

XIX. seminář o filosofických otázkách matematiky a fyziky
Velké Meziříčí 21. 8. 2019

Aktuality ze světa gravitačních vln

Jiří Podolský
Ústav teoretické fyziky
Matematicko-fyzikální fakulta
Univerzita Karlova v Praze



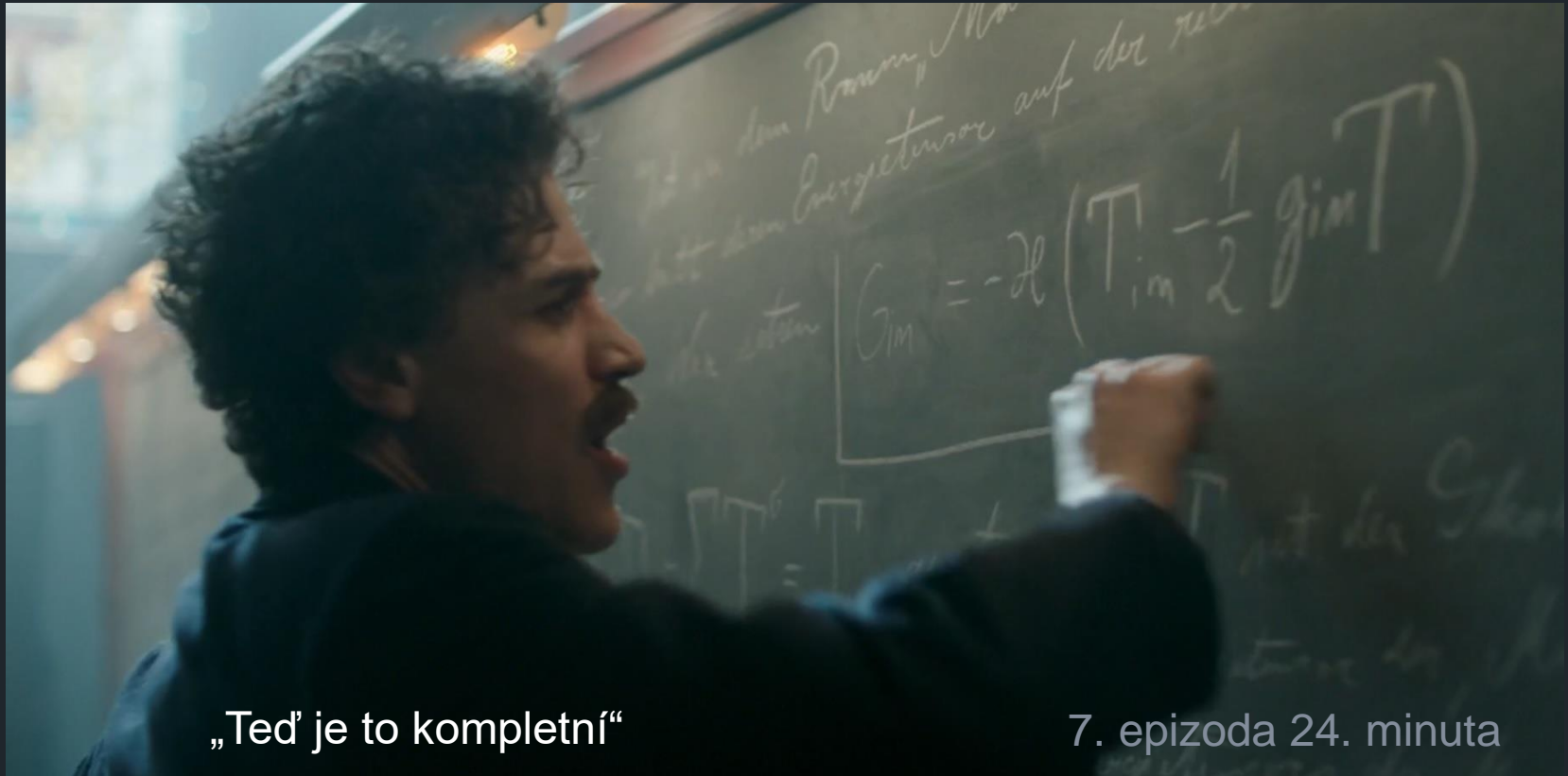
gravitační vlny byly prokázány (2016)

tím byla ověřena poslední z klíčových předpovědí obecné relativity (1916)

začala nová **éra gravitační astronomie**
vesmír lze studovat skrz „mnoho oken“

aktuálně: **mnoho nových objevů**
v budoucnu: **mnoho nových detektorů**

25. 11. 1915 v Berlíně **Albert Einstein** píše rovnice gravitačního pole



„Teď je to kompletní“

7. epizoda 24. minuta

Génius.



NATIONAL
GEOGRAPHIC

Einstein a gravitační vlny: 22. 6. 1916

Aproximativní integrace rovnic gravitačního pole

Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.

Bei der Behandlung der meisten speziellen (nicht prinzipiellen) Probleme auf dem Gebiete der Gravitationstheorie kann man sich damit begnügen, die $g_{\mu\nu}$ in erster Näherung zu berechnen. Dabei bedient man sich mit Vorteil der imaginären Zeitvariable $x_4 = it$ aus denselben Gründen wie in der speziellen Relativitätstheorie. Unter »erster Näherung« ist dabei verstanden, daß die durch die Gleichung

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

definierten Größen $\gamma_{\mu\nu}$, welche linearen orthogonalen Transformationen gegenüber Tensorcharakter besitzen, gegen 1 als kleine Größen behandelt werden können, deren Quadrate und Produkte gegen die ersten Potenzen vernachlässigt werden dürfen. Dabei ist $\delta_{\mu\nu} = 1$ bzw. $\delta_{\mu\nu} = 0$, je nachdem $\mu = \nu$ oder $\mu \neq \nu$.

Wir werden zeigen, daß diese $\gamma_{\mu\nu}$ in analoger Weise berechnet werden können wie die retardierten Potentiale der Elektrodynamik. Daraus folgt dann zunächst, daß sich die Gravitationsfelder mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Wir werden im Anschluß an diese allgemeine Lösung die Gravitationswellen und deren Entstehungsweise untersuchen. Es hat sich gezeigt, daß die von mir vorgeschlagene Wahl des Bezugssystems gemäß der Bedingung $g = |g_{\mu\nu}| = -1$ für die Berechnung der Felder in erster Näherung nicht vorteilhaft ist. Ich wurde hierauf aufmerksam durch eine briefliche Mitteilung des Astronomen DE SITTER, der fand, daß man durch eine andere Wahl des Bezugssystems zu einem einfacheren Ausdruck des Gravitationsfeldes eines ruhenden Massenpunktes gelangen kann, als ich ihn früher gegeben hatte¹. Ich stütze mich daher im folgenden auf die allgemein invarianten Feldgleichungen.

[2] ¹ Sitzungsber. XLVII, 1915, S. 833.

§ 1. Integration der Näherungsgleichungen des Gravitationsfeldes.

Die Feldgleichungen lauten in ihrer kovarianten Form [3]

$$\begin{aligned} R_{\mu\nu} + S_{\mu\nu} &= -\kappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \right) \\ R_{\mu\nu} &= -\sum_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \left\{ \frac{\mu\nu}{\alpha} \right\} + \sum_{\alpha\beta} \left\{ \frac{\mu\alpha}{\beta} \right\} \left\{ \frac{\beta\nu}{\alpha} \right\} \\ S_{\mu\nu} &= \frac{\partial \log \sqrt{g}}{\partial x_{\mu}} \frac{\partial}{\partial x_{\nu}} \sum_{\alpha} \left\{ \frac{\mu\nu}{\alpha} \right\} \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \end{aligned}$$

Dabei bedeuten die geschweiften Klammern die schon Symbole, $T_{\mu\nu}$ den kovarianten Energietensor zugehörigen Skalar. Die Gleichungen (1) liefern den Näherung die durch Entwickeln unmittelba

$$\sum_{\alpha} \frac{\partial^2 \gamma_{\mu\alpha}}{\partial x_{\alpha} \partial x_{\alpha}} + \sum_{\alpha} \frac{\partial^2 \gamma_{\alpha\mu}}{\partial x_{\alpha} \partial x_{\alpha}} - \sum_{\alpha} \frac{\partial^2 \gamma_{\alpha\alpha}}{\partial x_{\mu}^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_{\mu} \partial x_{\nu}} \left(\sum_{\alpha} \gamma_{\alpha\alpha} \right) =$$

Das letzte Glied der linken Seite stammt von der von mir bevorzugten Koordinatenwahl v chungen (2) lassen sich durch den Ansatz

$$\gamma_{\mu\nu} = \gamma'_{\mu\nu} + \psi \delta_{\mu\nu}$$

lösen, wobei die $\gamma'_{\mu\nu}$ der zusätzlichen Bedingu

$$\sum_{\alpha} \frac{\partial \gamma'_{\mu\alpha}}{\partial x_{\alpha}} = 0$$

genügen. Durch Einsetzen von (3) in (2) er linken Seite

$$-\sum_{\alpha} \frac{\partial \gamma'_{\mu\alpha}}{\partial x_{\alpha}^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_{\mu} \partial x_{\nu}} \left(\sum_{\alpha} \gamma'_{\alpha\alpha} \right) + 2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_{\mu} \partial x_{\nu}} - \delta_{\mu\nu} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_{\alpha} \partial x_{\alpha}} =$$

Der Beitrag des zweiten, dritten und fünften Gliedes verschwindet, wenn ψ gemäß der Gleichung

$$\sum_{\alpha} \gamma'_{\alpha\alpha} + 2\psi = 0 \quad (5)$$

gewählt wird, was wir festsetzen. Mit Rücksicht hierauf erhält man an Stelle von (2)



vlnová rovnice pro slabé perturbace

detail třetí strany nahoře:

690 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 22. Juni 1916

$$\sum_{\alpha} \frac{\partial^2}{\partial x_{\alpha}^2} \left(\gamma'_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \delta_{\mu\nu} \sum_{\alpha} \gamma'_{\alpha\alpha} \right) = 2 \times \left(T'_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \delta_{\mu\nu} \sum_{\alpha} T'_{\alpha\alpha} \right)$$

oder

vlnová rovnice se zdrojem !

$$\sum_{\alpha} \frac{\partial^2}{\partial x_{\alpha}^2} \gamma'_{\mu\nu} = 2 \times T'_{\mu\nu}. \quad (6)$$

Es ist hierzu zu bemerken, daß Gleichung (6) mit der Gleichung (4) im Einklang ist. Denn es ist zunächst leicht zu zeigen, daß bei der von uns erstrebten Genauigkeit der Impulsenergiesatz für die Materie

efekt gravitační vlny

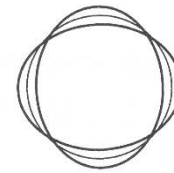


Figure 3.1. The distortion of a ring of test particles by a gravitational wave.

princip detekce

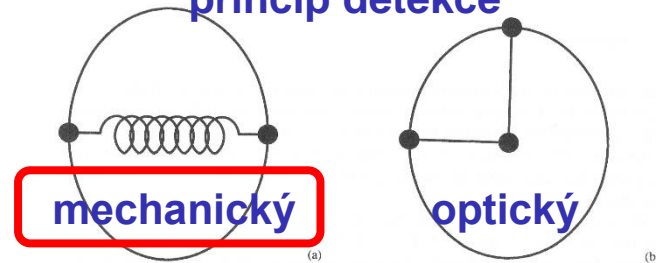
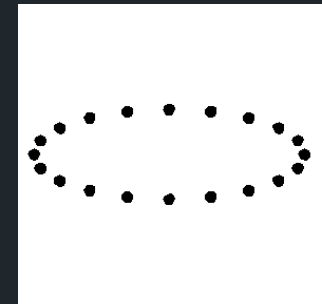
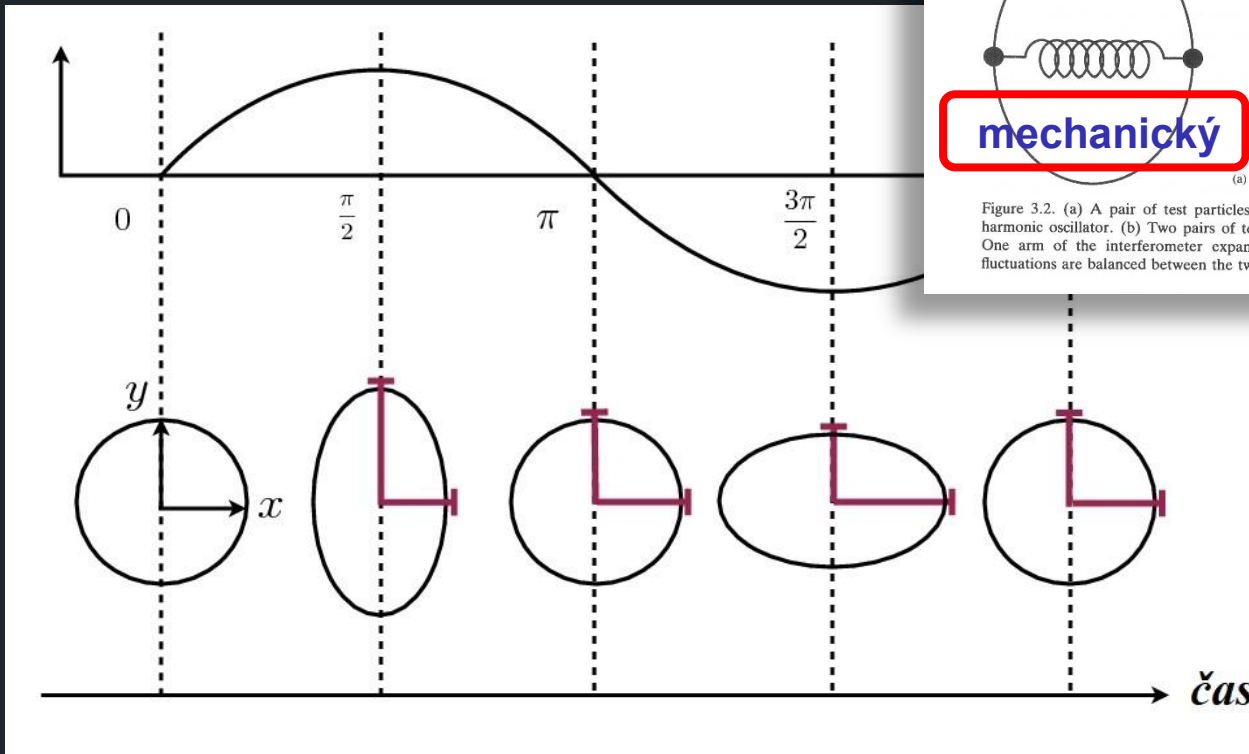


Figure 3.2. (a) A pair of test particles joined by a spring to make a mass quadrupole harmonic oscillator. (b) Two pairs of test particles connected via a laser interferometer. One arm of the interferometer expands, the other arm contracts, while laser beam fluctuations are balanced between the two arms, and cancel out.



periodické kvadrupólové deformace v příčné rovině

první pokusy o detekci gravitačních vln

1960 – 2000: mechanické rezonanční detektory Josepha Webera a jeho následovníků



Joseph Weber, říjen 1969

Credit: University of Maryland Libraries

PHYSICAL REVIEW VOLUME 117, NUMBER 1 JANUARY 1, 1960

Detection and Generation of Gravitational Waves*

J. WEBER
University of Maryland, College Park, Maryland

(Received February 9, 1959; revised manuscript received July 20, 1959)

Methods are proposed for measurement of the Riemann tensor and detection of gravitational waves. These make use of the fact that relative motion of mass points, or strains in a crystal, can be produced by second derivatives of the gravitational fields. The strains in a crystal may result in electric polarization in consequence of the piezoelectric effect. Measurement of voltages then enables certain components of the Riemann tensor to be determined. Mathematical analysis of the limitations is given. Arrangements are presented for search for gravitational radiation.

The generation of gravitational waves in the laboratory is discussed. New methods are proposed which employ electrically induced stresses in crystals. These give approximately a seventeen-order increase in radiation over a spinning rod of the same length as the crystal. At the same frequency the crystal gives radiation which is about thirty-nine orders greater than that of a spinning rod.

INTRODUCTION

THE question of gravitational radiation has always been a central issue in the General Theory of Relativity. Long ago, Einstein¹ and Eddington² studied the problem and predicted that very small amounts of energy would be radiated by a spinning rod or a double star. A great deal of theoretical work on the radiation problem has appeared, during the past four decades.

Experimental work along these lines now appears possible. Two avenues of approach will be considered.³ First we should like to detect the presence of gravitational radiation incident on earth from either the sun or outside the solar system. Secondly it would be highly desirable to be able to generate and detect this radiation in a small laboratory.

Devices for detection of the radiation operate essentially by measuring the Fourier transform of the

Riemann tensor. These will be discussed first. This will then be followed by proposals for generation of gravitational radiation which may give an increase of many orders over the gravitational radiation from a spinning rod.

DETECTION OF GRAVITATIONAL RADIATION

Suppose we have a system of masses which may interact with each other. We start with the action principle

$$\delta I = \delta \left[-cm \int ds + W \right] = 0. \quad (1)$$

In (1) m is the rest mass and W is the part of the action function associated with forces arising from the motion of the mass relative to other masses with which it interacts. The line element ds is given by

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu. \quad (2)$$

For δW we assume a function given by

$$-c\delta W = \int F_\mu \delta x^\mu ds; \quad (3)$$

(3) identifies F_μ as the four-force. The Euler-Lagrange

* Supported by the National Science Foundation.

¹ A. Einstein, Sitzber. deut. Akad. Wiss. Berlin, Kl. Math. Physik u. Tech. (1916), p. 688; (1918), p. 154.

² A. S. Eddington, Proc. Roy. Soc. (London) A102, 268 (1923).

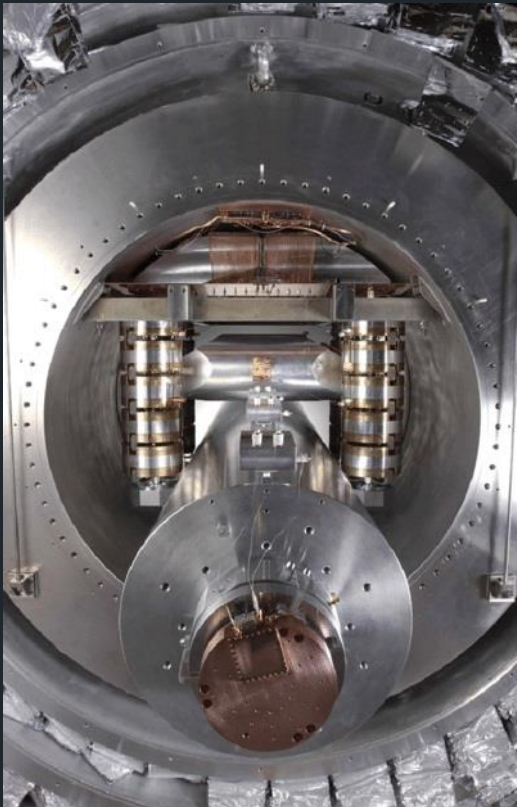
³ A number of the results discussed here were given without proof in the author's Gravity Research Foundation Prize Essays, April 1958 and April 1959, and at the Royaumont Conference on the Relativistic Theories of Gravitation, Royaumont, France, June, 1959 (unpublished).

