

# ΕΞΕΡΕΥΝΩΝΤΑΣ ΤΟ ΣΥΜΠΑΝ ΜΕ ΤΑ ΚΥΜΑΤΑ ΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΥΛΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ  
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



Κατερίνη, 7/5/2016

# 14 Σεπτεμβρίου 2015

## **LLO General**

william.parker@LIGO.ORG - posted 04:05, Monday 14 September 2015 (20526)

## **IFO Status**

Operating Mode: Observing

seismic is quiet; weather is clear

# 14 Σεπτεμβρίου 2015

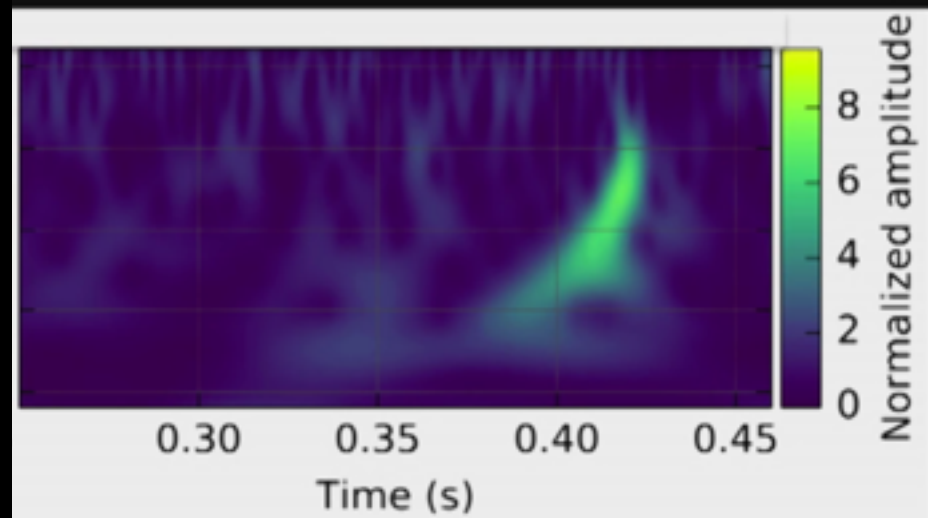
## LLO General

william.parker@LIGO.ORG - posted 04:05, Monday 14 September 2015 (20526)

## IFO Status

Operating Mode: Observing

seismic is quiet; weather is clear



# 14 Σεπτεμβρίου 2015

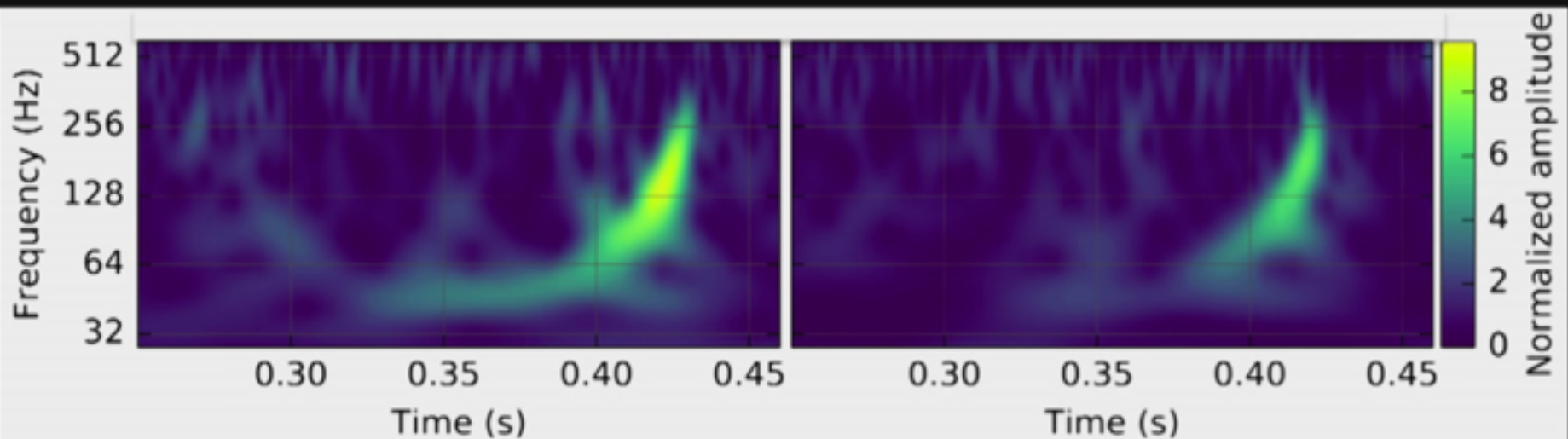
## LLO General

william.parker@LIGO.ORG - posted 04:05, Monday 14 September 2015 (20526)

## IFO Status

Operating Mode: Observing

seismic is quiet; weather is clear



# 14 Σεπτεμβρίου 2015

## LLO General

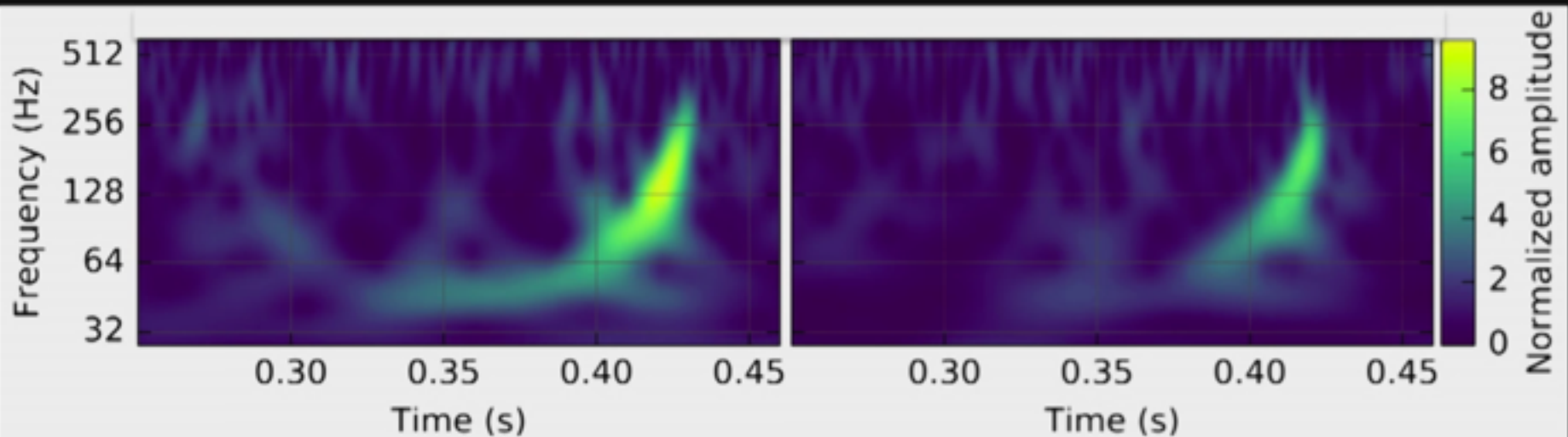
william.parker@LIGO.ORG - posted 04:05, Monday 14 September 2015 (20526)

## IFO Status

Operating Mode: Observing

seismic is quiet; weather is clear

## GW150914



A large, faint, circular nebula or galaxy core is centered in the image. It has a diffuse, glowing appearance with some internal structure. Two prominent dark spots are visible within the nebula, labeled with the numbers 29 and 36 in yellow. The background is a dense field of stars, with a concentration of blue and white stars around the nebula.

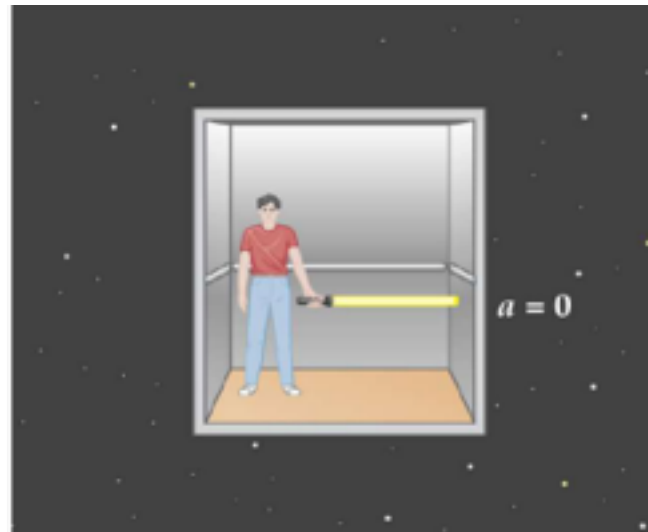
29

36

Απόσταση από εμάς:  
1 δισεκατομμύρια έτη φωτός

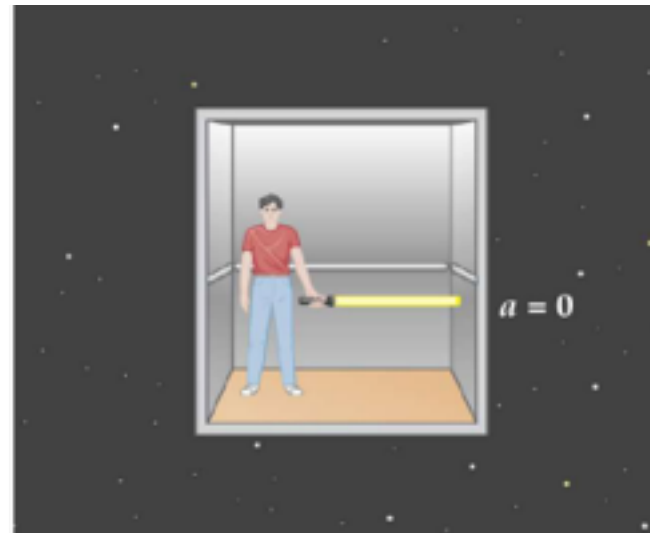
# Η Αρχή της Ισοδυναμίας

1907: Ο **Einstein** αποδεικνύει με βάση την αρχή της ισοδυναμίας ότι η τροχιά των φωτονίων καμπυλώνεται από το βαρυτικό πεδίο.



# Η Αρχή της Ισοδυναμίας

1907: Ο **Einstein** αποδεικνύει με βάση την αρχή της ισοδυναμίας ότι η τροχιά των φωτονίων καμπυλώνεται από το βαρυτικό πεδίο.





# Η Αρχή της Ισοδυναμίας

1907: Ο **Einstein** αποδεικνύει με βάση την αρχή της ισοδυναμίας ότι η τροχιά των φωτονίων καμπυλώνεται από το βαρυτικό πεδίο.



# Γενική Θεωρία Σχετικότητας (ΓΘΣ)

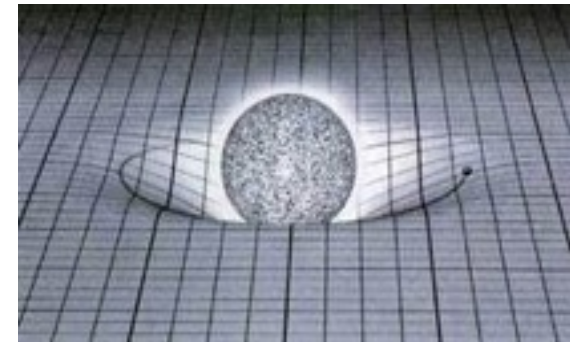
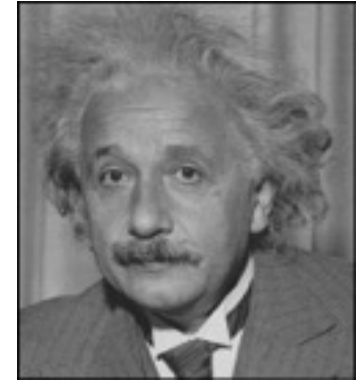
**1915:** Ο **Einstein** περιγράφει τη βαρύτητα ως μια **καμπύλωση** του 4-διάστατου **χωροχρόνου**.

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

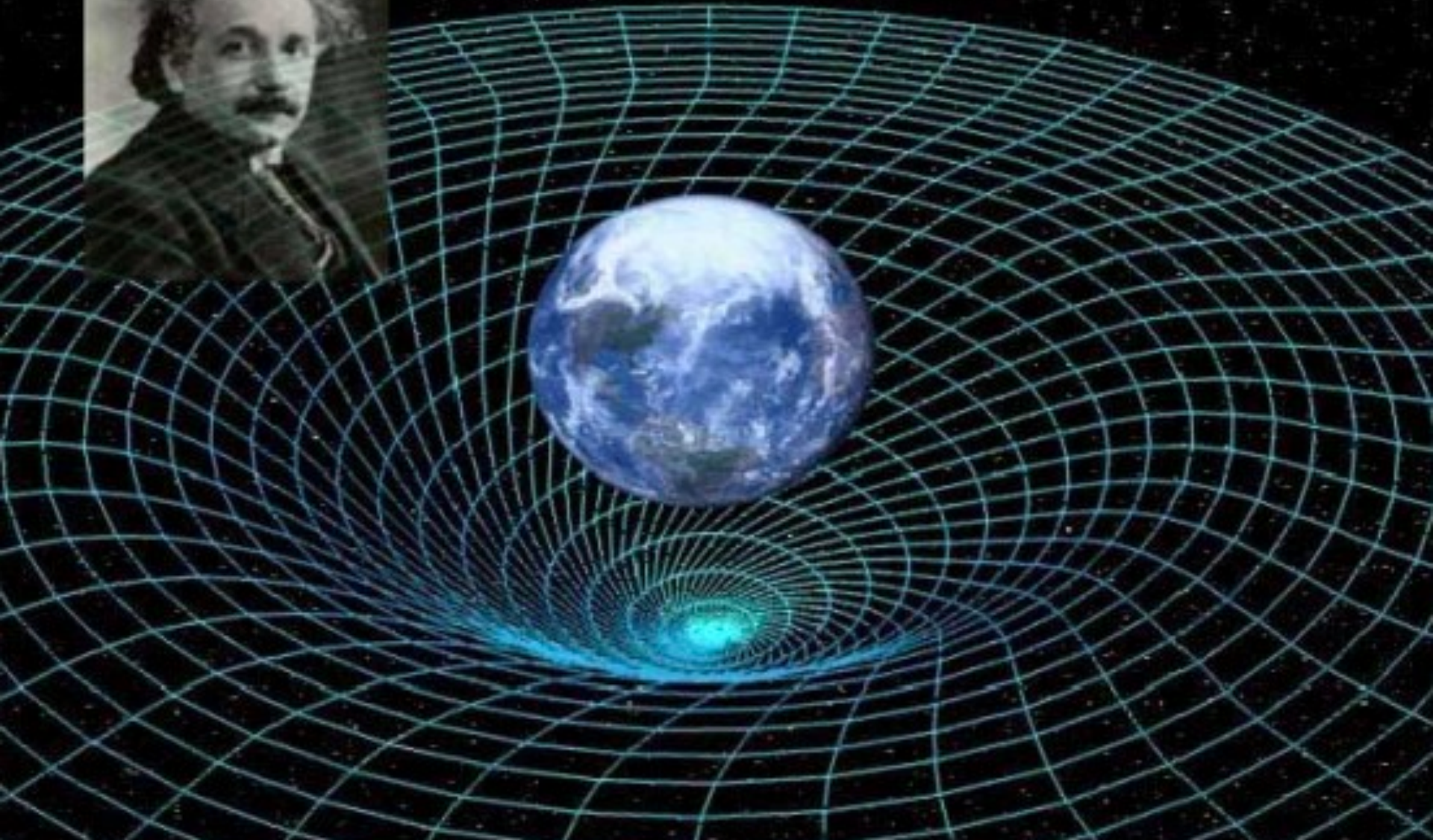
$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{00}(x_i) & g_{01}(x_i) & g_{02}(x_i) & g_{03}(x_i) \\ g_{10}(x_i) & g_{11}(x_i) & g_{12}(x_i) & g_{13}(x_i) \\ g_{20}(x_i) & g_{21}(x_i) & g_{22}(x_i) & g_{23}(x_i) \\ g_{30}(x_i) & g_{31}(x_i) & g_{32}(x_i) & g_{33}(x_i) \end{pmatrix}$$

Οι εξισώσεις του Einstein συνδέουν τη καμπύλωση του χωροχρόνου με την πυκνότητα ενέργειας, την ορμή και την τάση

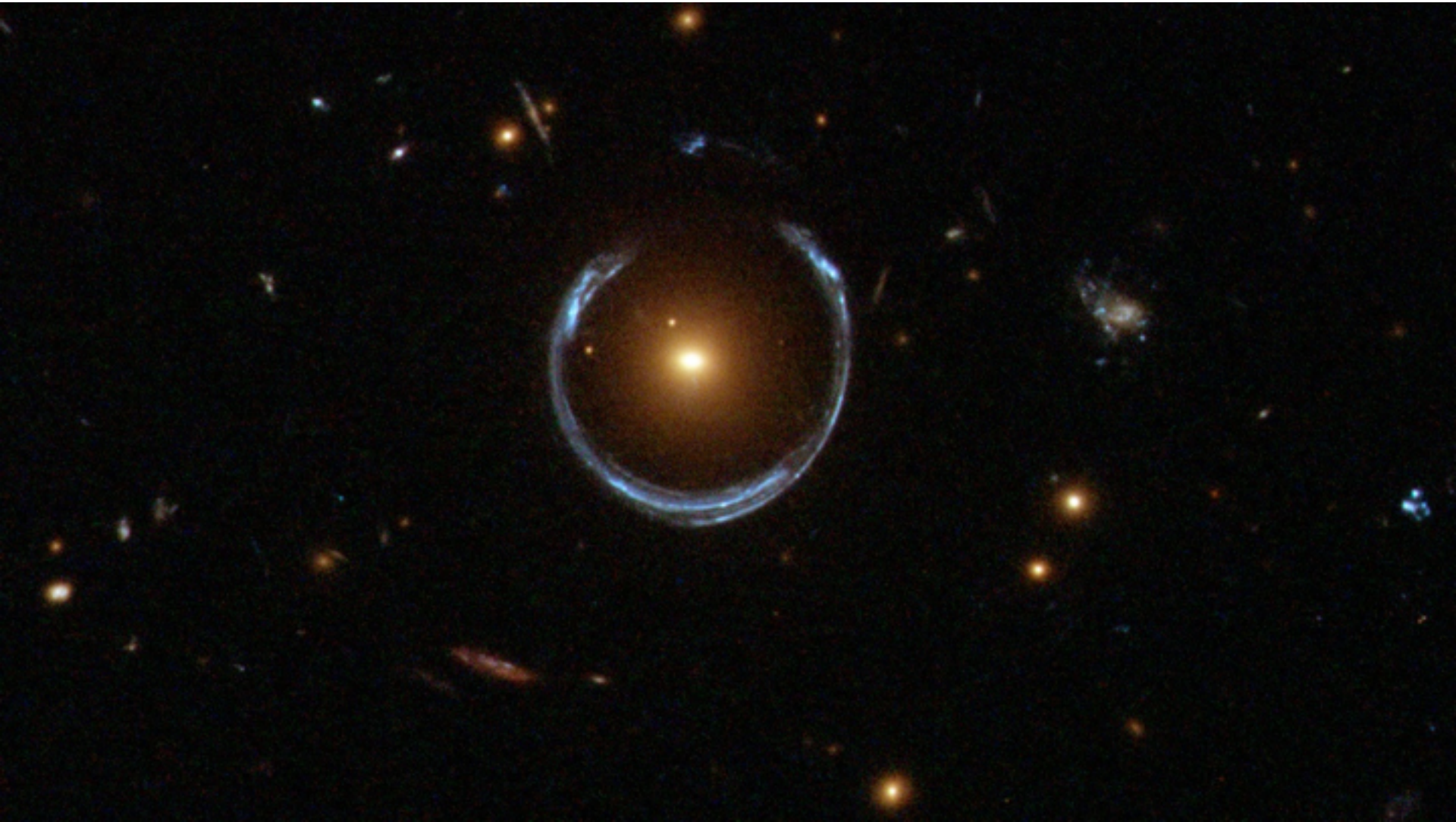
$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$



# Καμπύλωση του Χωροχρόνου



# «Δακτύλιος του Einstein»



# Πως διαδίδεται η βαρύτητα;

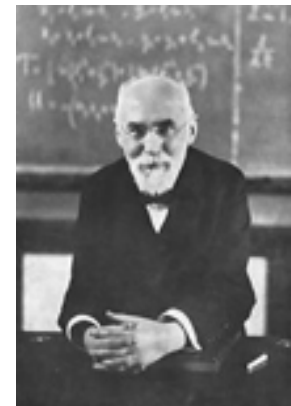
1805 ο Laplace η βαρυτική έλξη διαδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα

$$c_g > 7 \times 10^6 c$$

όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός.



