

Τα Κύματα της Βαρύτητας

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΥΛΑΣ

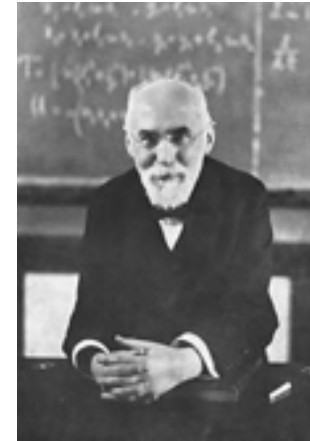
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



ΟΦΑ, 24/1/2015

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.

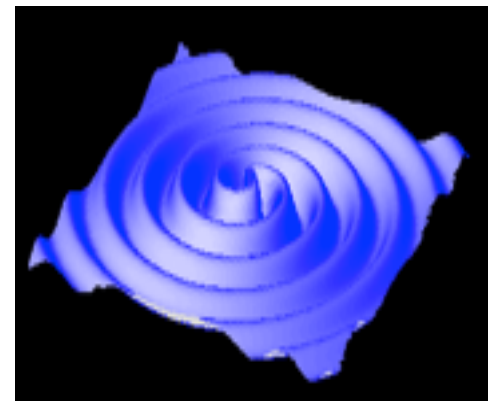


1905: ο Poincaré προτείνει την ύπαρξη βαρυτικών κυμάτων.



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

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



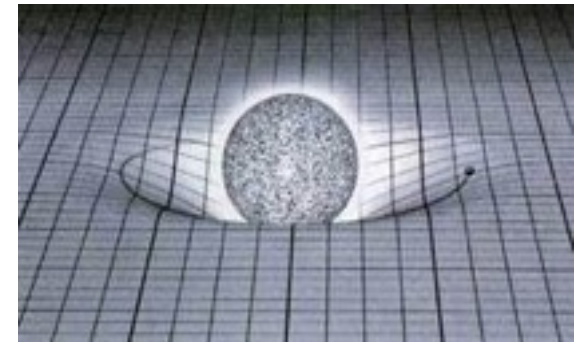
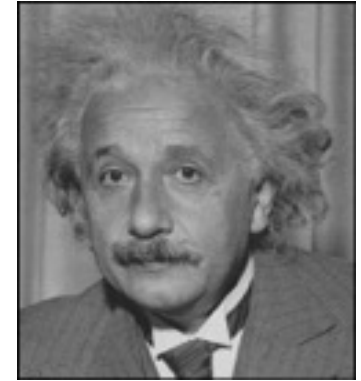
Γενική Θεωρία Σχετικότητας (ΓΘΣ)

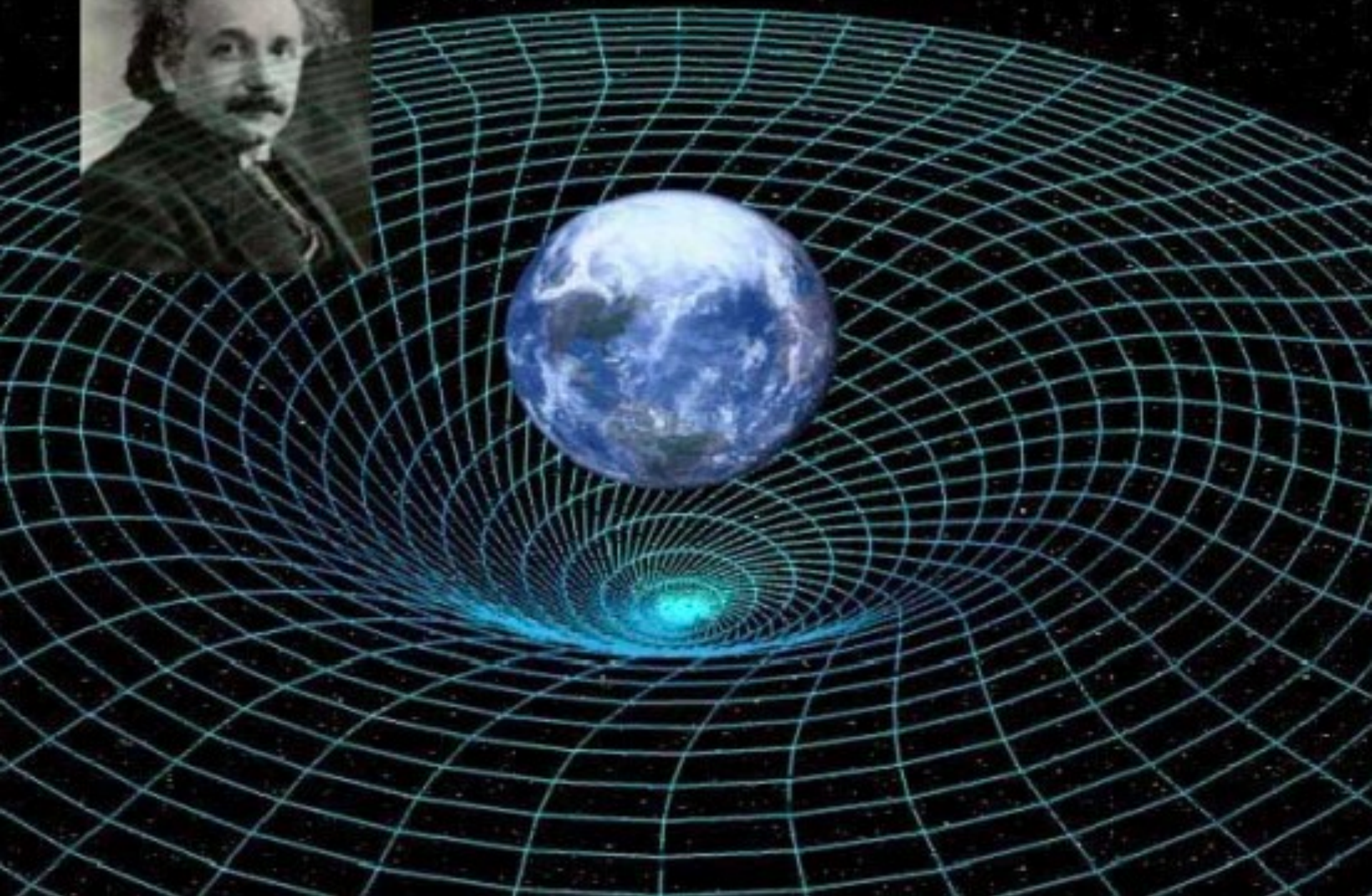
1915: Ο Einstein περιγράφει τη βαρύτητα ως μια *καμπύλωση* του 4-διάστατου *χωροχρόνου*.

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

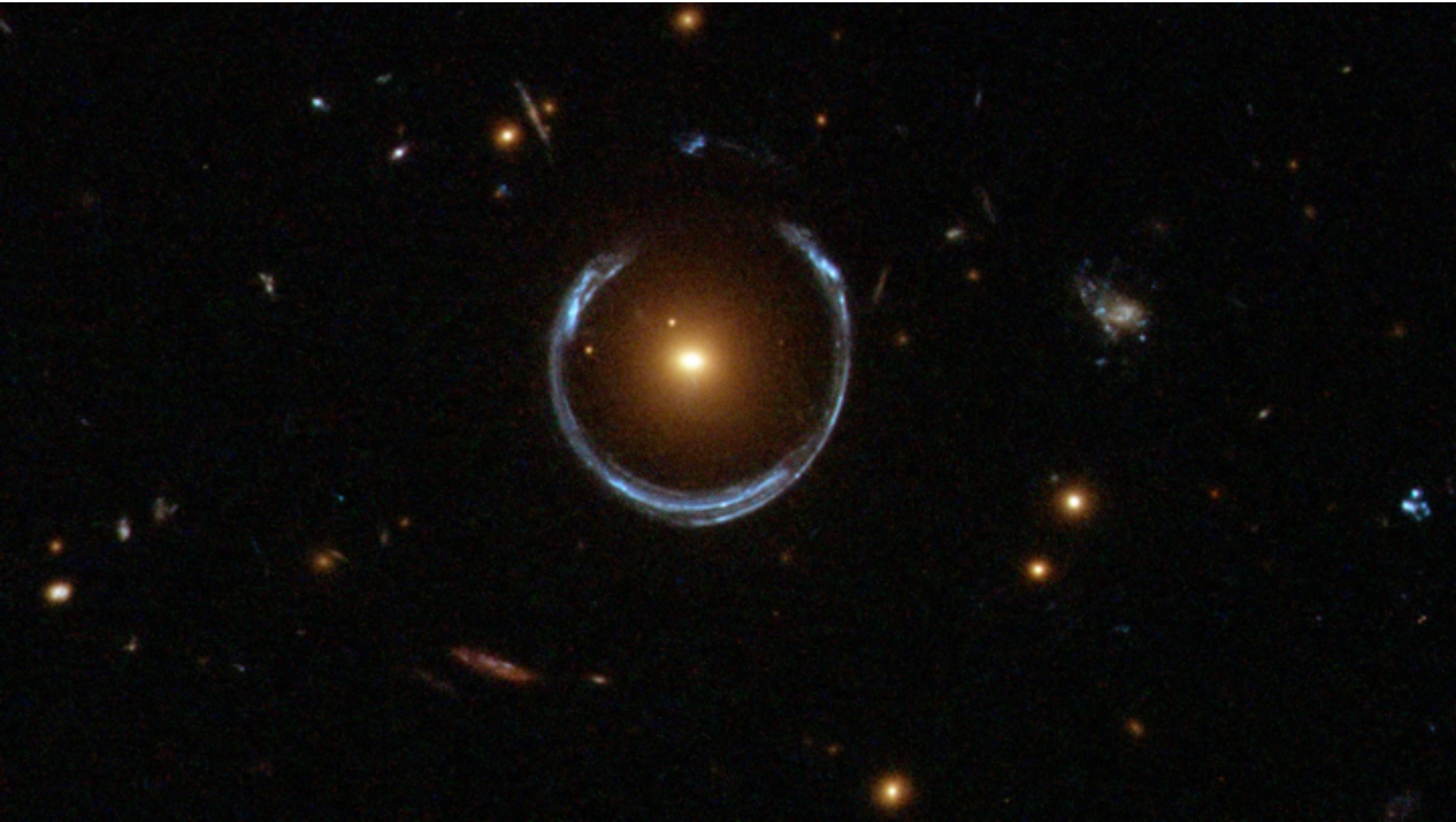
$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

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

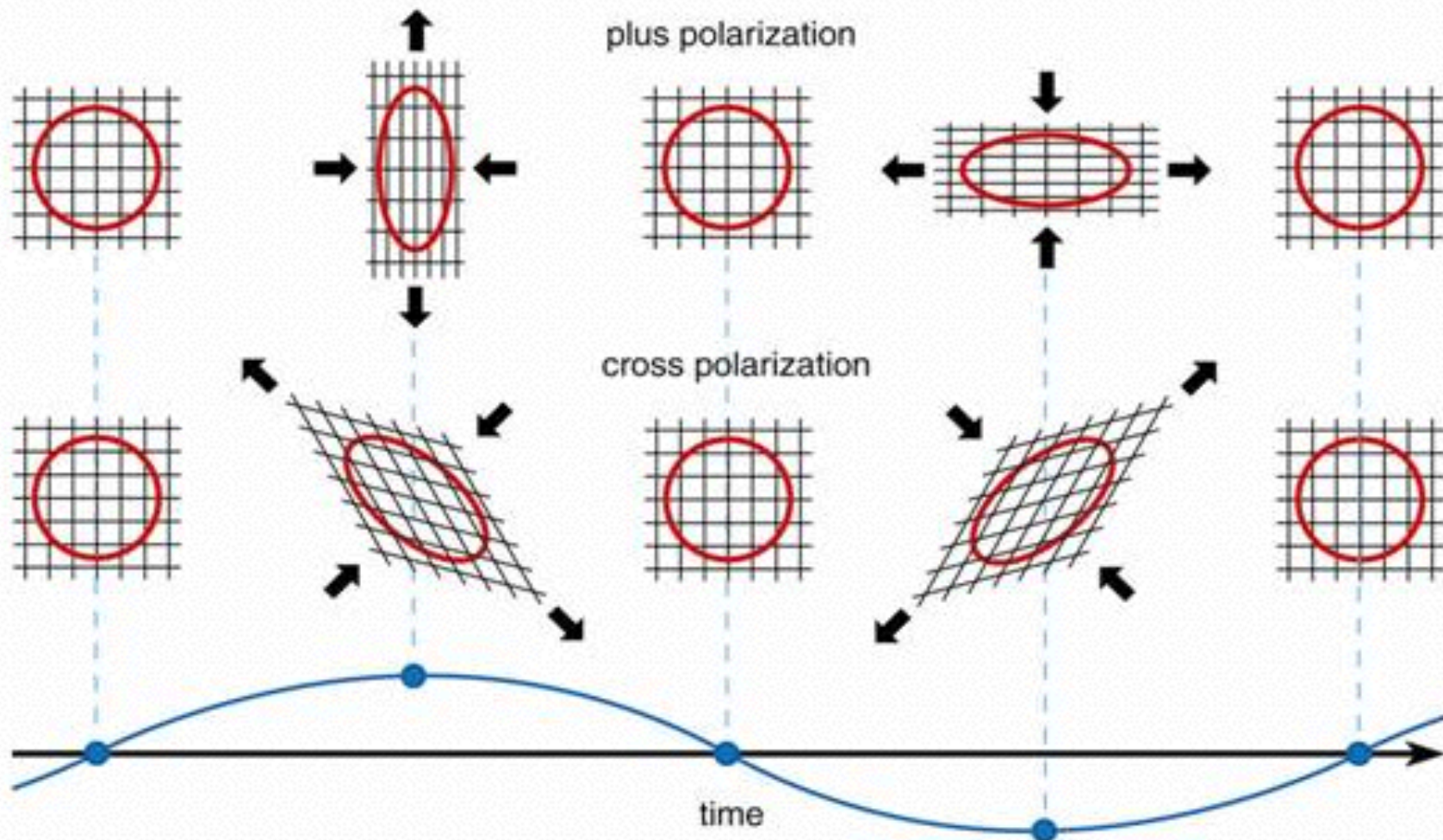
Ασθενής αλληλεπίδραση με την ύλη

Πόλωση + / x

Έχουν μήκος κύματος πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις της πηγής

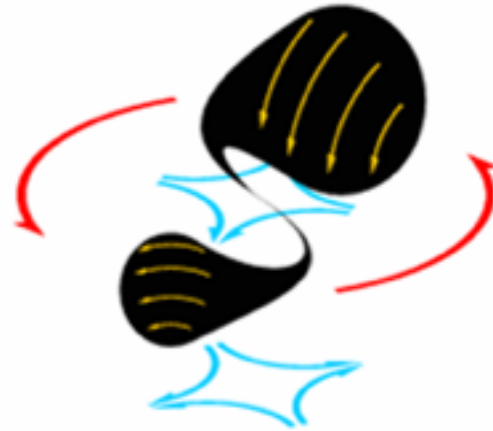
Πόλωση των Βαρυτικών Κυμάτων

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



Πλάτος Βαρυτικών Κυμάτων

Η πηγή των βαρυτικών κυμάτων είναι μη-αξονικά συμμετρικές χρονικές μεταβολές της μάζας (δm , τουλάχιστον τετραπολικές).



