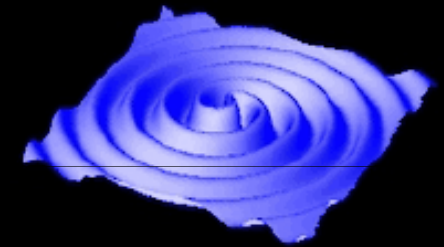
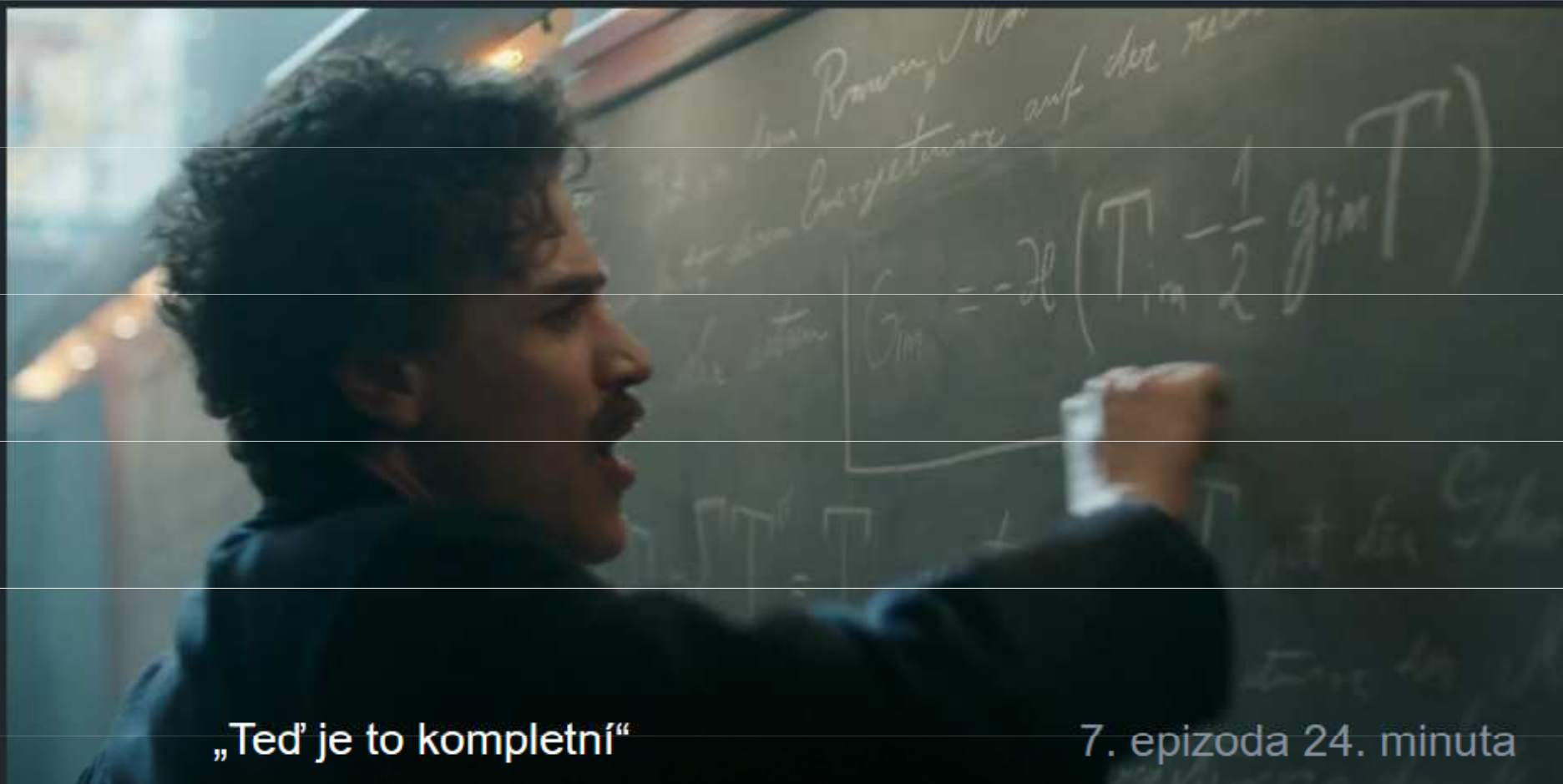


~ ~ ~ ~ ~ Gravitační vlny ~ ~ ~



~ prof. Jan Novotný, CSc. ~
Masarykova univerzita

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



„Teď je to kompletní“

7. epizoda 24. minuta

Génius.



NATIONAL
GEOGRAPHIC

Fyzika 20.století

Mikrosvět

Kvantová teorie – hmota

Planck, Schrödinger,

Heisenberg, Bohr, Dirac

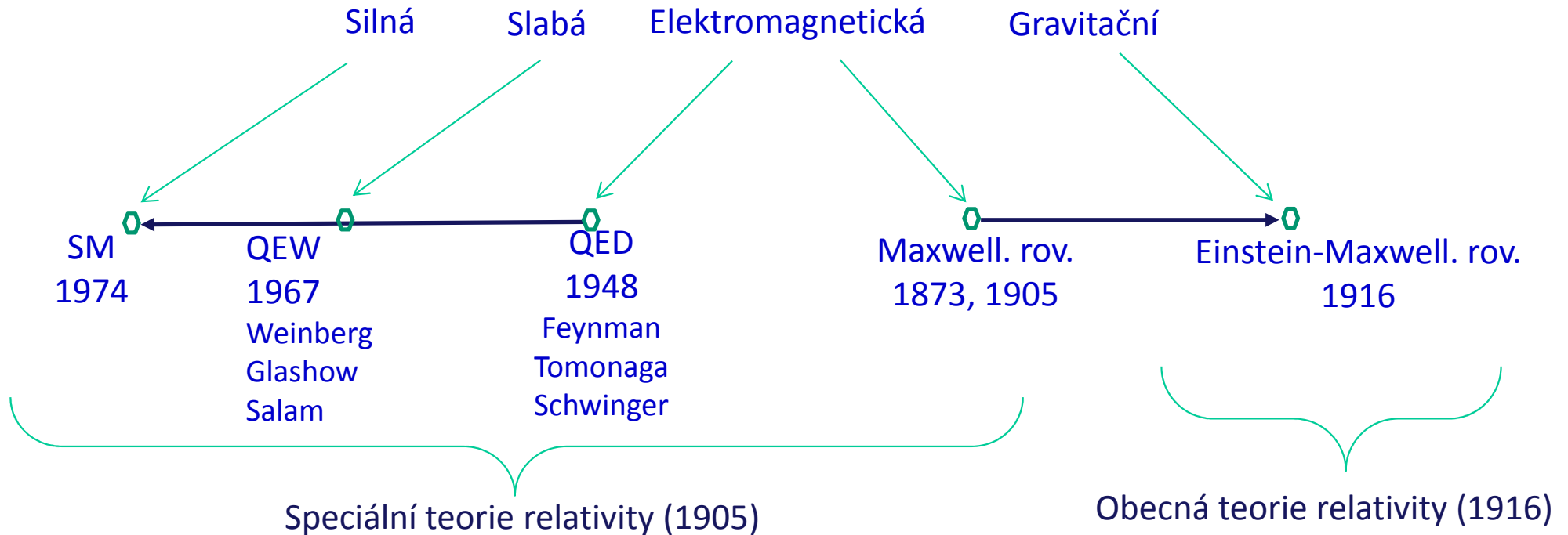
(1900-1930)

Makrosvět a vesmír

Teorie relativity – prostor a čas

STR (1905) → OTR (1915)

Interakce



Higgsův boson

Předpověď 1964

Objev 2012

Nobel.cena 2013

Gravitační vlny

Předpověď 1916

Objev 2015

Nobel. cena 2017

Základní formule: Einstein 1915, 1916, 1918

Interval a metrika $ds^2 = g_{ik} dx^i dx^k$

Rozklad pro malé poruchy $g_{ik} = g_{ik}^0 + h_{ik}$

Důsledek Einstein.rovnic $\square h_{ik} = 0$

Nenulové komponenty pouze $h_{23}, h_{22} = -h_{33}$

Kvadrupólový moment $D_{\alpha\beta} = \int \mu (3x_\alpha x_\beta - r^2 \delta_{\alpha\beta}) dV$

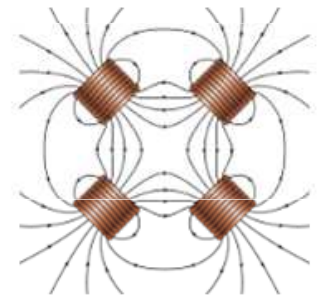
Vyzařovaný výkon $-\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{k}{45c^5} \ddot{D}_{\alpha\beta}^2$

Pro 2 tělesa při kruhovém pohybu $-\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{32k^4 m_1^2 m_2^2 (m_1 + m_2)}{5c^5 r^3}$