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



1905: ο Poincaré προτείνει την ύπαρξη βαρυτικών κυμάτων που διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός.



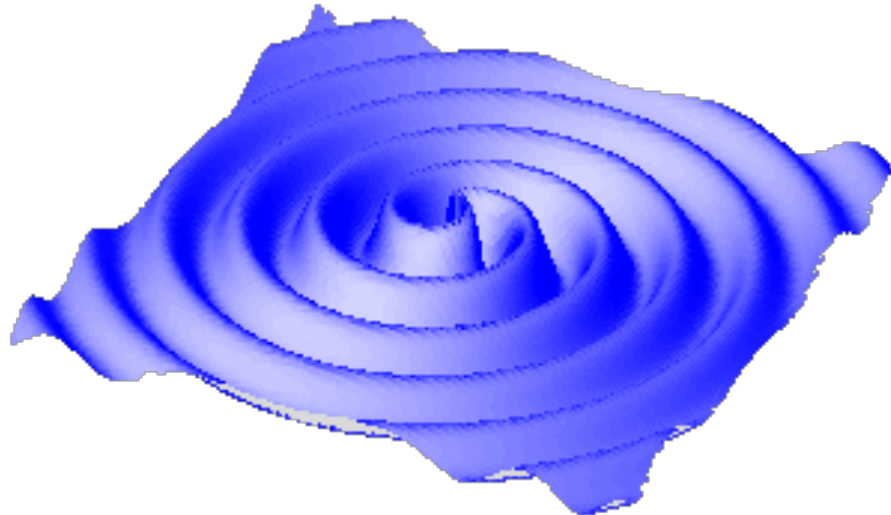
# Βαρυτικά Κύματα

**1916:** Ο Einstein περιέγραψε τα βαρυτικά κύματα στα πλαίσια της ΓΘΣ ως γραμμικές διαταραχές του μετρικού τανυστή:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad |h_{\mu\nu}| \ll 1$$

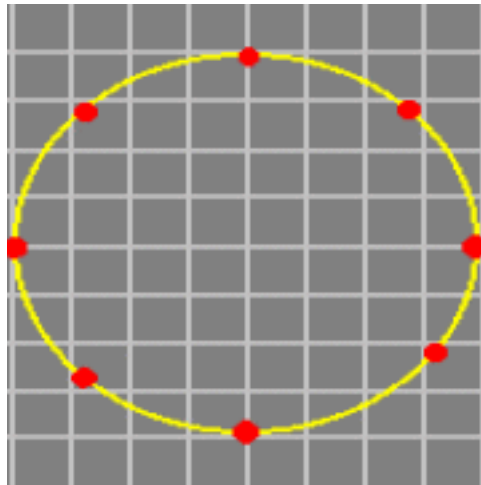
οπου  $\eta_{\mu\nu}$  είναι ο επίπεδος χωροχρόνος της Ειδικής Θεωρίας Σχετικότητας (Minkowski). Προκύπτει η κυματική εξίσωση:

$$\square \bar{h}_{\alpha\beta} = 0$$

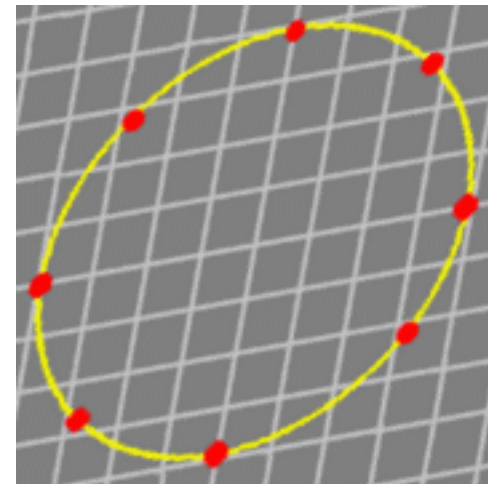


# Πόλωση Βαρυτικών Κυμάτων

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



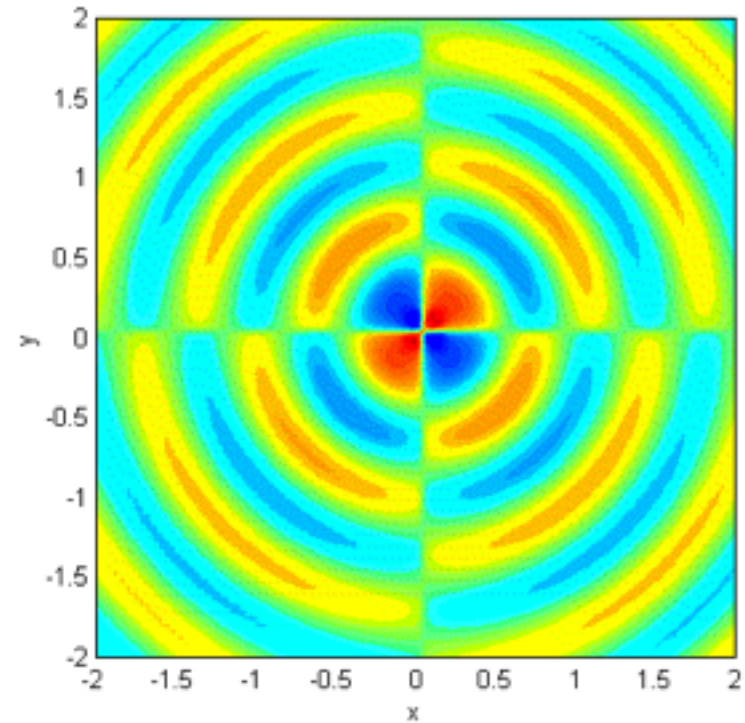
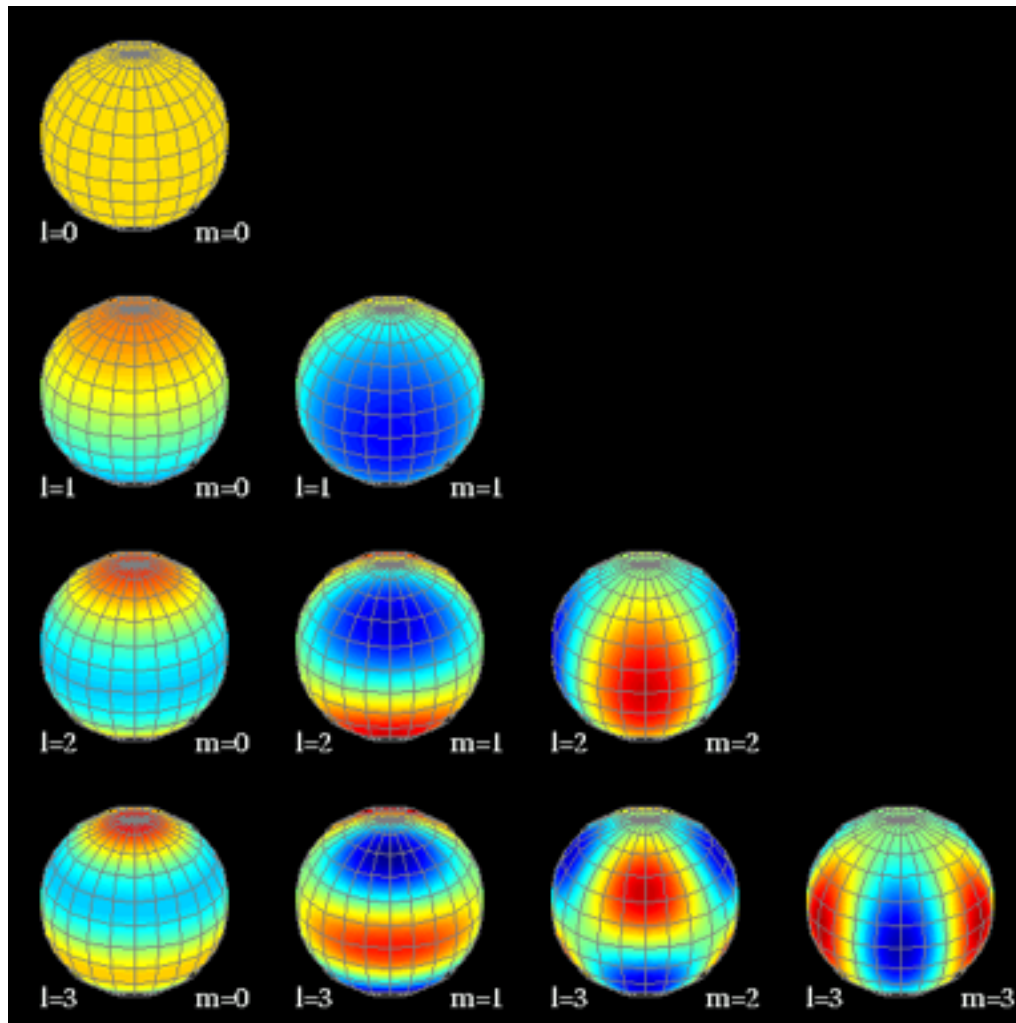
Πόλωση +



Πόλωση X

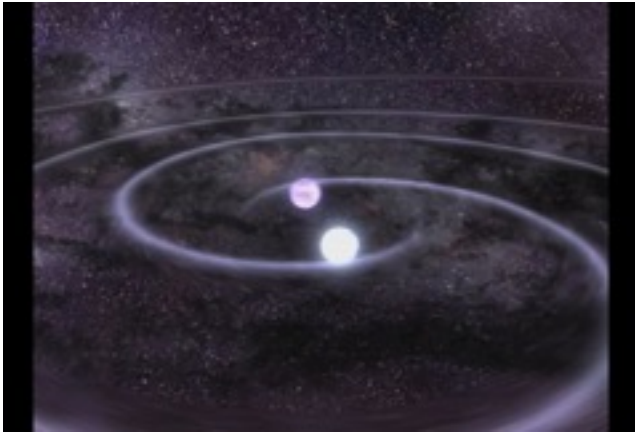
# Παραγωγή Βαρυτικών Κυμάτων

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





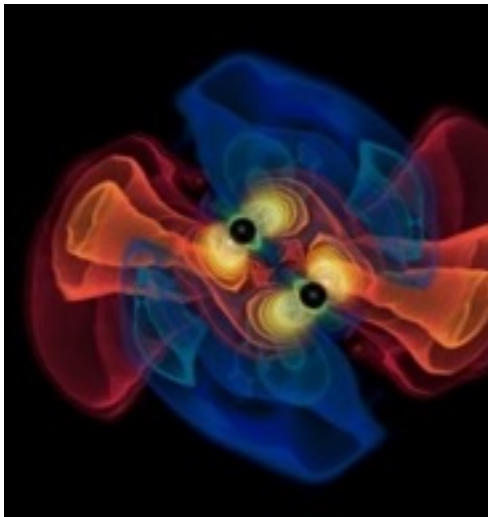
# Κύριες Πηγές Βαρυτικών Κυμάτων



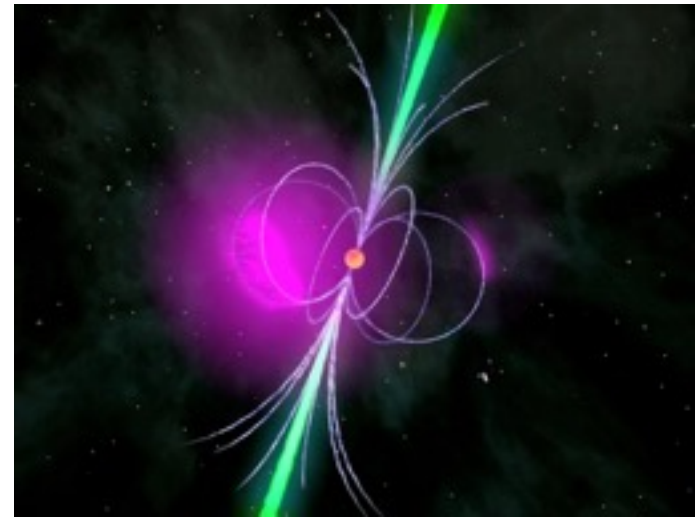
Συγχώνευση Αστέρων Νετρονίων



Κατάρρευση Αστέρων



Συγχώνευση Μελανών Οπών



Περιστρεφόμενοι Αστέρες Νετρονίων

# Πλάτος Βαρυτικών Κυμάτων

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

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

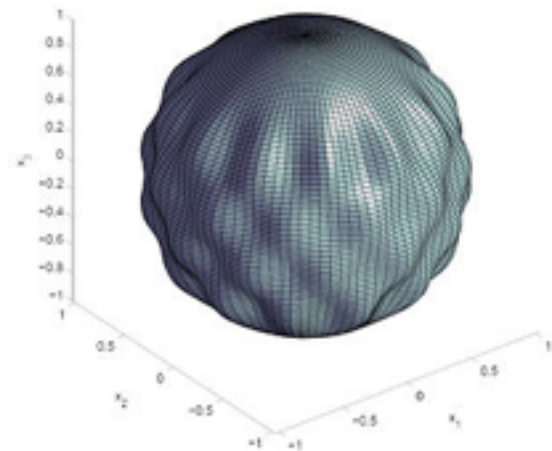
όπου:  $r$  η απόσταση της πηγής  
 $f$  η συχνότητα  
 $\rho$  η πυκνότητα  
 $\epsilon$  η παραμόρφωση

*Παράδειγμα:* Αστέρας νετρονίων σε απόσταση  $r = 70$  εκ. ετών φωτός που ταλαντώνεται με συχνότητα:  $f = 2000$  Hz

Πλάτος:  $10^{-22}$

Σε έναν ανιχνευτή μήκους  $4$  km, αυτό αντιστοιχεί σε **λιγότερο** από το:

$1\%$  της ακτίνας ενός πρωτονίου (!)



# Ροή Ενέργειας των Βαρυτικών Κυμάτων

Στο προηγούμενο παράδειγμα, η *ροή ενέργειας των βαρυτικών κυμάτων όταν φτάνουν στη Γη είναι:*

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

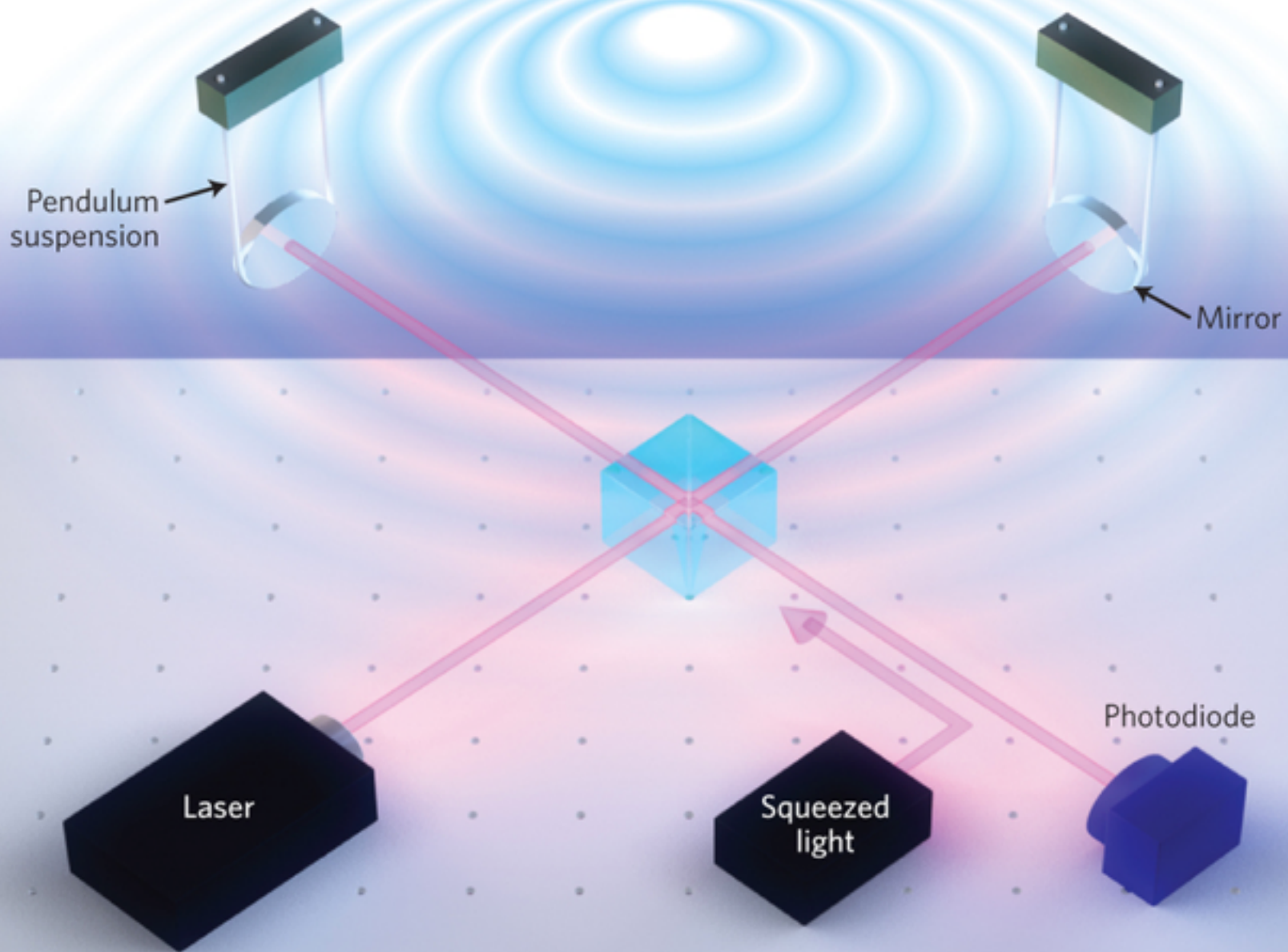
*Ροή ενέργειας H/M κυμάτων της Σελήνης στη Γη:*