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

$$h \sim \frac{\Omega^2 \delta m}{r}$$

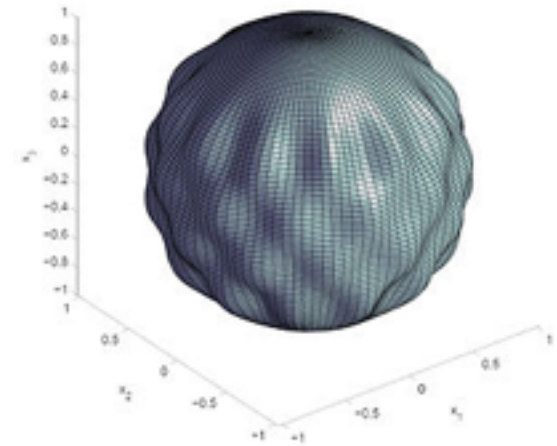
όπου r είναι η απόσταση της πηγής από εμάς.

Παράδειγμα: Ταλάντωση ενός Αστέρρα Νετρονίων

Ακτίνα: $R=10$ km

Συχνότητα: $f = 2000$ Hz

Απόσταση: $r = 70$ εκατομμύρια έτη φωτός



Ροή ενέργειας βαρυτικών κυμάτων στη Γη:

$0.6 \text{ W / m}^2 / \text{s}$ > ηλεκτρομαγνητική ροή της Σελήνης !

Λόγω της πολύ ασθενούς αλληλεπίδρασης των βαρυτικών κυμάτων με την ύλη, προκαλείται μια *διαφορά μήκους* μόλις

1% της ακτίνας ενός πρωτονίου (!)

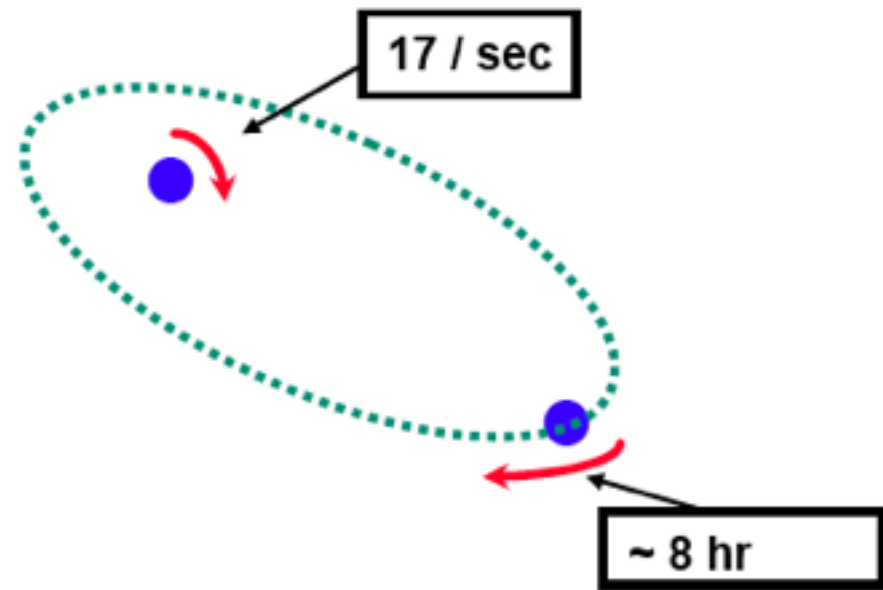
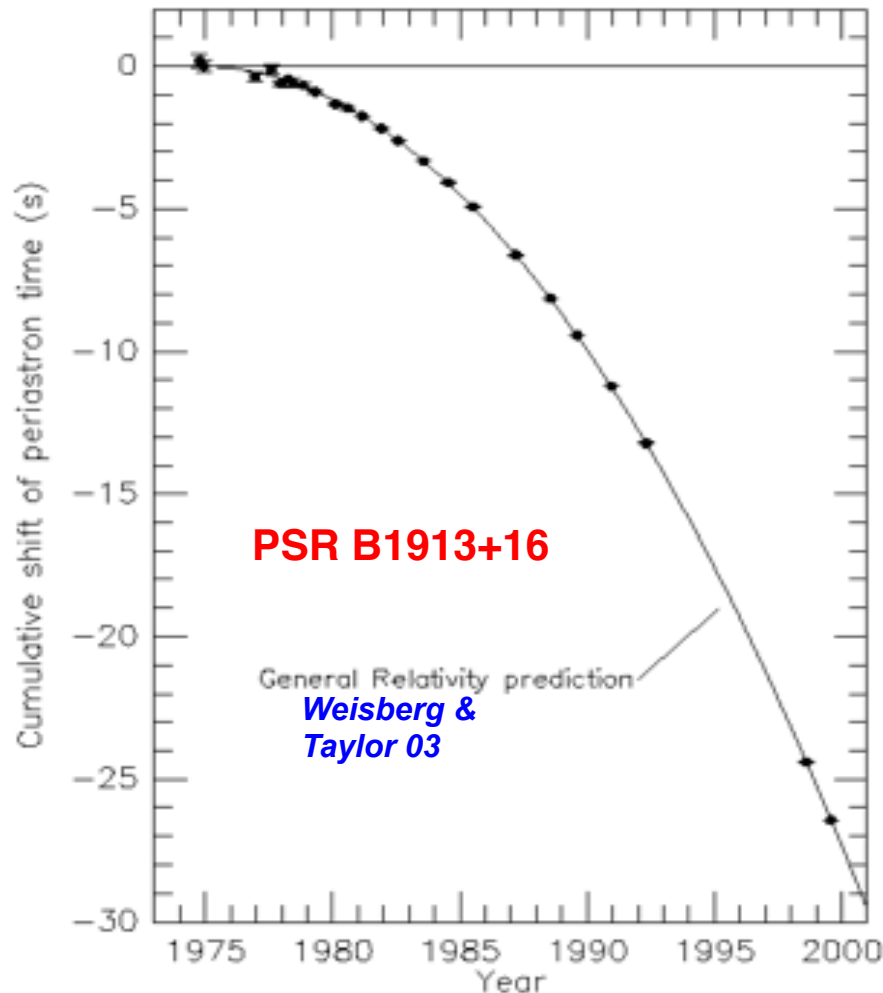
σε έναν ανιχνευτή μήκους 4 km.

Το πλάτος του βαρυτικού κύματος είναι $h \sim 10^{-21}$

Διπλά Συστήματα Αστέρων Νετρονίων

Βραβείο Νόμπελ 1993 στους Hulse & Taylor

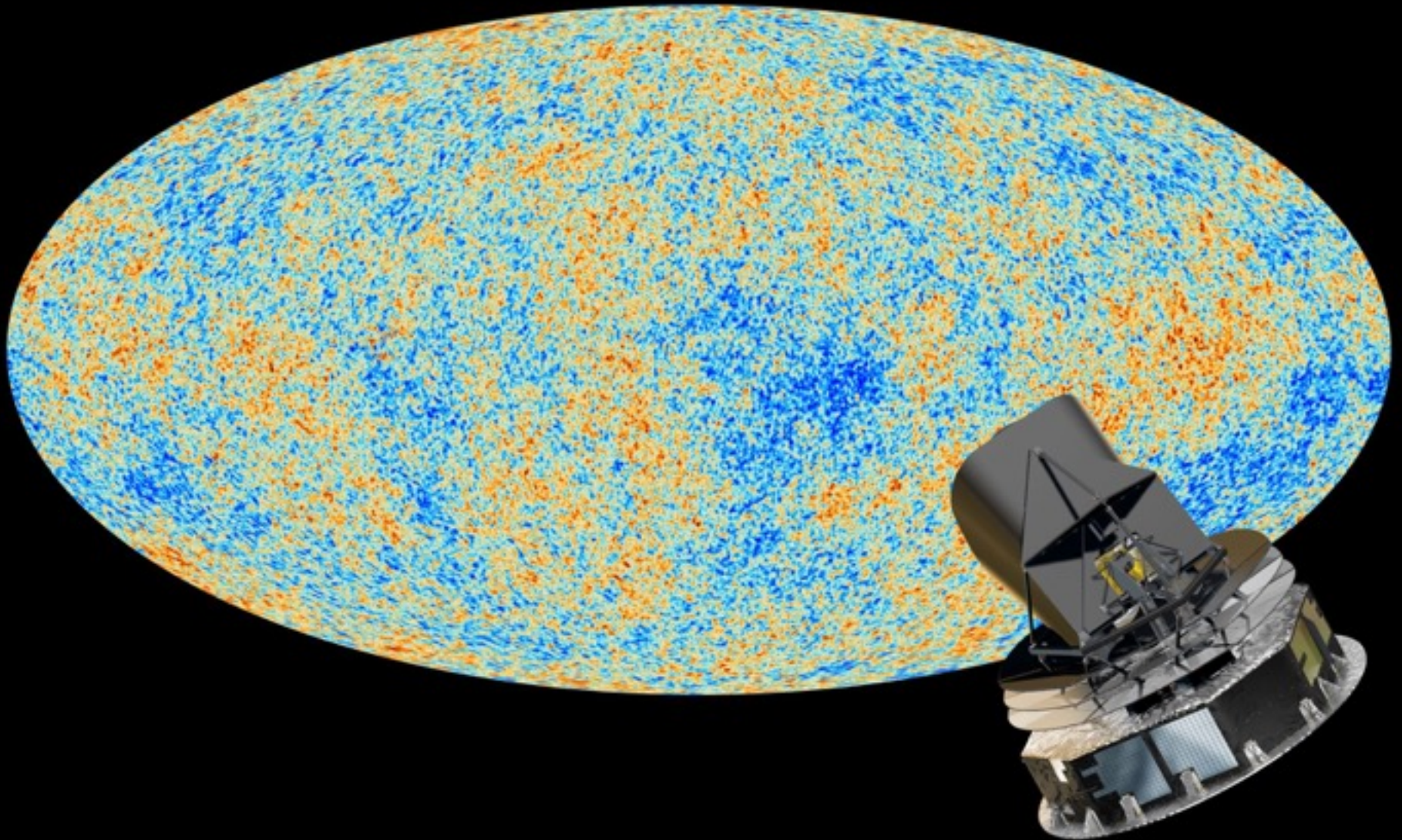
Η πρώτη έμμεση επιβεβαίωση της ύπαρξης των βαρυτικών κυμάτων!



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

Κοσμική Ακτινοβολία Υποβάθρου

Θερμοκρασία: 2.7 Κ. Διαταραχές: $< 10 \mu\text{K}$ (αποστολή Planck της ESA)



