

Gravitační vlny



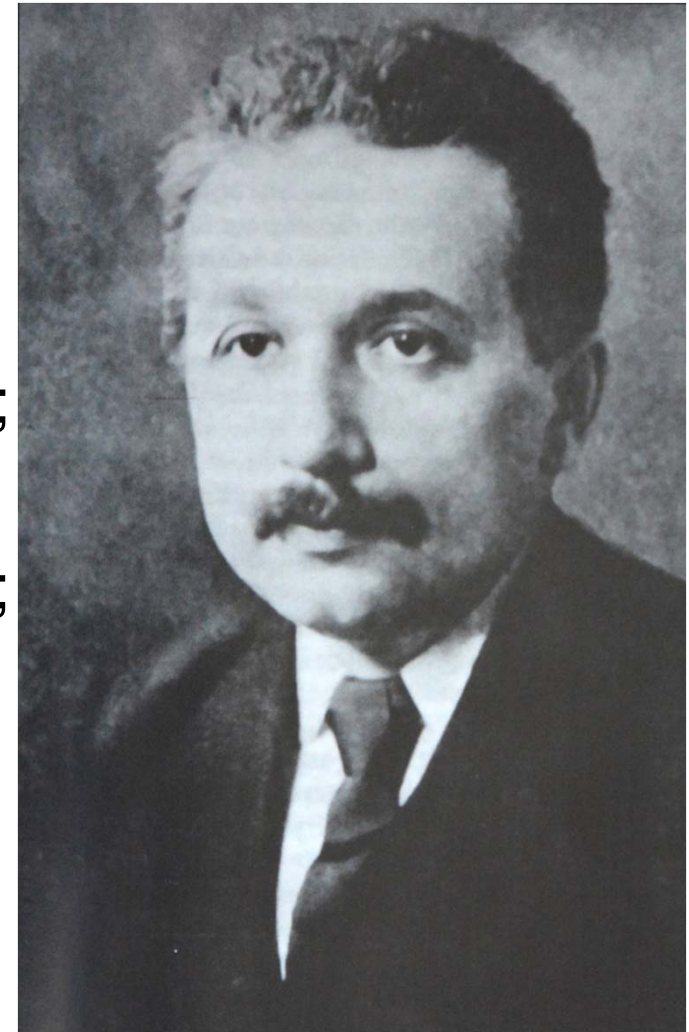
© Jaroslav Reichl, SPŠST Panská, Praha

inspirováno přednáškou Jiřího Podolského, MFF UK Praha

ALBERT EINSTEIN

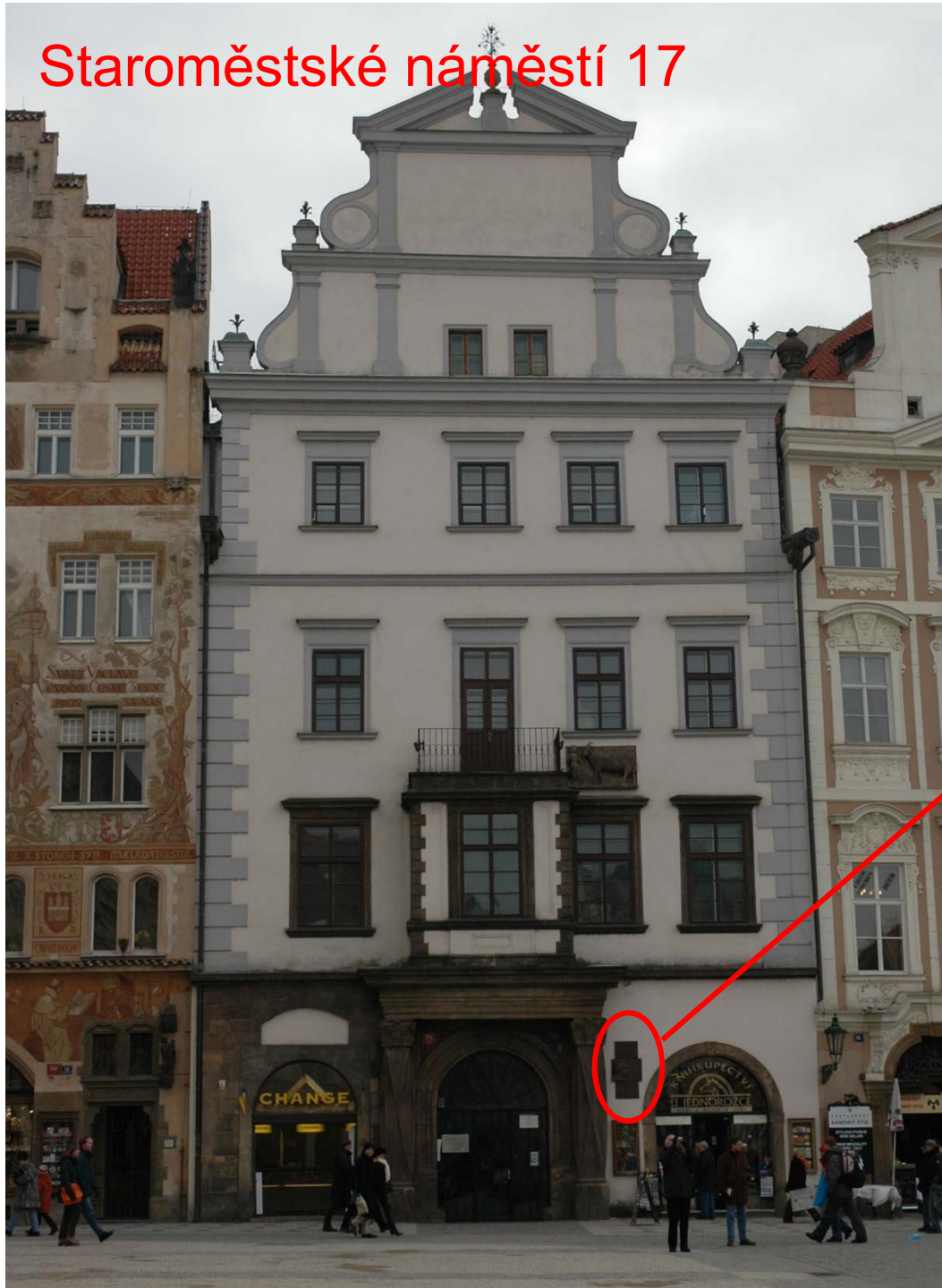
Albert EINSTEIN (14. 3. 1879 v Ulmu – 18. 4. 1955 v Princetonu)

- 1900 – první publikace v *Annalen der Physik*;
- 1904 – svatba s Milevou Maričovou;
- 1905 – přelomový rok
 - kvantové šíření záření;
 - vysvětlení Brownova pohybu;
 - publikace speciální teorie relativity;
- 1911 – 1912 přednáší v Praze;
- 1916 – 1918 – obecná teorie relativity;
- 1919 – rozvod a druhá svatba;
- 1932 – odjezd do USA;
- 1939 – dopis F. D. Rooseveltovi;
- do konce života – kvantová fyzika, ...

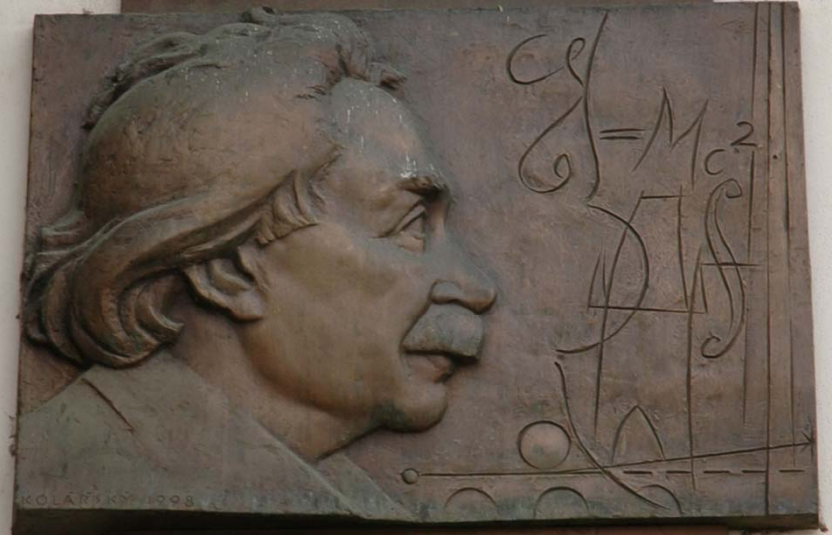


Zdroj: A. Einstein: *Jak vidím svět*

Staroměstské náměstí 17



V TOMTO DOMĚ „U JEDHOROŽCE“ V SALONU
BERTY FANTOVÉ, V LETECH 1911 AŽ 1912
HRÁVAL NA HOUSLE A SETRÁVAL SE ZDE
S PŘÁTELI, SPISOVATELI MAXEM BRODEM
A FRANZEM KAFKOU, PROFESOR TEORETICKÉ
FYZIKY NA PRAŽSKÉ UNIVERZITĚ, TVŮRCE
TEORIE RELATIVITY, NOSITEL NOBELOVY CENY.
ALBERT EINSTEIN.



