Εξερευνώντας το Σύμπαν με τα Κύματα της Βαρύτητας

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΥΛΑΣ

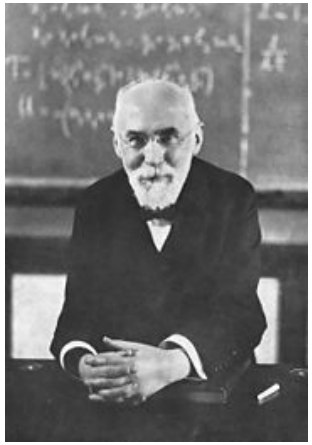
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



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.

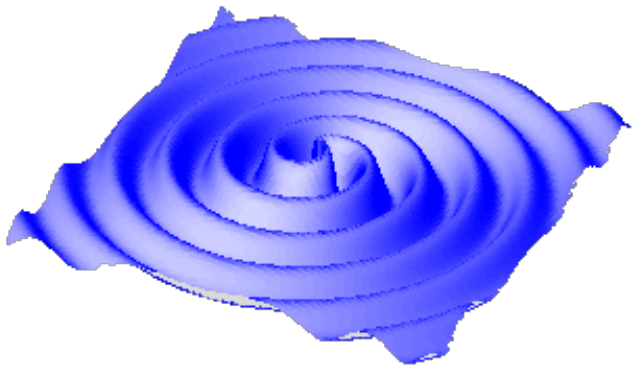


1905: ο Poincaré προτείνει την ύπαρξη βαρυτικών κυμάτων.



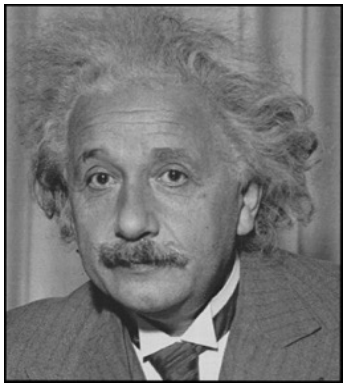
Έπρεπε να βρεθεί μια νέα θεωρία για τη βαρύτητα, η οποία να περιγράφεται από κυματικές εξισώσεις της μορφής

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



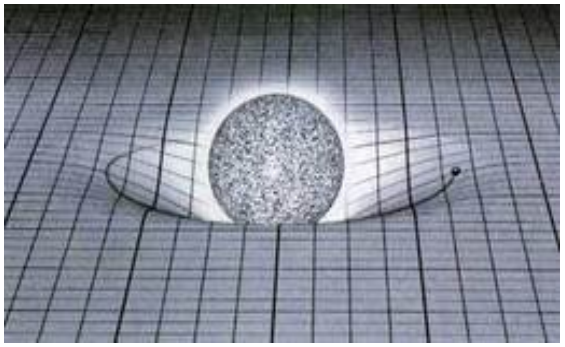
Γενική Θεωρία Σχετικότητας (ΓΘΣ)

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



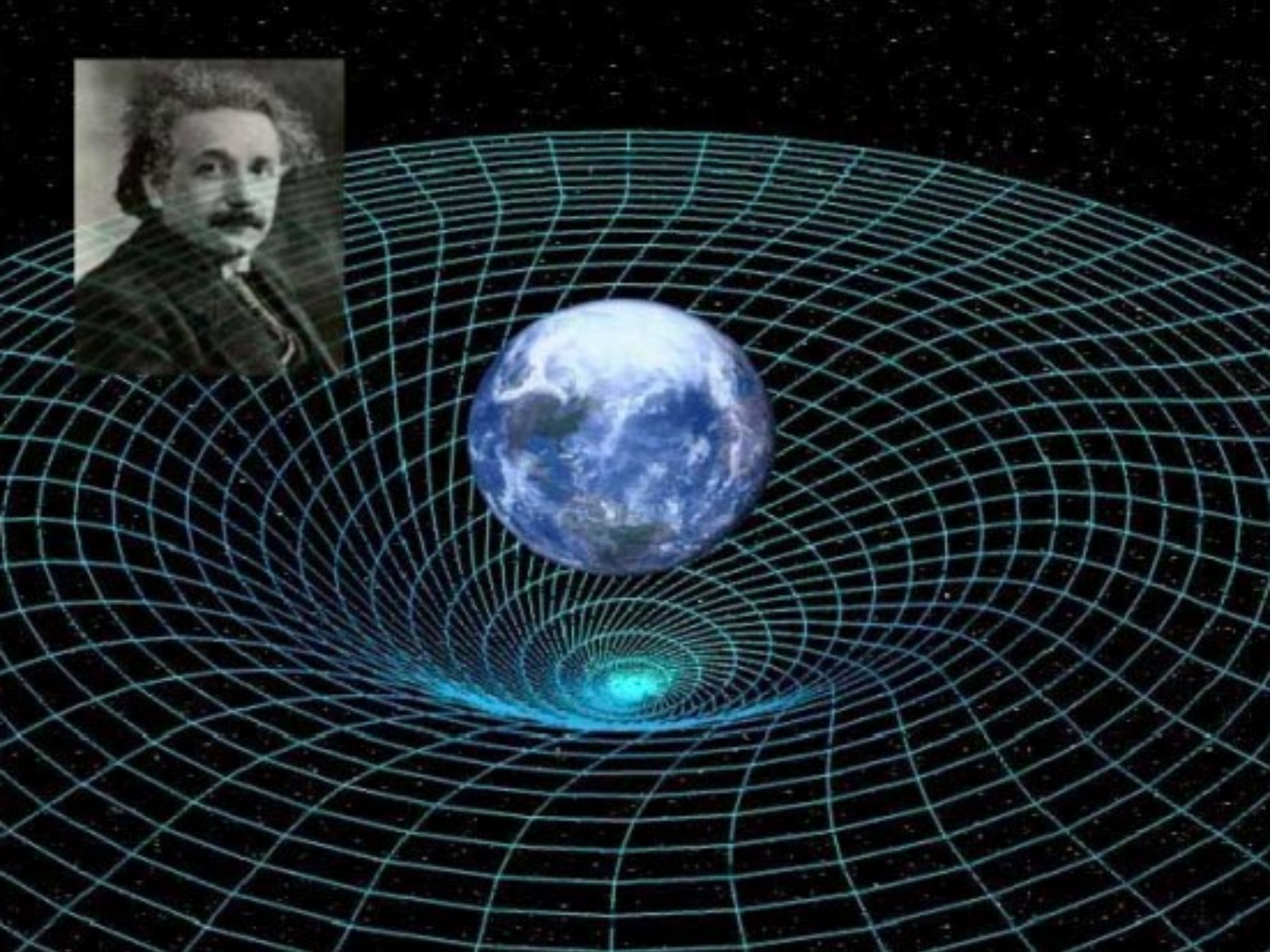
Οι φυσικές αποστάσεις μετρώνται με τη βοήθεια ενός *μετρικού τανυστή*.

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

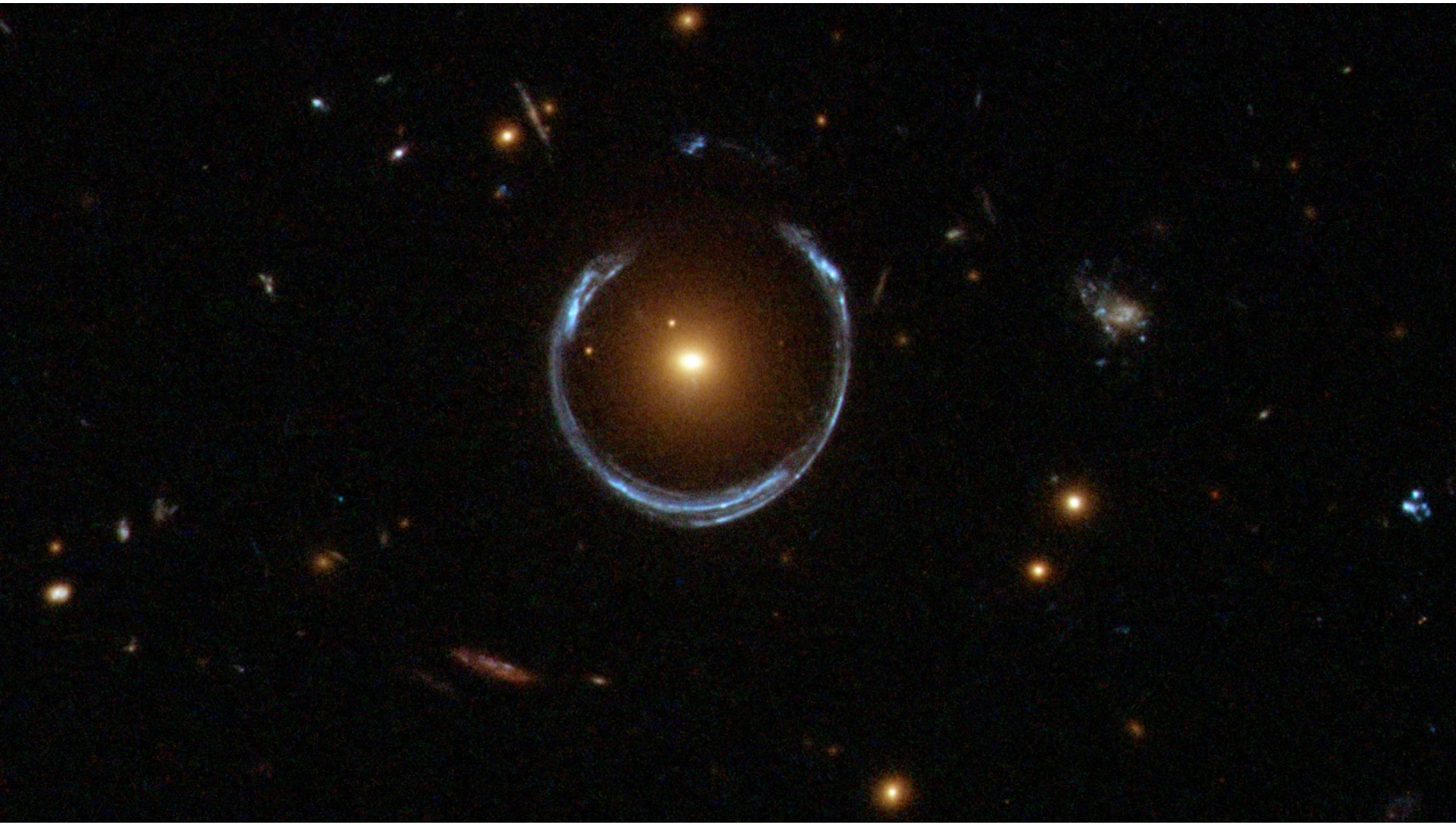


Οι εξισώσεις του Einstein πράγματι περιγράφουν τη διάδοση της βαρύτητας ως κύμα, με ταχύτητα ίση με αυτή του φωτός στο κενό.





"Δαχτυλίδι του Einstein" LRG 3-757



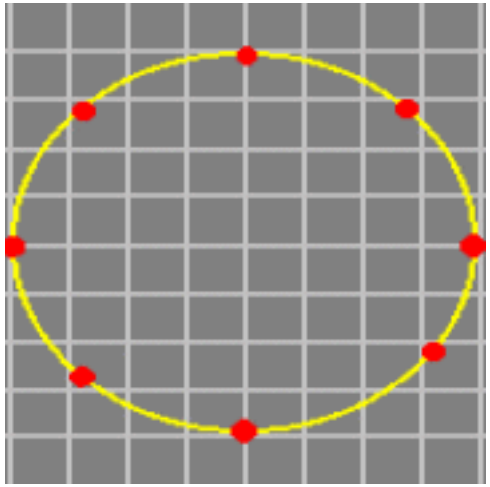
Διαφορές Βαρυτικών/Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

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

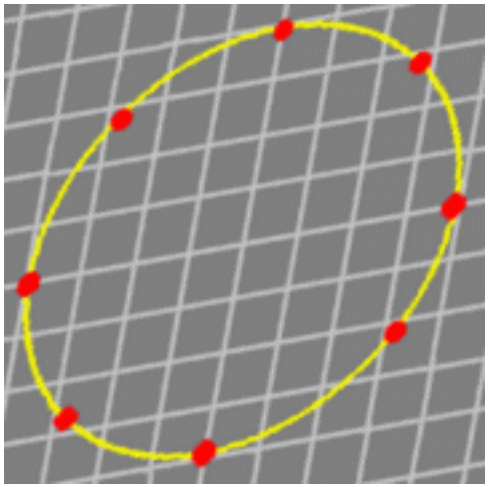
Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα	**Βαρυτικά Κύματα**
Τουλάχιστον διπολικά	Τουλάχιστον τετραπολικά
Δημιουργούνται από +/- φορτία	Δημιουργούνται από + μάζες
Ισχυρή αλληλεπίδραση με την ύλη	Ασθενής αλληλεπίδραση με την ύλη
Γραμμική/κυκλική πόλωση	Πόλωση + / x
Μπορεί να έχουν μήκος κύματος μικρότερο από τις διαστάσεις της πηγής	Έχουν μήκος κύματος πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις της πηγής