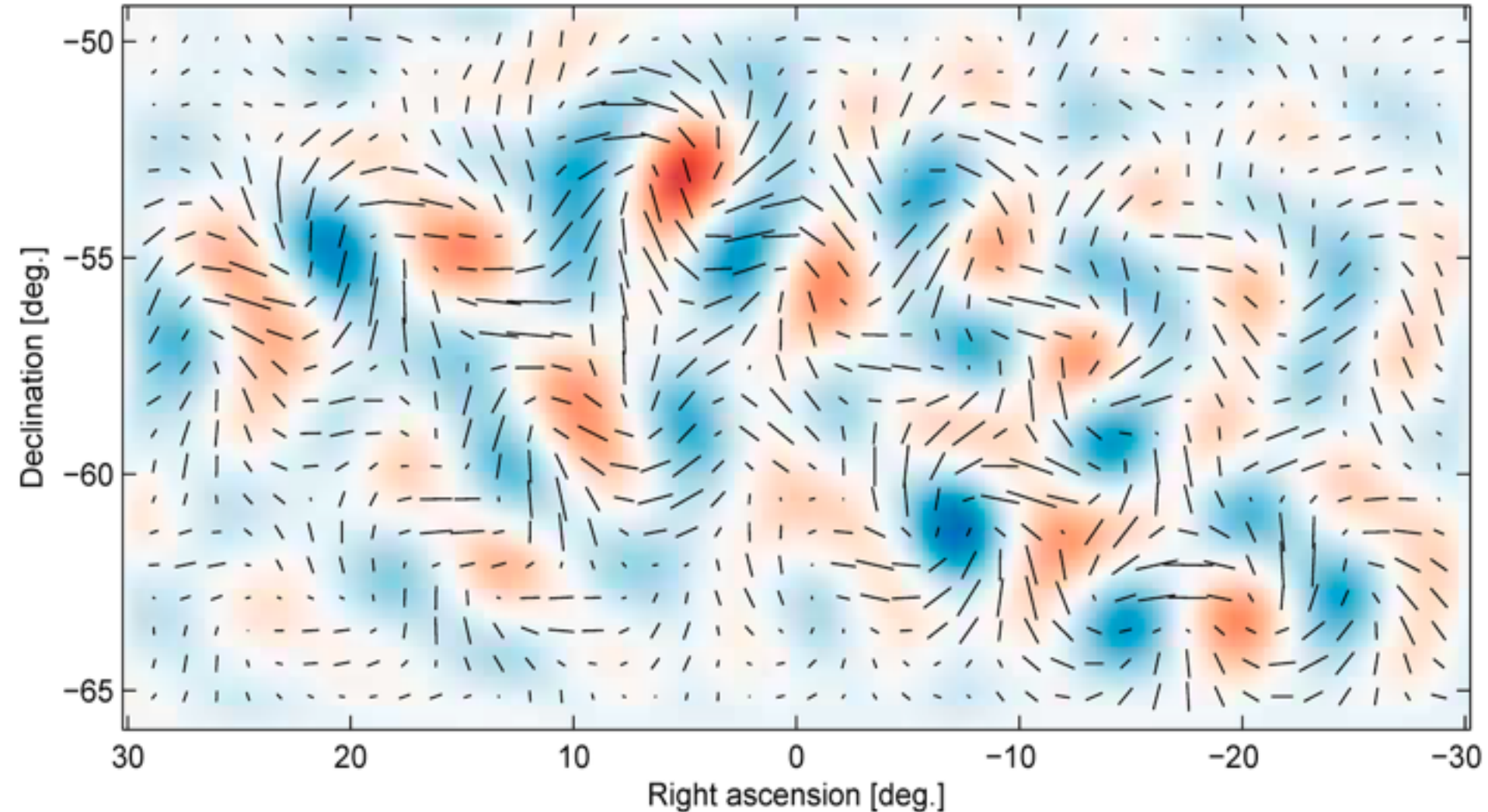
Πείραμα ΒΙΣΕΡ-2



Αποτύπωμα Βαρυτικών Κυμάτων

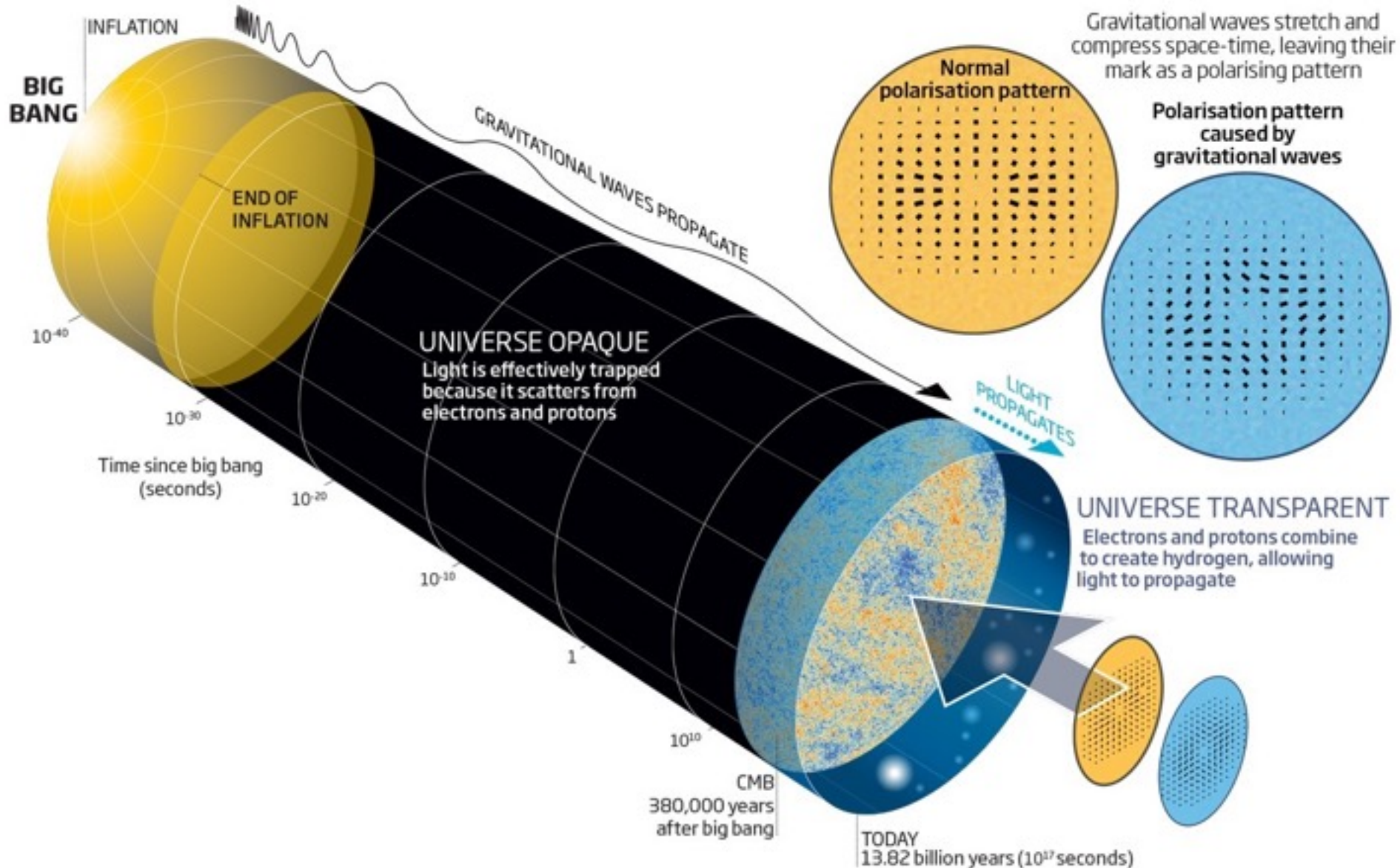
Η διέλευση ισχυρών βαρυτικών κυμάτων θα έπρεπε να αφήσει ένα χαρακτηριστικό αποτύπωμα (πόλωση B).

BICEP2 B-mode signal



Το 'Κανονικό' Κοσμολογικό Μοντέλο

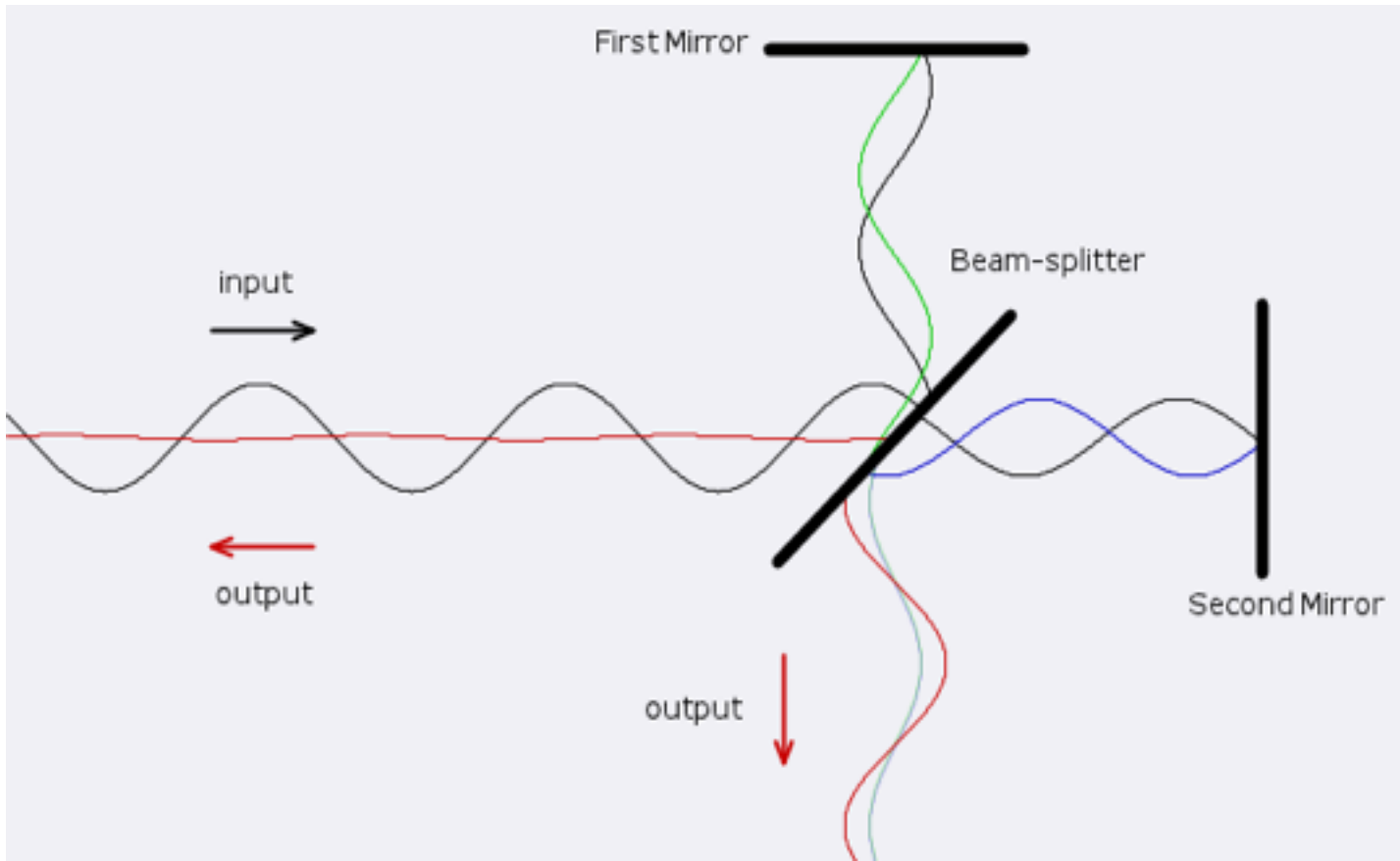
Το απλούστερο μοντέλο προβλέπει την ύπαρξη μιας αρχικής φάσης πληθωριστικής επέκτασης του Σύμπαντος.



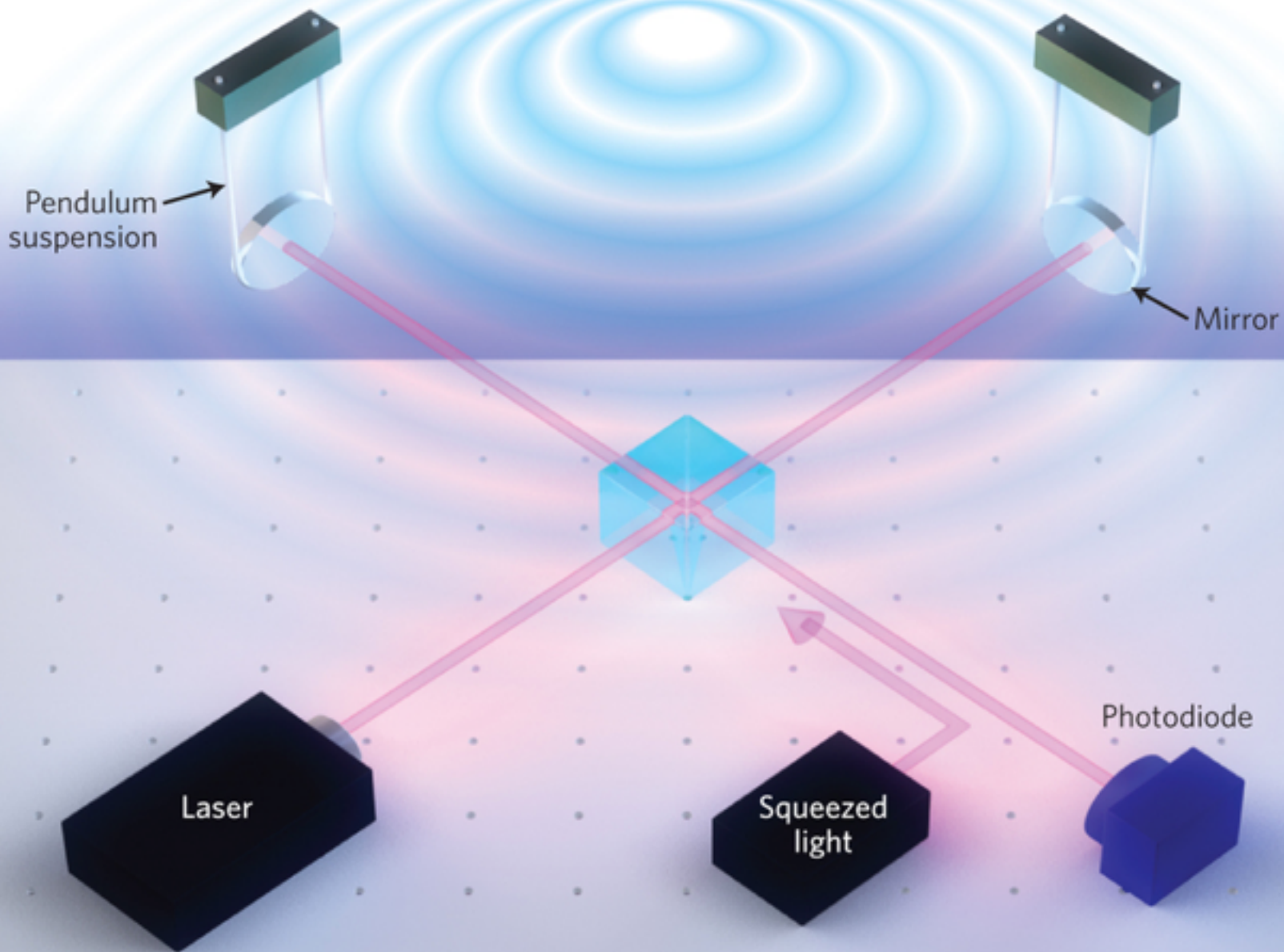
Συμβολόμετρο Ακτίνων Laser

Ουσιαστικά πρόκειται για μια μεγάλης κλίμακας **διάταξη τύπου Michelson-Morley**. Επειδή το μήκος κύματος των βαρυτικών κυμάτων είναι μεγαλύτερο από το μήκος των ακτίνων laser, χρησιμοποιείται **πολλαπλή ανάκλαση** (optical cavity) 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

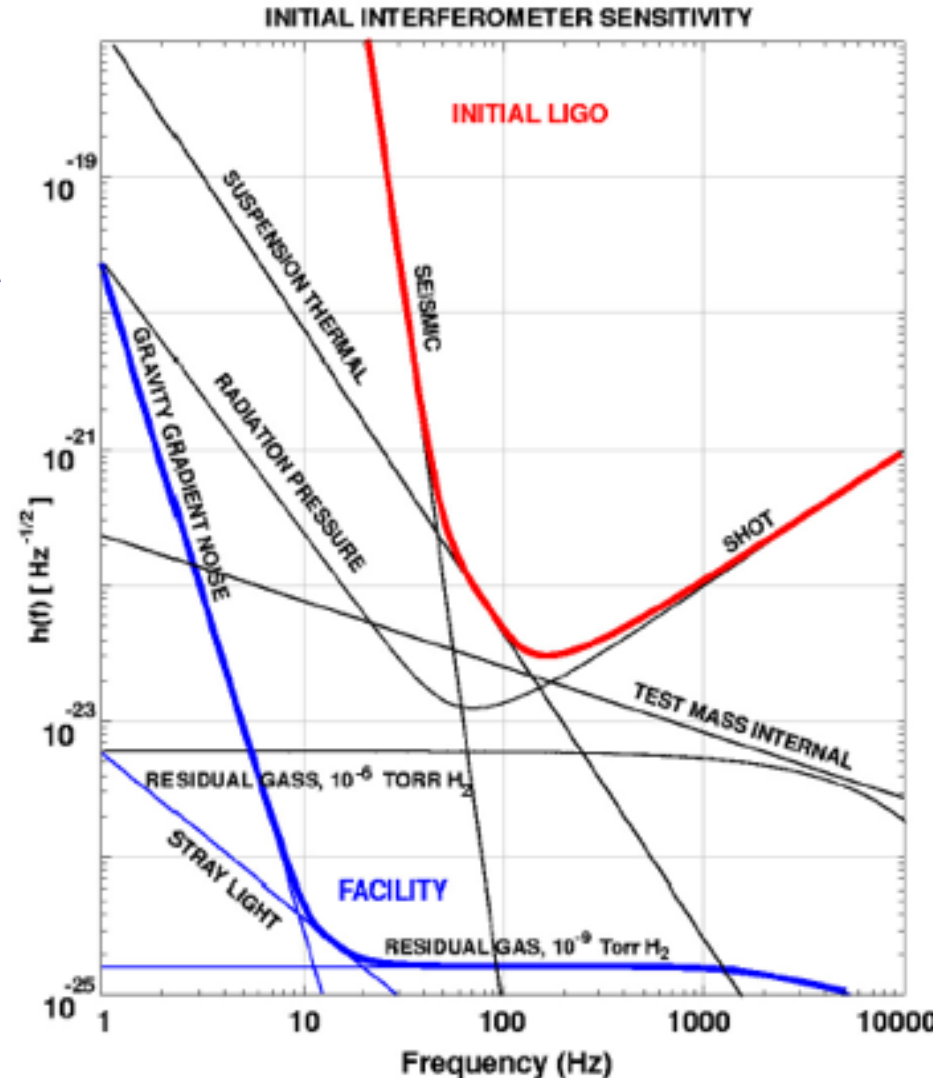
Τοπικές μεταβολές της βαρύτητας (ένα πουλί που πετά σε απόσταση 50m προκαλεί διαταραχές της τάξης 10^{-16} στη συχνότητα 1Hz !)