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

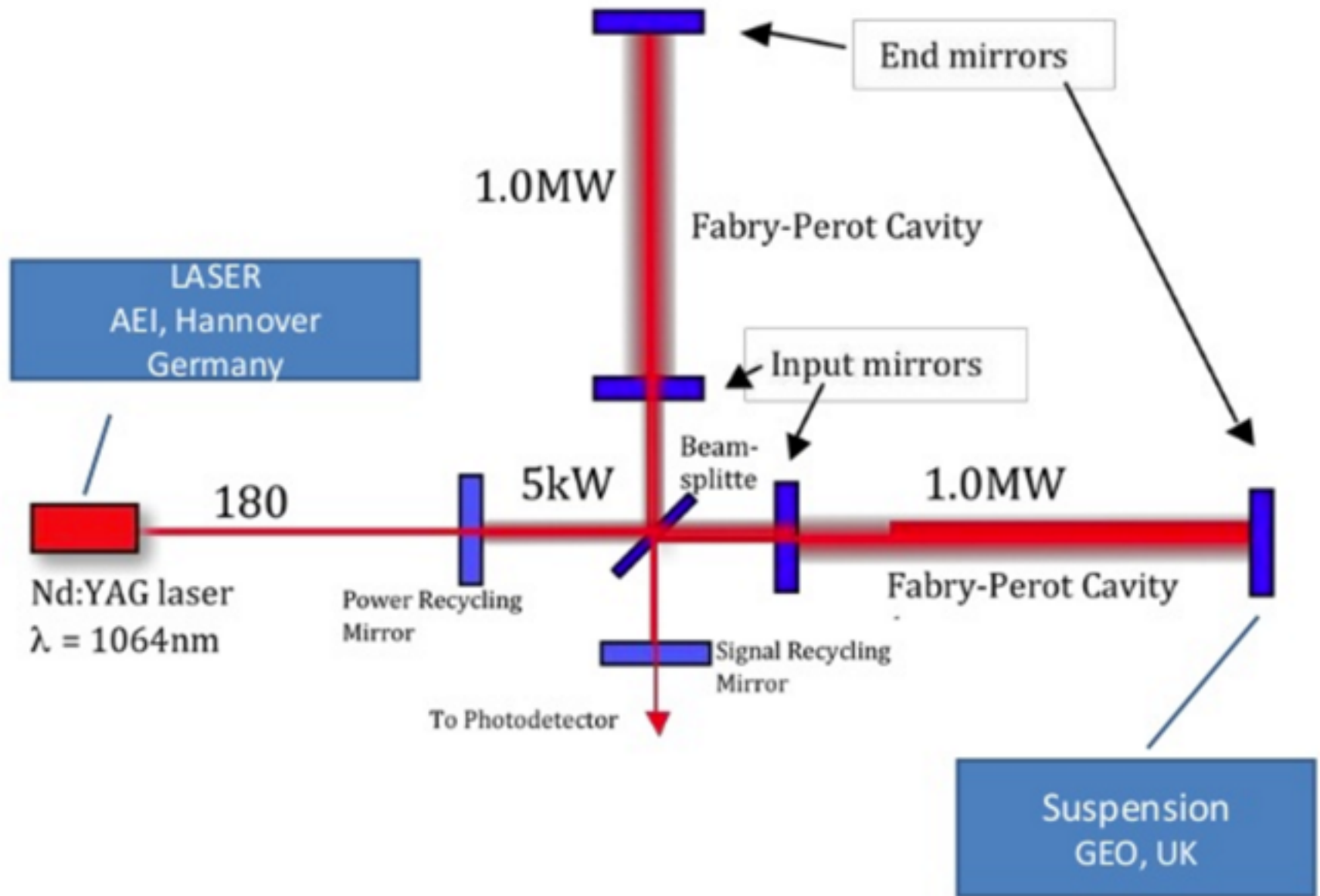


*ροή Βαρυτικών Κυμάτων = 400 x ροή H/M Σελήνης !!*

# Συμβολόμετρο Ακτίνων Laser

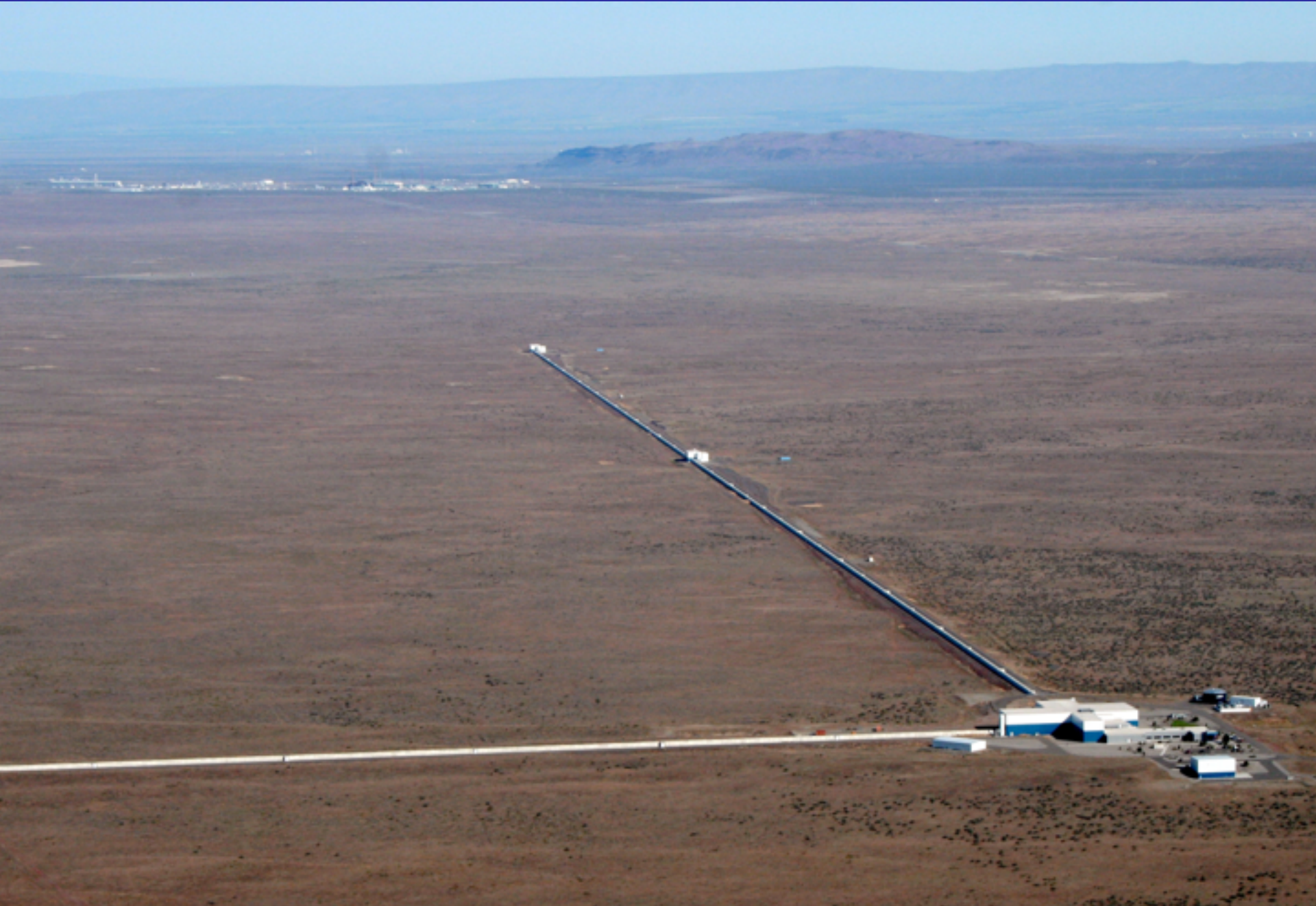


# Ανιχνευτής Advanced LIGO





# Advanced LIGO @ Hanford, WA



# Advanced VIRGO @ Pisa, Italy





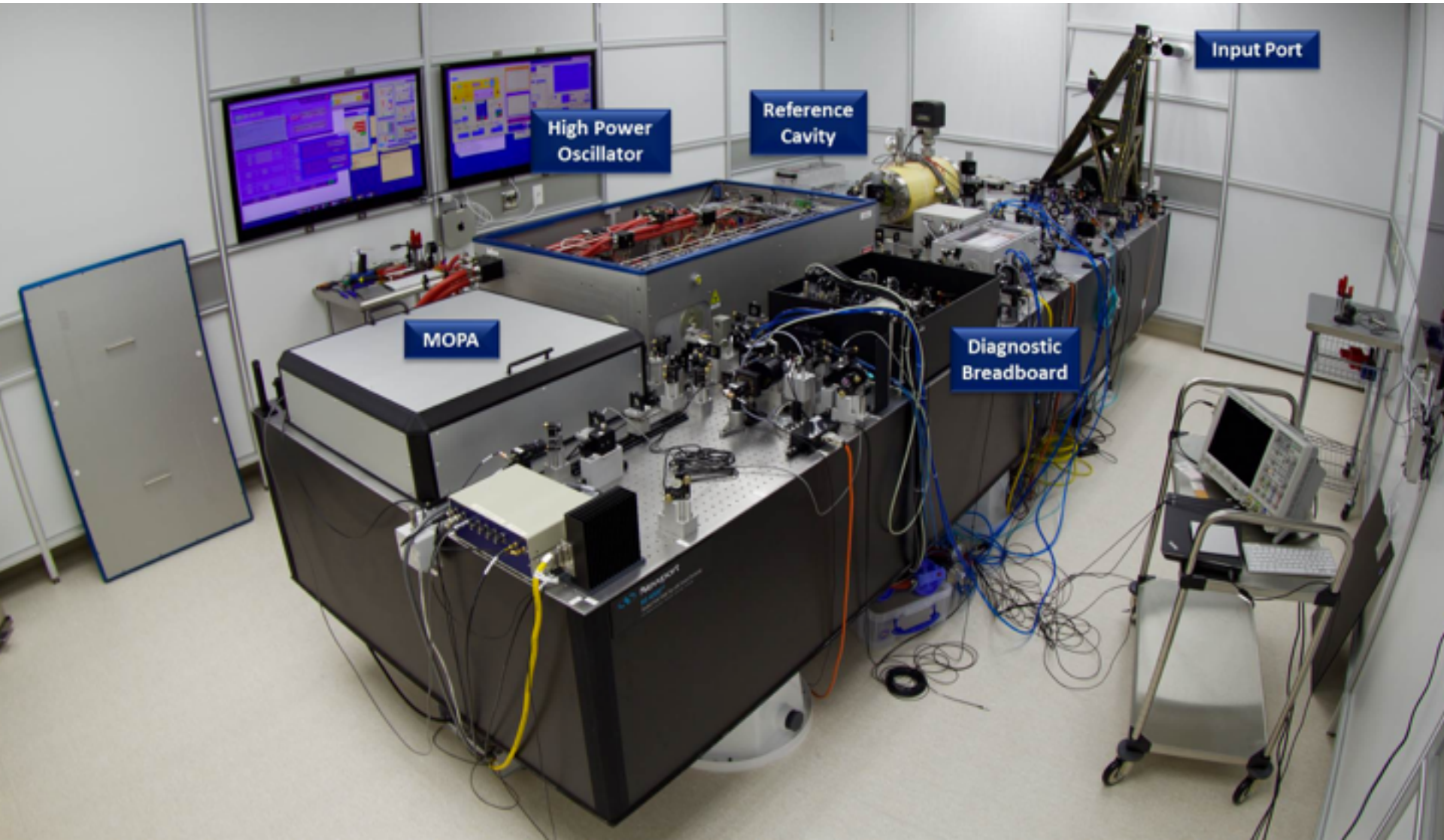
# Εργασίες αναβάθμισης του Advanced VIRGO



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

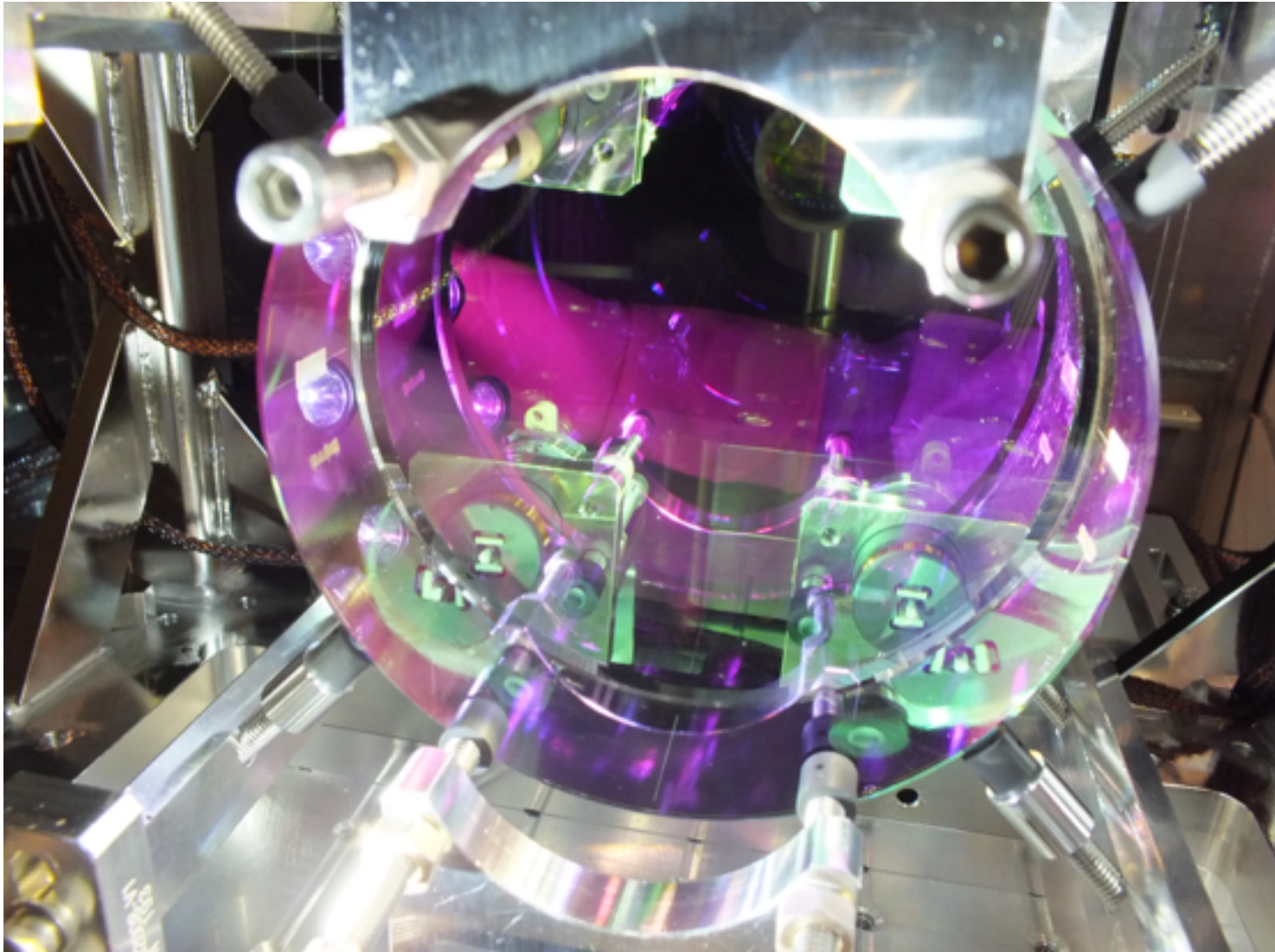
# Πηγή Laser

**Nd:YAG** (neodymium-doped yttrium aluminium garnet,  $\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) στο **υπέρυθρο**.



# Οπτικά στοιχεία

Λιωμένο καθαρό και ομογενές διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) (fused silica).



# Διοξείδιο του πυριτίου

"DO NOT EAT"

DESICCANT

SILICA

GEL

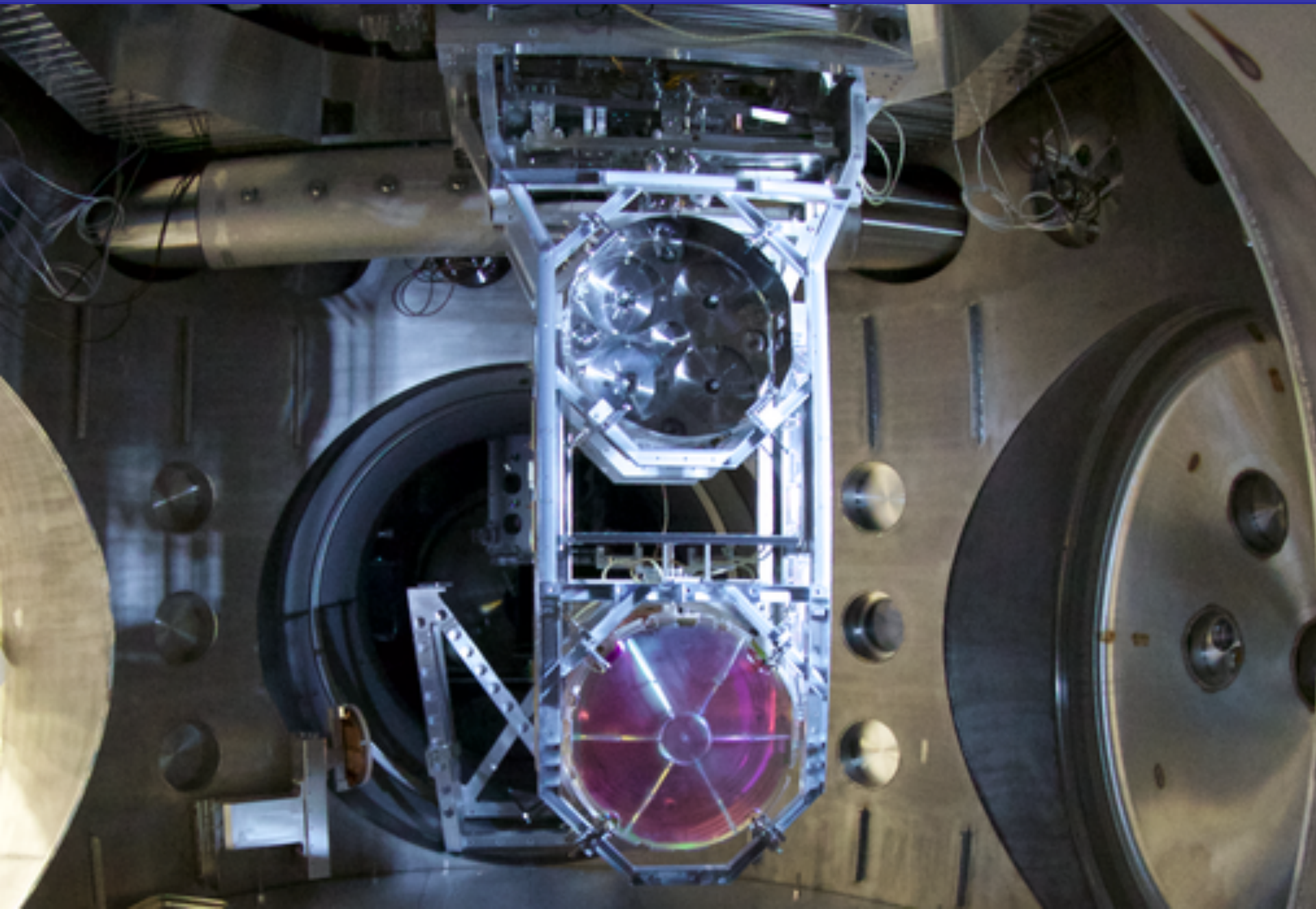
THROW AWAY

"DO NOT EAT"