Πόλωση των Βαρυτικών Κυμάτων

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



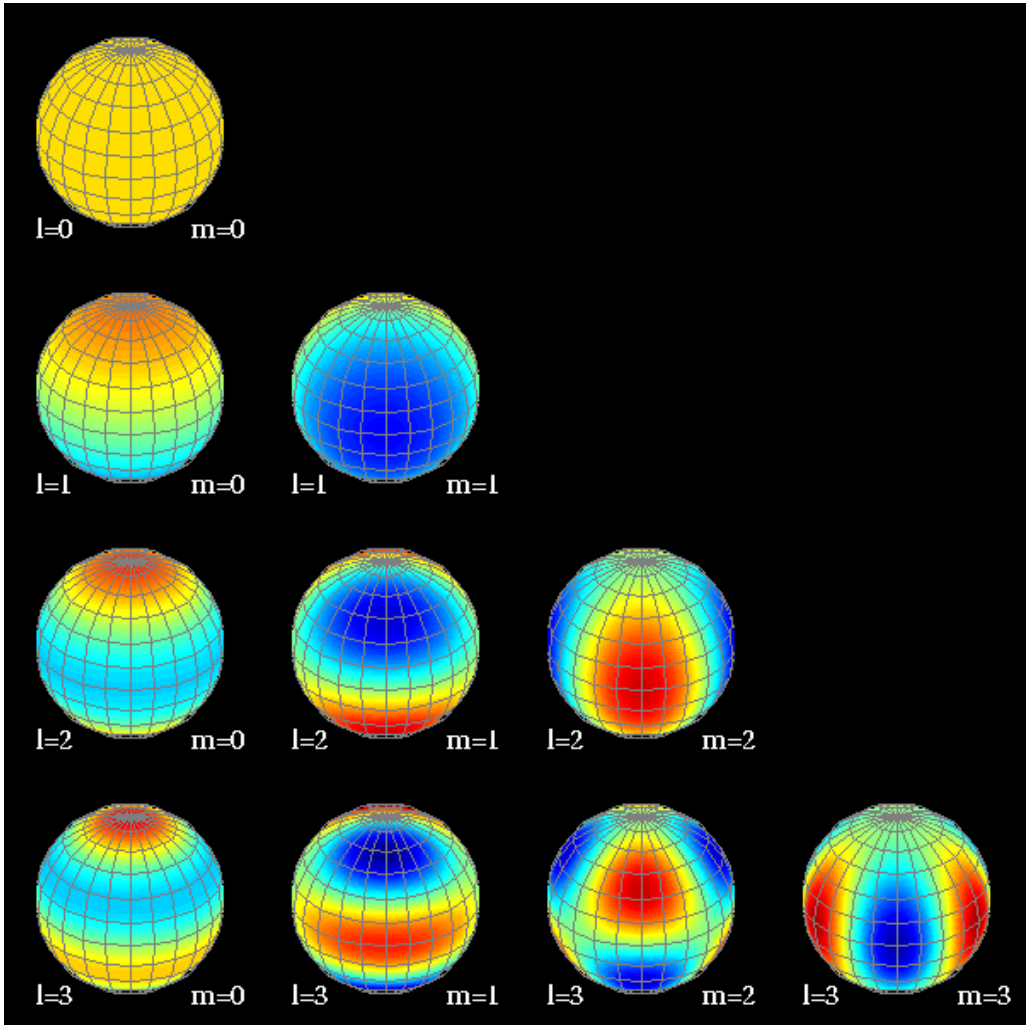
Πόλωση **+**

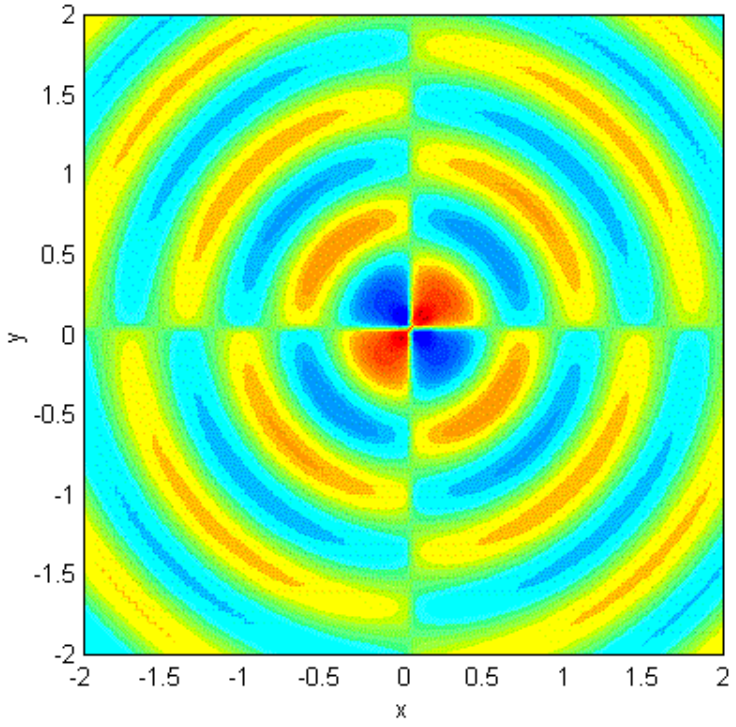


Πόλωση **X**

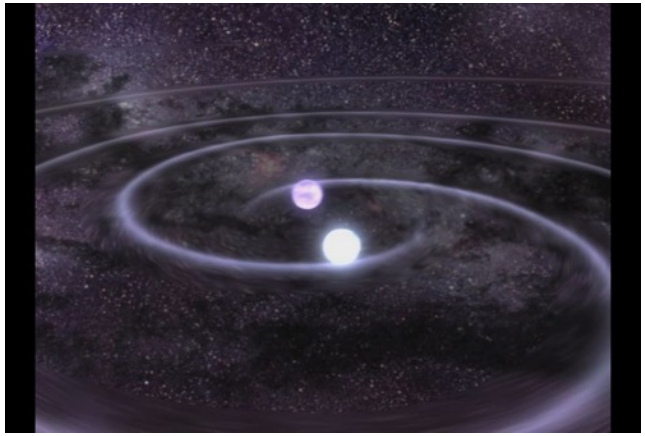
Παραγωγή Βαρυτικών Κυμάτων

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





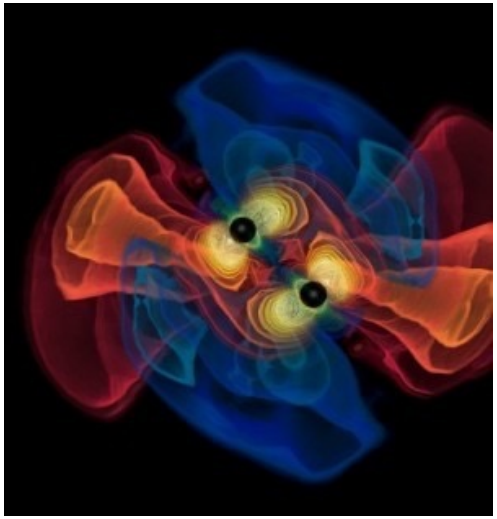
Κύριες Πηγές Βαρυτικών Κυμάτων



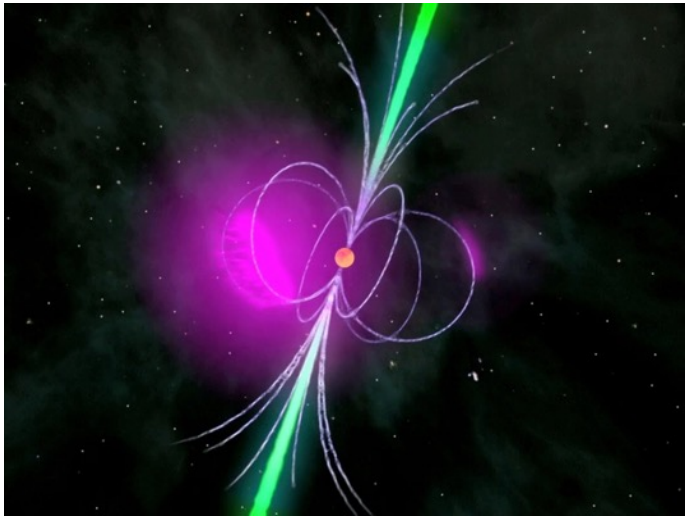
Συγχώνευση Αστέρων Νετρονίων



Κατάρρευση Αστέρων



Συγχώνευση Μελανών Οπών



Περιστρεφόμενοι Αστέρες Νετρονίων

Πλάτος και Συχνότητα Βαρυτικών Κυμάτων

Εάν υποθέσουμε περιοδική μεταβολή, με κάποια συχνότητα Ω, βρίσκουμε το πλάτος h των βαρυτικών κυμάτων:

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

όπου: r η απόσταση της πηγής
f η συχνότητα
ρ η πυκνότητα
ε η παραμόρφωση

Συχνότητα f

Αστρικές πηγές: 1 έως 1000 Hz

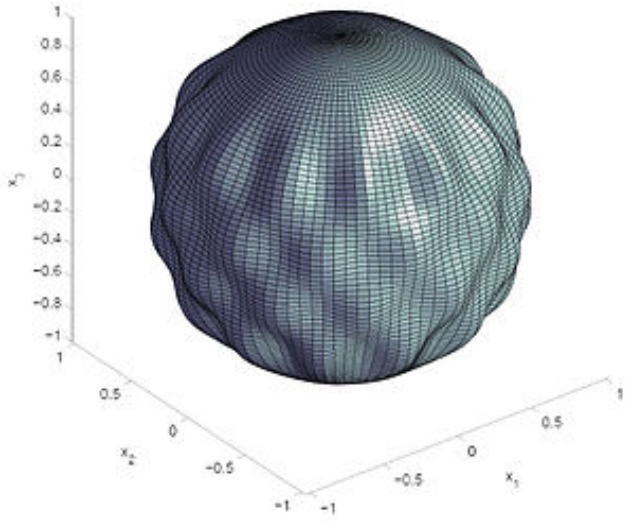
Γαλαξιακές πηγές: 10^{-8} έως 0.01 Hz

Παράδειγμα: Ταλάντωση ενός Αστέρα Νετρονίων

Ακτίνα: R=10 km

Συχνότητα: f = 2000 Hz

Απόσταση: r = 70 εκατομμύρια έτη φωτός



Ροή ενέργειας βαρυτικών κυμάτων στη Γη:

0.6 W / m^2

Ροή ενέργειας Η/Μ κυμάτων της Σελήνης στη Γη:

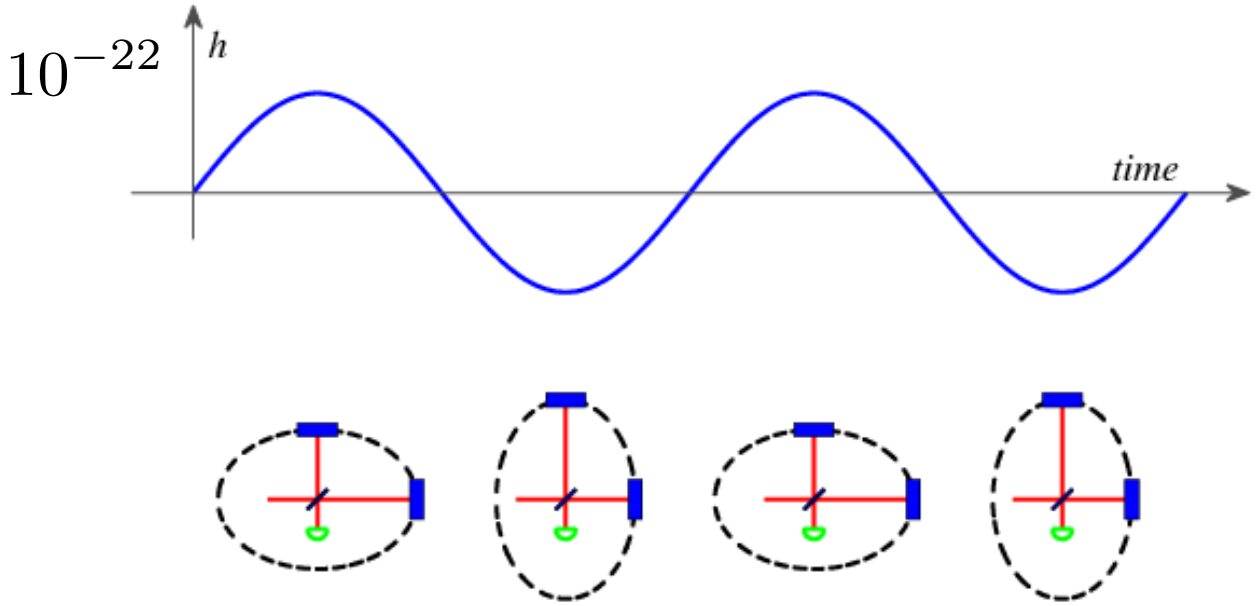
0.0015 W / m^2



ροή Β/Κ = 400 x ροή Η/Μ Σελήνης !!

