

ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΣΤΗΝ
ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ ΒΑΡΥΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΥΛΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



Θεσσαλονίκη, 2/3/2016

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

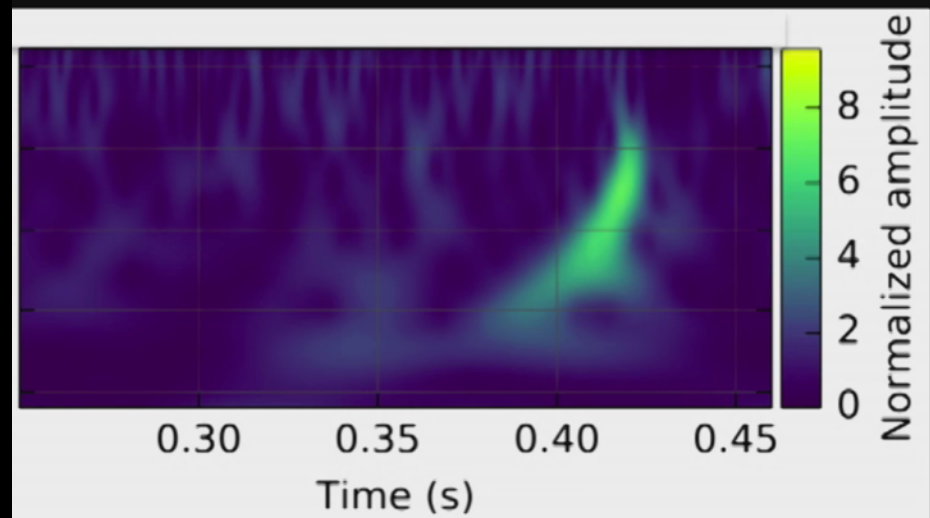
LLO General

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

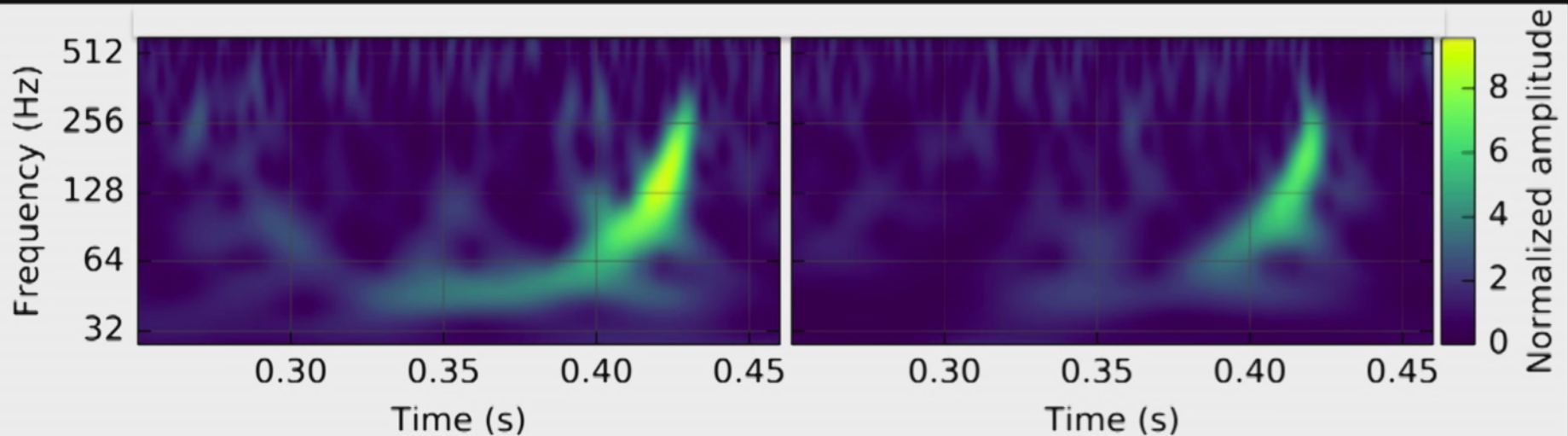
LLO General

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

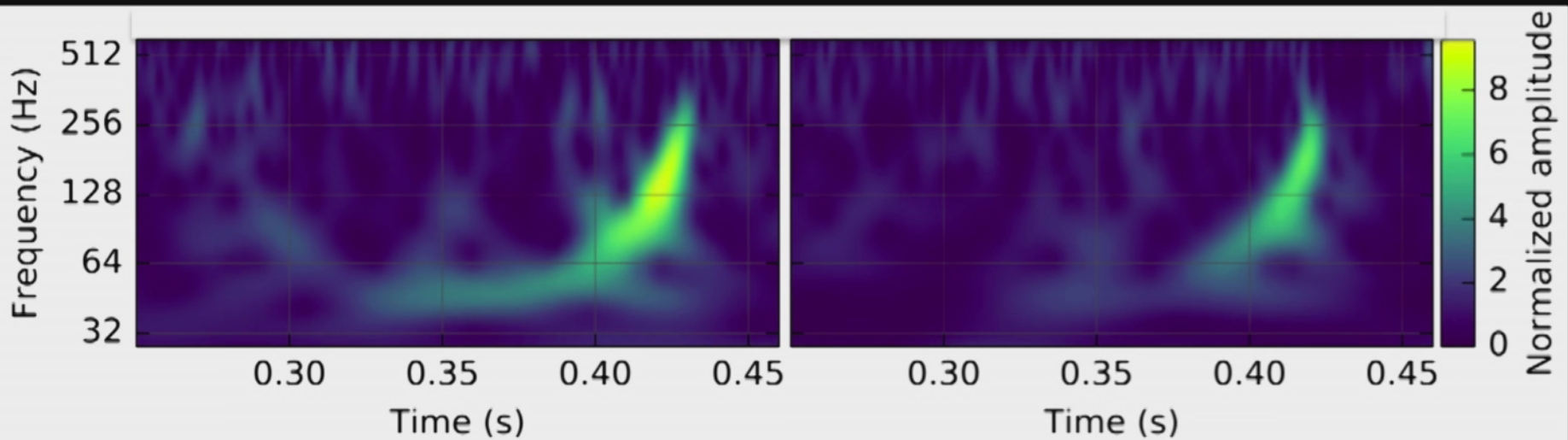
william.parker@LIGO.ORG - posted 04:05, Monday 14 September 2015 (20526)

IFO Status

Operating Mode: Observing

seismic is quiet; weather is clear

GW150914



Δομή της Ομιλίας

1. ***Σύντομη ιστορική αναδρομή.***
2. ***Βαρυτικά κύματα στη Γενική Θεωρία Σχετικότητας.***
3. ***Συμβολομετρικοί ανιχνευτές.***
4. ***Η εξαγωγή των χαρακτηριστικών της πηγής GW150914.***
5. ***Υπολογιστική Σχετικότητα.***
6. ***Μέθοδος μέτρησης της ακτίνας αστέρων νετρονίων μέσω βαρυτικών κυμάτων.***
7. ***Προοπτικές.***

Πως διαδίδεται η βαρυτική έλξη;

1805: ο Laplace πρότεινε ότι η βαρυτική έλξη διαδίδεται με **πεπερασμένη ταχύτητα**.

Για κινούμενα σώματα (όπως η Σελήνη), αυτό έχει ως συνέπεια μια **υστέρηση** της βαρυτικής έλξης και άρα μια **εκτροπή** της θέσης σε σχέση με την περίπτωση της ακαριαίας διάδοσης.

Ο Laplace υπέθεσε ότι η τροχιά της Σελήνης θα μεταβληθεί κατά έναν όρο τάξης v/c_g , όπου v η ταχύτητα του σώματος και c_g η ταχύτητα διάδοσης της βαρύτητας, προκαλώντας μία **προς τα έξω σπειροειδή κίνηση**.

Για να μη διαλυθεί η τροχιά μέσα σε μερικούς αιώνες, υπολόγισε ότι θα έπρεπε:

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

όπου c η ταχύτητα του φωτός.



TRAITÉ
DE
MÉCANIQUE CÉLESTE,
PAR M. LAPLACE,

Chancelier du Sénat conservateur, Grand-Officier de la Légion d'honneur, membre de l'Institut et du Bureau des Longitudes de France; des Sociétés royales de Londres et de Göttingue; des Académies des Sciences de Russie, de Danemarck, d'Italie, etc.

TOME QUATRIÈME.

A PARIS,

Chez COURCIER, Imprimeur-Libraire pour les Mathématiques, quai des Augustins, n° 71.

AN XIII = 1805.

Hendrik Lorentz

1900: ο Lorentz υπολόγισε ότι αν η βαρύτητα υπακούει στους ίδιους μετασχηματισμούς όπως και ο ηλεκτρομαγνητισμός, τότε η βαρυτική έλξη **διαδίδεται** με ταχύτητα το πολύ ίση με την **ταχύτητα του φωτός**, ενώ η εκτροπή θέσης εμφανίζεται στην τάξη $(v/c_g)^2$.

(559)

Physics. — "*Considerations on Gravitation*". By Prof. H. A. LORENTZ.

§ 1. After all we have learned in the last twenty or thirty years about the mechanism of electric and magnetic phenomena, it is natural to examine in how far it is possible to account for the force of gravitation by ascribing it to a certain state of the aether. A theory of universal attraction, founded on such an assumption, would take the simplest form if new hypotheses about the aether could be avoided, i. e. if the two states which exist in an electric and a magnetic field, and whose mutual connection is expressed by the well known electromagnetic equations were found sufficient for the purpose.

The special form of these terms may perhaps be modified. Yet, what has been said is sufficient to show that gravitation may be attributed to actions which are propagated with no greater velocity than that of light.



Βαρυτικά Κύματα

1905: ο **Poincaré** προτείνει επίσης, με βάση τους μετασχηματισμούς Lorentz, την ύπαρξη **βαρυτικών κυμάτων** που διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός.

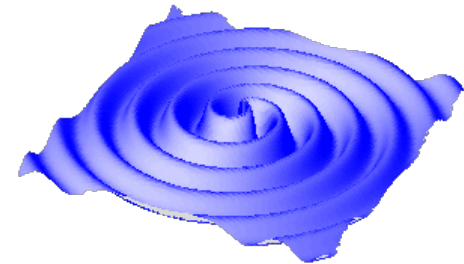
1504

ACADÉMIE DES SCIENCES.

ÉLECTRICITÉ. — *Sur la dynamique de l'électron.*

Note de M. **H. POINCARÉ**.

Il semble au premier abord que l'aberration de la lumière et les phénomènes optiques qui s'y rattachent vont nous fournir un moyen de déterminer le mouvement absolu de la Terre, ou plutôt son mouvement, non par rapport aux autres astres, mais par rapport à l'éther. Il n'en est rien; les expériences où l'on ne tient compte que de la première puissance de l'aberration ont d'abord échoué et l'on en a aisément découvert l'explication; mais Michelson, ayant imaginé une expérience où l'on pouvait mettre en évidence les termes dépendant du carré de l'aberration, ne fut pas plus heureux. Il semble que cette impossibilité de démontrer le mouvement absolu soit une loi générale de la nature.



Γενική Θεωρία Σχετικότητας (ΓΘΣ)

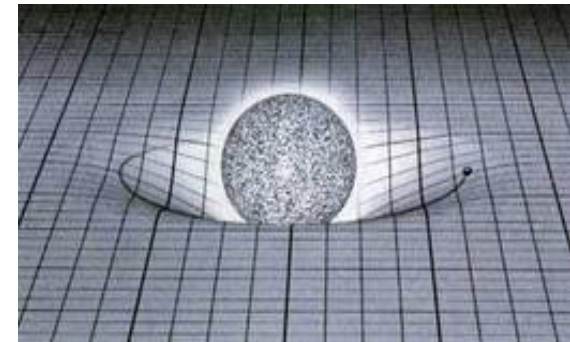
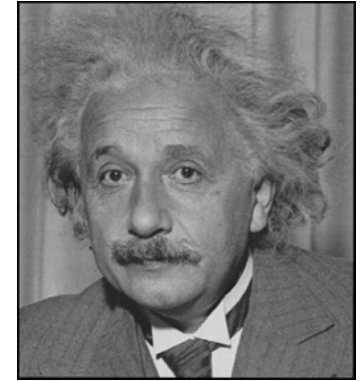
1915: Ο **Einstein** περιγράφει τη βαρύτητα ως μια **καμπύλωση** του 4-διάστατου **χωροχρόνου**.

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

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



Βαρυτικά Κύματα

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

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

όπου $\eta_{\mu\nu}$ είναι ο επίπεδος χωροχρόνος της Ειδικής Θεωρίας Σχετικότητας (Minkowski).

Γραμμικοποιώντας τον τανυστή Riemann προκύπτει η κυματική εξίσωση:

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

όπου:

$$\square := \nabla^2 - \partial_t^2$$

ο κυματικός τελεστής. Τα βαρυτικά κύματα στη ΓΘΣ είναι εγκάρσια.

Πόλωση Βαρυτικών Κυμάτων

Ο 4-διάστατος μετρικός τανυστής είναι συμμετρικός

- > 10 συνιστώσες
 - 4 λόγω ελευθερίας βαθμίδας της ΓΘΣ
 - 4 λόγω γραμμικών μετασχηματισμών
-

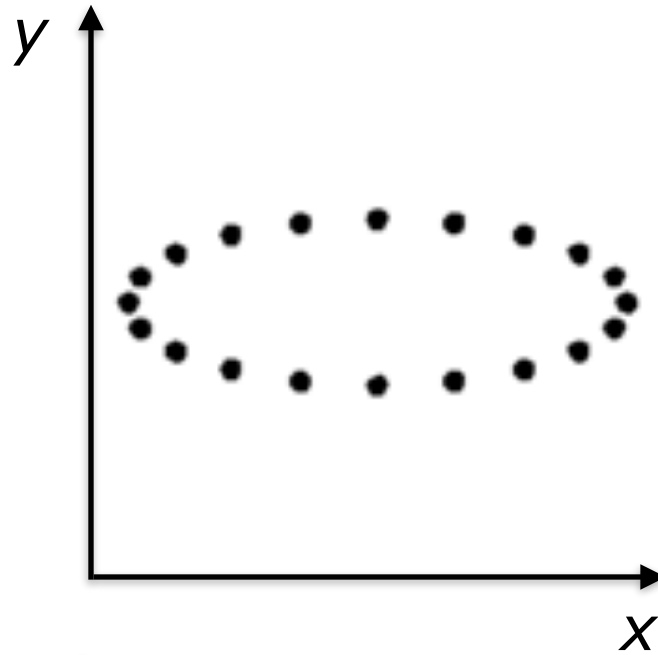
=> **2** ανεξάρτητες πολώσεις βαρυτικών κυμάτων

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: επίπεδο βαρυτικό κύμα που διαδίδεται κατά τον άξονα z με κυκλική συχνότητα ω :

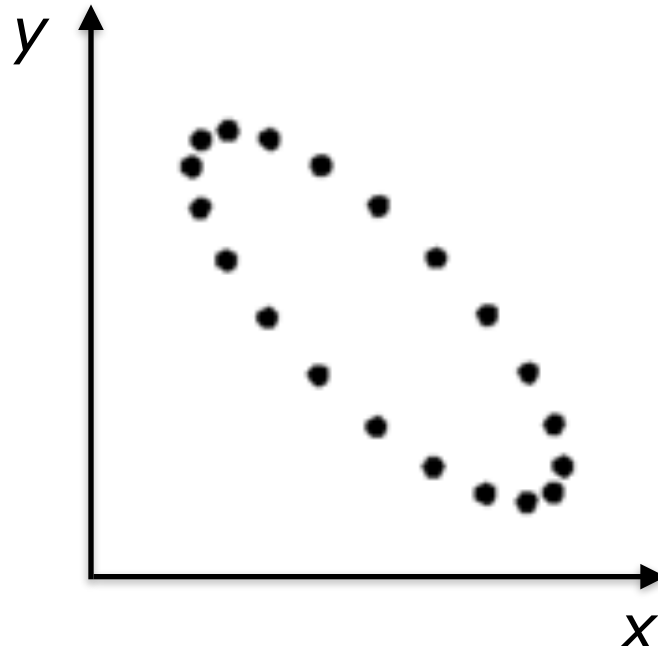
$$h_{\mu\nu}^{\text{TT}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cos [\omega(t - z)]$$

Πόλωση Βαρυτικών Κυμάτων

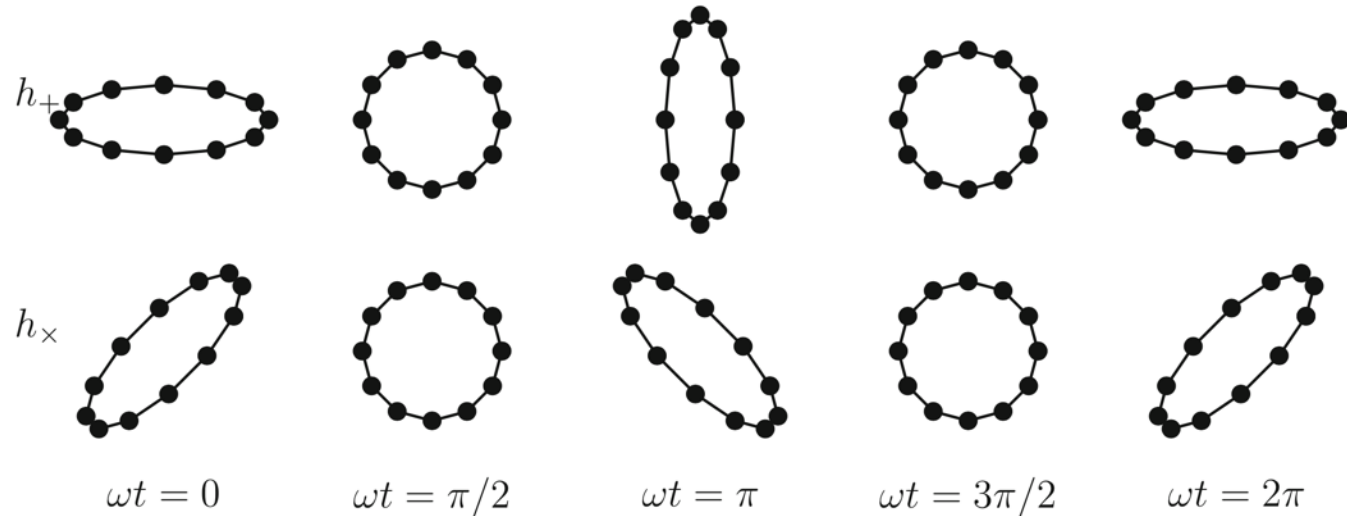
+ πόλωση:



\times πόλωση:



Σχετική Μεταβολή Μήκους



Για κύμα με + πόλωση, το μήκος κατά τον άξονα x είναι:

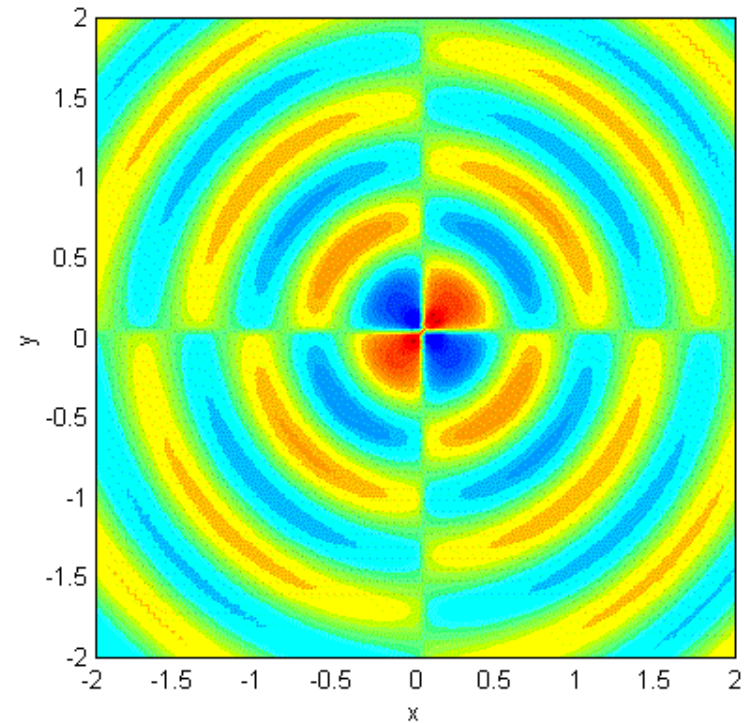
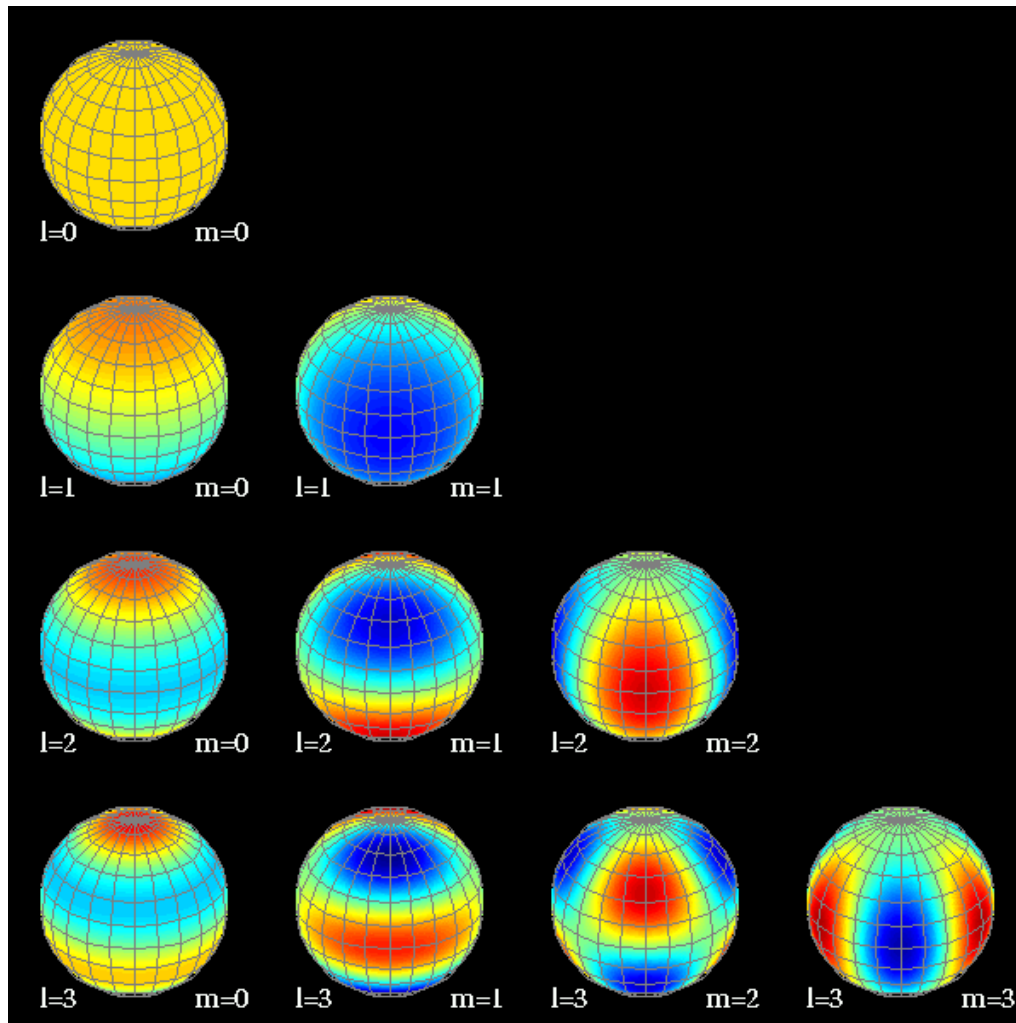
$$L = \int \sqrt{g_{xx}} dx = \int \sqrt{1 + h_+} dx$$

Η σχετική μεταβολή μήκους κατά τον άξονα x είναι:

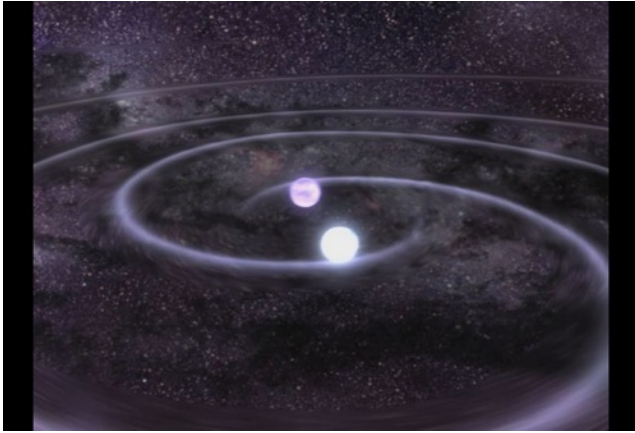
$$\Rightarrow \frac{\Delta L}{L} \simeq \frac{1}{2} h_+$$