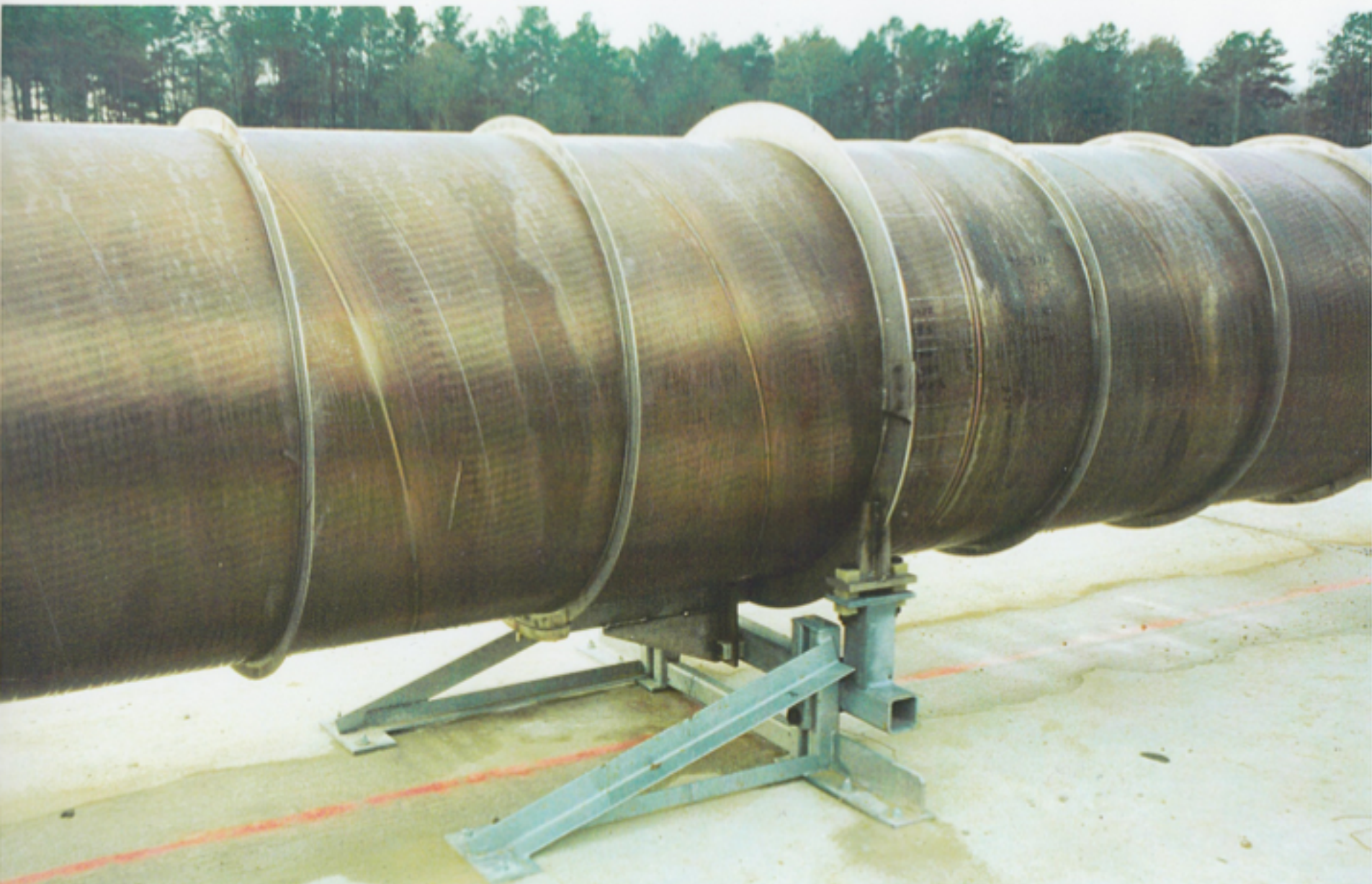
DESICCANT



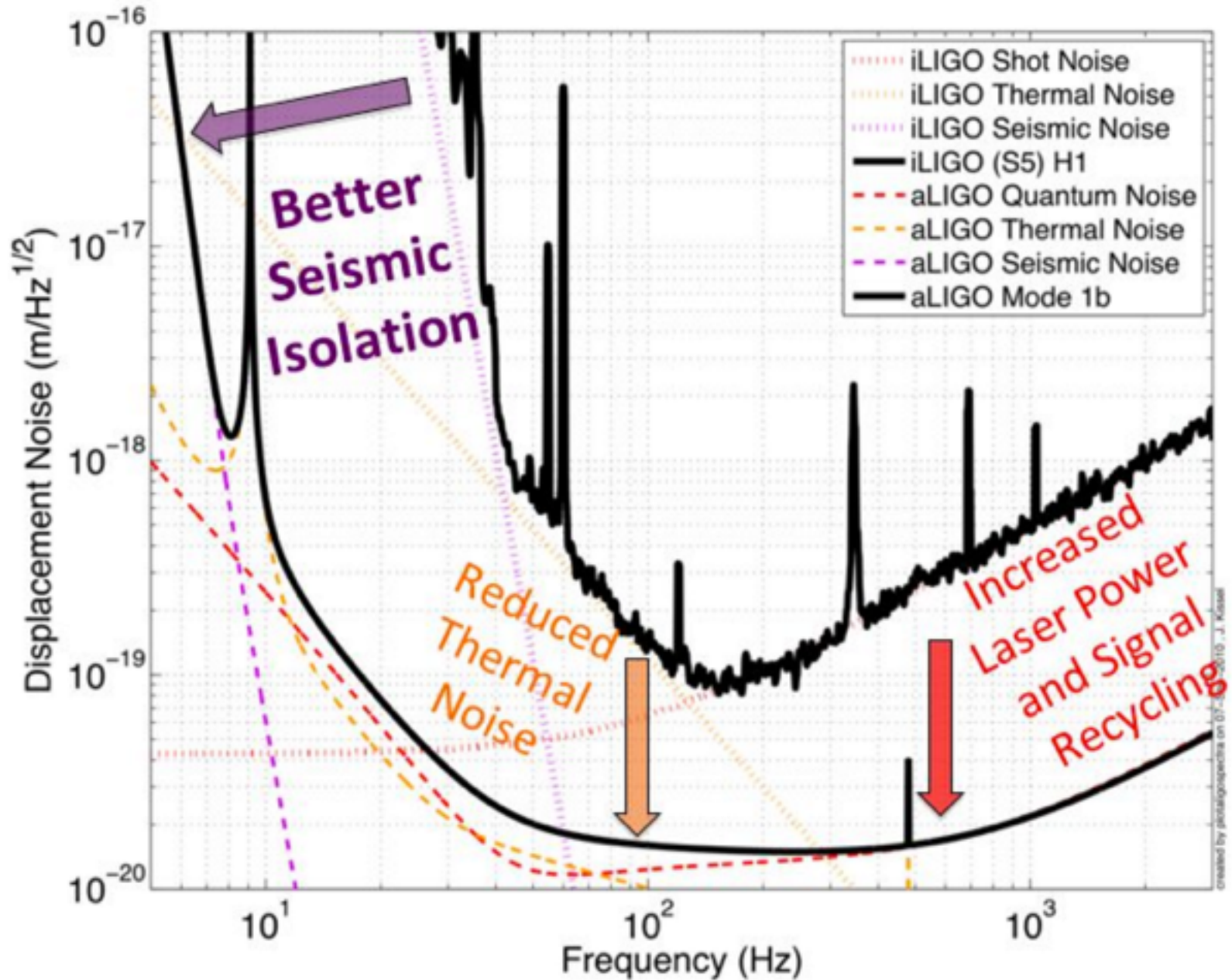
# Σύστημα απορρόφησης κραδασμών



# Σωλήνες κενού 1 $\mu\text{Pa}$

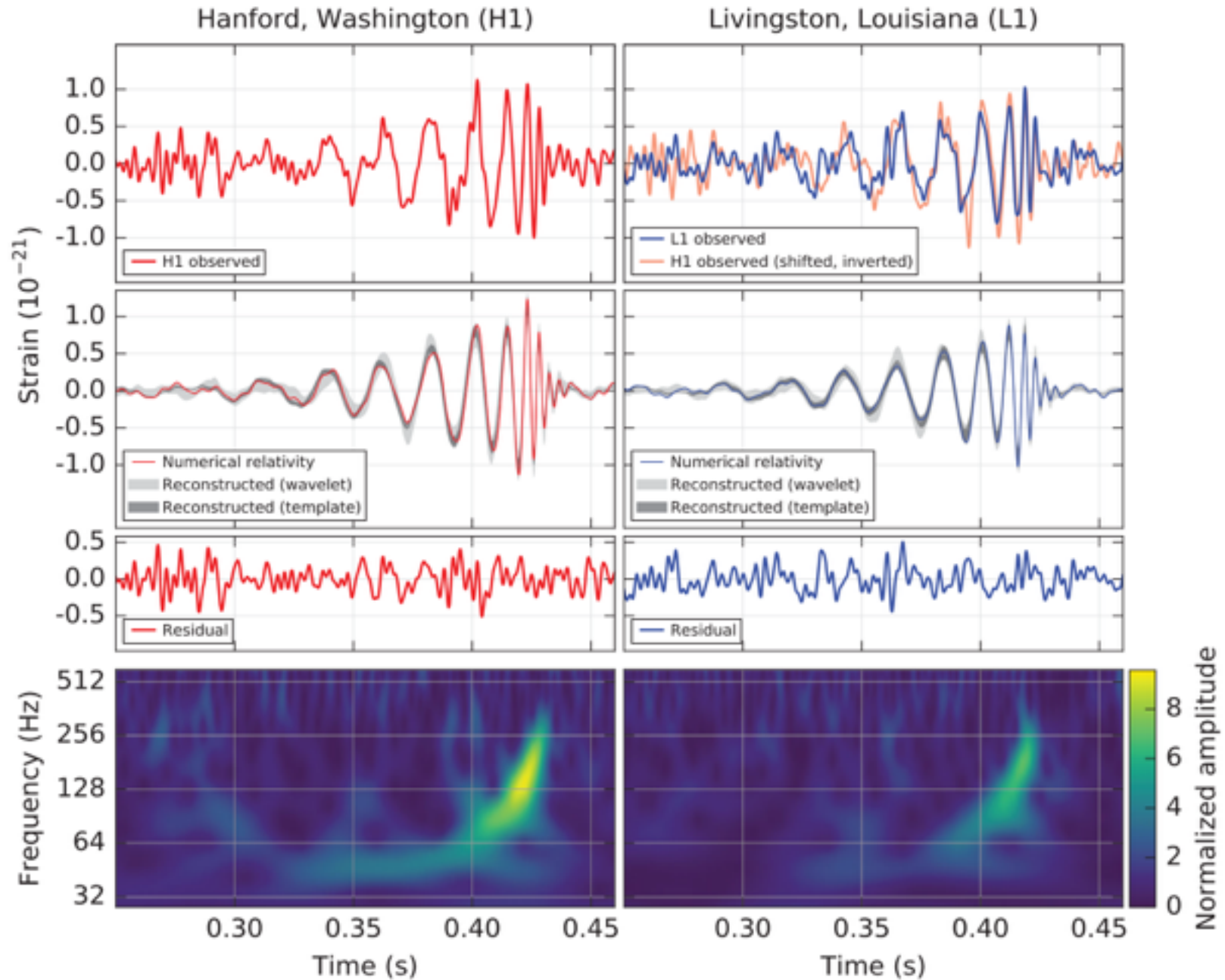


# Πηγές θορύβου



# Κυματομορφές της πηγής GW150914

Abbot et al. (2016)





# Χαρακτηριστικά της πηγής

---

---

Primary black hole mass	$36_{-4}^{+5} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29_{-4}^{+4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62_{-4}^{+4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67_{-0.07}^{+0.05}$
Luminosity distance	$410_{-180}^{+160} \text{ Mpc}$
Source redshift $z$	$0.09_{-0.04}^{+0.03}$

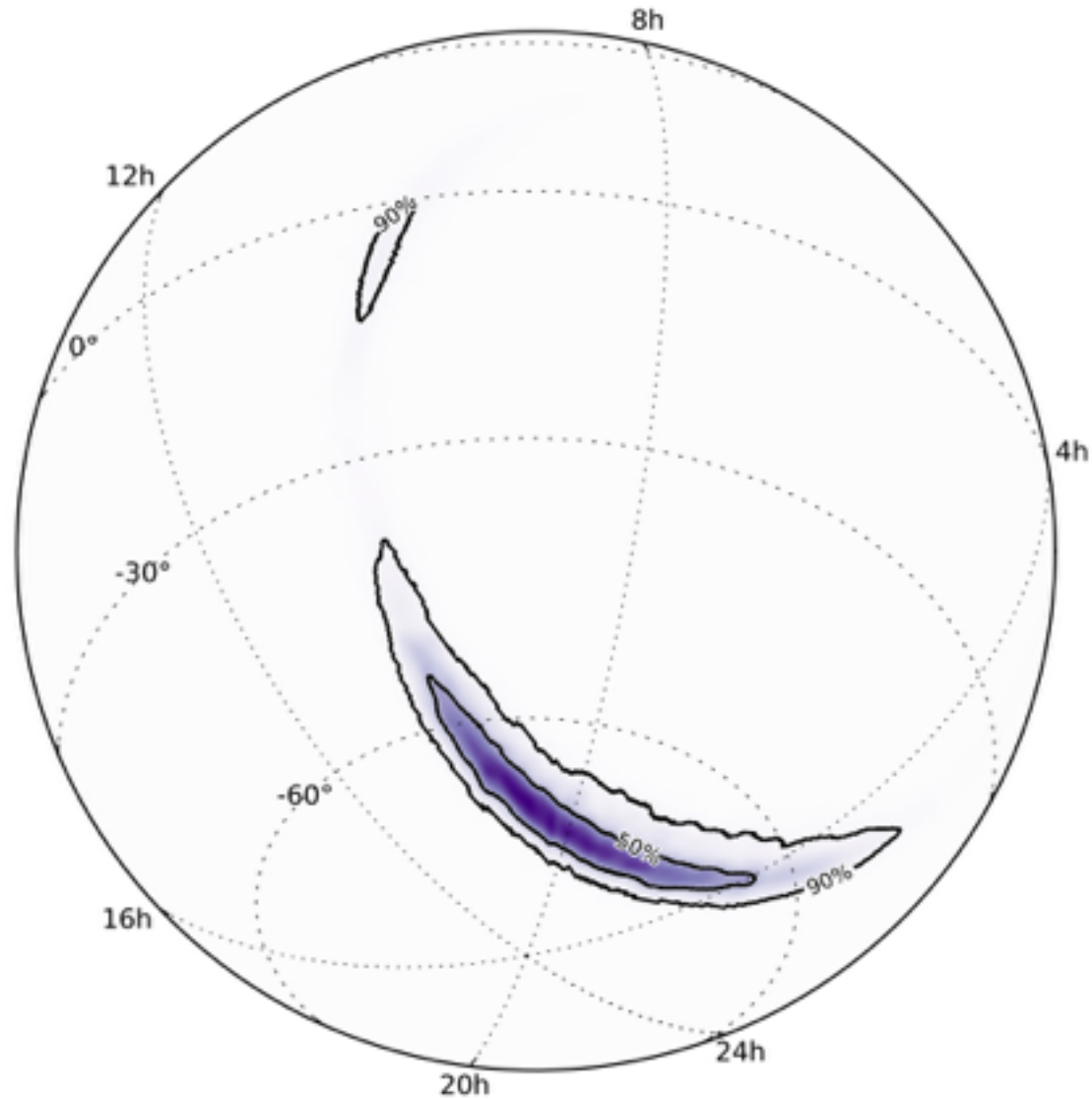
---

---

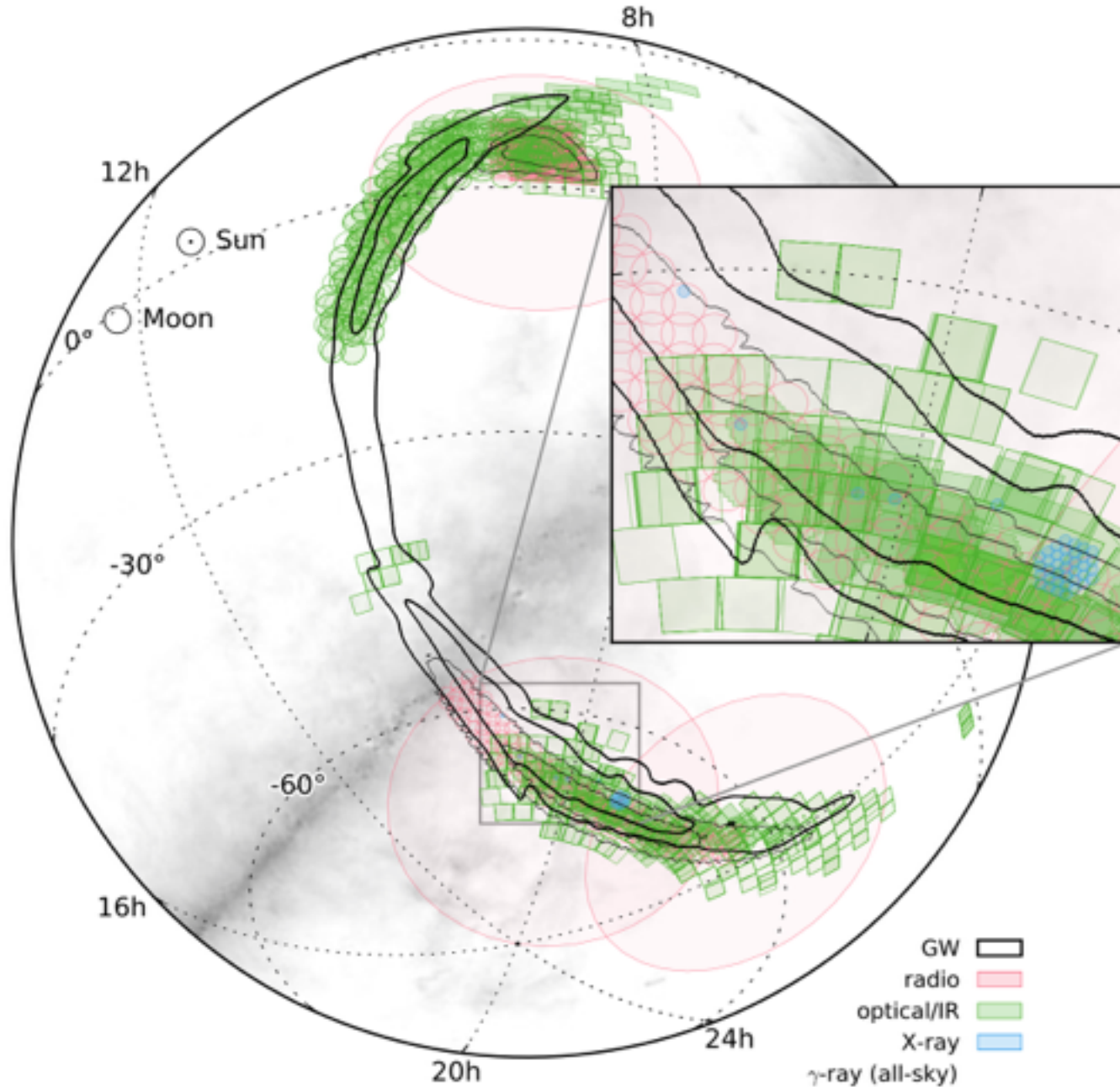
*(Με την υπόθεση επίπεδου κοσμολογικού μοντέλου  $\Lambda$ CDM, με  $\Omega_m = 0.3$  και σταθερά Hubble  $H_0 = 69.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .)*