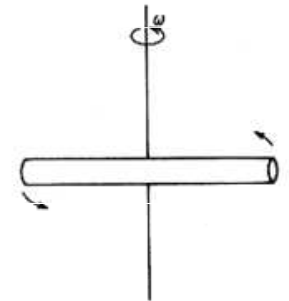
Pro sblížení 2 těles při kruhovém pohybu $\frac{dr}{dt} = -\frac{64k^3 m_1 m_2 (m_1 + m_2)}{5c^5 r^3}$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_\alpha \partial x_\alpha}$$

$$\square = \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}$$



pro vlnu ve směru x_1

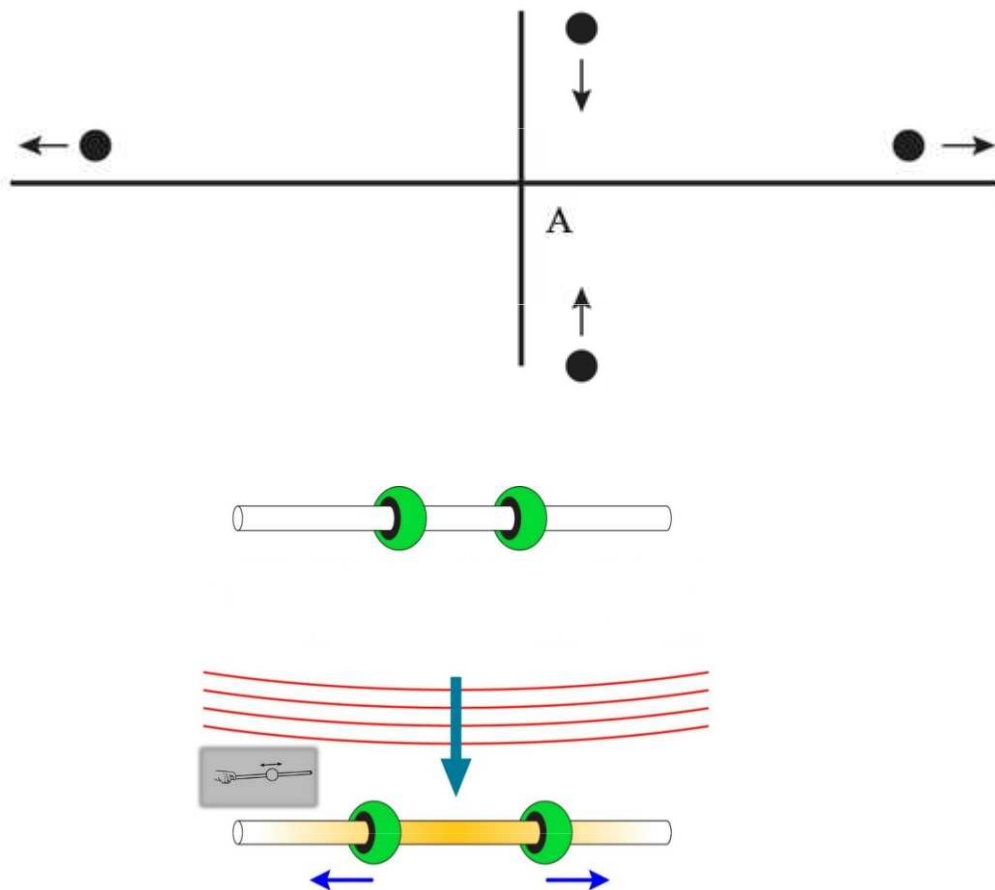
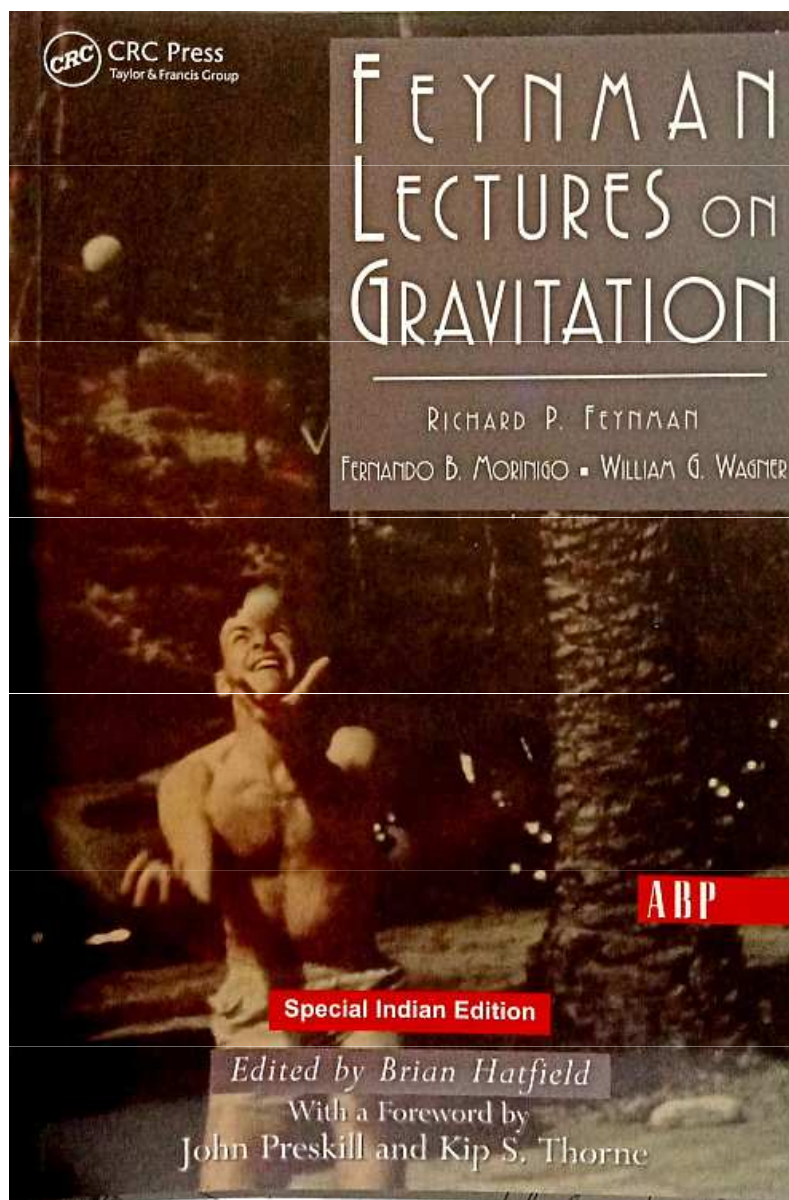


Oslava 70tin Alberta Einsteina v Institutu pro pokročilá studia.

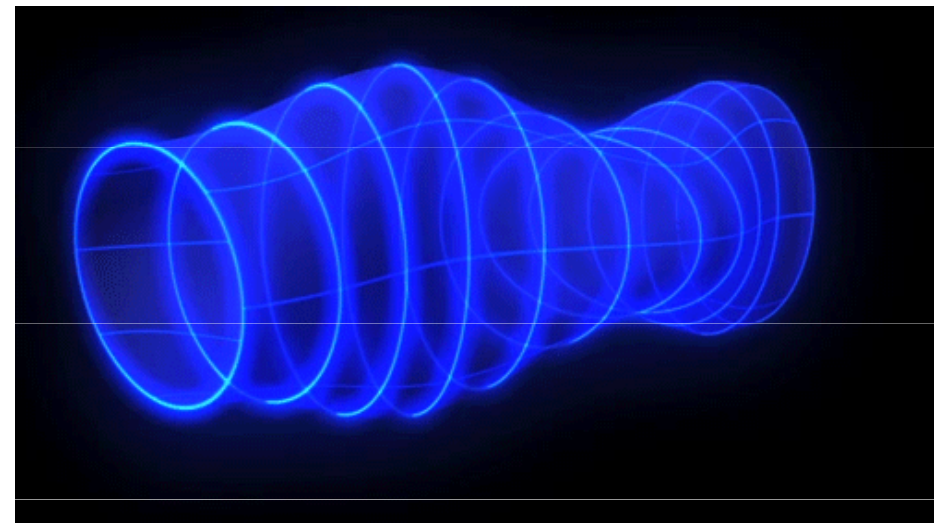


Zleva: H. P. Robertson, E. Wigner, H. Weyl, K. Goedel, I. I. Rabi, A. Einstein,
R. Ladenburg, J. R. Oppenheimer, and G. M. Clemence.