Παραγωγή Βαρυτικών Κυμάτων

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



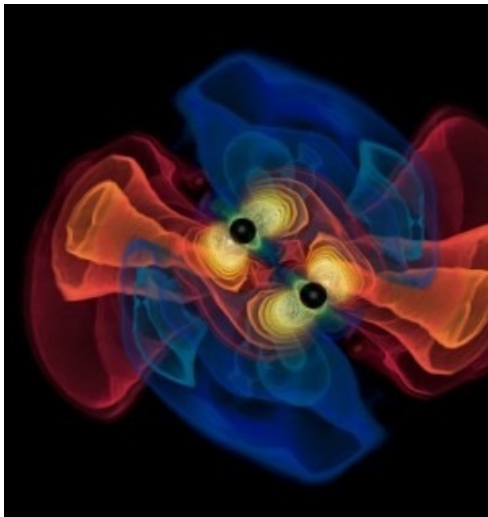
Κύριες Πηγές Βαρυτικών Κυμάτων



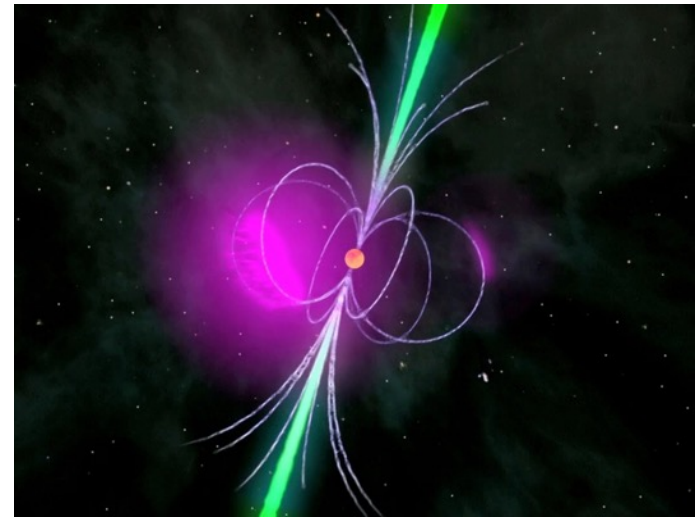
Συγχώνευση Αστέρων Νετρονίων



Κατάρρευση Αστέρων



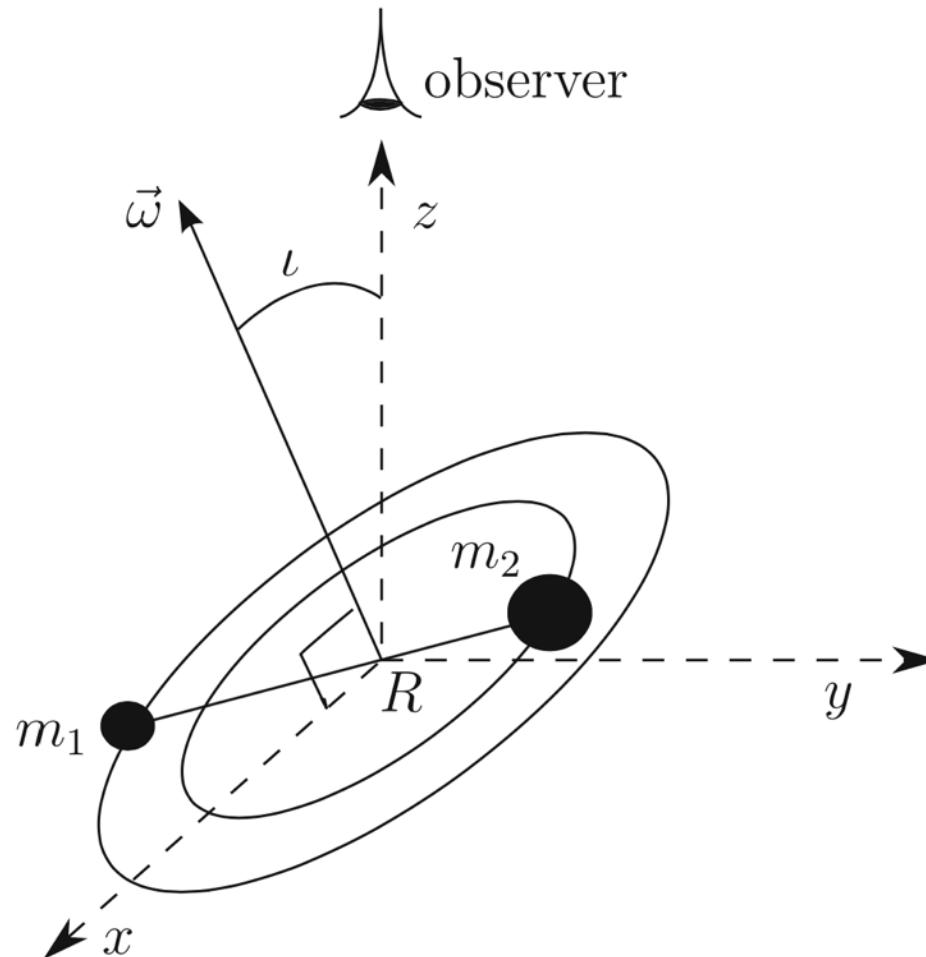
Συγχώνευση Μελανών Οπών



Περιστρεφόμενοι Αστέρες Νετρονίων

Διπλό Σύστημα Μελανών Οπών

Η συγχώνευση ενός διπλού συστήματος μελανών οπών εξαρτάται από συνολικά **17** παραμέτρους.



Βαρυτικά Κύματα

Τανυστής τετραπολικής ροής:

$$M^{ij} = \int d^3\vec{y} T^{00}(t, \vec{y}) y^i y^j$$

Πλάτη:

$$h_+ = \frac{\ddot{M}_{11} - \ddot{M}_{22}}{r} = \frac{4\mathcal{M}_c^{5/3} \omega^{2/3}}{r} \frac{1 + \cos^2 \iota}{2} \cos(2\omega t)$$

$$h_\times = \frac{2\ddot{M}_{12}}{r} = \frac{4\mathcal{M}_c^{5/3} \omega^{2/3}}{r} \cos \iota \sin(2\omega t)$$

όπου:

$$\mathcal{M}_c = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$

Ισχύς Βαρυτικών Κυμάτων

Ισχύς:

$$\frac{dE_{(\text{GW})}}{dt} = \frac{r^2}{32\pi} \int d\Omega \left\langle \dot{h}_{ij}^{\text{TT}} \dot{h}_{ij}^{\text{TT}} \right\rangle_l$$

Για διπλό σύστημα:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{(\text{GW})}}{dt} &= \frac{32}{5} \frac{G^4}{c^5} \frac{\mu^2 M^3}{a^5} \\ &= \frac{c^5}{5G} \left(\frac{a}{r_{\text{SM}}} \right)^{-5} \left(\frac{\mu}{M} \right)^2 \end{aligned}$$

Μέγιστη χαρακτηριστική τιμή:

$$c^5 / G = 3.63 \times 10^{59} \text{ erg s}^{-1}$$

Κοσμολογική Ερυθρομετατόπιση

Παράγοντας ερυθρομετατόπισης λόγω διαστολής του Σύμπαντος:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \simeq \frac{H_0}{c} D$$

Συχνότητα βαρυτικών κυμάτων:

$$f = f_0 / (1 + z)$$

Μάζα μελανών οπών:

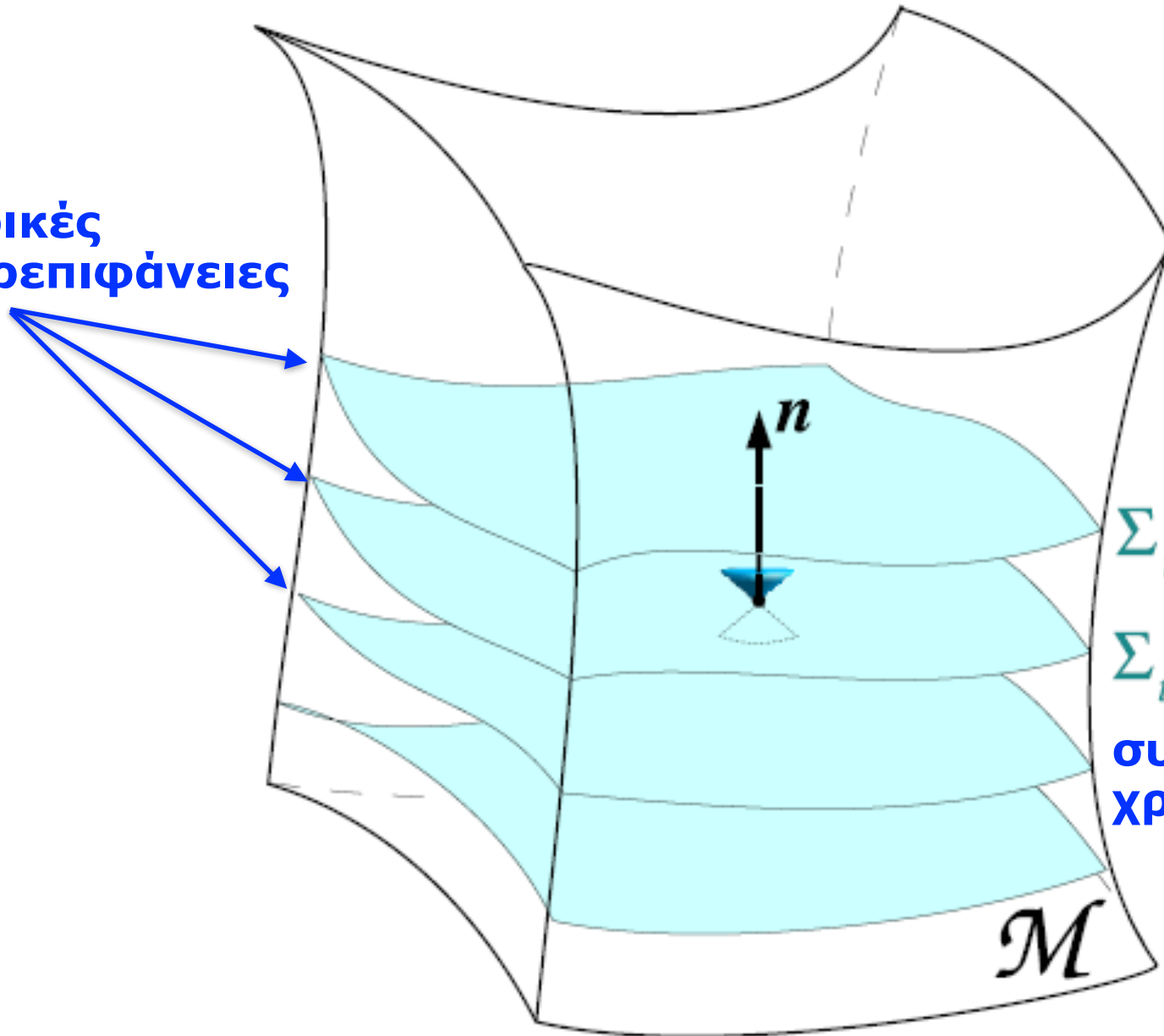
$$m = (1 + z)m_0$$

Πλάτος:

$$h \propto \frac{1}{D}$$

3+1 Διαχωρισμός του χωροχρόνου

Χωρικές
υπερεπιφάνειες



συντεταγμένος
χρόνος

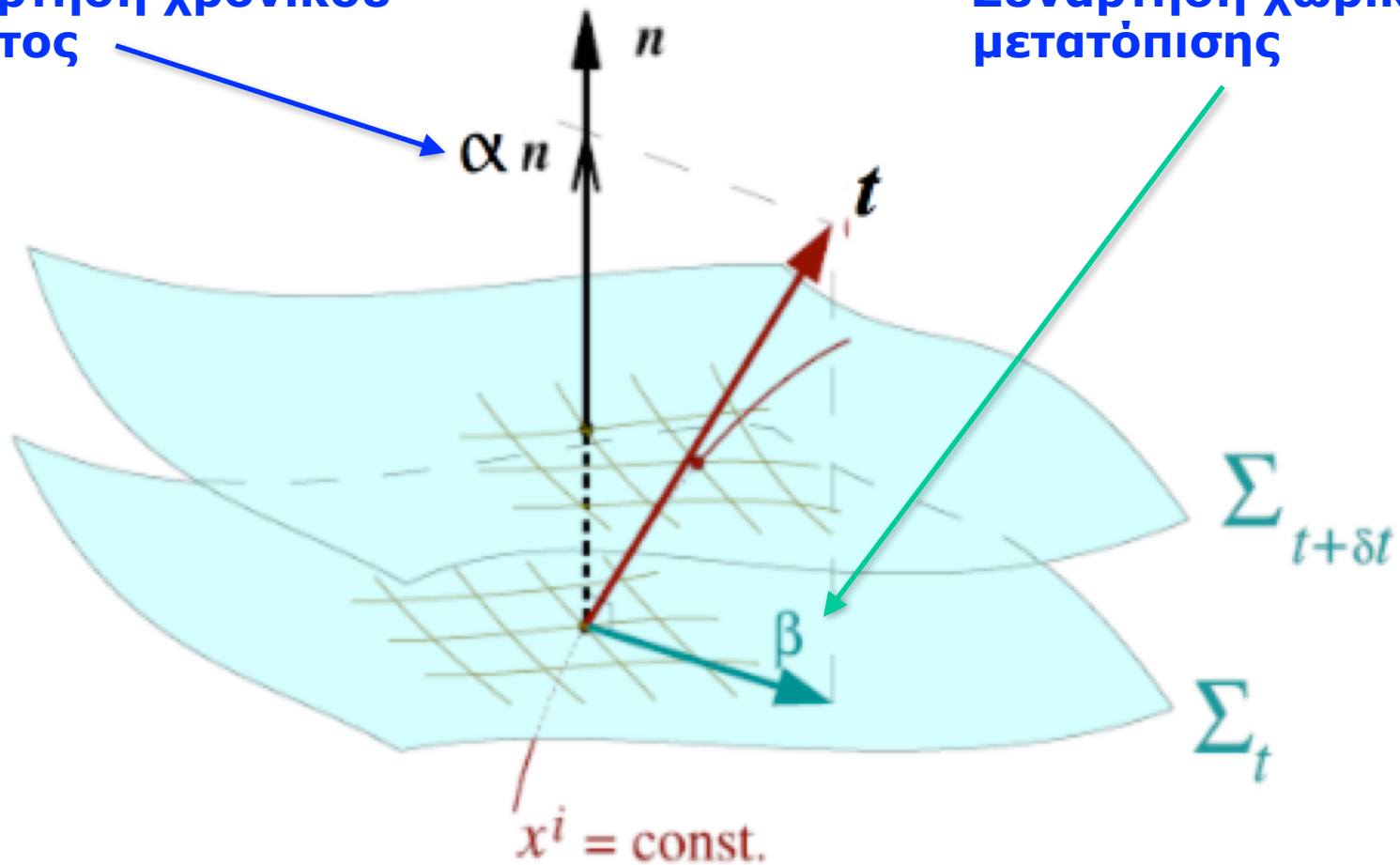
\mathcal{M}

3+1 Διαχωρισμός του χωροχρόνου

$$t^\alpha = \alpha n^\alpha + \beta^\alpha$$

Συνάρτηση χρονικού άλματος

Συνάρτηση χωρικής μετατόπισης

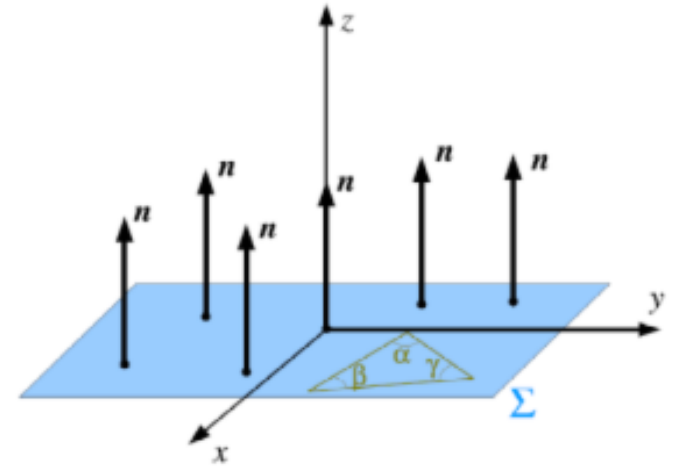


Εξωτερική καμπυλότητα

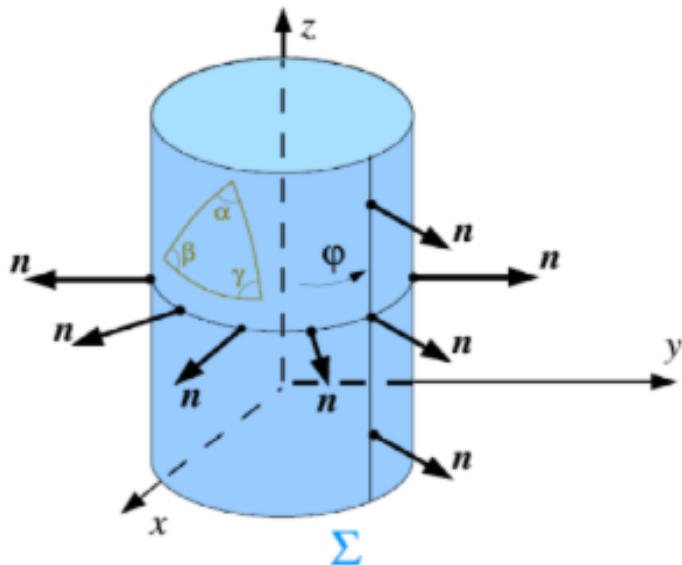
Εξωτερική καμπυλότητα:

$$K := \gamma^{ab} K_{ab}$$

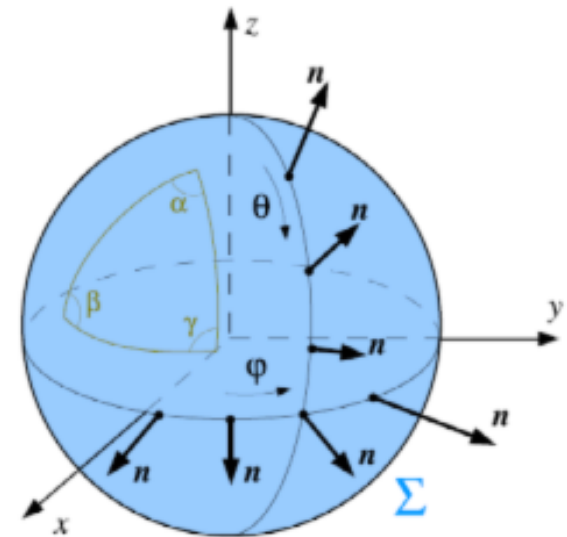
$$R := \gamma^{ab} R_{ab}$$



$$\alpha + \beta + \gamma = \pi, \quad R = 0, \quad K = 0$$



$$\alpha + \beta + \gamma = \pi, \quad R = 0, \quad K = -1/r_c$$



$$\alpha + \beta + \gamma > \pi, \quad R = 2/r_s^2, \quad K = -2/r_s$$

Σύστημα εξισώσεων 3+1

Με δεδομένες αρχικές συνθήκες, η χρονική εξέλιξη καθορίζεται από ένα υπερβολικό σύστημα 17 εξισώσεων:

$$\partial_t \gamma_{ab} = -2\alpha K_{ab} + D_a \beta_b + D_b \beta_a$$

$$\begin{aligned} \partial_t K_{ab} = & -D_a D_b \alpha + \alpha (R_{ab} + K K_{ab} - 2K_{ac} K^c_b) \\ & + \beta^c D_c K_{ab} + K_{ac} D_b \beta^c + K_{bc} D_a \beta^c \\ & - 8\pi\alpha \left[S_{ab} - \frac{\gamma_{ab}}{2} (S - \rho_E) \right]. \end{aligned}$$

$$\partial_t (\rho u^t \alpha \sqrt{\gamma}) = -D_b (\rho u^b \alpha \sqrt{\gamma}),$$

$$\partial_t j^a = \mathcal{L}_\beta j^a + \alpha (2K^a_b + \delta^a_b K) j^b - D_b (\alpha S^{ab}) - \rho_E D^a \alpha.$$

$$\partial_t \rho_E = \mathcal{L}_\beta \rho_E + \alpha K \rho_E - \frac{1}{\alpha} D_b (\alpha^2 j^b) + \alpha K_{ab} S^{ab}.$$

Σε 3 χωρικές διαστάσεις: **ασταθές** !

Μέθοδος BSSN-NOK

90's Nakamura, Oohara, Kojima / Shibata, Nakamura / Baumgarte, Shapiro

Ορισμοί

$$\tilde{\gamma}_{ij} = e^{-4\phi} \gamma_{ij}$$

$$e^{4\phi} = \gamma^{1/3} \equiv \det(\gamma_{ij})^{1/3}$$

$$\tilde{A}_{ij} = e^{-4\phi} A_{ij} \quad A_{ij} = K_{ij} - \frac{1}{3} \gamma_{ij} K,$$

$$\tilde{\Gamma}^i := \tilde{\gamma}^{jk} \tilde{\Gamma}_{jk}^i = -\tilde{\gamma}^{ij}{}_{,j}$$

“1+log” συνθήκη χρονικού άλματος

$$\partial_t \alpha = -2\alpha A$$

$$\partial_t A = \partial_t K$$

Συνθήκη μετατόπισης “Gamma-driver”

$$\partial_t \beta^i = B^i$$

$$\partial_t B^i = \frac{3}{4} \alpha \partial_t \tilde{\Gamma}^i - e^{-4\phi} \beta^i$$

Εξισώσεις χρονικής εξέλιξης

$$\frac{d}{dt} \tilde{\gamma}_{ij} = -2\alpha \tilde{A}_{ij}, \quad \frac{d}{dt} = \partial_t - \mathcal{L}_\beta$$

$$\frac{d}{dt} \phi = -\frac{1}{6} \alpha K.$$

$$\frac{d}{dt} K = -\gamma^{ij} D_i D_j \alpha + \alpha \left[\tilde{A}_{ij} \tilde{A}^{ij} + \frac{1}{3} K^2 + \frac{1}{2} (\rho + S) \right],$$

$$\frac{d}{dt} \tilde{A}_{ij} = e^{-4\phi} [-D_i D_j \alpha + \alpha (R_{ij} - S_{ij})]^{TF}$$

$$+ \alpha (K \tilde{A}_{ij} - 2 \tilde{A}_{il} \tilde{A}_j^l),$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \tilde{\Gamma}^i = -2 \tilde{A}^{ij} \alpha_{,j} + 2\alpha \left(\tilde{\Gamma}_{jk}^i \tilde{A}^{kj} - \frac{2}{3} \tilde{\gamma}^{ij} K_{,j} - \tilde{\gamma}^{ij} S_{j,i} + 6 \tilde{A}^{ij} \phi_{,j} \right)$$

$$- \frac{\partial}{\partial x^j} \left(\beta^l \tilde{\gamma}^{ij}{}_{,l} - 2 \tilde{\gamma}^{m(j} \beta_{,m}^{i)} + \frac{2}{3} \tilde{\gamma}^{ij} \beta_{,l}^l \right).$$

Πρώτη ευσταθής προσομοίωση M.O. σε 3D

2000:

PHYSICAL REVIEW D, VOLUME 62, 044034

Towards a stable numerical evolution of strongly gravitating systems in general relativity: The conformal treatments

Miguel Alcubierre,¹ Bernd Brügmann,¹ Thomas Dramlitsch,¹ José A. Font,² Philippos Papadopoulos,³ Edward Seidel,^{1,4}
Nikolaos Stergioulas,^{1,5} and Ryoji Takahashi¹

¹Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, Am Mühlenberg 1, D-14476 Golm, Germany

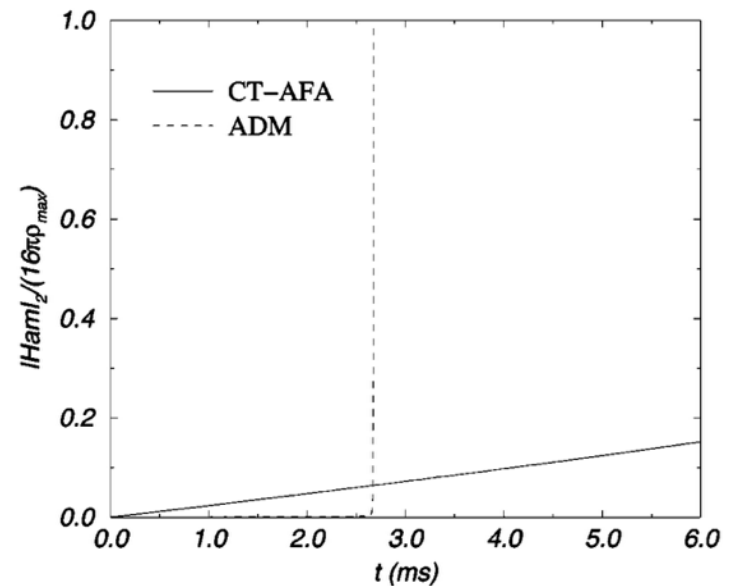
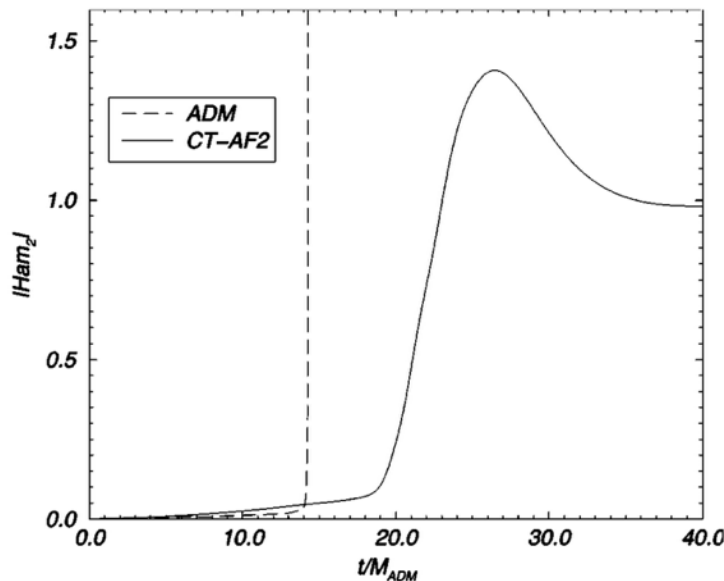
²Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Str. 1, D-85740 Garching, Germany

³School of Computer Science and Maths, University of Portsmouth, Portsmouth PO1 2EG, United Kingdom

⁴National Center for Supercomputing Applications, Beckman Institute, 405 N. Mathews Ave., Urbana, Illinois 61801

⁵Department of Physics, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki 54006, Greece

(Received 20 March 2000; published 24 July 2000)



Πρώτες προσομοιώσεις συγχώνευσης Μ.Ο.

2005: Pretorius / Campanelli, Lusto et al.