Detekce a generování gravitačních vln
Physical Review 117, 306-313, 1.1.1960

kryogenní rezonanční detektory

80. a 90. léta

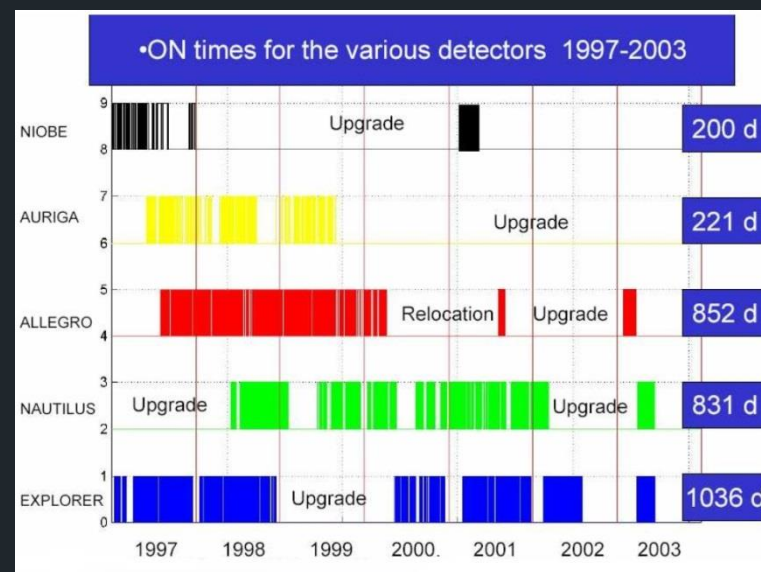
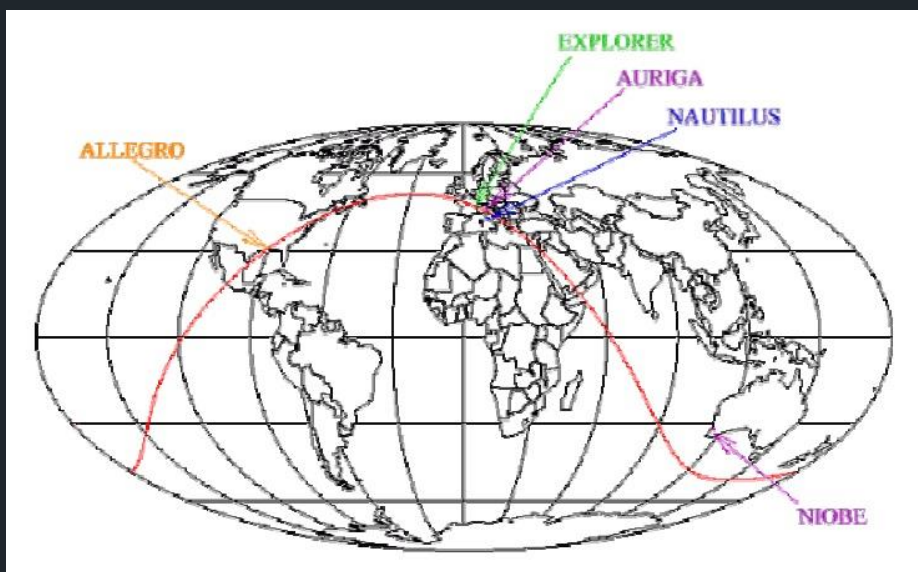
- kryogenní systémy: $T \approx 4 \text{ K}$
- ultrakryogenní: až $T \approx 0,1 \text{ K}$
- supravodivé magnetometry SQUID



- EXPLORER CERN, Ženeva
- ALLEGRO Louisiana, USA
- NAUTILUS Frascati, Řím
- AURIGA Legnaro, Padova
- NIOBE Perth, Austrálie


umístění detektorů a měření kolem 2000

detector	ALLEGRO	AURIGA	EXPLORER	NAUTILUS	NIOBE
Mode frequencies [Hz]	895, 920	912, 930	905, 921	908, 924	694, 713
Bar mass M [kg]	2296	2230	2270	2260	1500
Bar length L [m]	3.0	2.9	3.0	3.0	2.75
Bar temperature [K]	4.2	0.2	2.6	0.1	5.0
Longitude	91°10'44" W	11°56'54" E	6°12' E	12°40'21" E	115°49' E
Latitude	30°27'45" N	45°21'12" N	46°27' N	41°49'26" N	31°56' S
Azimuth	40° W	44° E	39° E	44° E	0°



Louisiana

Ženeva Padova Řím Perth




tyto úžasné
mechanické rezonanční detektory
ale neuspěly...

důvod je dnes jasný

v principu jsou sice hodně citlivé
ale pouze na určitých frekvencích

a ve vesmíru neexistují zdroje
které by na těchto frekvencích
měly dostatečně velkou amplitudu



v 90. letech na scénu vstupují
širokopásmové
interferometrické detektory

efekt gravitační vlny

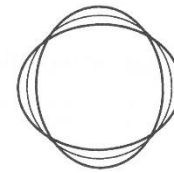
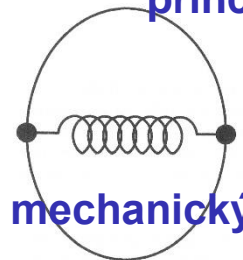
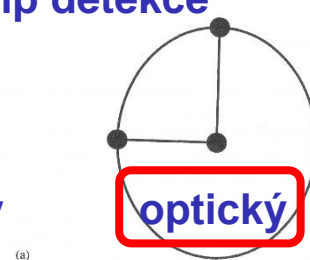


Figure 3.1. The distortion of a ring of test particles by a gravitational wave.

princip detekce

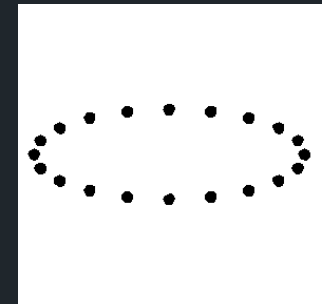
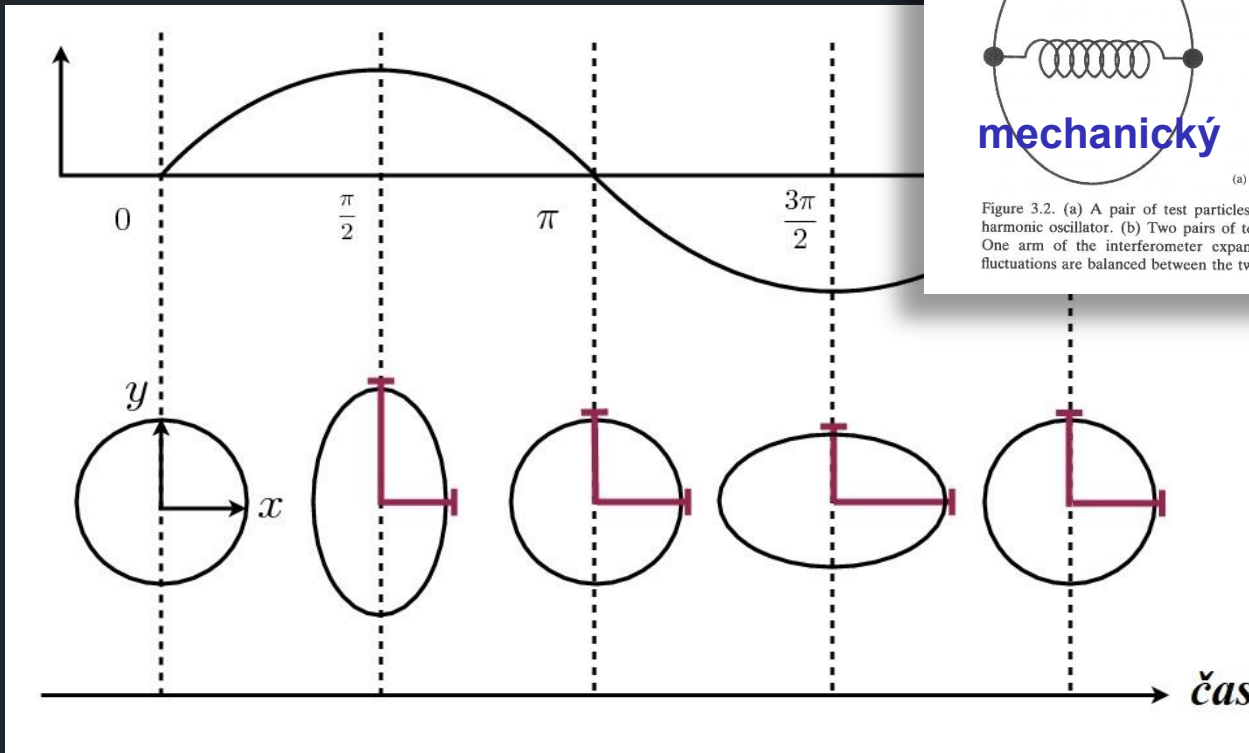


mechanický



optický

Figure 3.2. (a) A pair of test particles joined by a spring to make a mass quadrupole harmonic oscillator. (b) Two pairs of test particles connected via a laser interferometer. One arm of the interferometer expands, the other arm contracts, while laser beam fluctuations are balanced between the two arms, and cancel out.



periodické kvadrupólové deformace v příčné rovině

klíčová studie:

Weiss 1972

MIT report, rozsah 23 stran

A. Gioime

NLE QPR # 15
15 Apr. 1972

(V. GRAVITATION RESEARCH)

B. ELECTROMAGNETICALLY COUPLED BROADBAND GRAVITATIONAL ANTENNA

1. Introduction

The prediction of gravitational radiation that travels at the speed of light has been an essential part of every gravitational theory since the discovery of special relativity. In 1918, Einstein,¹ using a weak-field approximation in his very successful geometrical theory of gravity (the general theory of relativity), indicated the form that gravitational waves would take in this theory and demonstrated that systems with time-variant mass quadrupole moments would lose energy by gravitational radiation. It was evident to Einstein that since gravitational radiation is extremely weak, the most likely measurable radiation would come from astronomical sources. For many years the subject of gravitational radiation remained the province of a few dedicated theorists; however, the recent discovery of the pulsars and the pioneering and controversial experiments of Weber^{2,3} at the University of Maryland have engendered a new interest in the field.

klíčová studie:

Weiss 1972

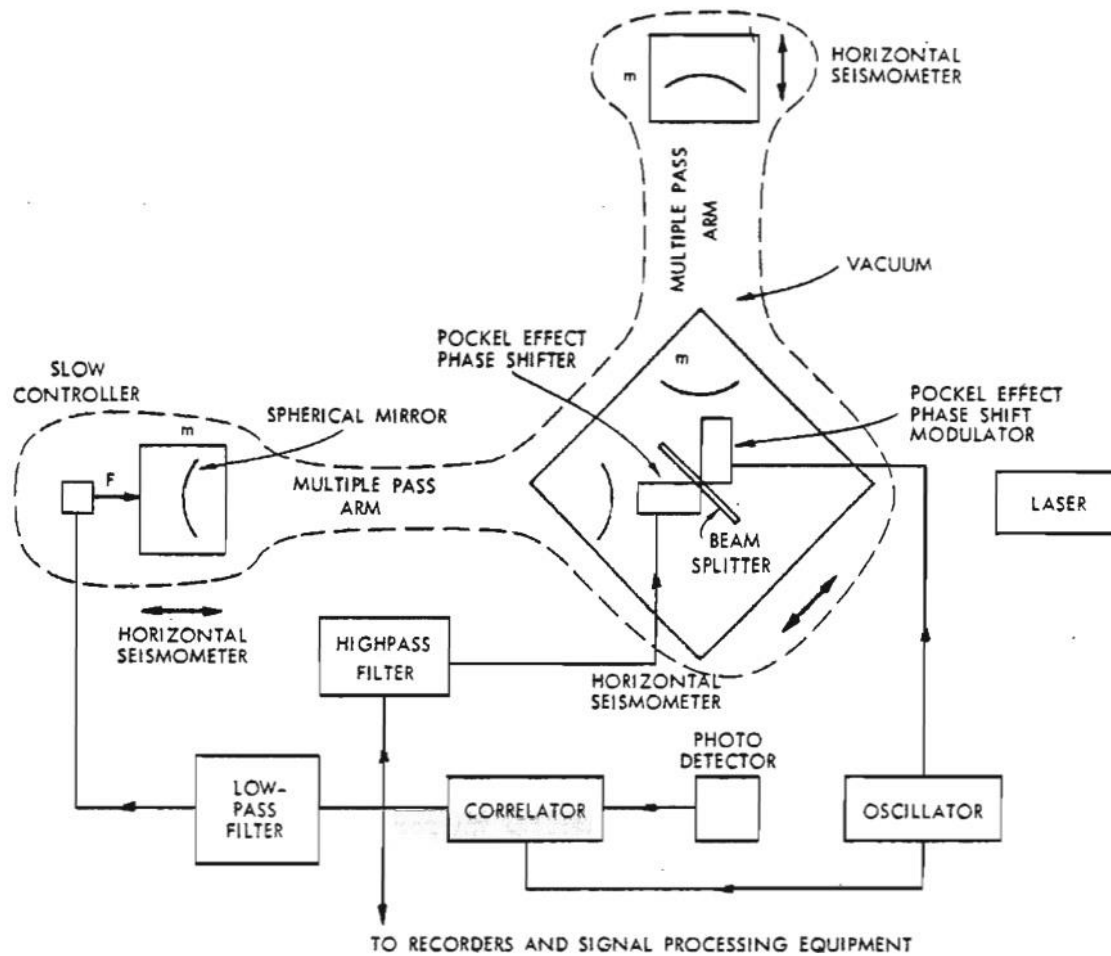
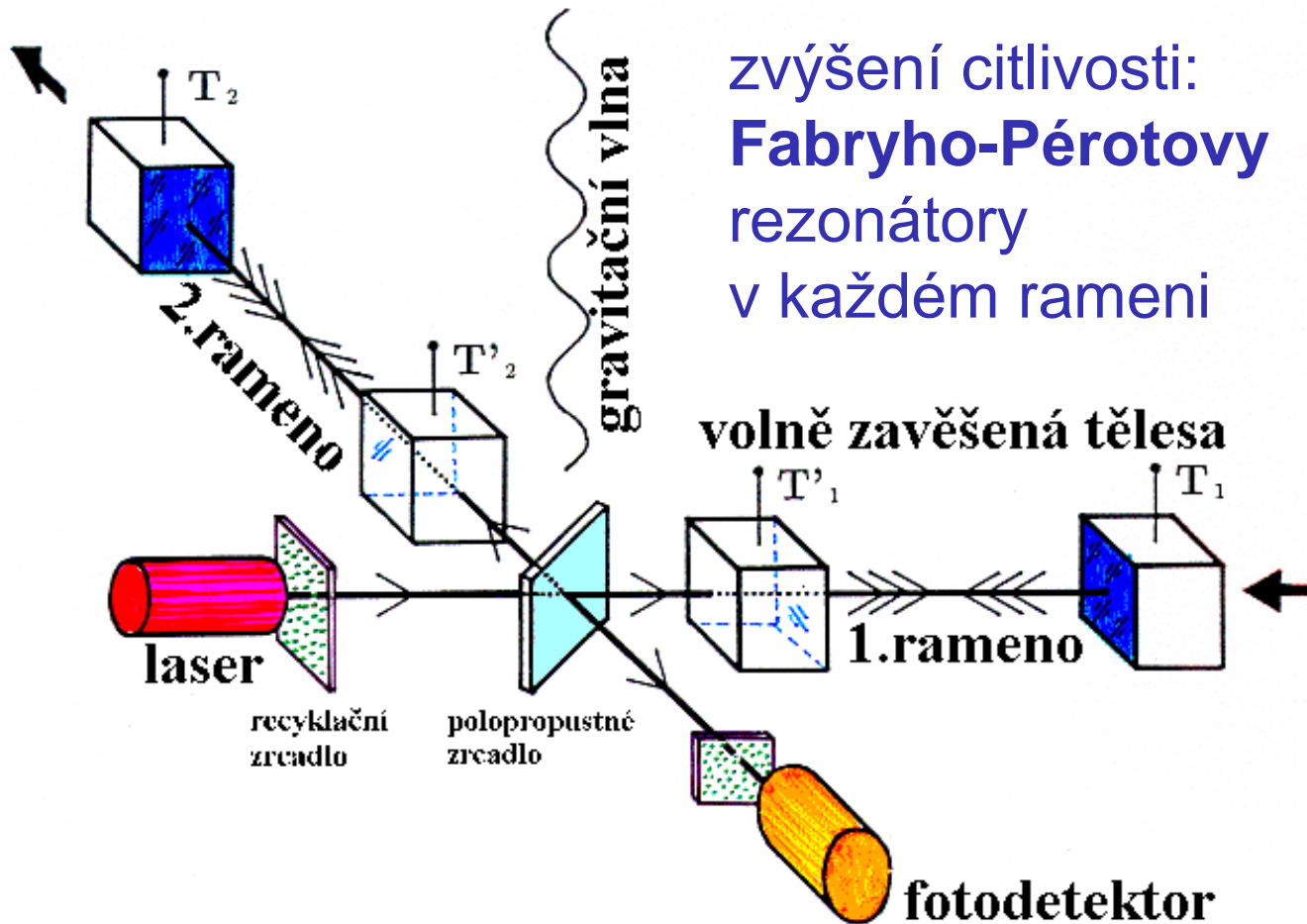


Fig. V-20. Proposed antenna.

schéma dnešního interferometru



TAMA 300

konec 90. let Tokyo, Japonsko 300 m



GEO 600

konec 90. let Sarstedt u Hannoveru, Německo 600 m



éra LIGO a Virgo 2002 – 2010

- americké LIGO: ramena 4 km Hanford a Livingston
- evropské Virgo: ramena 3 km Cascina italská Pisa



LIGO (Hanford, USA)



Virgo (Pisa, Itálie)