Στις μεσαίες συχνότητες:

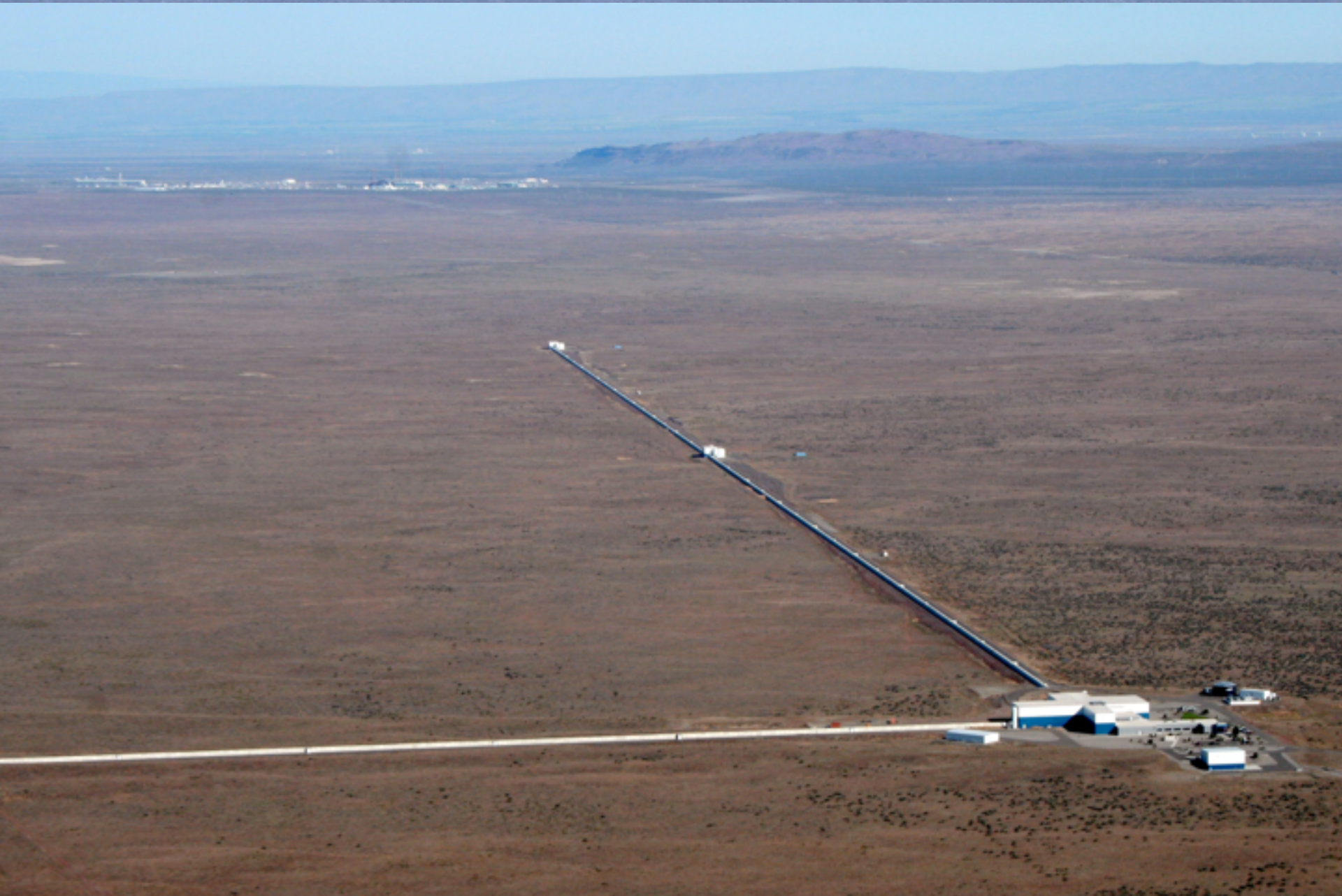
Θερμικός θόρυβος

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)

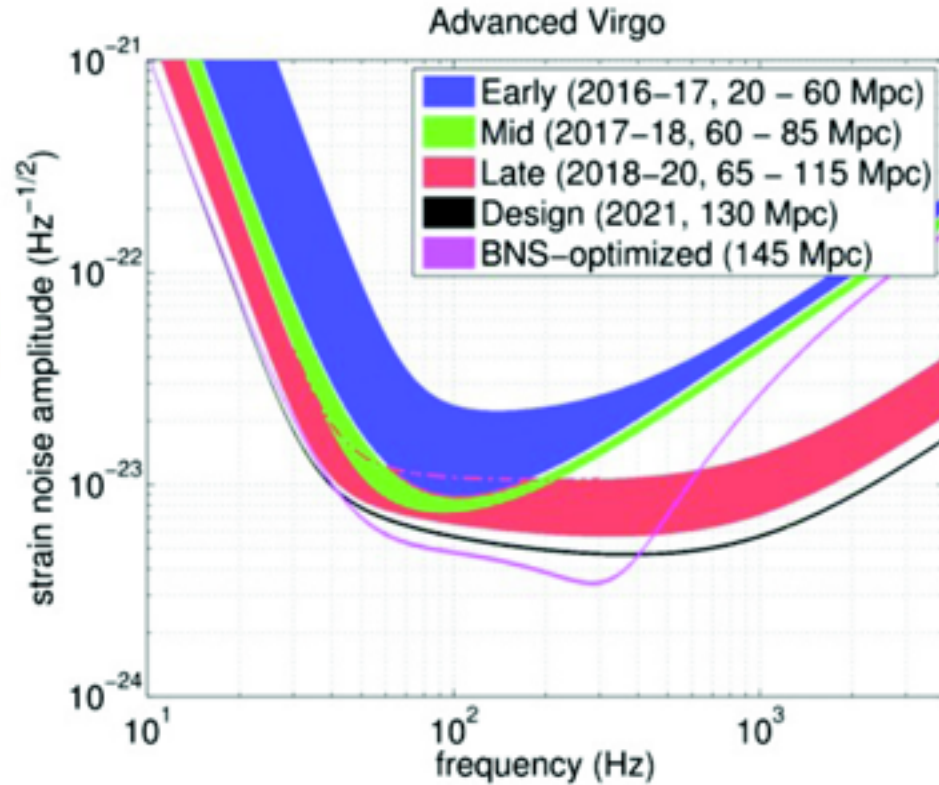
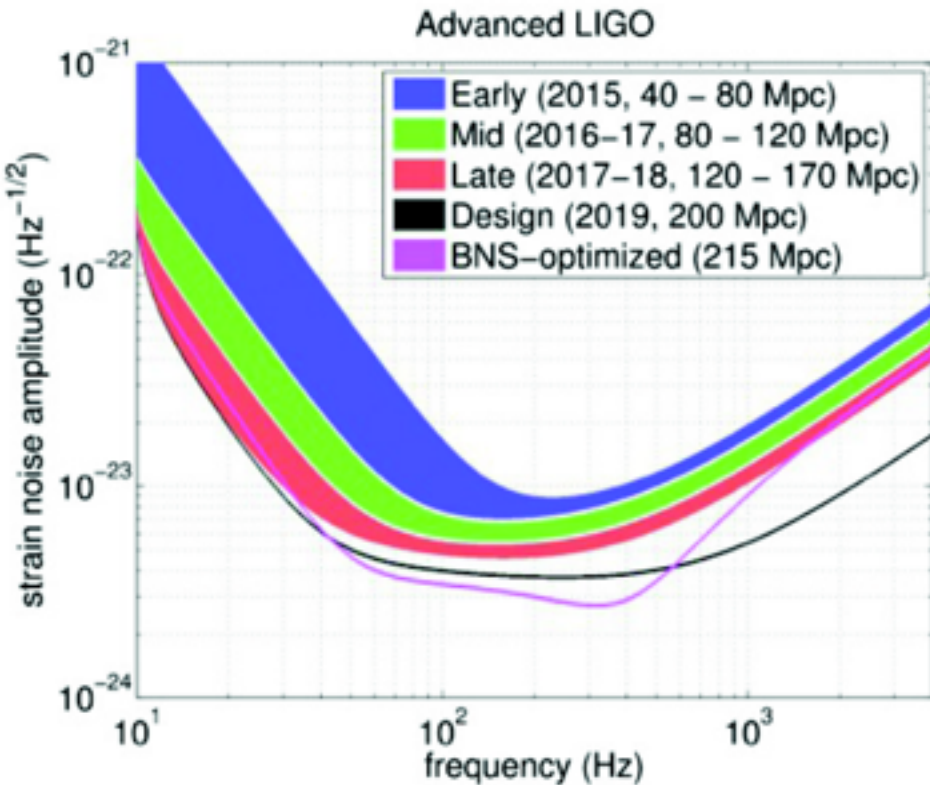
Παγκόσμιο Δίκτυο Συμβολόμετρων Ακτίνων Laser

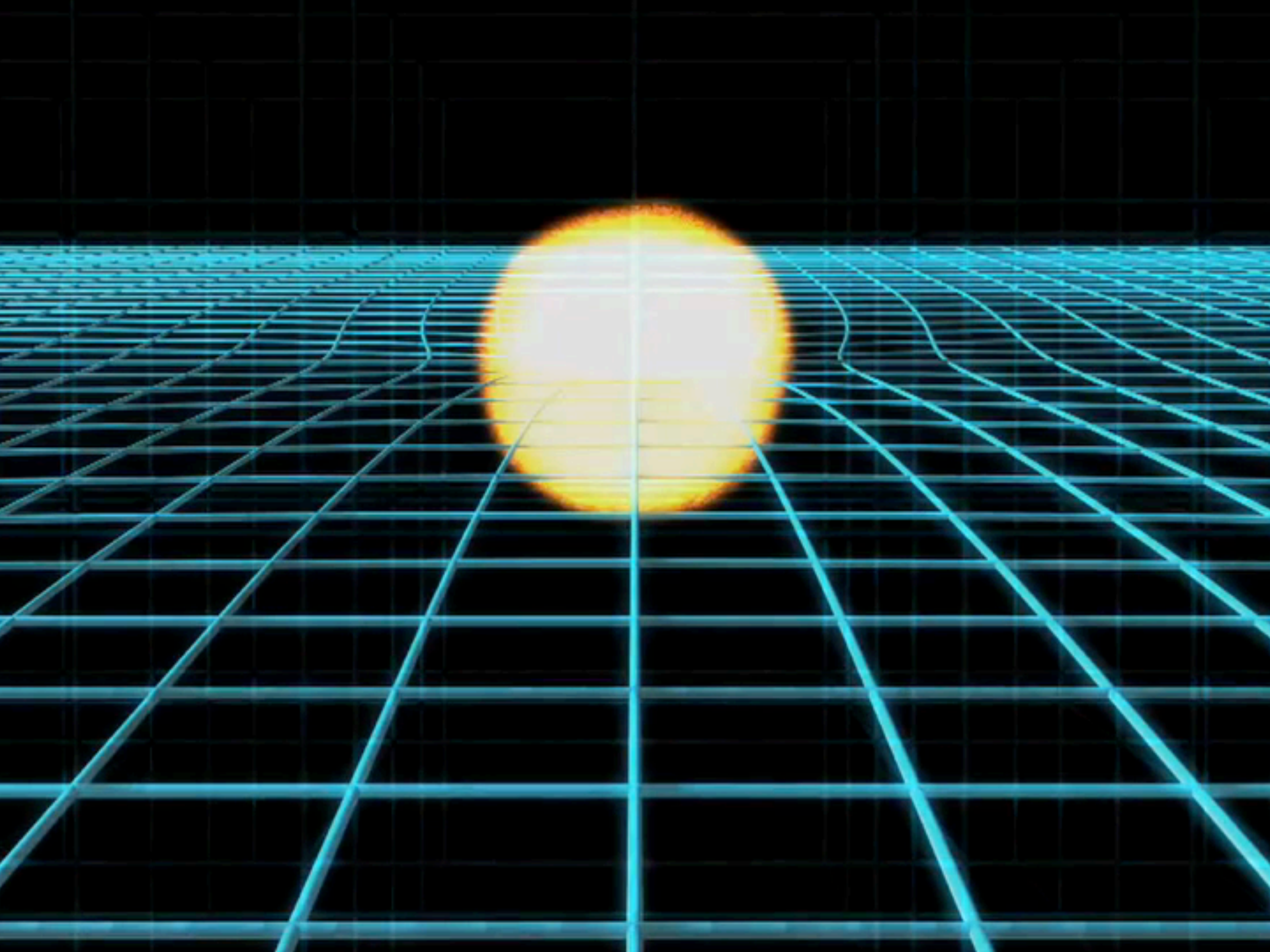
Μελλοντικά, όλοι οι συμβολομετρικοί ανιχνευτές θα λειτουργούν ως ένα *ενιαίο πείραμα*, το οποίο θα επιτρέπει τον *εντοπισμό θέσης* των διαφόρων πηγών.

