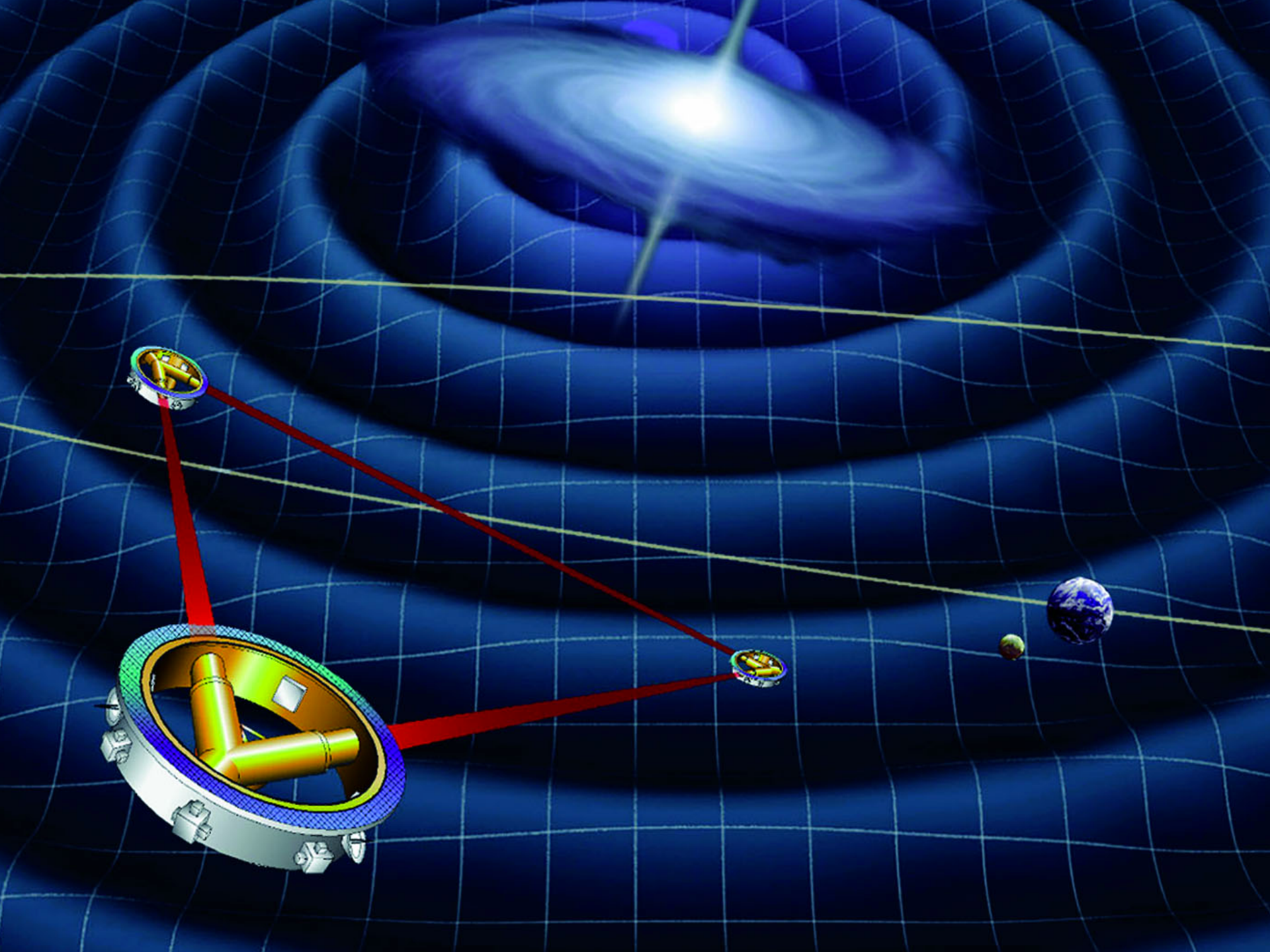
Η ανάλυση της κυματομορφής θα επιτρέψει τον υπολογισμό της μάζας και ακτίνας των αστέρων νετρονίων με ακρίβεια καλύτερη από 3%. Αυτό θα μας αποκαλύψει τις πραγματικές ιδιότητες της ύλης στο κέντρο αυτών των αστέρων.



Η έρευνα στο ΑΠΘ υποστηρίζεται από υποτροφία Marie-Curie της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και από υποτροφία του πειράματος VIRGO.