HERE, IN THE SALON OF MRS. BERTA FANTA,
ALBERT EINSTEIN, PROFESSOR
AT PRAGUE UNIVERSITY IN 1911 TO 1912,
FOUNDER OF THE THEORY OF RELATIVITY,
NOBEL PRIZE WINNER, PLAYED THE VIOLIN
AND MET HIS FRIENDS, FAMOUS WRITERS
MAX BROD AND FRANZ KAFKA.

JEDNOTA ČESKÝCH MATEMATIKŮ A FYZIKŮ  MĚSTSKÝ ÚŘAD PRAHA

CESTA K OTR

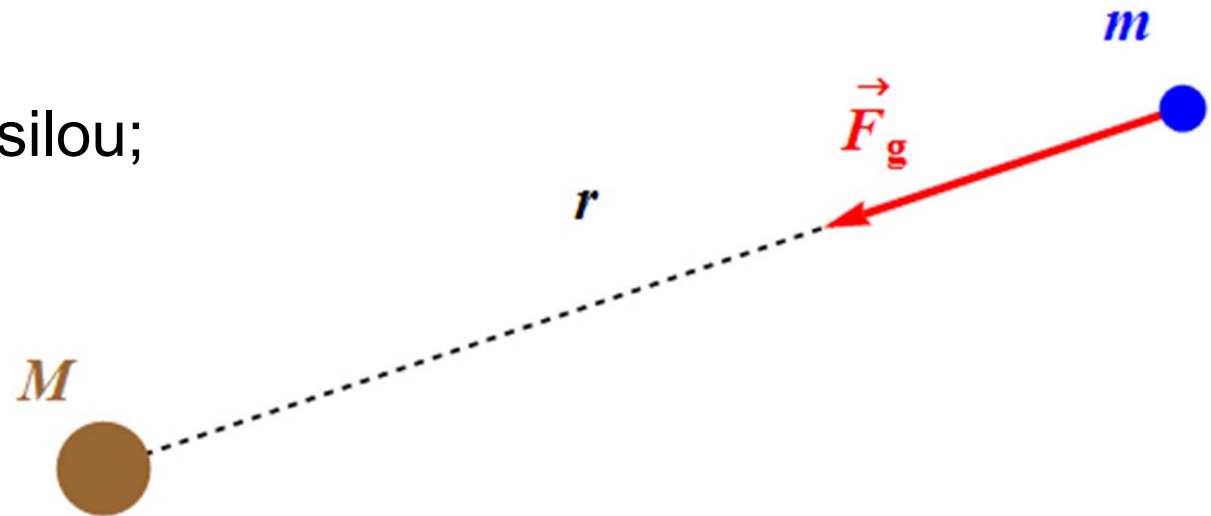
obecná teorie relativity (teorie gravitace):

- 1905 (Bern) – *současnost* závisí na volbě vztažné soustavy;
- 1907 (Bern) – princip ekvivalence;
- 1912 (Praha) – důsledky principu ekvivalence (ohyb světla, frekvenční posun, ...), hlavní rysy nové teorie;
- 1913 (Curych) – relativistická teorie gravitace (Gauss, Riemann, Grossmann);
- 25. 11. 1915 (Berlín) – přednáška, v níž prezentuje finální rovnice gravitačního pole.

NEWTON x EINSTEIN

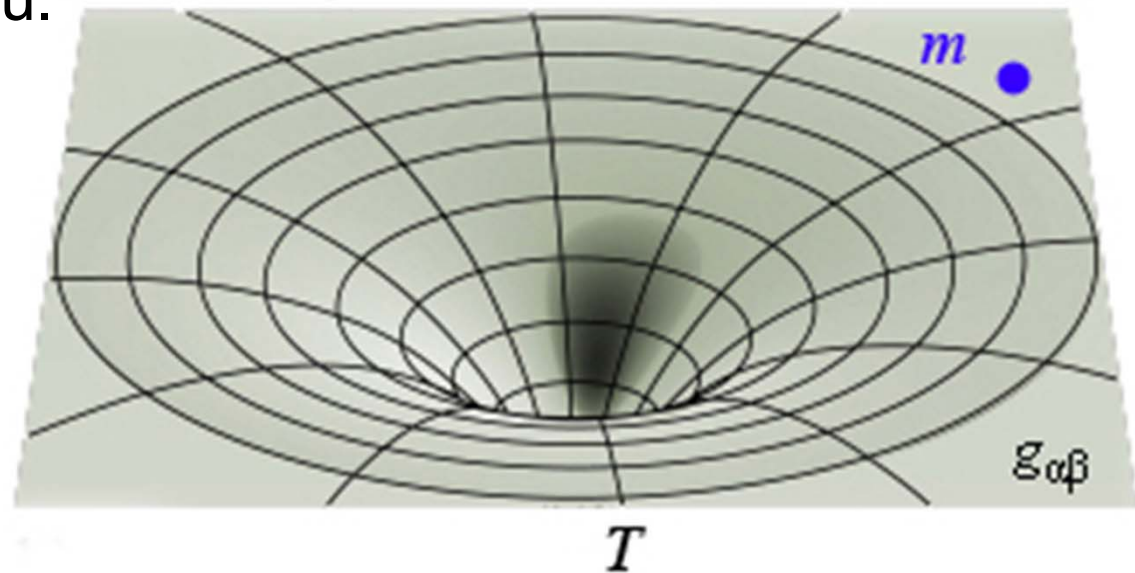
Newton

- gravitace popsána silou;
- působení na dálku.



Einstein

- gravitace popsána polem (polní teorie);
- zakřivení prostoročasu.



EINSTEINOVY ROVNICE GRAVITACE

Einsteinovy rovnice vyjádřené pomocí diferenciální geometrie:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R \cdot g_{\mu\nu} + \Lambda \cdot g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

The diagram illustrates the components of the Einstein field equations. Callout boxes identify the terms as follows:

- $R_{\mu\nu}$: Ricciho tenzor
- R : skalární křivost
- $g_{\mu\nu}$: metrika prostoročasu
geometrie, pole
- Λ : kosmologická konstanta
- $T_{\mu\nu}$: tenzor energie-hybnosti
pohyb těles

- nelineární parciální diferenciální rovnice;
- geometrie prostoročasu „říká“ hmotě, jak se má pohybovat;
- hmota se pohybuje a ovlivňuje tvar prostoročasu.

CESTA KE GRAVITAČNÍM VLNÁM

myšlenka na existenci gravitačních vln se rodila postupně:

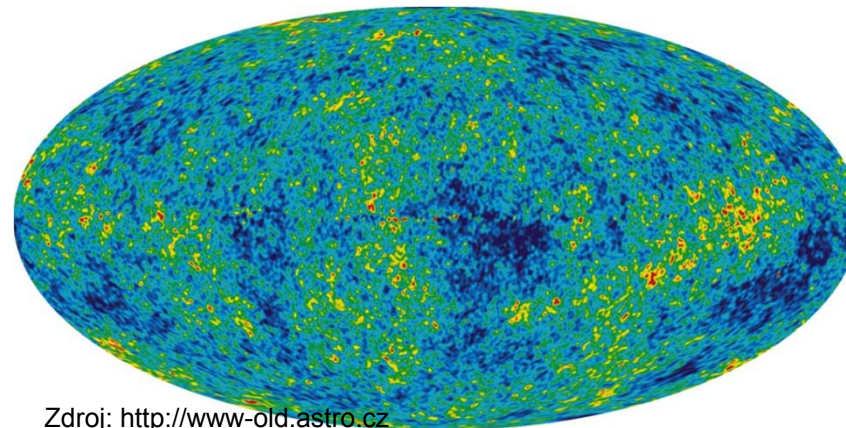
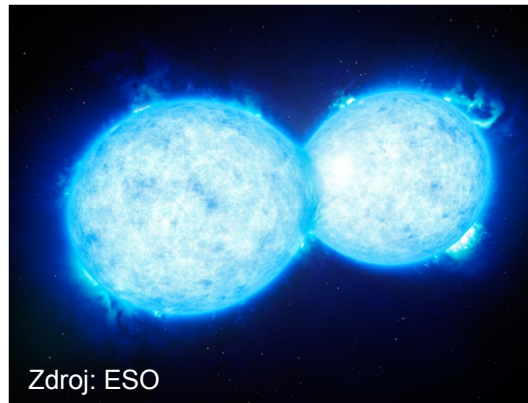
- 1911 – *O vlivu gravitace na šíření světla*, ohyb světla v gravitačním poli;
- 1913 – *Nástin zobecněné teorie relativity a teorie gravitace*, spolu s M. Grossmannem;
- 1916 – *Základy obecné teorie relativity*, publikace rovnic;
- 1916 – *Aproximativní integrace rovnic gravitačního pole*, předpověď existence gravitačních vln:
 - plochý prostoročas
 - malé poruchy, které lze popsat lineárně;
 - vlastnosti gravitačních vln;
- 1918 – *O gravitačních vlnách*, oprava drobných chyb, zpřesnění poznatků, další diskuse vlastností gravitačních vln.