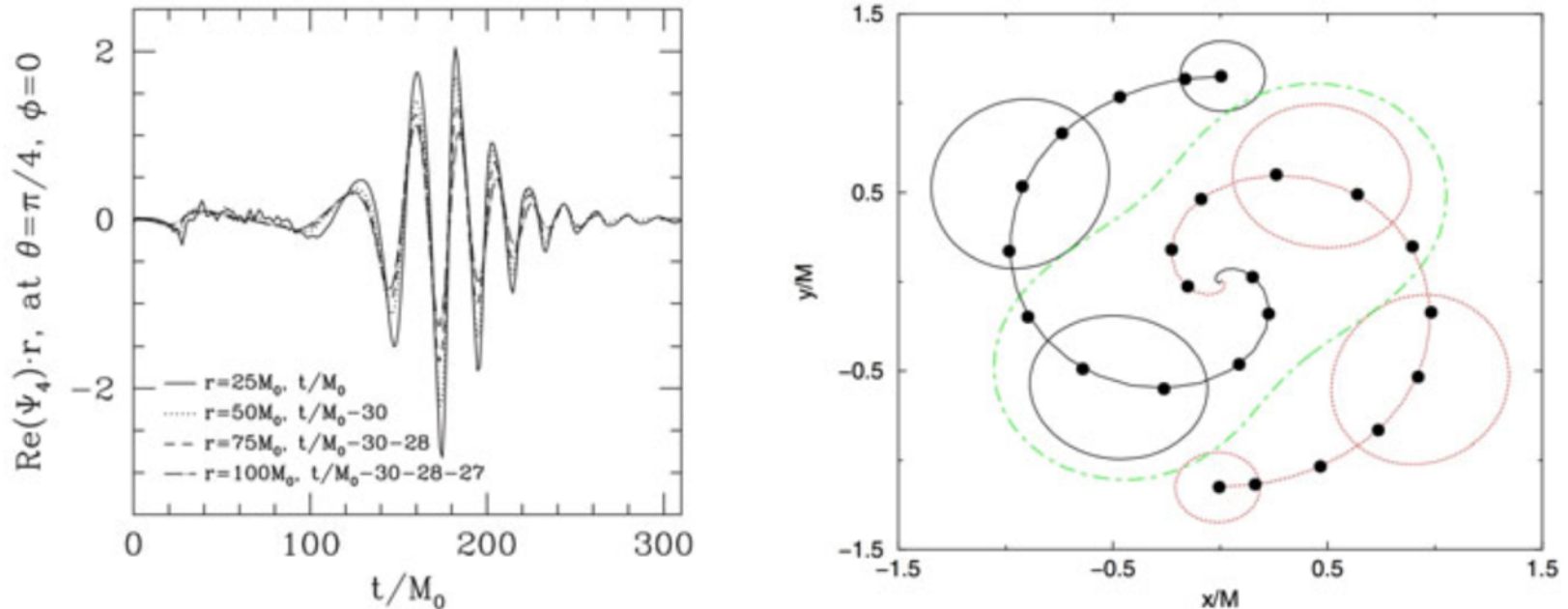
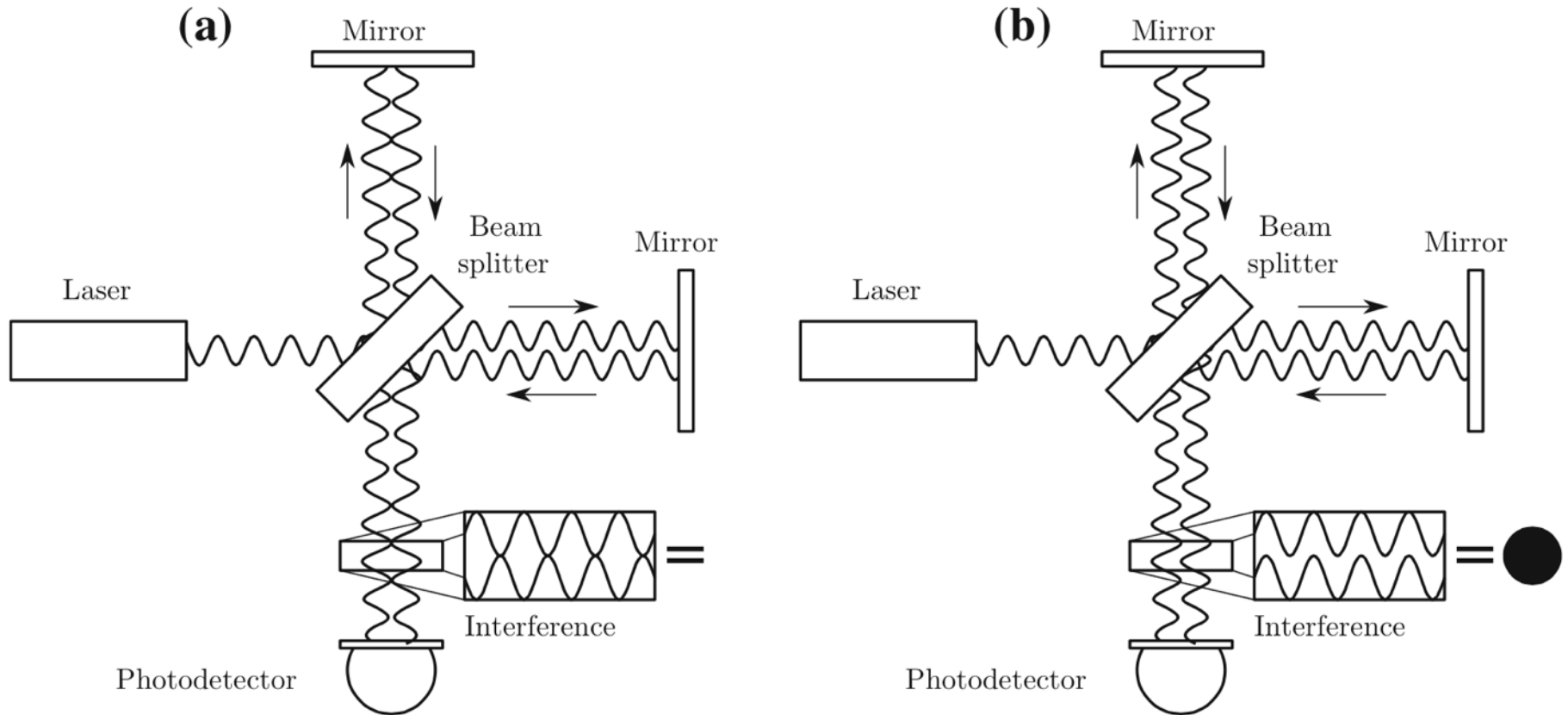
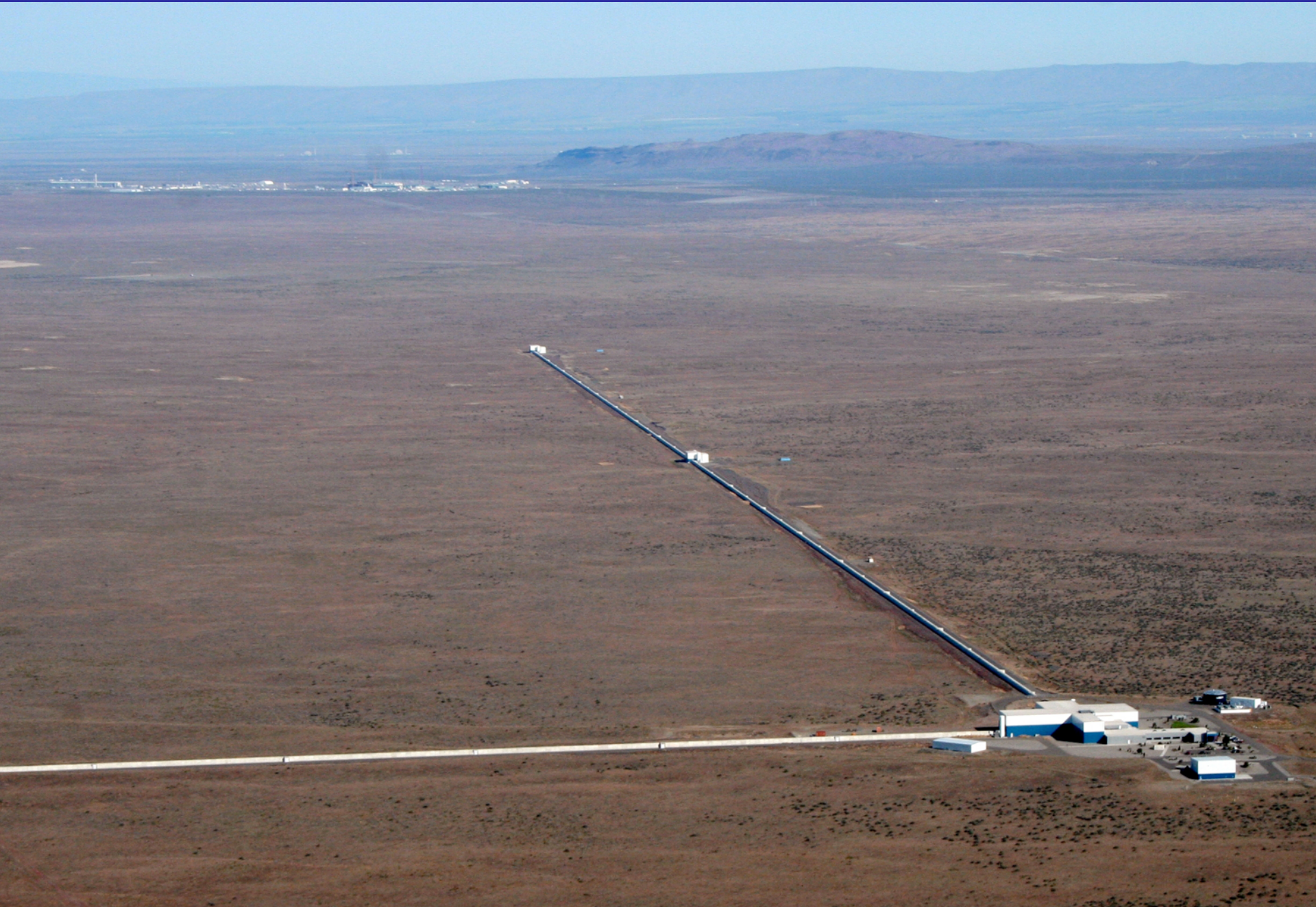


Fig. 8.5: First numerical simulations of gravitational waves generated by two merging Schwarzschild black holes of equal mass. *Left panel:* Pretorius’s first waveform simulation in 2005 [330] showing all three phases in Fig. 8.4. *Right panel:* Orbital evolution of a similar simulation by the UT Brownsville group in 2006 [332]. Filled circles show position of the two black holes every $2.5 \tau_g$, and black and red ovals show their “apparent” horizons (surfaces in the simulation where it is apparent that light cannot escape and which are always inside the true event horizon). Eventually, a *single common horizon* forms for both holes (green curve). The largest amplitude waves then are emitted, followed by a rapid ringdown as the merger product relaxes into a spherical state by emitting more gravitational radiation. Figures reprinted with permission; copyright (2005, 2006) by the American Physical Society (APS).

Συμβολομετρικοί Ανιχνευτές



Advanced LIGO @ Hanford, WA



Advanced VIRGO @ Pisa, Italy

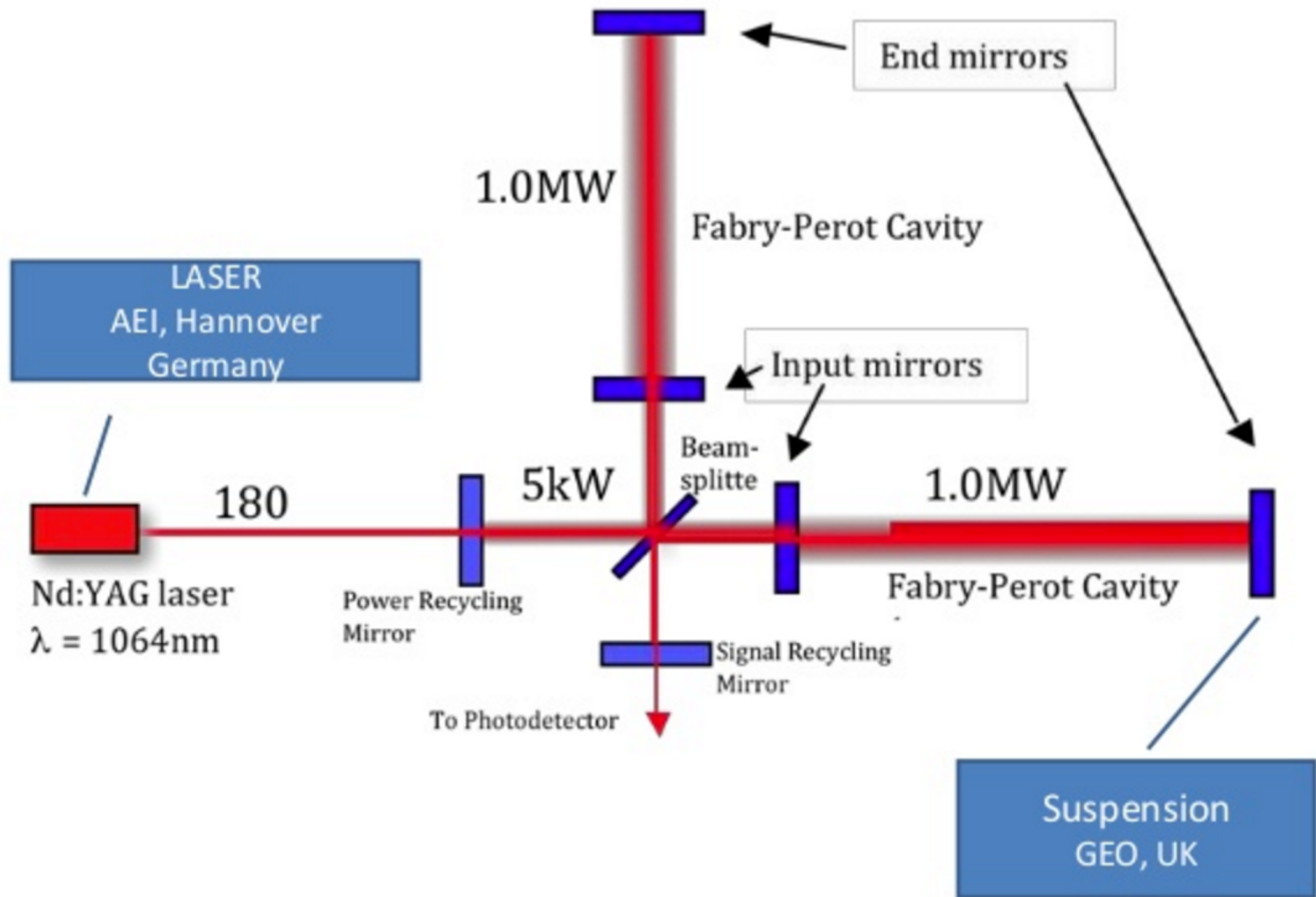


Εργασίες αναβάθμισης του Advanced VIRGO



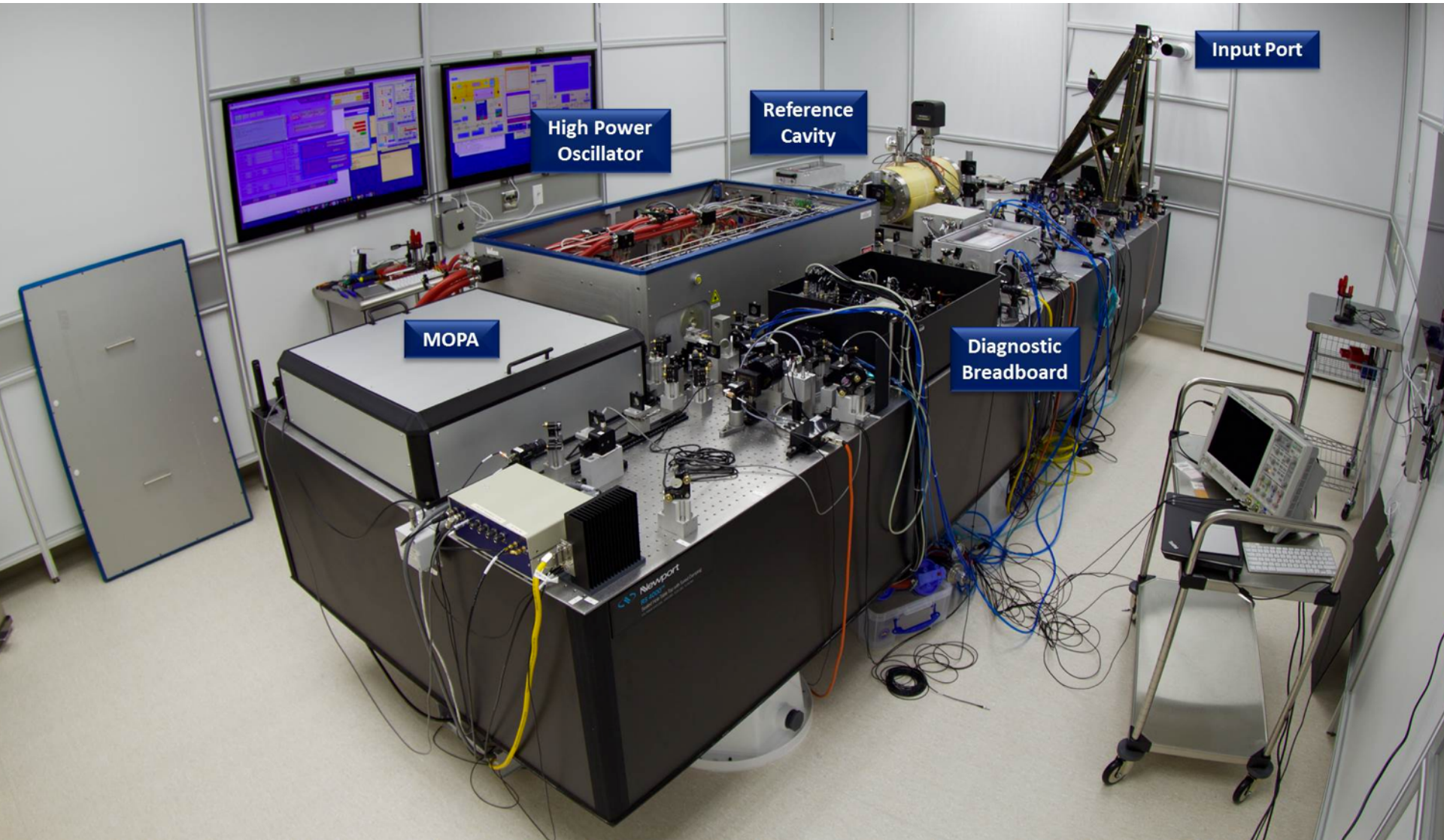
Συμμετοχή στο Επιστημονικό
Συμβούλιο
Virgo-Ego Scientific Forum (VESF)

Ανιχνευτής Advanced LIGO



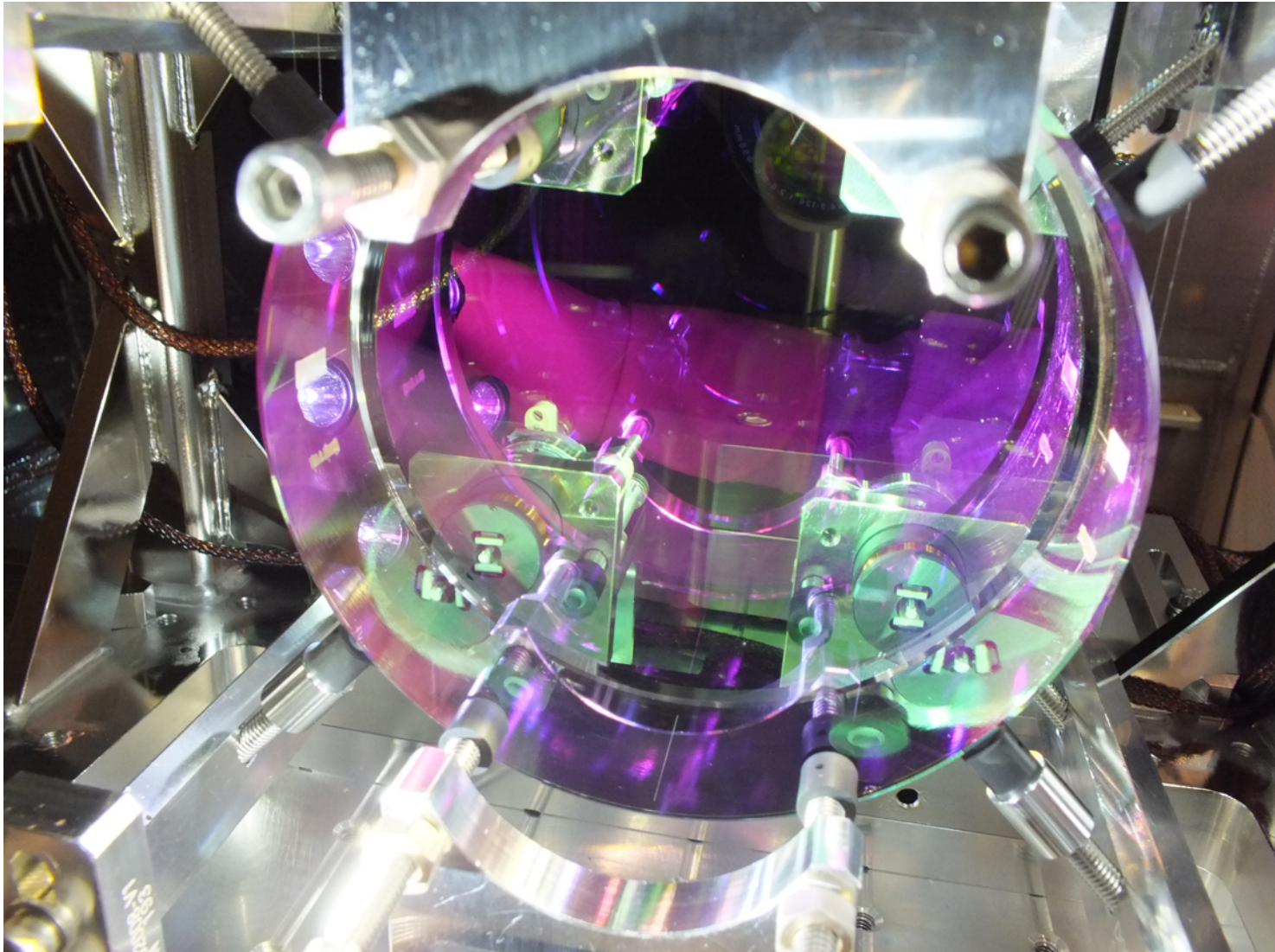
Πηγή Laser

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 (SiO_2) (fused silica).