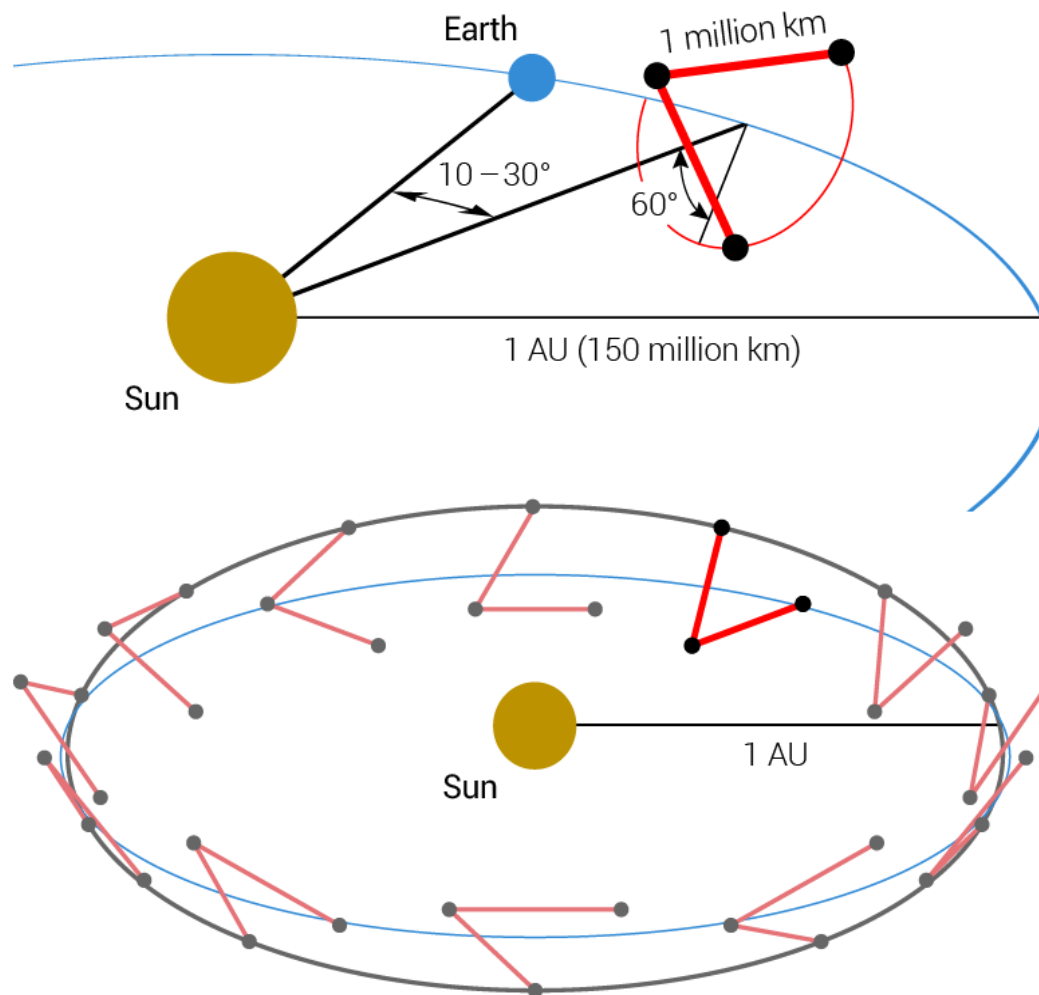






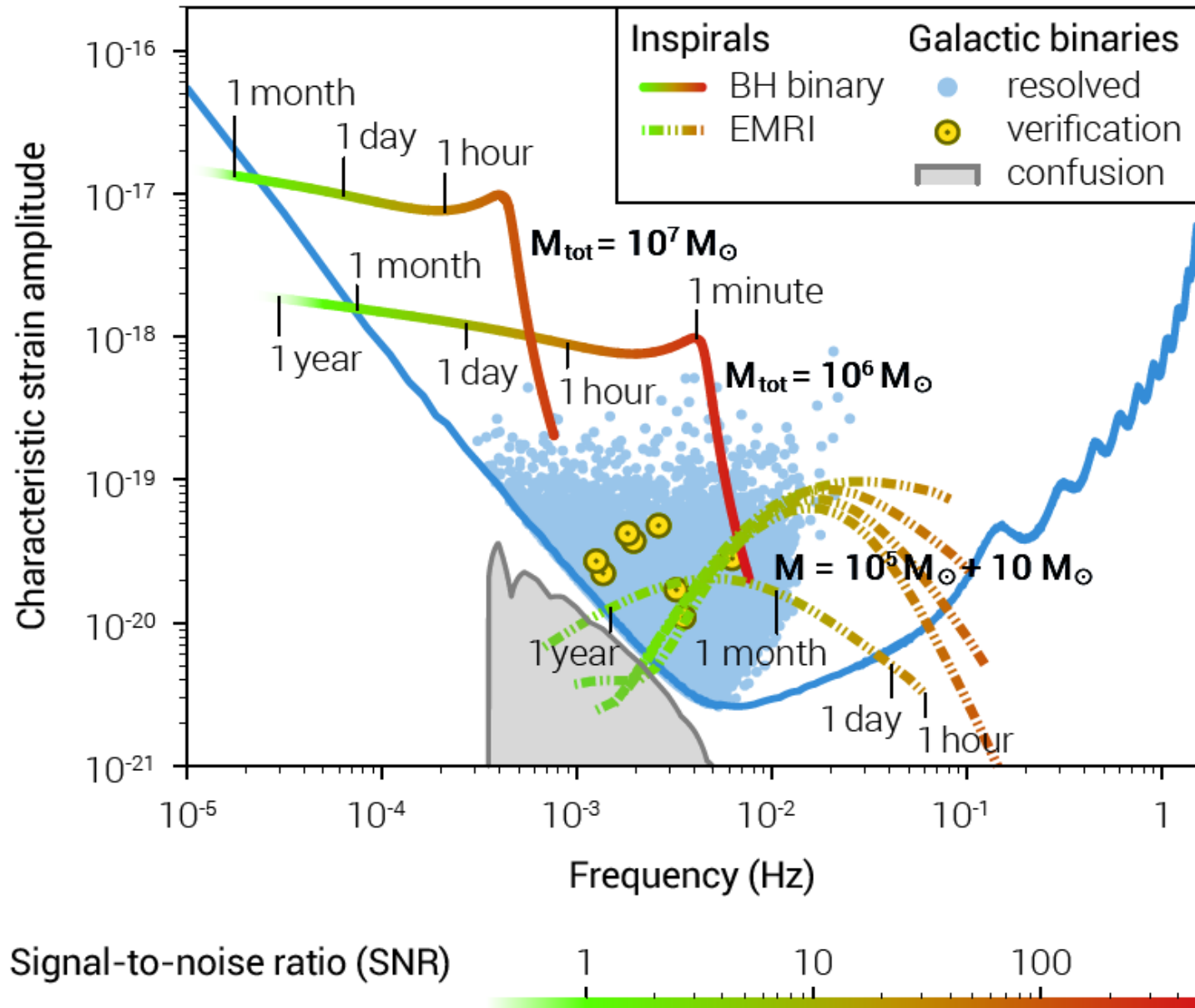
# Διαστημικό Συμβολόμετρο eLISA

Για πηγές πολύ χαμηλών