Σχετική Μεταβολή Μήκους

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



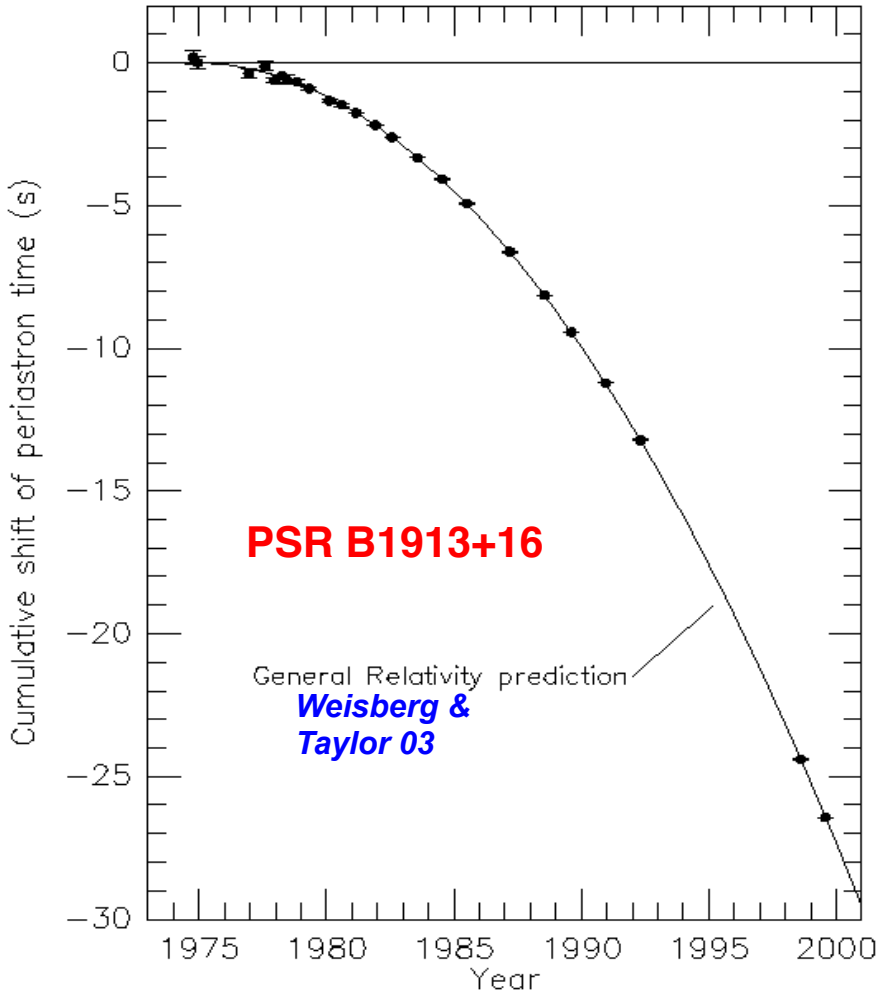
Σε έναν *ανιχνευτή μήκους* 4 km, αυτό αντιστοιχεί σε:

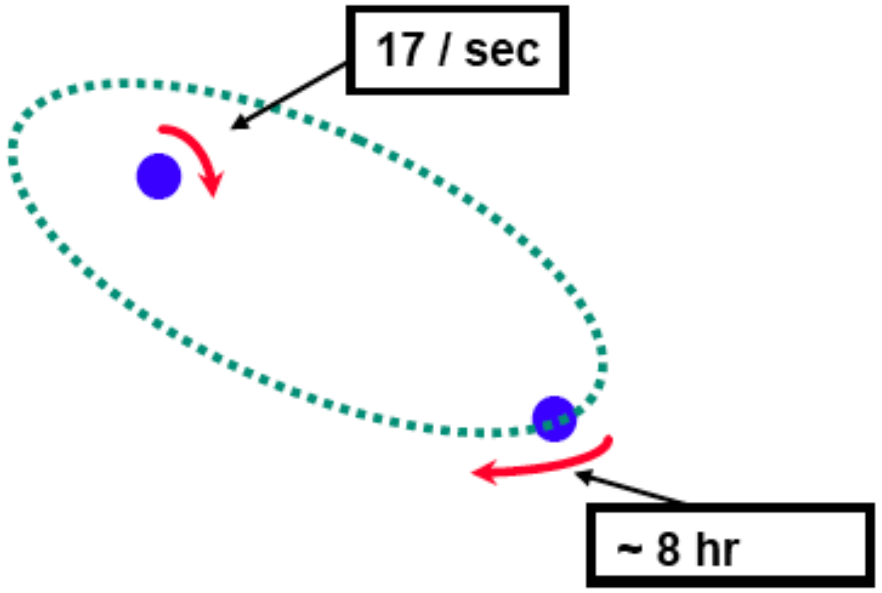
λιγότερο από το 1% της ακτίνας ενός πρωτονίου (!)

Διπλά Συστήματα Αστέρων Νετρονίων

Βραβείο Νόμπελ 1993 στους Hulse & Taylor

Η *πρώτη έμμεση επιβεβαίωση* της ύπαρξης των βαρυτικών κυμάτων!



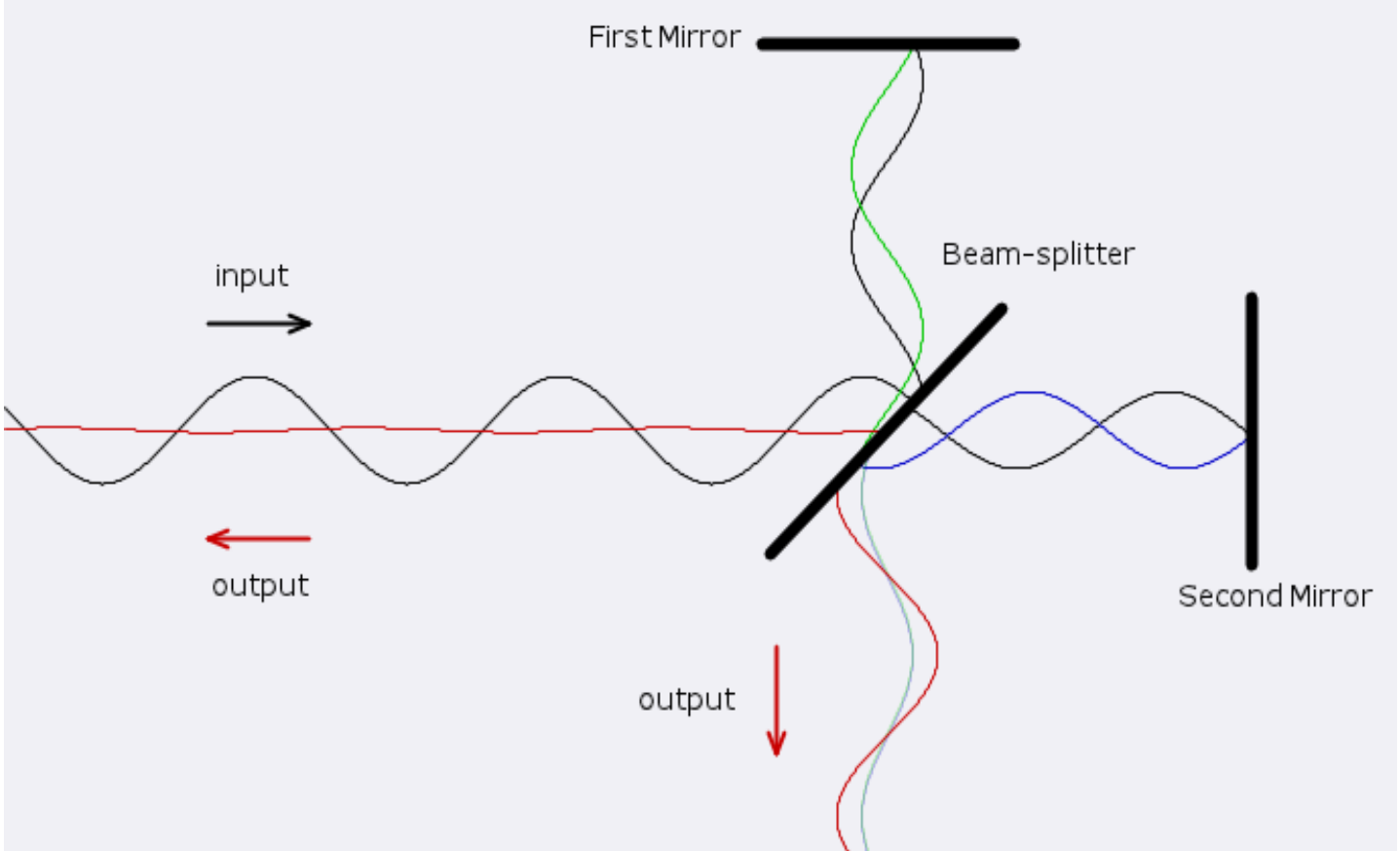


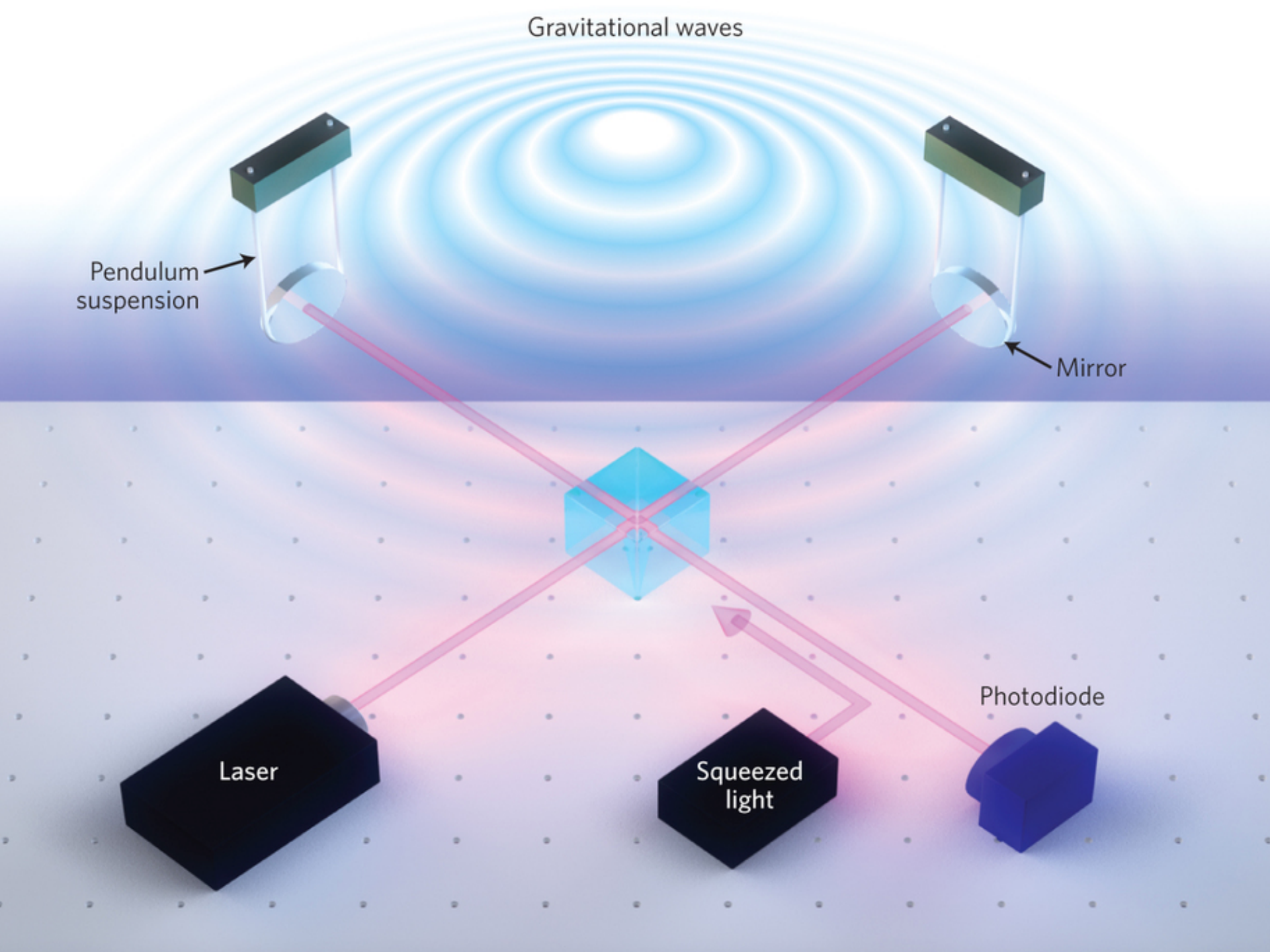
Λόγω εκπομπής βαρυτικών κυμάτων, η τροχιά συρρικνώνεται με ρυθμό που συμφωνεί κατά 99.8% με τη ΓΘΣ.