Διοξείδιο του πυριτίου

"DO NOT EAT"

DESICCANT

SILICA

GEL

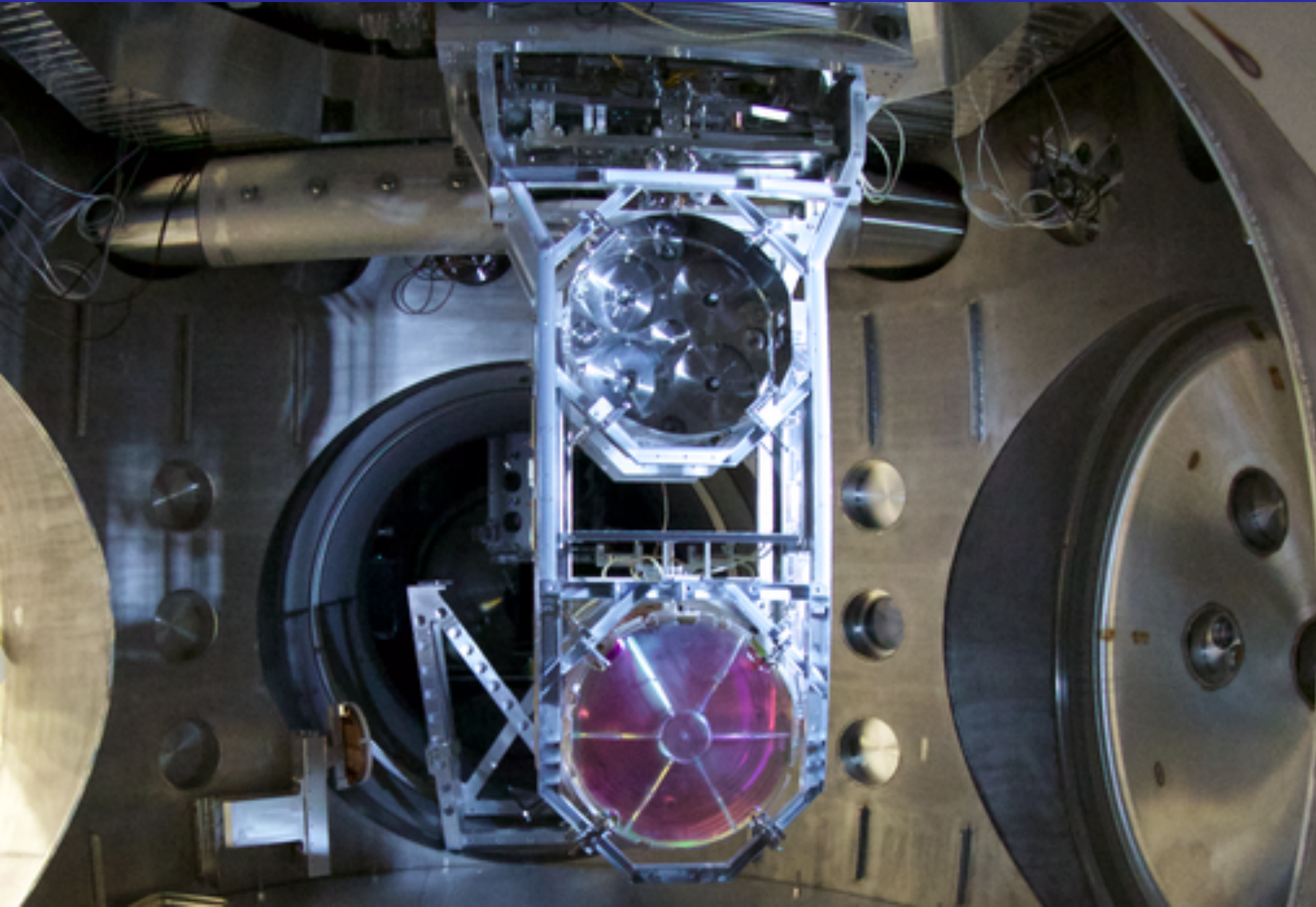
THROW AWAY

"DO NOT EAT"

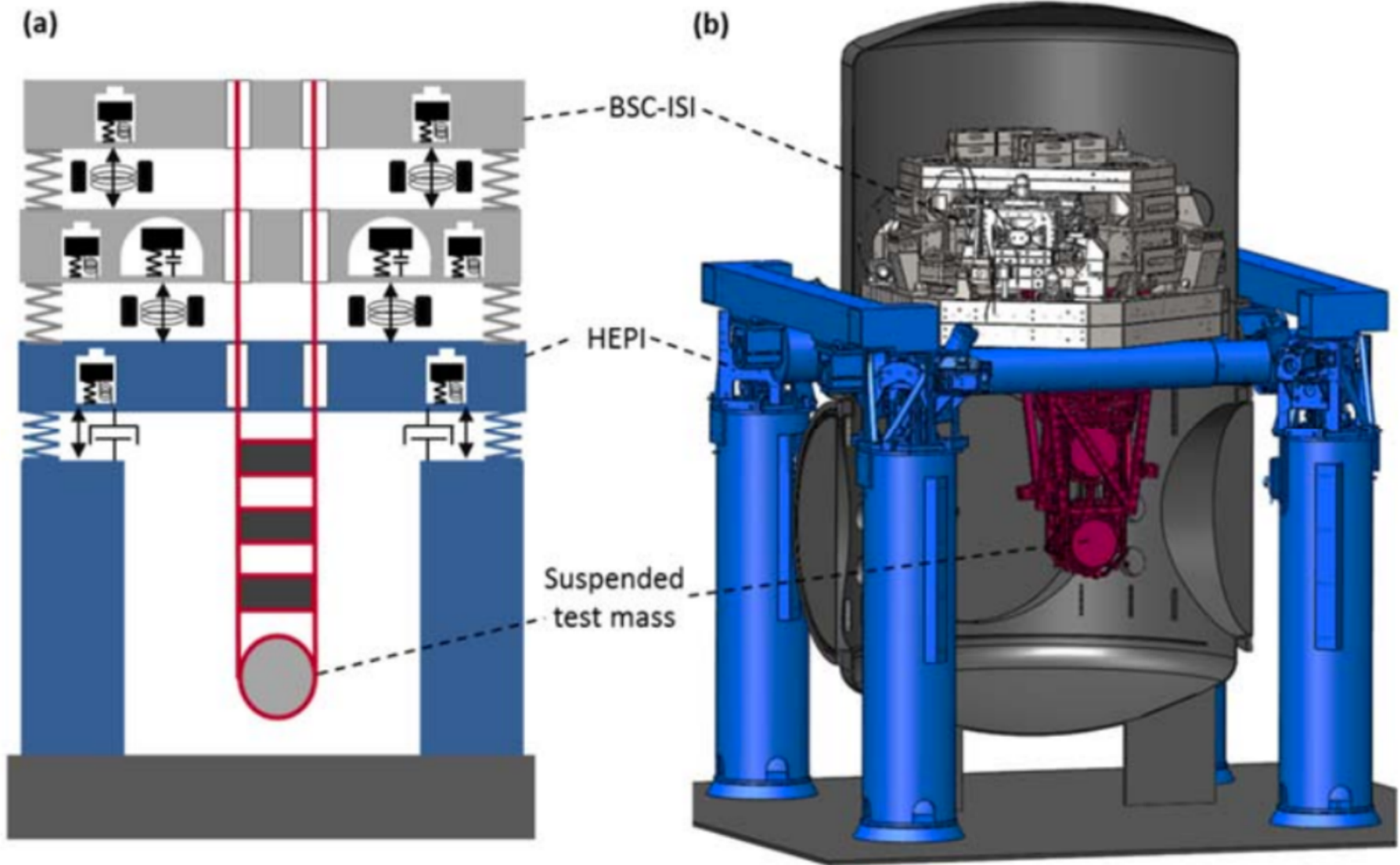
DESICCANT



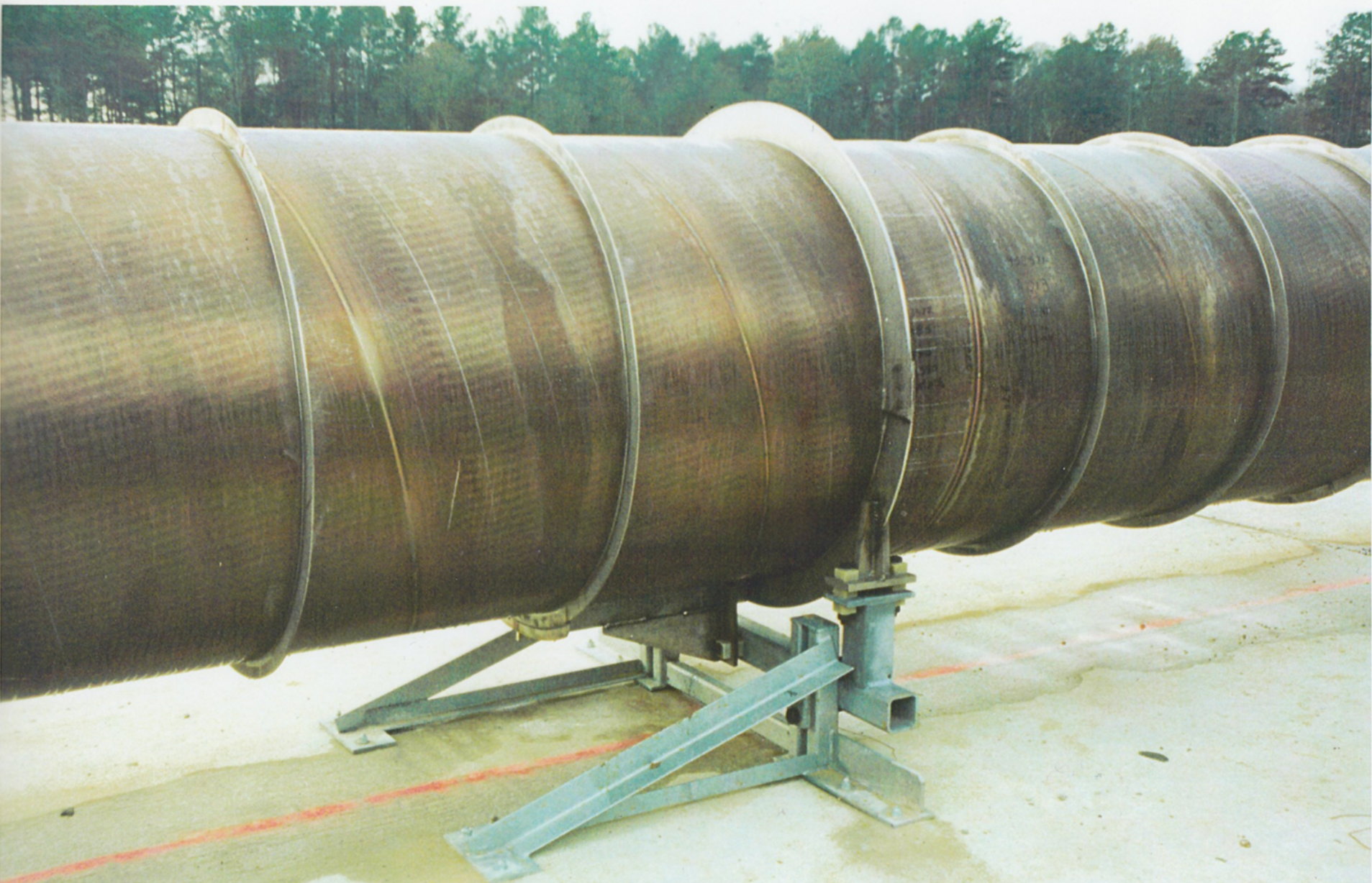
Παθητικό σύστημα απορρόφησης κραδασμών



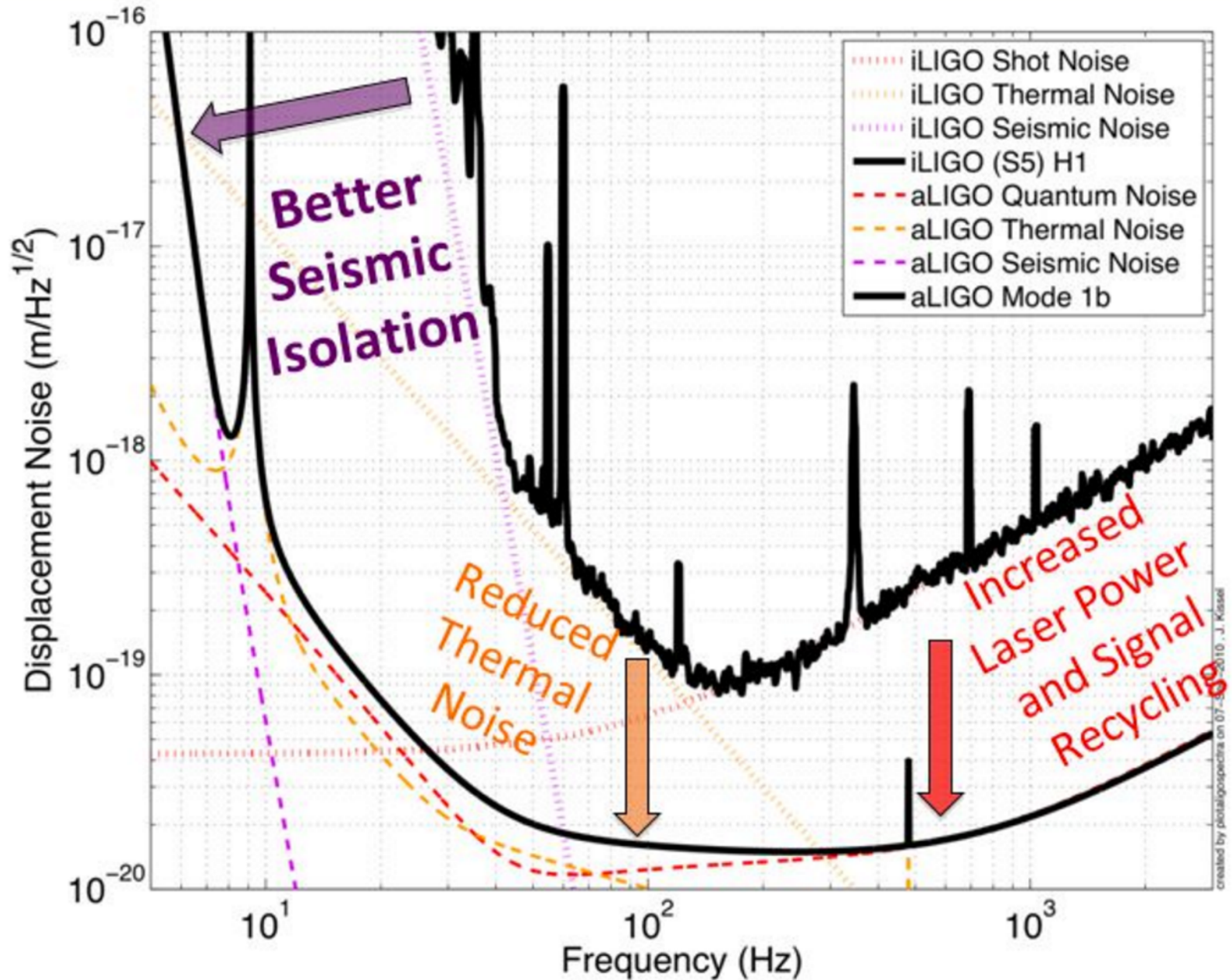
Ενεργητικό σύστημα απορρόφησης κραδασμών



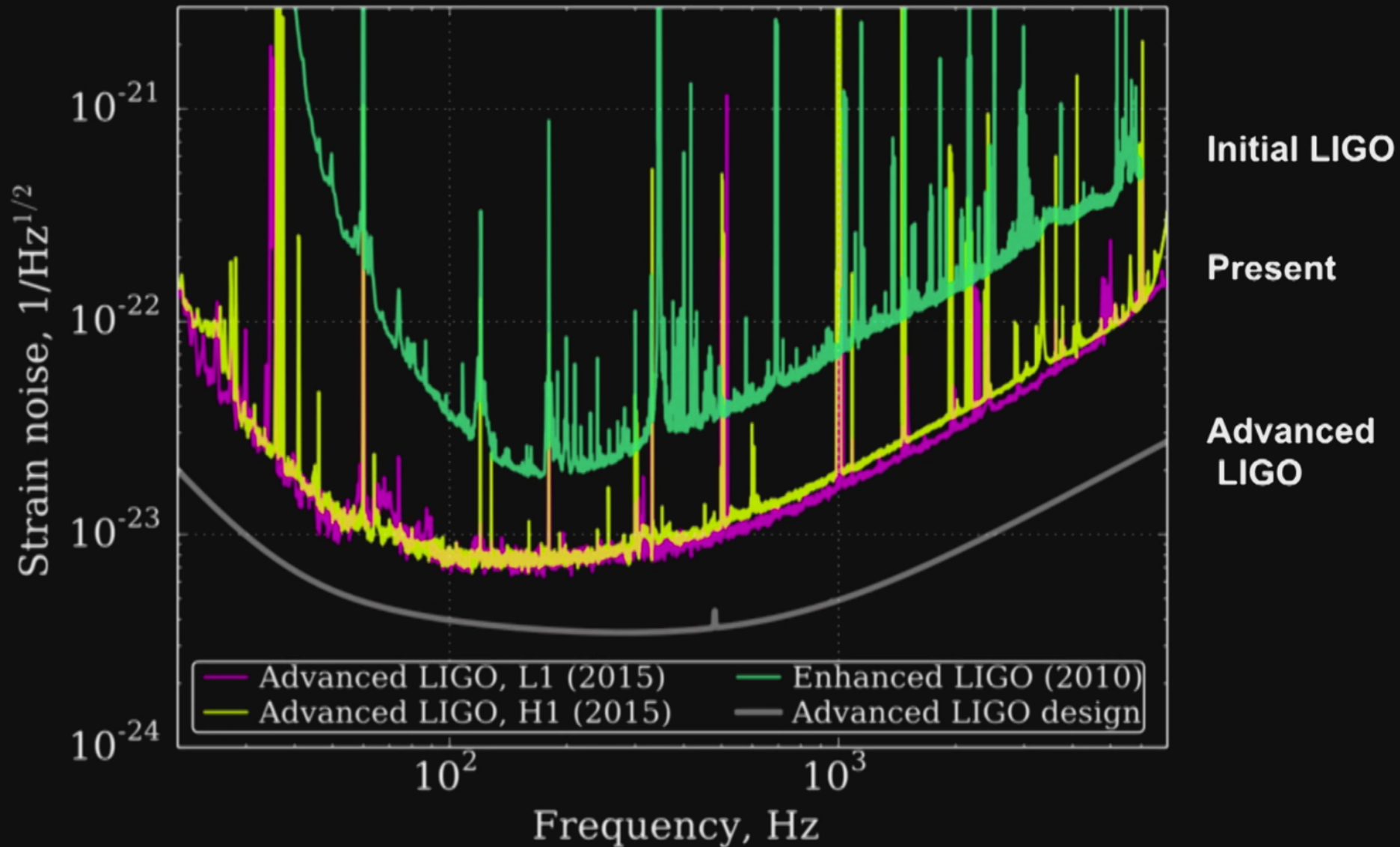
Σωλήνες κενού 1 μPa



Πηγές θορύβου



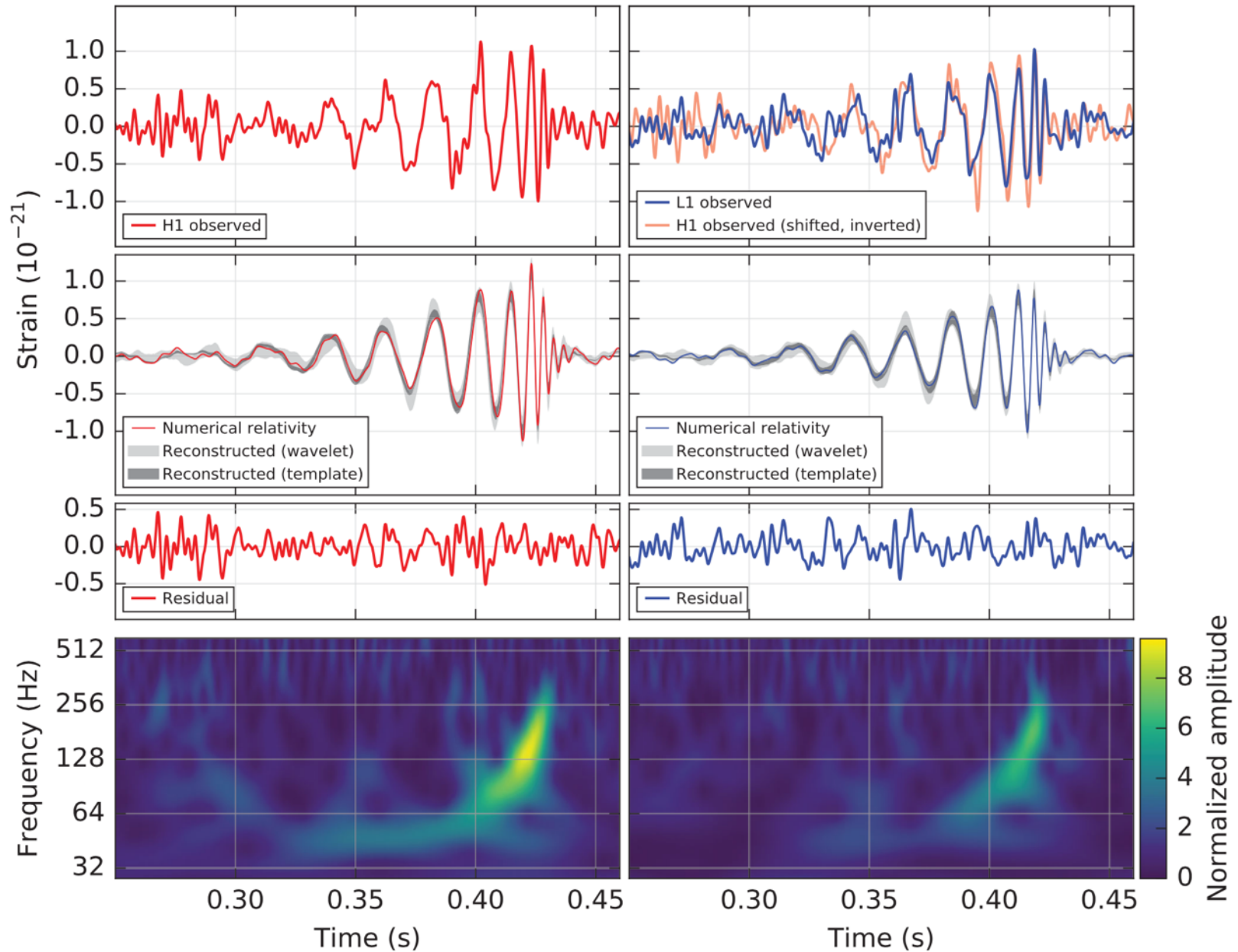
Καμπύλες θορύβου



Κυματομορφές της πηγής GW150914

Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)

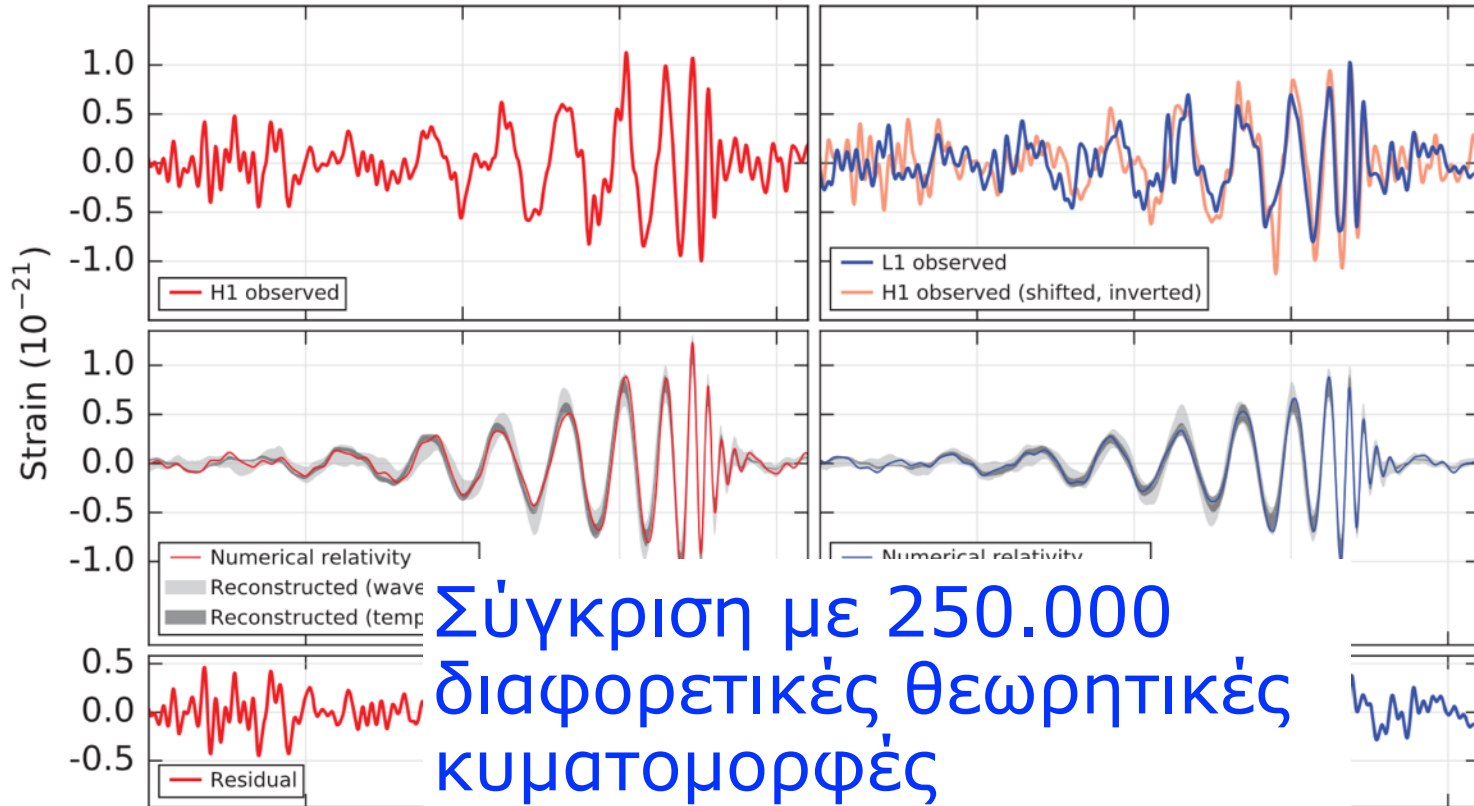


Abbot et al. (2016)

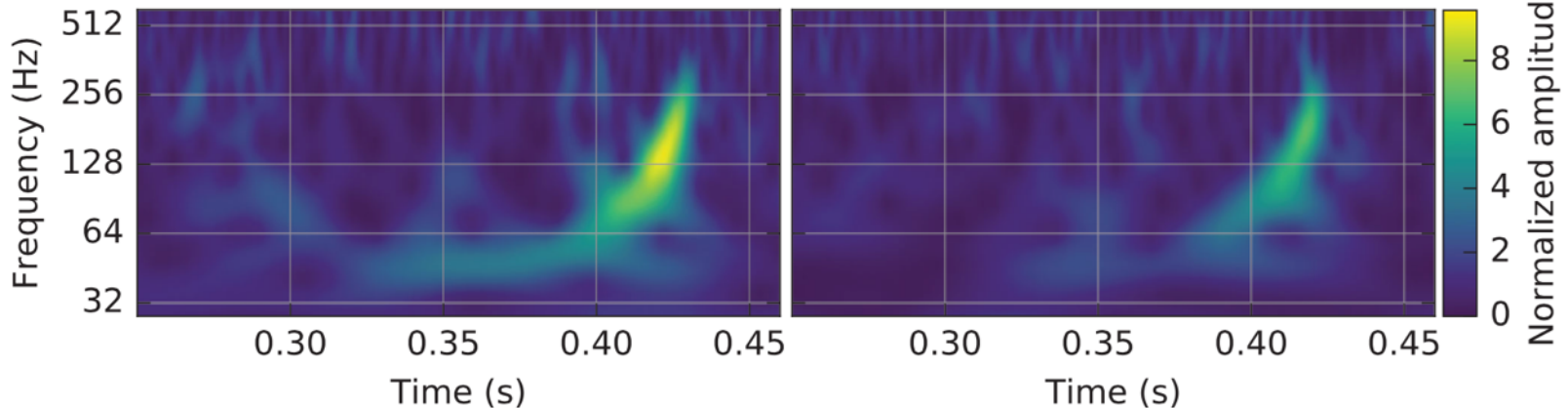
Κυματομορφές της πηγής GW150914

Hanford, Washington (H1)