συχνοτήτων, χρειάζεται πολύ μεγάλο μήκος των ακτίνων laser.

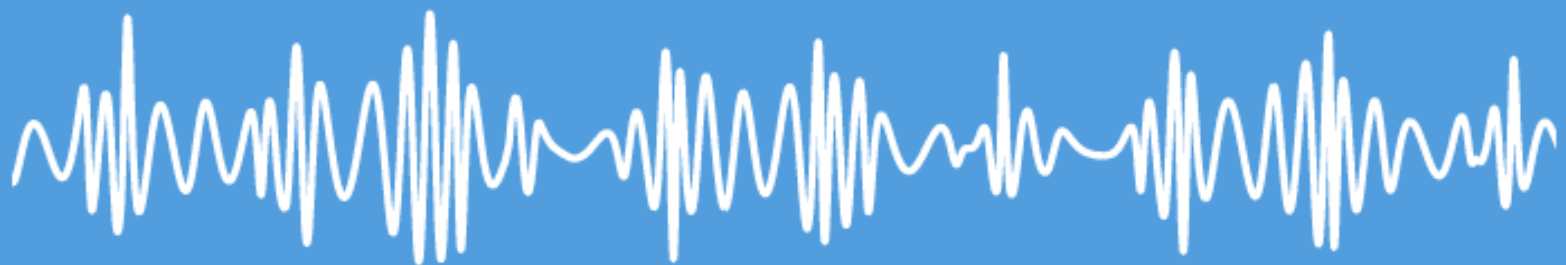
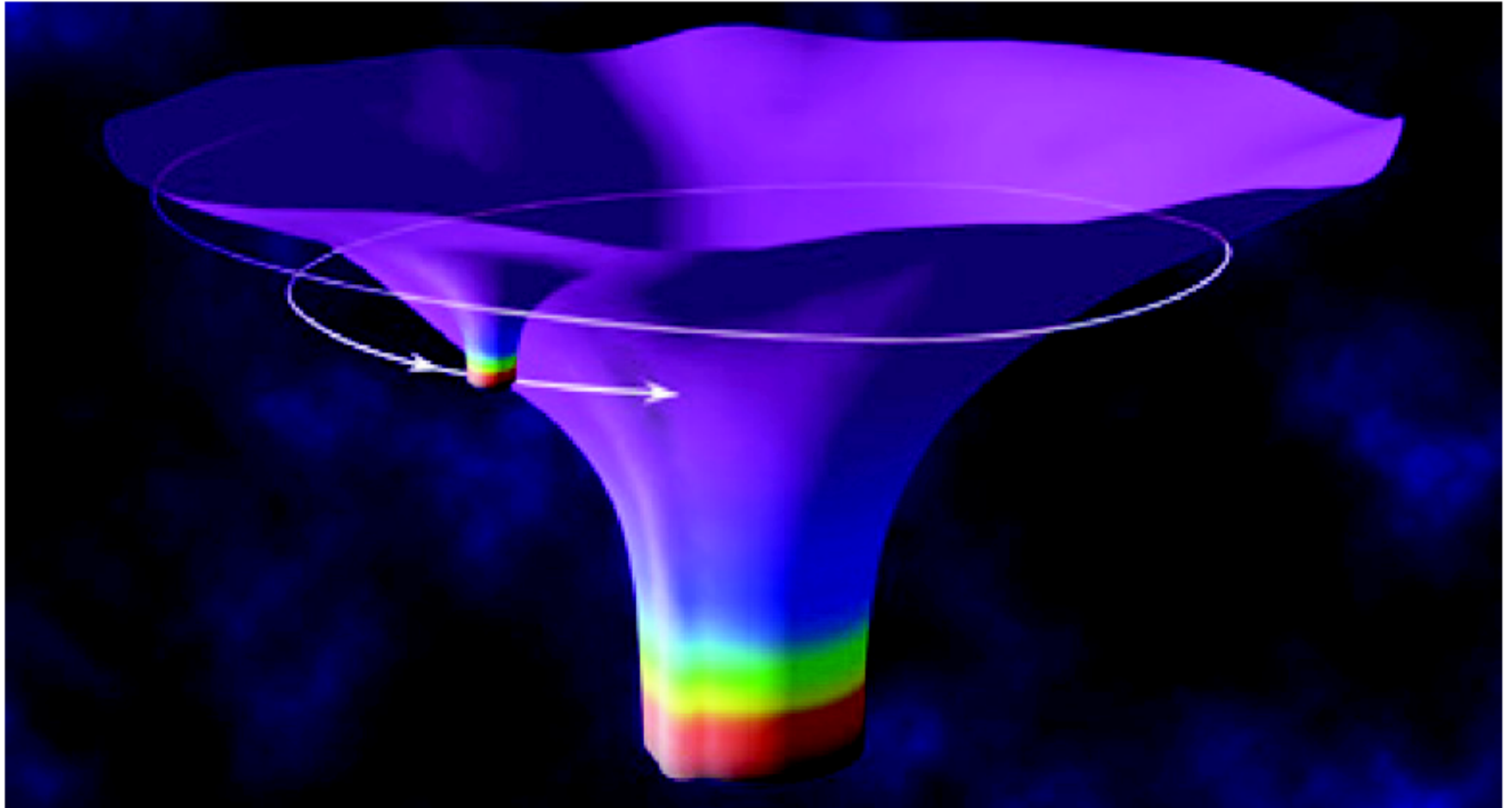