počátky LIGO

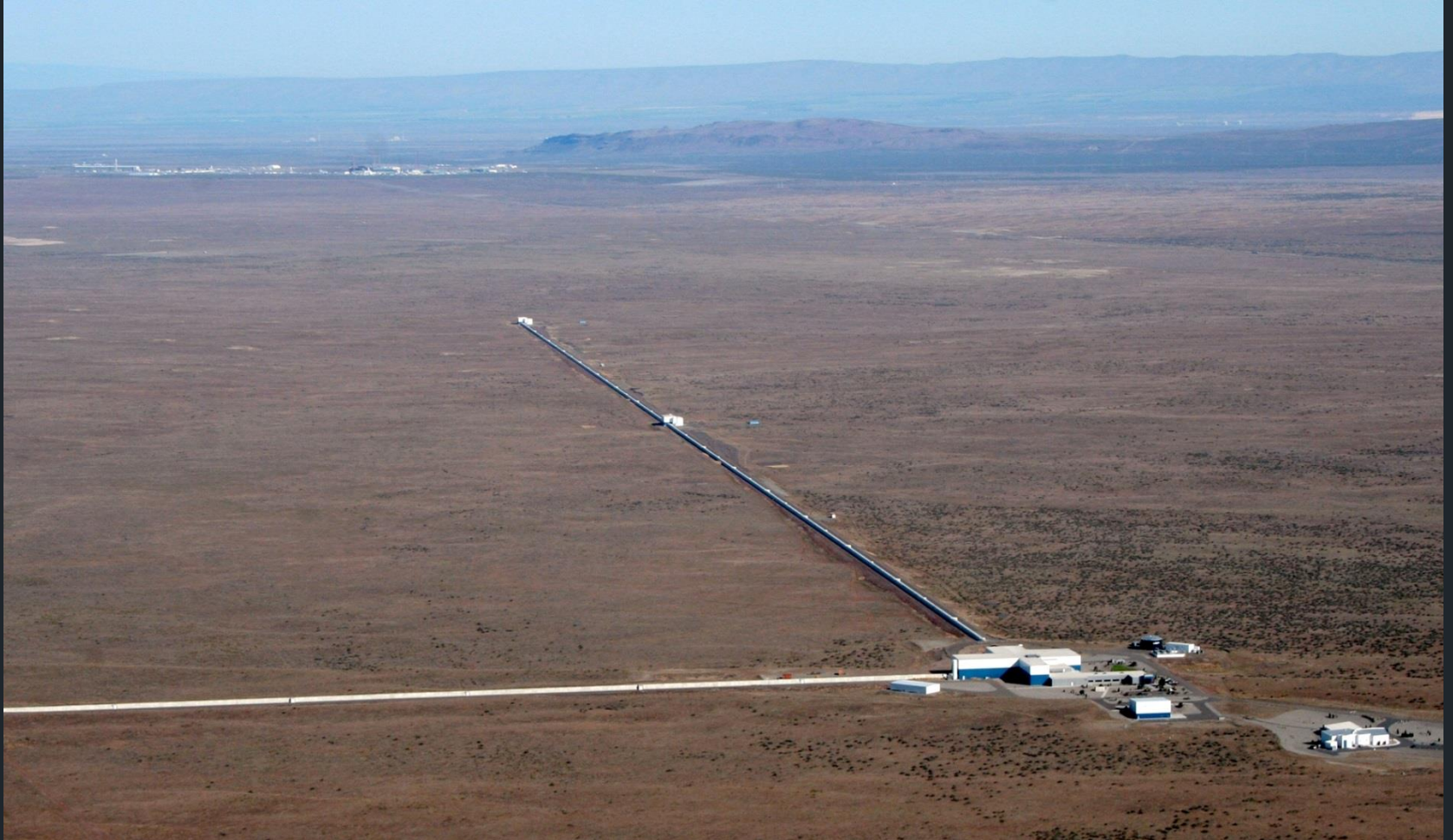
Caltech 1990



Kip Thorne Ronald Drever Robbie Vogt 1. ředitel projektu LIGO

LIGO Hanford

4 km a 2 km



Credit : Caltech/MIT/LIGO Lab

LIGO Livingston

4 km



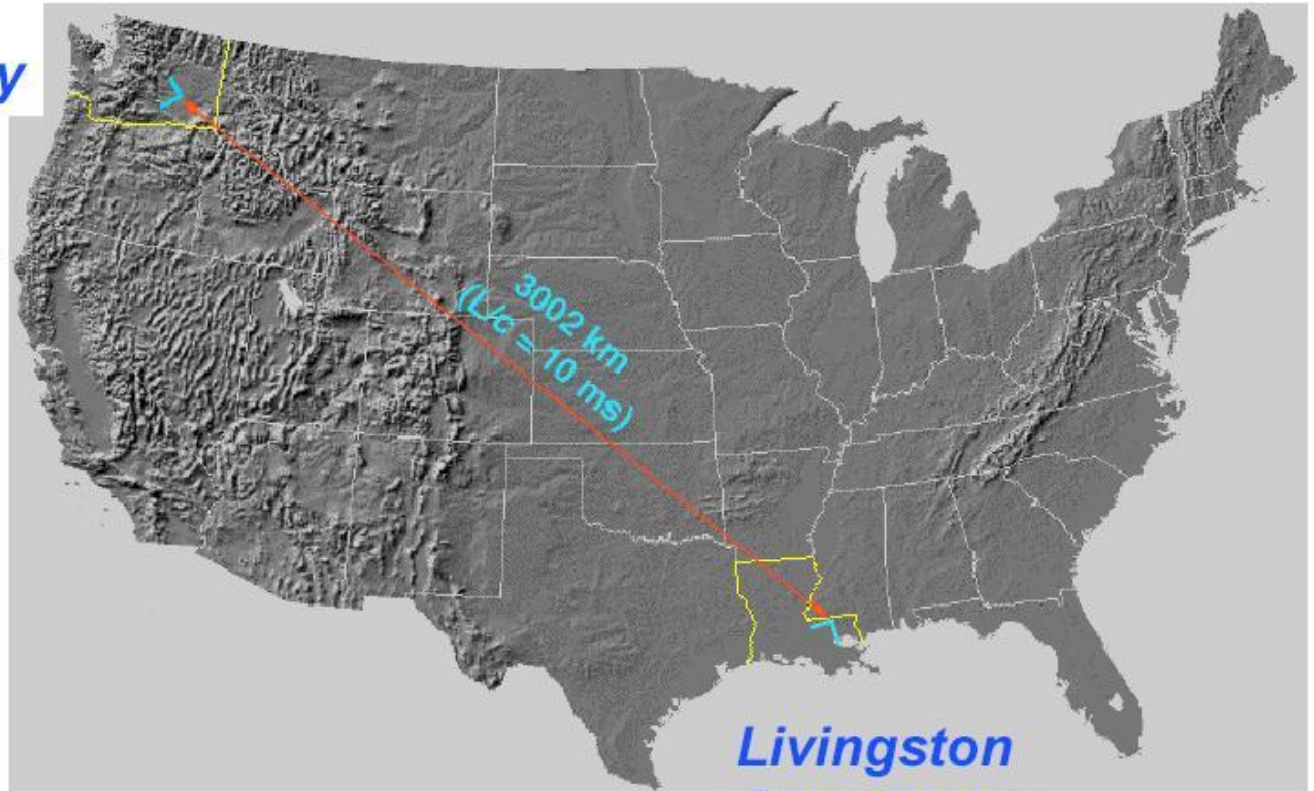
Credit : Caltech/MIT/LIGO Lab

LIGO Hanford

a

LIGO Livingston

Hanford
Observatory



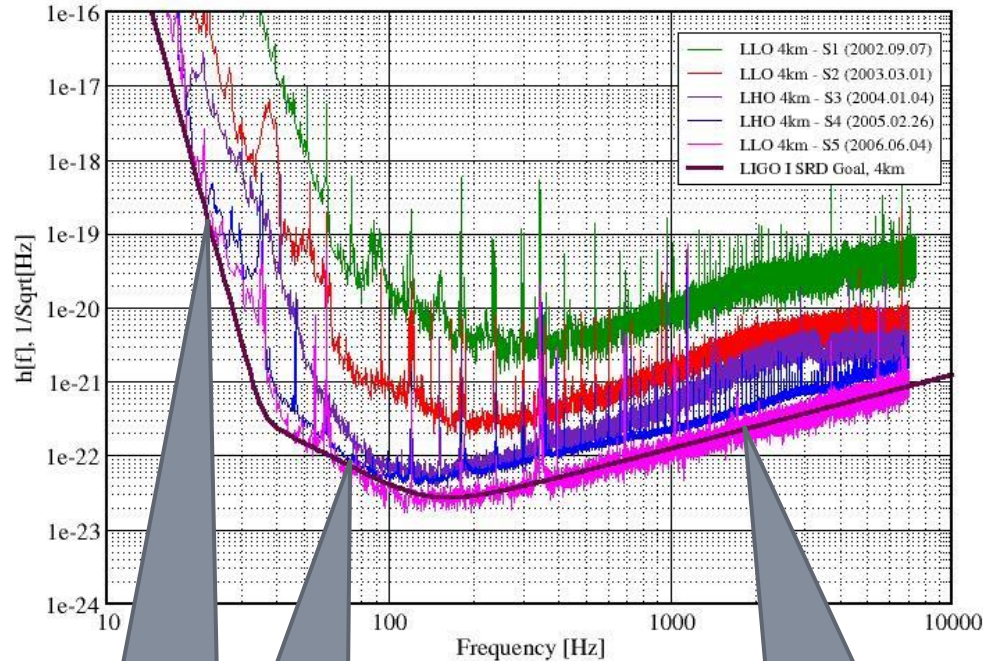
Livingston
Observatory

citlivost LIGO

2002 – 2010

Best Strain Sensivities for the LIGO Interferometers

Comparisons among S1 - S5 Runs LIGO-G060009-02-Z



seismický šum
lepší izolace

fotonový šum
více fotonů

tepelný šum
lepší materiály, teplota

vědecká měření, tzv.
Science Runs:

- S1 8/2002 – 9/2002
- S2 2/2003 – 4/2003
- S3 10/2003 – 1/2004
- S4 2/2005 – 3/2005
- S5 11/2005 – 9/2007
- S6 7/2009 – 10/2010

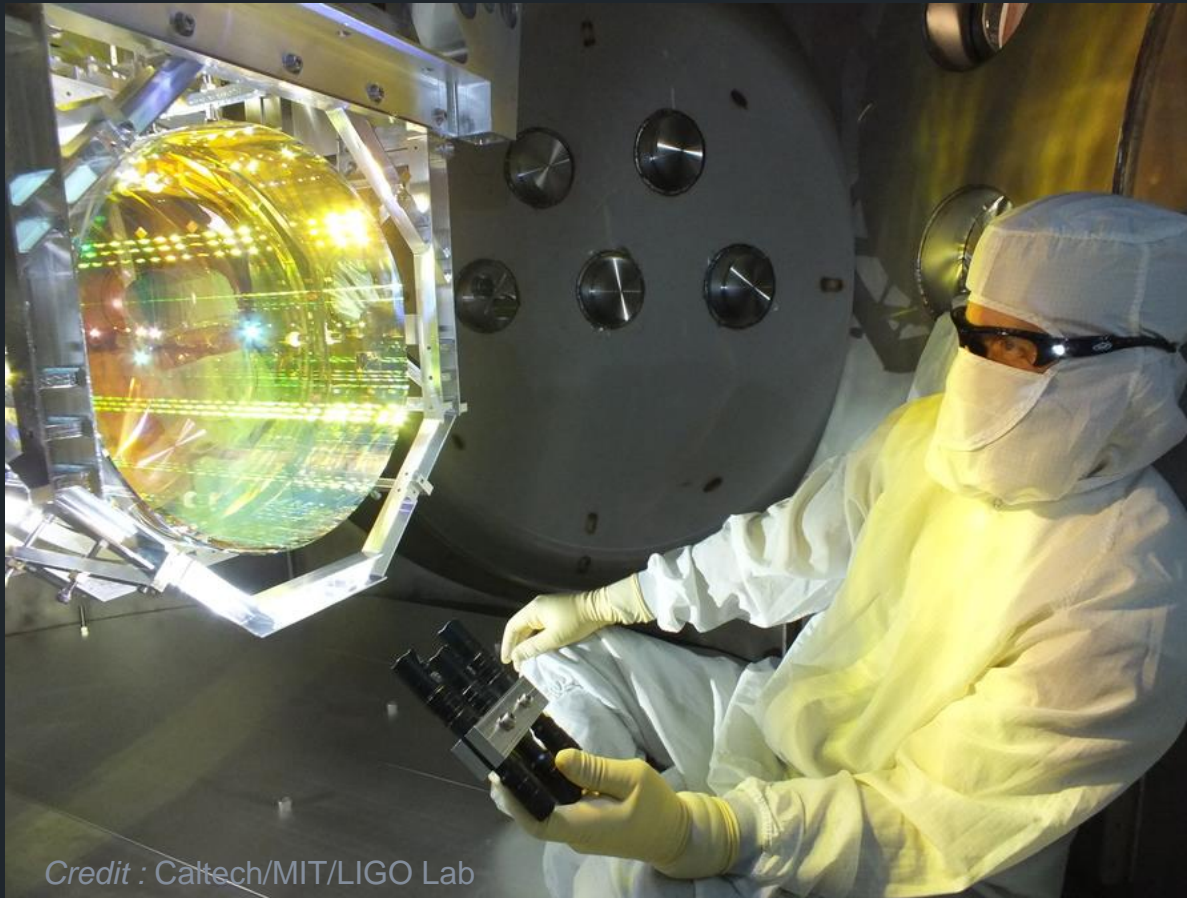
max citlivost byla až 10^{-22}

narůstající citlivost
ale žádný signál...

hlavní zdroje šumu
jejich možné řešení

Advanced LIGO: 2015

stejně dlouhá ramena 4 km, ale **řádové** vylepšení citlivosti:



Credit : Caltech/MIT/LIGO Lab

seismický šum:

- platforma s aktivní seismickou izolací
- čtyřkyvadlo

tepelný šum:

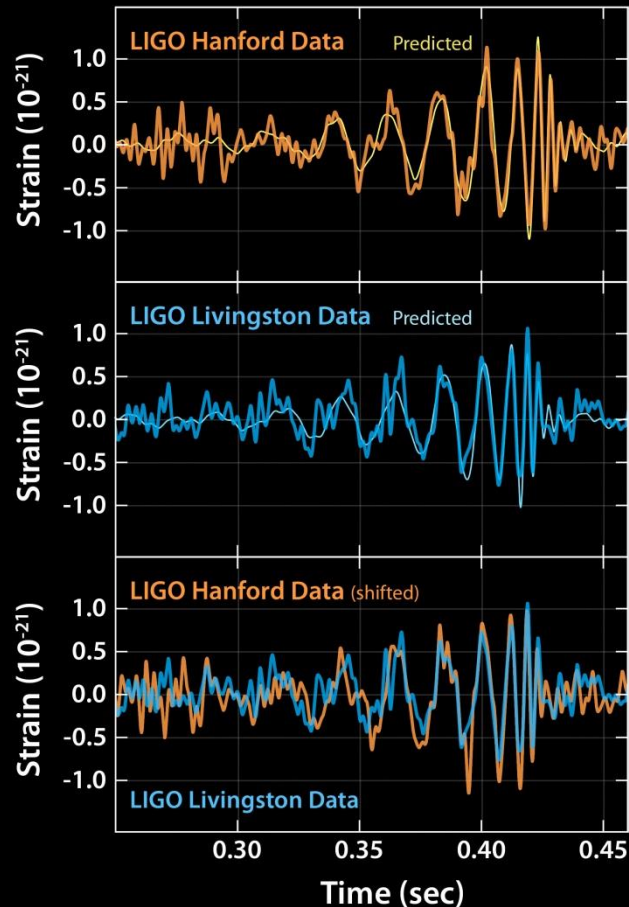
- závěsy zrcadel z křemenných vláken
- křemenná zrcadla hmotnosti 40 kg
- dielektrické vrstvy s nízkými ztrátami

ultravysoké vakuum:

- tlak v trubicích menší než $1 \mu\text{Pa}$

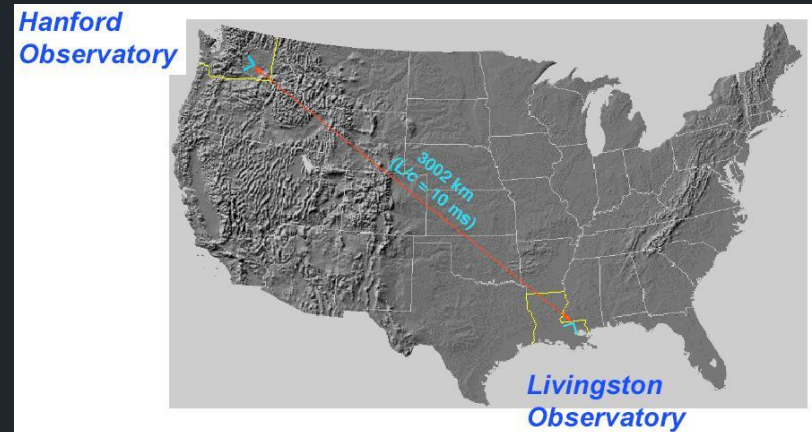
hned po spuštění v září 2019 detekce gravitační vlny !

oznámeno až 11. 2. 2016 na tiskové konferenci



signál **GW150914** zaznamenaný
v pondělí 14. září 2015 v 09:50:45 UTC
oběma **observatořemi LIGO**

- identický signál
- trval 150 ms
- zpožděn o 7 ms : **L** a pak **H**



zdrojem byla srážka velkých černých děr

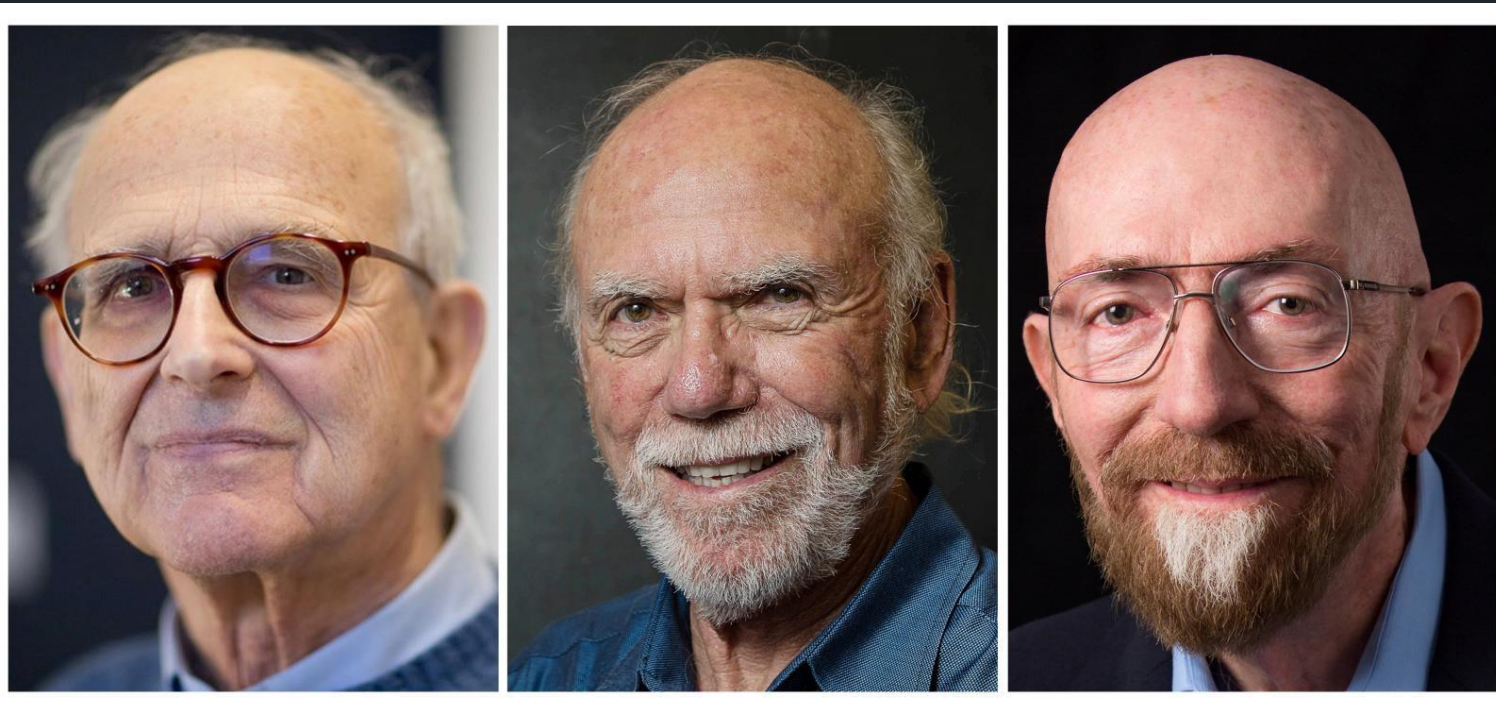
závěrečné 4 oběhy (= 8 cyklů vln) spirálového přibližování černých děr a jejich splnutí
2 objevy: první přímá detekce gravitačních vln a první pozorované splnutí černých děr



výkon $200 M_{\odot} c^2/s$: 10x více než svítily všechny hvězdy ve vesmíru !!!

Nobelova cena za fyziku 2017

hlavní představitelé LIGO/VIRGO Collaboration



Rainer Weiss

Barry C. Barish

Kip S. Thorne

„za rozhodující příspěvky k detektoru LIGO a pozorování gravitačních vln“

Kip Thorne v Praze

květen 2019

tři krásné přednášky na Karlově univerzitě
videozáznamy jsou na stránkách
[https://www.mff.cuni.cz/cs/verejnost/aktuality/
na-matfyzu-prednasei-nobelista-thorne](https://www.mff.cuni.cz/cs/verejnost/aktuality/na-matfyzu-prednasei-nobelista-thorne)



fotografie: Jiří Podolský





co dalšího se stalo
od první detekce gravitační vln
14. září 2015

výsledky 12. 9. 2015 - 19. 1. 2016

první běh O1 Advanced LIGO 49 dní



první událost
v září 2015

nejasný kandidát
v říjnu 2015

druhá událost
v prosinci 2015

potvrzen ve finálním katalogu detekcí GWTC-1 (1.12. 2018)

výsledky 30. 11. 2016 - 25. 8. 2017

druhý běh O2 Advanced LIGO 117 dní

citlivost detektorů byla během roku 2016 vylepšena asi o 15% oproti O1

objevené vlny:

shrnutí prvních gravitačních vln z černých děr

1. vlna GW150914

hmotnosti černých děr

$$m_1 = 36 M_{\odot} \pm 5$$

$$m_2 = 29 M_{\odot} \pm 4$$

hmotnost výsledné díry

$$M = 62 M_{\odot} \pm 4$$

její rotace

$$a = 0,67 \pm 0,05$$

pozorováno 8 cyklů

max amplituda

$$h_{\max} = 10^{-21}$$

vzdálenost

$$1,3 \text{ miliardy svět. let} \\ (z = 0,1)$$

2. vlna GW151226

hmotnosti černých děr

$$m_1 = 14 M_{\odot} \pm 6$$

$$m_2 = 8 M_{\odot} \pm 2$$

hmotnost výsledné díry

$$M = 21 M_{\odot} \pm 4$$

její rotace

$$a = 0,74 \pm 0,06$$

pozorováno 55 cyklů

max amplituda

$$h_{\max} = 3 \times 10^{-22}$$

vzdálenost

$$1,4 \text{ miliardy svět. let} \\ (z = 0,1)$$

3. vlna GW170104

hmotnosti černých děr

$$m_1 = 31 M_{\odot} \pm 7$$

$$m_2 = 20 M_{\odot} \pm 5$$

hmotnost výsledné díry

$$M = 49 M_{\odot} \pm 5$$

její rotace

$$a = 0,64 \pm 0,15$$

pozorováno 7 cyklů

max amplituda

$$h_{\max} = 7 \times 10^{-22}$$

vzdálenost

$$2,9 \text{ miliardy svět. let} \\ (z = 0,2)$$

4. vlna GW170814

hmotnosti černých děr

$$m_1 = 31 M_{\odot} \pm 5$$

$$m_2 = 25 M_{\odot} \pm 4$$

hmotnost výsledné díry

$$M = 53 M_{\odot} \pm 3$$

její rotace

$$a = 0,70 \pm 0,06$$

pozorováno 6 cyklů

max amplituda

$$h_{\max} = 6 \times 10^{-22}$$

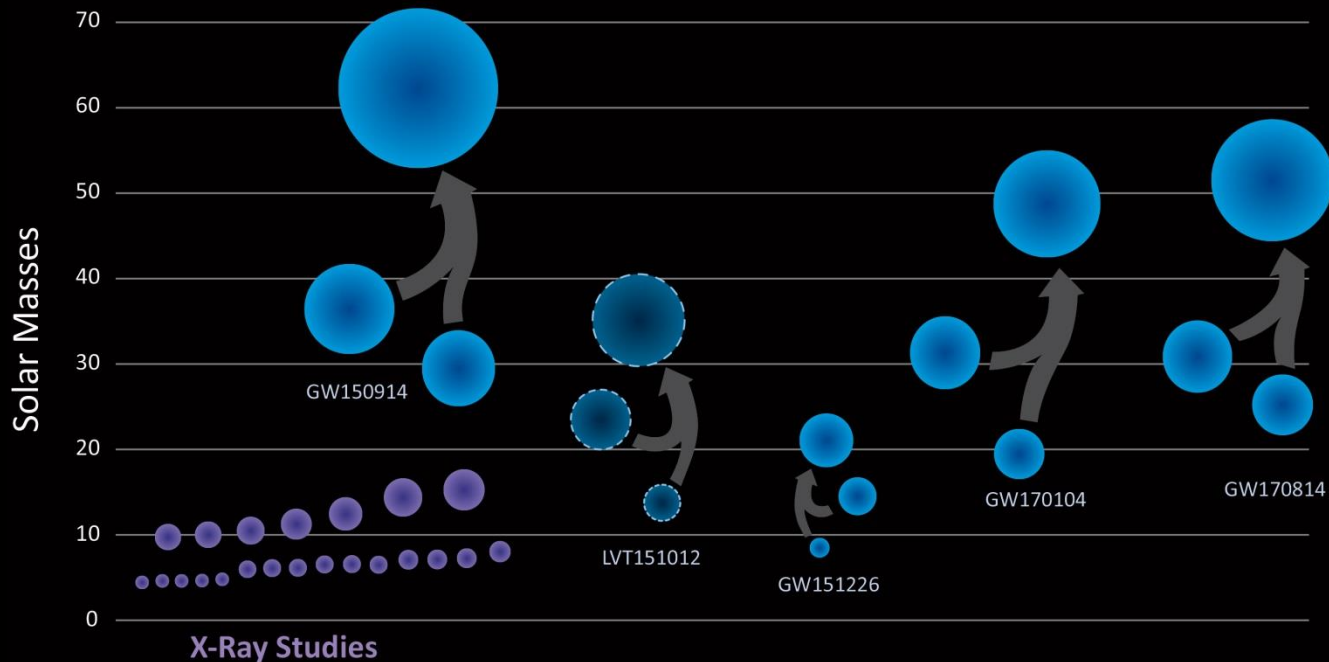
vzdálenost

$$1,8 \text{ miliardy svět. let} \\ (z = 0,1)$$

shrnutí prvních objevů černých děr

běh O1 a O2 Advanced LIGO plus Virgo

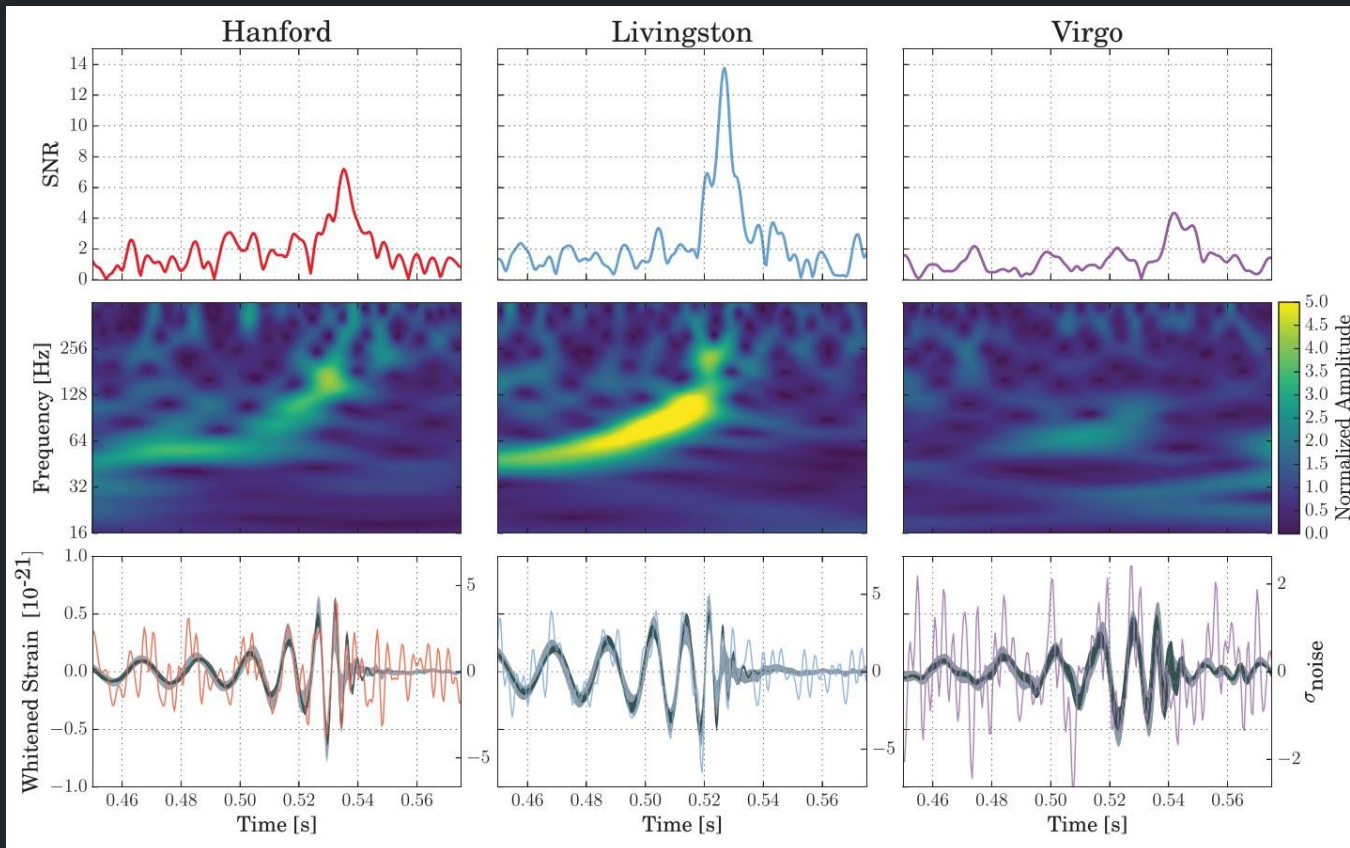
hmotnosti známých černých děr



LIGO/VIRGO

již společná detekce LIGO a Virgo

poprvé detekovány gravitační vlny pomocí tří detektorů

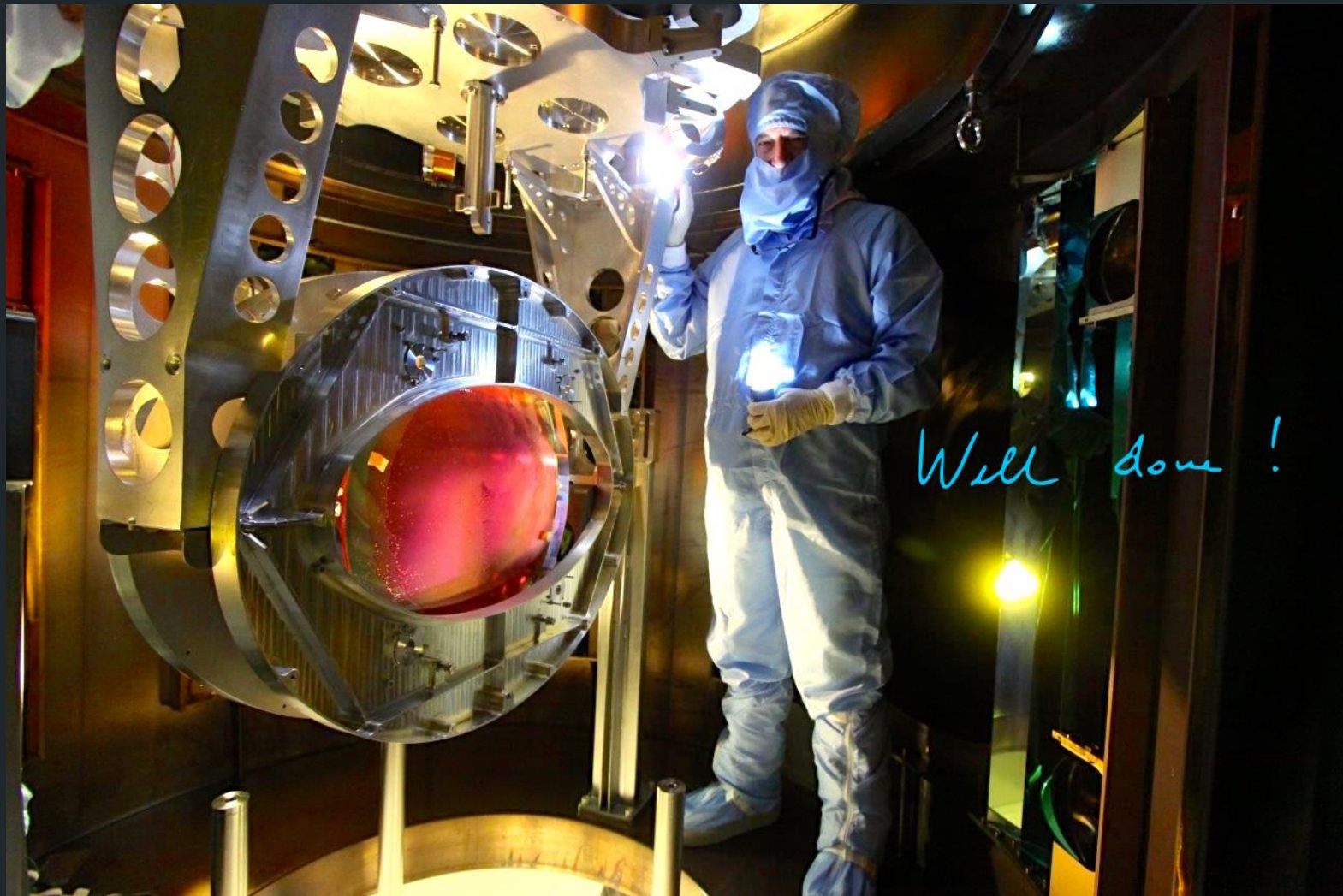


Advanced Virgo spuštěn 1. 8. 2017



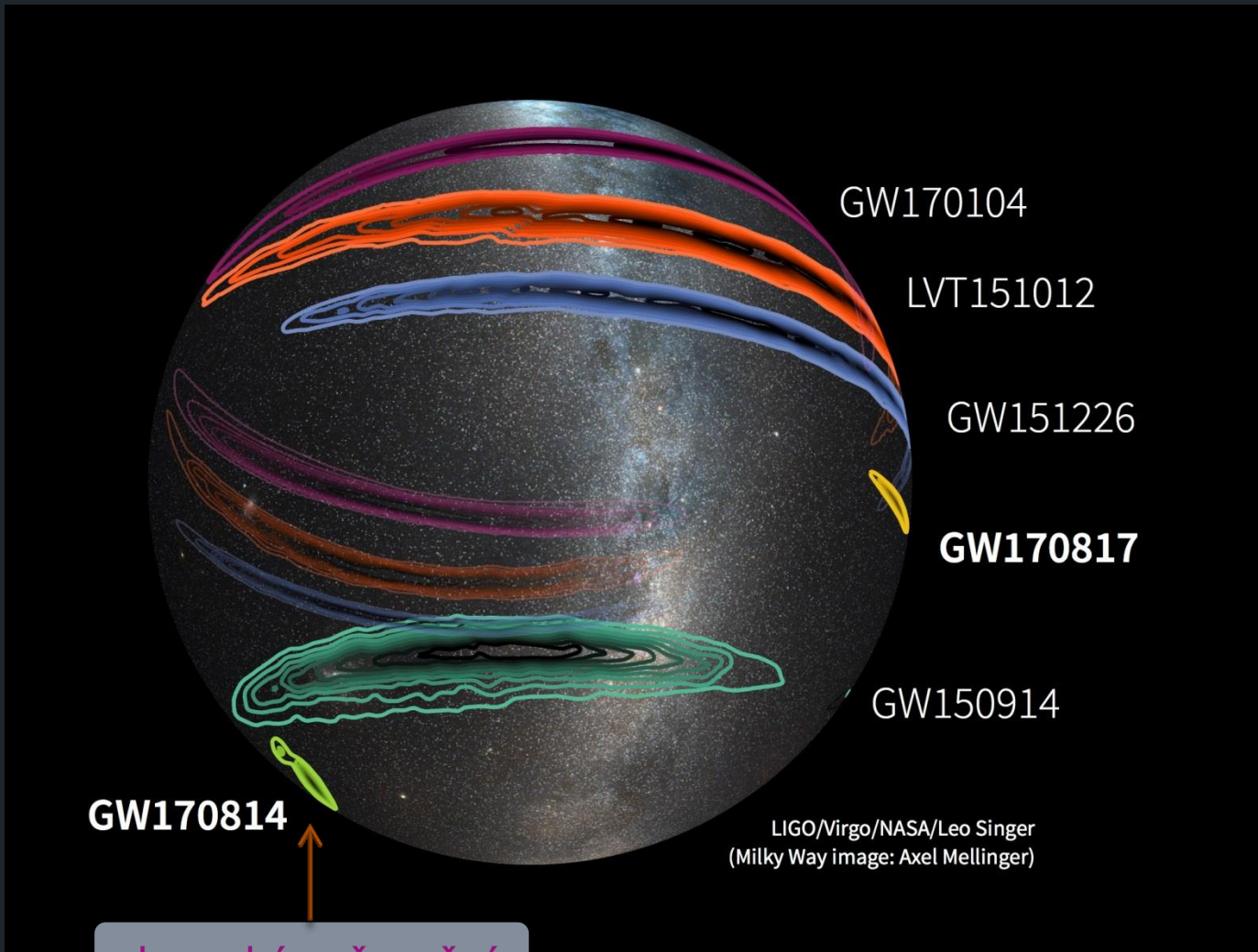
Credit: Virgo Collaboration/Marco Meniero

dělič svazku



Well done !

lepší lokalizace zdrojů gravitačních vln



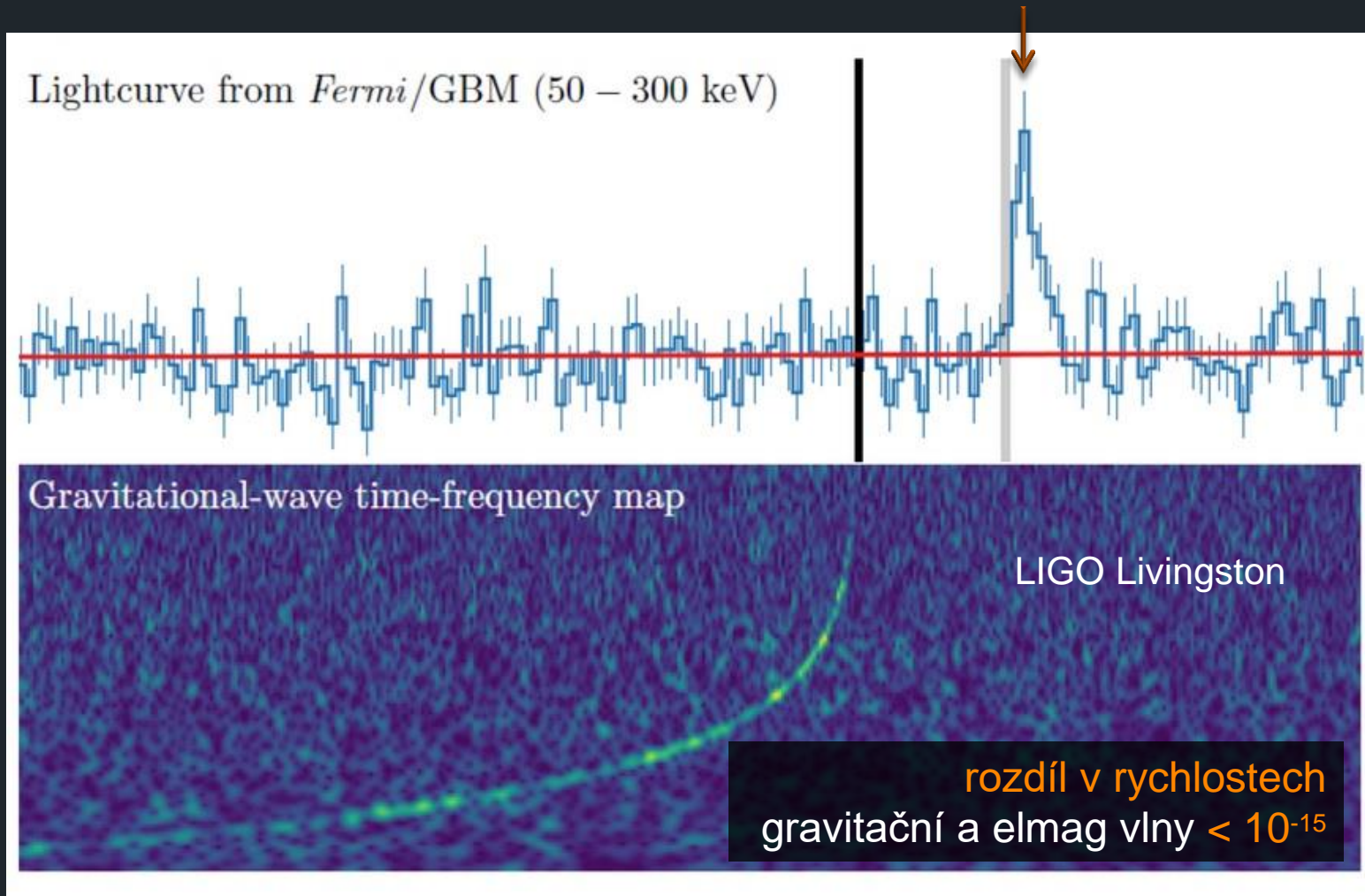
obrovské zpřesnění

úžasný objev LIGO a Virgo 17. 8. 2017

- detekce gravitační vlny **GW170817**
ze srážky dvou neutronových hvězd !
- navíc koincidence s gama zábleskem **SGRB170817A** (Fermi, INTEGRAL)
první elmag identifikace zdroje !
- v galaxii **NGC 4993**
Hydra, 130 mil světelných let
- následně 70 dalších observatoří
gama, X, UV, opt, IR, radio



gravitační vlna +1,7s gama záblesk



gravitační signál typu čirp trval více než minutu

srážka a splynutí neutronových hvězd



Splynutí neutronových hvězd: umělecké znázornění

Zdroj: ESA

5. vlna **GW170817**

hmotnosti hvězd

$$m_1 = 1,4 - 1,6 M_{\odot}$$

$$m_2 = 1,2 - 1,4 M_{\odot}$$

celková hmotnost

$$M = 2,74 M_{\odot} \pm 0,02$$

pozorováno **3000 cyklů**

SNR **32**

lokalizace **28 deg²**

maximální amplituda

$$h_{\max} = 6 \times 10^{-22}$$

vyzářená energie

$$> 0,03 M_{\odot} c^2$$

vzdálenost

130 milionů svět. let

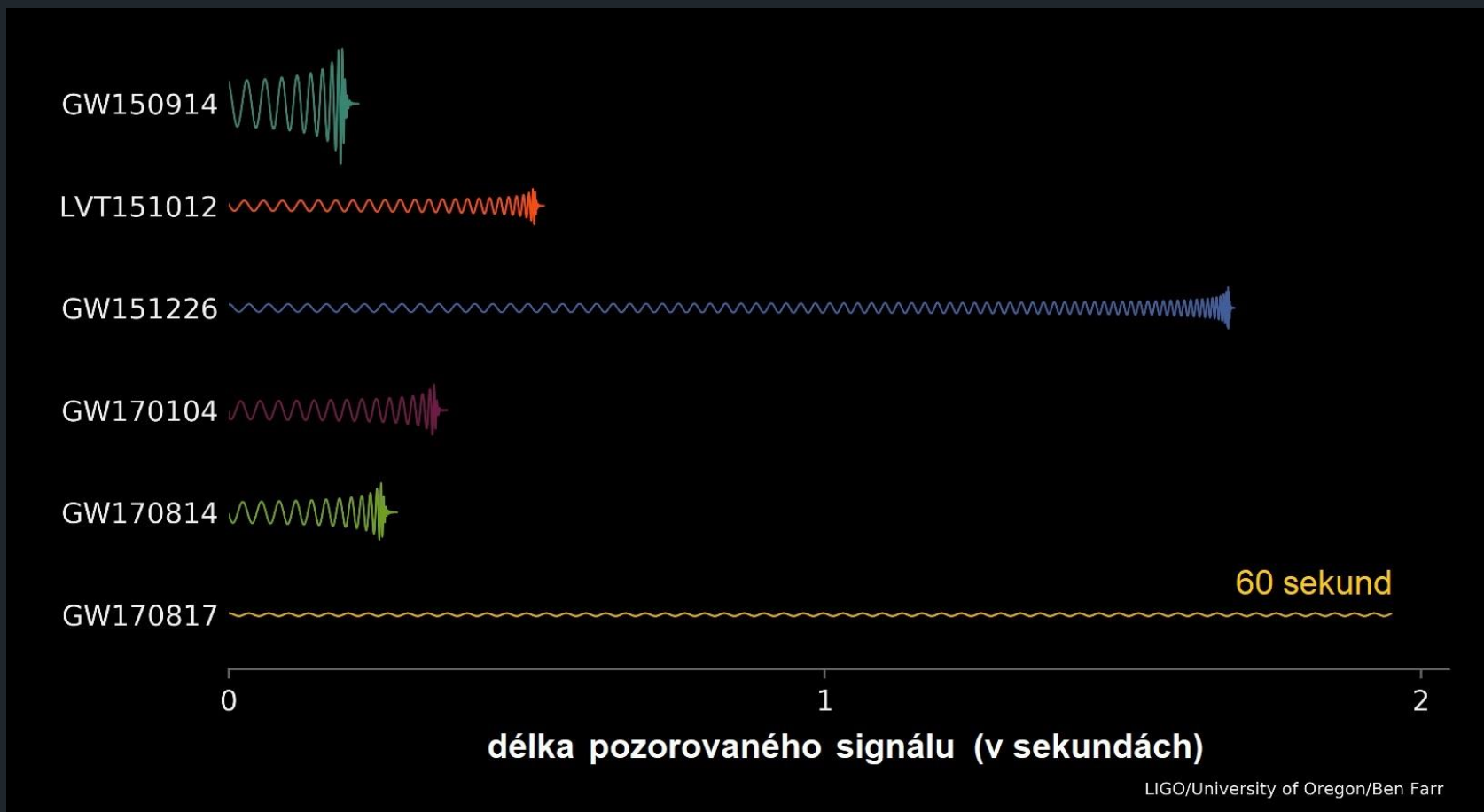
produkce těžkých prvků *r*-procesem

rychlý záchyt neutronů: tak vzniká většina těžkých prvků ve vesmíru



shrnutí vln oznámených do prosince 2018

běh O1 a O2 Advanced LIGO plus Virgo



kompletní výsledky O1+O2

katalog detekcí GWTC-1
Gravitational-Wave Transient Catalog 1

zveřejněný 1.12. 2018
(krátkodobé, dočasné signály)