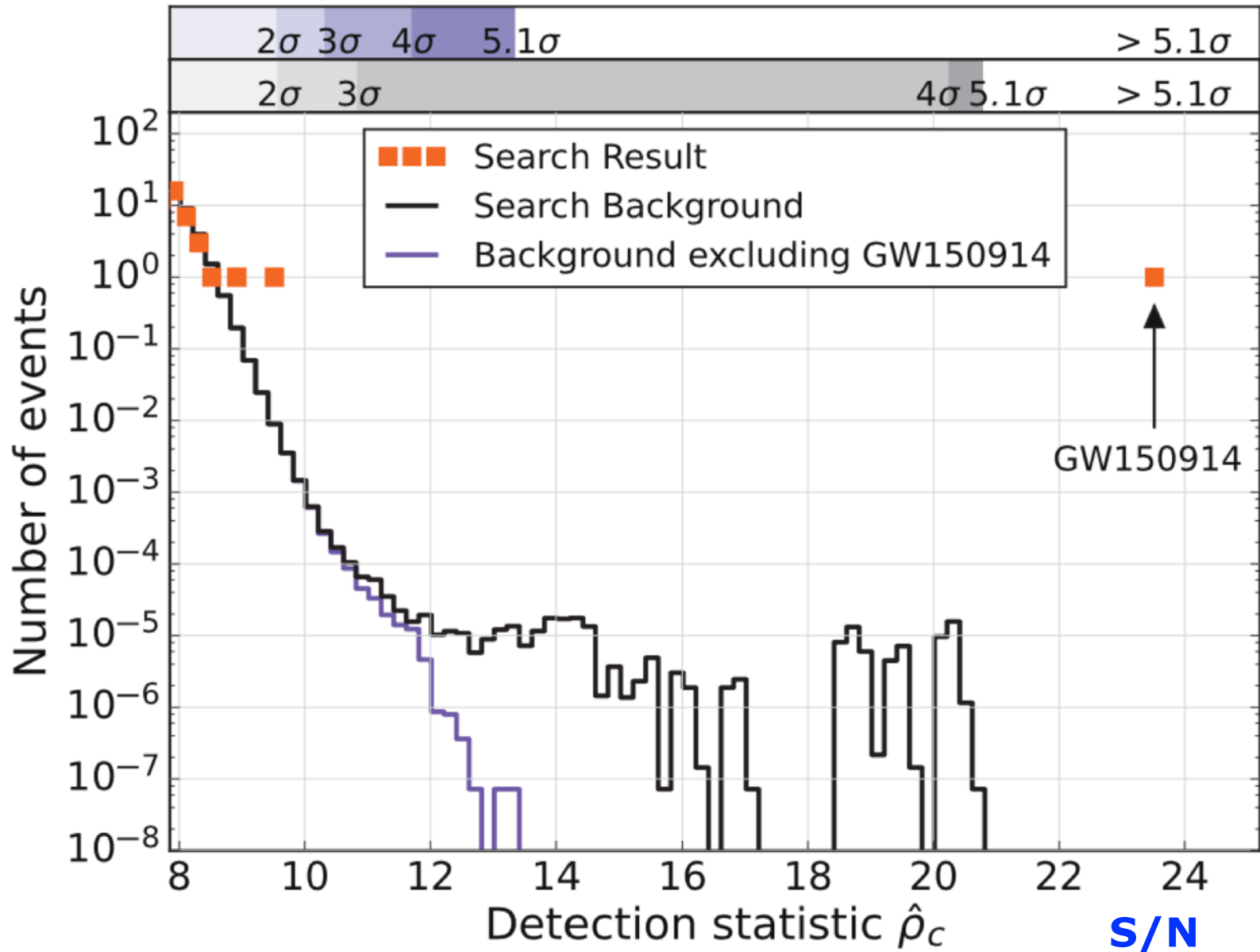
Livingston, Louisiana (L1)



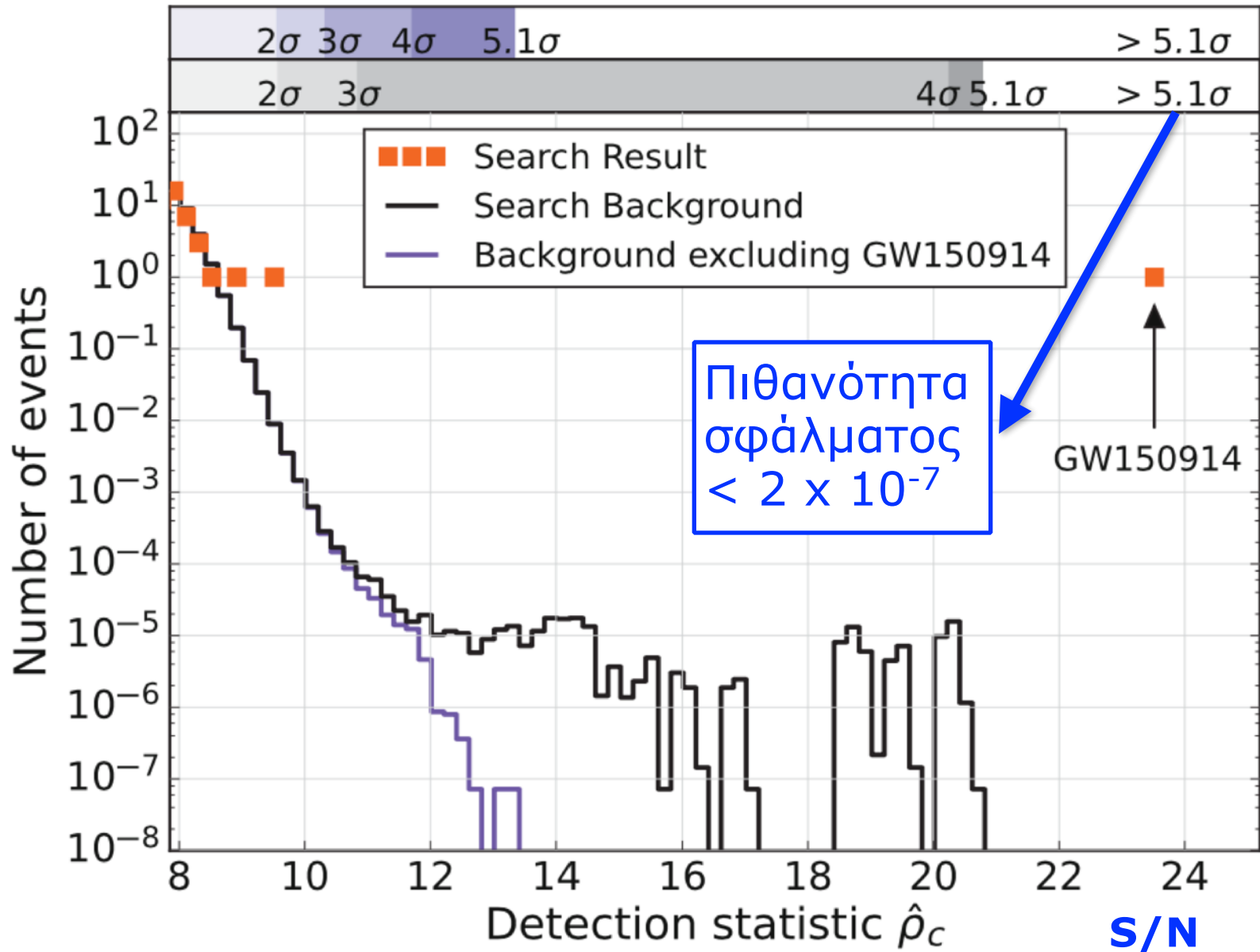
Σύγκριση με 250.000
διαφορετικές θεωρητικές
κυματομορφές



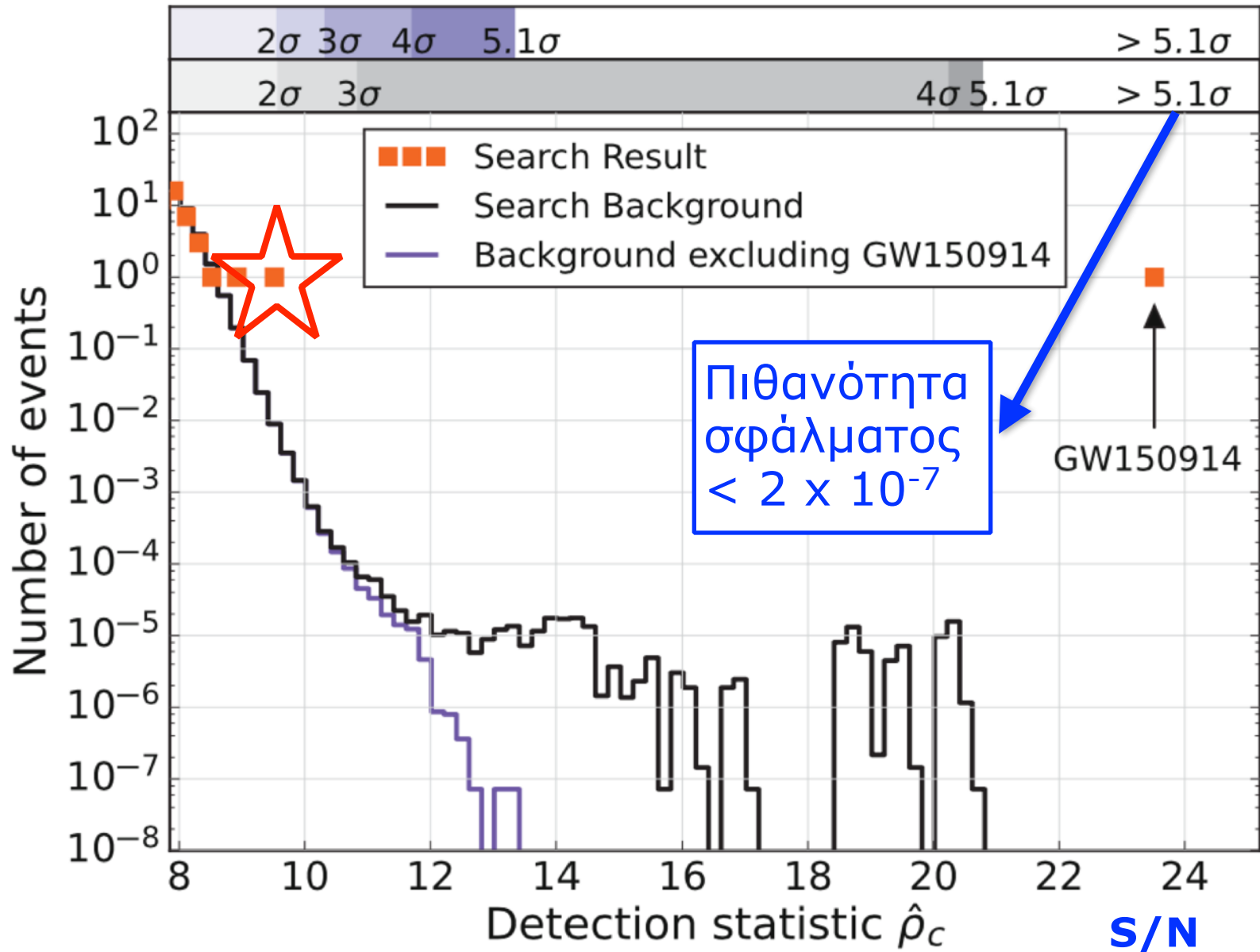
Στατιστική ανάλυση της ανίχνευσης



Στατιστική ανάλυση της ανίχνευσης



Στατιστική ανάλυση της ανίχνευσης

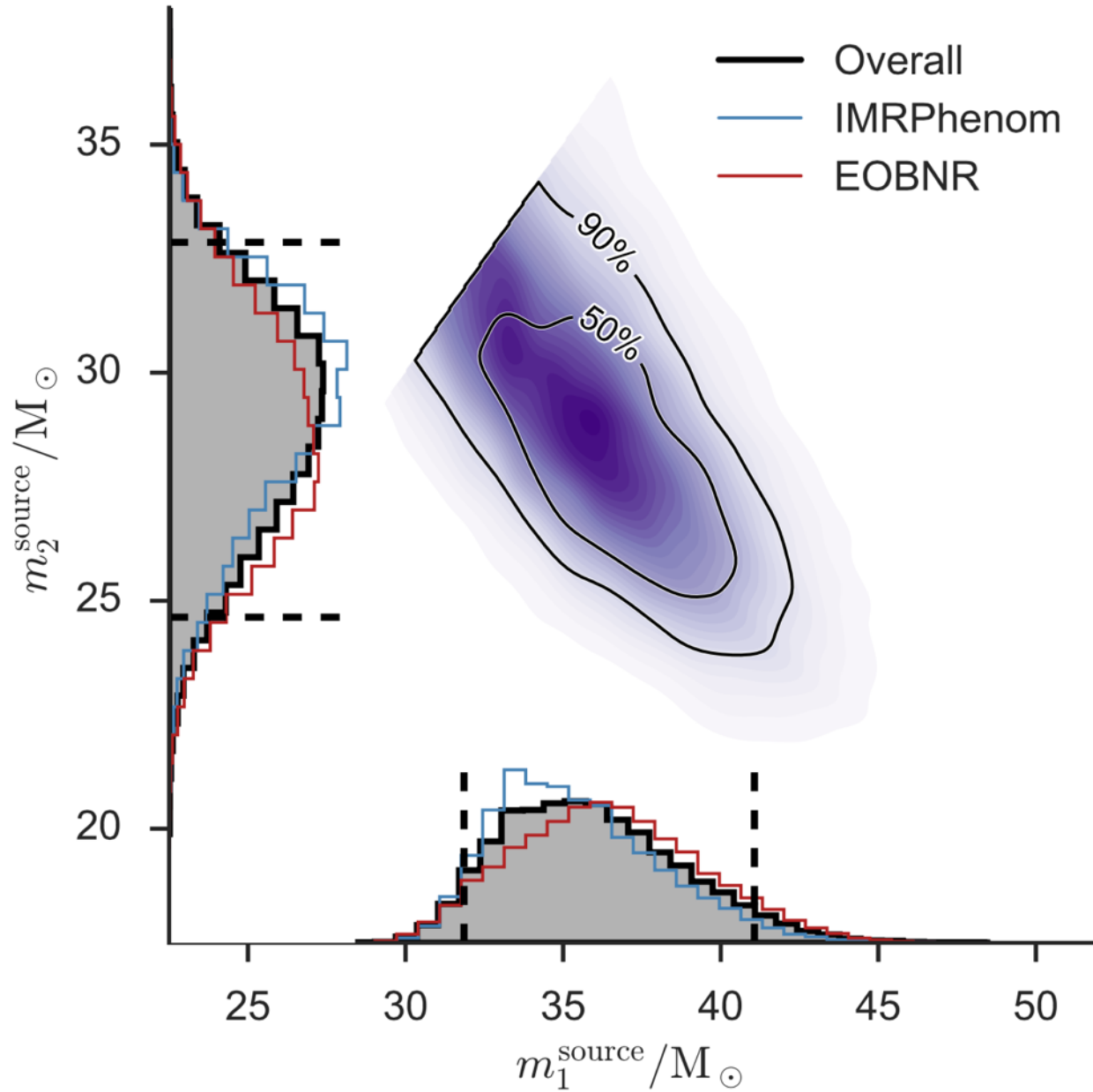


Χαρακτηριστικά της πηγής

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 Λ CDM, με $\Omega_m = 0.3$ και σταθερά Hubble $H_0 = 69.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.)

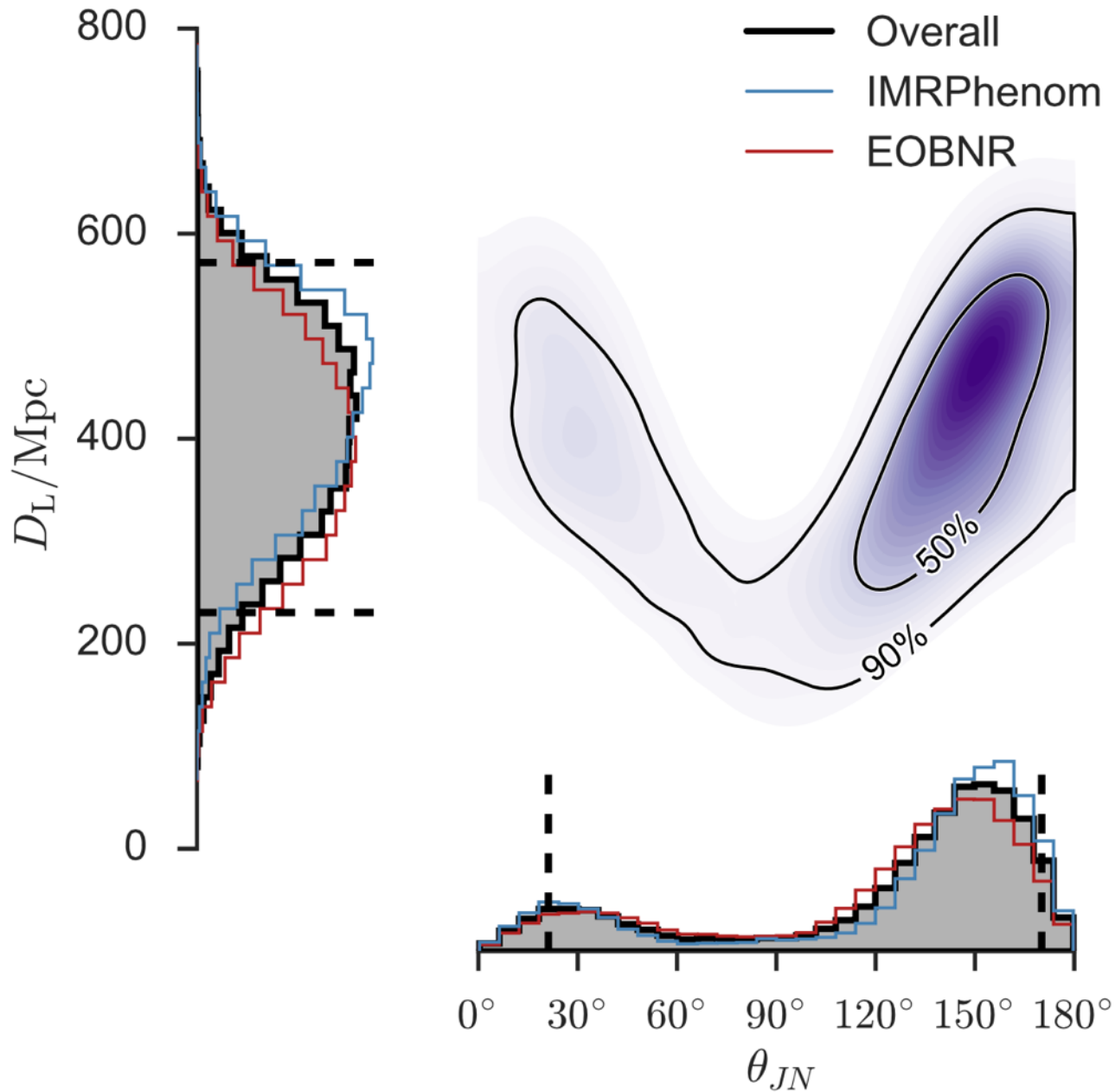
Υπολογισμός των μαζών



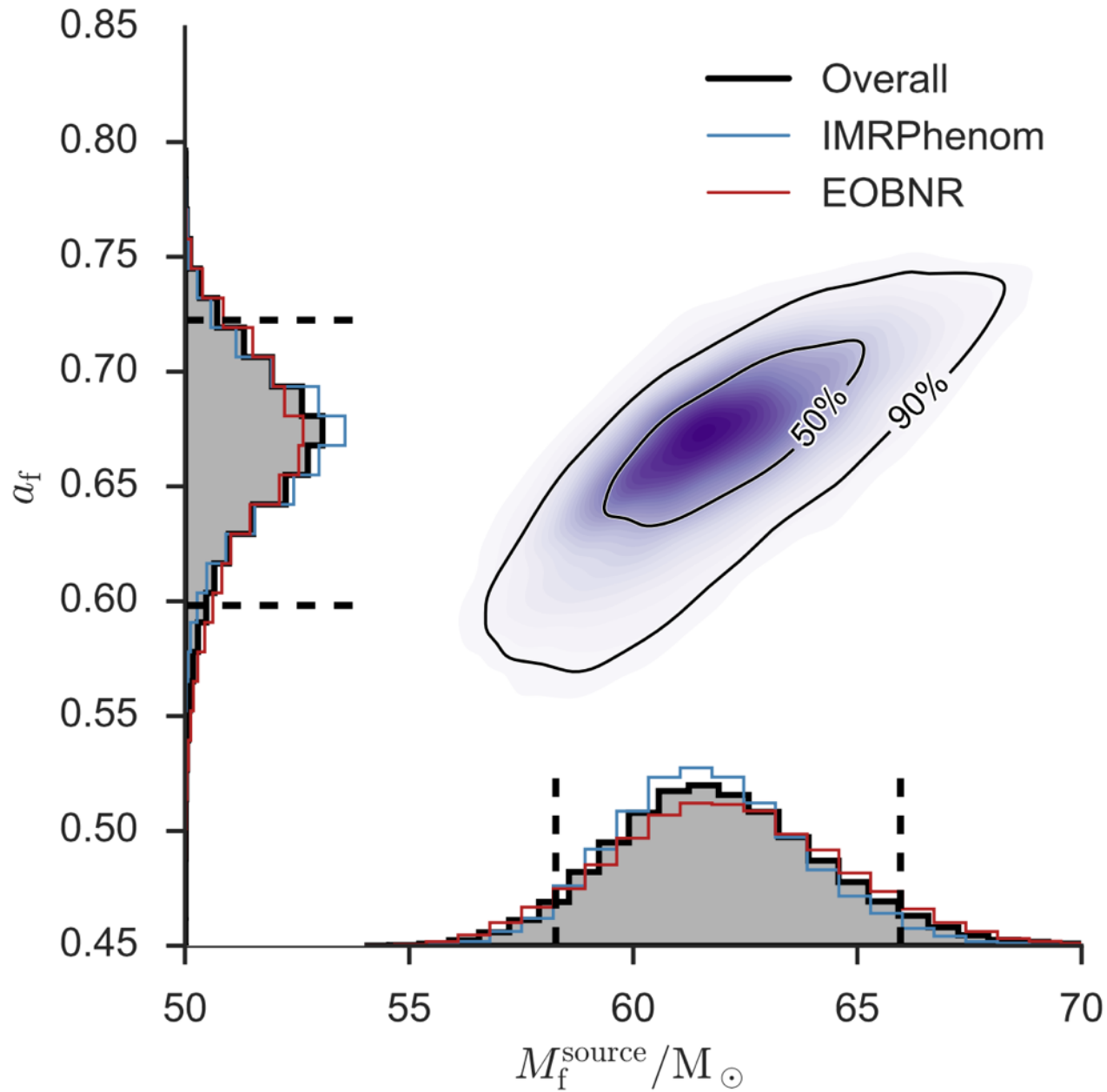
Abbot et al. (2016)

Υπολογισμός απόστασης και κλίσης της τροχιάς

Abbot et al. (2016)



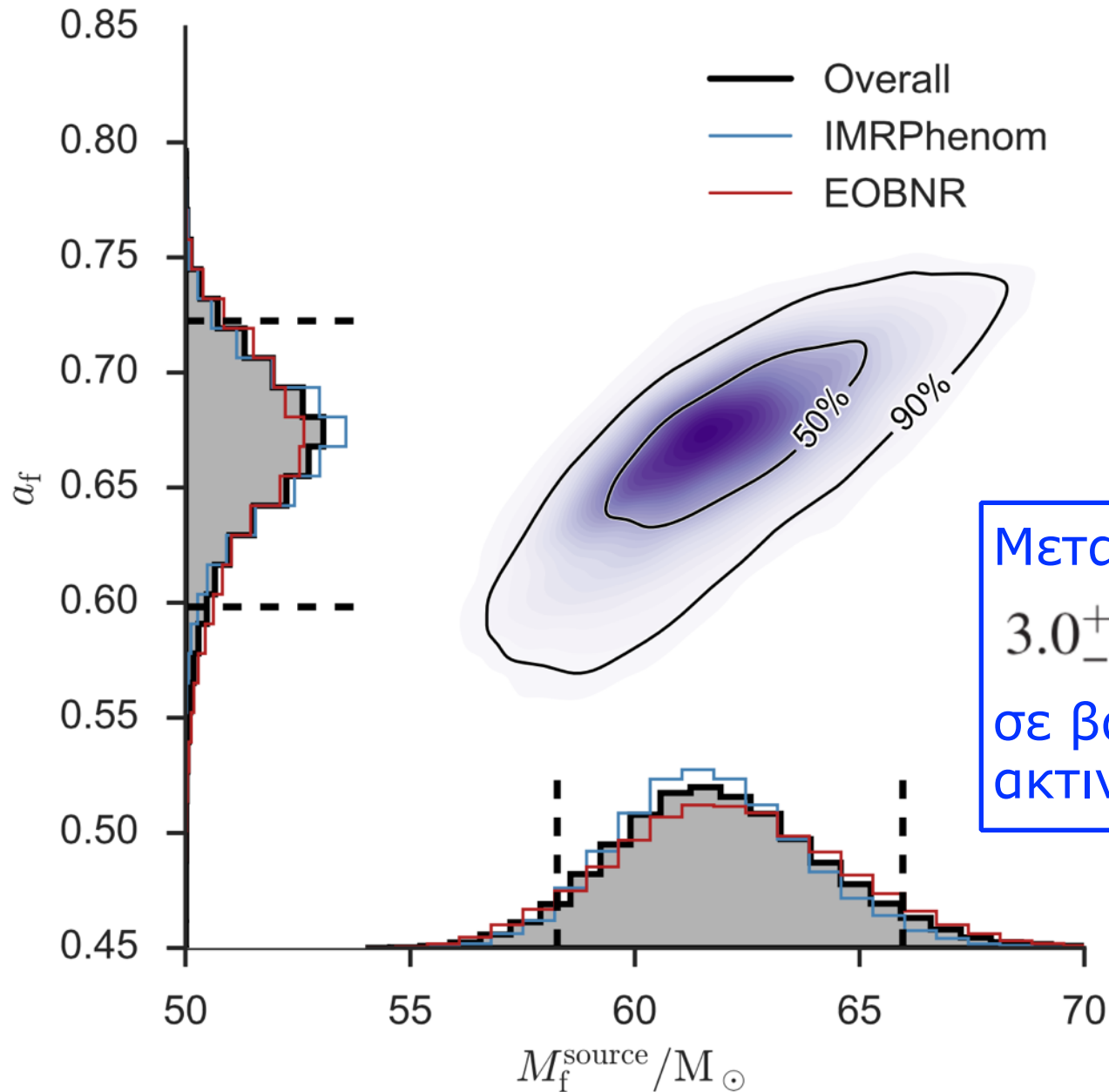
Υπολογισμός τελικής μάζας και στροφορμής