# Διαστημικό Συμβολόμετρο eLISA

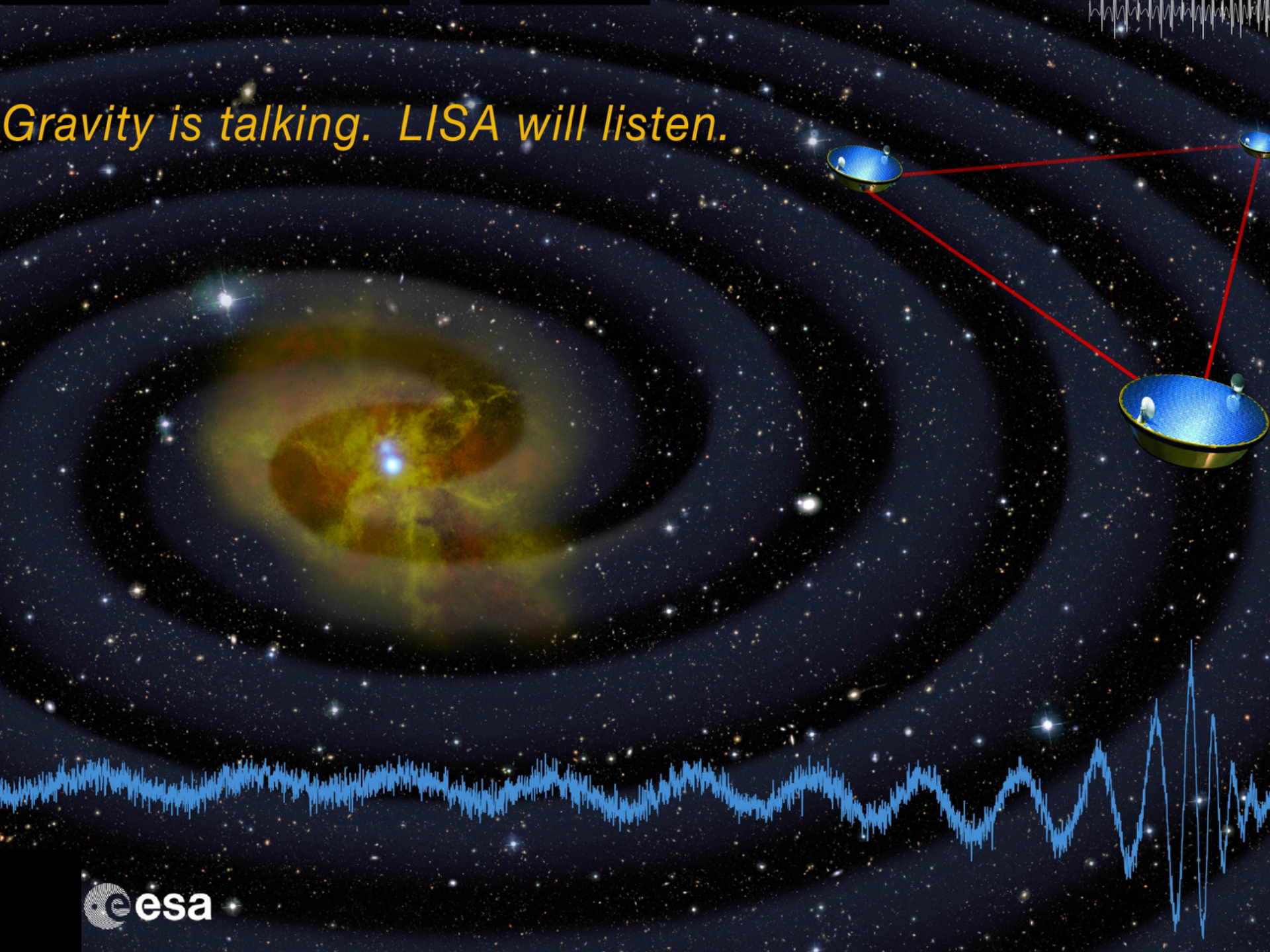


# Ο "Ήχος" μιας Μελανής Οπής

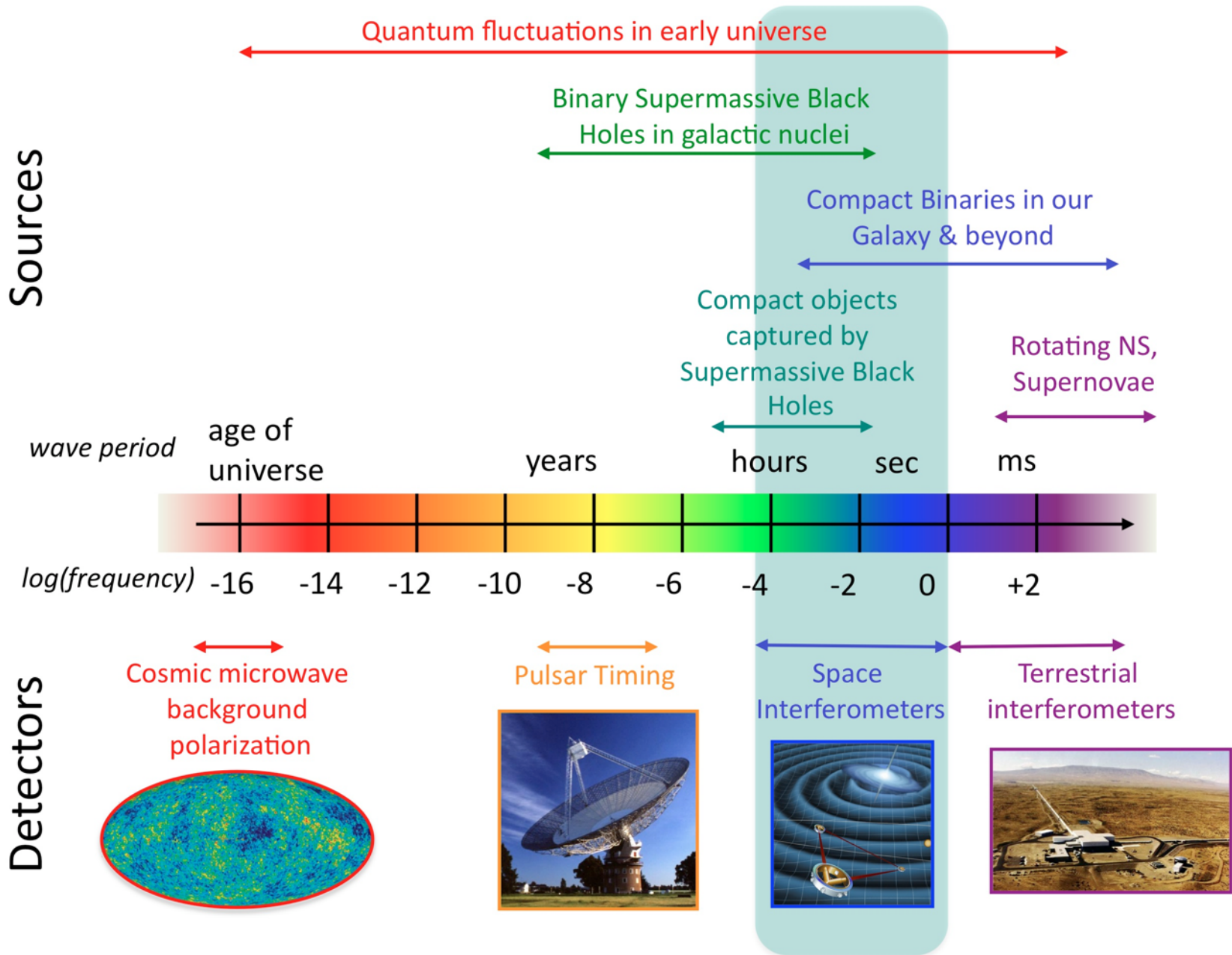