# Περιοχή εντοπισμού της πηγής GW150914

**Χρονικό διάστημα ανάμεσα στις δύο ανιχνεύσεις:  $6.9^{+0.5}_{-0.4}$  ms.**



# Παρατηρήσεις στο Η/Μ φάσμα



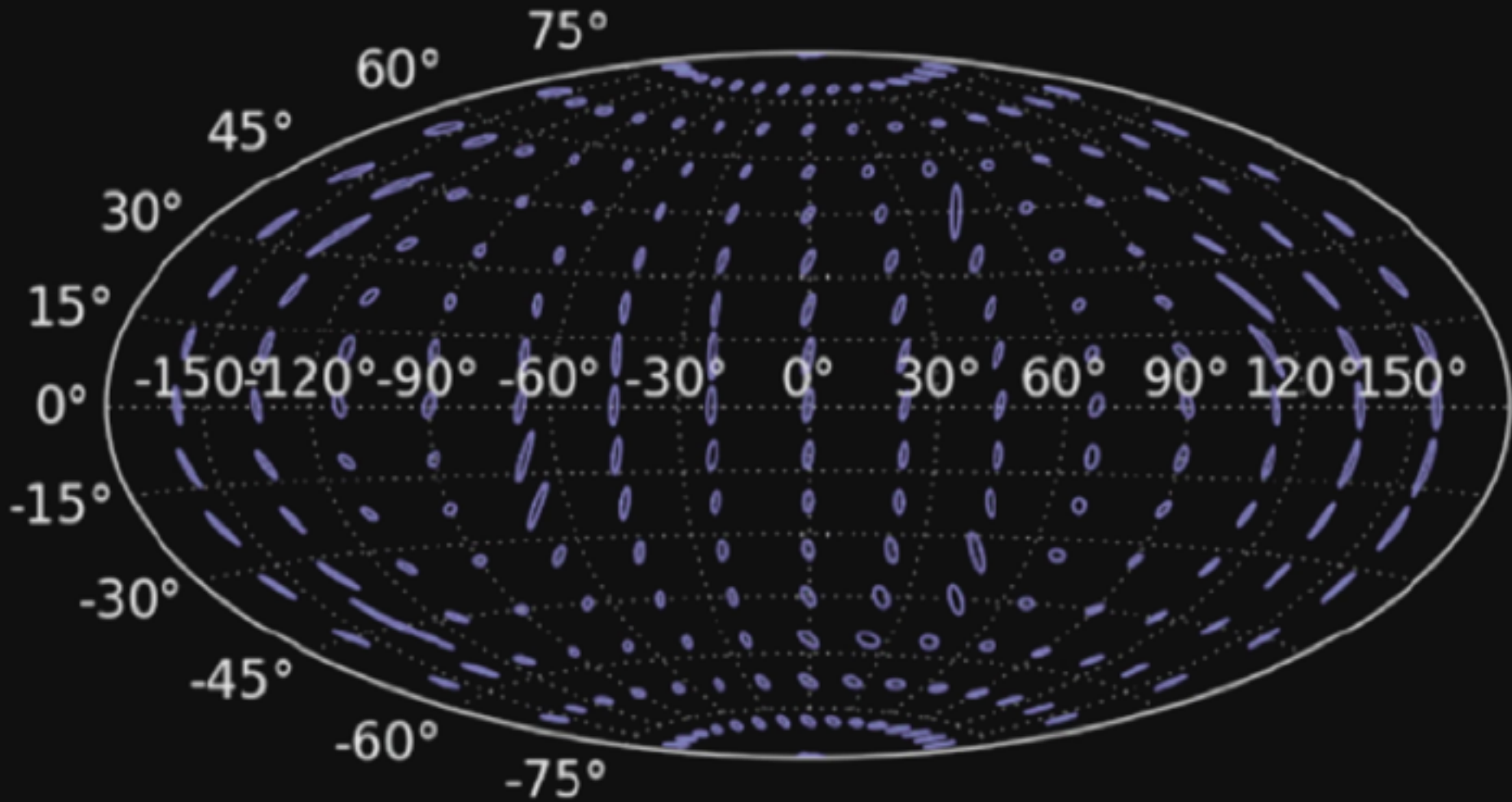
Abbot et al. (2016)

# Παγκόσμιο δίκτυο

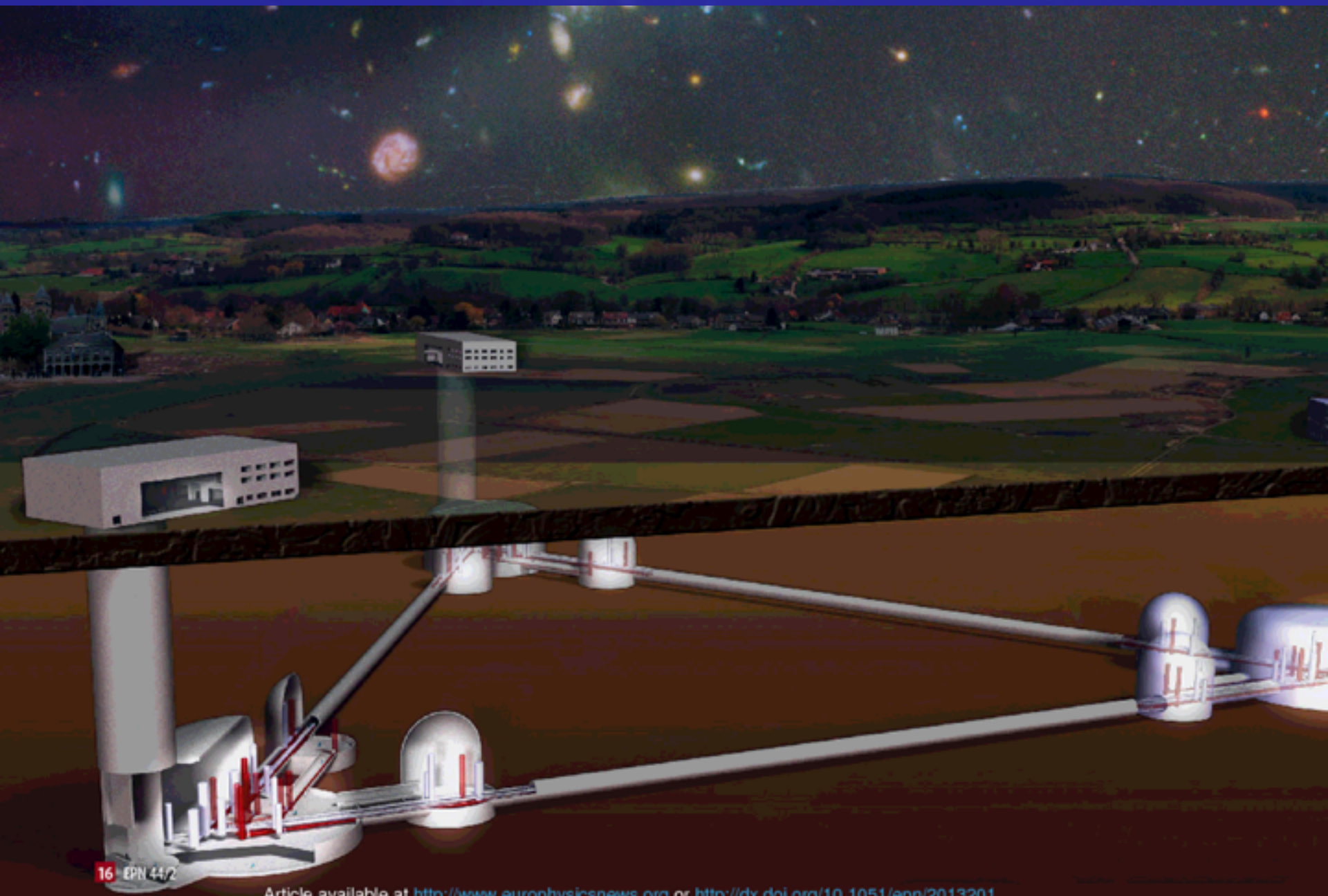
Σύντομα, όλοι οι συμβολομετρικοί ανιχνευτές θα λειτουργούν ως ένα *ενιαίο πείραμα*, το οποίο θα επιτρέπει τον *εντοπισμό θέσης* των διαφόρων πηγών.



# Ακριβής εντοπισμός θέσης



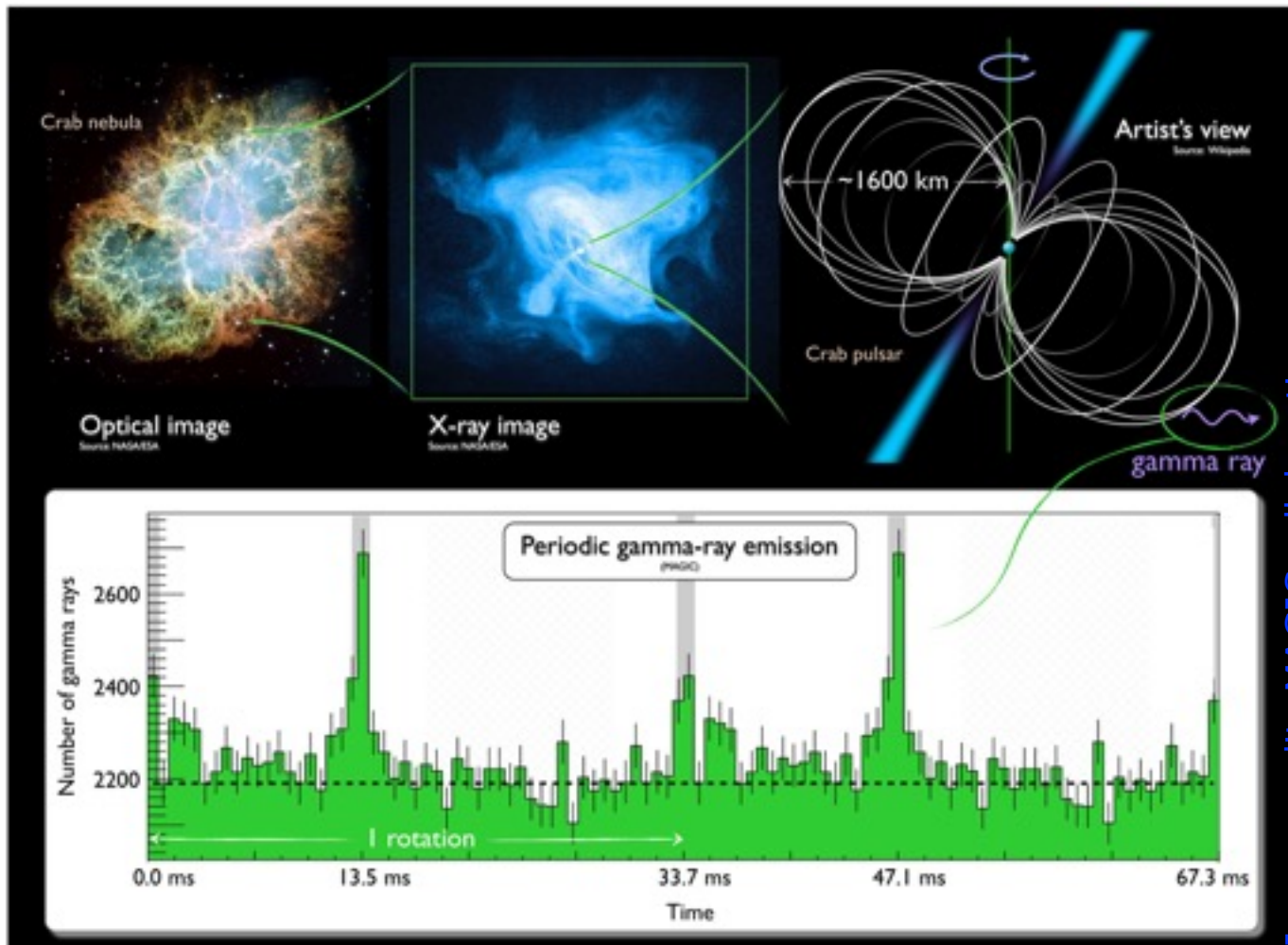
# Einstein Telescope



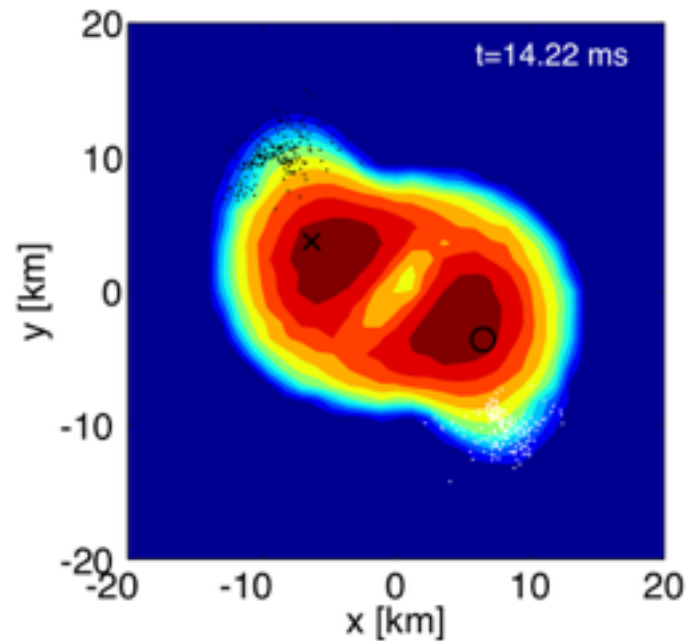
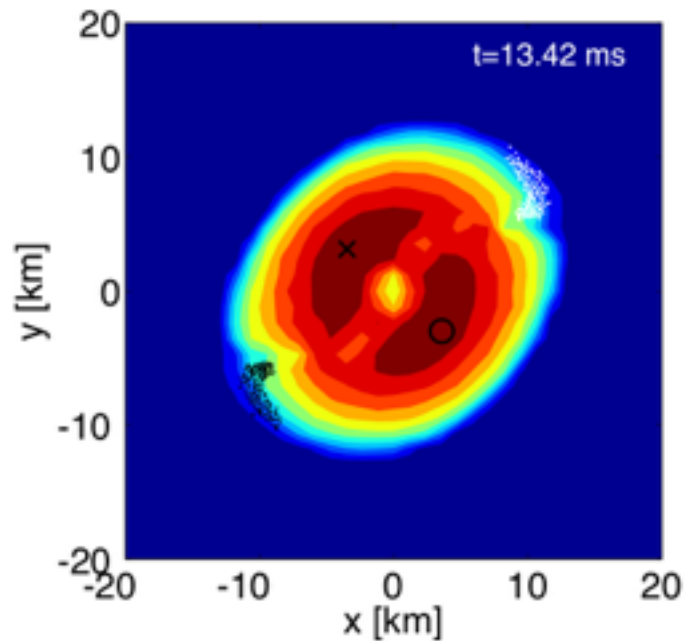
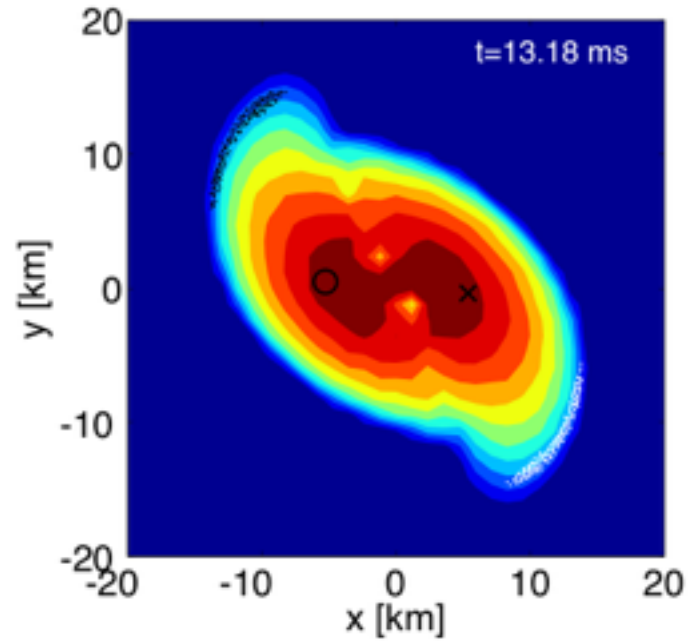
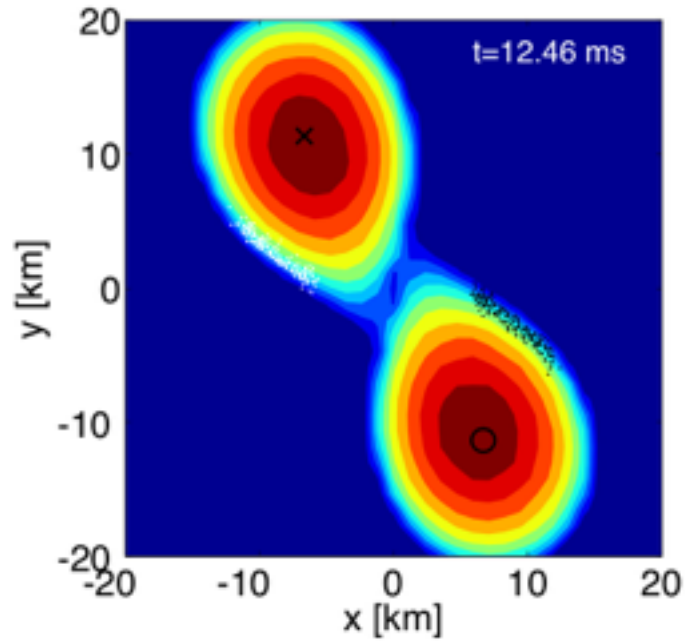
# Αστέρες Νετρονίων

Οι αστέρες νετρονίων παρατηρούνται εδώ και 50 χρόνια. Όμως, ακόμη δε γνωρίζουμε την κατάσταση της ύλης στον πυρήνα τους!

Δεν έχουμε ακριβείς μετρήσεις της ακτίνας!