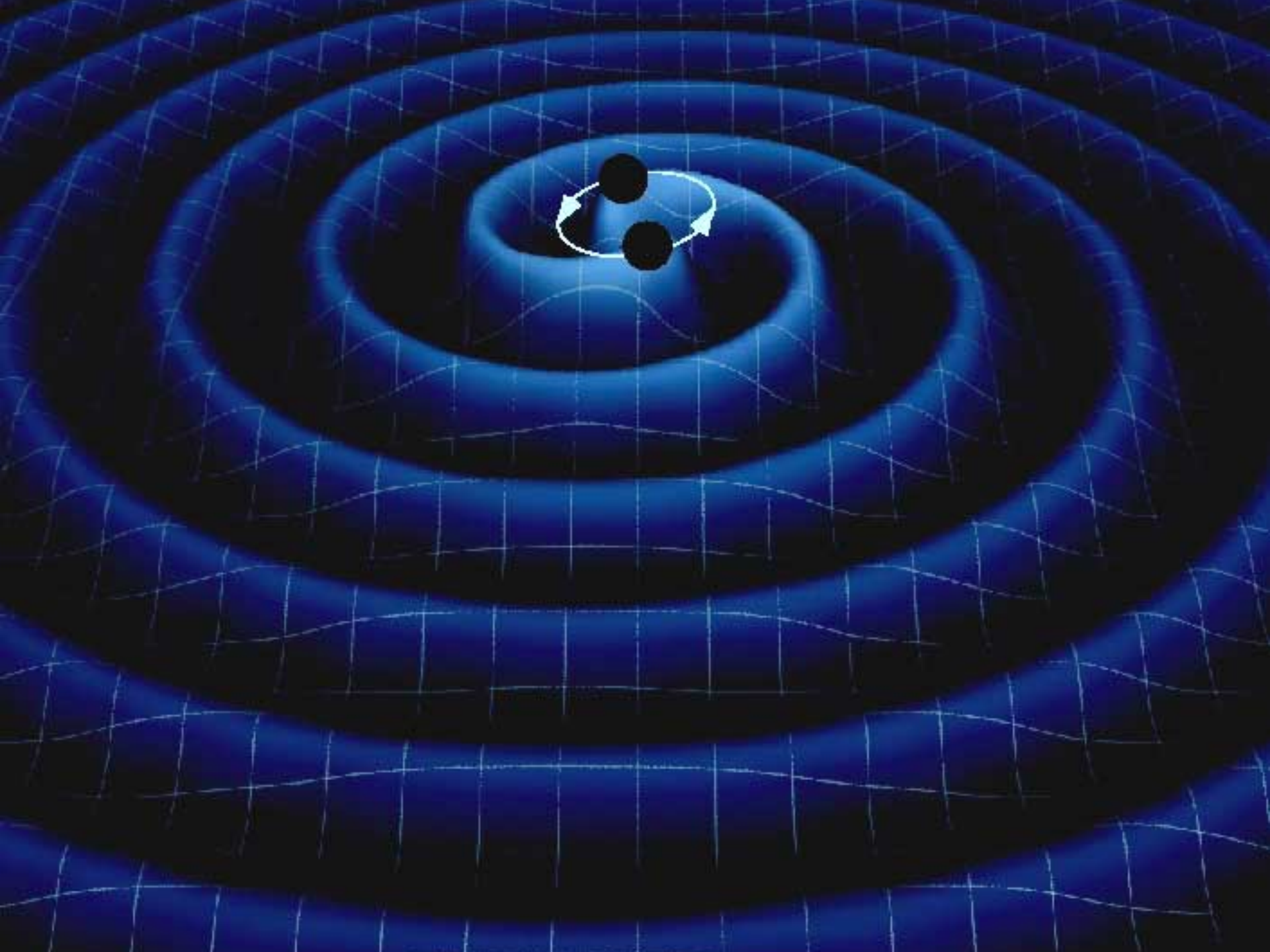


Συμβολομετρικοί Ανιχνευτές 2ης Γενιάς

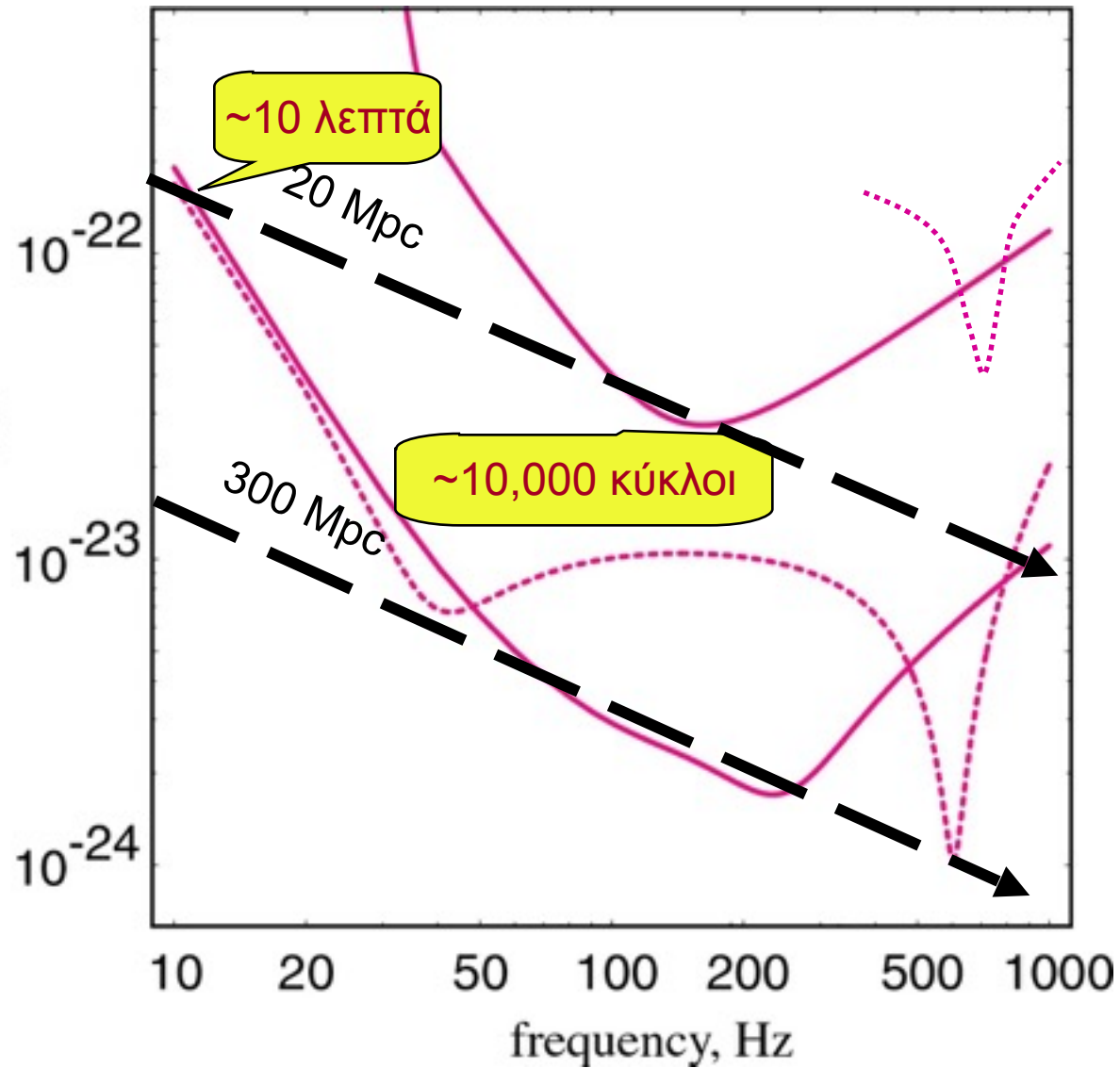
Σήμερα οι ανιχνευτές LIGO, VIRGO και GEO βρίσκονται στο **στάδιο της αναβάθμισης** και αναμένεται στο διάστημα **2015-2020** να προσεγγίσουν σταδιακά την επιθυμητή ευαισθησία. Η έναρξη λειτουργίας του Advanced LIGO αναμένεται σε λίγους μήνες.