VLASTNOSTI GRAVITAČNÍCH VLN

- zdroje
 - nesymetrický zrychlený pohyb hmoty;
 - závisí na excentricitě trajektorie, po níž se hmota pohybuje: rostoucí excentricita – roste intenzita vln;
 - kvadrupólové vlnění.

možné zdroje

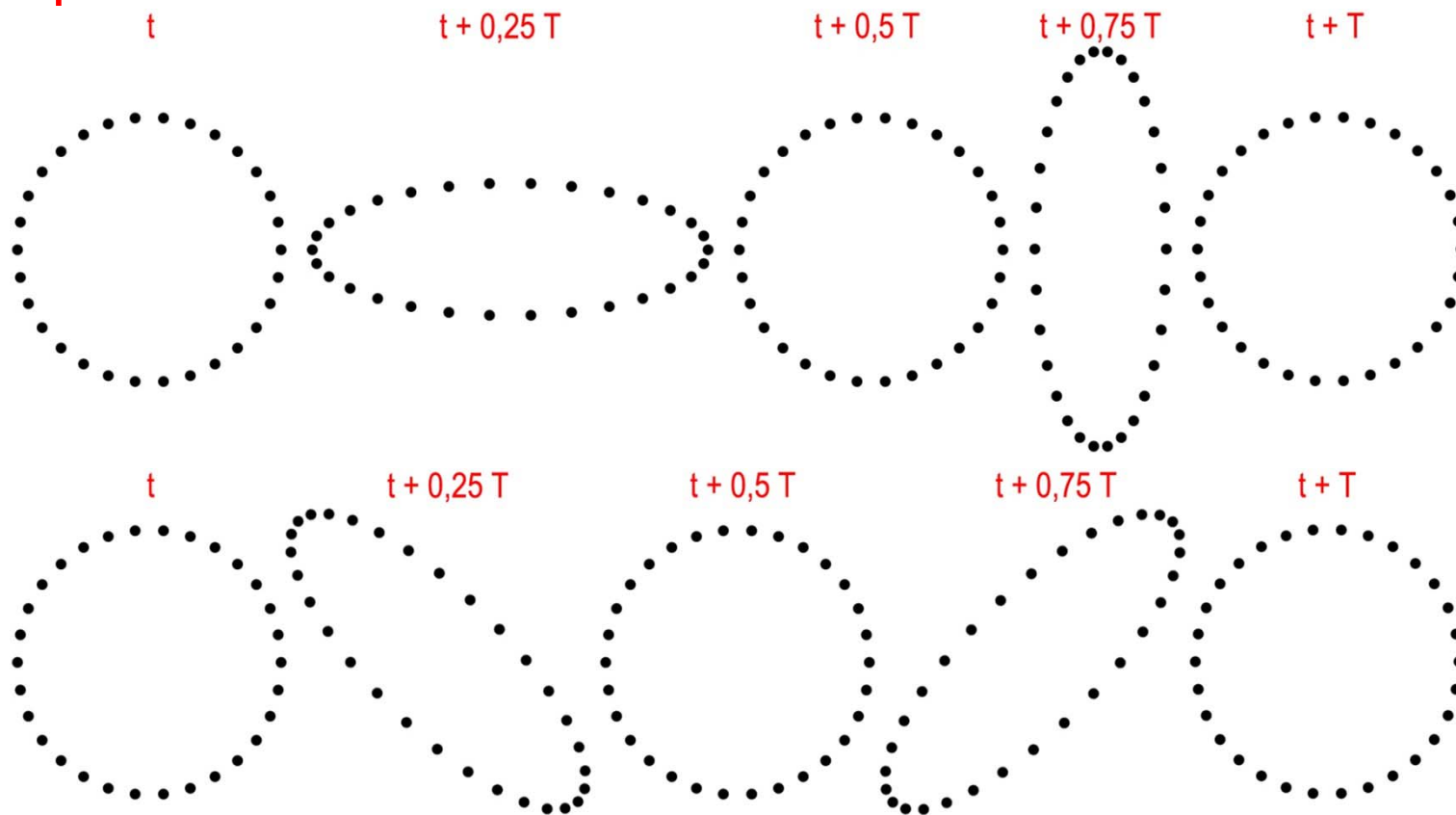
- kompaktní dvojhvězdy;
- supernovy;
- velký třesk.



VLASTNOSTI GRAVITAČNÍCH VLN

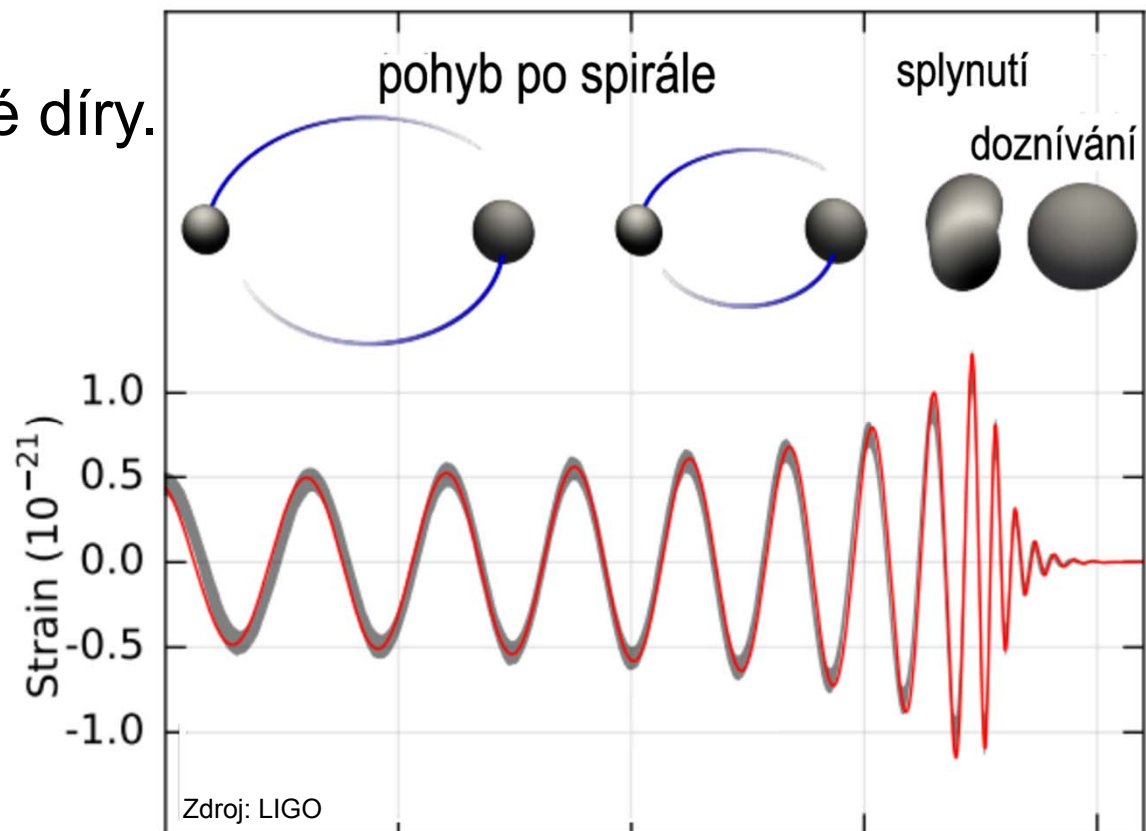
- periodické změny křivosti prostoročasu;
- příčné vlny;
- šíří se rychlostí o velikosti c ;
- dvě polarizace.