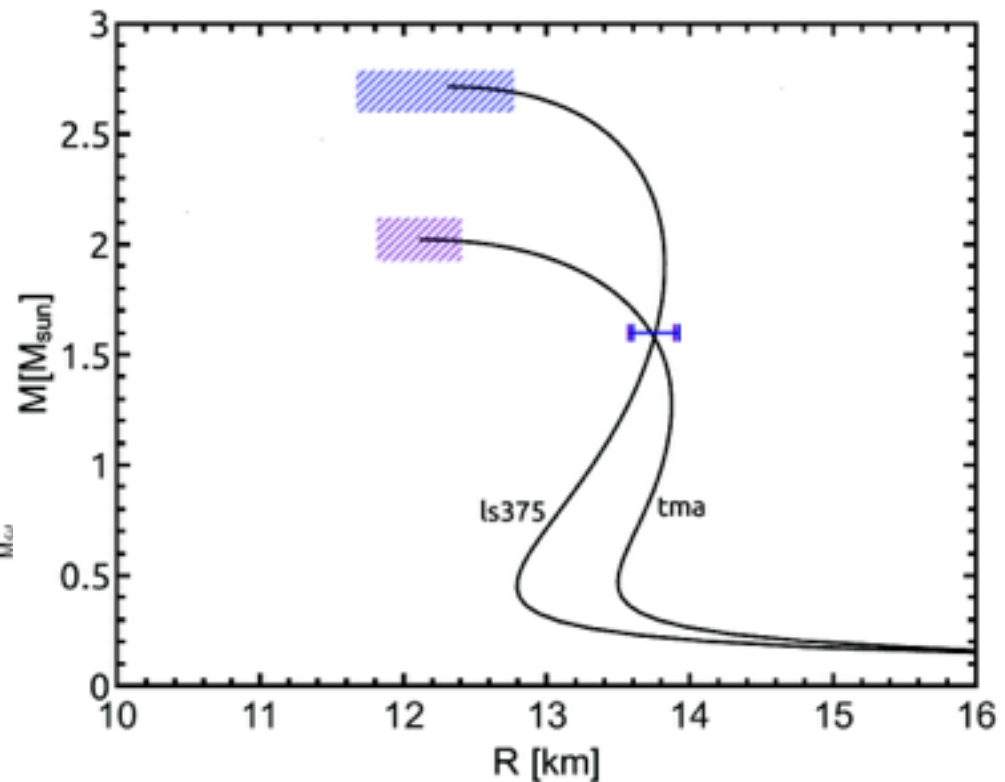
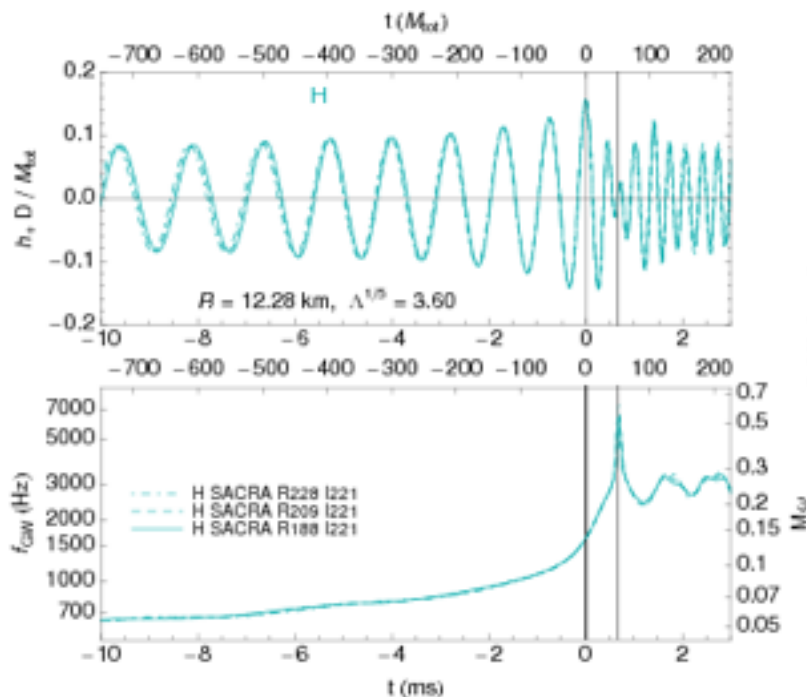
# Προσομοιώσεις με υπολογιστική σχετικότητα





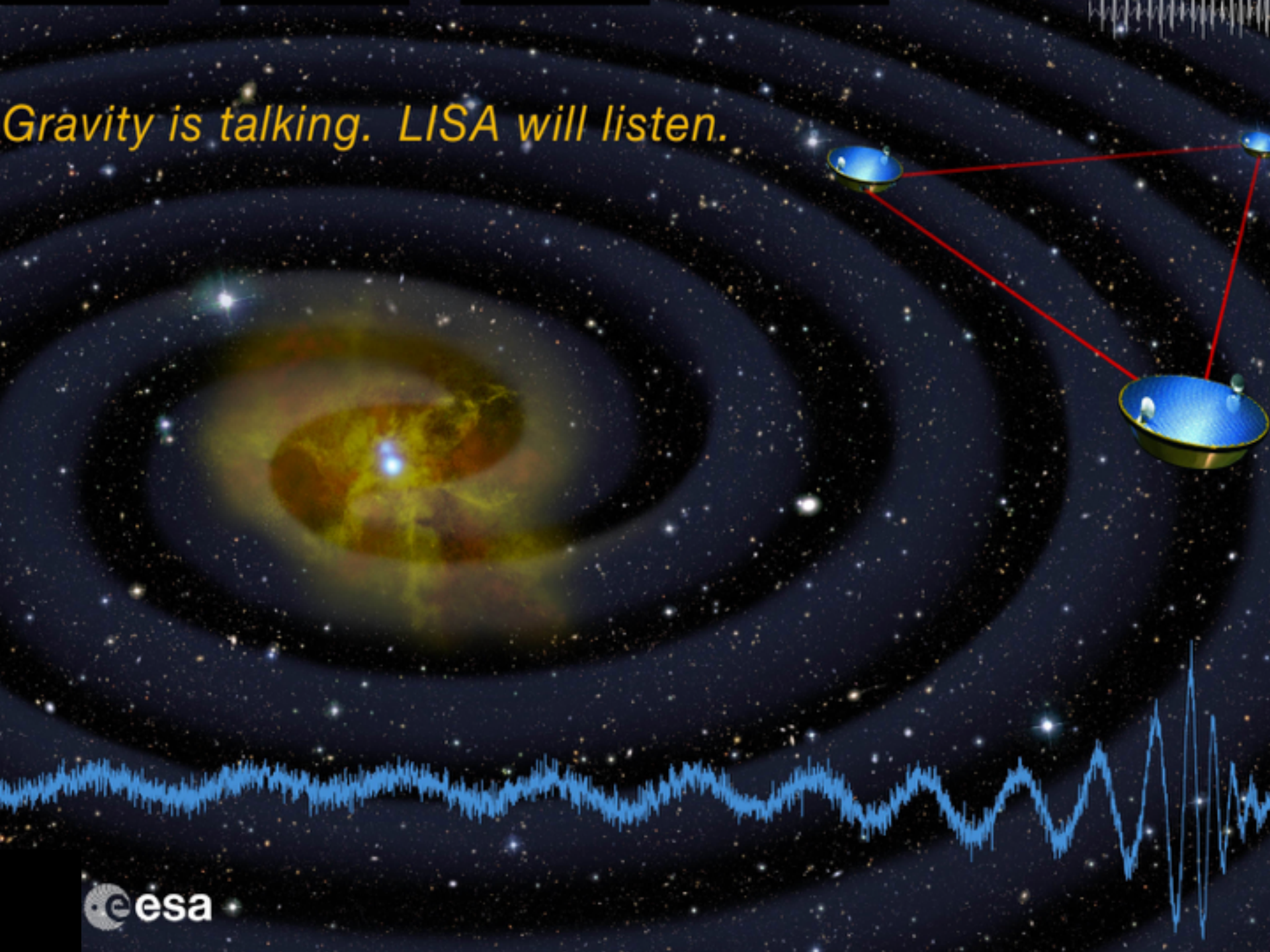
# Συγχώνευση Αστέρων Νετρονίων

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.



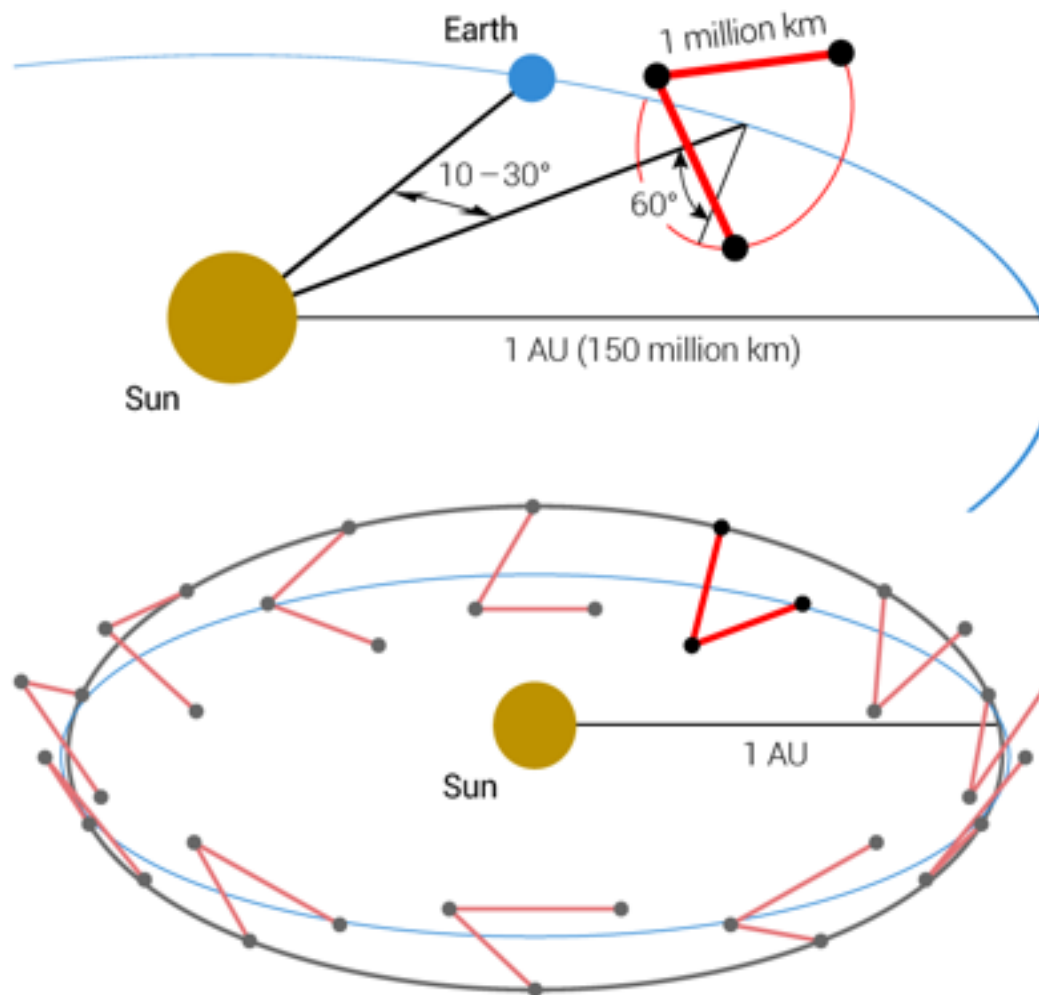
Η έρευνα στο ΑΠΘ υποστηρίζεται από υποτροφία Marie-Curie της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και από υποτροφία του πειράματος VIRGO.

*Gravity is talking. LISA will listen.*



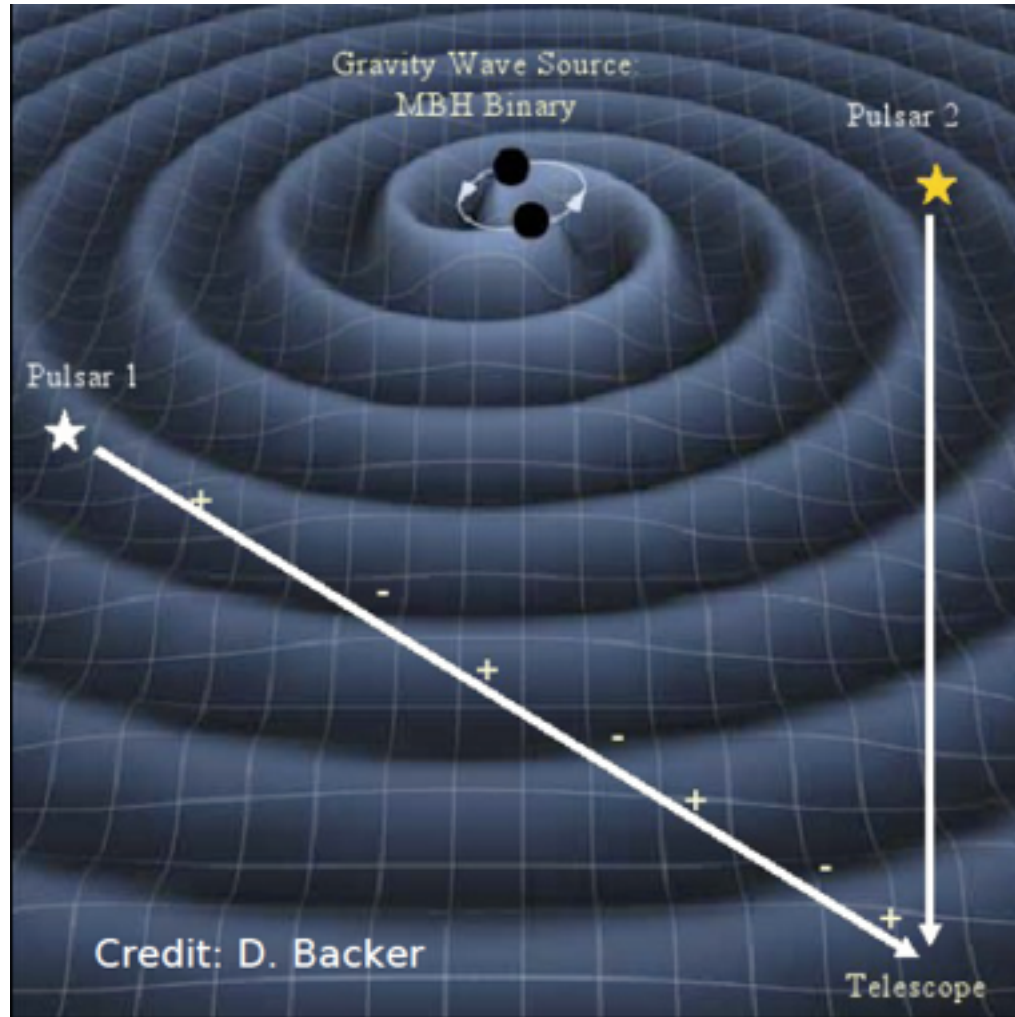
# Διαστημικό Συμβολόμετρο eLISA

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



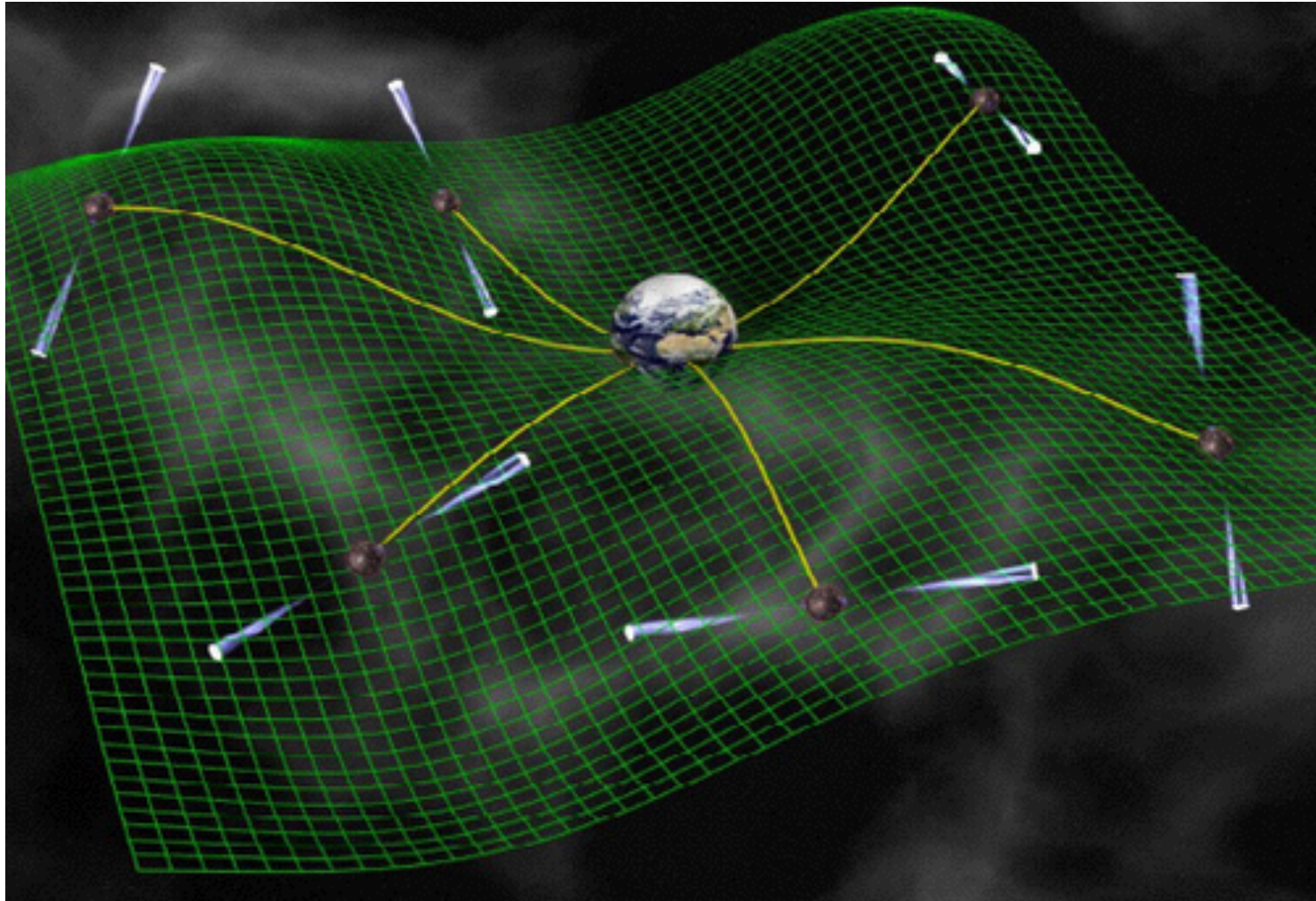
# Ανίχνευση Βαρυτικών Κυμάτων μέσω Pulsar

Τα pulsar μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων.