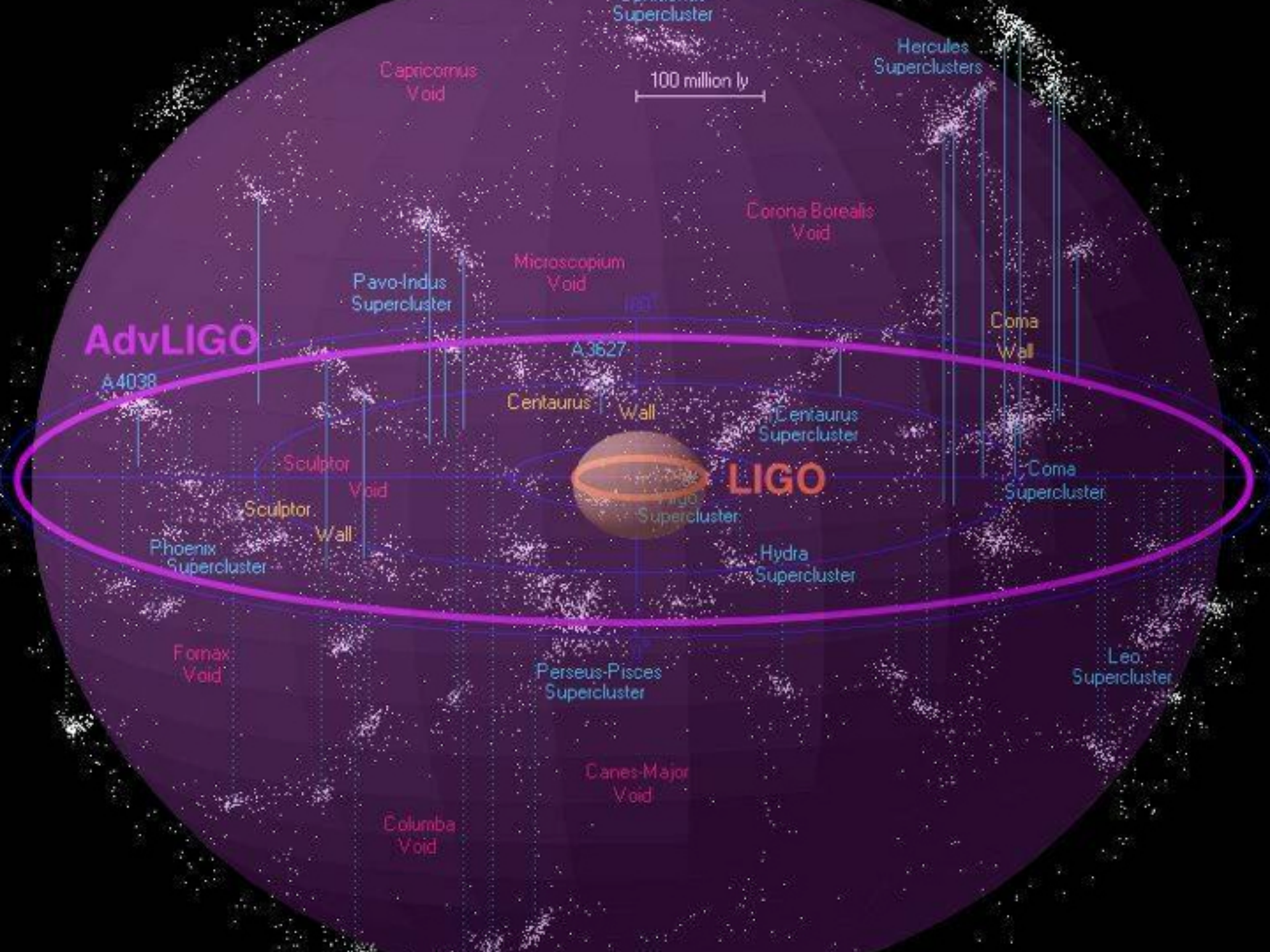






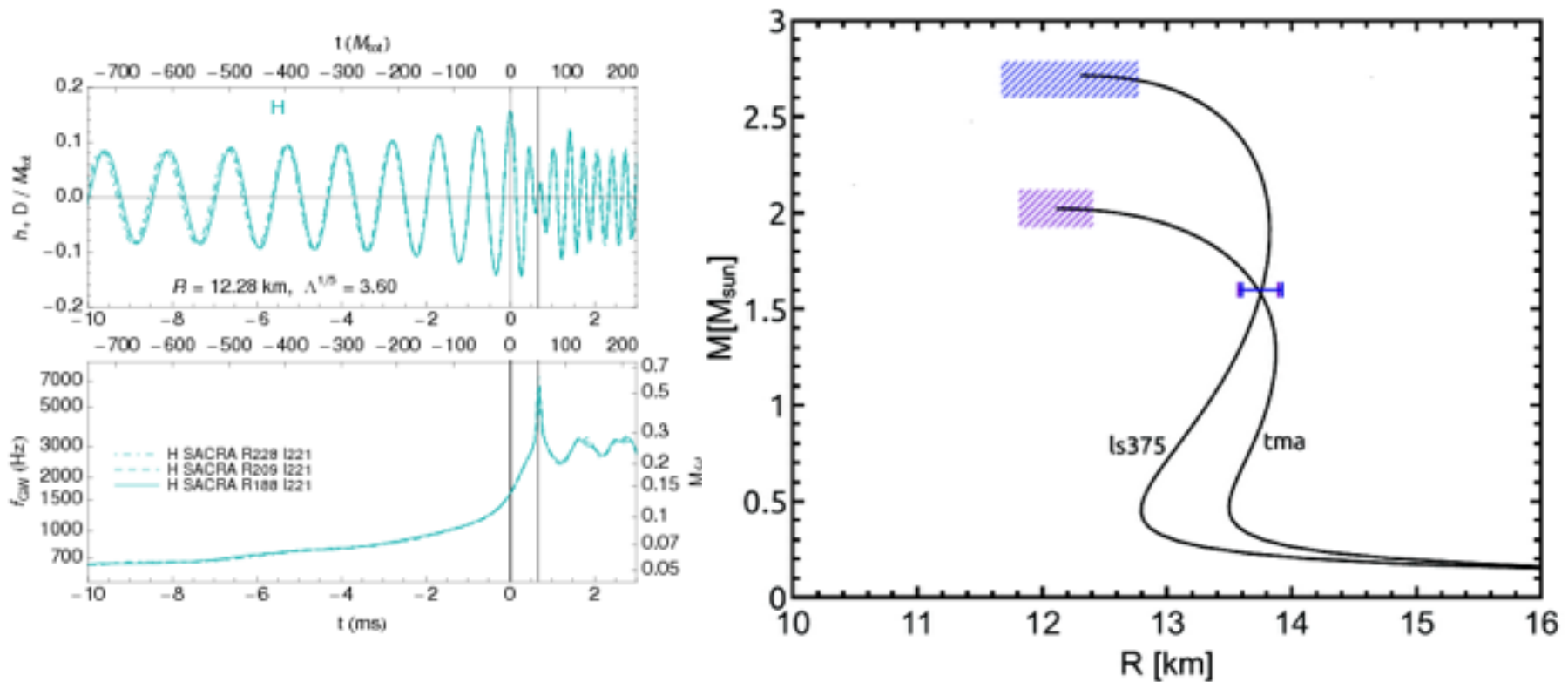
Ανίχνευση Συγχώνευσης Αστέρων Νετρονίων



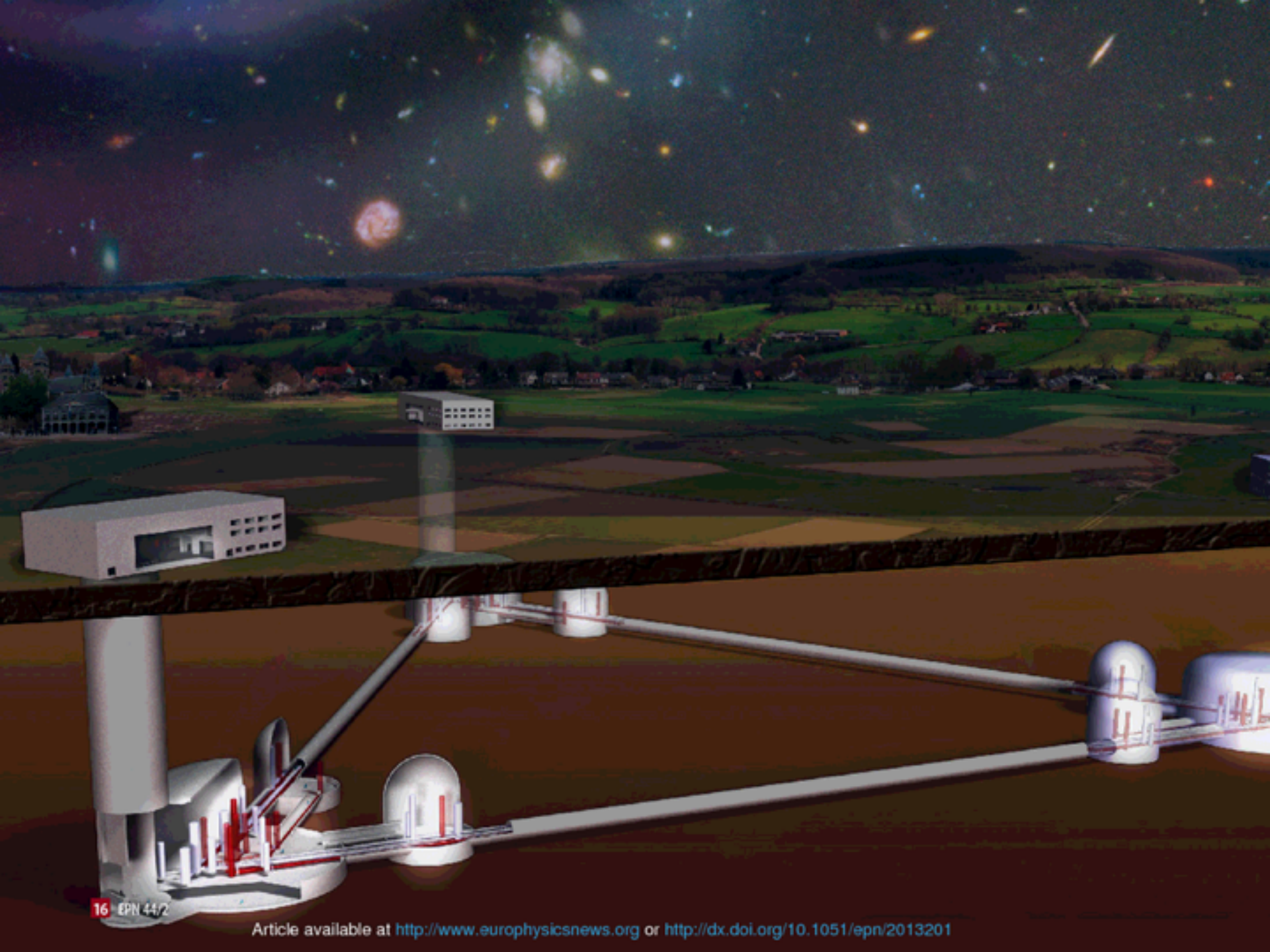


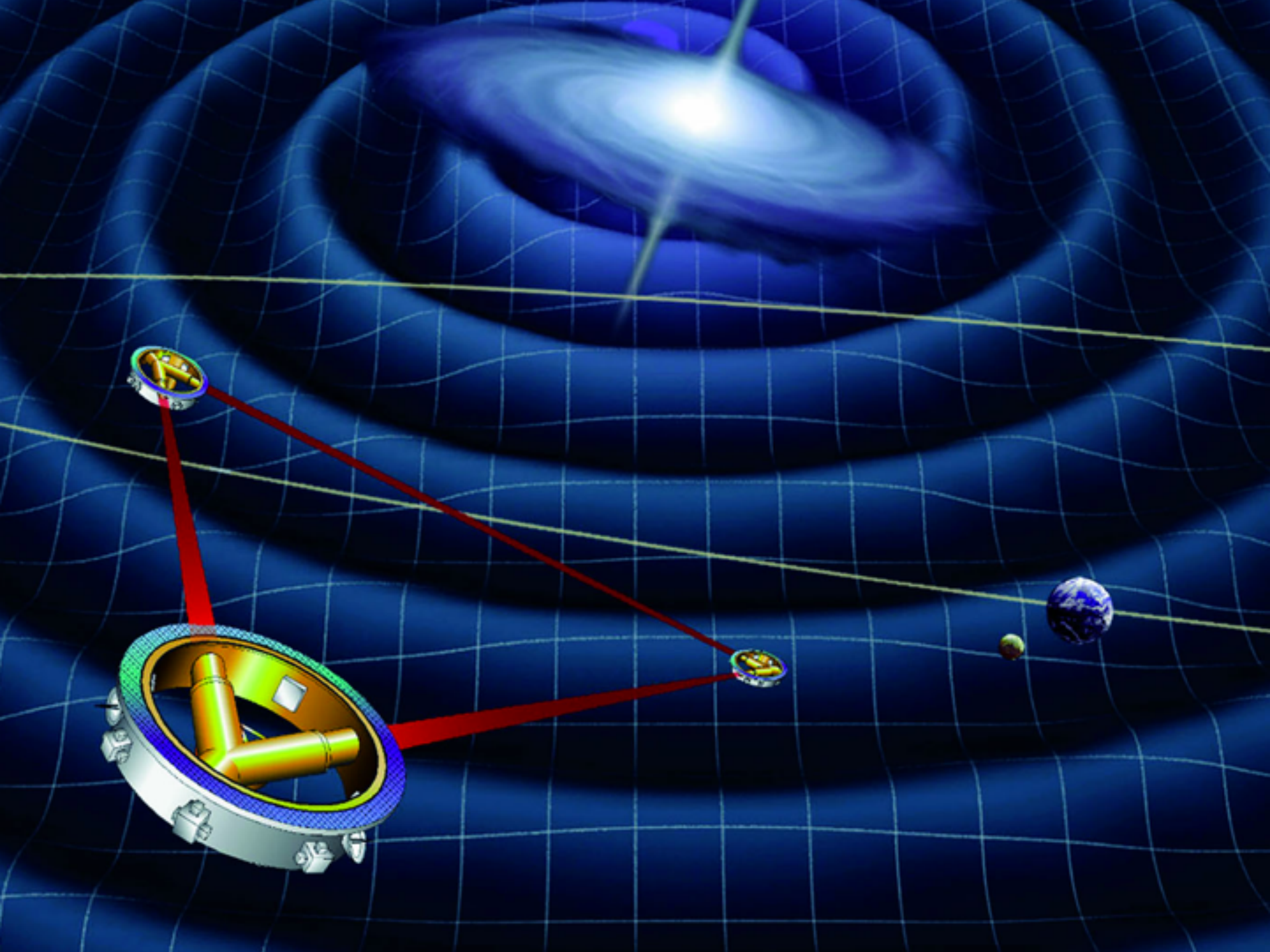
Ανίχνευση Συγχώνευσης Αστέρων Νετρονίων

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.



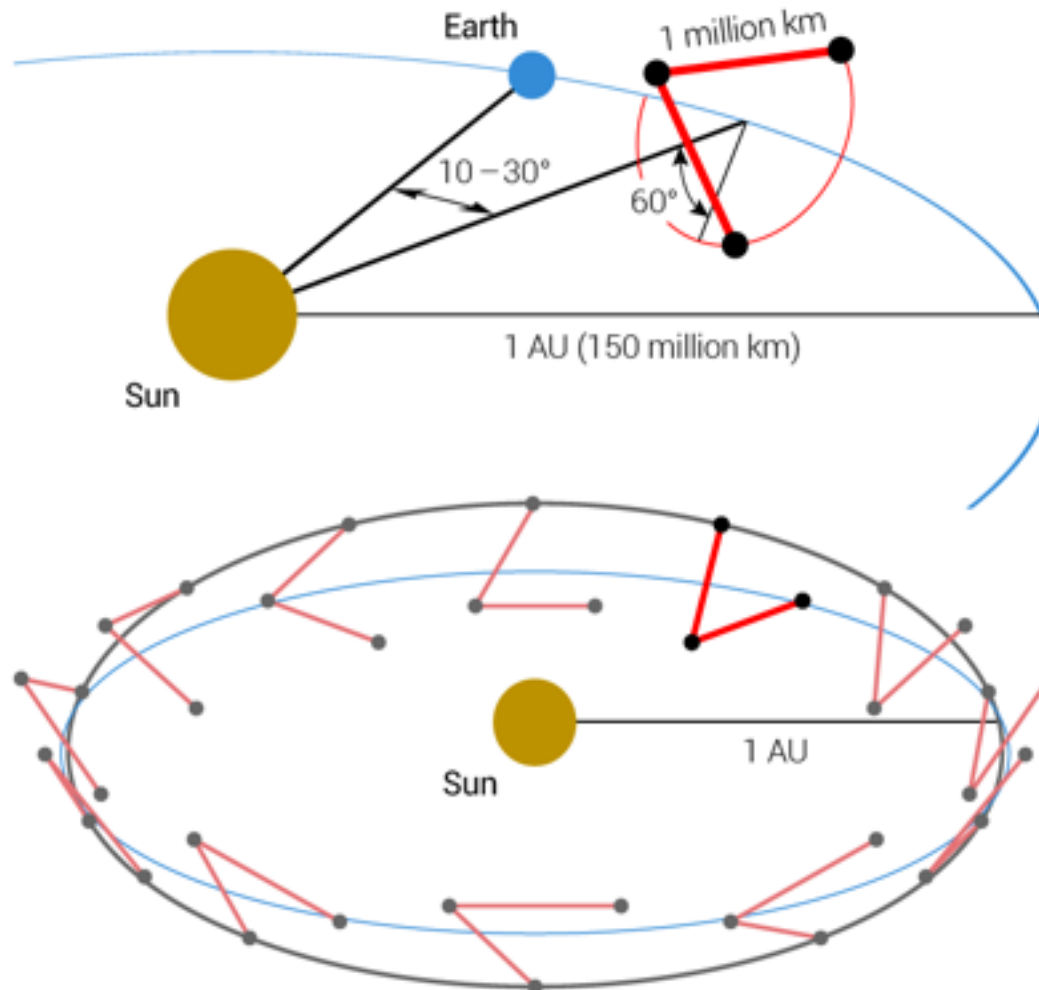
Η έρευνα στο ΑΠΘ υποστηρίζεται από υποτροφία Marie-Curie της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και από υποτροφία του πειράματος VIRGO.