Abbot et al. (2016)

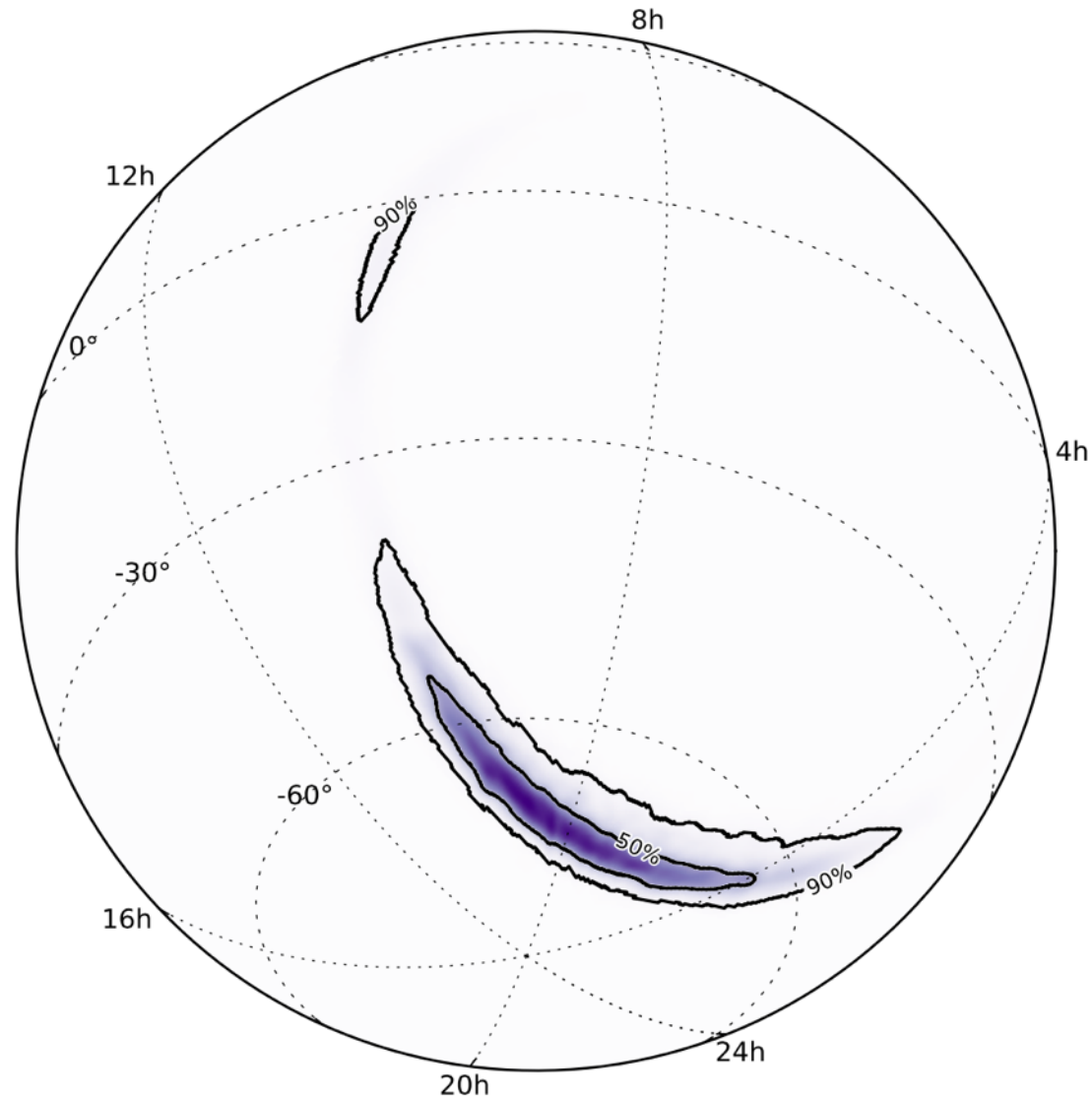
Υπολογισμός τελικής μάζας και στροφορμής

Abbot et al. (2016)



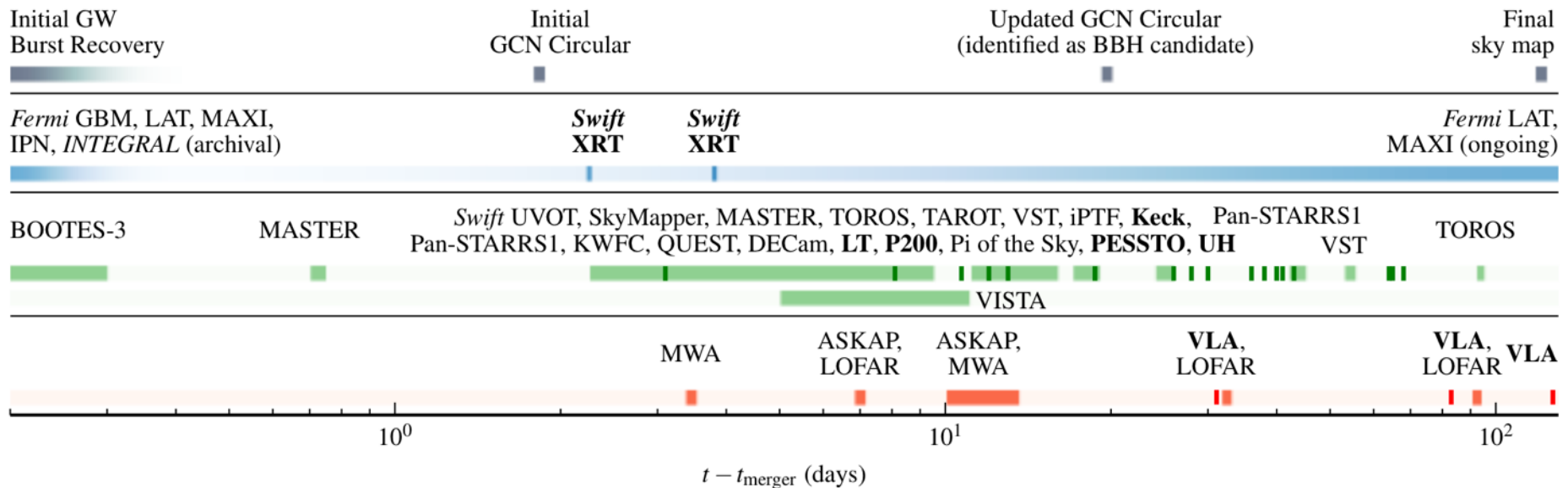
Περιοχή εντοπισμού της πηγής GW150914

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

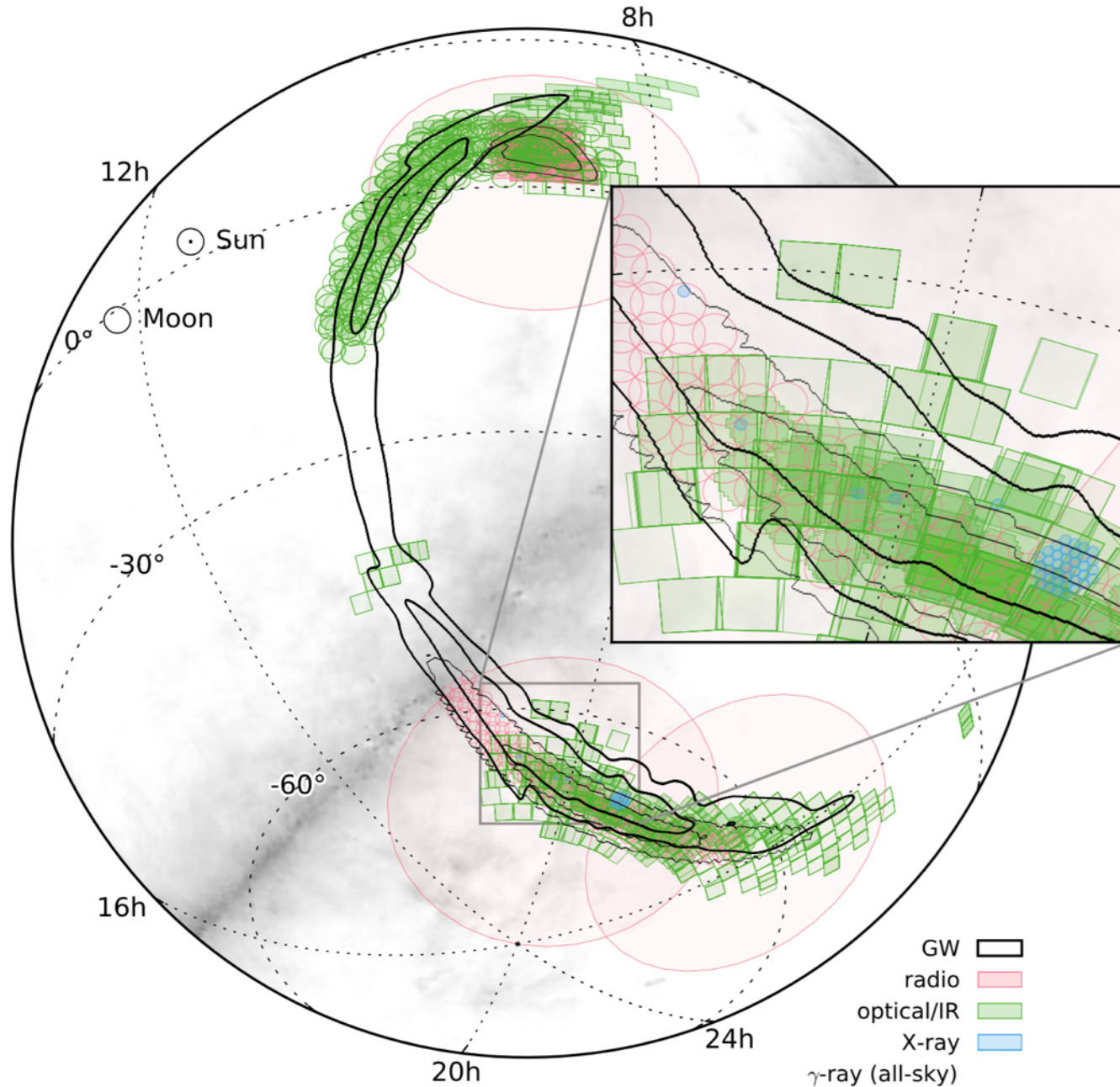


Παρατηρήσεις στο Η/Μ φάσμα

Στις 16 Σεπτεμβρίου 2015 ειδοποιήθηκαν 25 διαφορετικές ομάδες που έκαναν παρατηρήσεις σε όλο το Η/Μ φάσμα διάρκειας ημερών έως μηνών (τα αποτελέσματα αναμένονται).



Παρατηρήσεις στο Η/Μ φάσμα

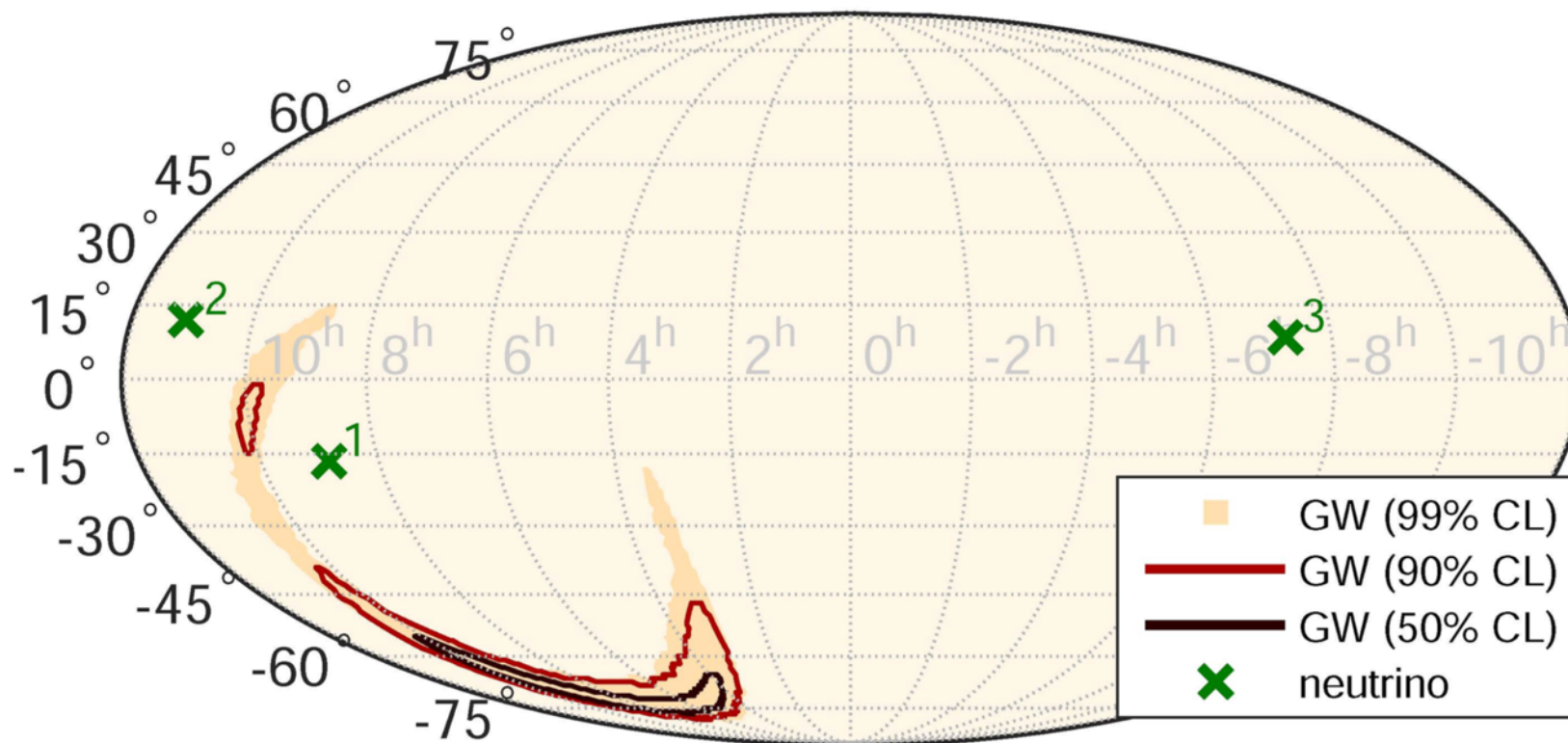


Abbot et al. (2016)

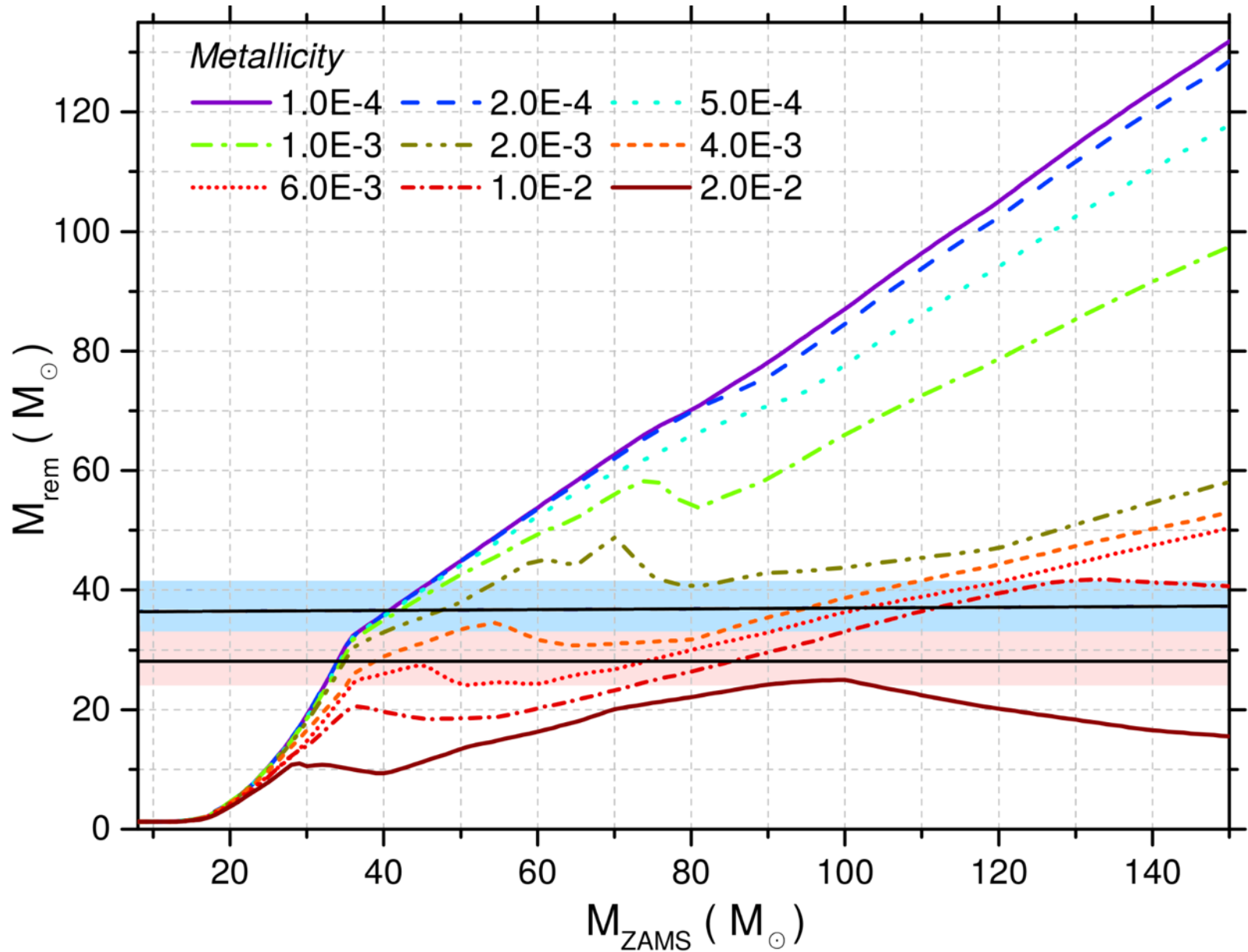
Έλεγχος για νετρίνα με IceCube και ANTARES

Άνω όριο στην εκπομπή νετρίνο:

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



Αστροφυσικά συμπεράσματα



Abbot et al. (2016)

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:

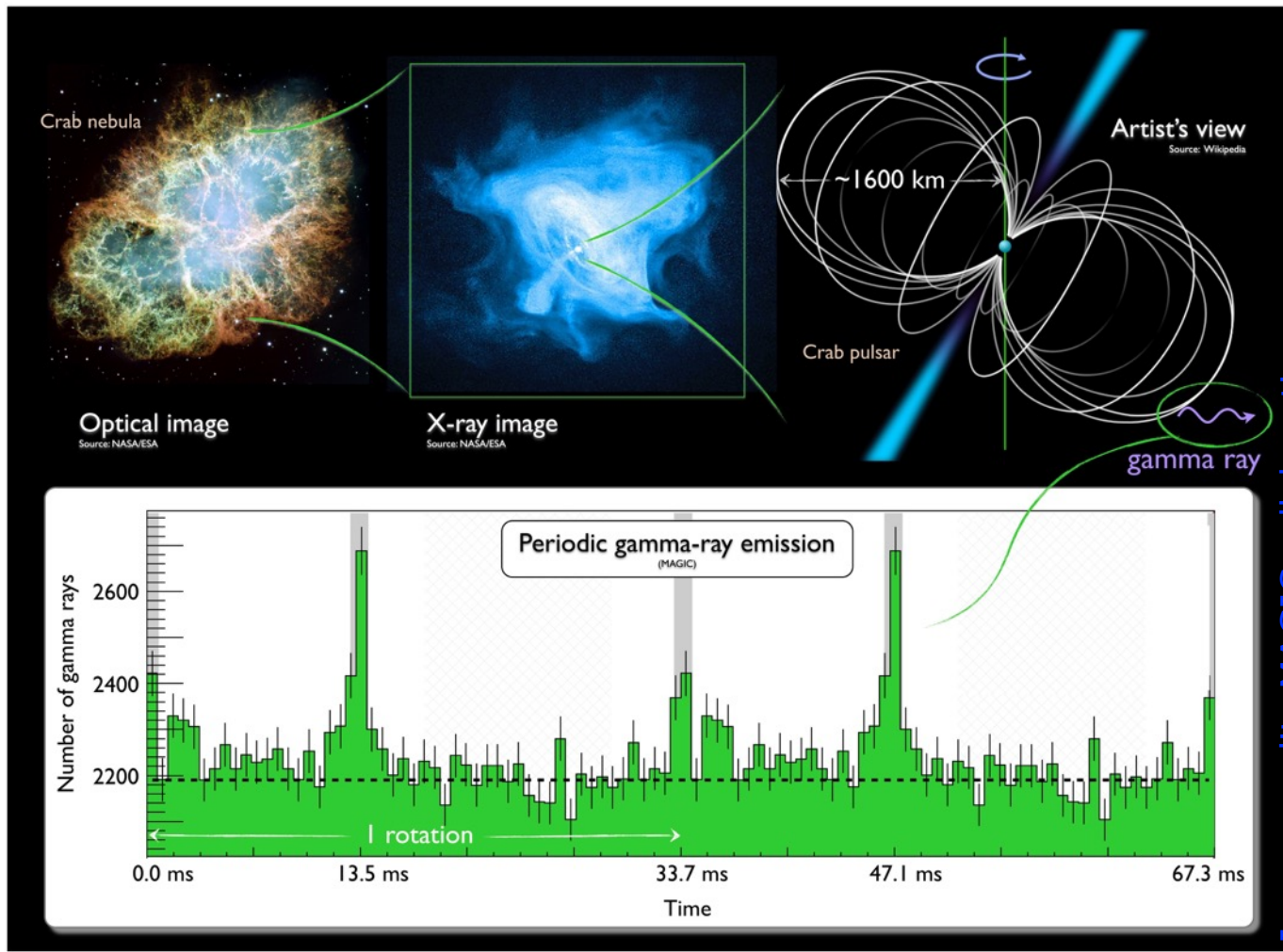
$$m_g \leq 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2$$

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

Αστέρες Νετρονίων

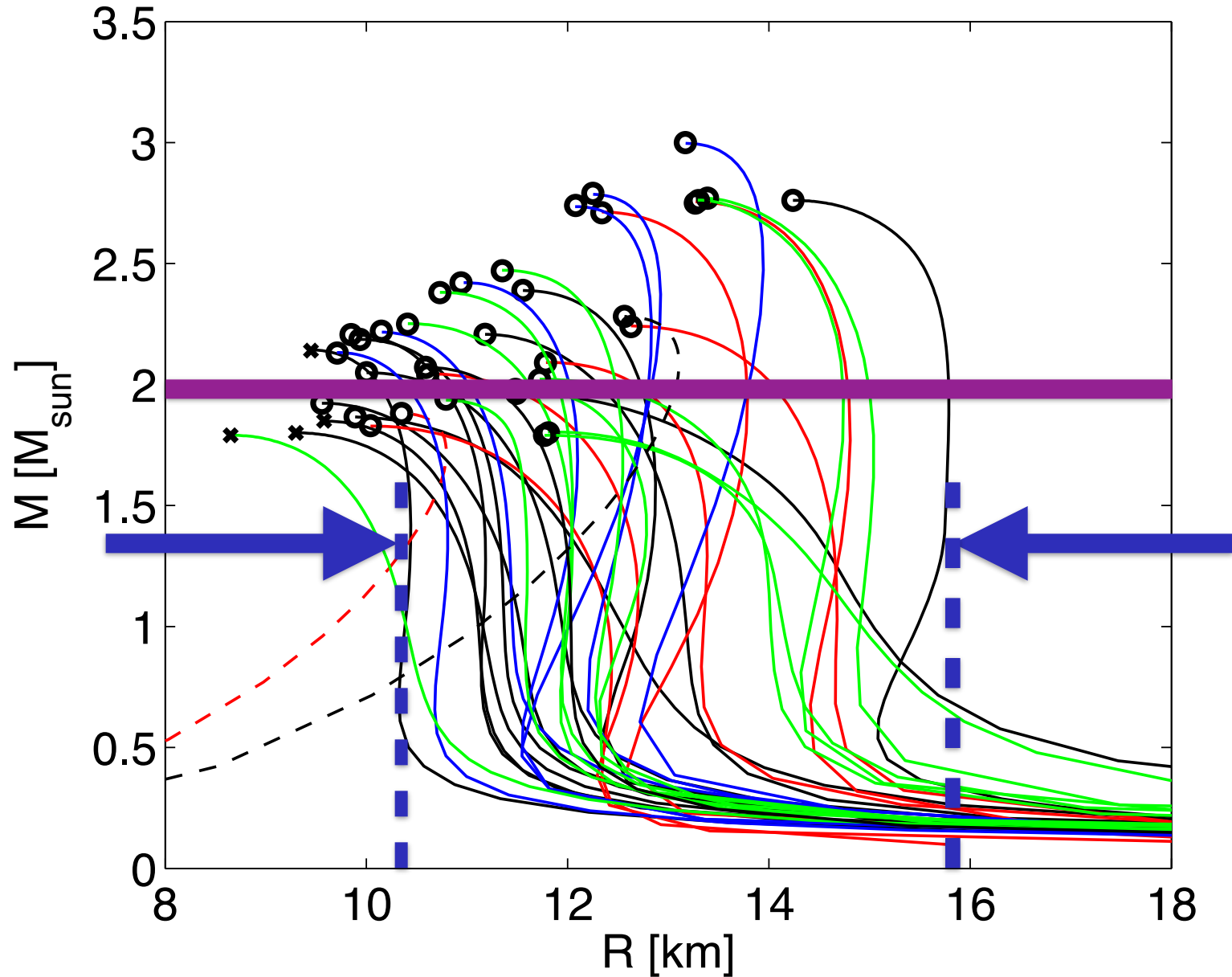
Οι **αστέρες νετρονίων** παρατηρούνται εδώ και **50 χρόνια**. Όμως, ακόμη δε γνωρίζουμε την κατάσταση της ύλης στον πυρήνα τους!