*Gravity is talking. LISA will listen.*



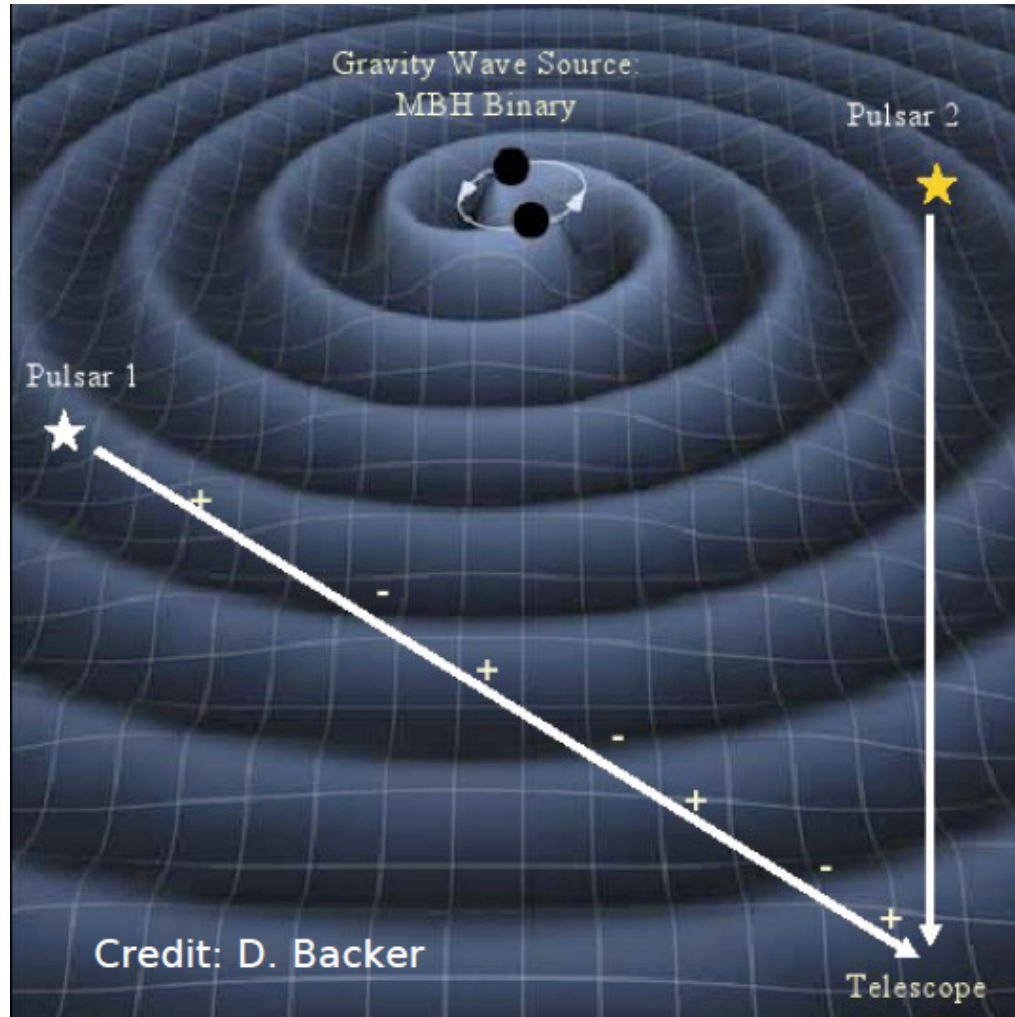
# The Gravitational Wave Spectrum