10 srážek černých děr
1 srážka neutronových hvězd

Event	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	M/M_\odot	χ_{eff}	M_f/M_\odot	a_f	$E_{\text{rad}}/(M_\odot c^2)$	$\ell_{\text{peak}}/(\text{erg s}^{-1})$	d_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/\text{deg}^2$
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$28.6^{+1.6}_{-1.5}$	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	$63.1^{+3.3}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$3.6^{+0.4}_{-0.4} \times 10^{56}$	430^{+150}_{-170}	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	179
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$15.2^{+2.0}_{-1.1}$	$0.04^{+0.28}_{-0.19}$	$35.7^{+9.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	$3.2^{+0.8}_{-1.7} \times 10^{56}$	1060^{+540}_{-480}	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1555
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$0.18^{+0.20}_{-0.12}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$3.4^{+0.7}_{-1.7} \times 10^{56}$	440^{+180}_{-190}	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$21.5^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.04^{+0.17}_{-0.20}$	$49.1^{+5.2}_{-3.9}$	$0.66^{+0.08}_{-0.10}$	$2.2^{+0.5}_{-0.5}$	$3.3^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	960^{+430}_{-410}	$0.19^{+0.07}_{-0.08}$	924
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$7.9^{+0.2}_{-0.2}$	$0.03^{+0.19}_{-0.07}$	$17.8^{+3.2}_{-0.7}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	$0.9^{+0.0}_{-0.1}$	$3.5^{+0.4}_{-1.3} \times 10^{56}$	320^{+120}_{-110}	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	396
GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$35.7^{+6.5}_{-4.7}$	$0.36^{+0.21}_{-0.25}$	$80.3^{+14.6}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	$4.8^{+0.7}_{-0.7}$	$4.2^{+0.9}_{-1.5} \times 10^{56}$	2750^{+1350}_{-1320}	$0.48^{+0.19}_{-0.20}$	1033
GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$25.0^{+2.1}_{-1.6}$	$0.07^{+0.16}_{-0.16}$	$56.4^{+5.2}_{-3.7}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$3.5^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	990^{+320}_{-380}	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	340
GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$24.2^{+1.4}_{-1.1}$	$0.07^{+0.12}_{-0.11}$	$53.4^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$3.7^{+0.4}_{-0.5} \times 10^{56}$	580^{+160}_{-210}	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87
GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$1.186^{+0.001}_{-0.001}$	$0.00^{+0.02}_{-0.01}$	≤ 2.8	≤ 0.89	≥ 0.04	$\geq 0.1 \times 10^{56}$	40^{+10}_{-10}	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$26.7^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.09^{+0.18}_{-0.21}$	$59.8^{+4.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$3.4^{+0.5}_{-0.7} \times 10^{56}$	1020^{+430}_{-360}	$0.20^{+0.07}_{-0.07}$	39
GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$29.3^{+4.2}_{-3.2}$	$0.08^{+0.20}_{-0.22}$	$65.6^{+9.4}_{-6.6}$	$0.71^{+0.08}_{-0.10}$	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	$3.6^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	1850^{+840}_{-840}	$0.34^{+0.13}_{-0.14}$	1651



signál

hmotnosti

výsledná hmotnost a spin

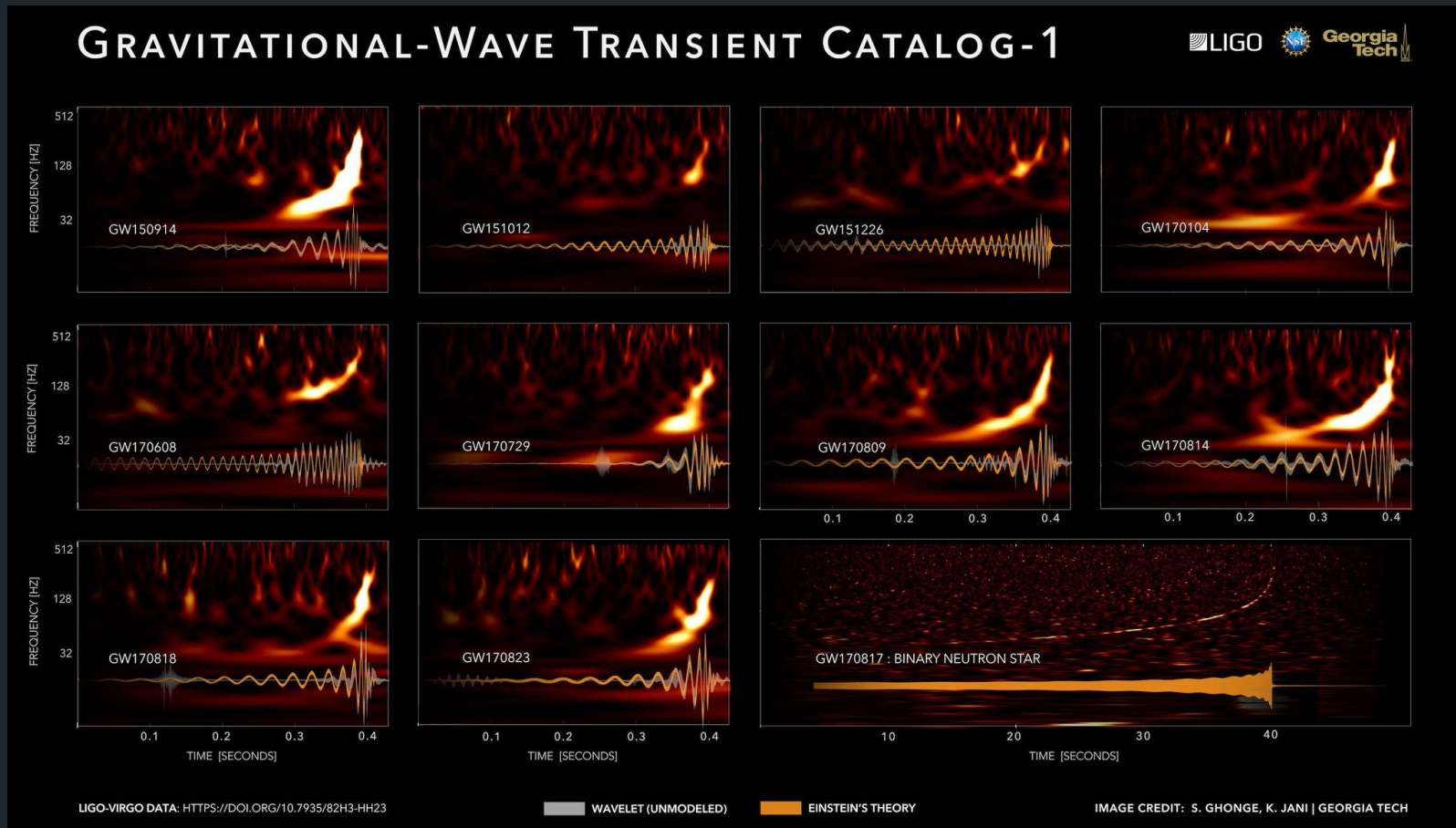
energie

vzdálenost

lokalizace

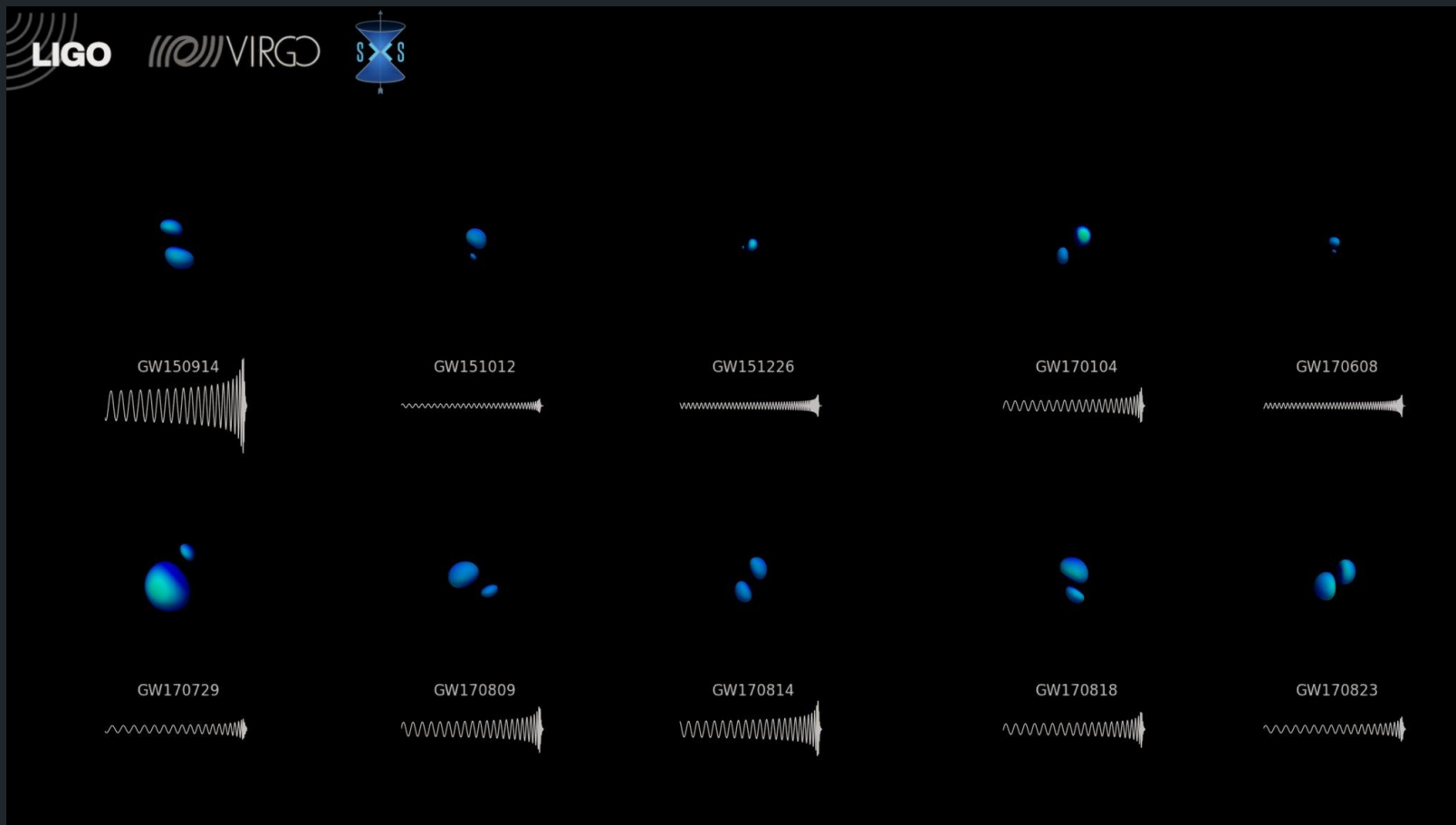
katalog detekcí GWTC-1 prosinec 2018

všech 11 potvrzených signálů:



katalog detekcí GWTC-1 prosinec 2018

velikosti černých děr a příslušné signály:



animace <https://www.youtube.com/watch?v=gmmD72cFOU4&feature=youtu.be>

právě nyní probíhá třetí běh měření O3

začal 1. 4. 2019 a potrvá přes rok

každý může průběžně sledovat výsledky díky stránce

GraceDB

Gravitational-Wave Candidate Event Database

<https://gracedb.ligo.org/>

GraceDB | x +

https://gracedb.ligo.org/superevents/p

GWTC-1

Most Visited info Google gmail Přebkladač Free Dict Relativita Author Hub JiPo ORCID etc GIS GraceDB my papers

GraceDB — Gravitational-Wave Candidate Event Database

HOME PUBLIC ALERTS SEARCH LATEST DOCUMENTATION LOGIN

LIGO/Virgo Public Alerts

Detection candidates: 23

SORT: EVENT ID (A-Z)

Event ID	Possible Source (Probability)	UTC	GCN	Location	FAR
S190816i	NSBH (83%), Terrestrial (17%)	Aug. 16, 2019 13:04:31 UTC	GCN Circulars Notices VOE		1 per 2.2067 years
S190814bv	NSBH (>99%)	Aug. 14, 2019 21:10:39 UTC	GCN Circulars Notices VOE		1 per 1.559e+25 years
S190808ae	Terrestrial (57%), BNS (43%)	Aug. 8, 2019 22:21:21 UTC	GCN Circulars Notices VOE		1.0622 per year
S190728q	BBH (95%), MassGap (5%)	July 28, 2019 06:45:10 UTC	GCN Circulars Notices VOE		1 per 1.2541e+15 years
S190727h	BBH (92%), Terrestrial (5%), MassGap (3%)	July 27, 2019 06:03:33 UTC	GCN Circulars Notices VOE		1 per 229.92 years

GraceDB
19.8.2019

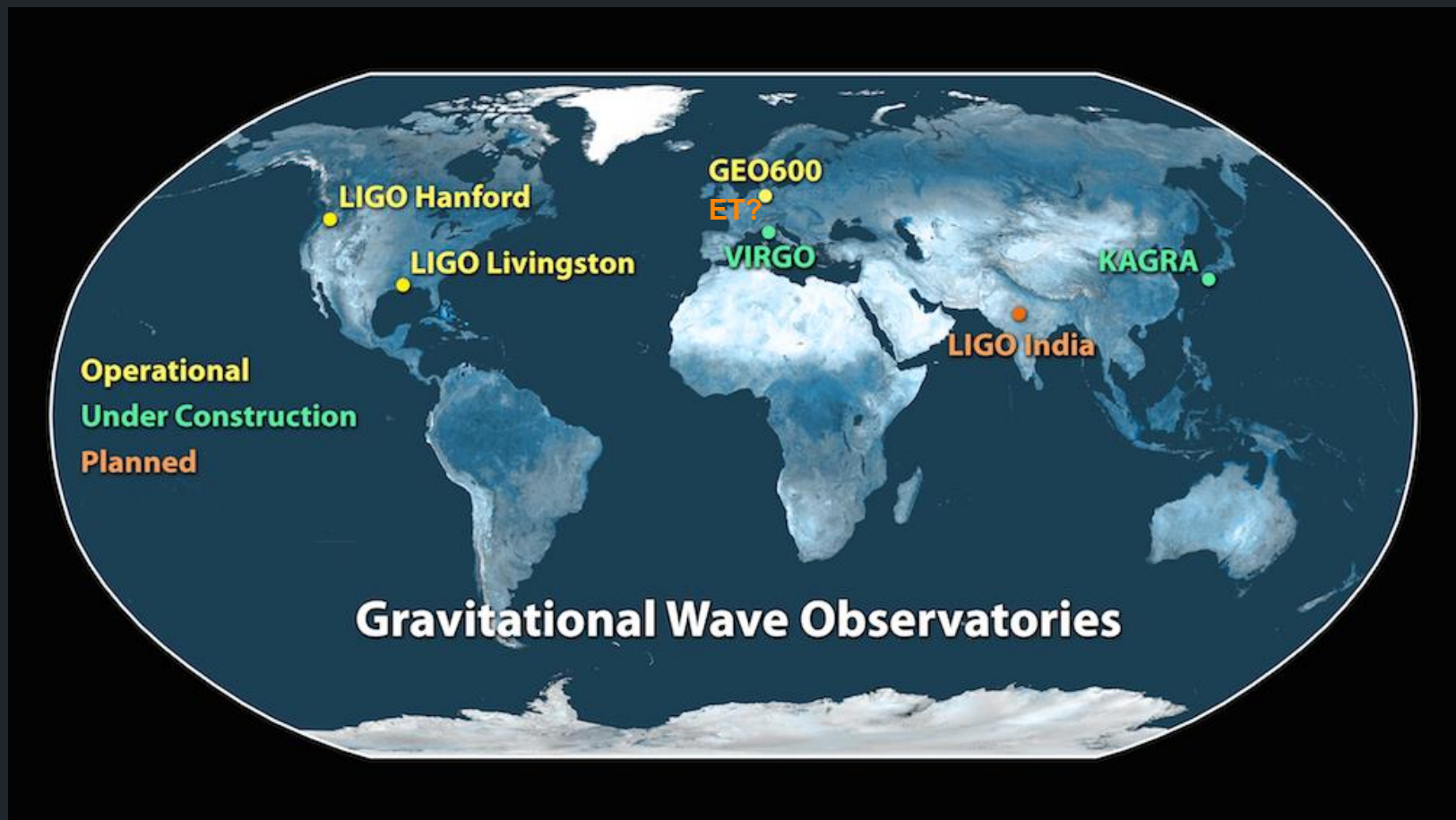
23 kandidátů

NS-BH poprvé!

BH-BH

atd.

dnešní a budované detektory



plány 3G (3. generace) detektorů velké podzemní kryogenní interferometry

1. krok: 2.5G detektor v Japonsku

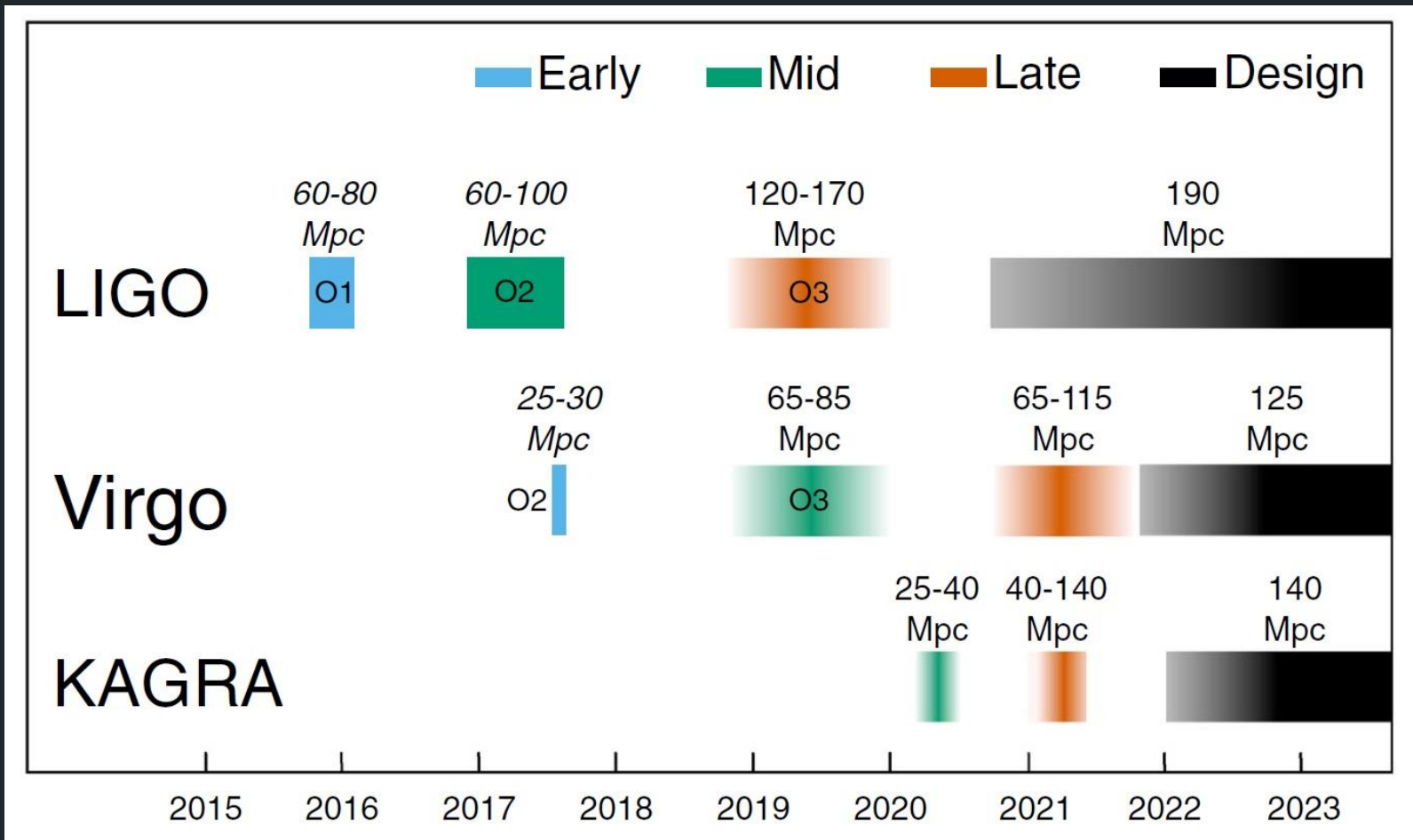
KAGRA (KAmioka GRAVitational wave detector) 3 km, citlivost 10^{-23}