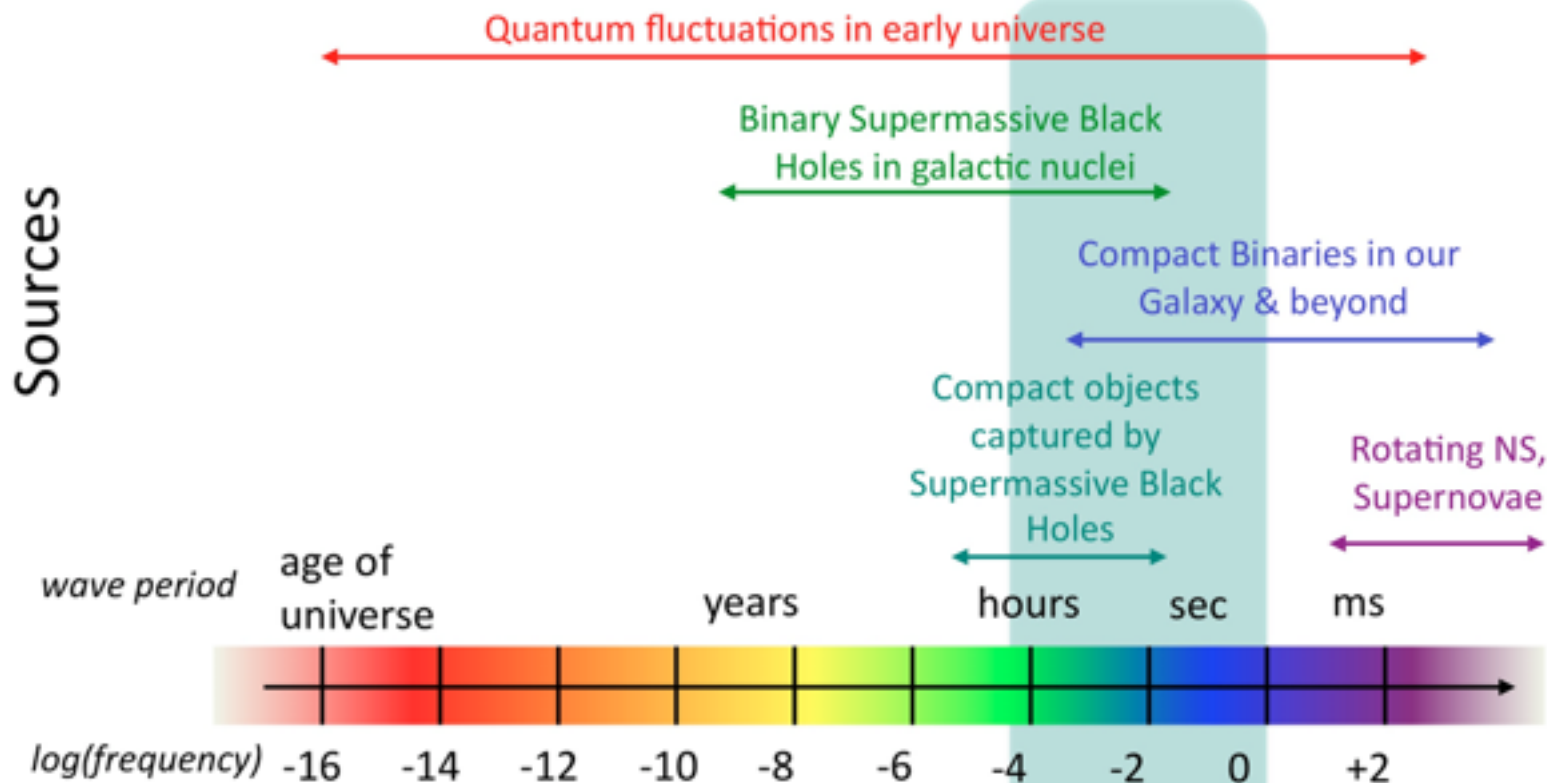
# Ανίχνευση Βαρυτικών Κυμάτων μέσω Pulsar

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

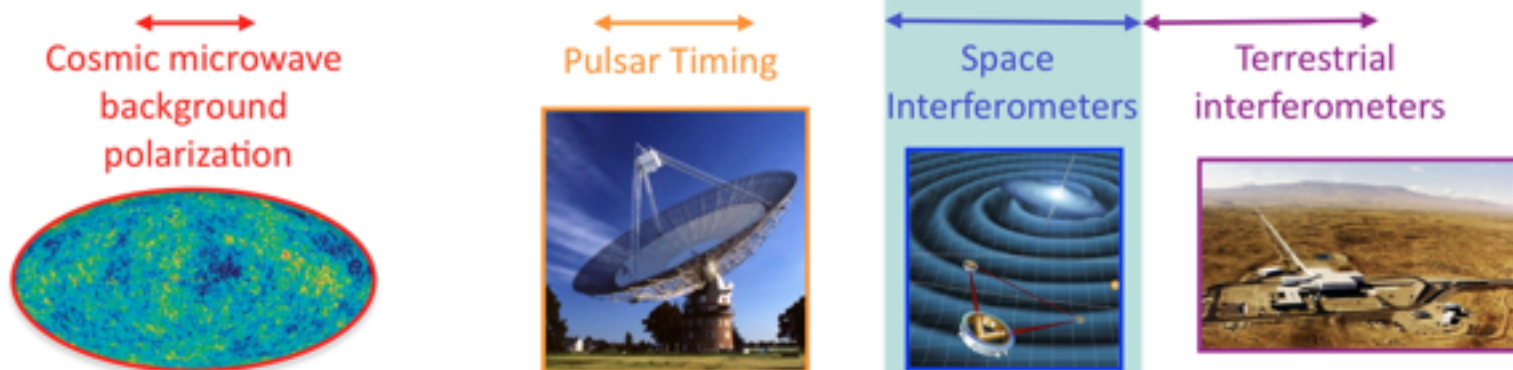


# The Gravitational Wave Spectrum

Sources

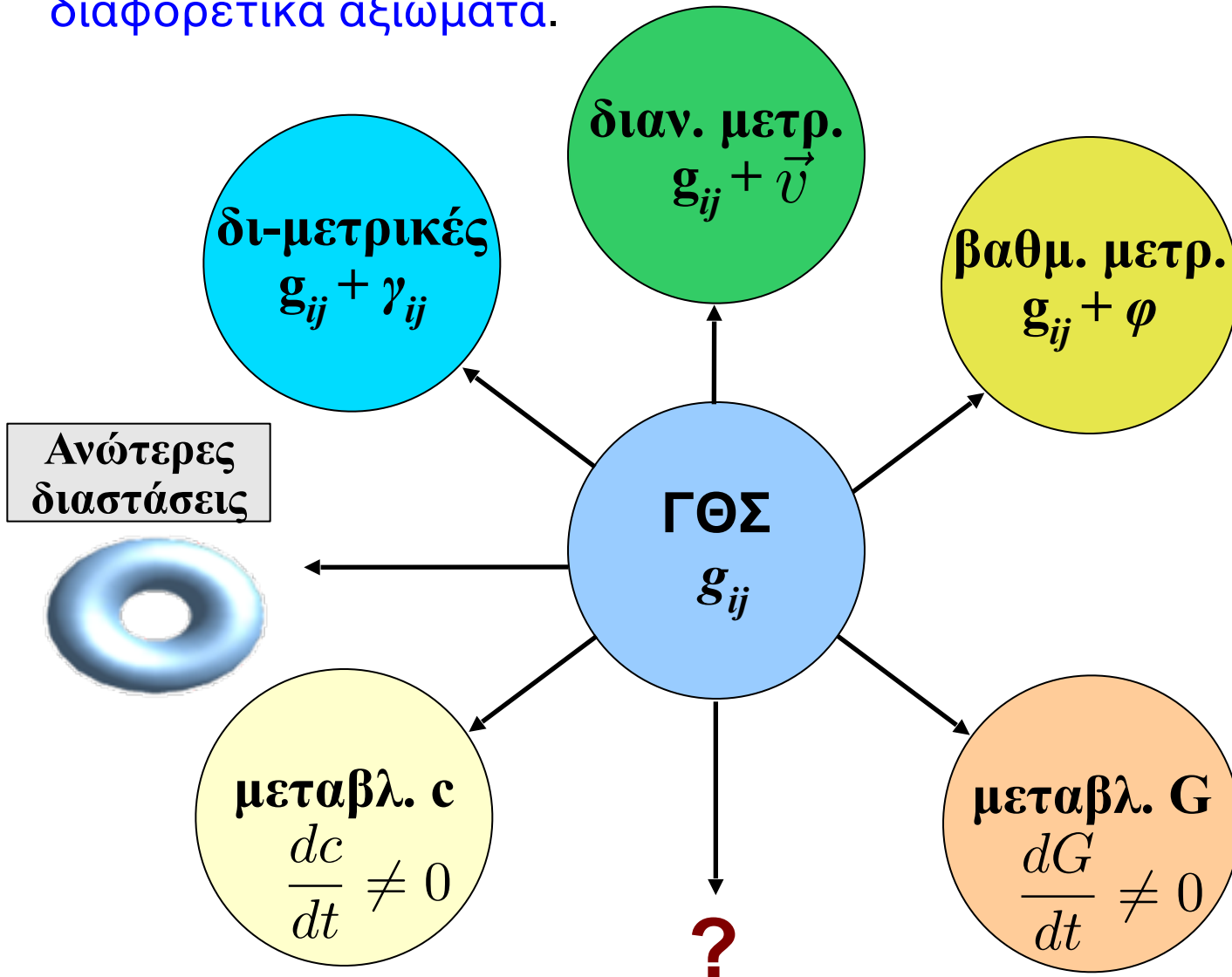


Detectors



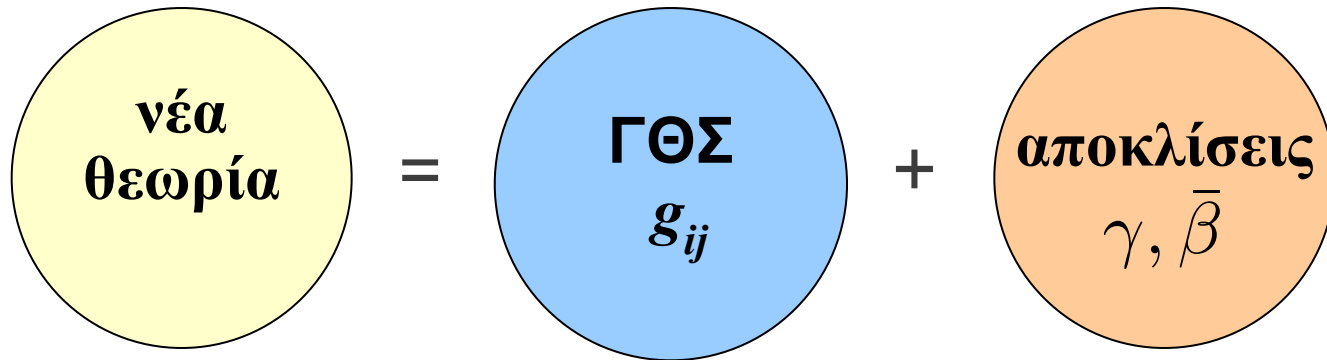
# Επεκτάσεις της ΓΘΣ

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.



Ευχαριστώ για την προσοχή σας!

Οι διαφάνειες είναι διαθέσιμες  
στην ιστοσελίδα:

[www.astro.auth.gr/~niksterg](http://www.astro.auth.gr/~niksterg)

# Έλεγχος της ταχύτητας διάδοσης

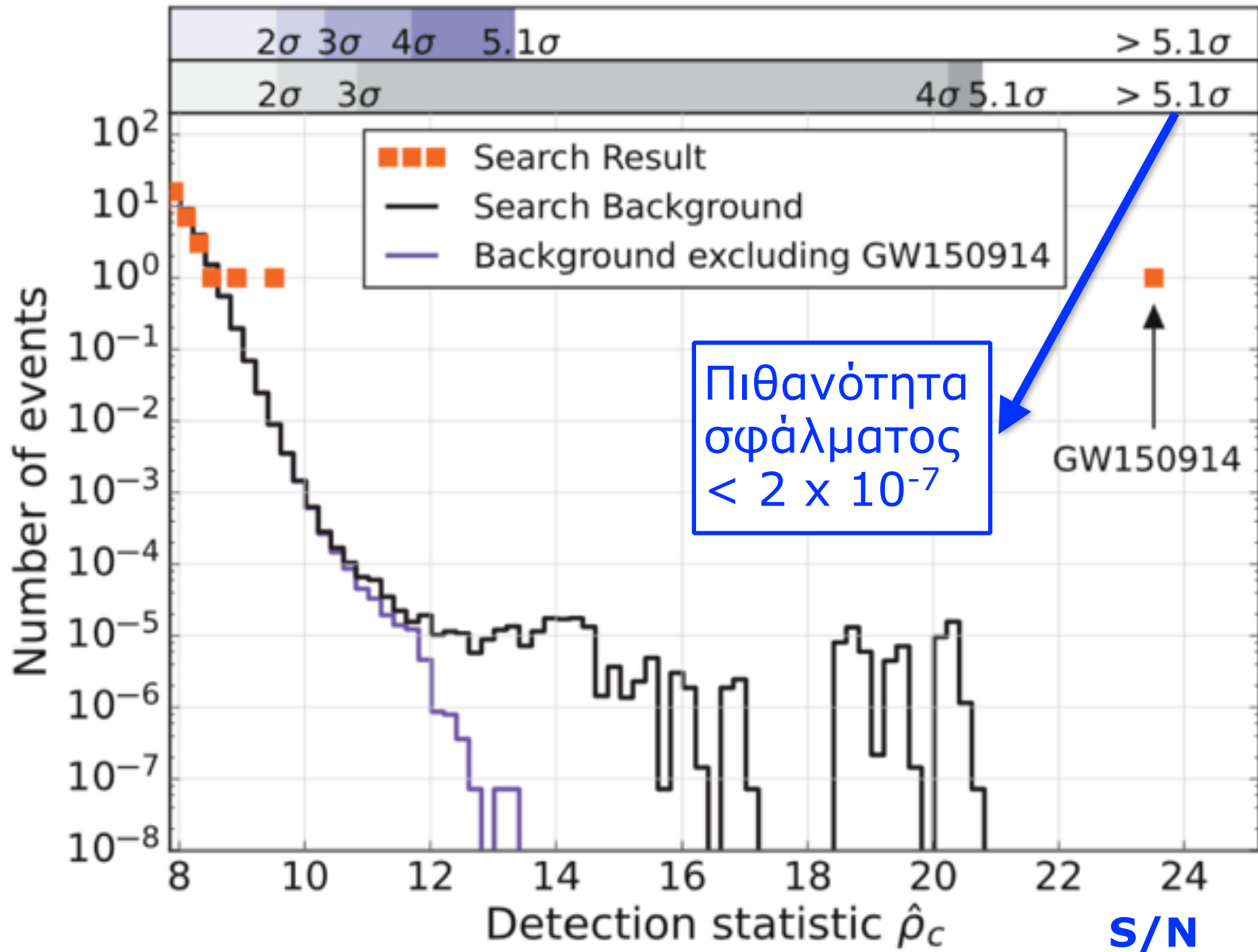
**Αν τα βαρυτόνια έχουν μάζα, τα βαρυτικά κύματα θα διαδίδονται με ταχύτητα  $v < c$  (που θα εξαρτάται και από τη συχνότητα). Προκύπτει μια συνολική μετατόπιση στη φάση του βαρυτικού κύματος.**

**Από την παρατήρηση της πηγής GW150914 προκύπτει:**

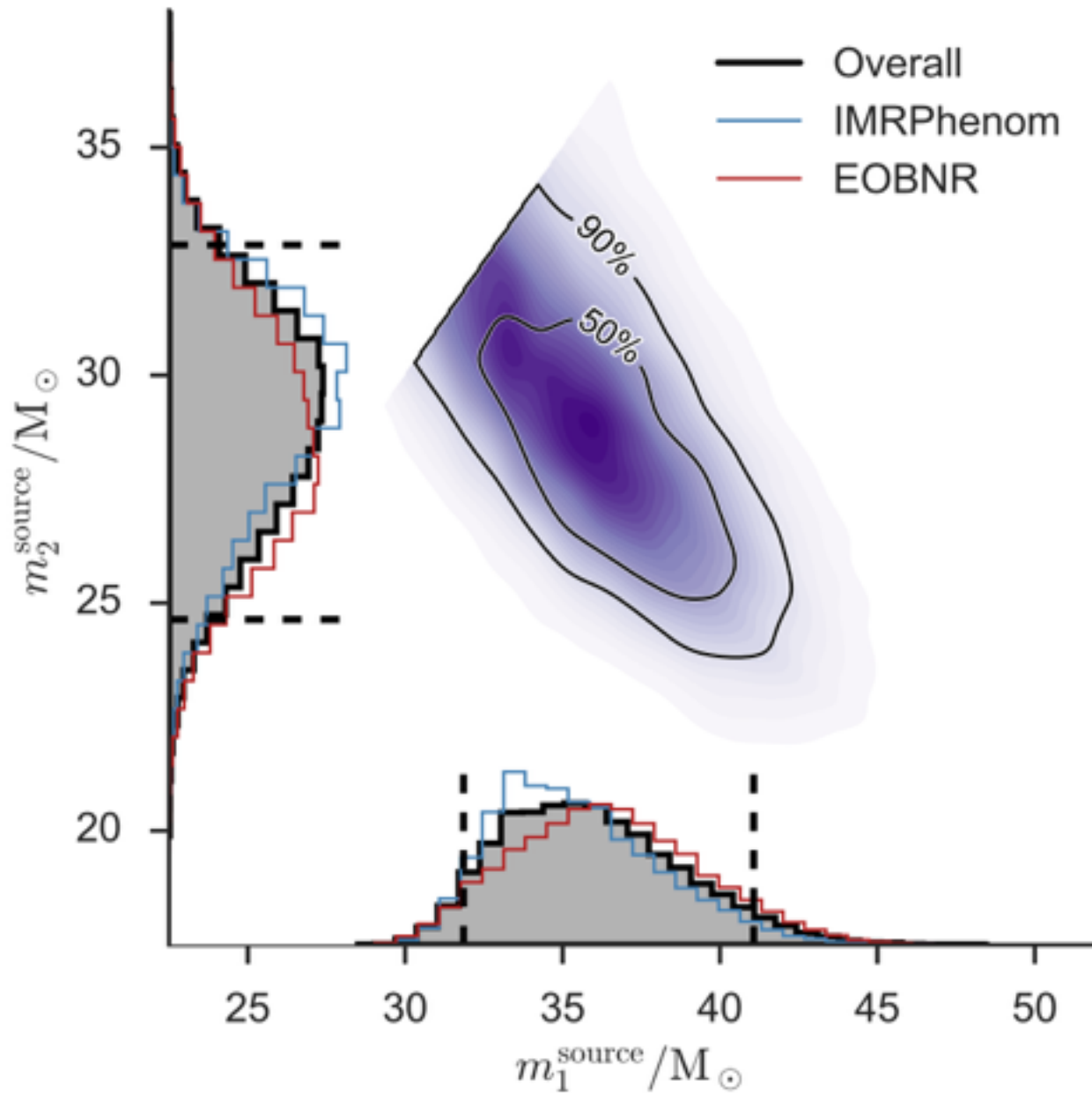
$$m_g \leq 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2$$