Δεν έχουμε ακριβείς μετρήσεις της ακτίνας!

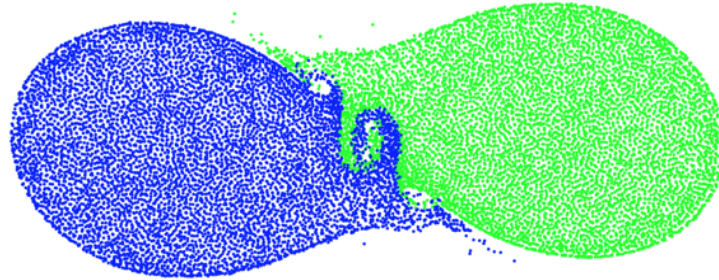


Αποτελέσματα με διάφορες καταστατικές εξισώσεις

Bauswein, Janka, Hebeler & Schwenk (2012)



Συγχώνευση αστέρων νετρονίων



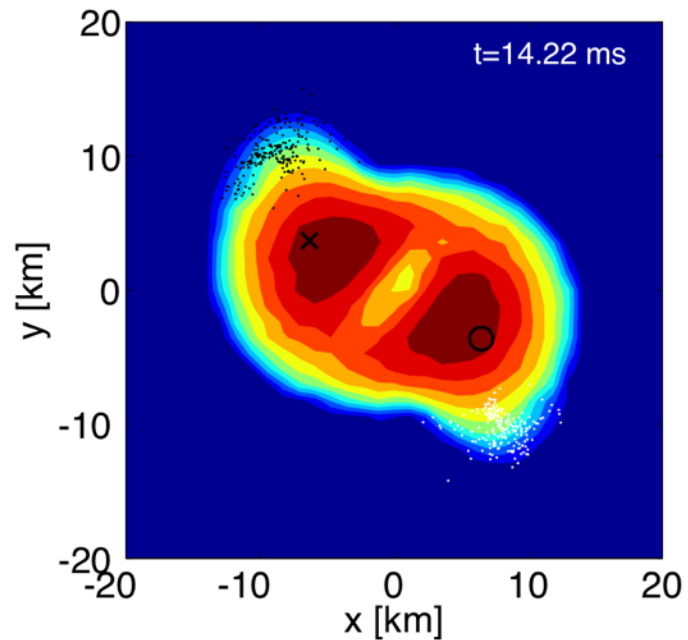
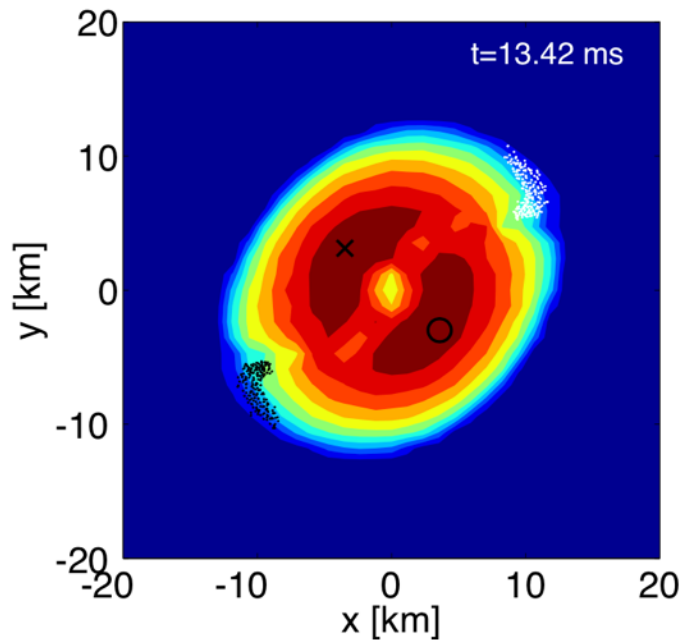
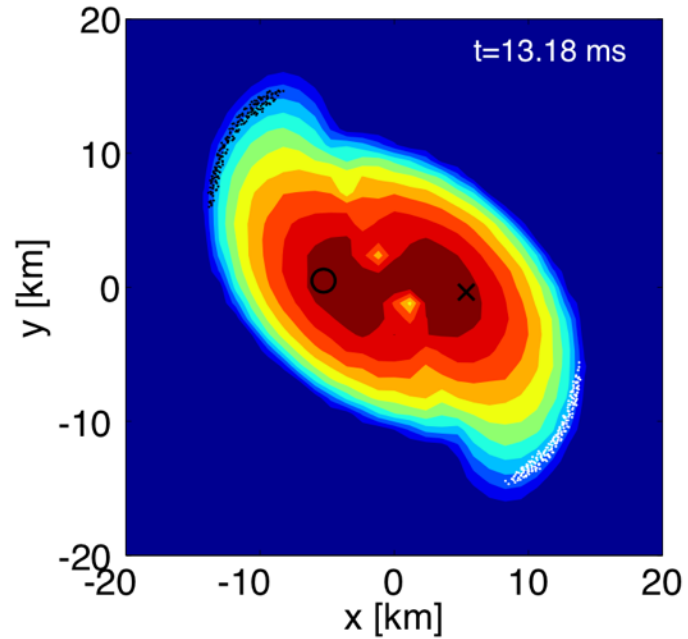
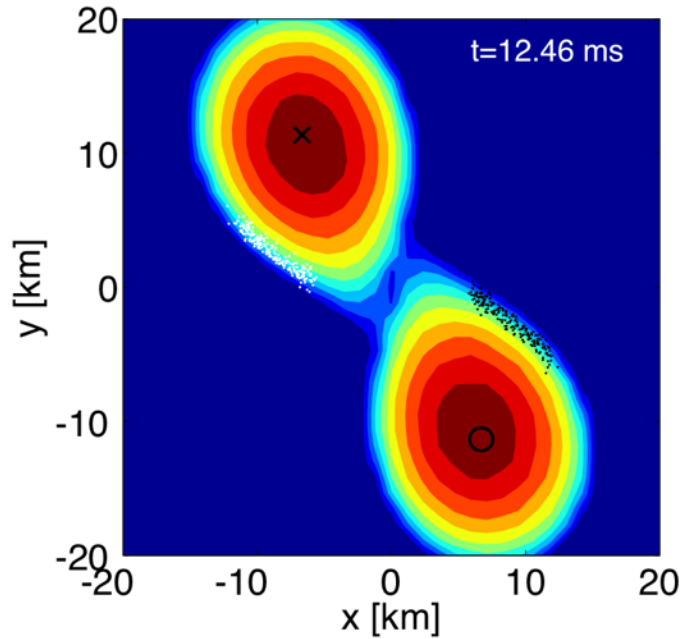
Η πιο πιθανή μάζα μετά τη συγχώνευση είναι:

$$2.4M_{\odot} < M_{\text{tot}} < 3M_{\odot}$$

Επειδή γνωρίζουμε ότι $M_{\text{max}} > 2M_{\odot}$ για μη περιστρεφόμενους α.ν., θα δημιουργηθεί ένας βαρύ αστέρας που θα επιβιώσει για τουλάχιστον $\tau > 10$ ms.

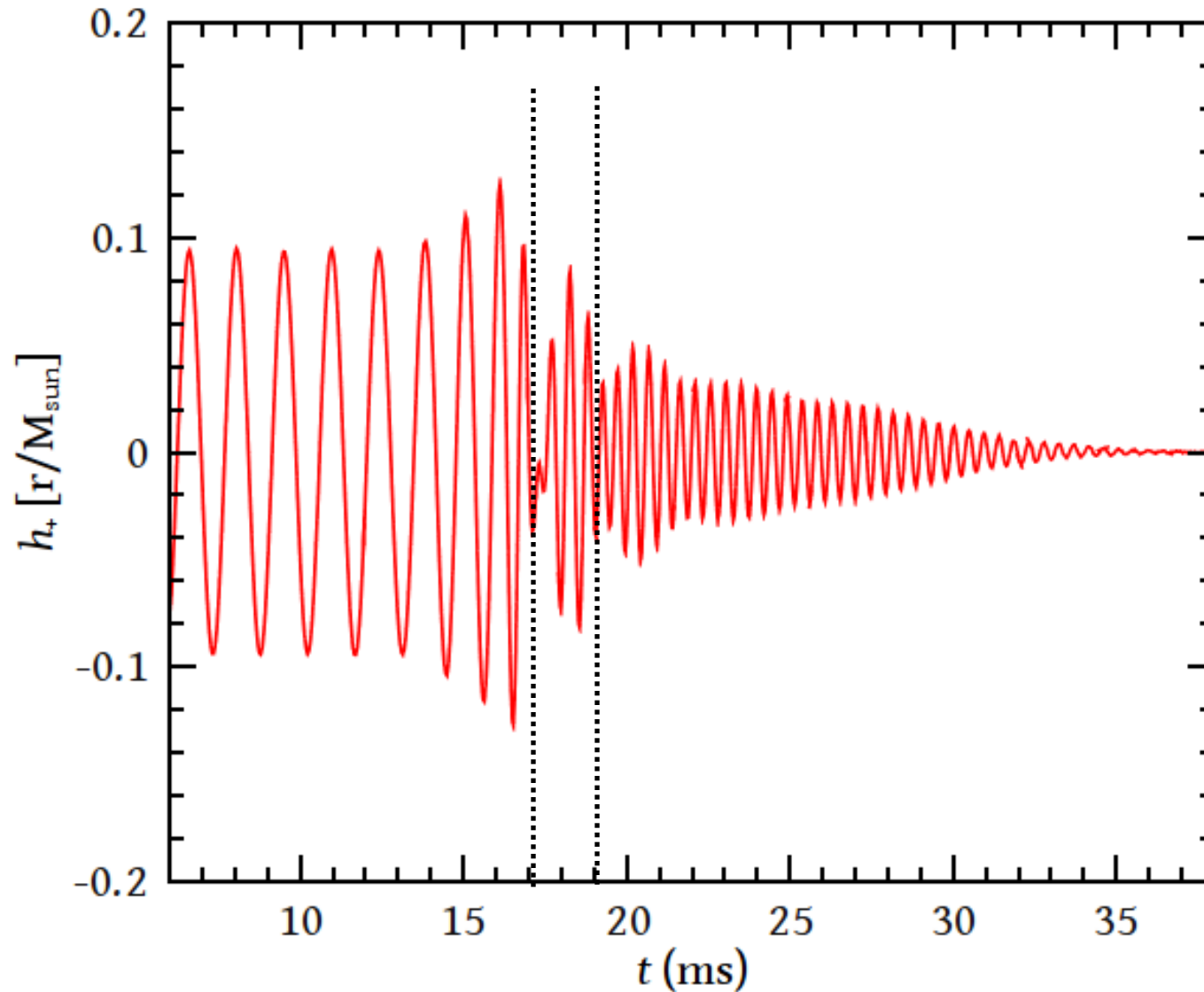
Ο αστέρας μετά τη συγχώνευση είναι σε προσωρινή ισορροπία λόγω της διαφορικής περιστροφής που έχει.

Προσομοιώσεις με υπολογιστική σχετικότητα



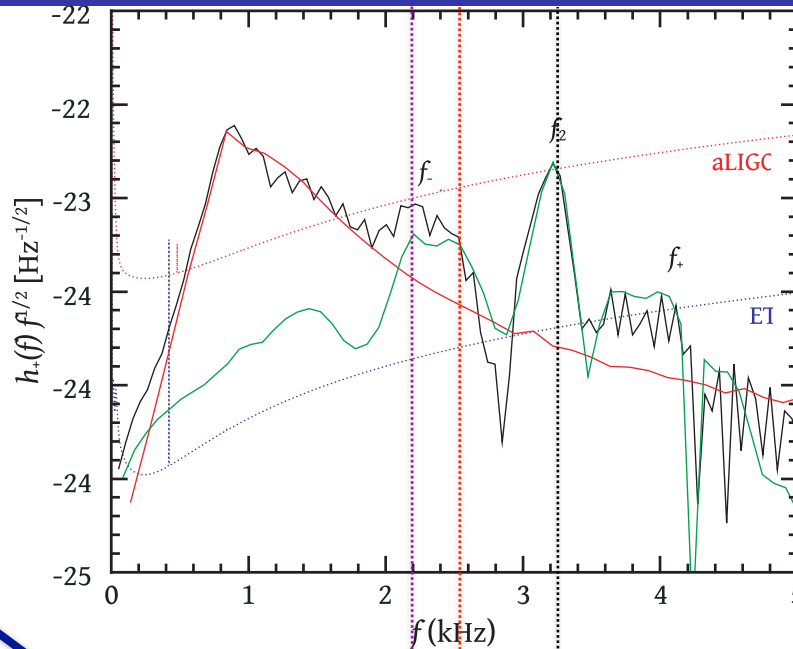
Ταλαντώσεις μετά τη συγχώνευση

Stergioulas, Bauswein, Zagkouris, Janka (2011)



Χαρακτηριστικές συχνότητες

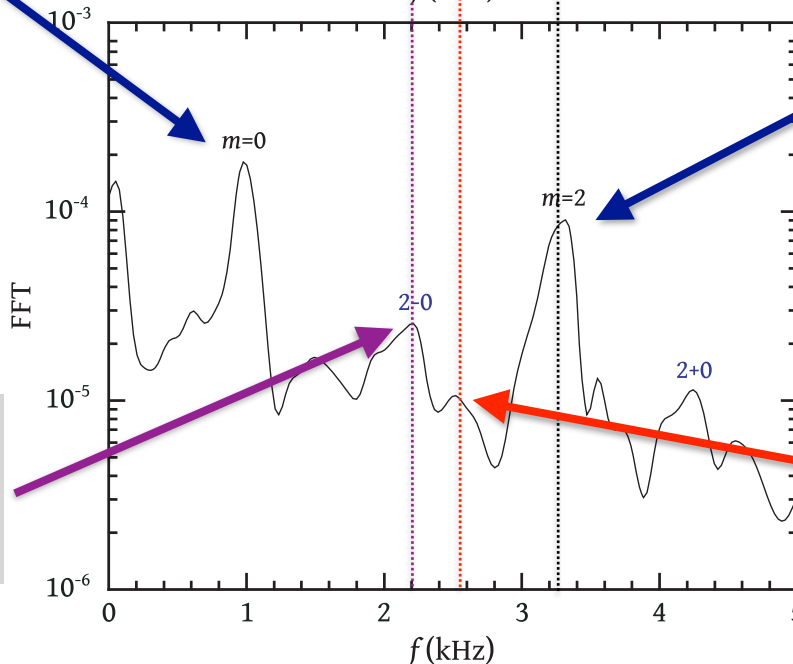
GRAVITATIONAL WAVE SPECTRUM



$l=m=0$
linear quasi-radial mode

FFT OF
HYDRODYNAMICS
IN EQUATORIAL
PLANE

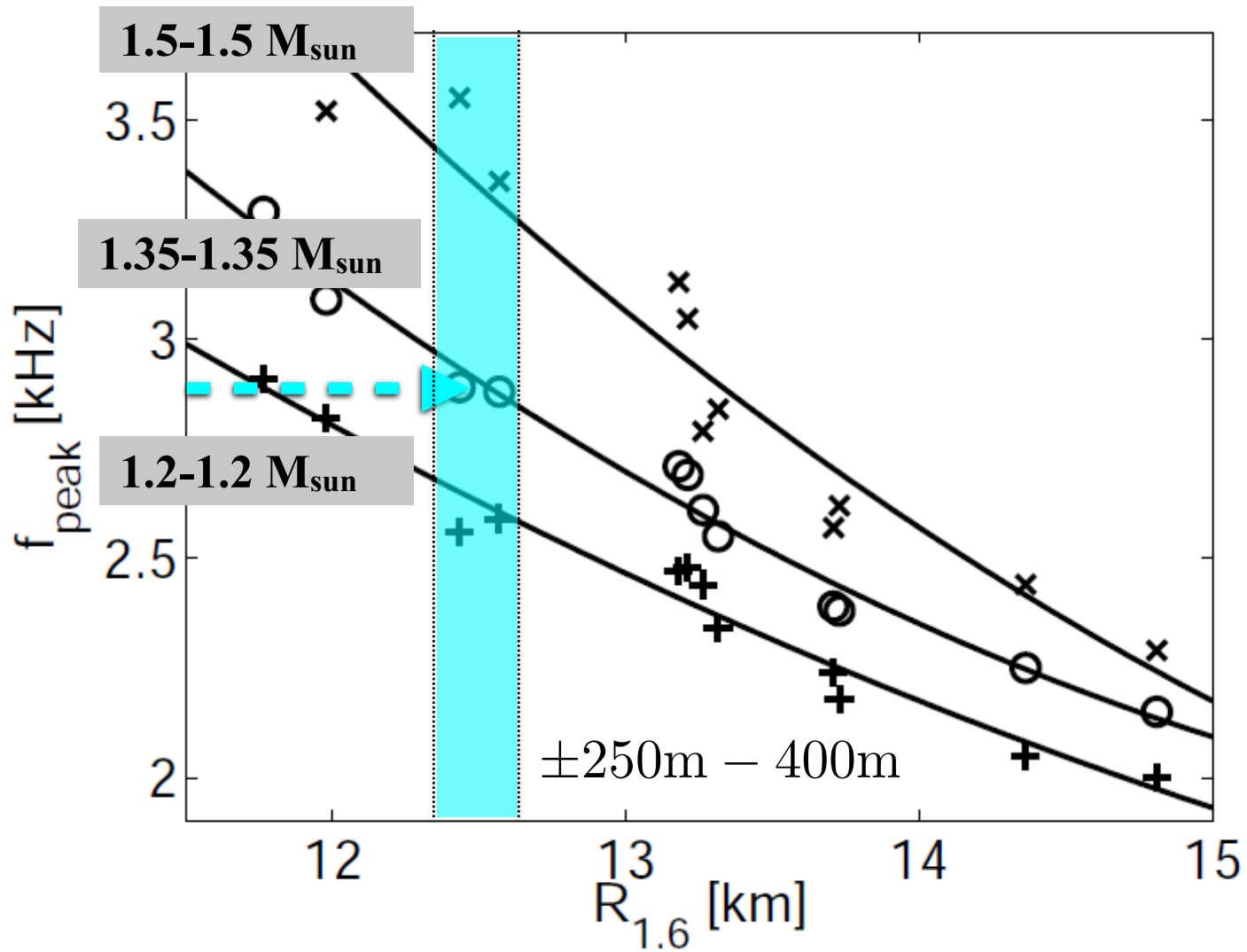
*“2-0” quasi-linear
combination
frequency*



$l=m=2$
linear f-mode

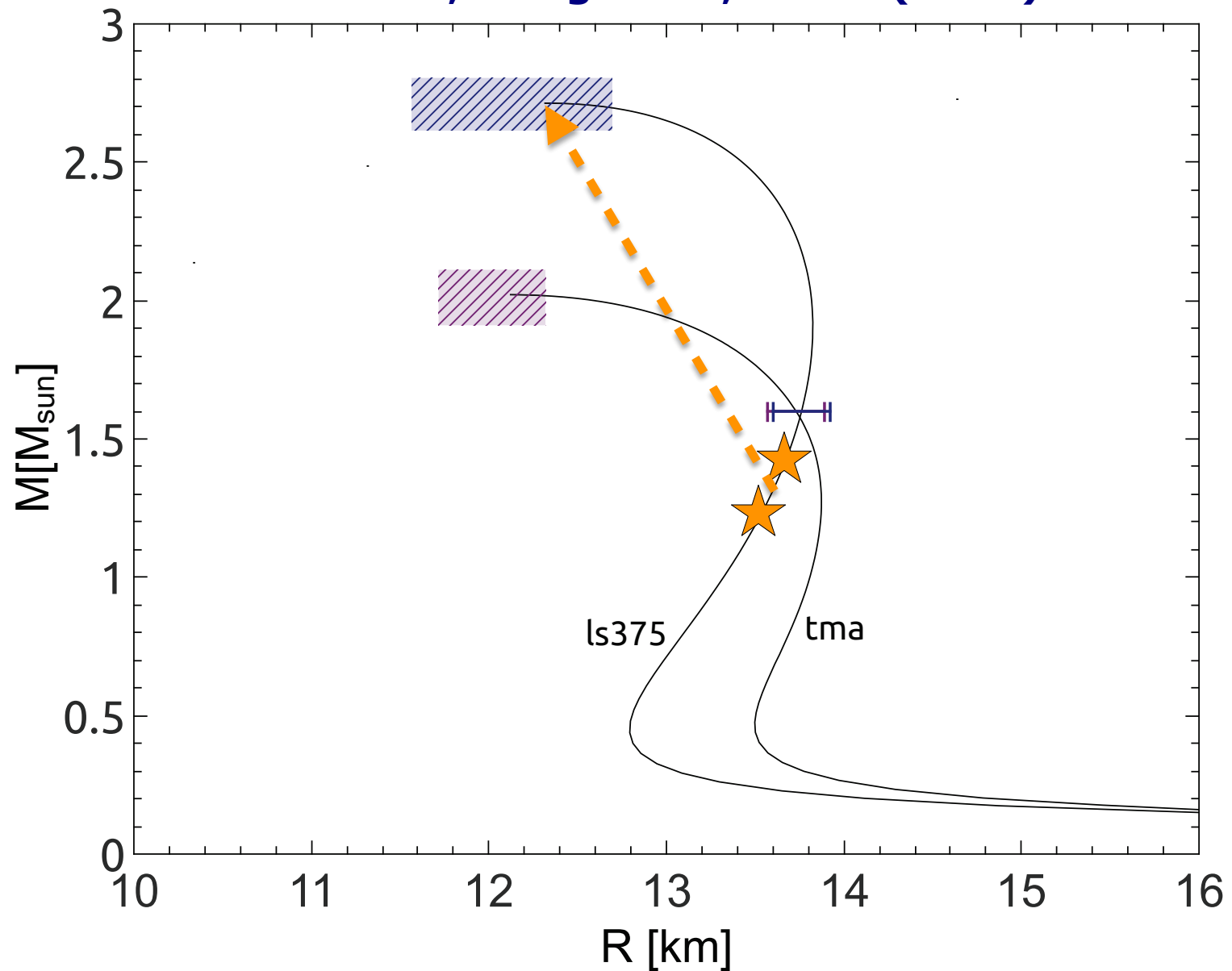
*nonlinear
spiral frequency*

Υπολογισμός της ακτίνας



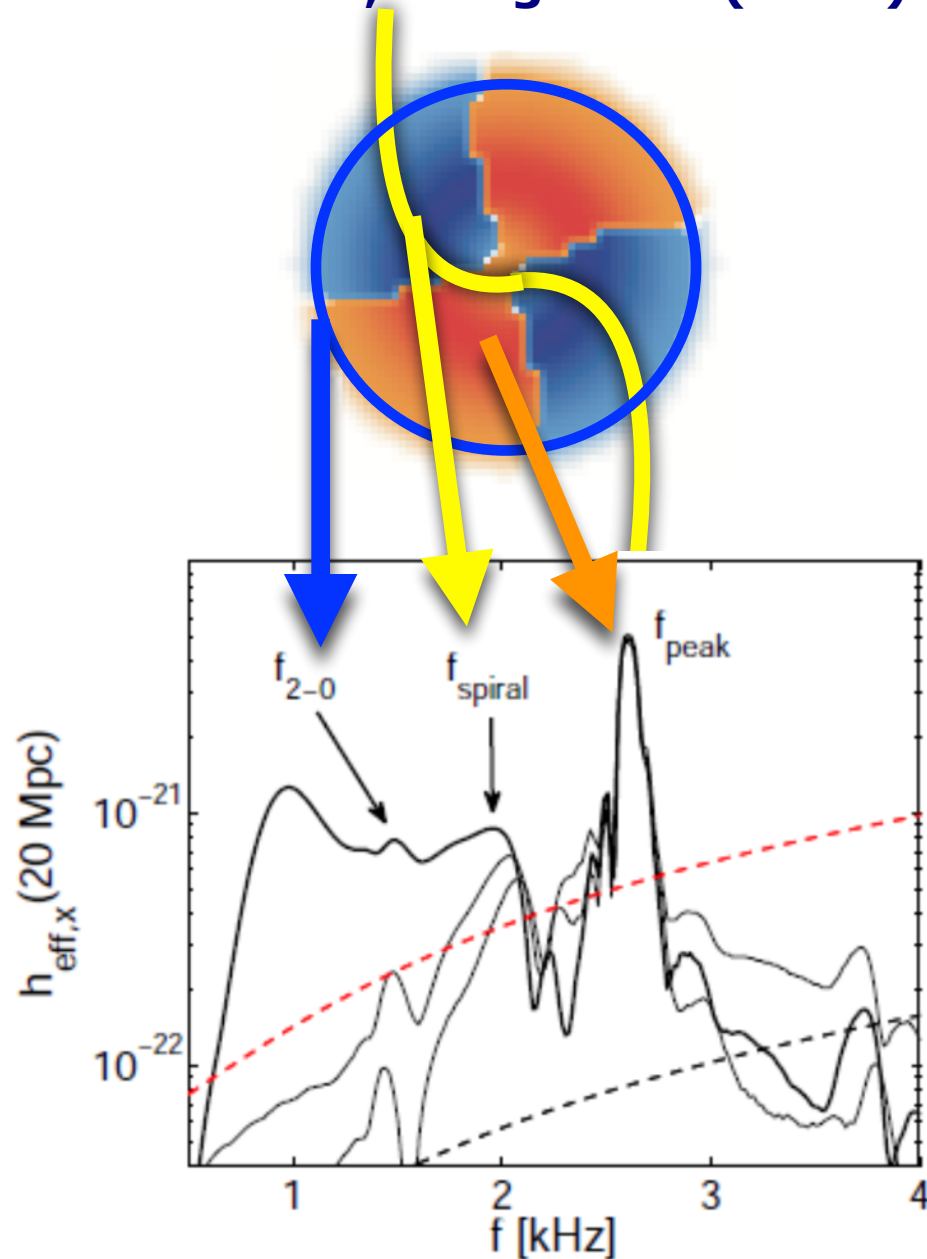
Υπολογισμός της ακτίνας

Bauswein, Stergioulas, Janka (2014)