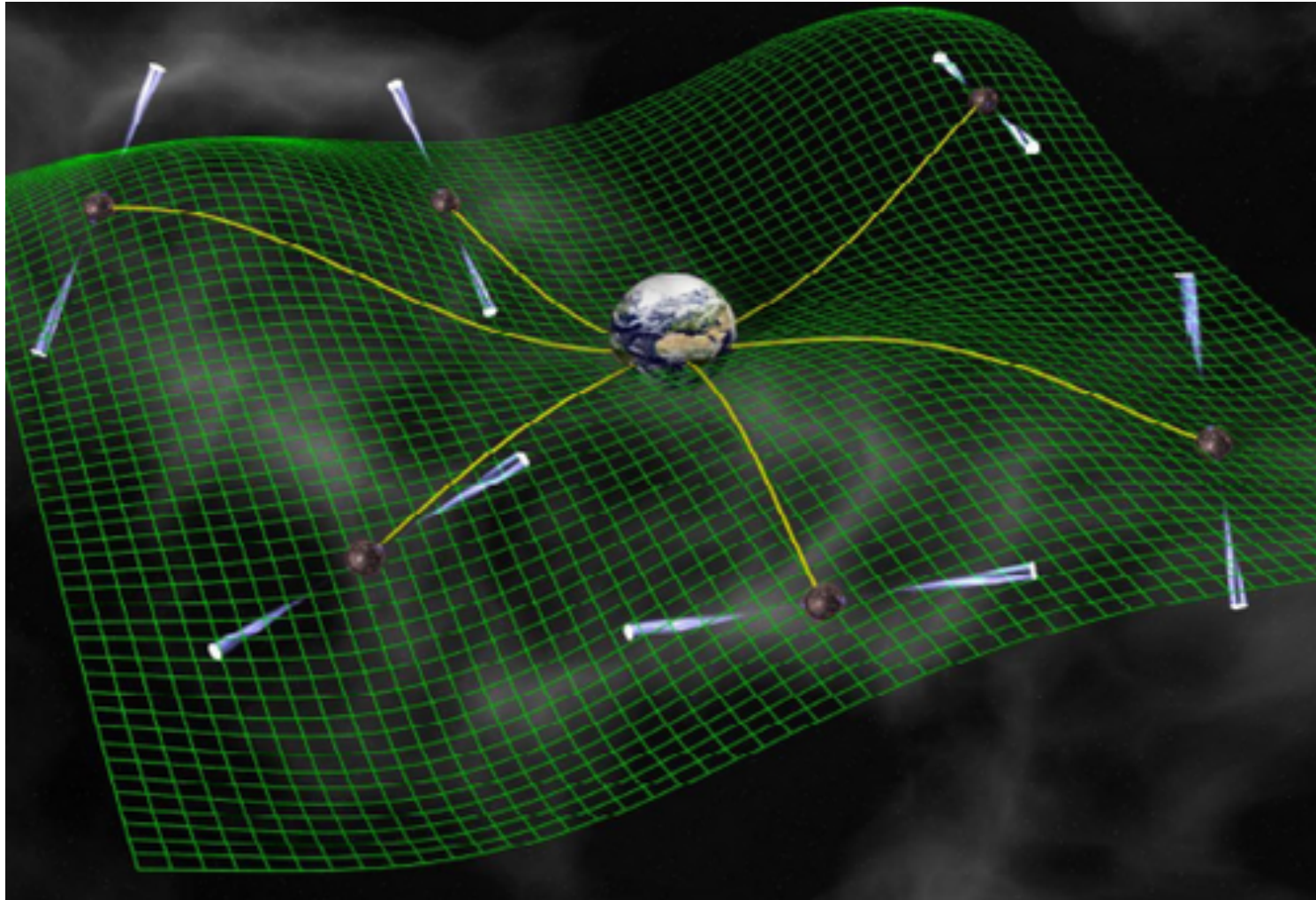
# Ανίχνευση Βαρυτικών Κυμάτων μέσω Pulsar

Τα pulsar μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων.