elektromagnetické vlnění

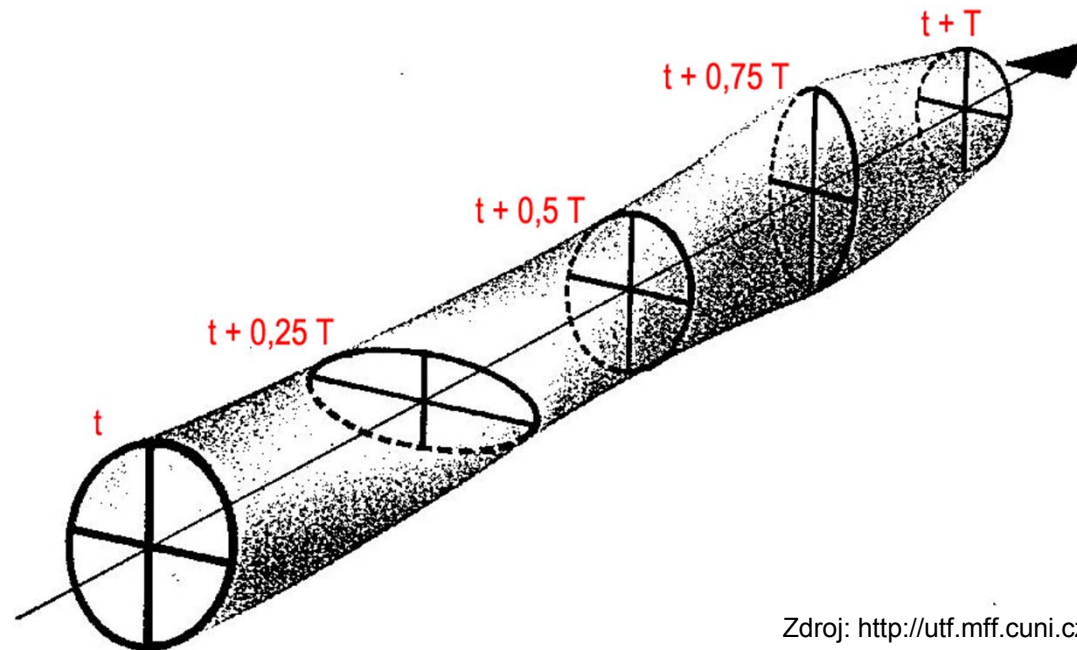


VLASTNOSTI GRAVITAČNÍCH VLN

- pro detekci na Zemi – zdrojem kompaktní dvojhvězdy velkých hmotností;
- po roce 2000 – numerická relativita, která řeší Einsteinovy rovnice numericky;
- předpověď chování dvou hmotných objektů, které kolem sebe obíhají;
- simulace pro dvě černé díry.

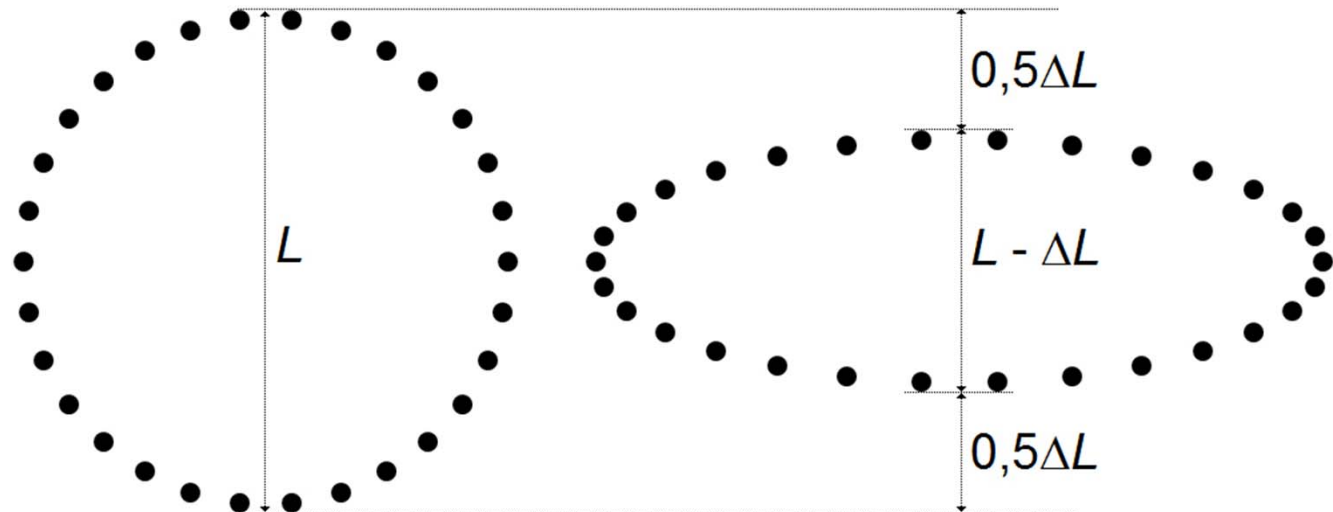


PROBLÉMY DETEKCE GRAVITAČNÍCH VLN



- malé amplitudy gravitačních vln – malé deformace objektů na Zemi

$$h = \frac{\Delta L}{L}$$

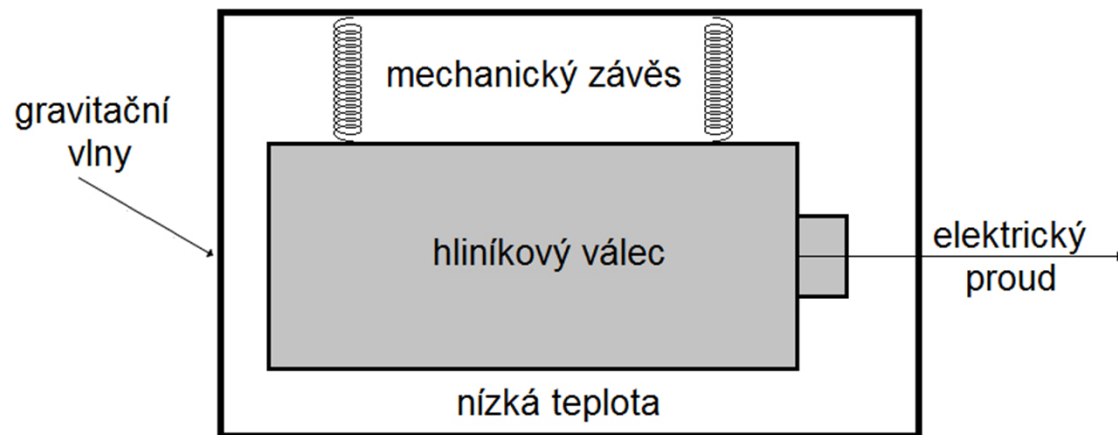


PROBLÉMY DETEKCE GRAVITAČNÍCH VLN

- frekvence (10; 1000) Hz;
- h z intervalu (10^{-24} ; 10^{-22});
 - vzdálenost Země – Slunce s přesností na 100 protonů;
 - vzdálenost Praha – Brno s přesností na padesátinu atomového jádra;
 - délka metrové tyče s přesností na miliardtinu atomového jádra;
- někteří fyzikové váhají, zda gravitační vlny existují, i sám Einstein koncem třicátých let pochybuje;
- jiní fyzikové se snaží vymyslet způsob, jak gravitační vlny detekovat na Zemi.