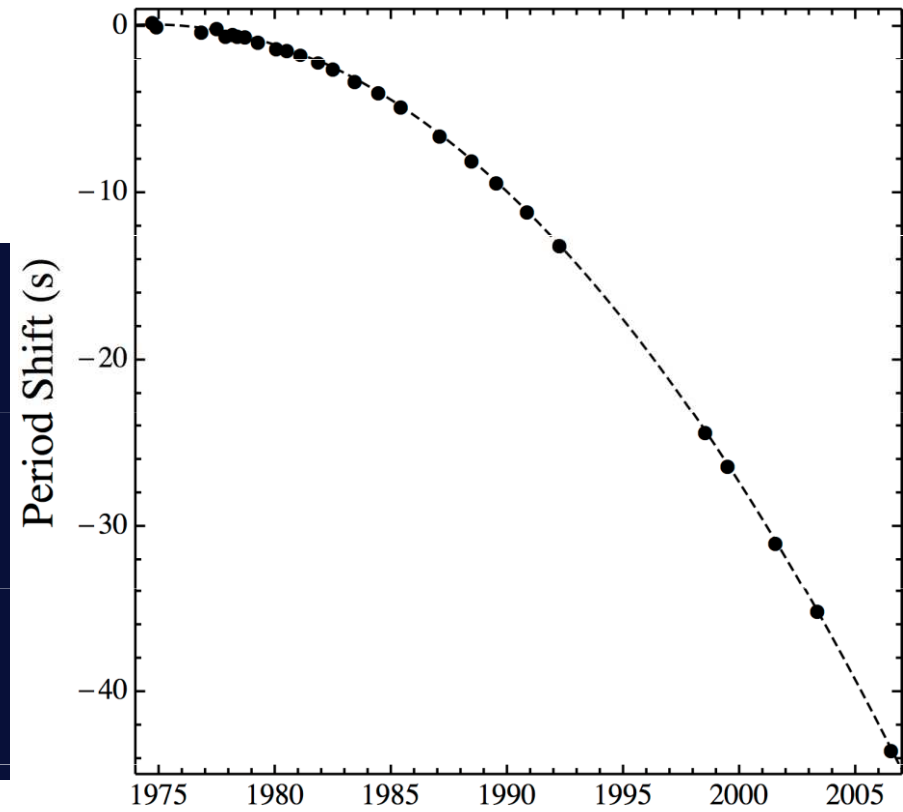
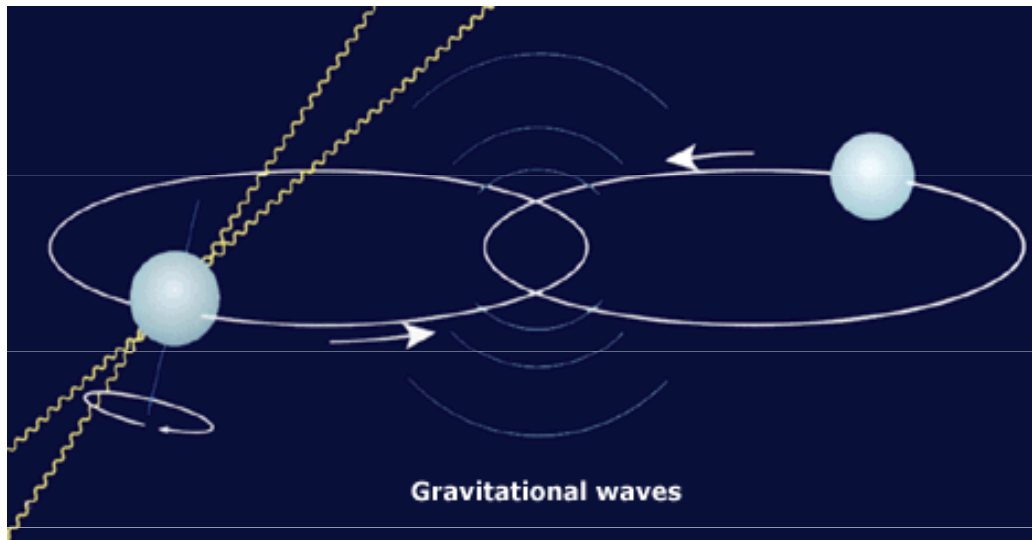
Feynman a gravitace



Přednášky o gravitaci na Caltechu 1962-63
Feynmanův vztah k relativistům
„Sticky bead“ argument“ 1957



Možný zdroj gravitačných vln



Joseph Weber
kontroverzní pionýr měření gravitačních vln



Zprovozněno v roce 1966 a v roce 1972 byla naměřena jediná koincidence, která se již nikdy nezopakovala. Dnes se soudí, že relativní citlivost byla malá.

$$h \approx \frac{\Delta L}{L} \approx 10^{-15}$$

ON THE ENERGY-MOMENTUM PSEUDOTENSORS AND THE QUADRUPOLE FORMULA

J. Novotný, J. Horáký

Department of Theoretical Physics, J.E. Purkyně University
611 37, Kotlářská 2, Brno, ČSSR

Introduction

The problem of conservation laws (i.e. the correct definition of energy and momentum of gravitational field) has been closely associated with the general theory of relativity from its origin up to date [1]. In 60's this problem was widely reexamined and a number of new energy-momentum pseudotensors were found [2], [3]. This discussion led to the profound understanding of essence of the problem, but a generally acceptable and definite solution was not reached [4].

In the connection with the new possibilities of testing the quadrupole formula for some binary systems the correctness of classical derivation of this formula and its physical meaning were called in question [5], [6].

It is possible to ask, whether the data concerning the change of motion of binary systems can lead us to the choice of a correct theory of conservation laws.

Superpotentials

As the most general pseudotensor formulation of conservation laws in GR we can consider the equations

$$[(-g)^{\alpha} (T_i^{\alpha} + t_i^{\alpha})]_{,k} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{16\pi k}{c^3} \dot{t}^{\alpha} = C_1 (h_{(11)}^{ab} h_{(1)ab}^{(1)\alpha} + h_{(11)}^{ab, \rho} h_{(1)ab}^{(\rho) - h_{(12)}^{(1)\alpha}}) + C_2 h_{(11)}^{b1, \rho} + C_3 (h_{(11)}^{ab, \rho} - h_{(12)}^{ab, \rho})$$

After substitution of concrete values $h_{(11)}^{ab}$ and $h_{(1)ab}^{(\rho)}$ we have

$$\dot{t}^{\alpha} = \frac{c^3}{16\pi k} \left[C_1 - \frac{1}{2} C_2 + \frac{1}{2} C_3 \right] (\dot{\psi}^{\alpha} + \dot{\psi}^{\alpha})$$

This is the generalization of the formula (25), which we are searched for. Let us note that the result is dependent on the functions φ, ψ from the 1. approximation only. By introducing the quadrupole momentum tensor and calculating the midd value we obtain the generalized quadrupole formula

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{k}{45c^3} \left(C_1 - \frac{1}{2} C_2 + \frac{1}{2} C_3 \right) \ddot{D}_{ij} \ddot{D}^{ij}$$