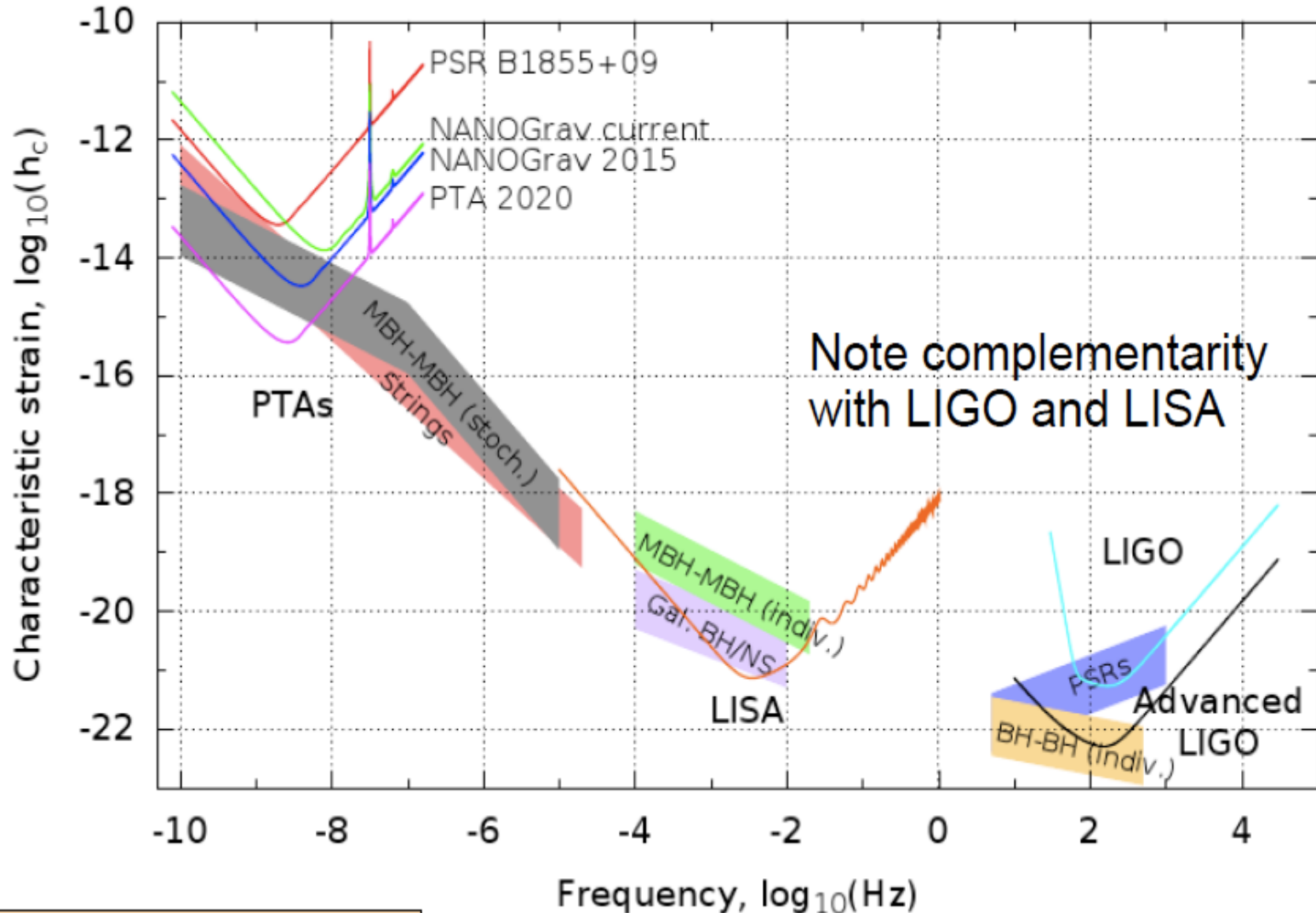


# Ανίχνευση Βαρυτικών Κυμάτων μέσω Pulsar

Αυτό που μπορεί να ανιχνευθεί είναι το υπόβαθρο βαρυτικών κυμάτων από γαλαξιακές μελανές οπές σε συχνότητες nHz (2015-2020).