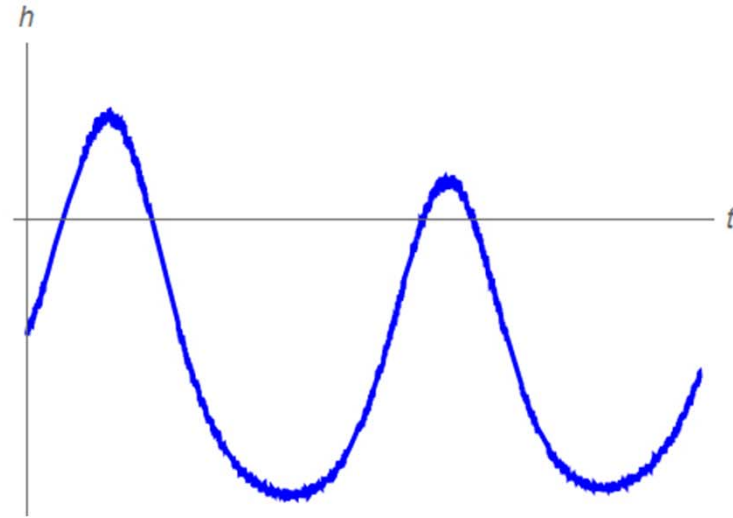
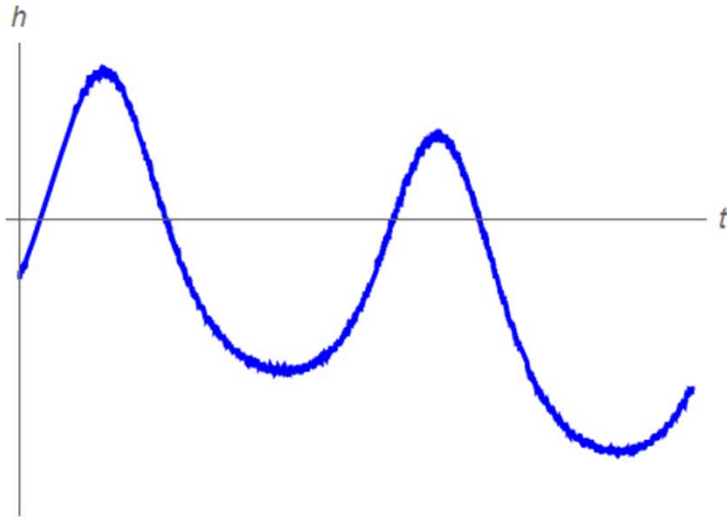
PRVNÍ POKUSY O DETEKCI GRAVITAČNÍCH VLN

- americký fyzik Joseph Weber (1919 - 2000);
- rezonanční detektor, piezokrystaly;
- frekvenční omezení (900; 1100) Hz;
- postupné vylepšování – více kolaborujících detektorů, zkoumání korelace signálů;
- 1960 – *Detekce a generování gravitačních vln.*

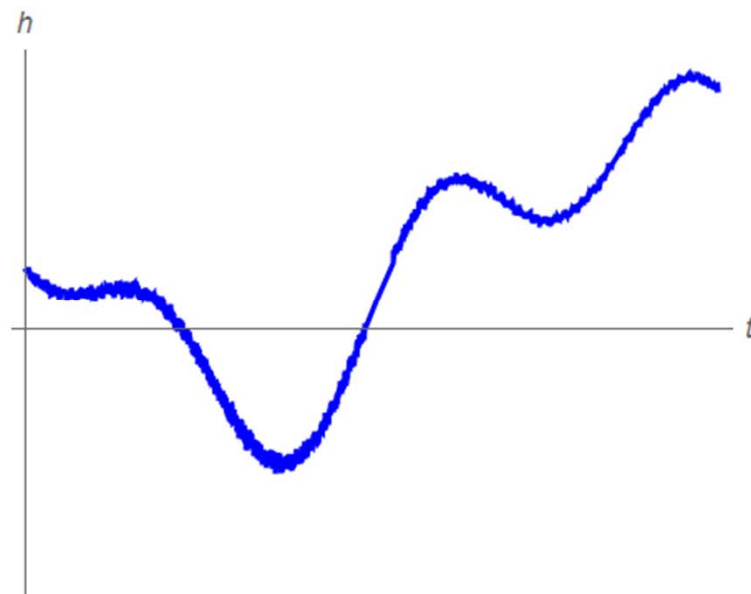
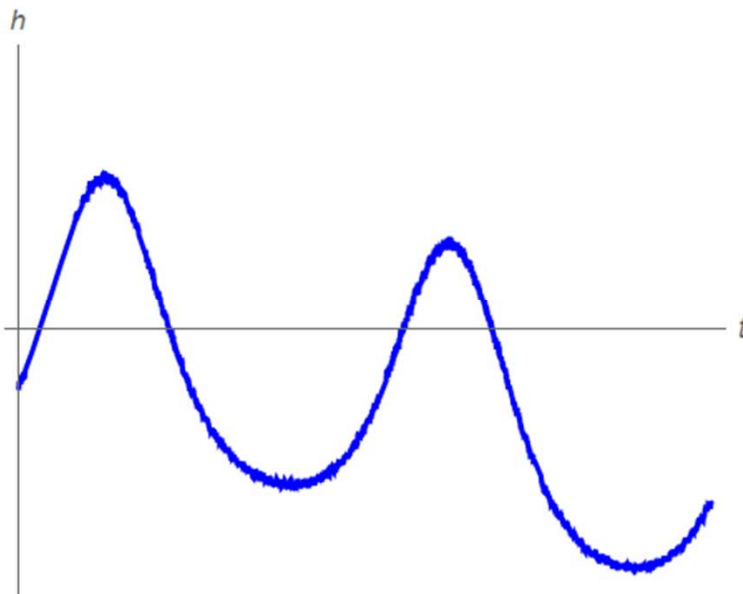