japonský detektor KAGRA



plány pozorování LIGO, Virgo, KAGRA

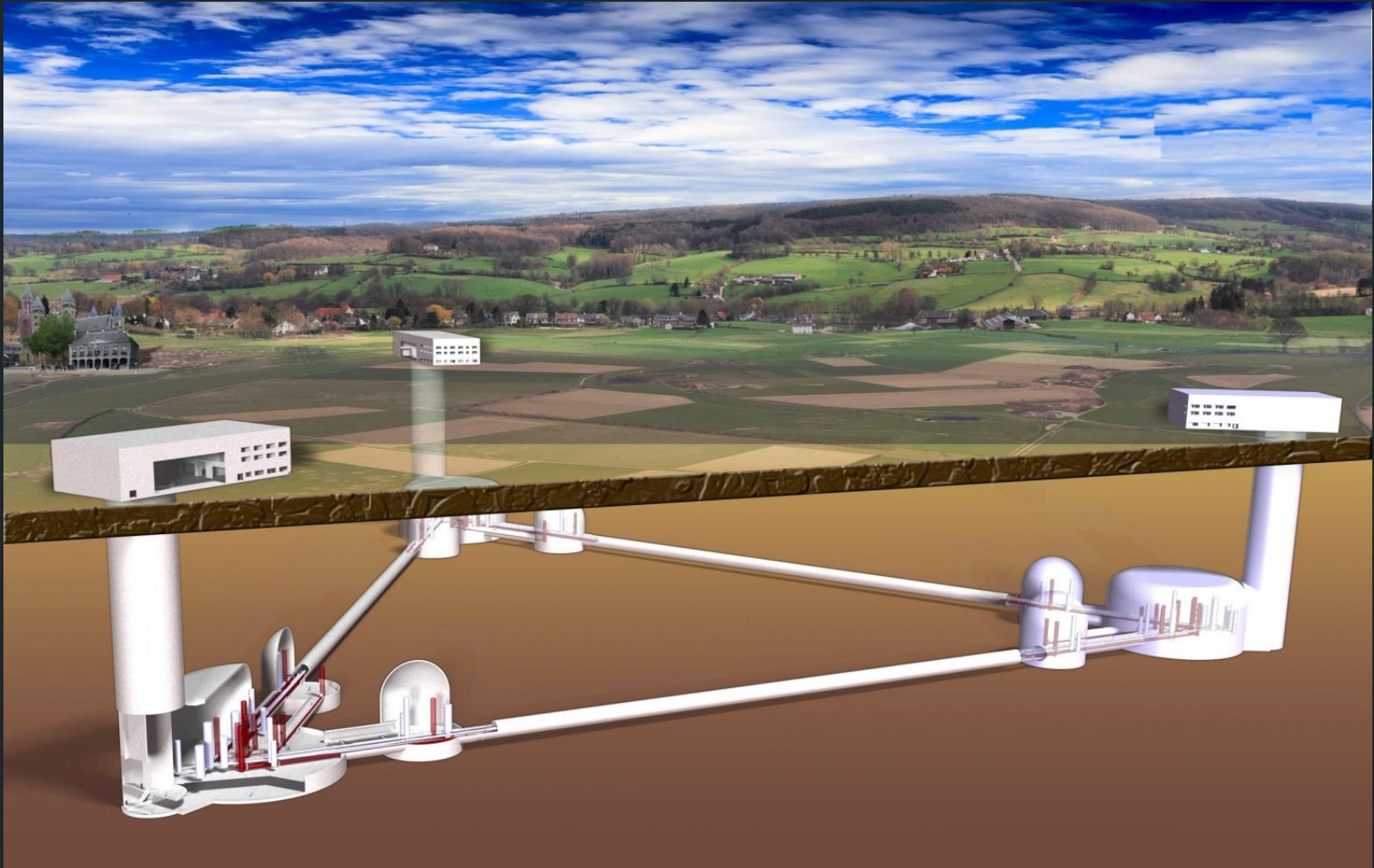


3G plány třetí generace detektorů

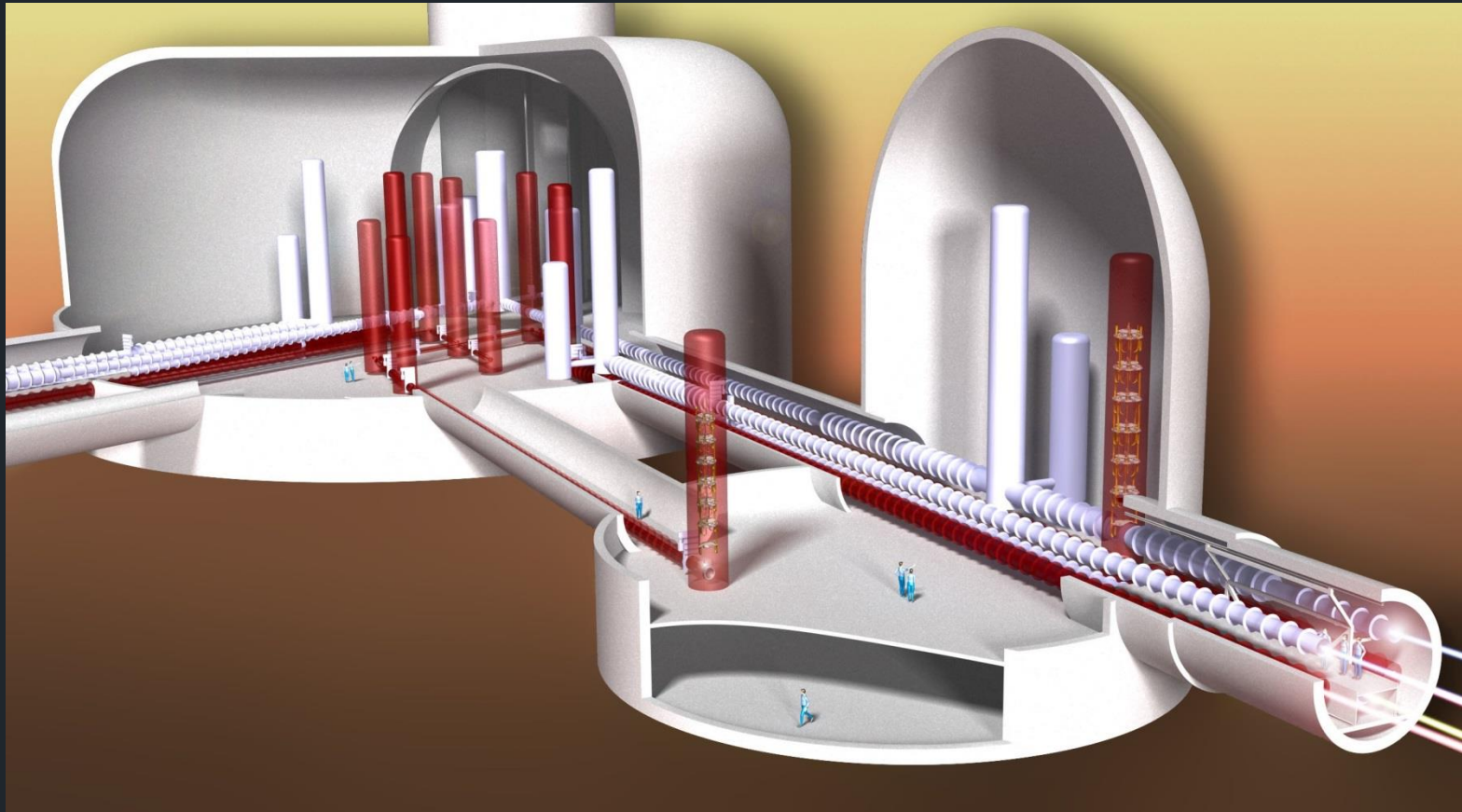
desetikilometrové podzemní kryogenní interferometry

- ET evropský projekt Einstein Telescope
velikost 10 km, citlivost 10^{-24}
- CE americký projekt Cosmic Explorer
velikost 40 km, citlivost 10^{-24}

evropský projekt ET



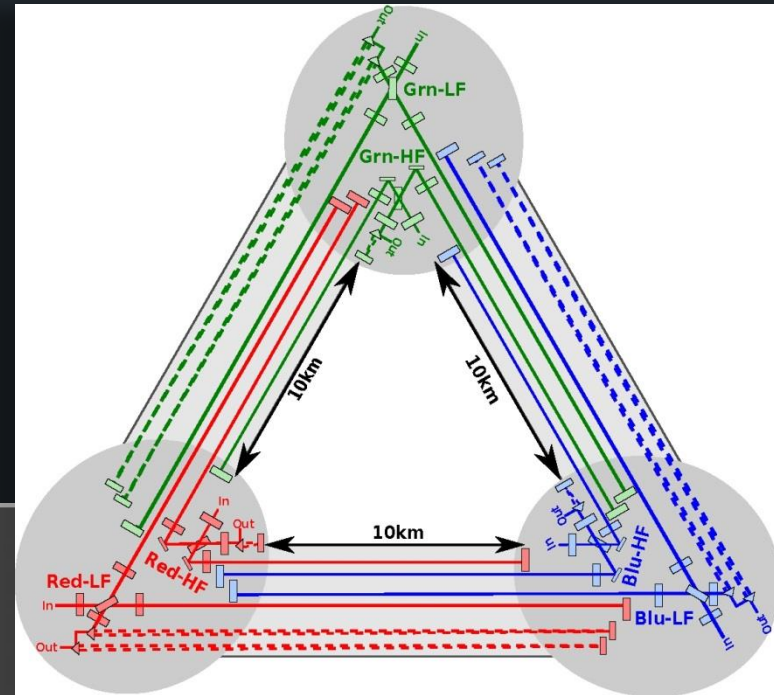
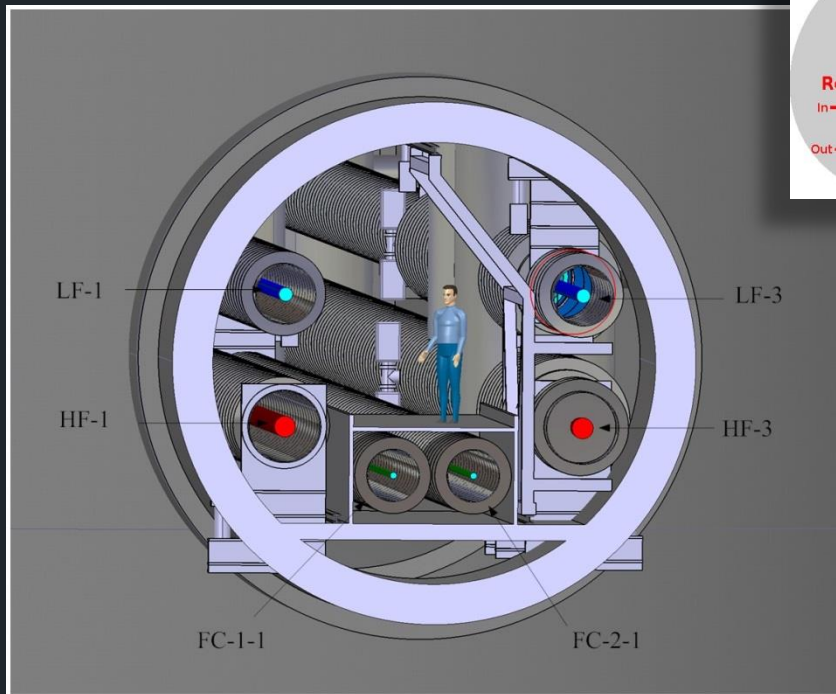
evropský projekt ET snad po roce 2025



evropský projekt ET

trojúhelníková konfigurace

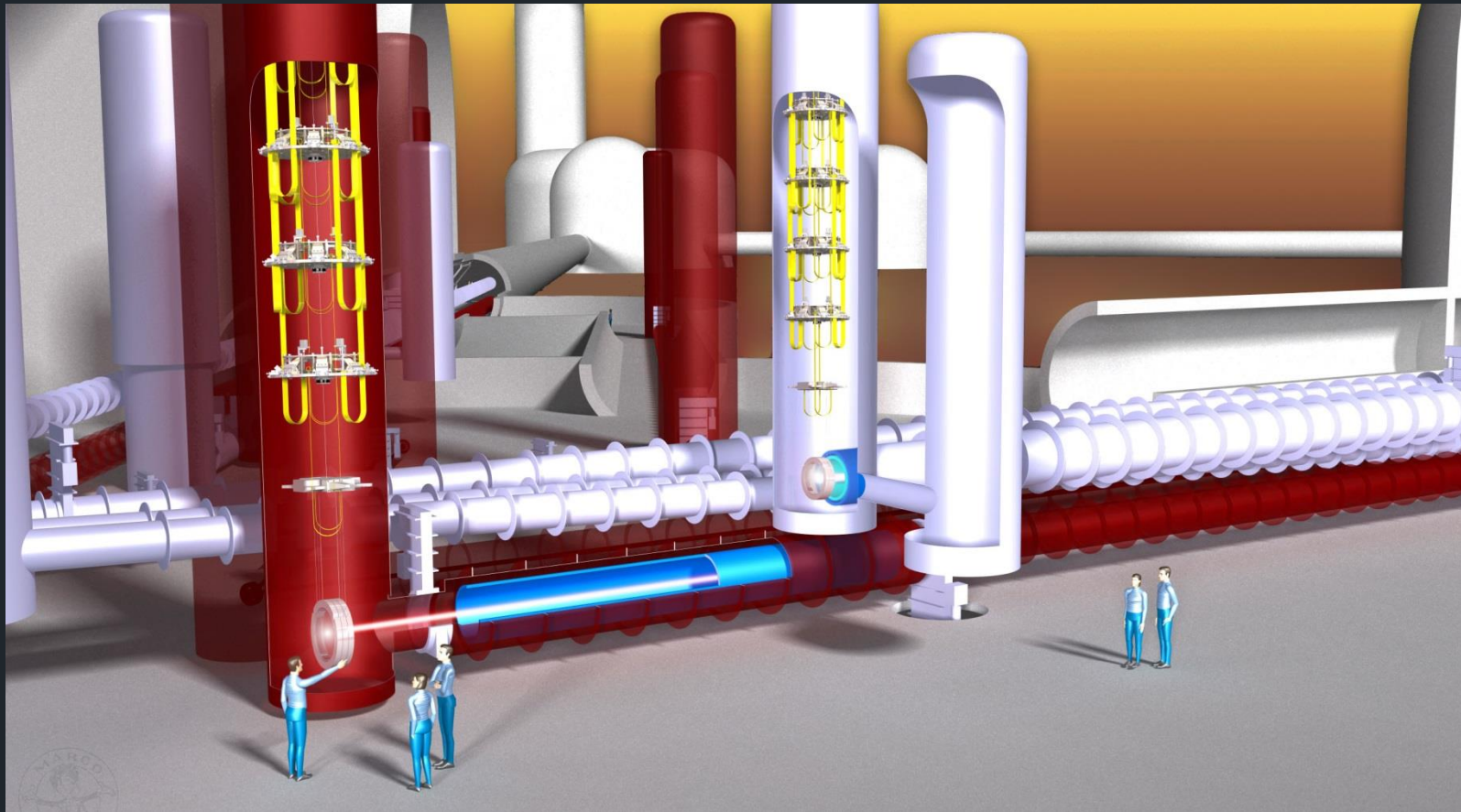
3 interferometrické soustavy



LF laser nižší frekvence
HF laser vyšší frekvence

optimalizovaná detekce
gravitačních vln
nižších a vyšších frekvencí

ET superatenuátor 17 m

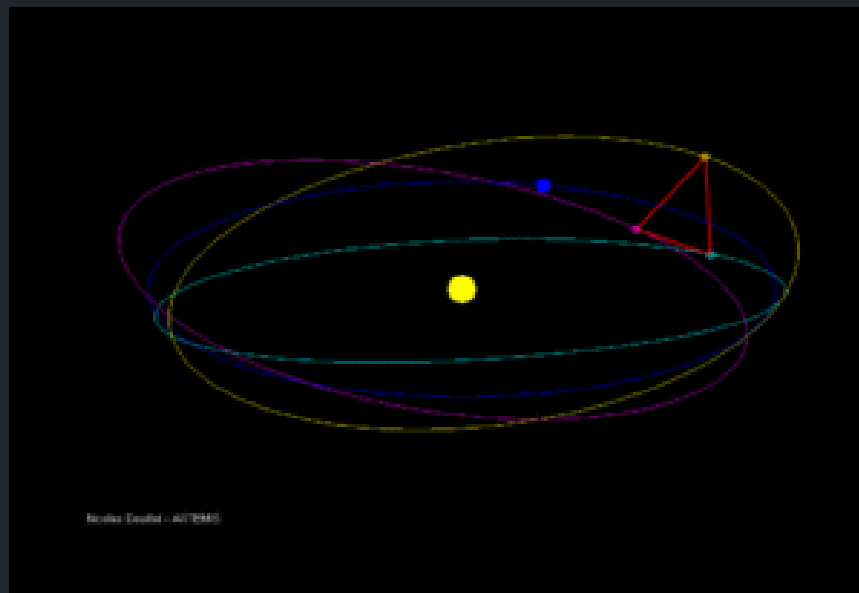
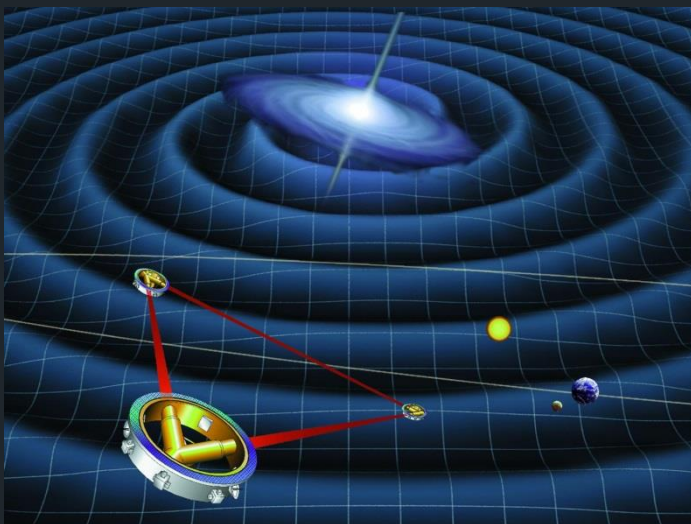


chystáme se ale také otevřít
zcela nové gravitační okno:
v kosmu

spousta jiných zdrojů gravitačních vln
na mnohem menších frekvencích

LISA v kosmu

Laser Interferometer Space Antena



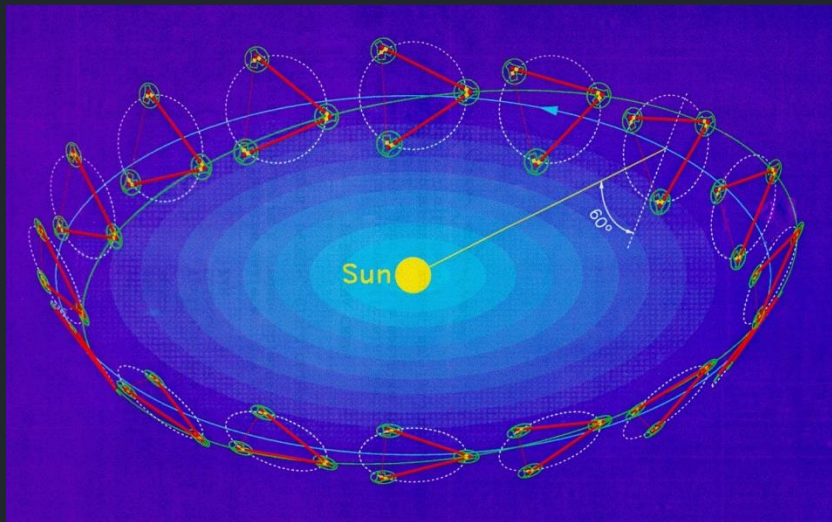
- obří interferometry ESA
- 3 družice
- ve vrcholech trojúhelníka
- strany 5 milionů km
- oběh kolem Slunce 1 AU
- za Zemí 20°
- sklon roviny 60°



- bezsilová trajektorie
- testovací krychle 46 mm
- 2 kg, $\frac{1}{4}$ Pt + $\frac{3}{4}$ Au
- korekční trysky o tahu μN
- lasery 2W
- teleskopy \varnothing 40 cm
- 1,5 miliardy EUR

extrémně nízké frekvence gravitačních vln 0,1 mHz – 0,1 Hz

LISA bude evropská



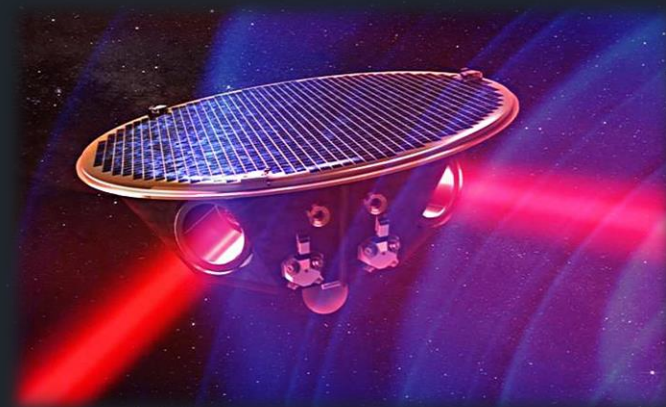
v roce 2010 **NASA**
od projektu **odstoupila**

musel se přepracovat
a to v režii **ESA**

naštěstí přežil!