**Αυτό το όριο είναι 1000 φορές πιο αυστηρό, από ό,τι προηγούμενα πειράματα σε διπλά συστήματα πάλσαρ.**

# Στατιστική ανάλυση της ανίχνευσης



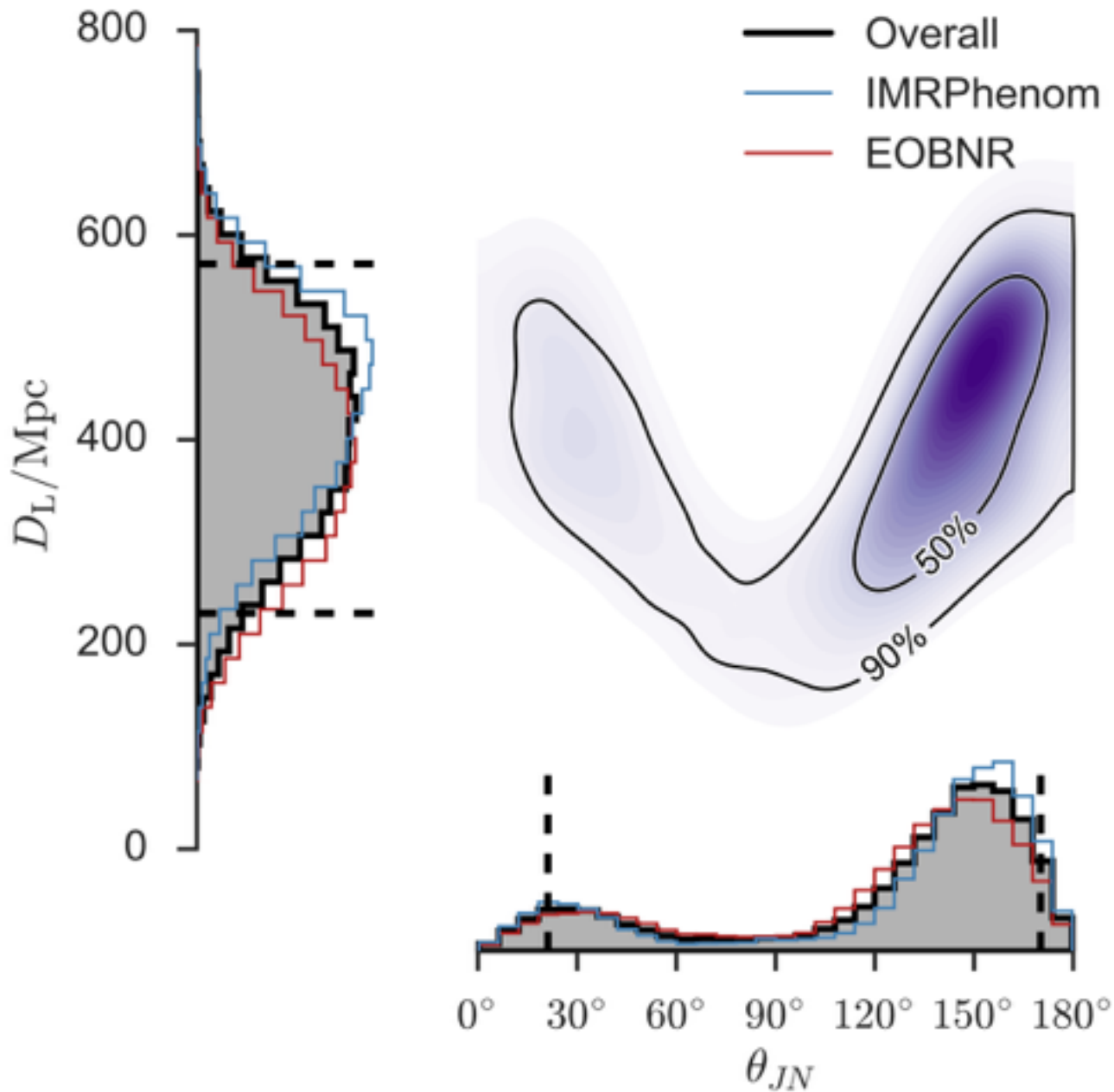
# Υπολογισμός των μαζών



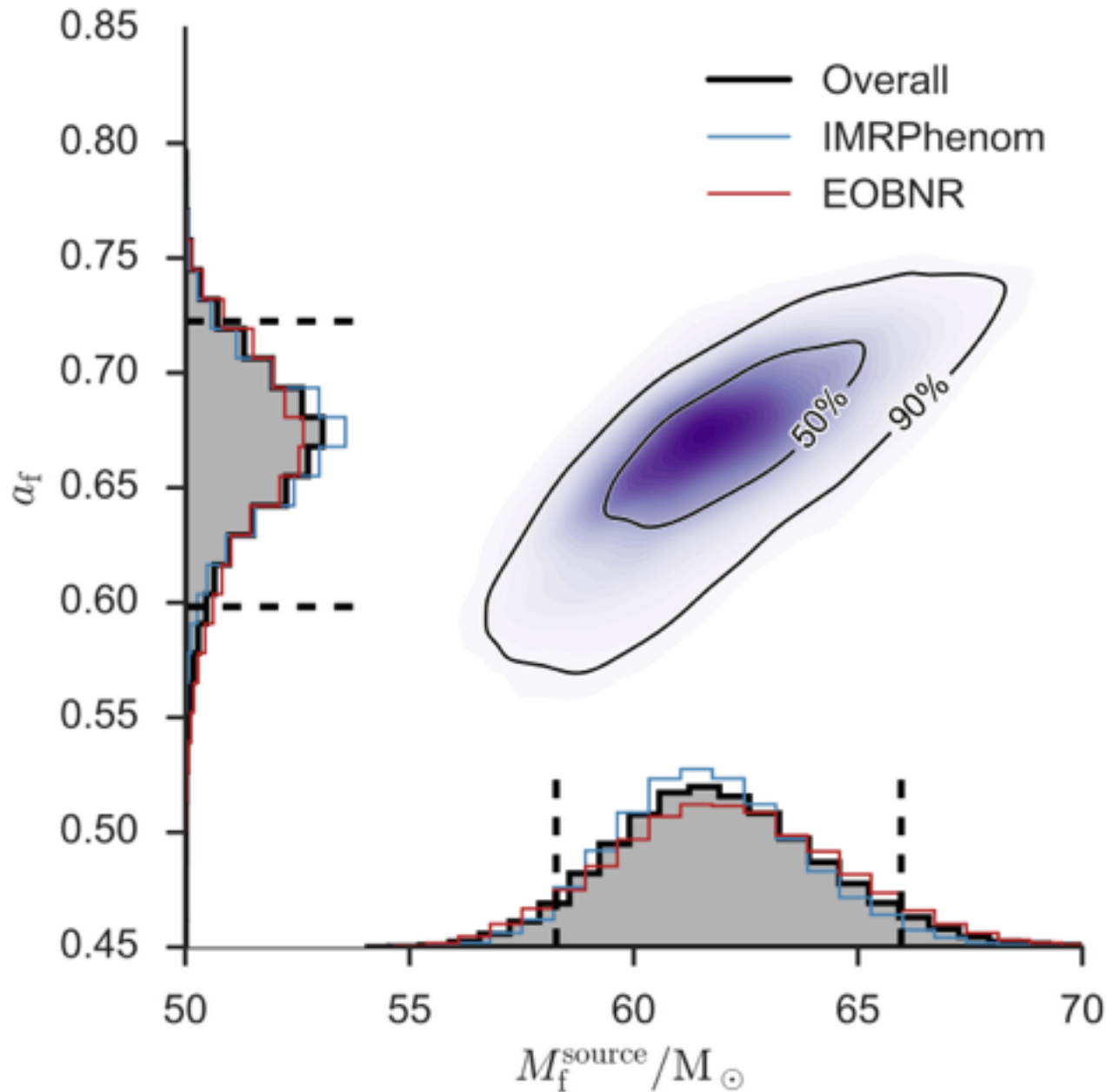
Abbot et al. (2016)

# Υπολογισμός απόστασης και κλίσης της τροχιάς

Abbot et al. (2016)



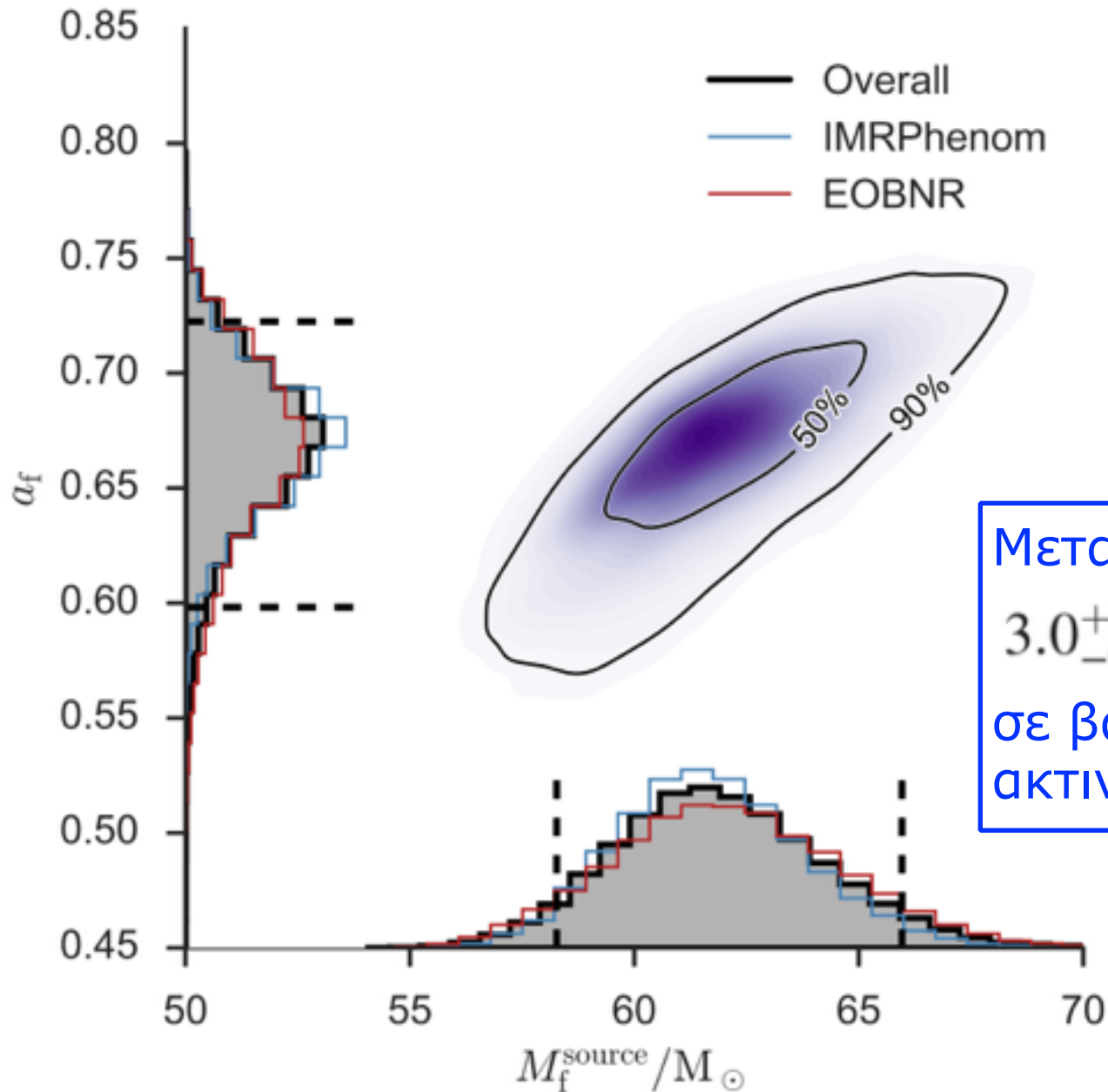
# Υπολογισμός τελικής μάζας και στροφορμής



Abbot et al. (2016)

# Υπολογισμός τελικής μάζας και στροφορμής

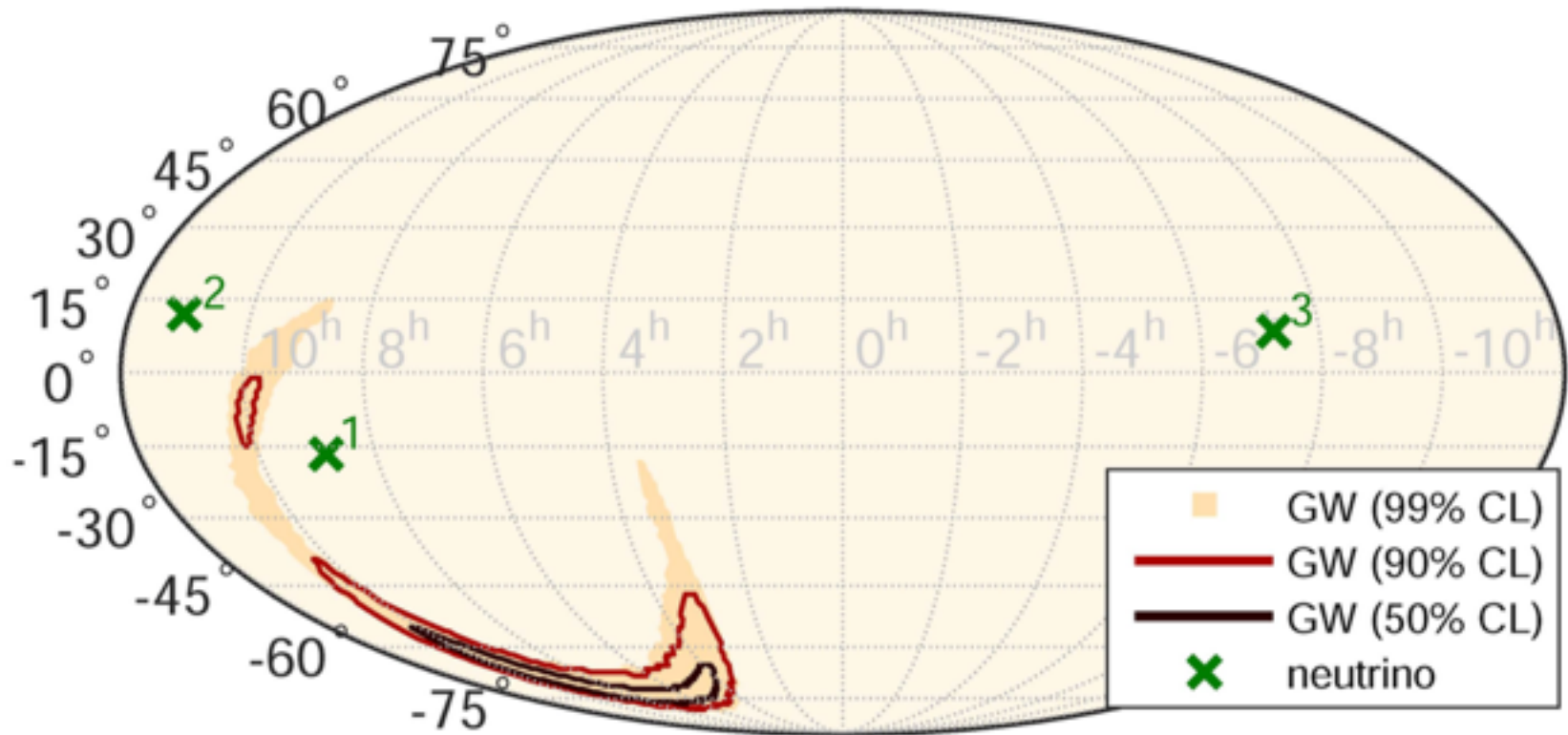
Abbot et al. (2016)



# Έλεγχος για νετρίνα με IceCube και ANTARES

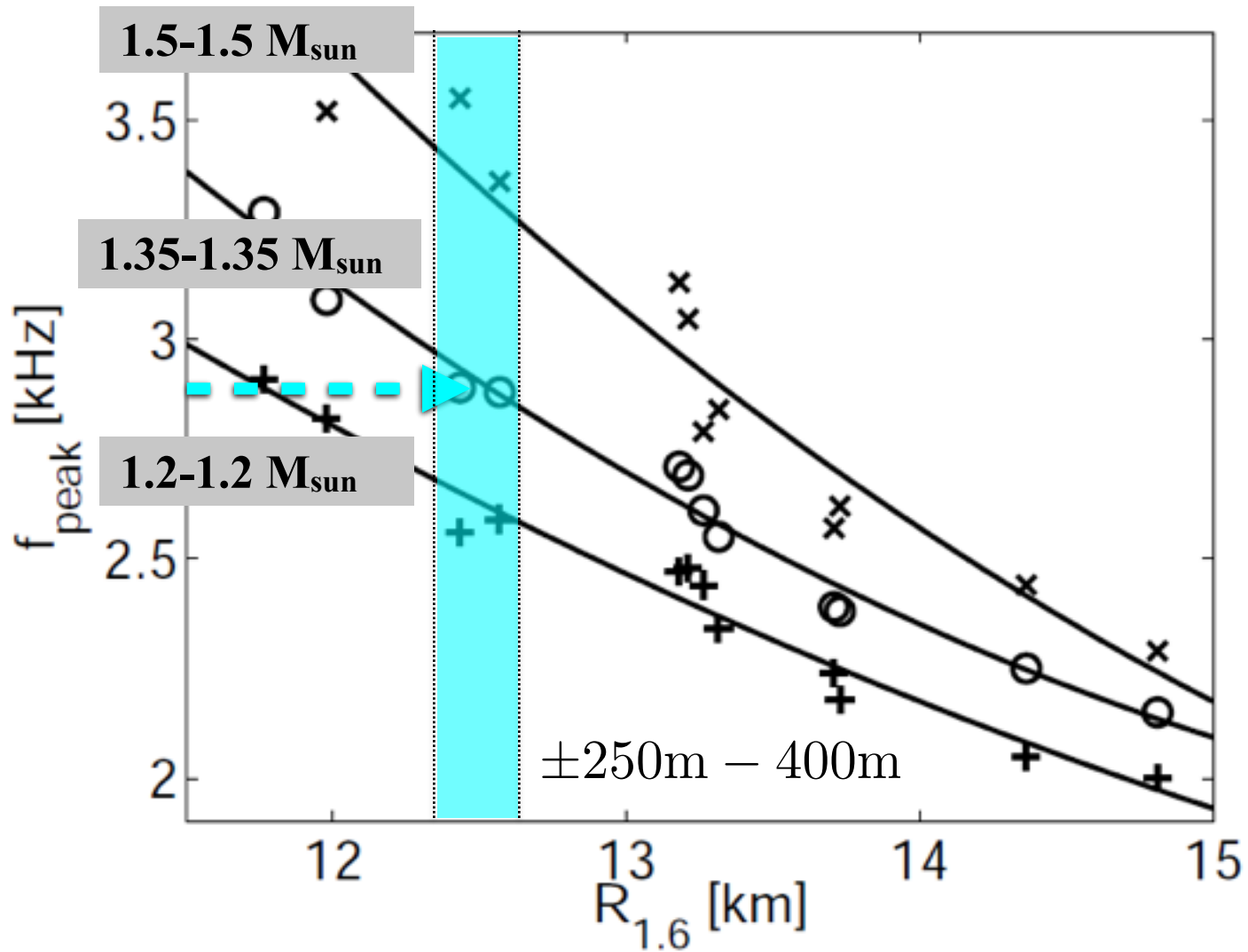
**Άνω όριο στην εκπομπή νετρίνο:**

$$E_{\nu, \text{tot}}^{\text{ul}} \sim 10^{52} - 10^{54} \left( \frac{D_{\text{gw}}}{410 \text{ Mpc}} \right)^2 \text{ erg}$$





# Υπολογισμός της ακτίνας



# Καμπύλες θορύβου