PRVNÍ POKUSY O DETEKCI GRAVITAČNÍCH VLN

- korelující signály

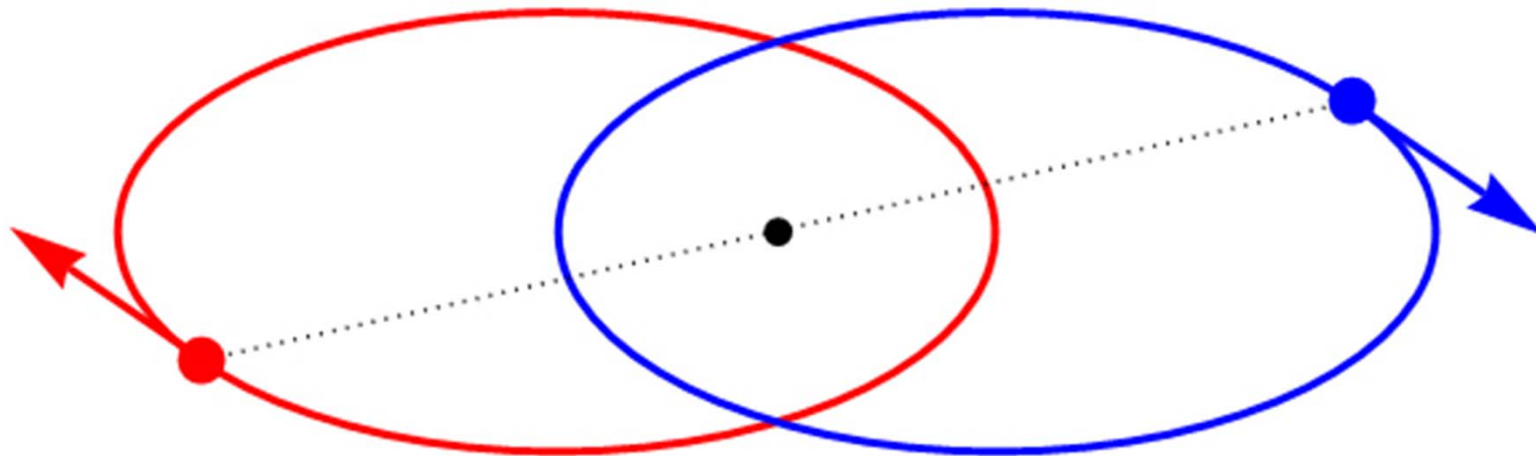


- nekorelující signály



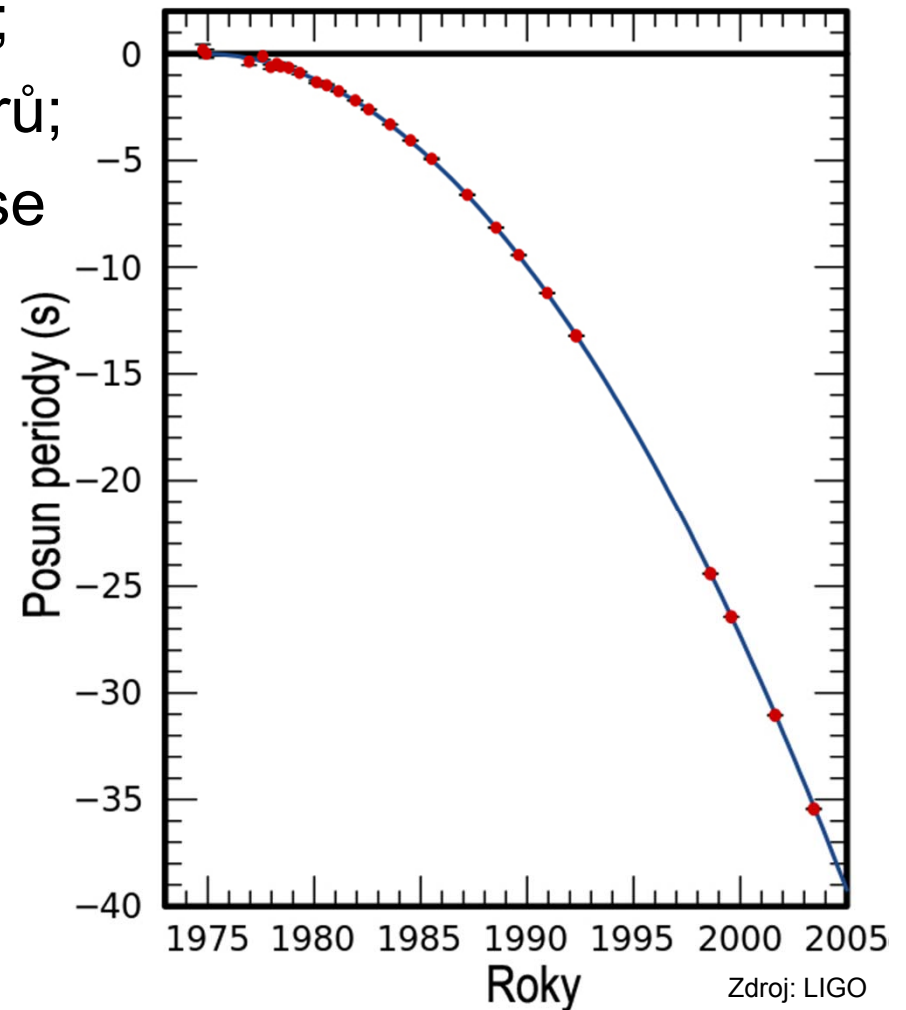
BINÁRNÍ PULSAR PSR B1913+16

- 1974 – Russell Alan Hulse a Joseph Hooton Taylor objevili binární pulsar PSR B1913+6;
- v souhvězdí Orla;
- 21 000 ly od Země;
- 2 neutronové hvězdy o hmotnostech $1,387 M_{\odot}$ a $1,441 M_{\odot}$;
- vzájemná vzdálenost: 700 000 km až 3 100 000 km;
- oběžná doba: 7,75 h;
- při každém oběhu se přiblíží k sobě o 3,1 mm;
- každý rok se oběžná doba zkrátí o $76 \mu\text{s}$.



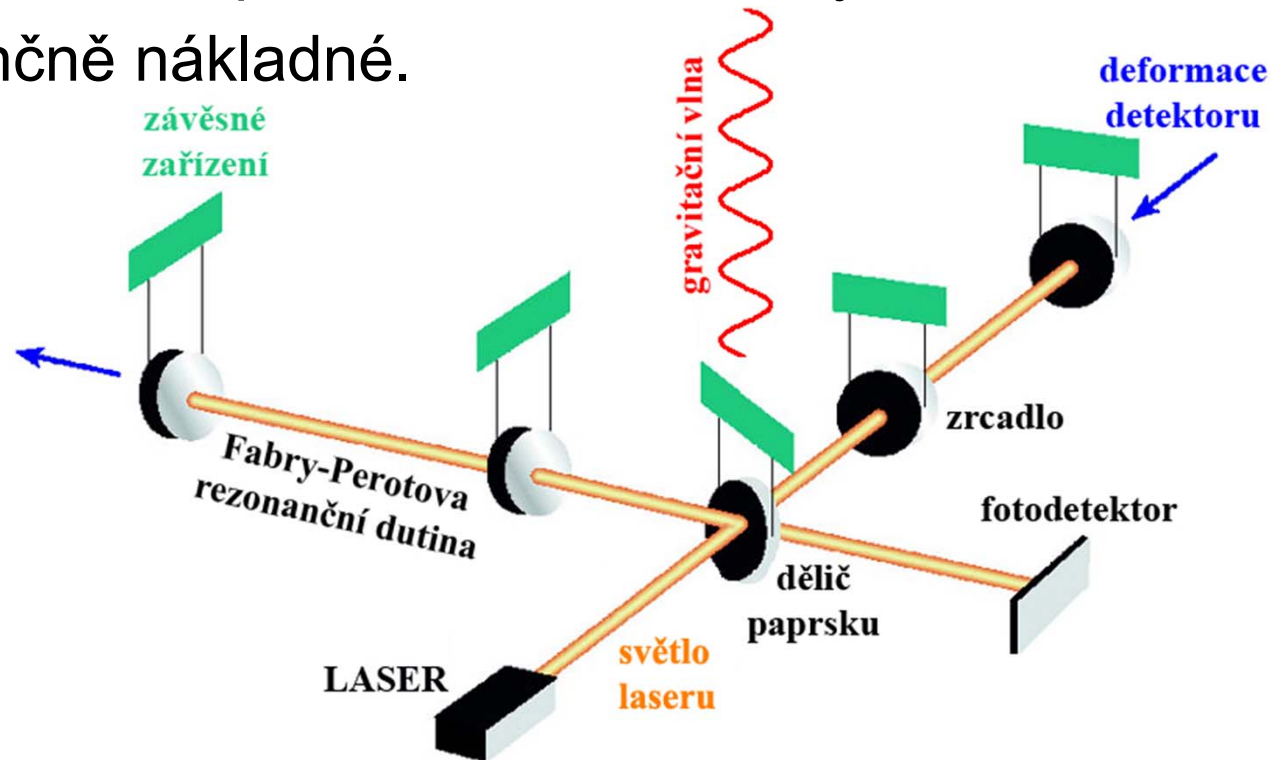
EXISTENCE GRAVITAČNÍCH VLN POTVRZENA

- vysvětlení: část energie pulsaru je vyzařována ve formě gravitačních vln;
- existence gravitačních vln byla tedy **potvrzena** – o jejich existenci již nikdo nepochybuje;
- potvrzeno objevy dalších pulsarů;
- 1993 – Nobelova cena pro Hulse a Taylora.



PRVNÍ INTERFEROMETRY

- od 90. let 20. století;
- zásadní odlišnost od Weberova detektoru;
 - využití interference světla, větší frekvenční rozsah;
 - zvýšení citlivosti až na 10^{-21} až 10^{-22} ;
 - pro požadovanou citlivost 10^{-24} je nutné prodloužit délku ramen nebo použít mnohonásobný odraz světla;
 - finančně nákladné.



PRVNÍ INTERFEROMETRY

- postupně vybudovány detektory:
 - MARK 2 (Caltech, USA) – 40 metrů;
 - TAMA 300 (Tokyo, Japonsko) – 300 metrů;
 - GEO 600 (Hannover, Německo) – 600 metrů;
 - LIGO (Hanford, Livingston, USA) – 4 kilometry;
 - Virgo (Pissa, Itálie) – 3 kilometry.



VIRGO – PISSA (ITÁLIE)



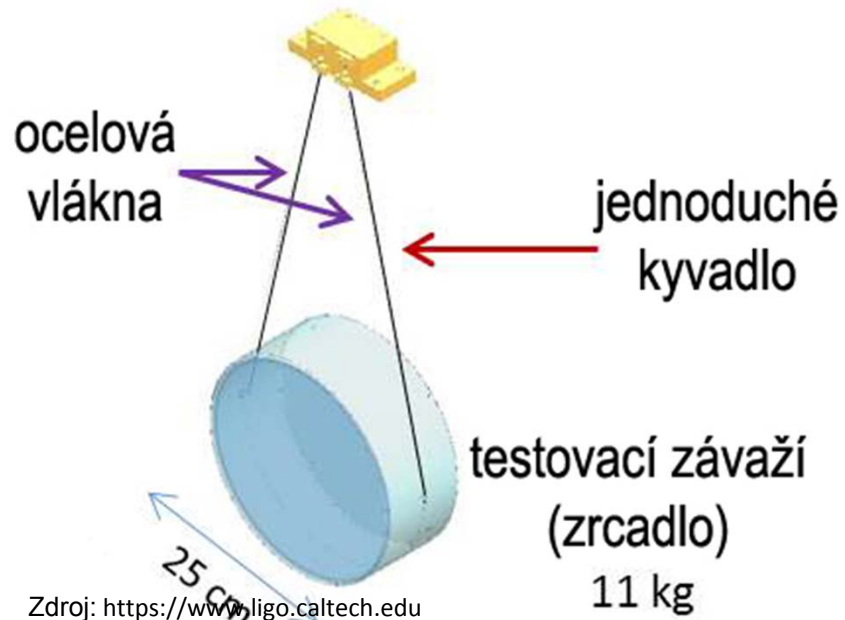
LIGO (Laser Interferometer Gravitational wave Observatory)

- 2 detektory (Hanford, Livingston, USA):
 - odlišení šumu od dat, možnost lokalizace zdroje;
 - vzdálenost 3000 km;
 - délka ramen: 4 kilometry;
 - průměr trubice: 1,5 metru;
 - největší vakuová prostora na světě: 9000 m³ ($p < 1 \mu\text{Pa}$).