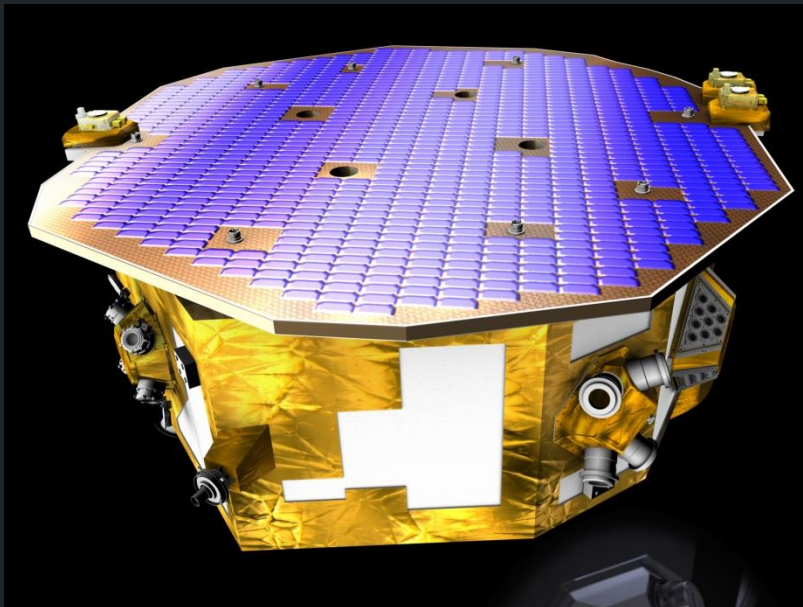
již schváleno jako **mise L3**
programu **ESA Cosmic Vision**

realizace v roce **2035**

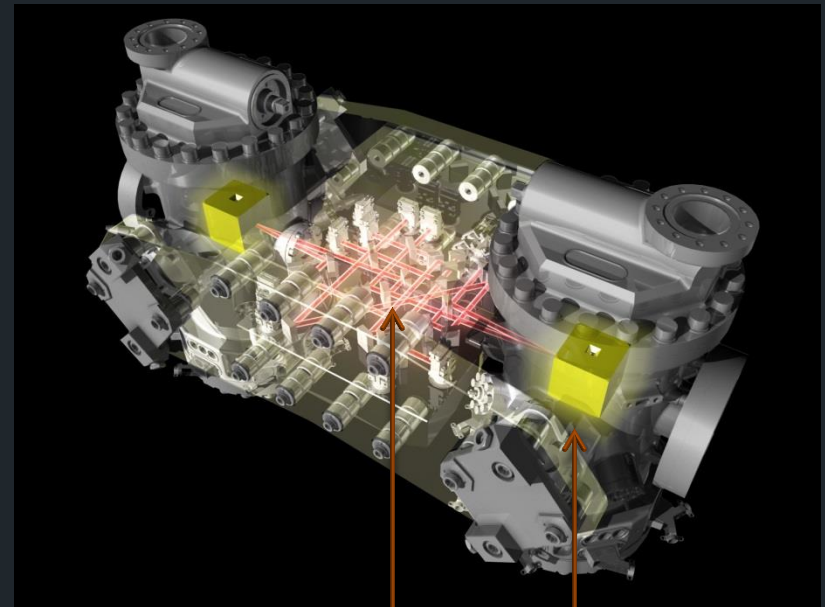


také díky úspěšné misi **LISA Pathfinder**

technologický průkopník **ESA**: Předvoj **eLISY**



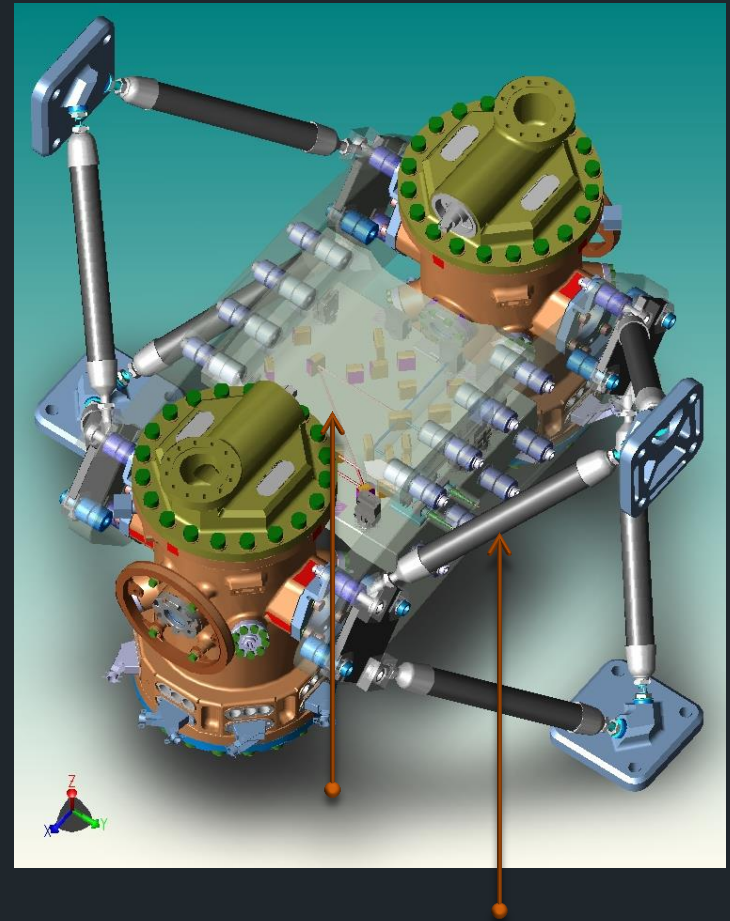
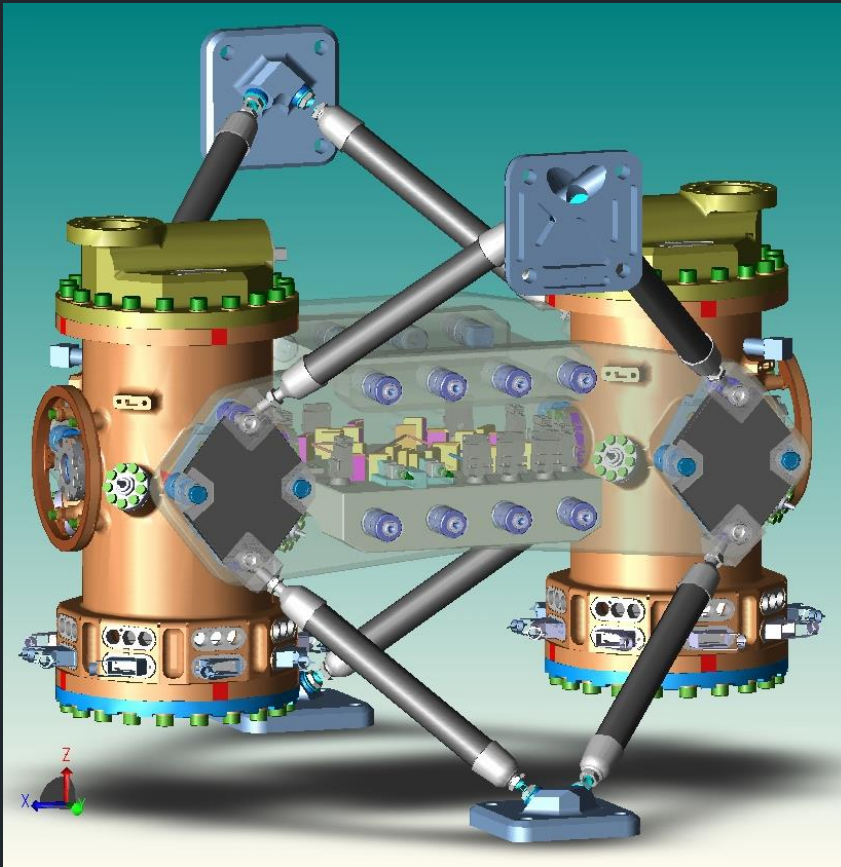
Credit : ESA/ATG medialab



- optická lavice
- testovací krychle
- korekční mikrotrysky



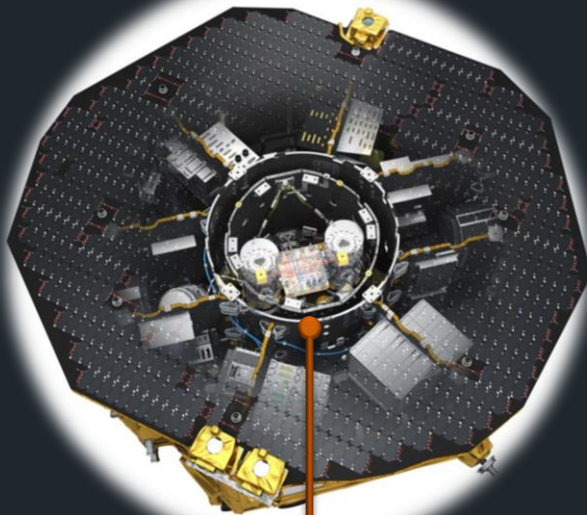
LISA Pathfinder - schéma



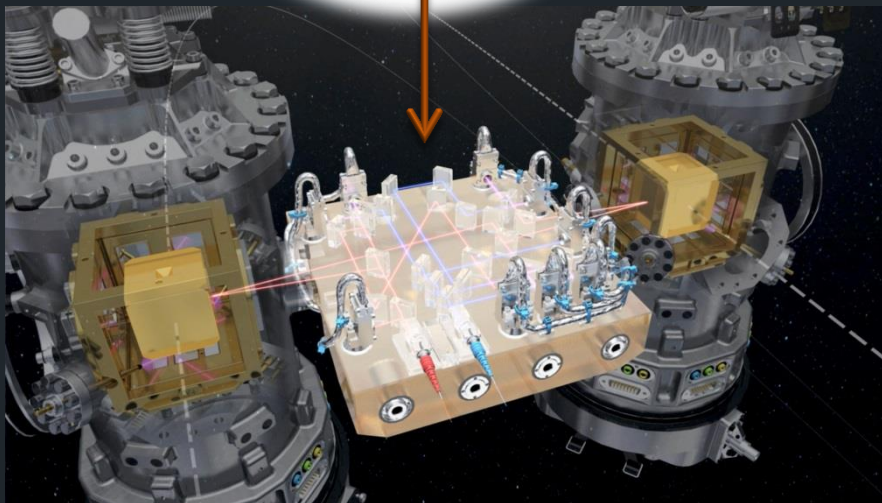
Credit : ESA/ATG medialab

- optická lavice
- testovací krychle

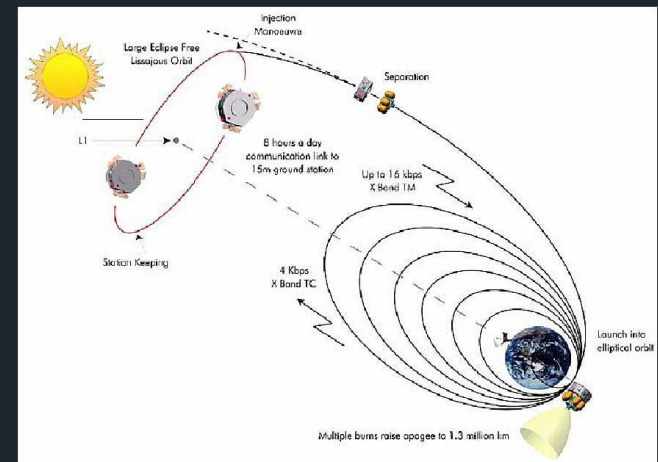
mission LISA Pathfinder



- 3. 12. 2015 start z kosmodromu Kourou
- 22. 1. 2016 v okolí libračního bodu L1
- 16. 2. 2016 uvolněny testovací krychle



Credit : ESA/ATG medialab



- technologická mise **trvala rok**
- ověřovala **pikometrovou přesnost** měření vzdáleností krychlí

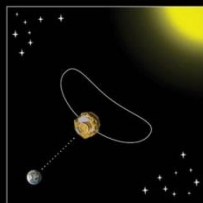
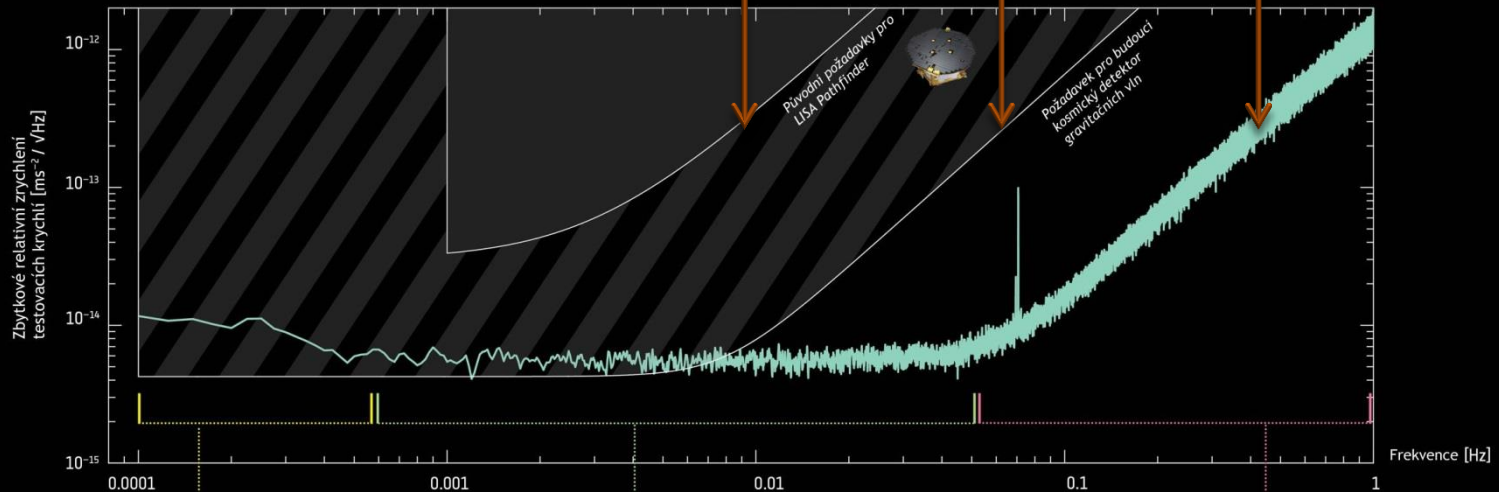
vše proběhlo skvěle !

plán
Pathfinder

požadavky
LISA

skutečnost
Pathfinder

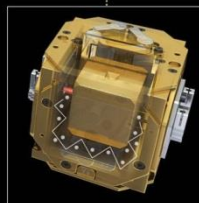
→ LISA PATHFINDER PŘEDČILA OČEKÁVÁNÍ



Odstředivá síla

Ortáčení sondy je potřebné kvůli tomu, aby solární panely mířily ke Slunci a anténa k Zemi. Společně s šumem ze sledovačů hvězd vzniká rušivá odstředivá síla. Tento vliv byl od výsledku odečten a zdroj tohoto šumu je stále analyzován odborníky.

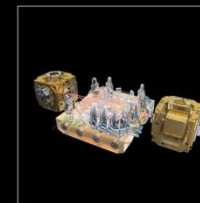
www.esa.int



Vypouštění plynu

Uvnitř měřících dutin jsou testovací krychle vystaveny nárazům molekul plynů, které zůstaly uvnitř. Tento rušivý vliv se podařilo postupem času snížit vypuštěním těchto zbytků do vesmíru.

Spacecraft: ESA/ATG medialab; data: ESA/LISA Pathfinder Collaboration



Snímání šumu

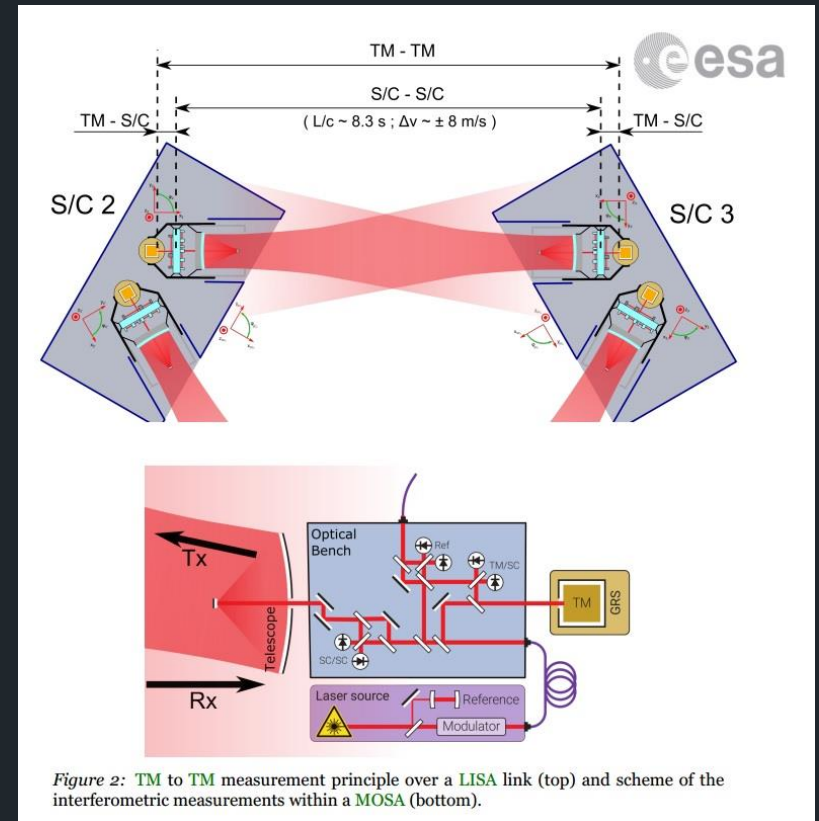
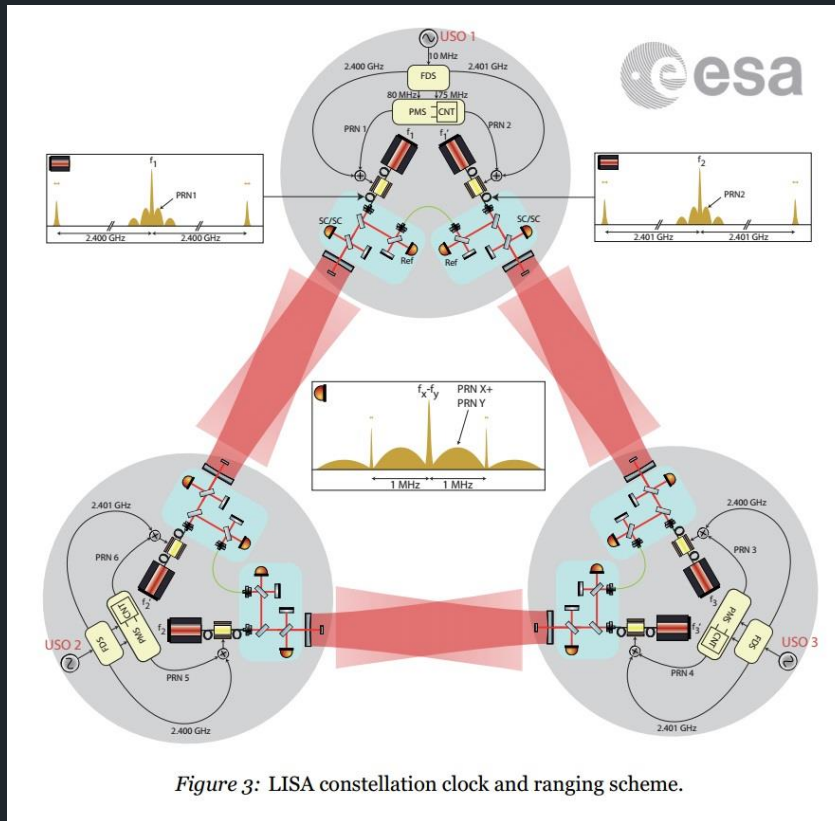
Tento šum optického metrologického systému se používá k monitorování pozice a orientace krychli na úrovni 35 fm / √Hz. Již nyní se podařilo překonat úroveň přesnosti budoucí observatoře gravitačních vln více než 100×.