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
Pendulum suspension
Mirror
Laser
Squeezed light
Photodiode

Πηγές Πειραματικού Θορύβου

Η ευαισθησία του ανιχνευτή περιορίζεται από διάφορες πηγές θορύβου:

Στις χαμηλές συχνότητες:

Σεισμικές δονήσεις

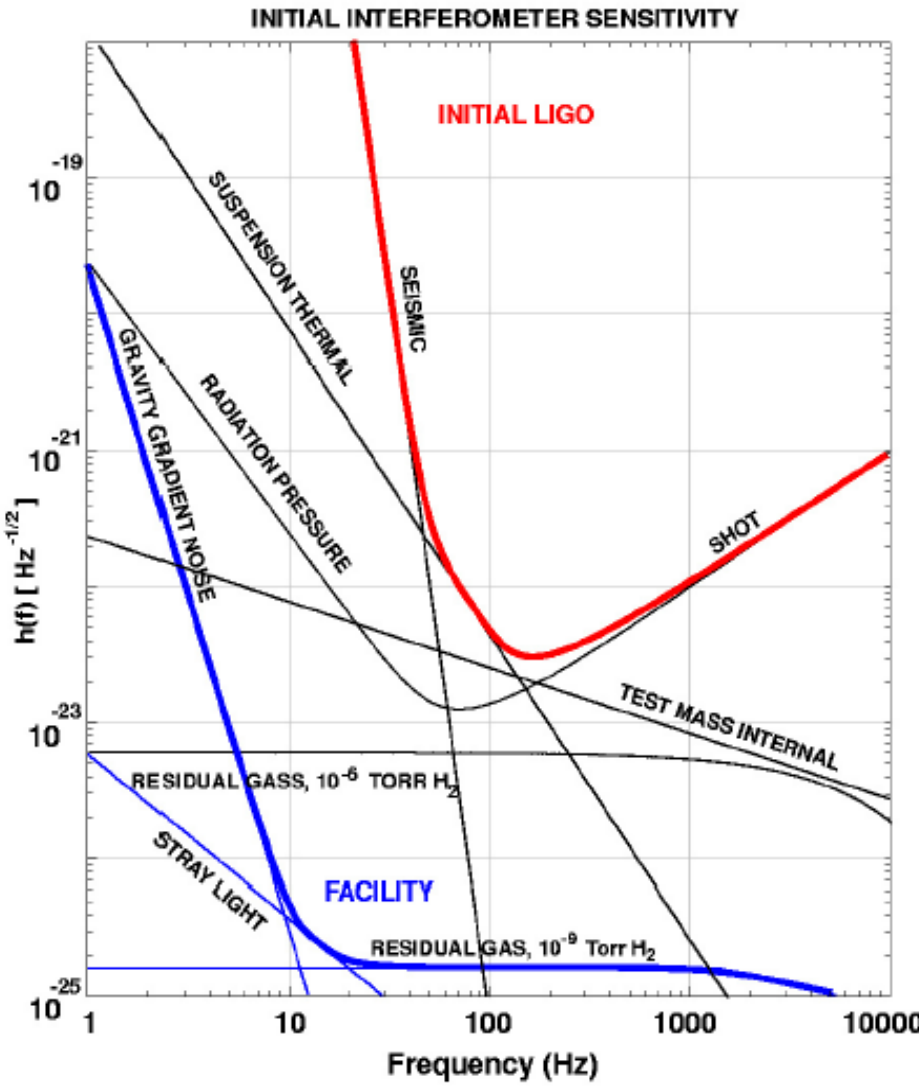
Τοπικές βαρυτικές μεταβολές

Στις μεσαίες συχνότητες:

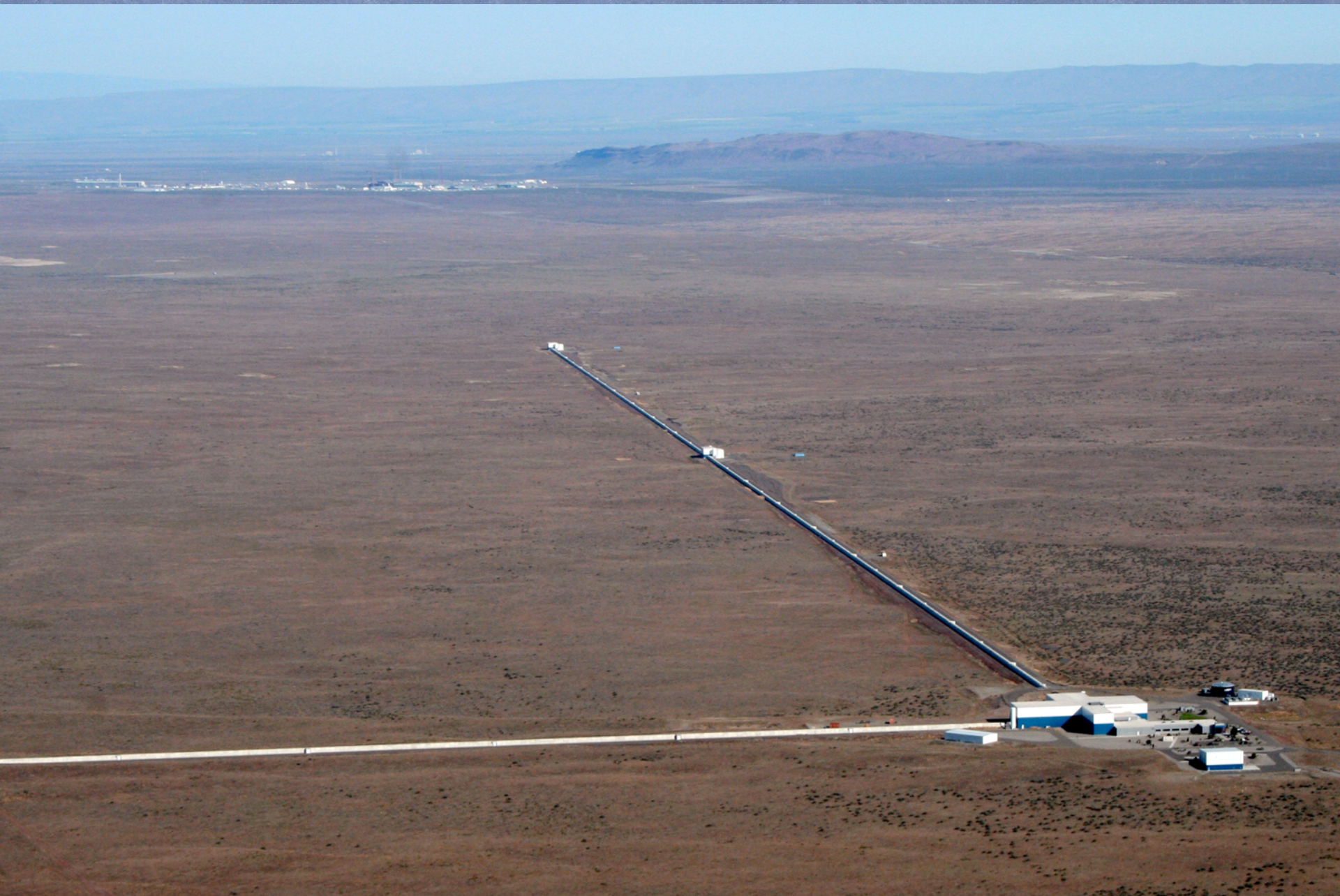
Θερμικός θόρυβος

Στις υψηλές συχνότητες:

Κβαντικές διαταραχές της ακτίνας laser



Advanced LIGO Detector at Hanford, WA




Museum of Natural History

Advanced VIRGO Detector at Pisa, Italy



Εργασίες Αναβάθμισης στον Ανιχνευτή VIRGO







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

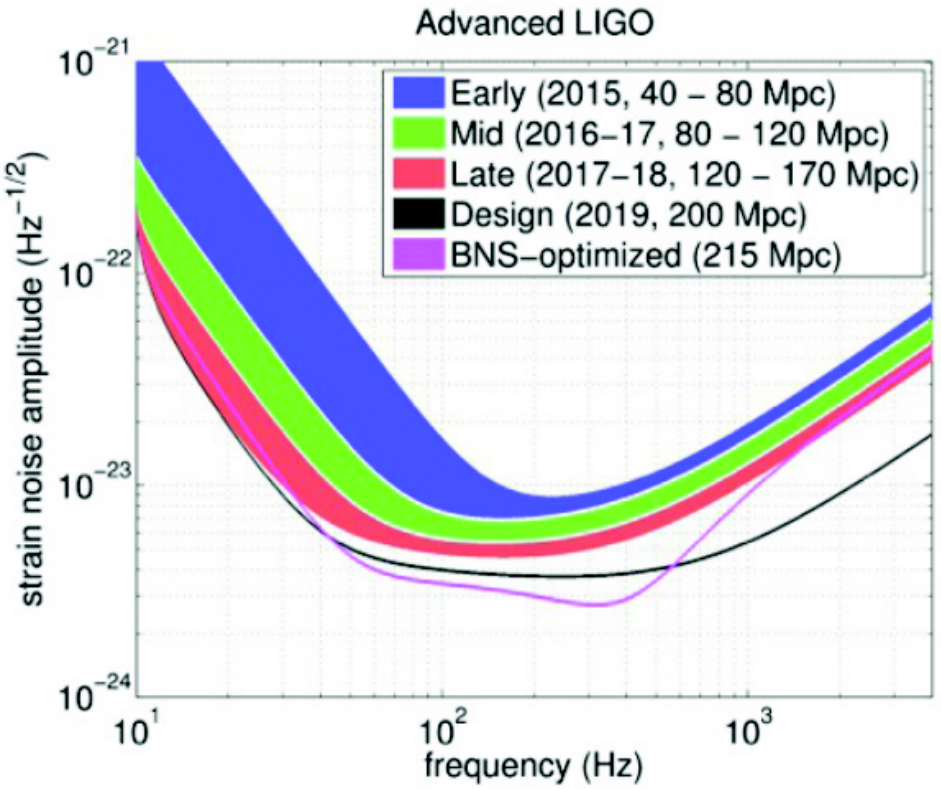
Παγκόσμιο Δίκτυο Συμβολόμετρων Ακτίνων Laser

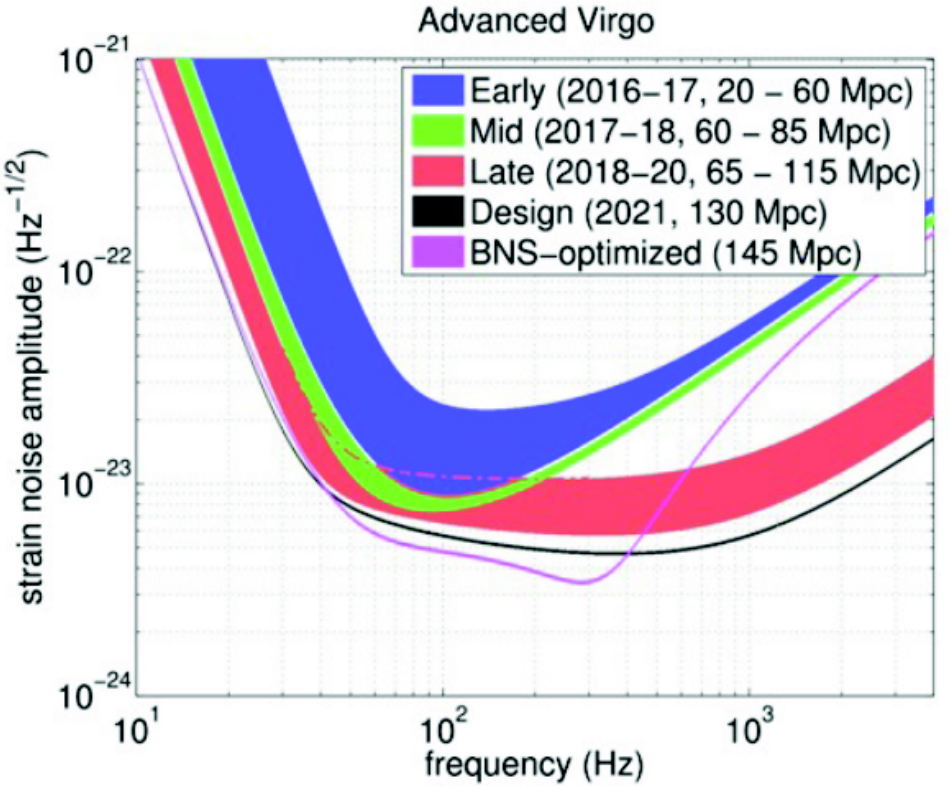
Σύντομα, όλοι οι συμβολομετρικοί ανιχνευτές θα λειτουργούν ως ένα *ενιαίο πείραμα*, το οποίο θα επιτρέπει τον *εντοπισμό θέσης* των διαφόρων πηγών.