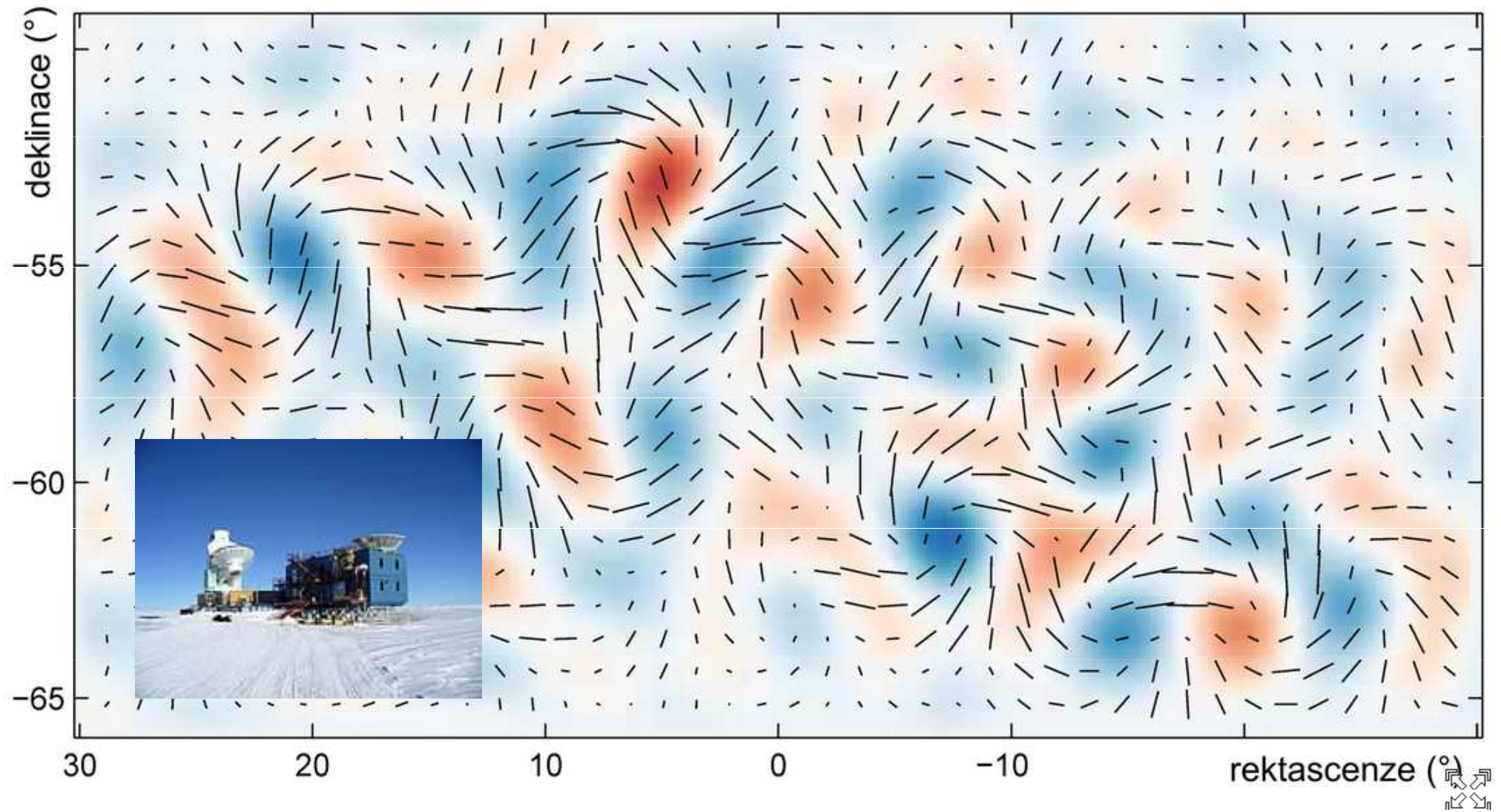
Conclusion

The essential result of our preceding calculations shows the multiplicative constant in the formula (53) to be identical with that one in the formula (10)

$$E = \left(C_1 - \frac{1}{2} C_2 + \frac{1}{2} C_3 \right) M c^2$$

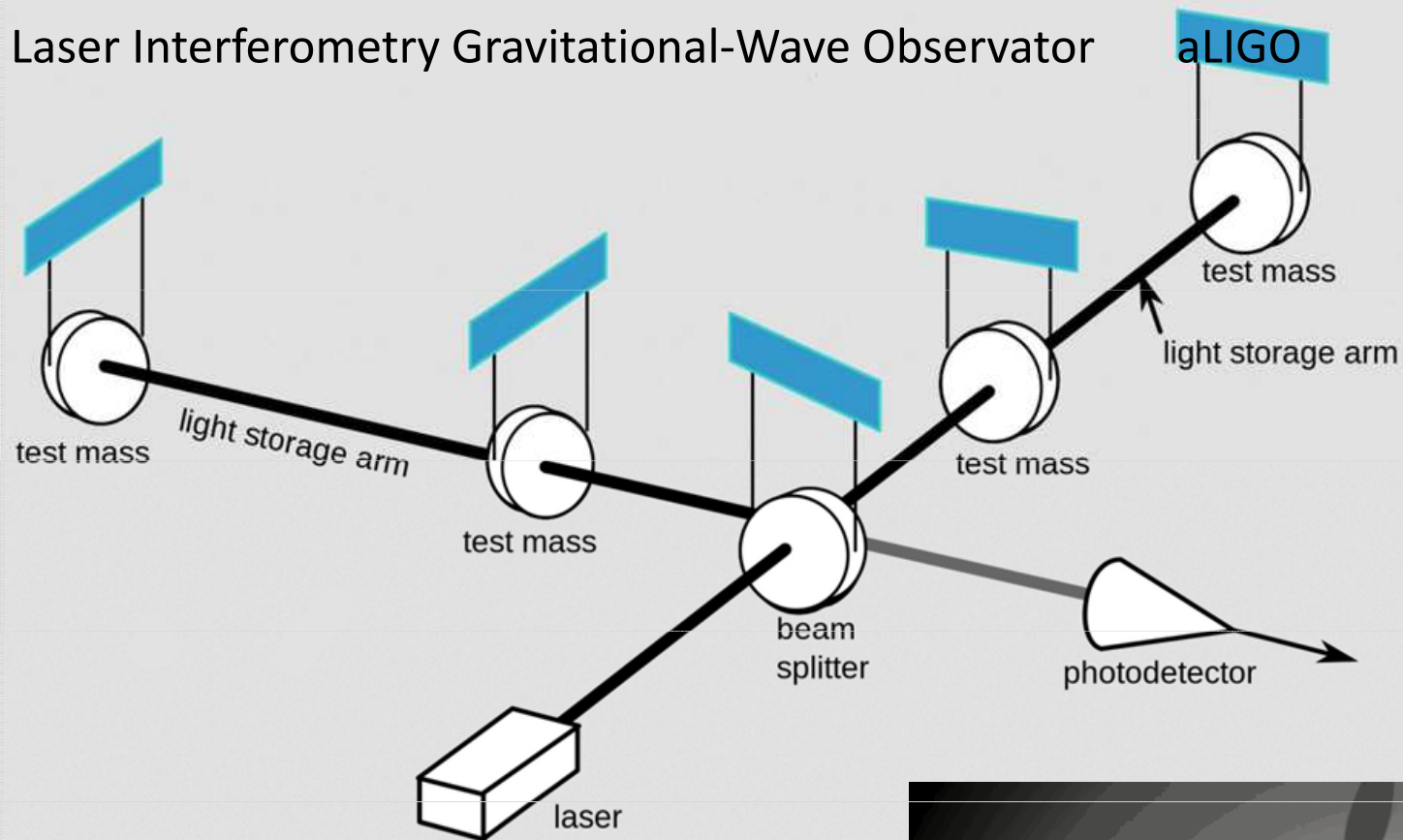
Hence, the conclusion follows that the directly observable quantity dM/dt is independent of the choice of constants C_1, C_2, C_3 and, consequently, independent of the choice of the concrete pseudotensor from the wide class (6) containing also the pseudotensors with the second derivatives. This means the negative answer to our question mentioned in the introduction. On the other hand, mere arbitrariness in the choice of the pseudotensor does not give sufficient reasons for the rejection of quadrupole formula.

BICEP2 B-mode signal



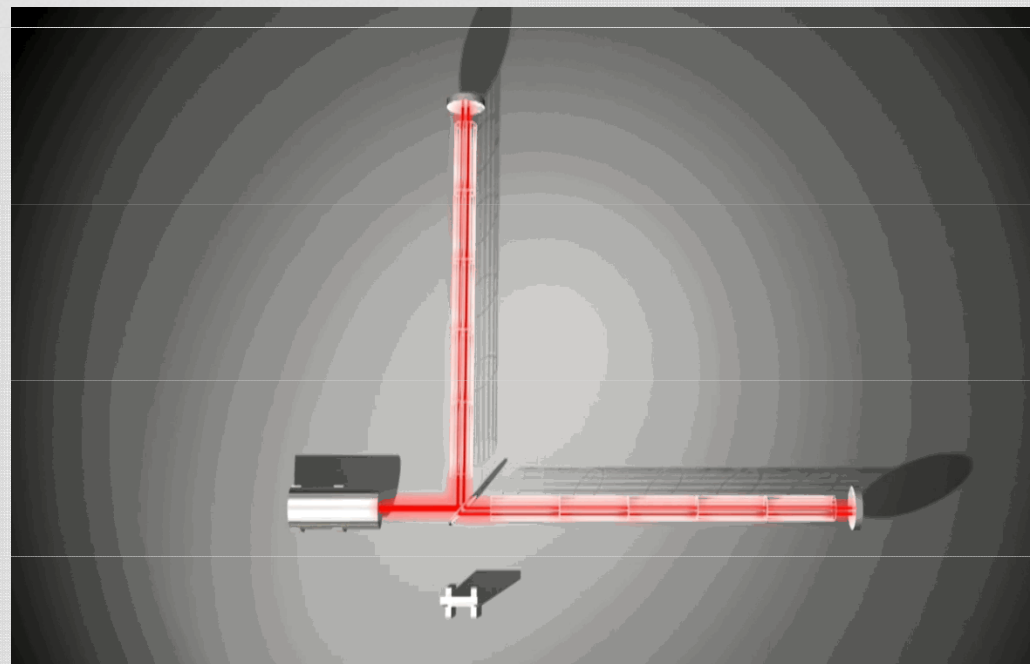
Snaha o nepřímou detekci reliktních gravitačních vln observatoř BICEP (2014) na Jižní pólu
- srovnání s měřením sondy Planck výsledky nepotvrdilo