Τρεις βασικές συχνότητες

Bauswein, Stergioulas (2015)



2016:

Observing Gravitational Waves From The Post-Merger Phase Of Binary Neutron Star Coalescence

J. A. Clark

Center for Relativistic Astrophysics and School of Physics, Georgia Institute of
Technology, Atlanta, GA 30332, USA

A. Bauswein

Department of Physics, Aristotle University of Thessaloniki, GR-54124
Thessaloniki, Greece

Heidelberger Institut für Theoretische Studien, D-69118 Heidelberg, Germany

N. Stergioulas

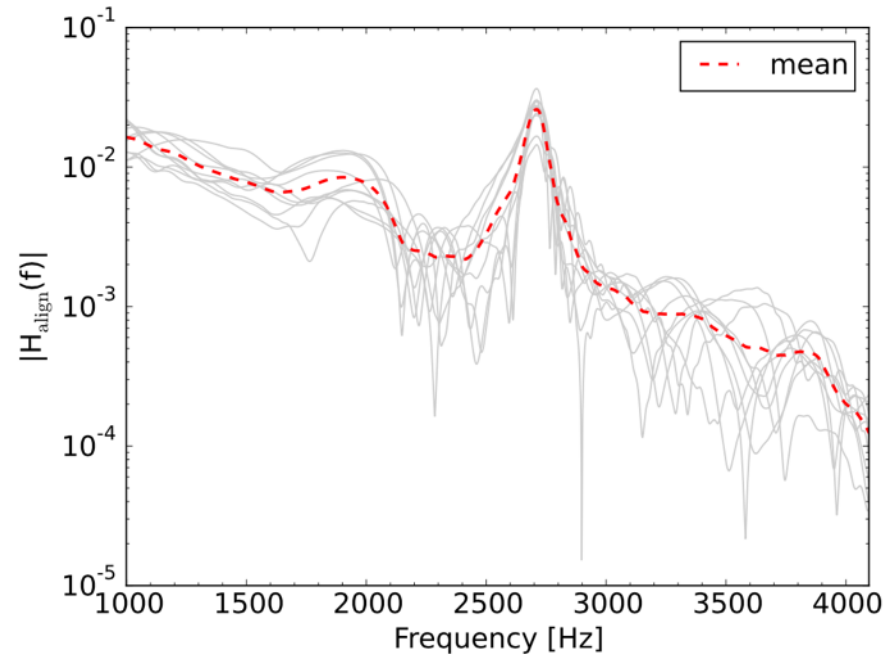
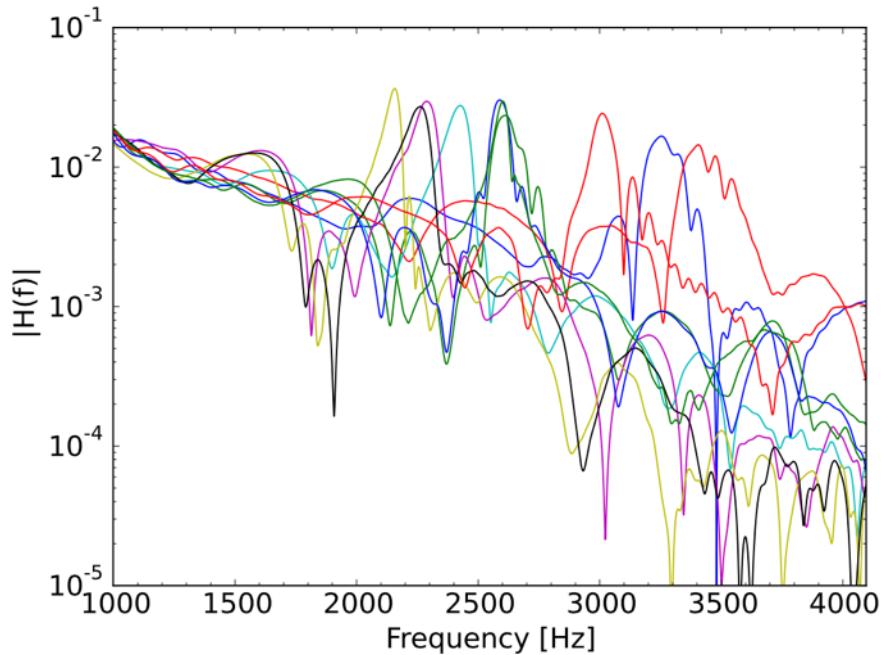
Department of Physics, Aristotle University of Thessaloniki, GR-54124
Thessaloniki, Greece

D. Shoemaker

Center for Relativistic Astrophysics and School of Physics, Georgia Institute of
Technology, Atlanta, GA 30332, USA

Ανάλυση βασικών συνιστωσών

Πρώτη εφαρμογή της μεθόδου Principal component analysis (PCA)



Η μέθοδος αυτή μας επέτρεψε να φτάσουμε στο **90% του μέγιστου πλάτους, χωρίς την ανάγκη λεπτομερούς μοντελοποίησης.**

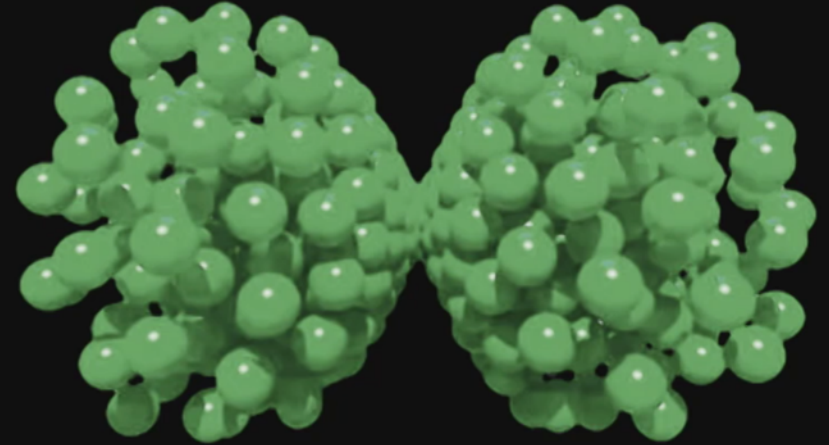
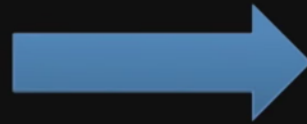
Ελαττώσαμε κατά πολλές τάξεις μεγέθους το υπολογιστικό κόστος για την μέτρηση της ακτίνας από συγχωνεύσεις αστέρων νετρονίων.

Παγκόσμιο δίκτυο

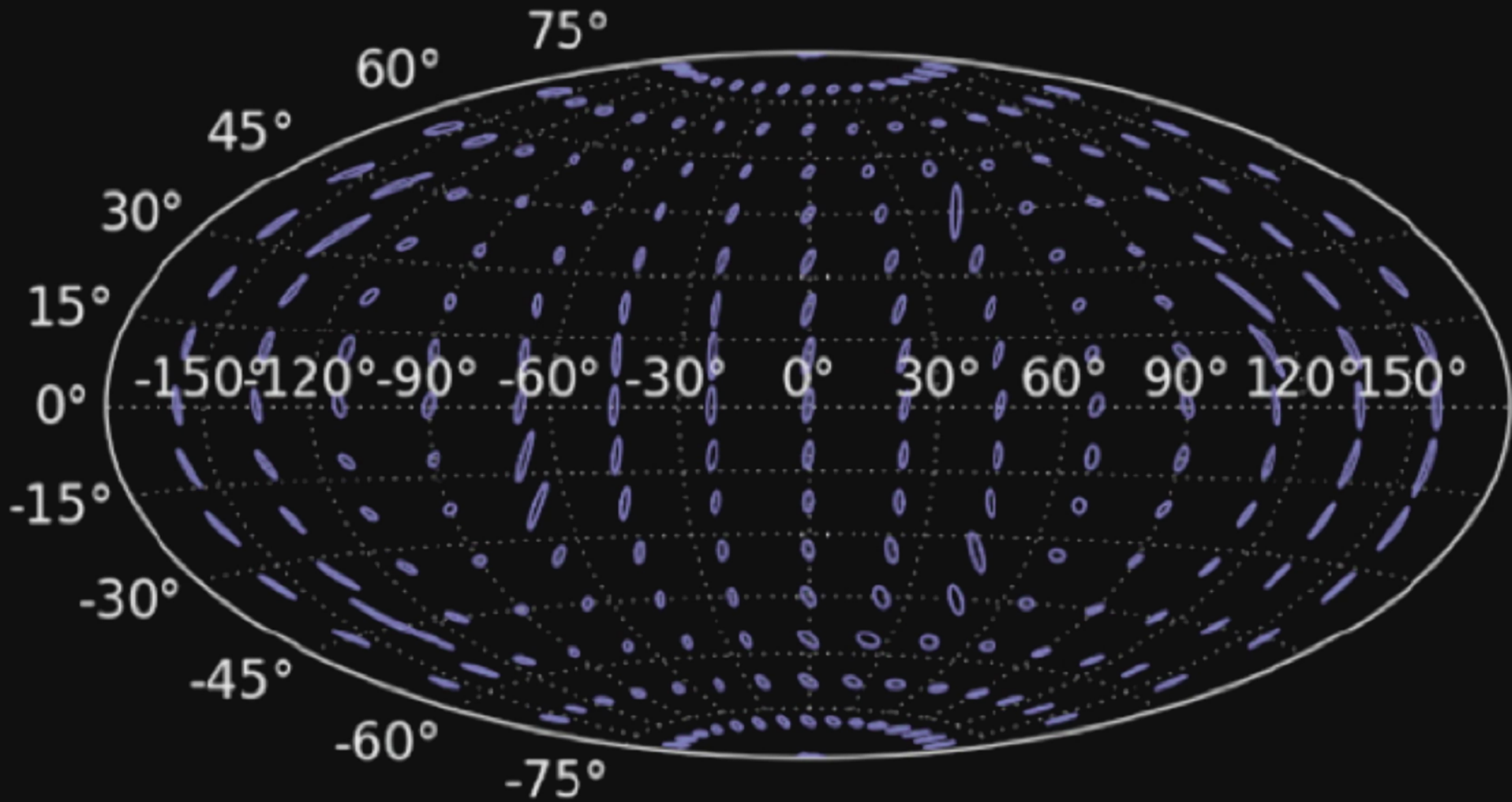
Σύντομα, όλοι οι συμβολομετρικοί ανιχνευτές θα λειτουργούν ως ένα *ενιαίο πείραμα*, το οποίο θα επιτρέπει τον *εντοπισμό θέσης* των διαφόρων πηγών.



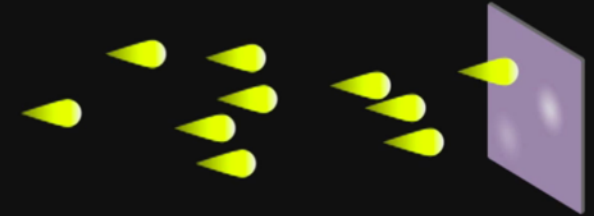
Βελτίωση ενεργητικής απόσβεσης κραδασμών



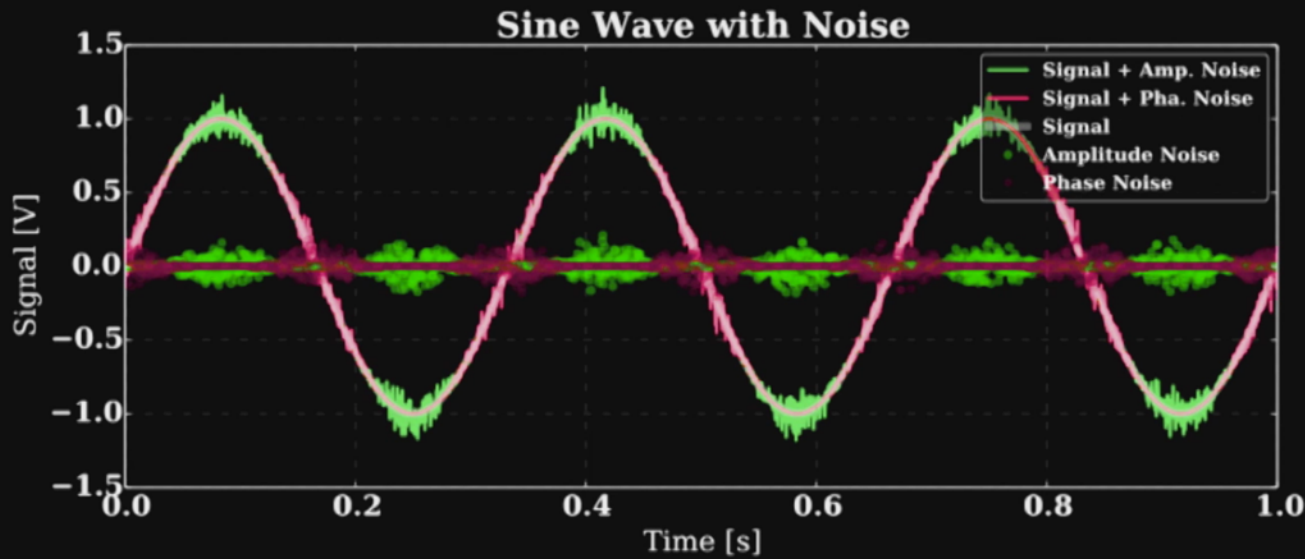
Ακριβής εντοπισμός θέσης



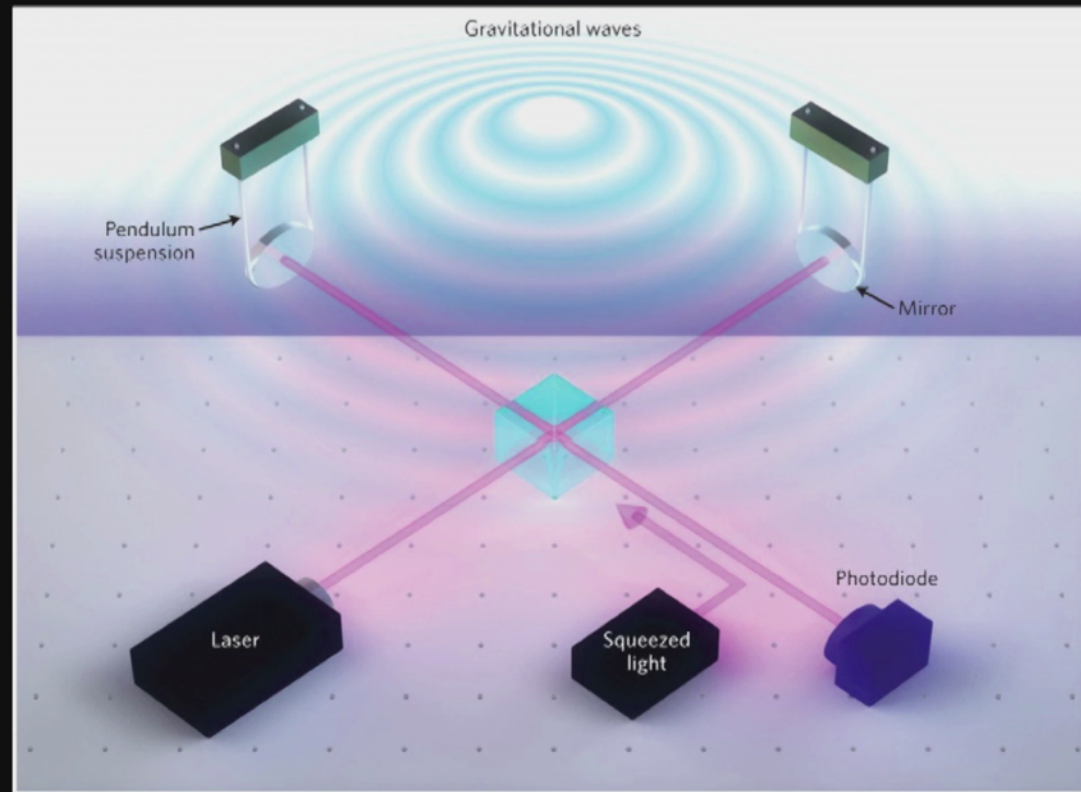
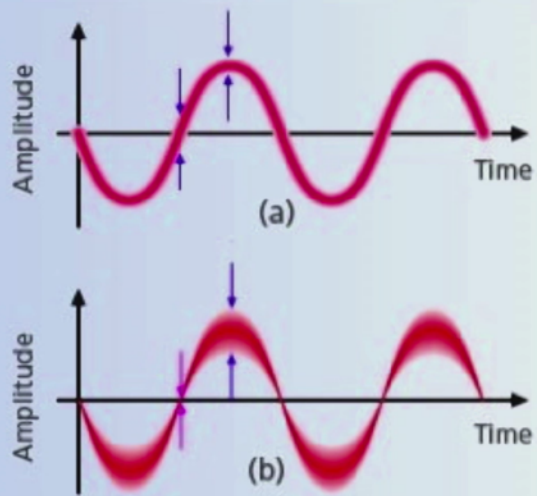
Βελτίωση κβαντικού θορύβου



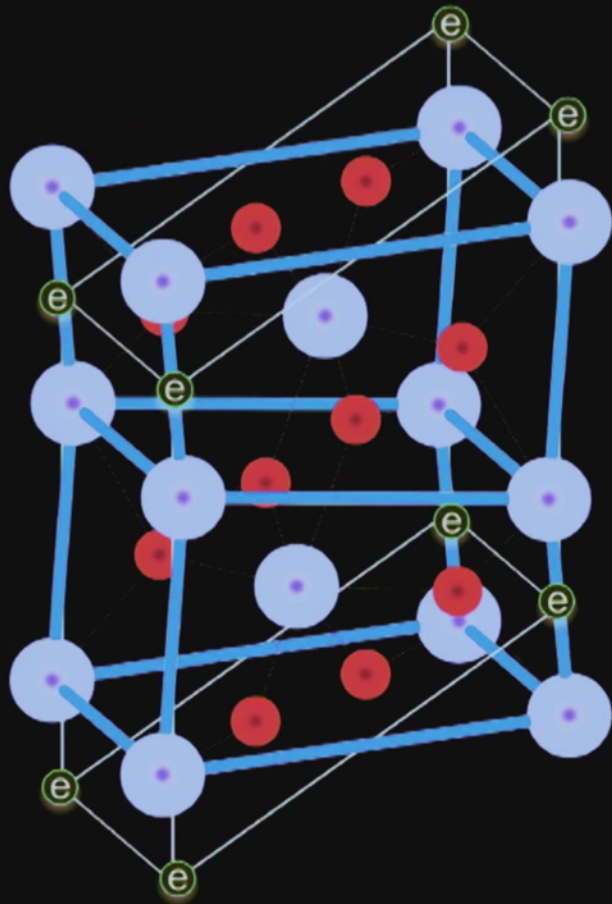
$$\Delta E \Delta \phi \geq \hbar \omega / 2$$



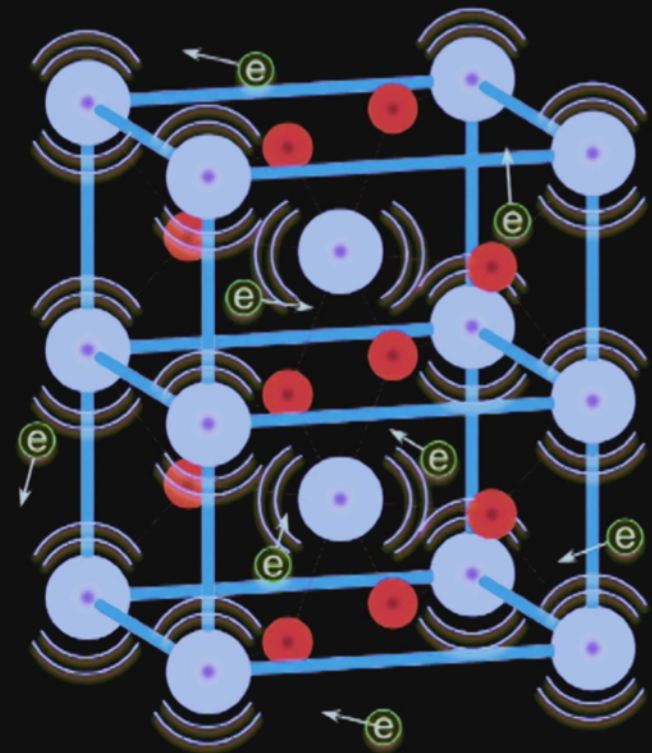
Βαρυτικά Κύματα



Βελτίωση θερμικής συμπεριφοράς

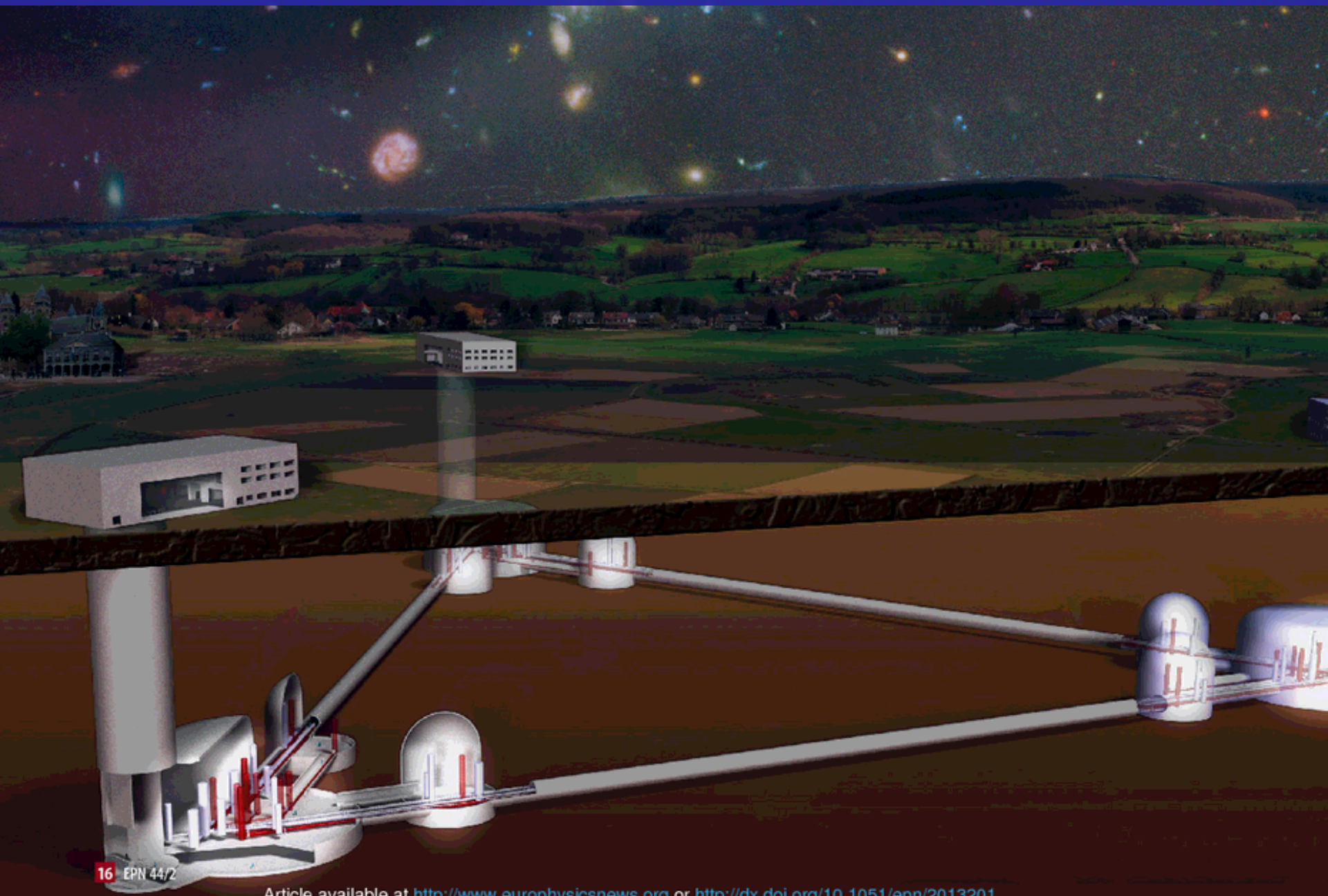


Cold



Hot

Einstein Telescope





VESF – The Virgo–EGO Scientific Forum

[Home](#) [Documents](#) [Events](#) [Fellowships](#) [Schools](#) [Members](#)

The [Virgo](#) Collaboration and the [CNRS/INFN](#) EGO Consortium have set-up a Forum where participating astrophysicists and theorists contribute to the further development of scientific knowledge around Virgo.

It is the purpose of the Virgo–EGO Scientific Forum (**VESF**) to enlarge the research community around the present Virgo collaboration by providing individual participants and institutions interested with scientific opportunities of stimulating research, publications, and all other scientific activities.

The **VESF** includes the members of the Virgo Collaboration and scientists interested in gravitational wave research from other laboratories, observatories and institutions.

The **VESF** scope, functions and organization are detailed in its [Charter](#).

As foreseen in the Charter, the VESF governing body is its Council.

The Council elects the members of the Executive Board which, in turn, appoints the VESF Coordinator.

The Executive Board (EB) is currently formed by:

- [Luigi Stella](#), VESF Coordinator, chairs the EB
- [Toni Font](#), Member
- [Andrea Possenti](#), Member
- [Nikolaos Stergioulas](#), Member
- [Guglielmo Tino](#), Member
- Virgo spokesperson ([Fulvio Ricci](#)), Member
- EGO Director ([Federico Ferrini](#)), Member