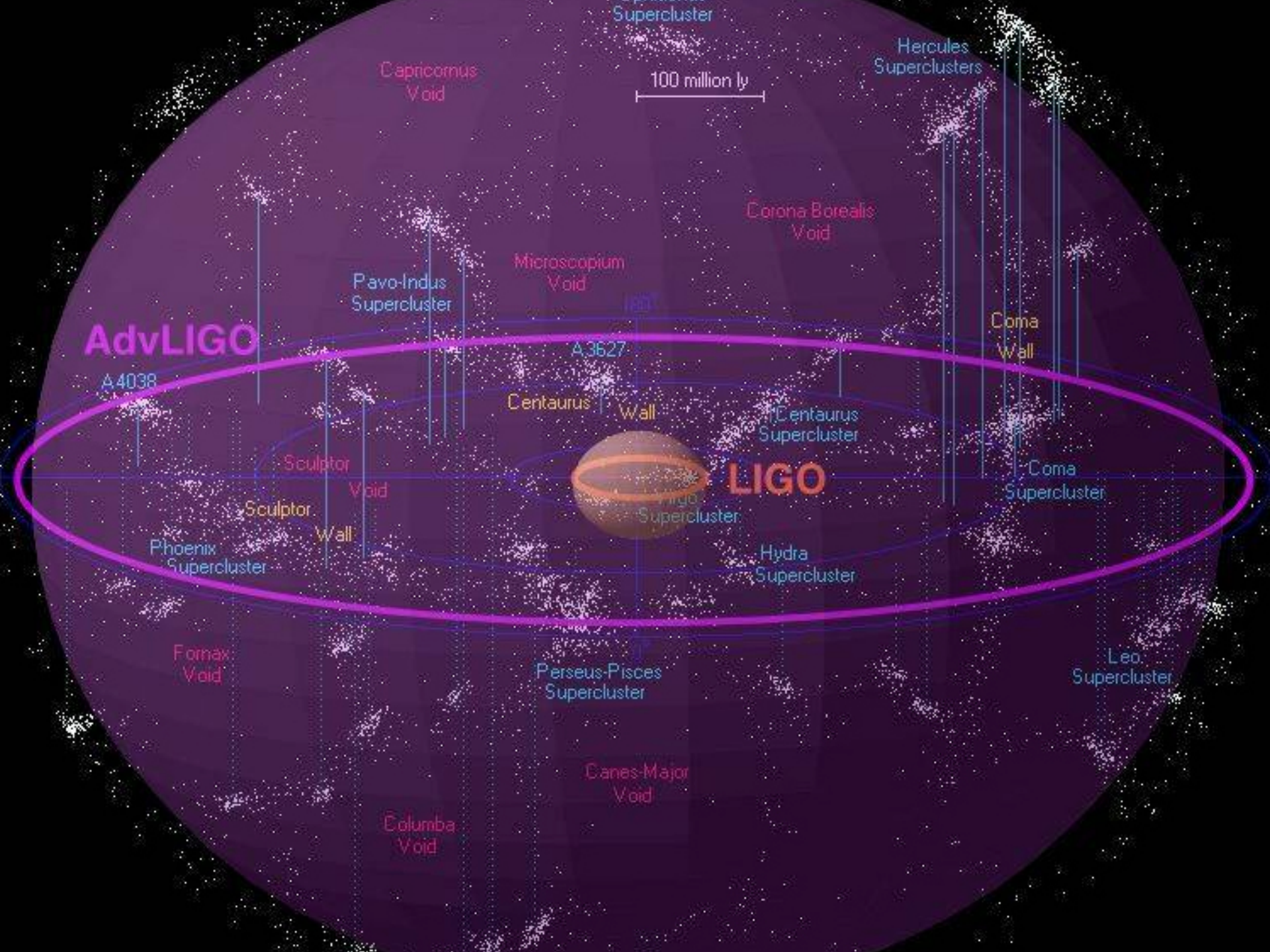


Συμβολομετρικοί Ανιχνευτές 2ης Γενιάς

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

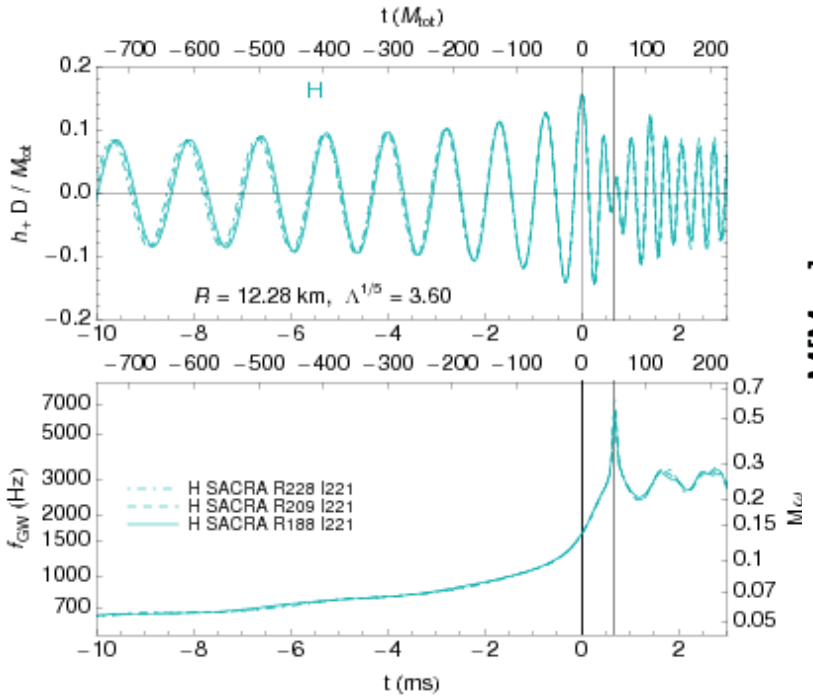


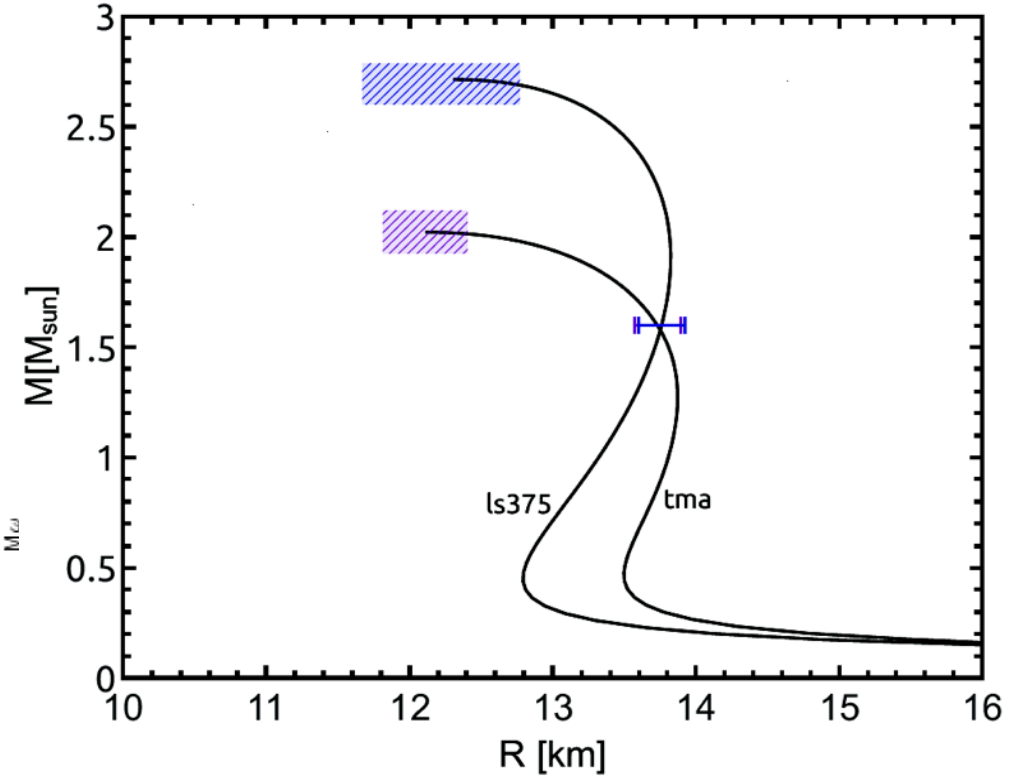



Capricornus Void
100 million ly
Hercules Superclusters
Corona Borealis Void
Microscopium Void
Pavo-Indus Supercluster
AdvLIGO
A3627
A4038
Coma Wall
Centaurus Wall
Centaurus Supercluster
Sculptor Void
LIGO
Coma Supercluster
Sculptor Wall
Virgo Supercluster
Phoenix Supercluster
Hydra Supercluster
Fornax Void
Perseus-Pisces Supercluster
Leo Supercluster
Canes Major Void
Columba Void

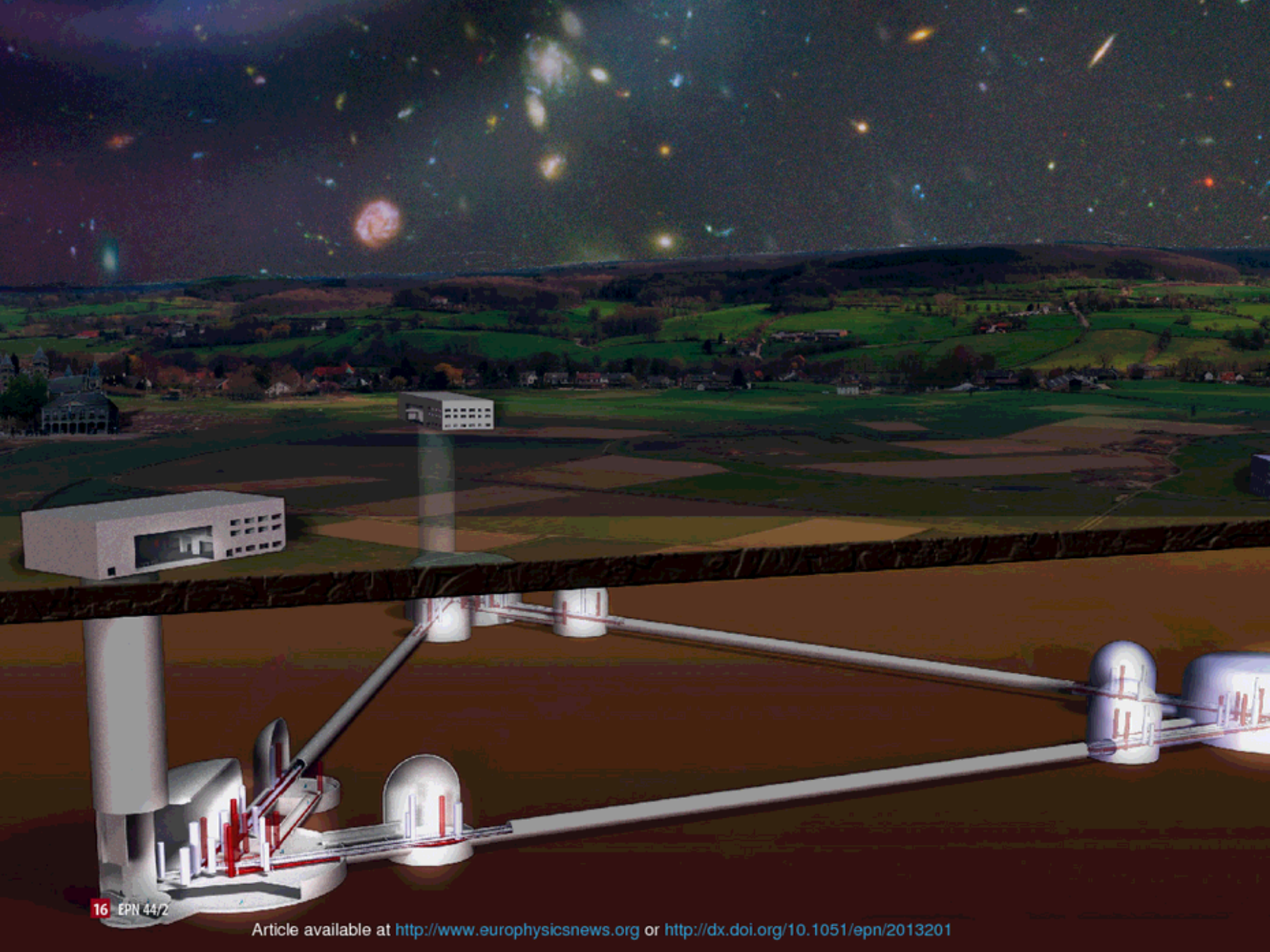
Ανίχνευση Συγχώνευσης Αστέρων Νετρονίων

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.