European Space Agency

technologicky je LISA už dnes proveditelná !
a ESA se 20. 6. 2017 rozhodla ji realizovat !

teď se na ní pracuje,
bude vypadat asi takto:

LISA optické schéma



LISA optické schéma

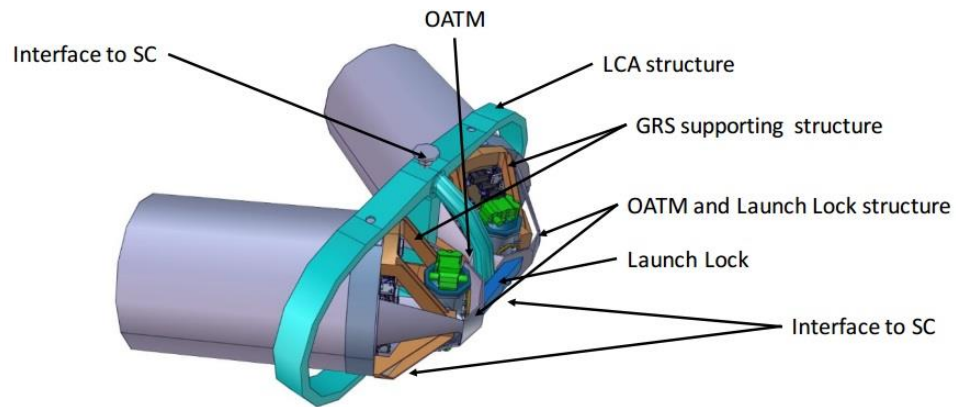


Figure 4: CAD view of the two MOSAs mounted into the LCA structure.

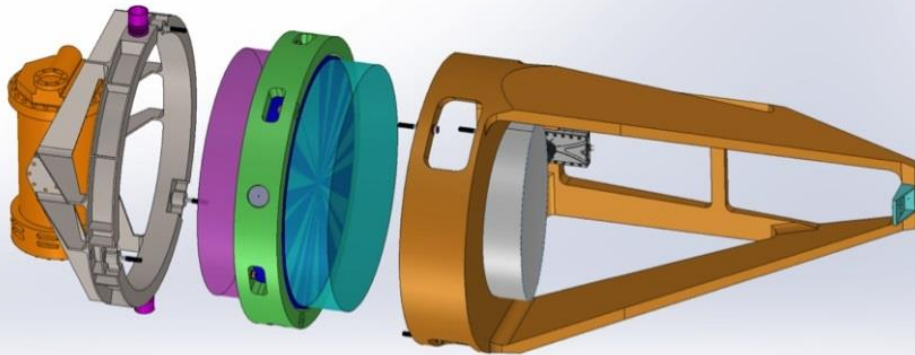


Figure 5: Exploded CAD view of a MOSAs.

vakuová komora LISA

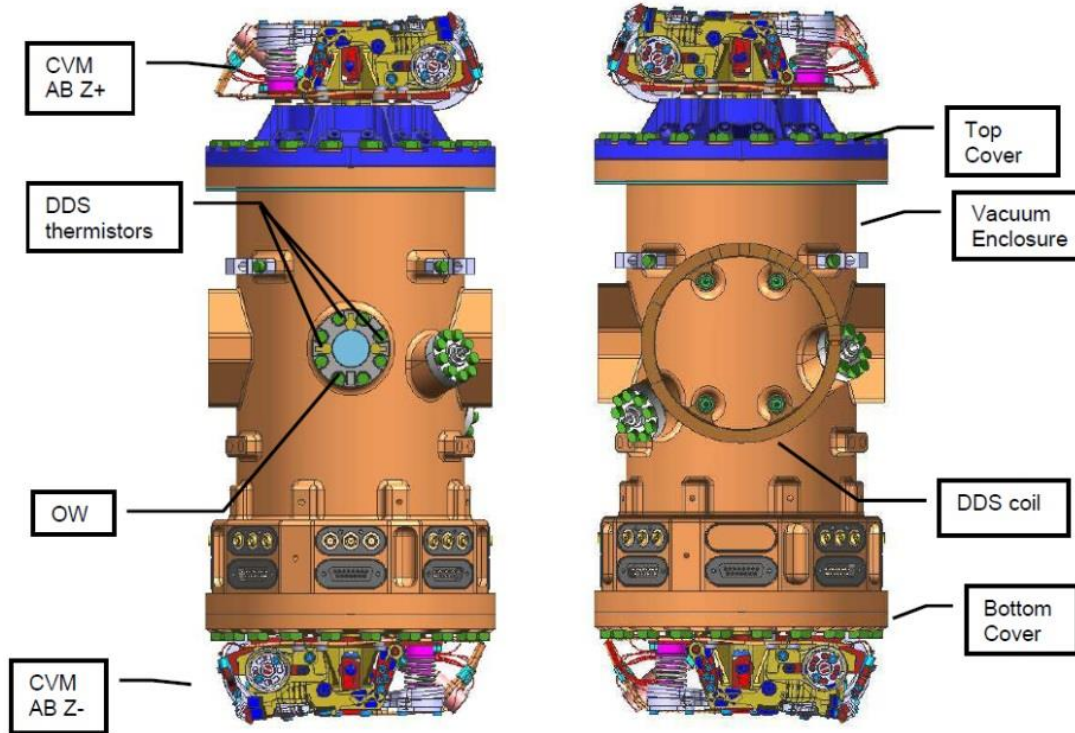


Figure 19: Illustration of the GRS VC viewed along the $\pm x$ axes (figure courtesy of OHB Italia SpA). Visible in profile are the Y-face mechanical interfaces for mounting the GRS head. D-type connectors for the electrical connections are seen in a “ring” configuration near the -Z of the VC.

optická lavice LISA: líc a rub

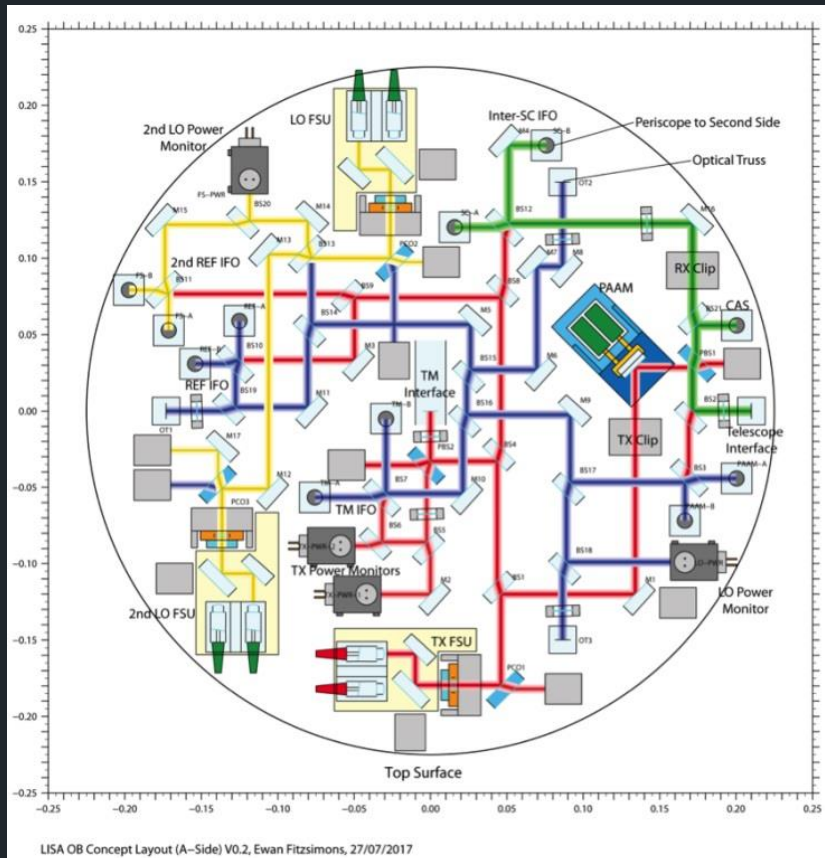


Figure 12: Representative OB optical design - "A-side"

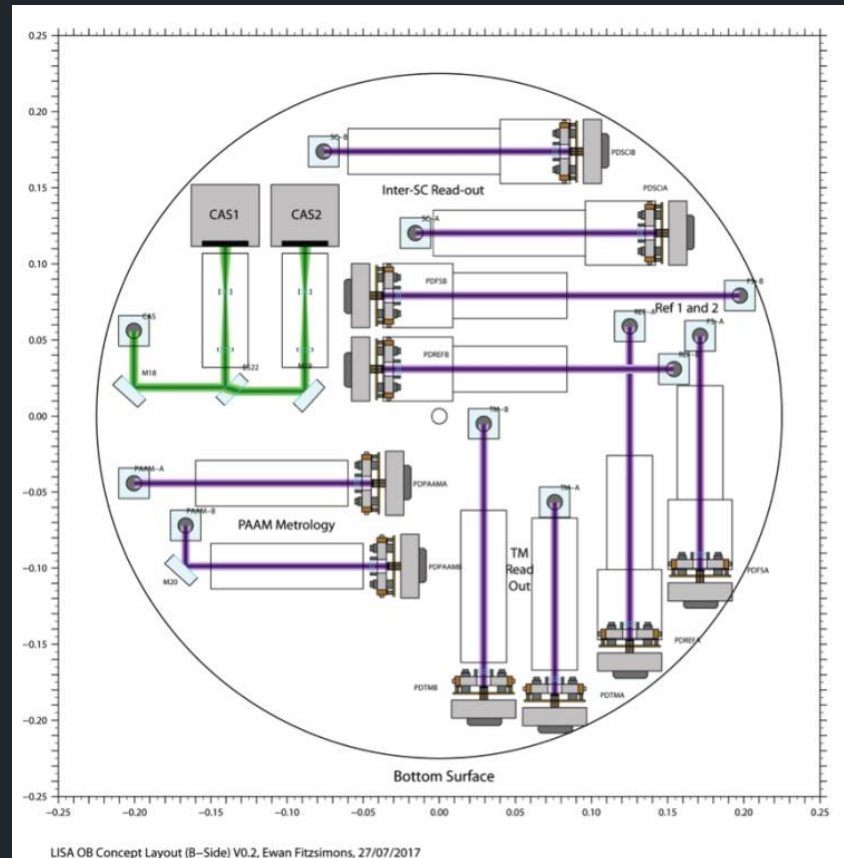


Figure 13: Representative OB optical design - "B-side"

optická lavice LISA: líc a rub

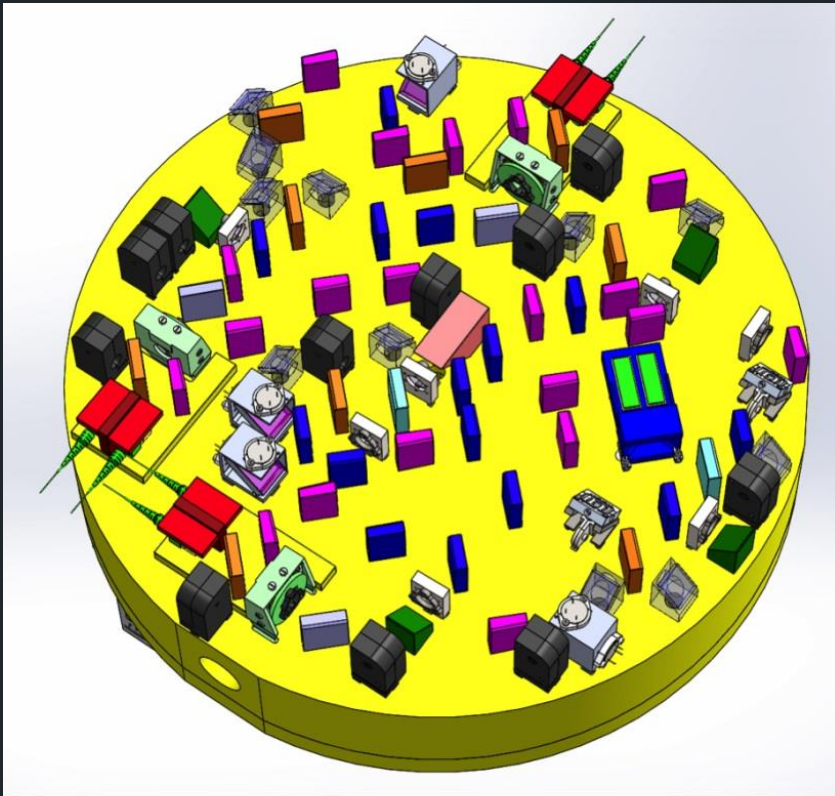


Figure 14: Representative OB mechanical design - "A-side"

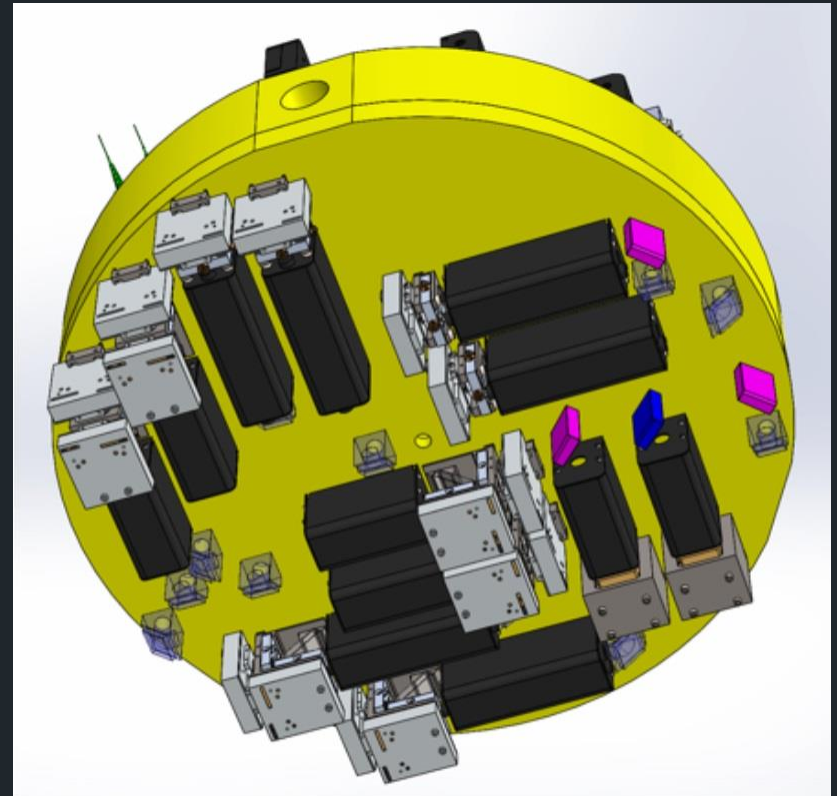


Figure 15: Representative OB mechanical design - "B-side"

pouzdro elektrod

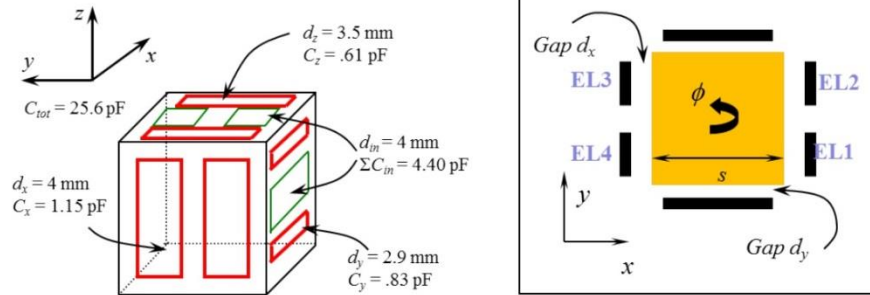


Figure 17: Cartoon of the EH design, with gap dimensions and approximate capacitance values (infinite parallel plate approximation).

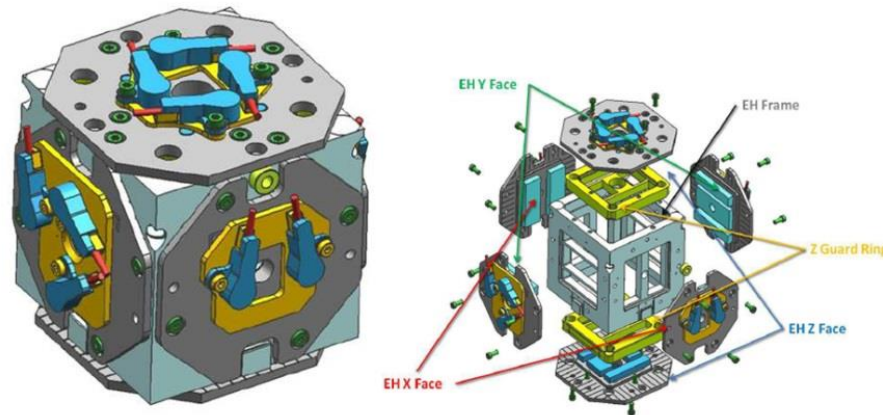
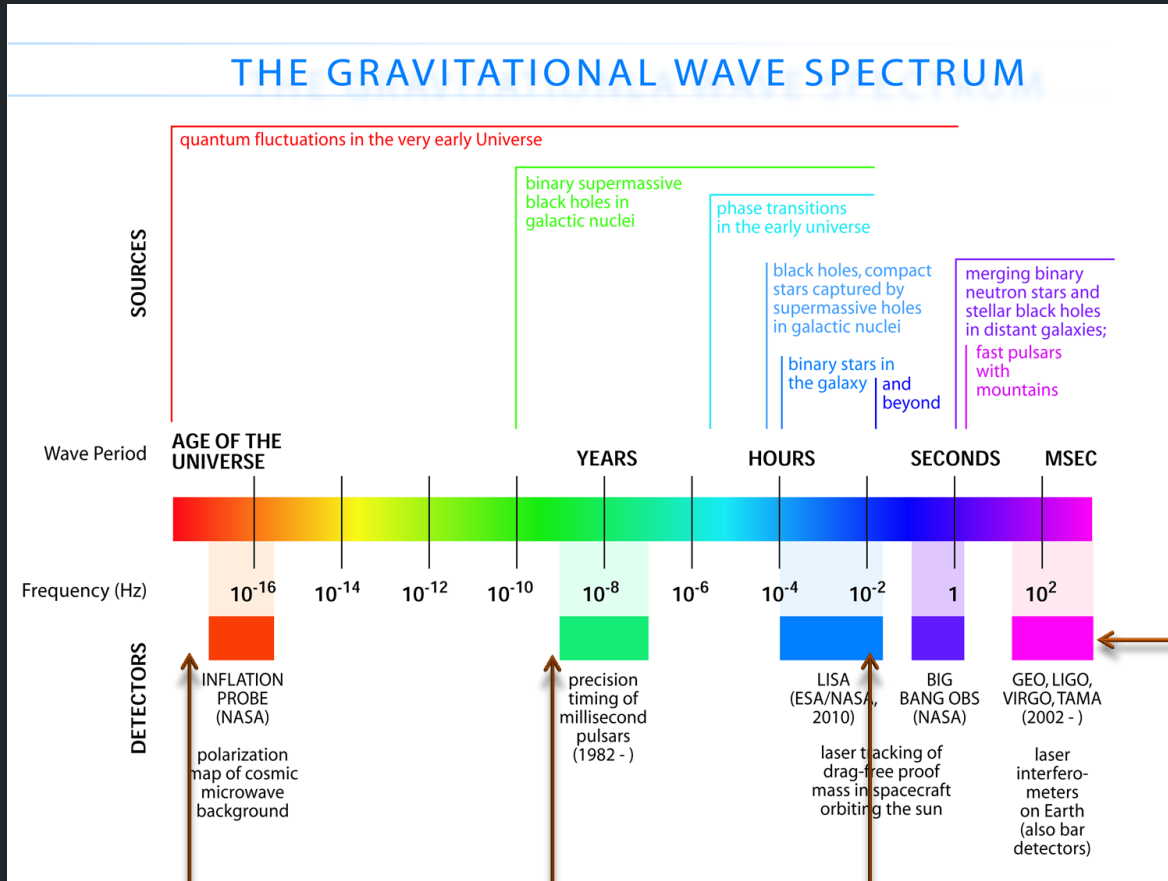


Figure 18: Illustration of the EH configuration (figure courtesy of OHB Italia SpA).

hodláme sledovat plné spektrum gravitačních vln



úplně odlišná gravitační okna do kosmu, tedy různé zdroje

- LIGO a Virgo na Zemi:**
- srážky černých děr hvězdných hmotností
 - neutronových hvězd
 - výbuchy supernov

polarizace reliktního mikrovlnného záření
kvantové fluktuace raného vesmíru

přesné časování pulsarů
srážky galaktických černých děr

- LISA ve vesmíru:**
- srážky supermasivních černých děr
 - běžné binární systémy bílých trpaslíků