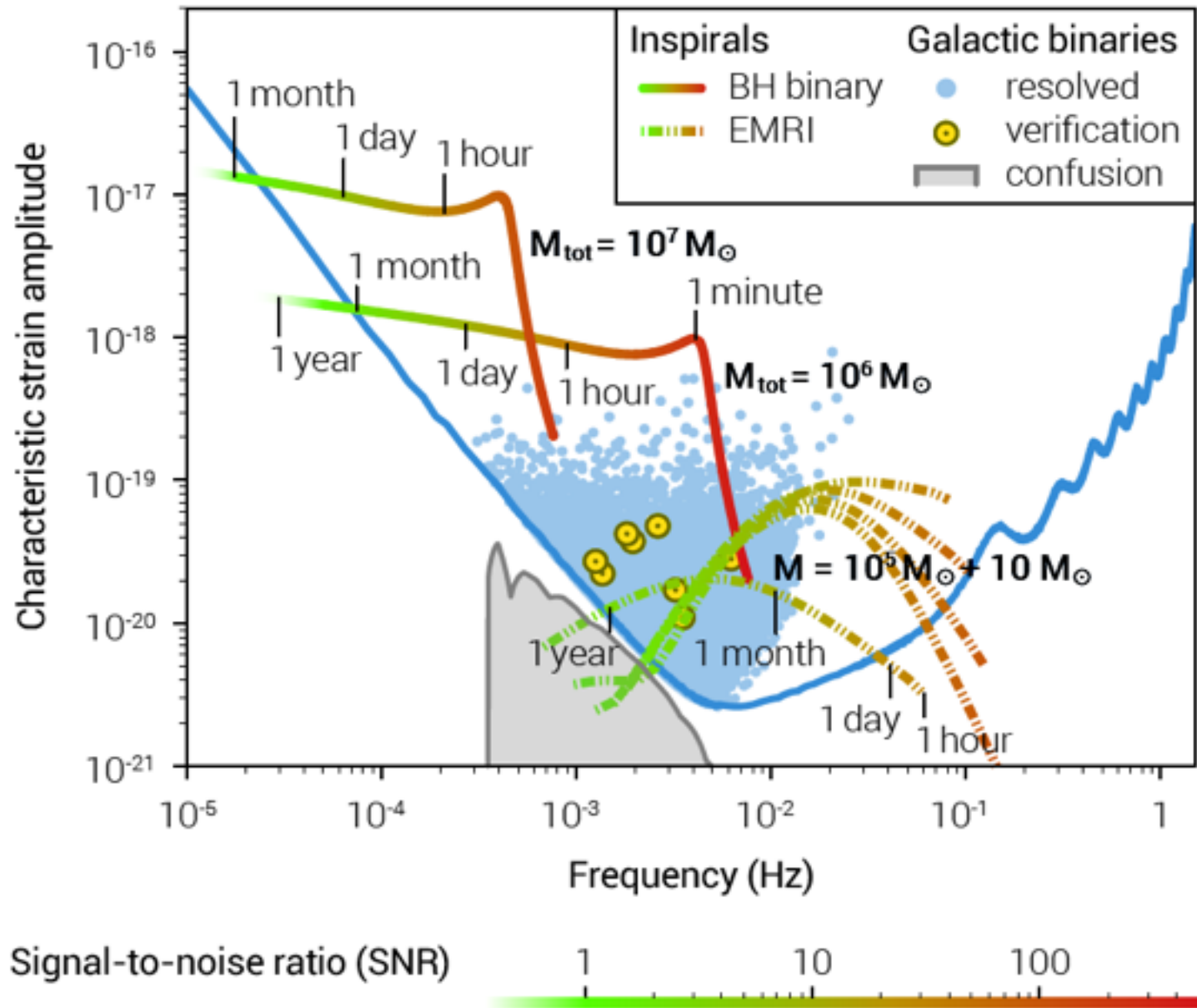


Διαστημικό Συμβολόμετρο eLISA

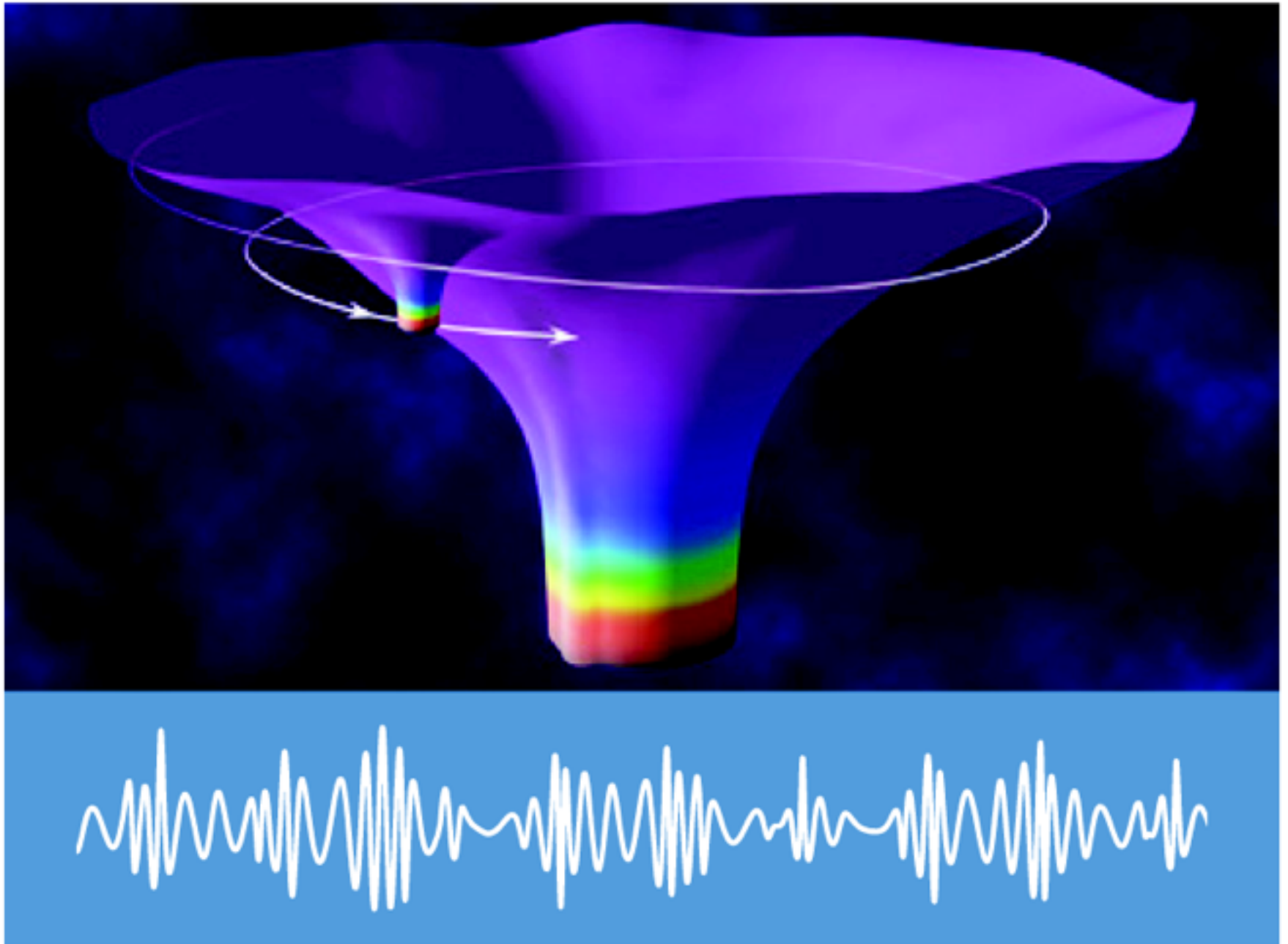
Για πηγές πολύ χαμηλών συχνοτήτων, χρειάζεται πολύ μεγάλο μήκος των ακτίνων laser.



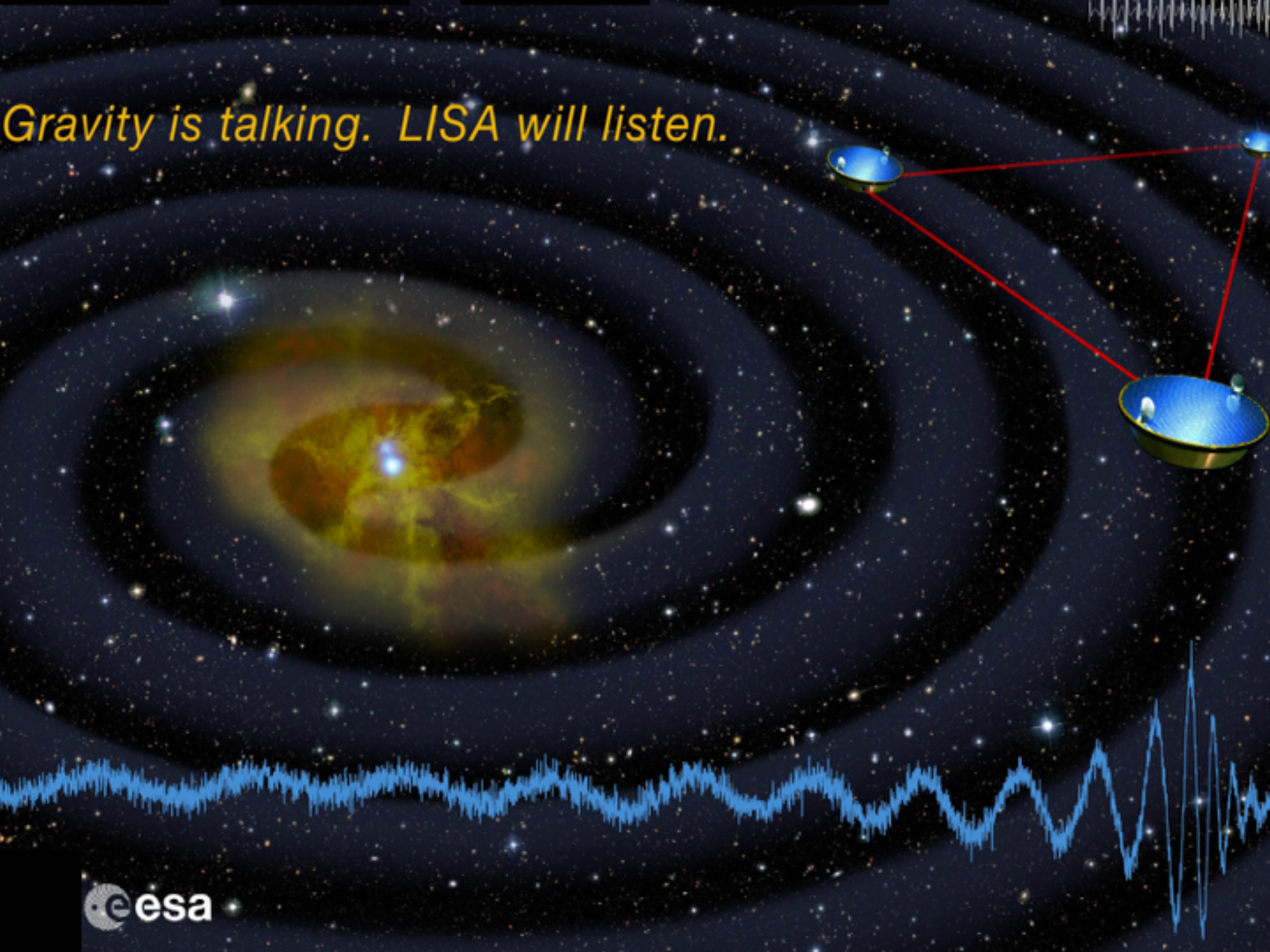
Διαστημικό Συμβολόμετρο eLISA



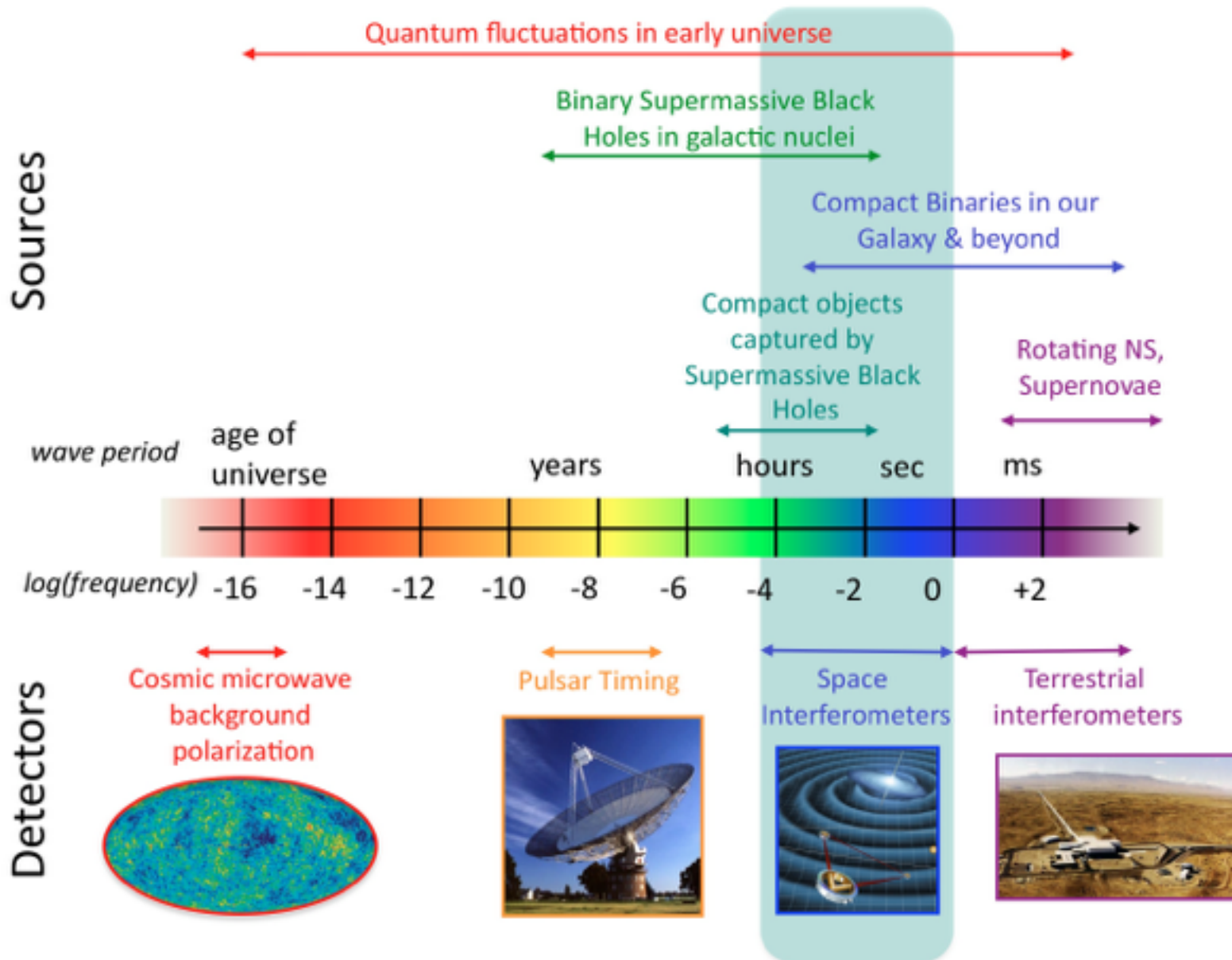
Ο "Ήχος" μιας Μελανής Οπής



Gravity is talking. LISA will listen.