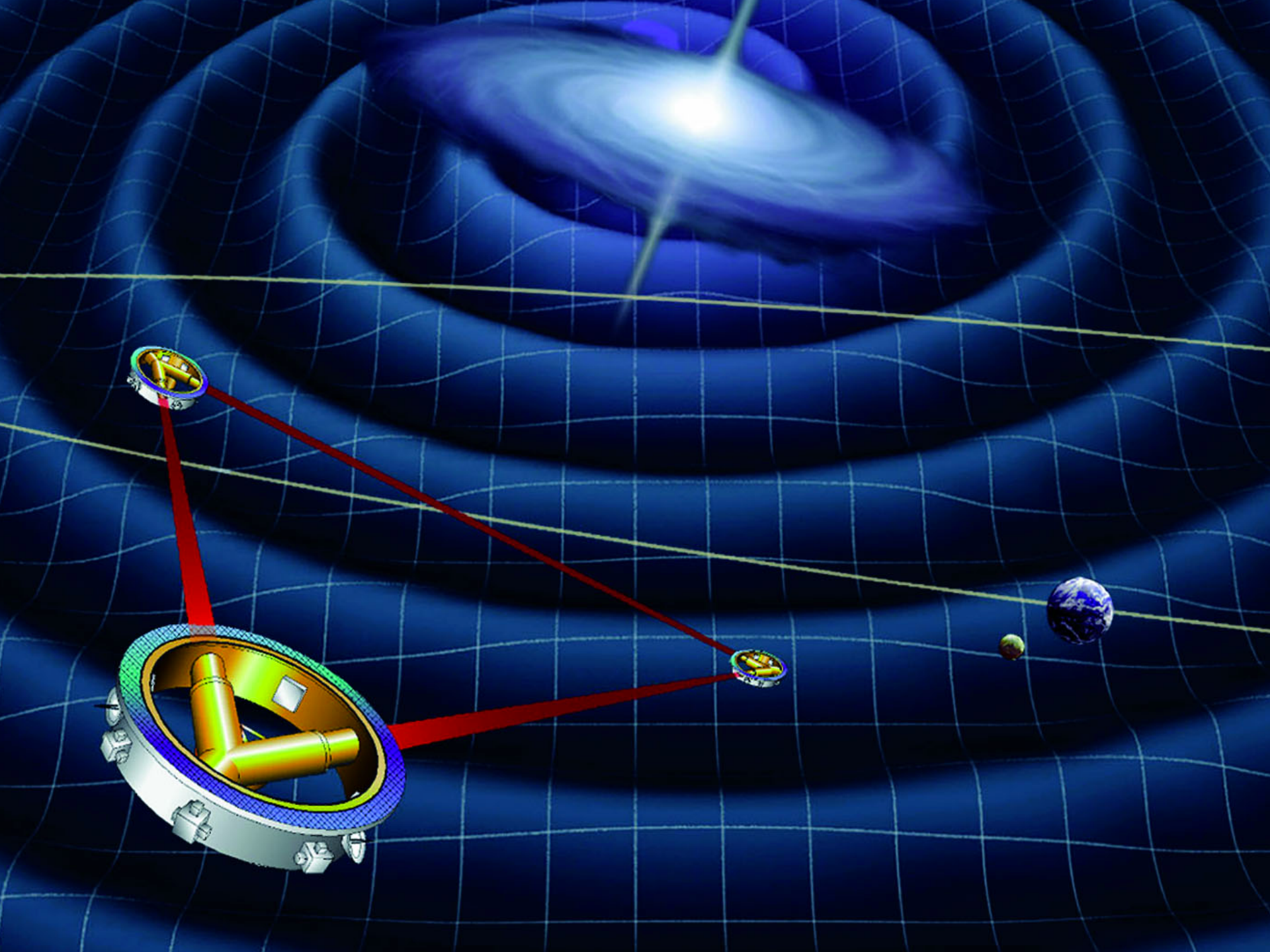




Η έρευνα στο ΑΠΘ υποστηρίζεται από υποτροφία Marie-Curie της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και από υποτροφία του πειράματος VIRGO.

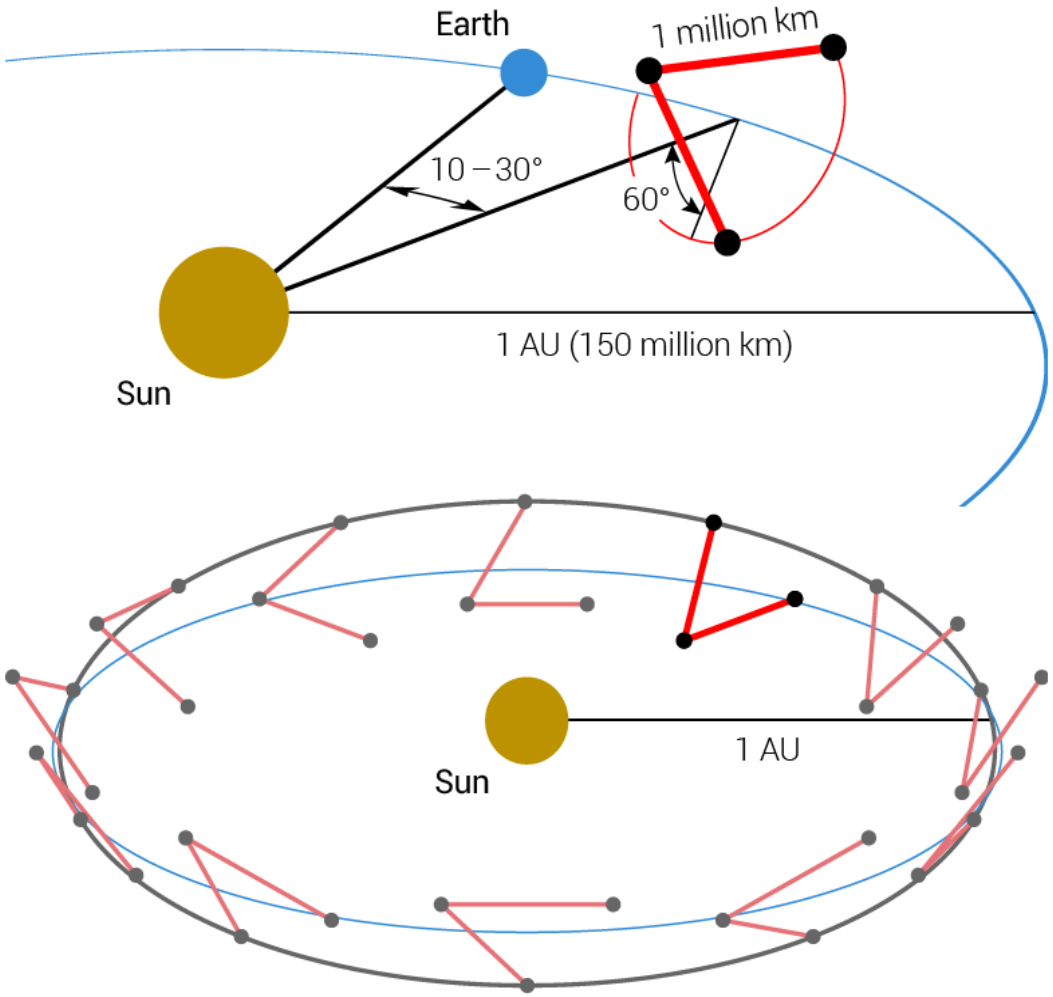


Article available at http://www.europhysicsnews.org or http://dx.doi.org/10.1051/epn/2013201

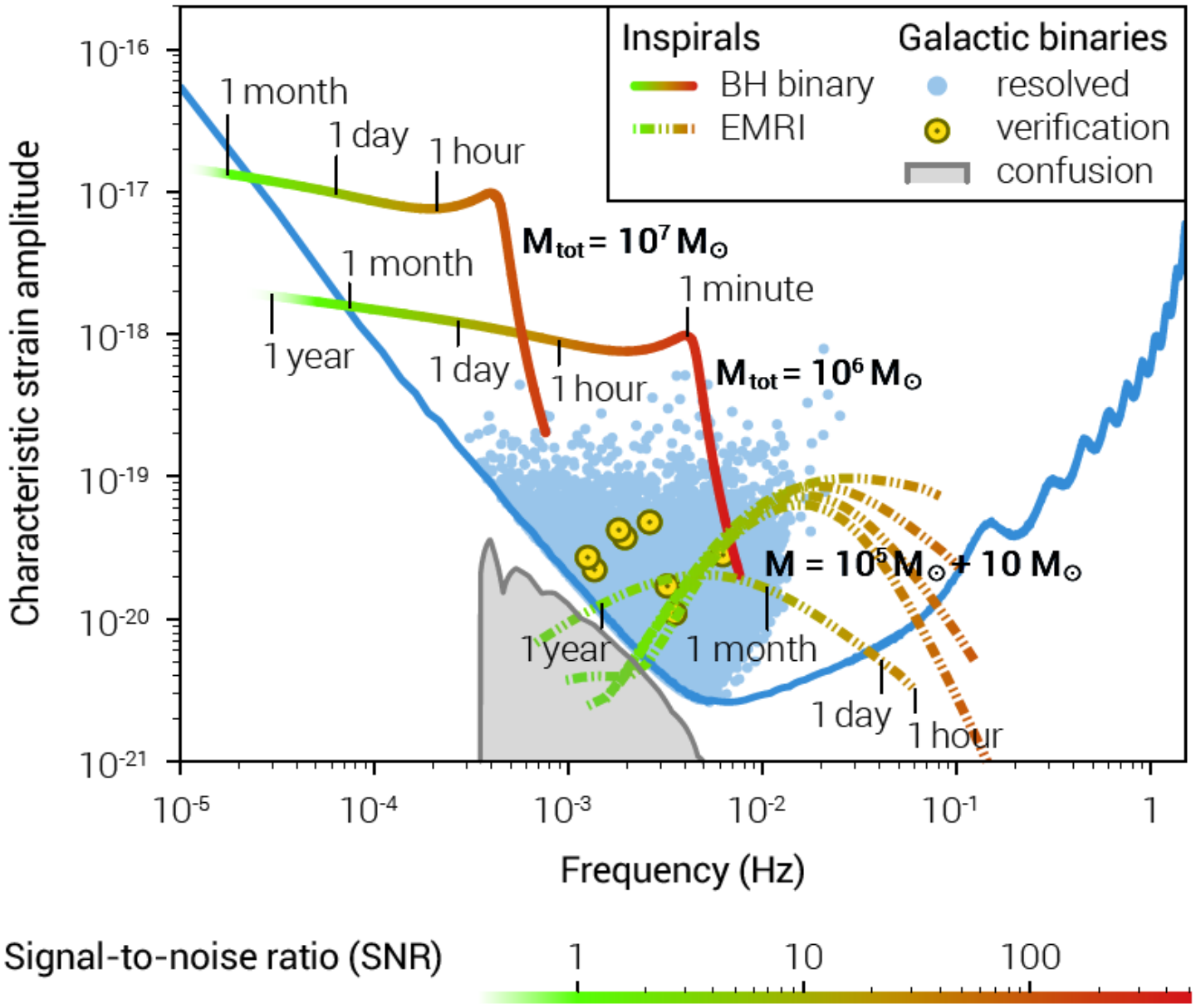


Διαστημικό Συμβολόμετρο eLISA

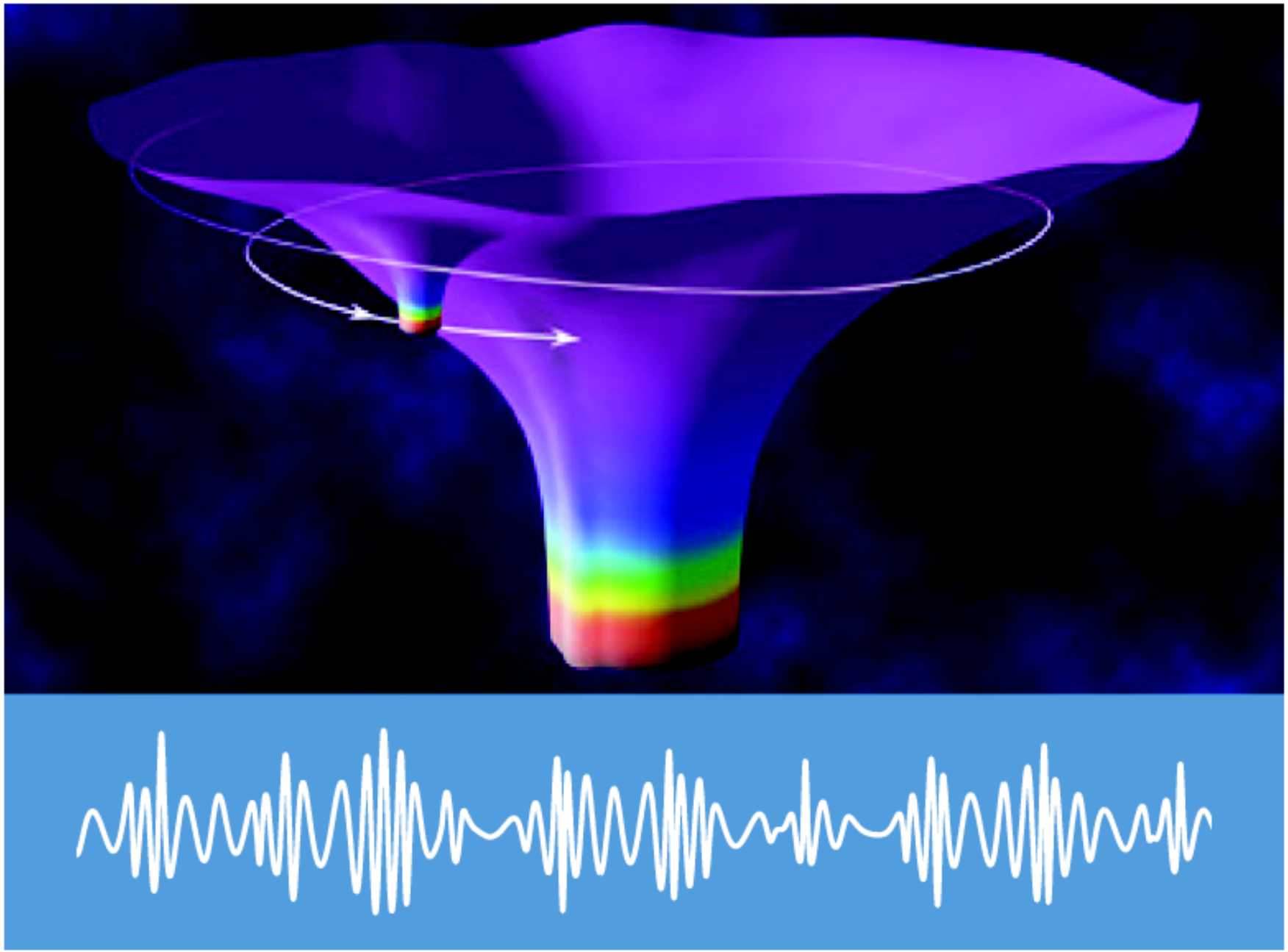
Για πηγές πολύ χαμηλών συχνοτήτων, χρειάζεται πολύ μεγάλο μήκος των ακτίνων laser.