Laser Interferometry Gravitational-Wave Observatory



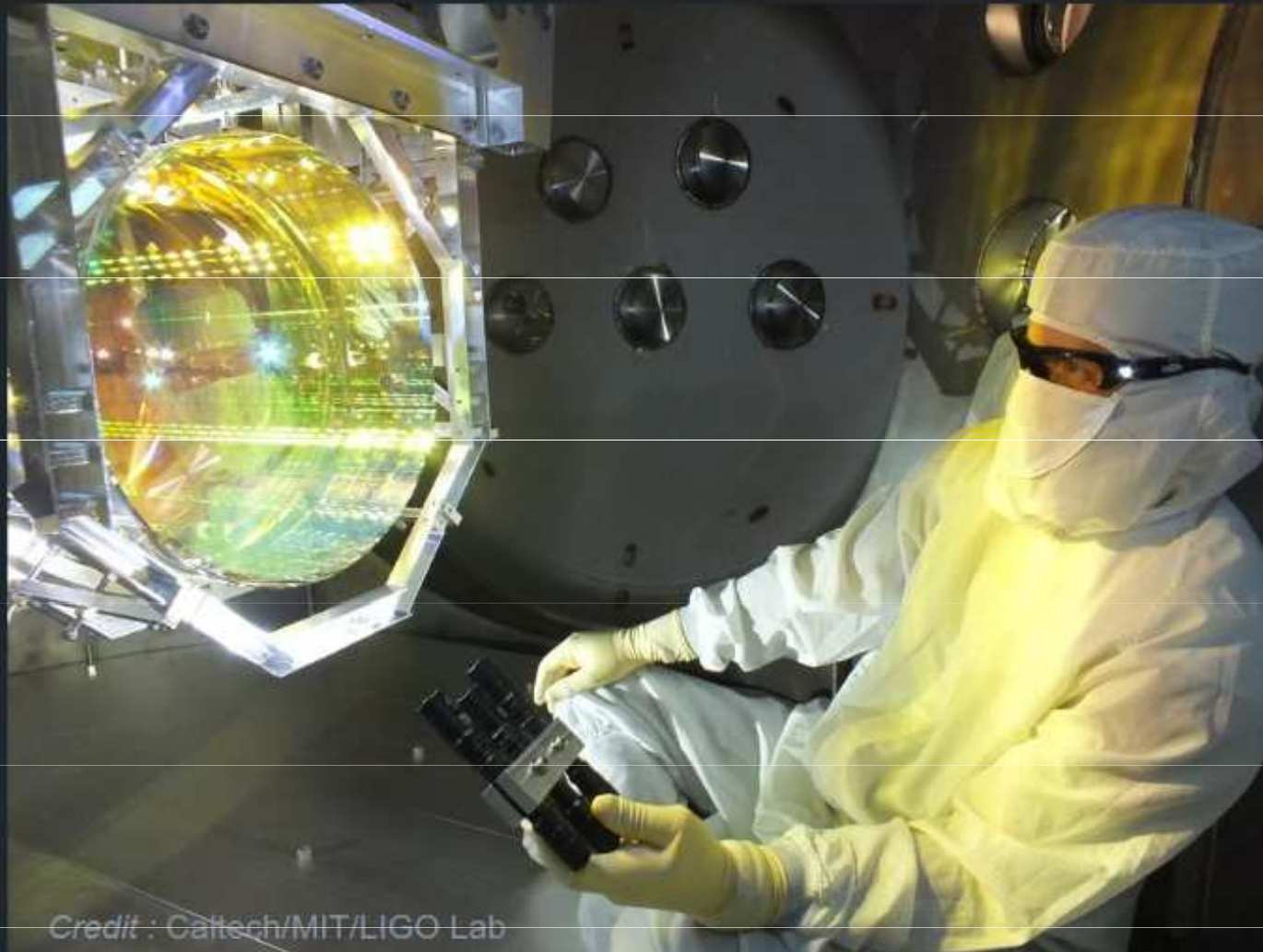
4 km dlouhá ramena

$$\frac{\Delta L}{L} \approx 10^{-23}$$



Advanced LIGO: 2015

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



seismický šum:

- platforma s aktivní seismickou izolací
- čtyřkyvadlo

tepelný šum:

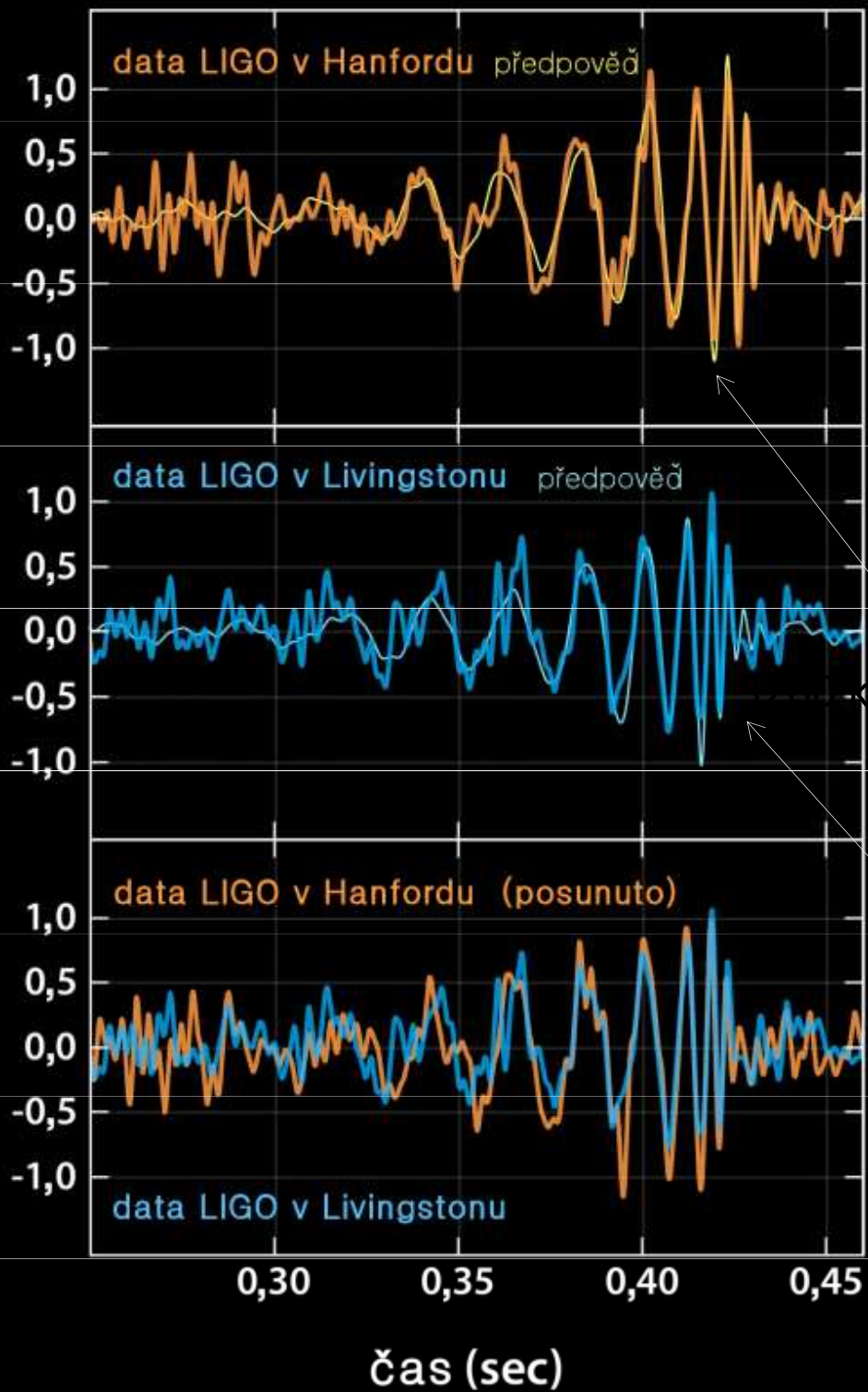
- závěsy zrcadel z křemenných vláken
- křemenná zrcadla hmotnosti 40 kg
- dielektrické vrstvy s nízkými ztrátami

ultravysoké vakuum:

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

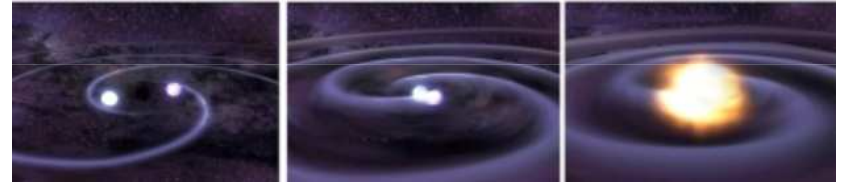
Credit : Caltech/MIT/LIGO Lab

relativní deformace (10^{-21})



14.9.2015

11. února 2016



Hanford

3200 km.