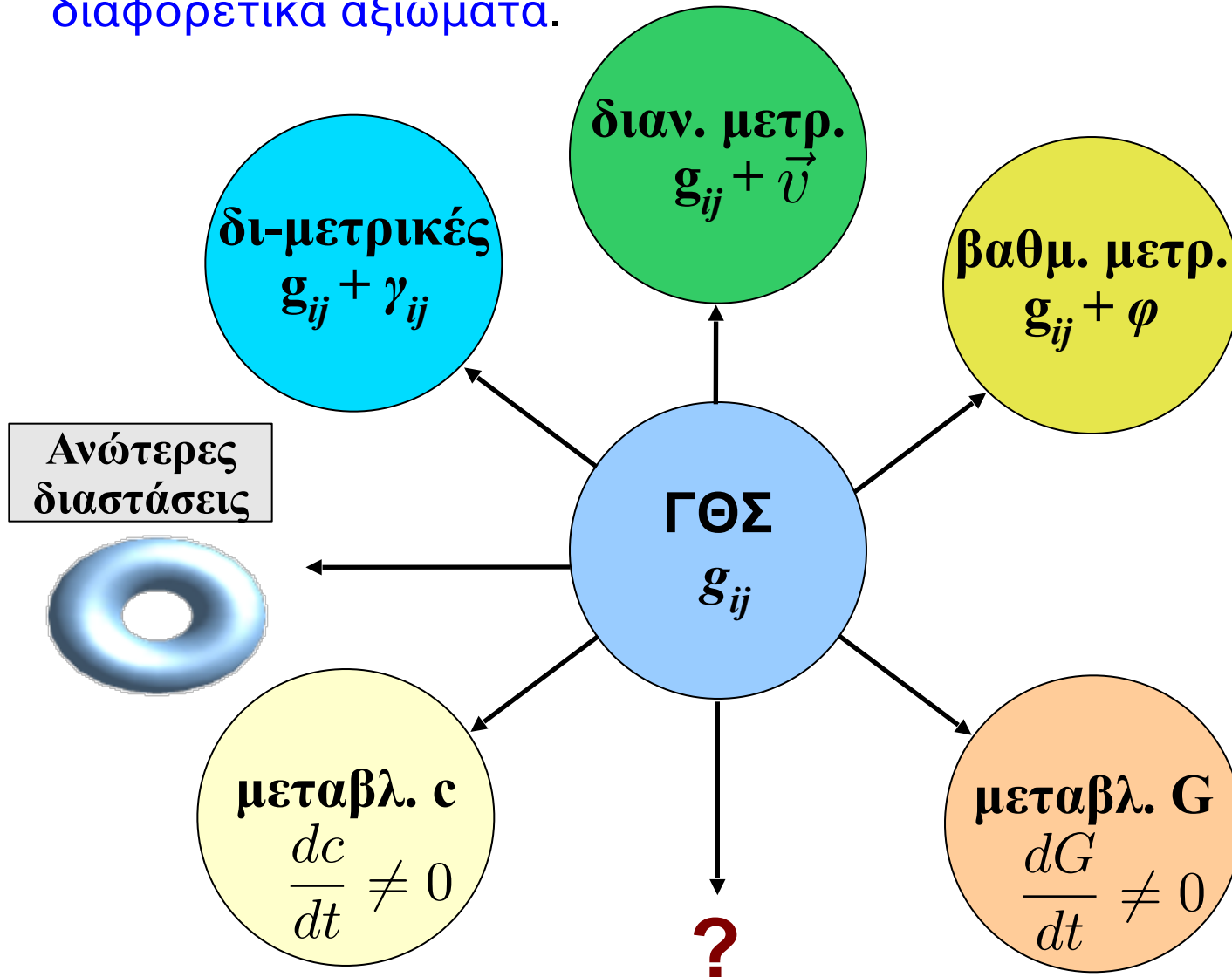
# Ανίχνευση Βαρυτικών Κυμάτων μέσω Pulsar





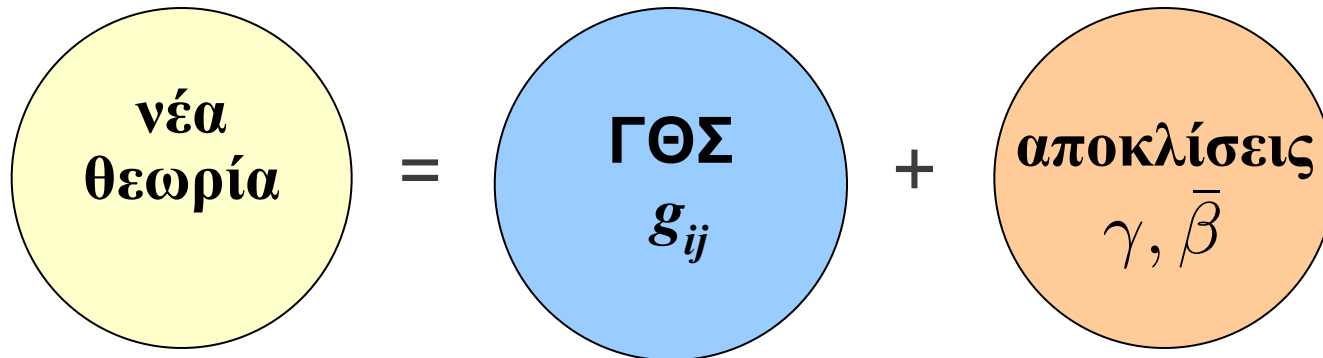
# Επεκτάσεις της ΓΘΣ

Σήμερα υπάρχουν επεκτάσεις της ΓΘΣ, που βασίζονται σε διαφορετικά αξιώματα.



# Επεκτάσεις της ΓΘΣ

Οι 4-διάστατες επεκτάσεις έχουν ως **βάση τη ΓΘΣ** και αποκλίνουν από αυτή κατά *10 διαφορετικές παραμέτρους*.



Οι δύο κύριες παράμετροι απόκλισης από τη ΓΘΣ είναι οι  $\gamma, \bar{\beta}$ .

Εάν βρεθεί πειραματικά ότι έχουν **μη-μηδενικές τιμές**, τότε η ΓΘΣ θα αντικατασταθεί από μια νέα, πιο ακριβή θεωρία.

# ΤΕΛΟΣ

Η ομιλία είναι διαθέσιμη στην ιστοσελίδα:  
<http://www.astro.auth.gr/~niksterg>