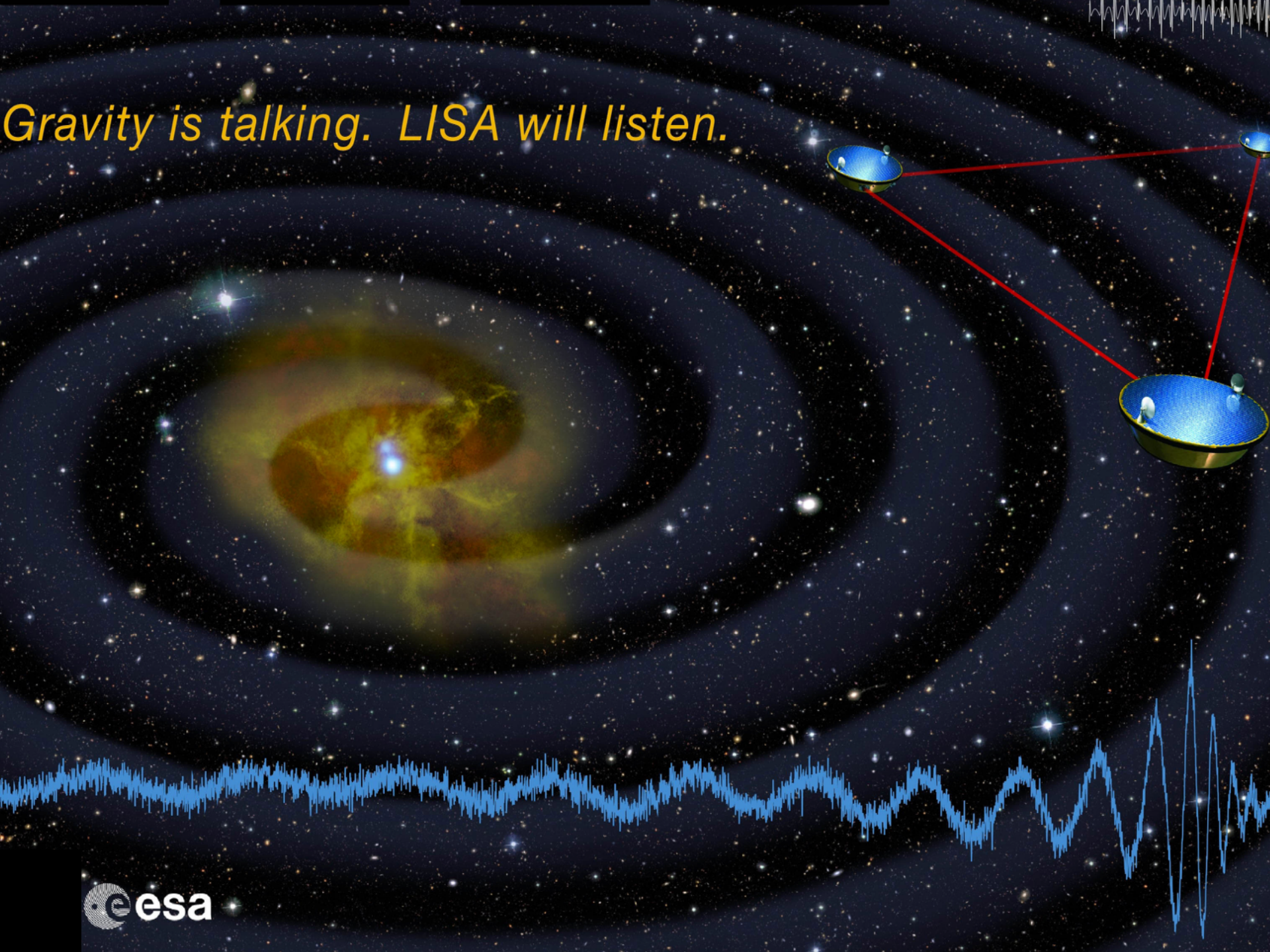


Διαστημικό Συμβολόμετρο eLISA

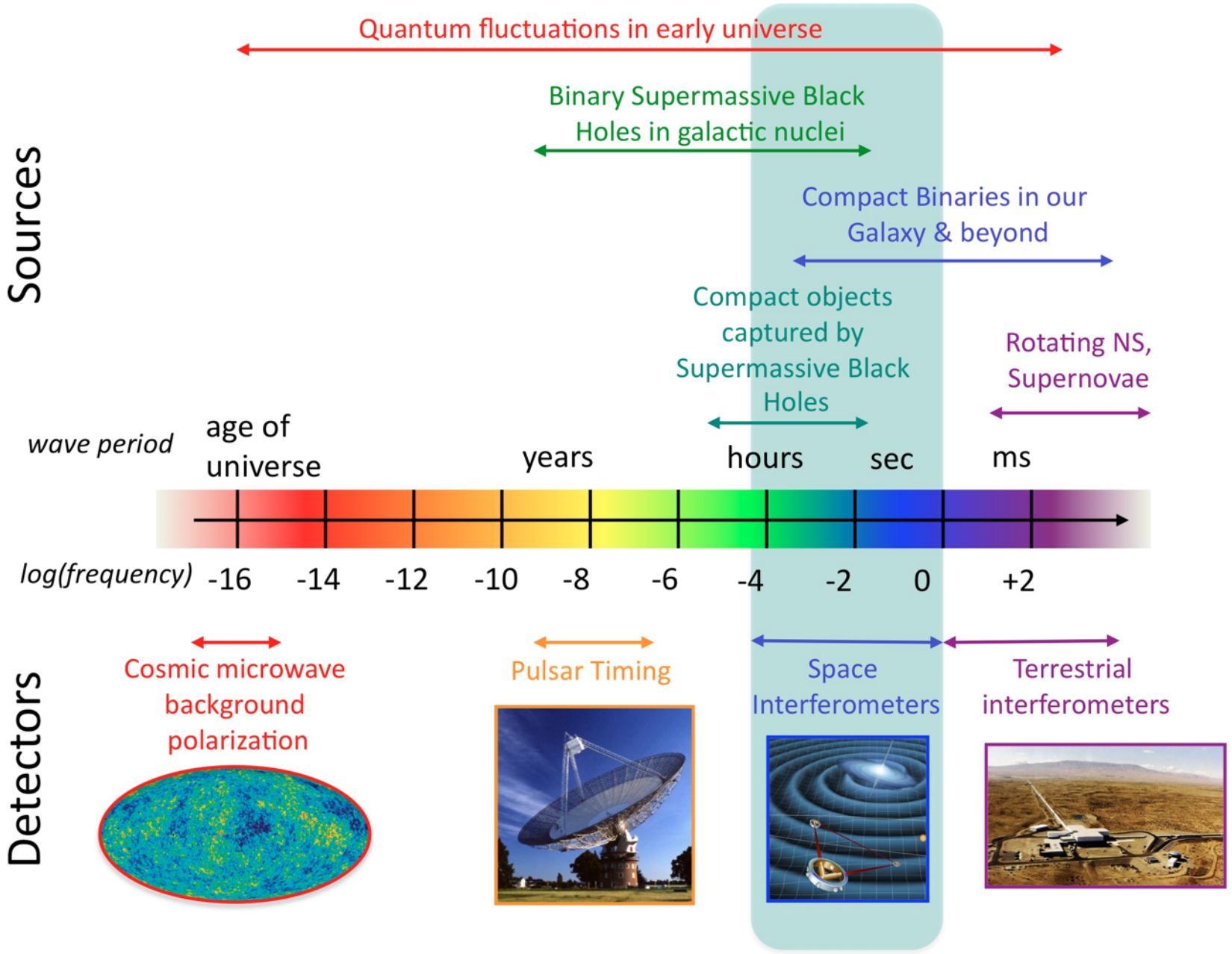


Ο "Ήχος" μιας Μελανής Οπής



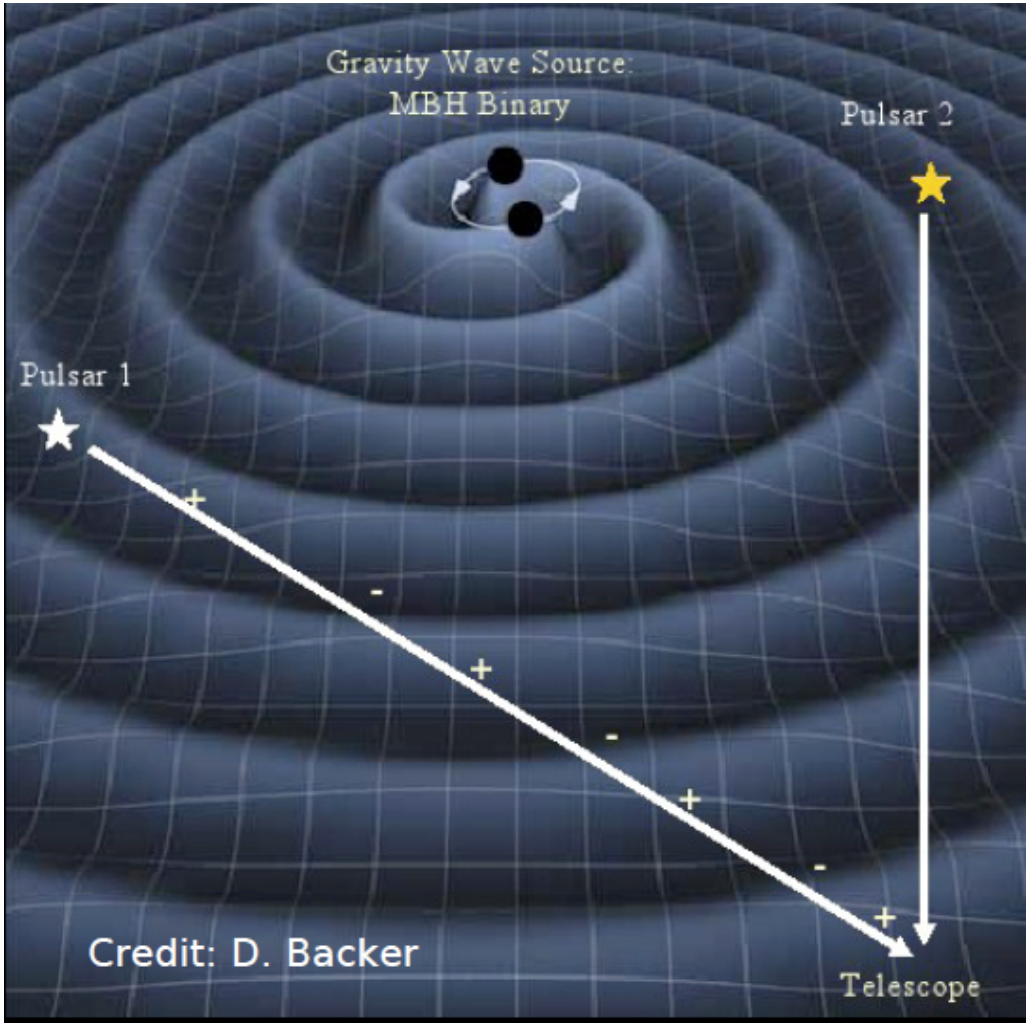

Gravity is talking. LISA will listen.
esa

The Gravitational Wave Spectrum



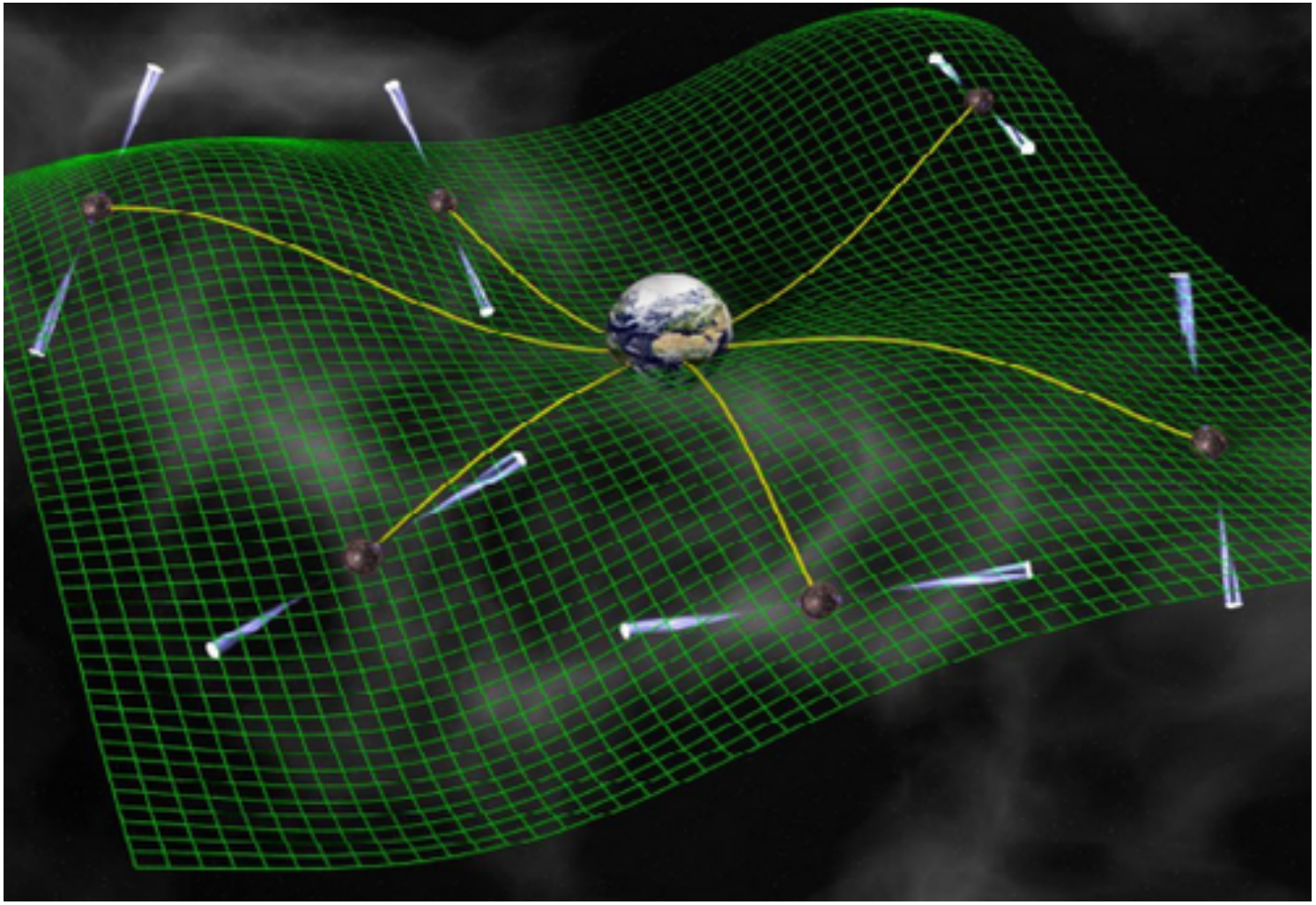
Ανίχνευση Βαρυτικών Κυμάτων μέσω Pulsar