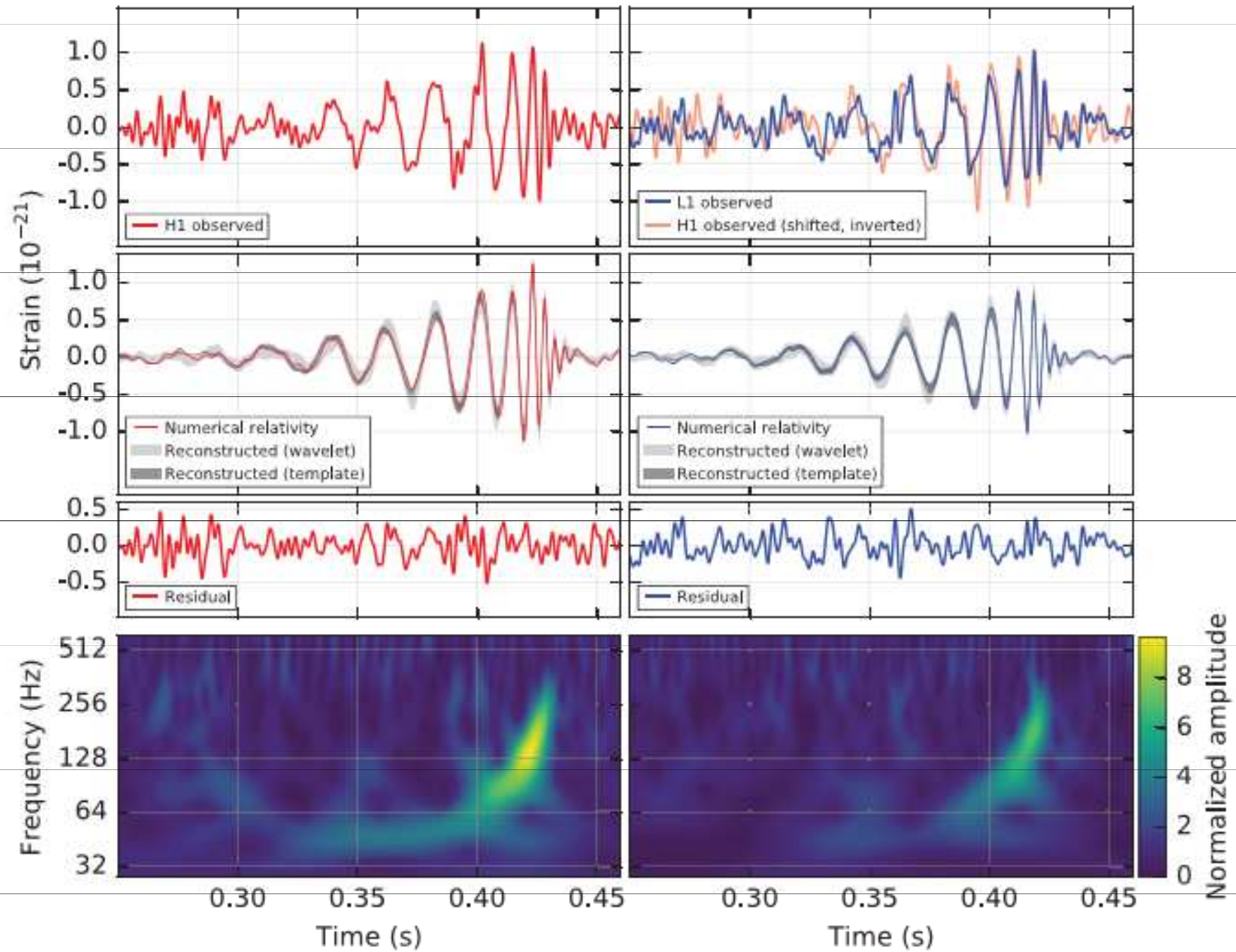


Livingstone



Hanford, Washington (H1)

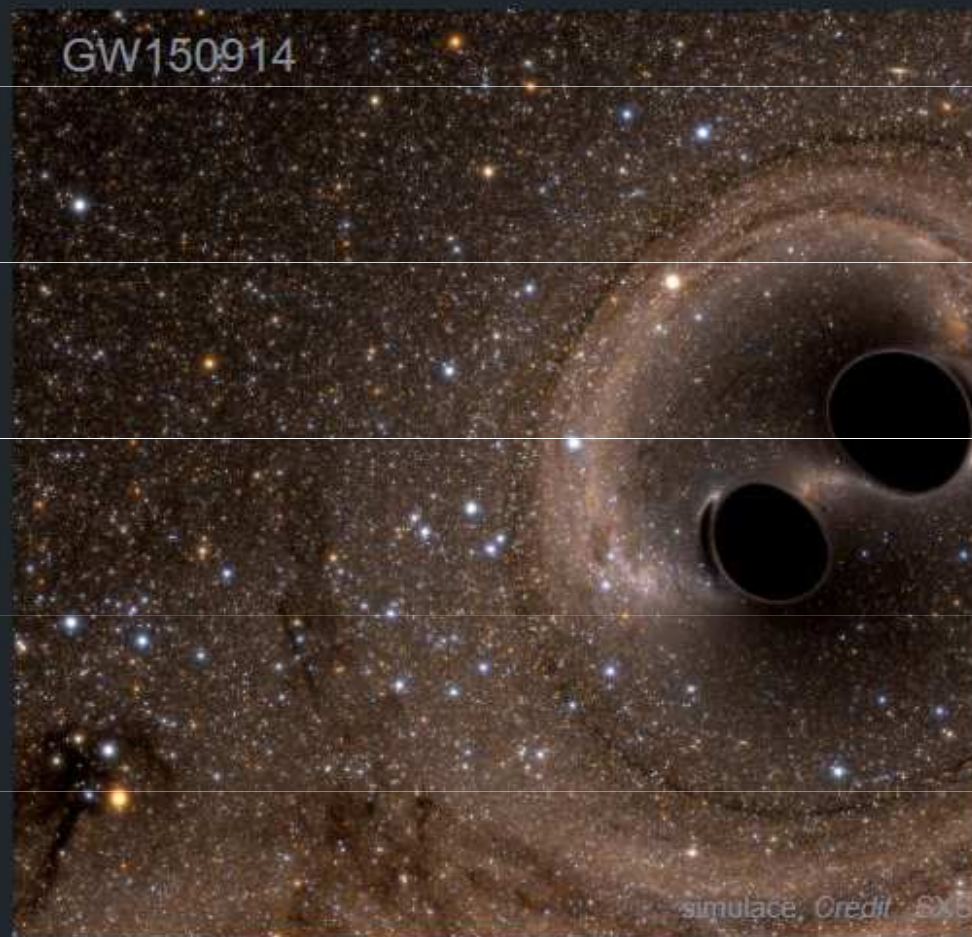
Livingston, Louisiana (L1)



zdrojem byla srážka velkých černých děr

závěrečné 4 oběhy (= 8 cyklů vln) spirálového přibližování černých děr a jejich splynutí

2 objevy: první přímá detekce gravitačních vln a první pozorované splynutí černých děr