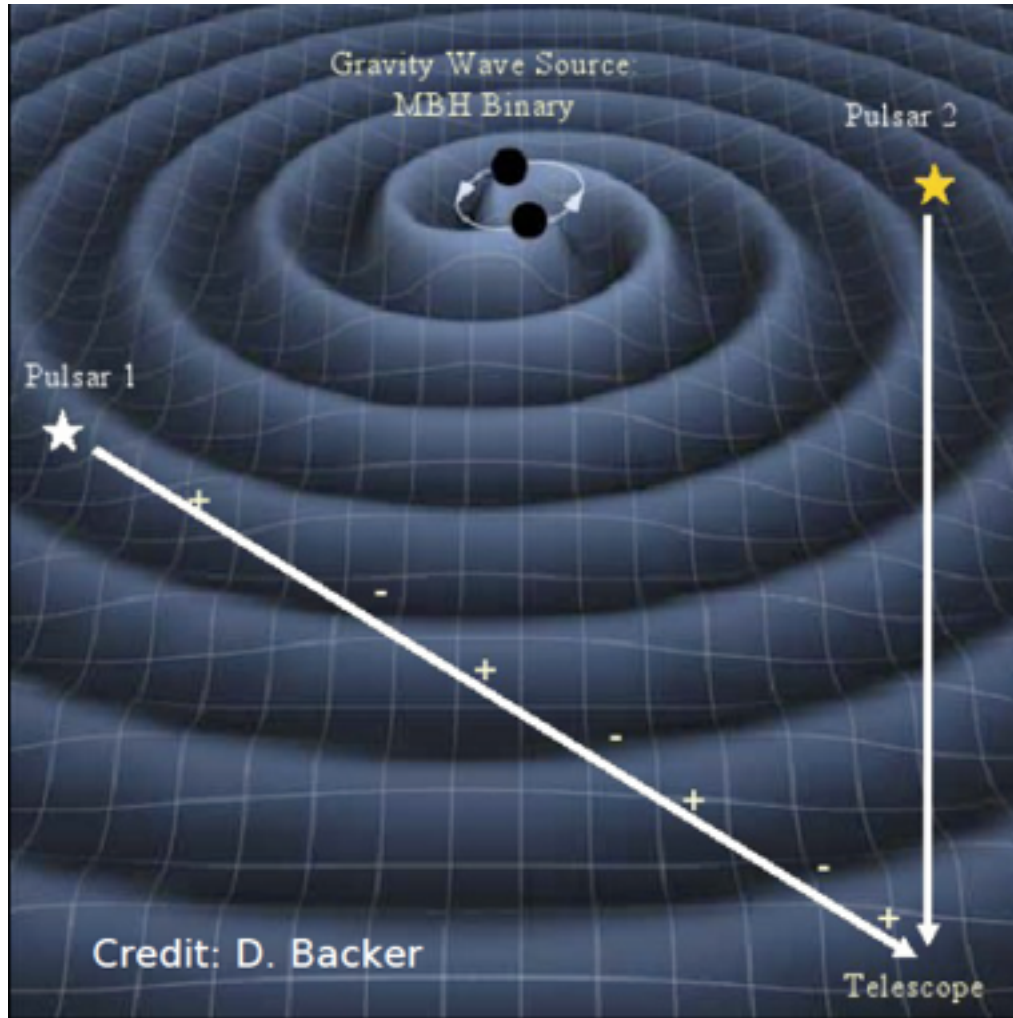


The Gravitational Wave Spectrum



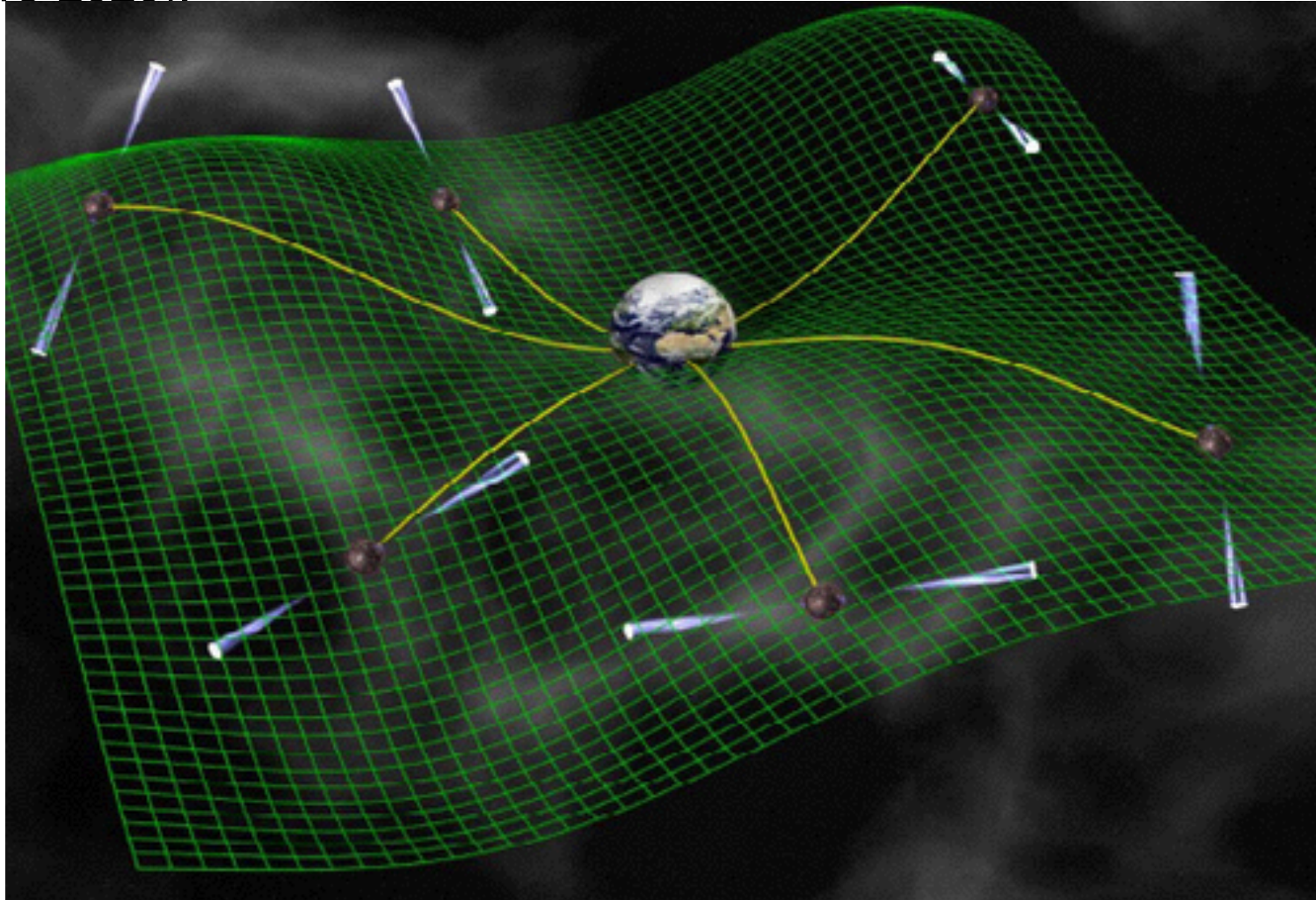
Ανίχνευση Βαρυτικών Κυμάτων μέσω Pulsar

Τα pulsar μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων.

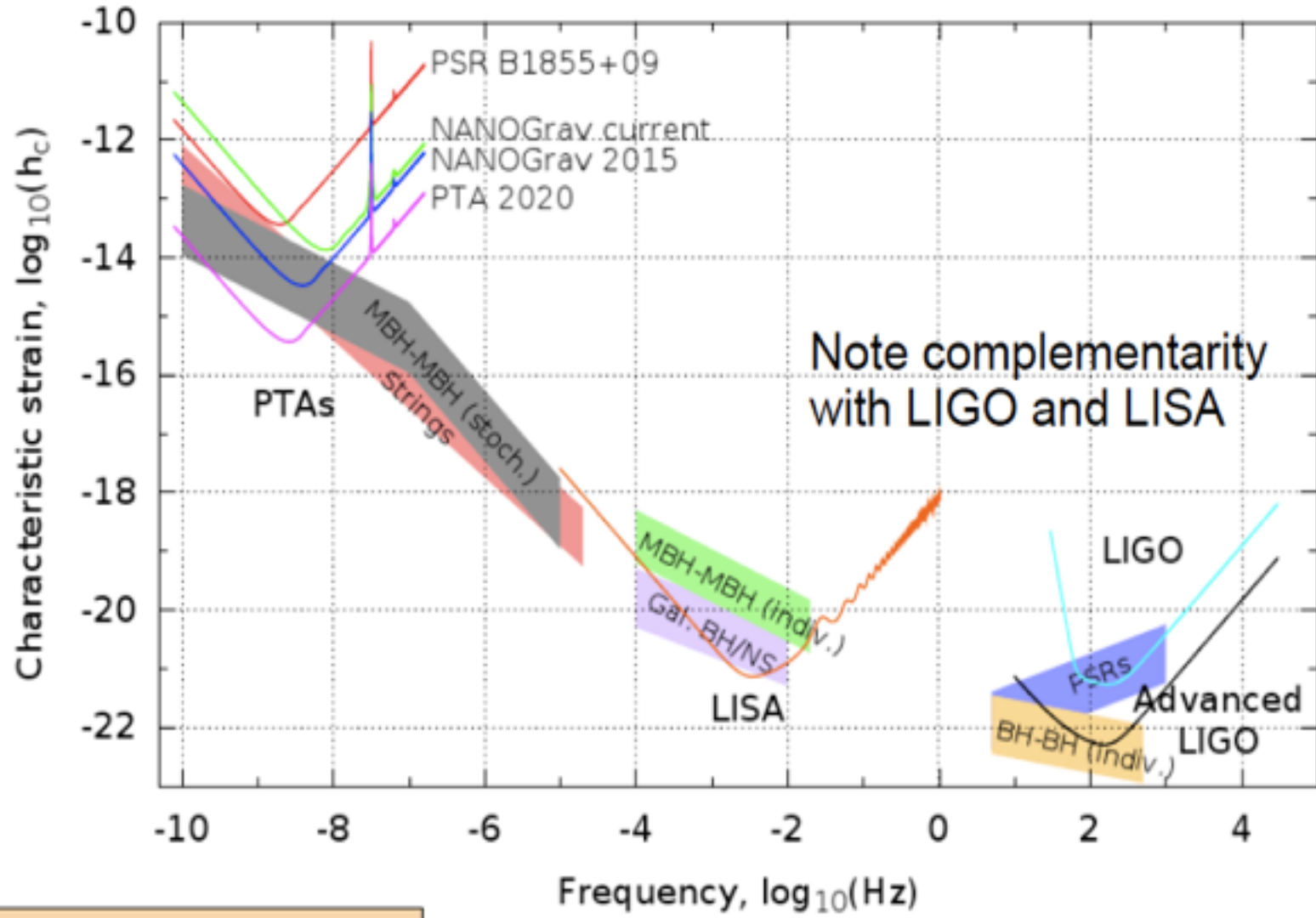


Ανίχνευση Βαρυτικών Κυμάτων μέσω Pulsar

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

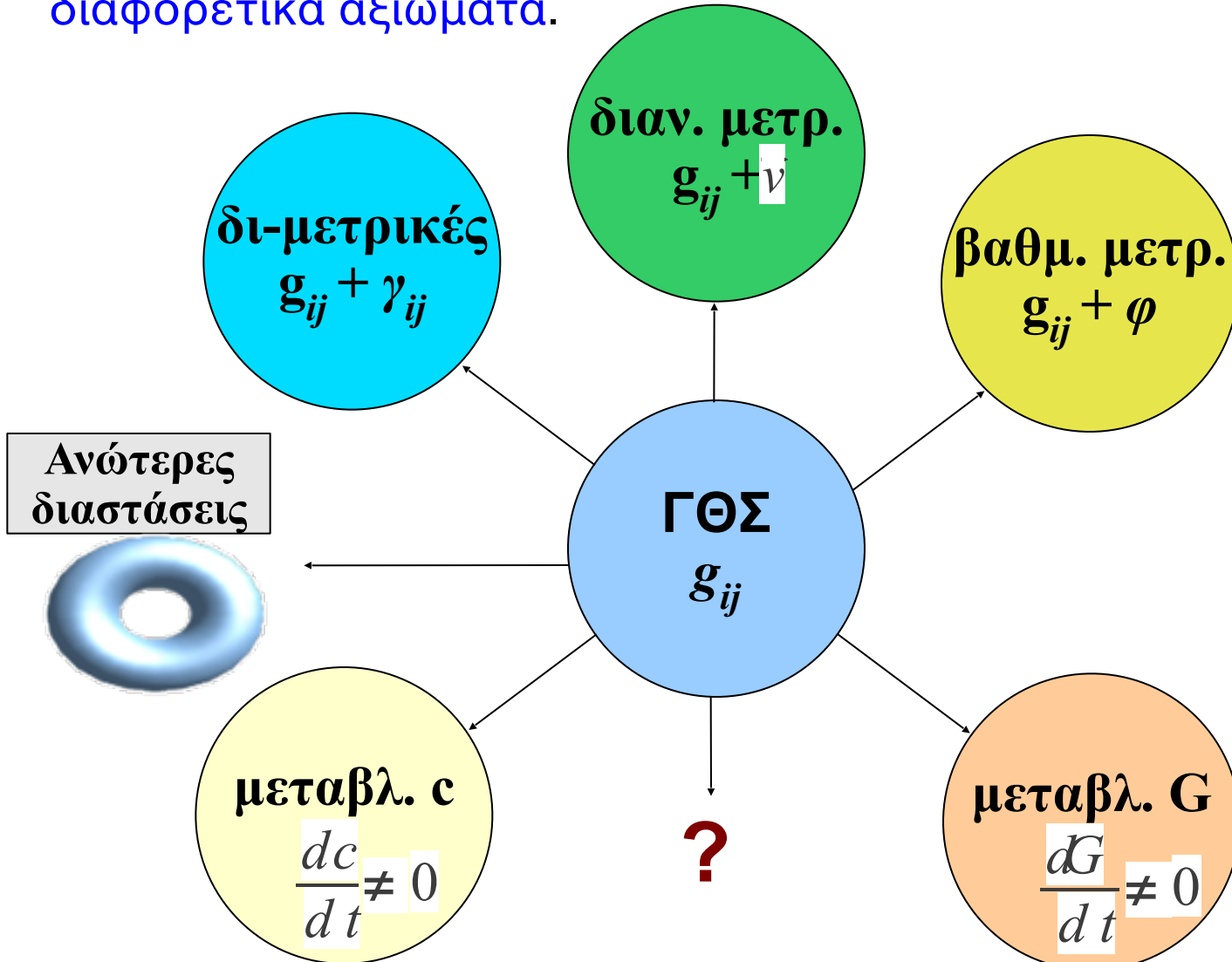


Ανίχνευση Βαρυτικών Κυμάτων μέσω Pulsar



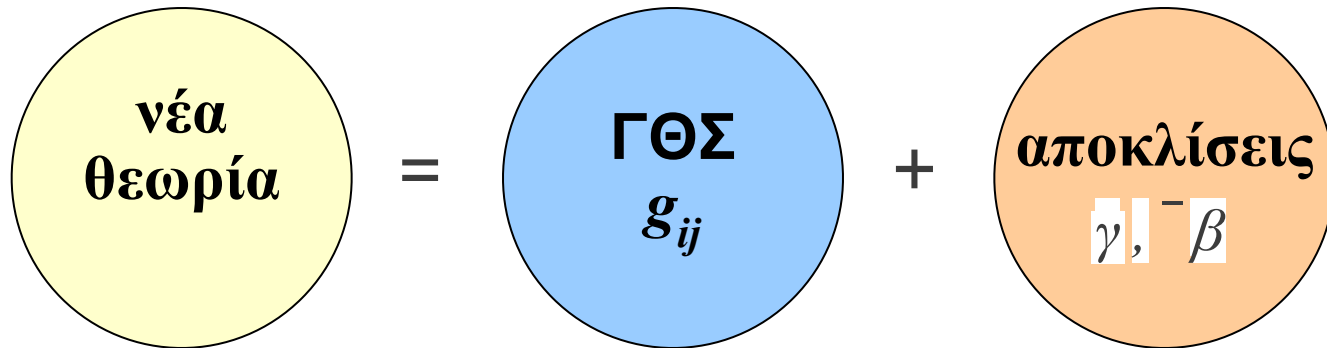
Επεκτάσεις της ΓΘΣ

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

*ΚΑΛΗ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΚΗ ΧΡΟΝΙΑ
ΣΕ ΟΛΑ ΤΑ ΜΕΛΗ ΤΟΥ ΟΦΑ !*

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