Τα pulsar μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων.

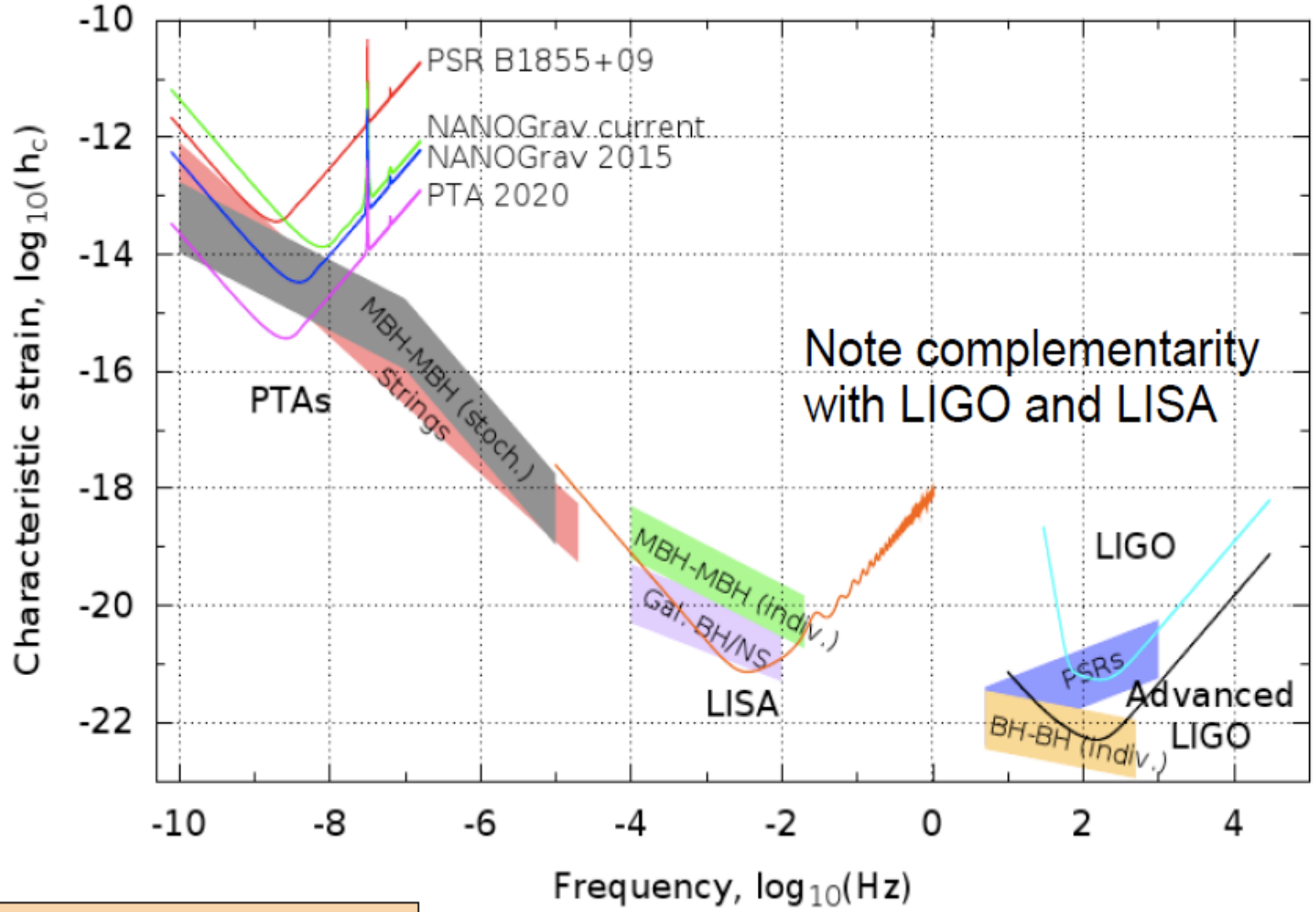


Ανίχνευση Βαρυτικών Κυμάτων μέσω Pulsar

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

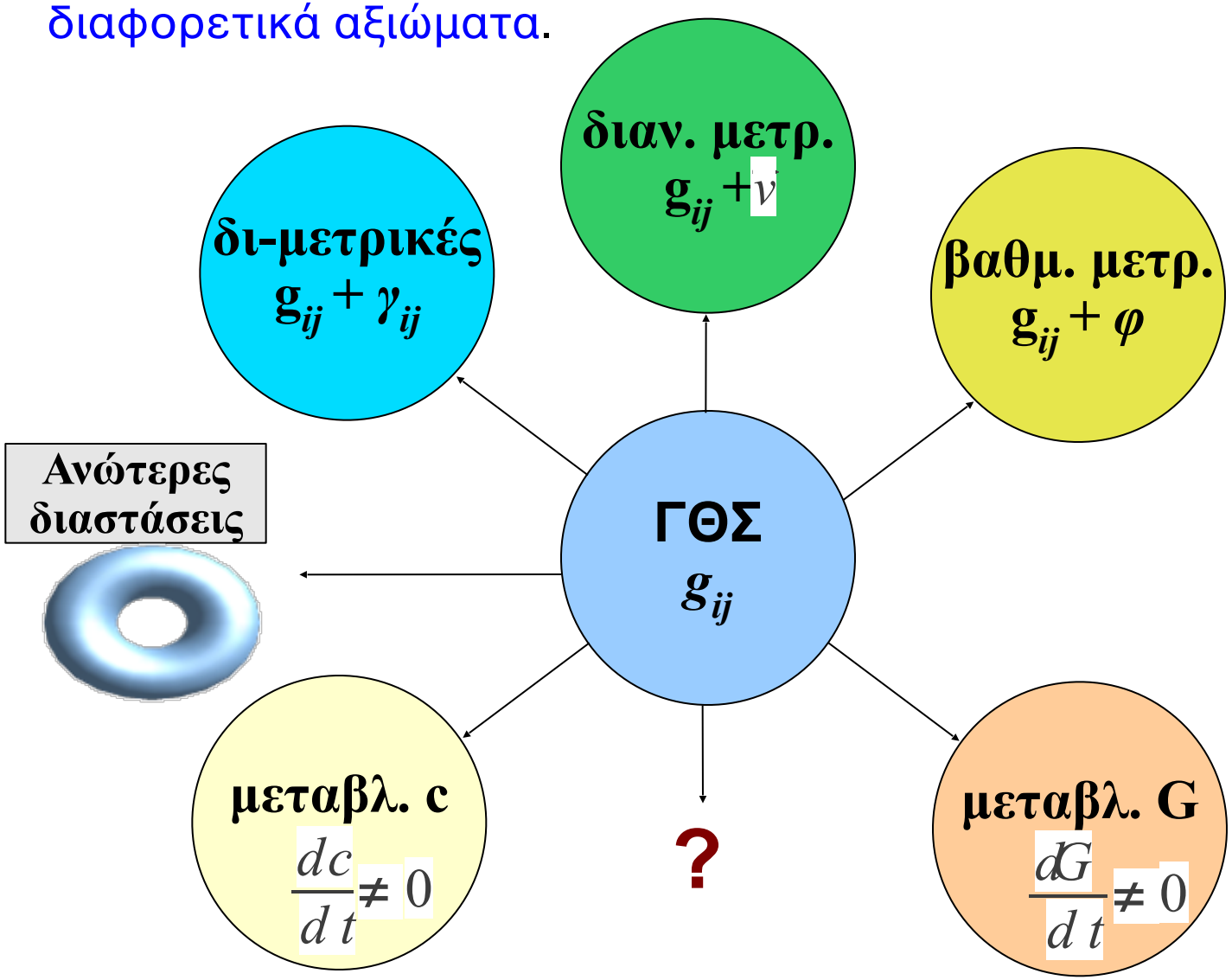


Ανίχνευση Βαρυτικών Κυμάτων μέσω Pulsar



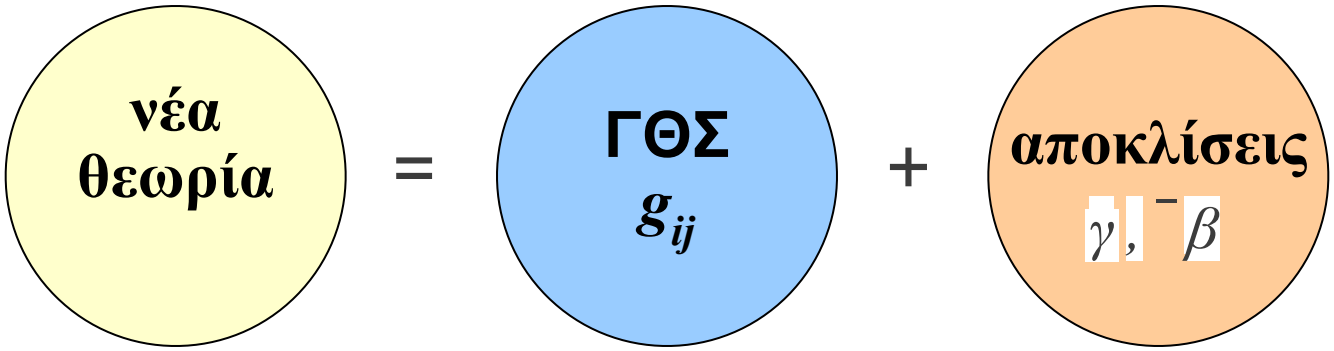
Επεκτάσεις της ΓΘΣ

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