hmotnosti černých děr

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

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

hmotnost výsledné černé díry

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

její rotace

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

rozdíl hmoty-energie

$$E = 3 M_{\odot} c^2 \pm 0,5$$

vyzáření gravitačními vlnami

maximální amplituda

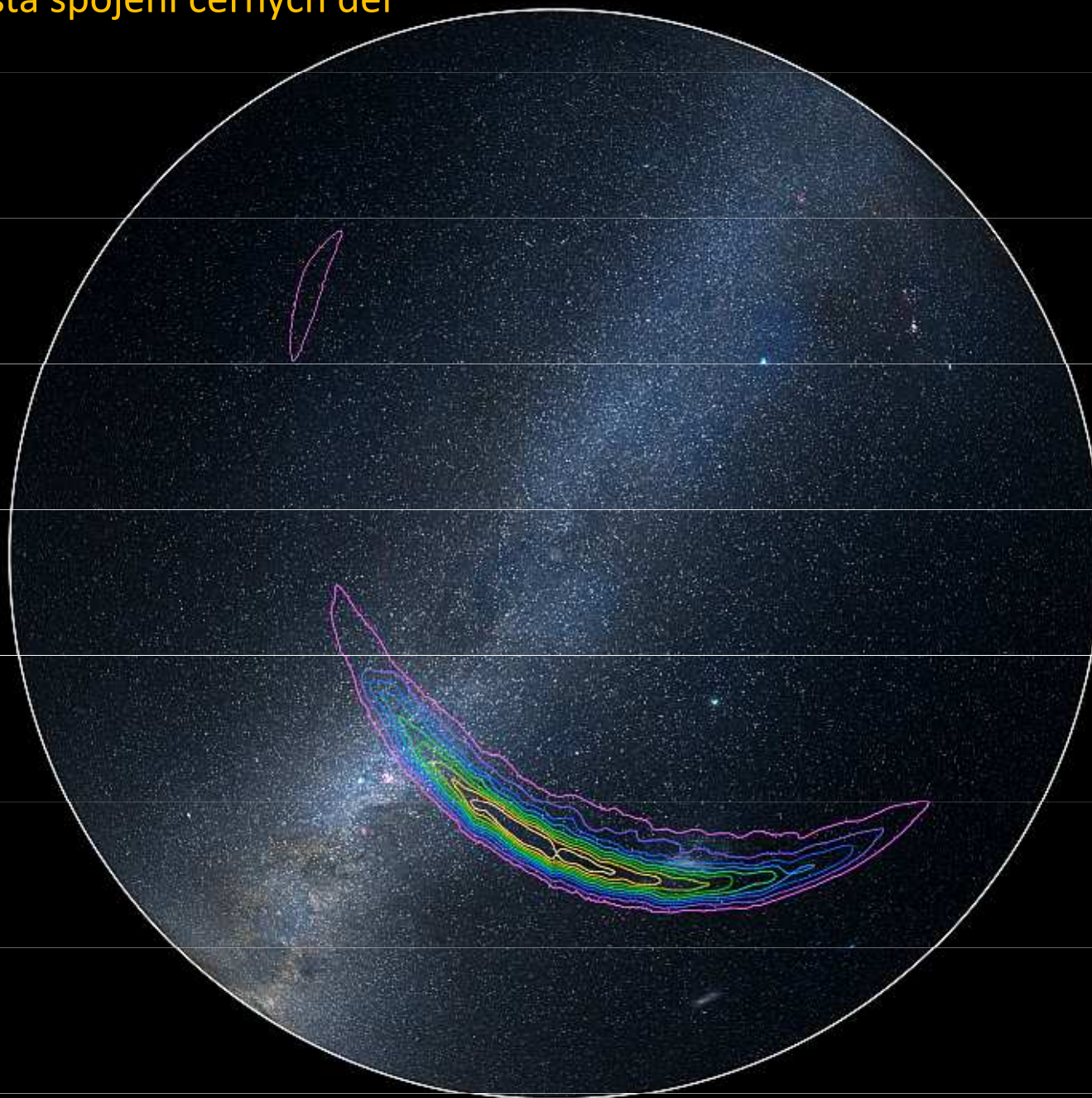
$$h_{\max} = 10^{-21}$$

vzdálenost zhruba

1,3 miliardy světelných let
tedy kosmologická ($z=0,1$)

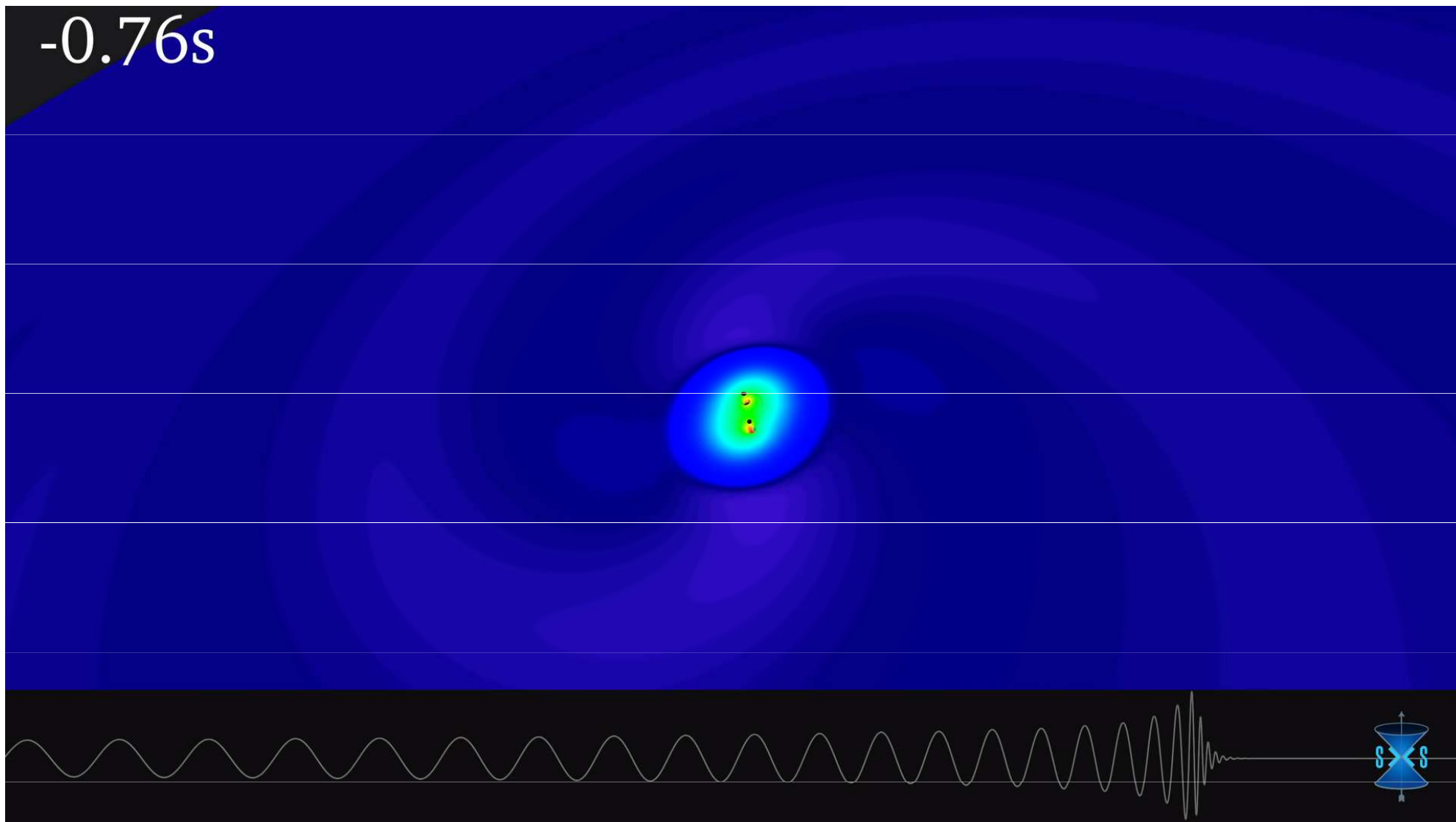
výkon $200 M_{\odot} c^2/s$: 10x více než svítily všechny hvězdy ve vesmíru !!!

Odhad místa spojení černých děr





-0.76s



Vizualizace sloučení černých děr.

Obíhající černé díry ztrácejí energii vyzařováním gravitačních vln. Ty jsou znázorněny jednak zprohýbanou plochou v okolí černých děr, jednak signálem v dolní části videa.

Při sloučení děr má signál výrazné maximum, po sloučení zcela mizí.



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410_{-180}^{+160} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36_{-4}^{+5}M_{\odot}$ and $29_{-4}^{+4}M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62_{-4}^{+4}M_{\odot}$, with $3.0_{-0.5}^{+0.5}M_{\odot}c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

PRL 116, 061102 (2016)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016

For robustness and validation, we also use other generic transient search algorithms [41]. A different search [73] and a parameter estimation follow-up [74] detected GW150914 with consistent significance and signal parameters.

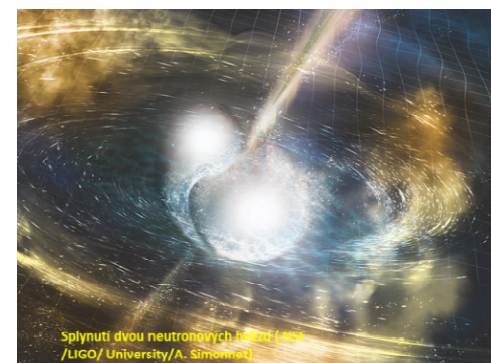
B. Binary coalescence search

This search targets gravitational-wave emission from binary systems with individual masses from 1 to $99M_{\odot}$, total mass less than $100M_{\odot}$, and dimensionless spins up to 0.99 [44]. To model systems with total mass larger than $4M_{\odot}$, we use the effective-one-body formalism [75], which combines results from the post-Newtonian approach [11,76] with results from black hole perturbation theory

TABLE I. Source parameters for GW150914. We report median values with 90% credible intervals that include statistical errors, and systematic errors from averaging the results of different waveform models. Masses are given in the source frame; to convert to the detector frame multiply by $(1+z)$ [90]. The source redshift assumes standard cosmology [91].

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} Mpc
Source redshift z	$0.09_{-0.04}^{+0.03}$

Detekce gravitační vlny spolu s **gama zářením** vzniklým při splývání 2 neutronových hvězd.



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

$$1,3 \text{ miliardy svét. let}$$

$$(z = 0,1)$$

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

$$1,4 \text{ miliardy svét. let}$$

$$(z = 0,1)$$

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

$$2,9 \text{ miliardy svét. let}$$

$$(z = 0,2)$$

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

$$1,8 \text{ miliardy svét. let}$$

$$(z = 0,1)$$

úžasný objev LIGO a Virgo 17. 8. 2017

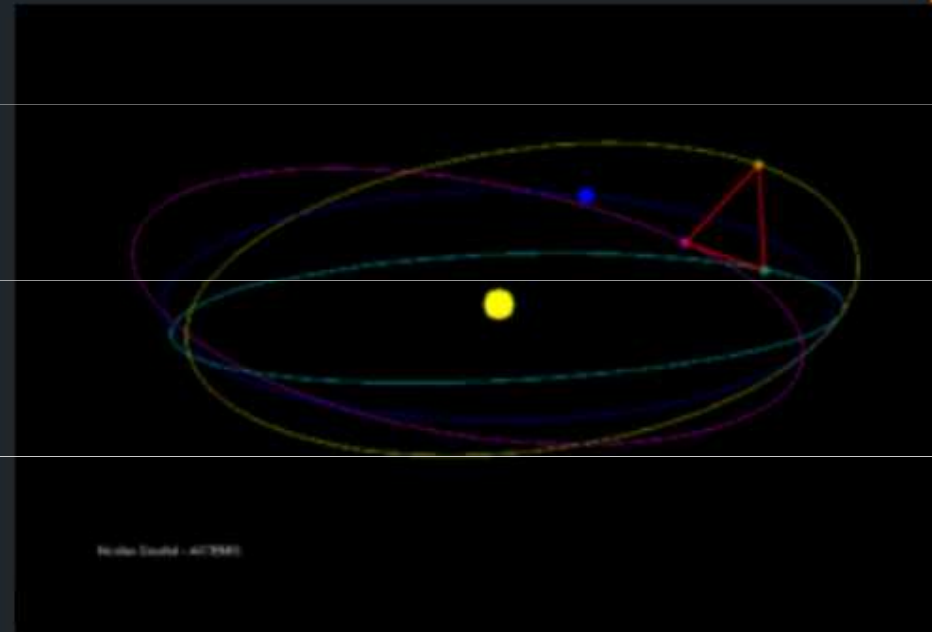
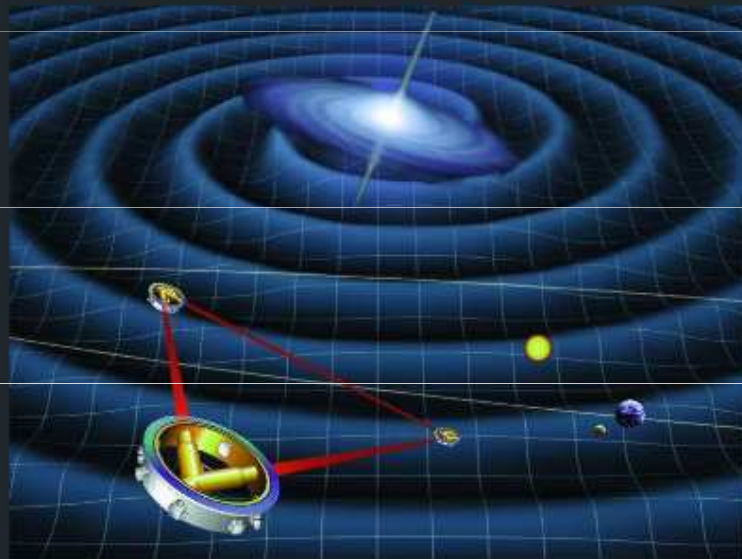


- detekce gravitační vlny GW170817 ze srážky dvou neutronových hvězd !
- navíc koincidence s gama zábleskem SGRB170817A (Fermi, INTEGRAL) první elmag identifikace zdroje !
- v galaxii NGC 4993
Hydra, 130 mil světelných let
- následně 70 dalších observatoří
gama, X, UV, opt, IR, radio



LISA v kosmu

Laser Interferometer Space Antena



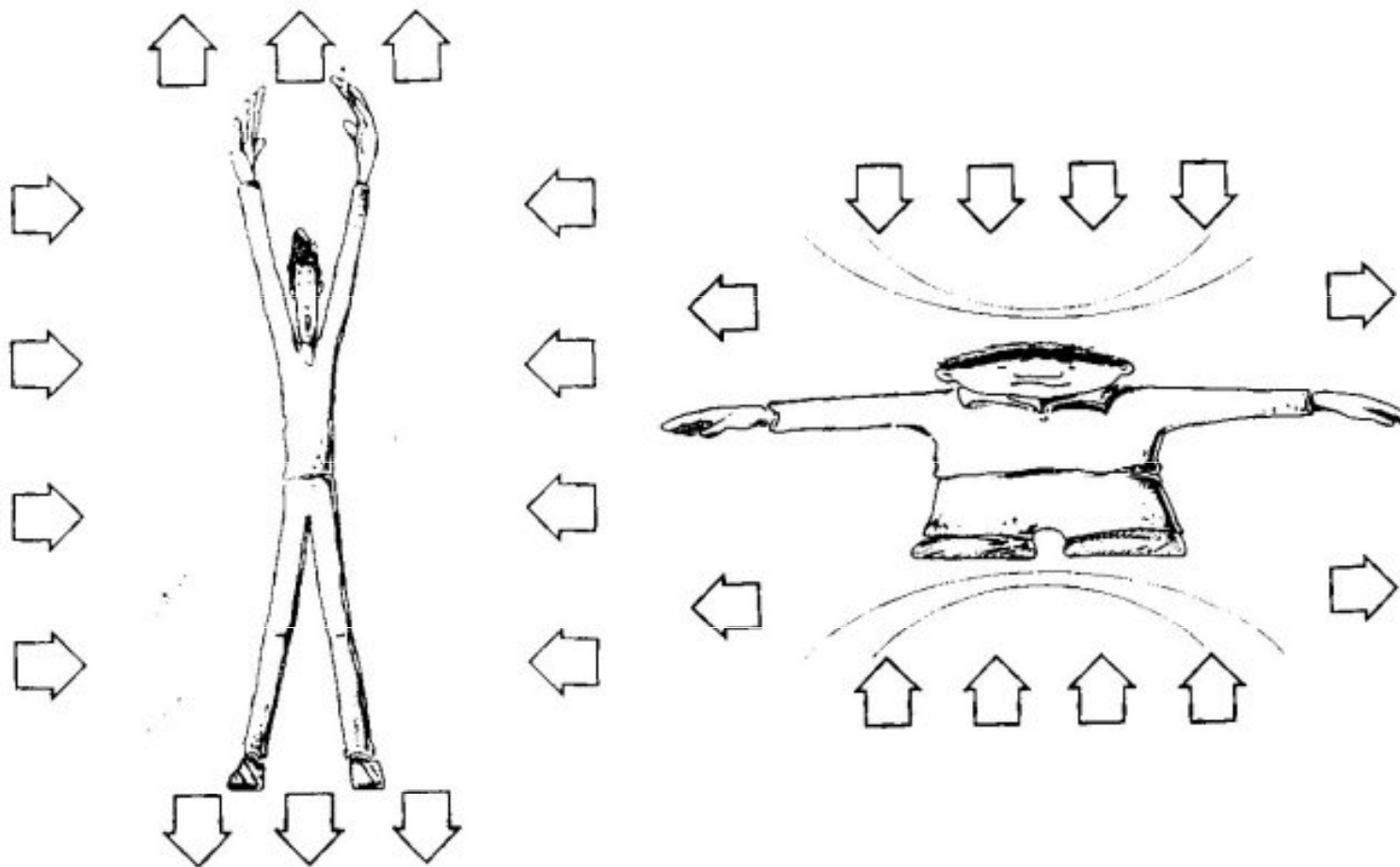
- obří interferometry ESA
- 3 družice
- ve vrcholech trojúhelníka
- strany 5 milionů km
- oběh kolem Slunce 1 AU
- za Zemí 20°
- sklon roviny 60°



- 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

Děkuji za pozornost



Zdroje:

Podolský J.: *Gravitační vlny a možnosti jejich detekce*, Pokroky mat. fyz. a astr. 40 (1995) 272.

LIGO – videa, MIT <http://www.aldebaran.cz/bulletin>, Petr Kulhánek 2016

Novotny J., Horsky J.: *Proceedings of Einstein Foundation International.*, Vol.1, No.2 (1983) 171-181,
On the energy-momentum pseudotensors and the quadrupole formulae

Základní formule: Einstein 1915, 1916, 1918

Interval a metrika $ds^2 = g_{ik} dx^i dx^k$

Rozklad pro malé poruchy $g_{ik} = g_{ik}^0 + h_{ik}$

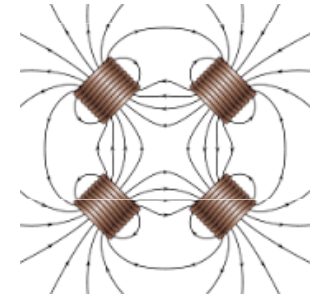
$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_\alpha \partial x_\alpha}$$

Důsledek Einstein.rovnic $\square h_{ik} = 0$

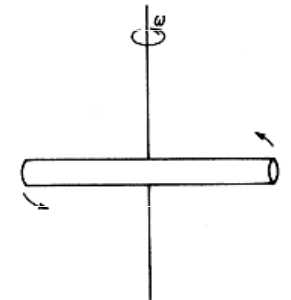
$$\square = \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}$$

Nenulové komponenty pouze $h_{23}, h_{22} = -h_{33}$

pro vlnu ve směru x_1



Kvadrupólový moment $D_{\alpha\beta} = \int \mu (3x_\alpha x_\beta - r^2 \delta_{\alpha\beta}) dV$



Vyzařovaný výkon $-\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{k}{45c^5} \ddot{D}_{\alpha\beta}^2$

Pro 2 tělesa při kruhovém pohybu

$$-\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{32k^4 m_1^2 m_2^2 (m_1 + m_2)}{5c^5 r^3}$$

Pro sblížení 2 těles při kruhovém pohybu

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{64k^3 m_1 m_2 (m_1 + m_2)}{5c^5 r^3}$$