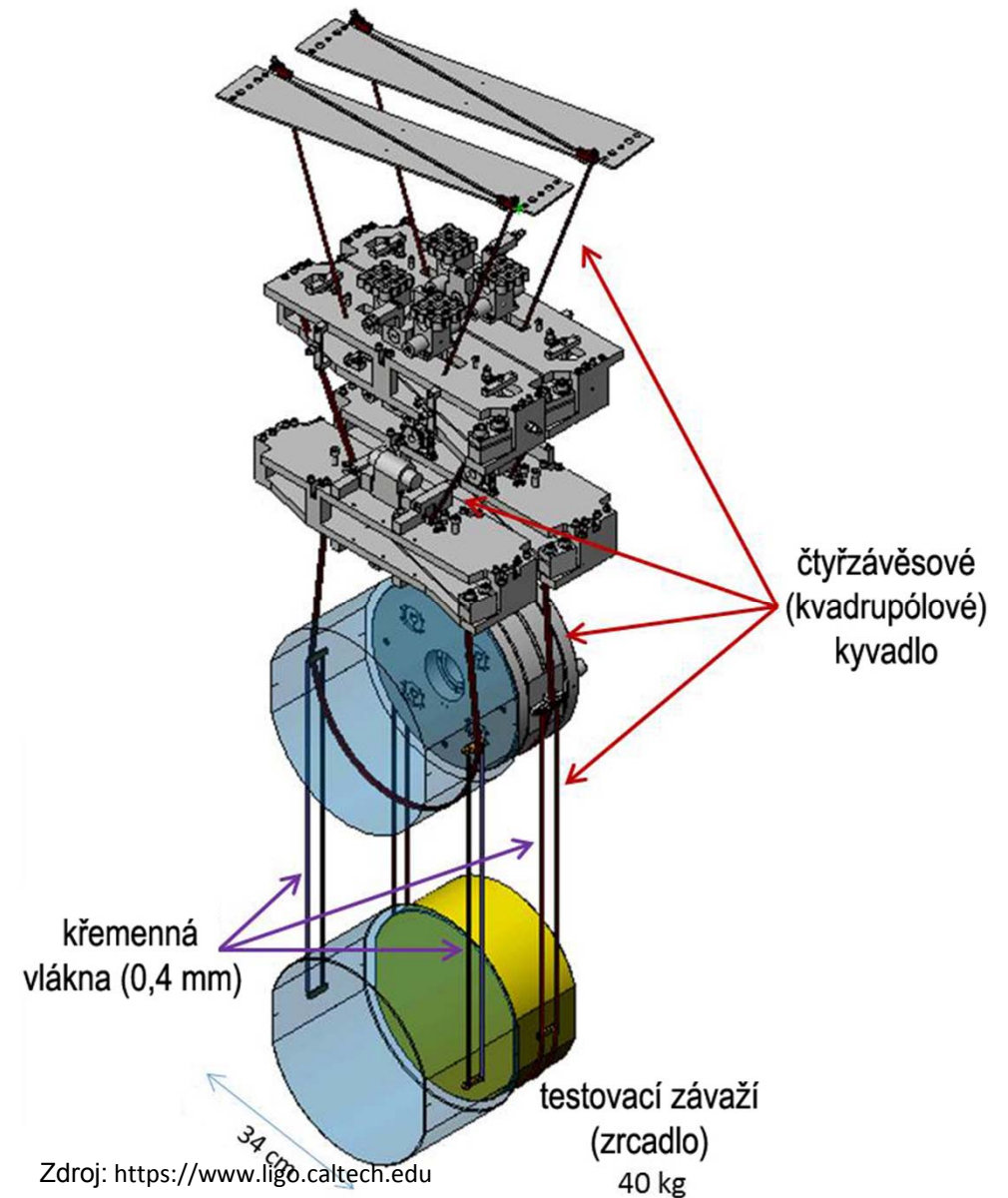
LIGO

LIGO



Zdroj: <https://www.ligo.caltech.edu>

Advanced LIGO

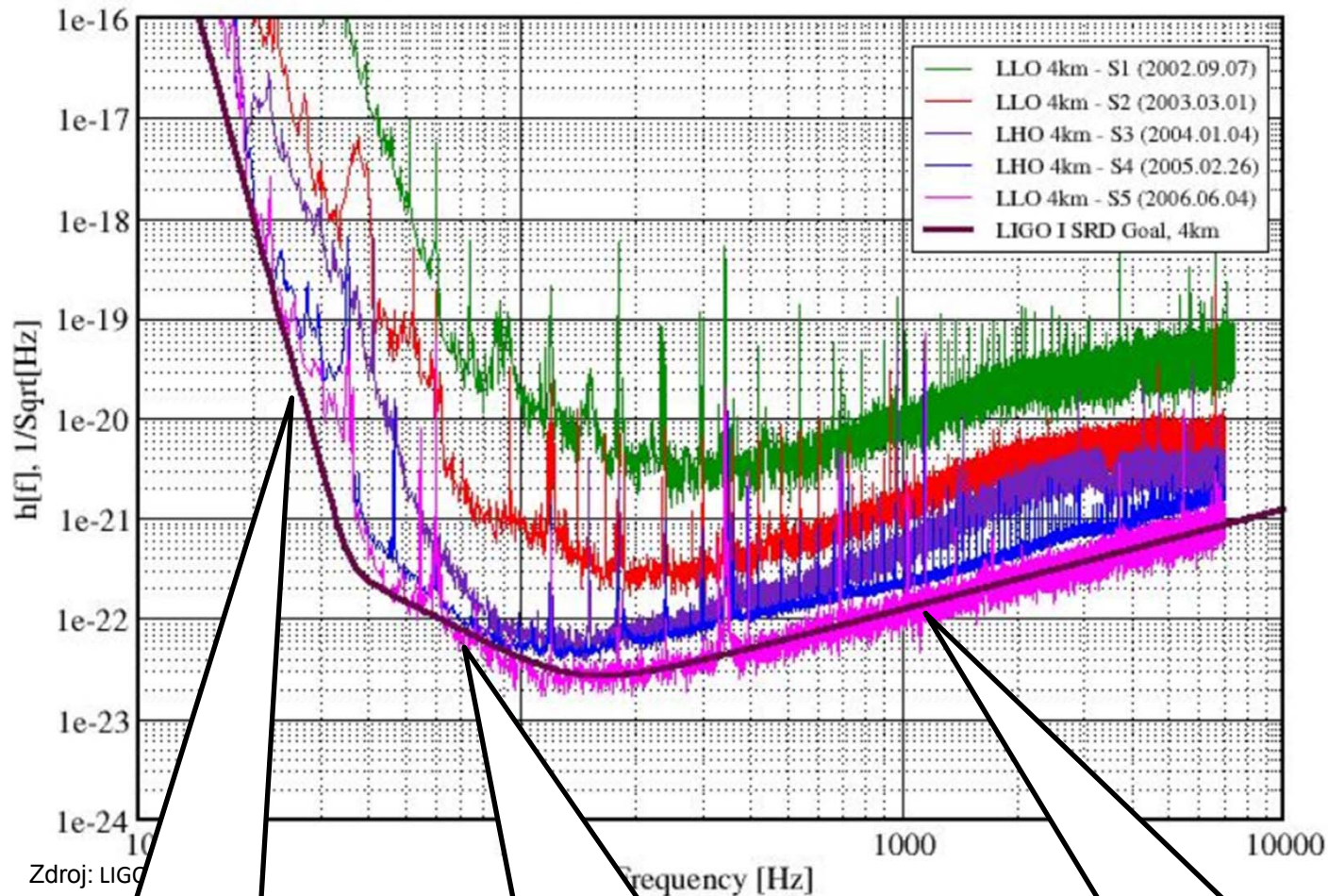


Zdroj: <https://www.ligo.caltech.edu>

LIGO

Best Strain Sensitivities for the LIGO Interferometers

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

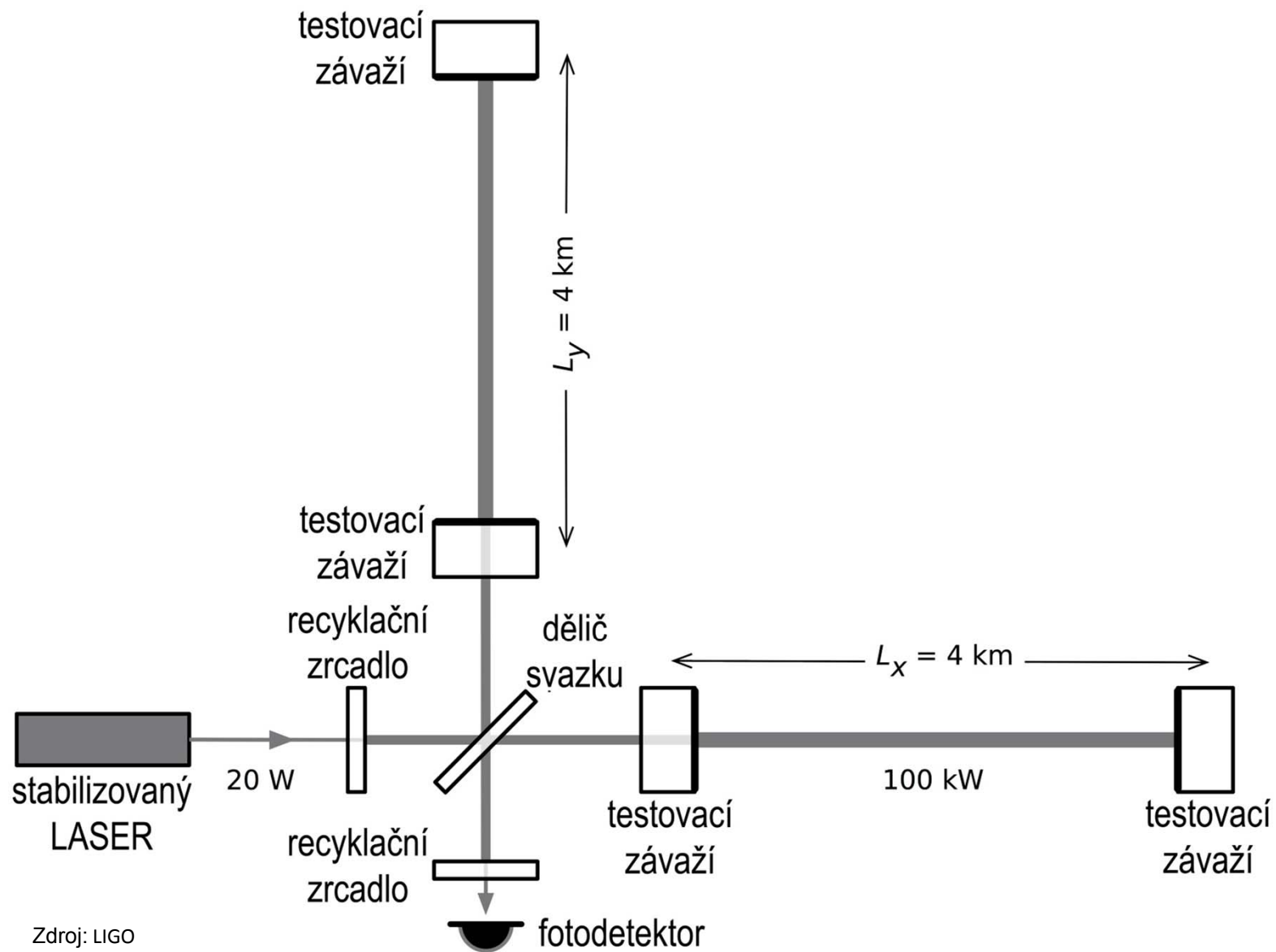


seismický šum
aktivní platforma,
čtyřkyvadlo

tepelný šum
lepší materiály,
chlazení

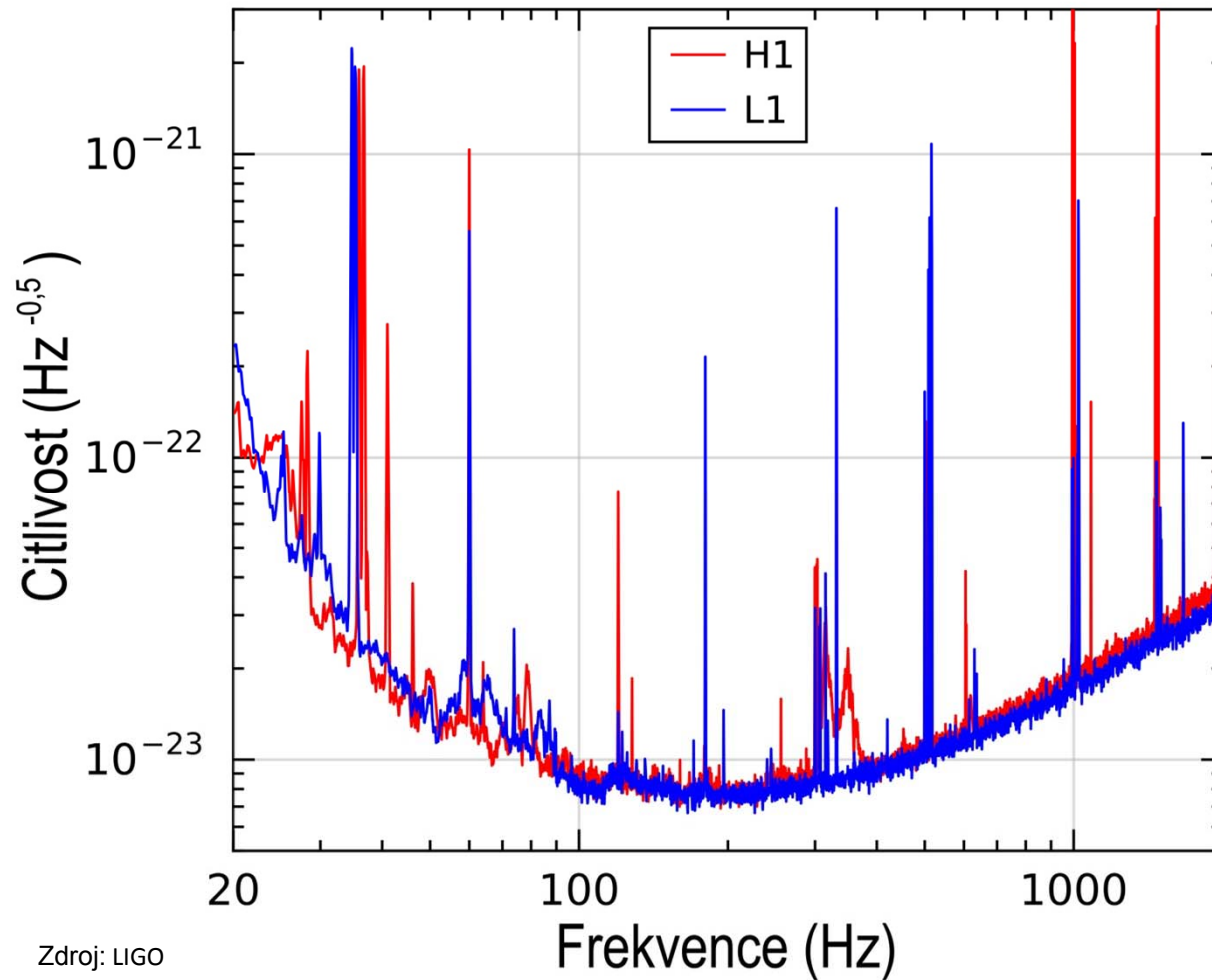
fotonový šum
výkonnější
LASER a optika

LIGO



Zdroj: LIGO

LIGO



- 33 Hz – 38 Hz;
- 60 Hz – el. proud;
- 330 Hz;
- 500 Hz – závěsy;
- 1000 Hz – závěsy;
- 1080 Hz.

kalibrační frekvence


DETEKCE GRAVITAČNÍCH VLN POTVRZENA

- 11. února 2016 ohlášena detekce gravitačních vln;
- 14. září 2015 v 9:50:45 UTC, oba detektory LIGO;
- signál trval 150 ms;
- detekce signálu dva dny před oficiálním uvedením detektoru do provozu;
- nutnost ověřit zaznamenaná data, vyčistit je od šumu, ...;
- článek ve *Physical Review Letters* – 1010 autorů a 130 institucí.



DETEKCE GRAVITAČNÍCH VLN POTVRZENA

PRL **116**, 061102 (2016)

 Selected for a Viewpoint in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

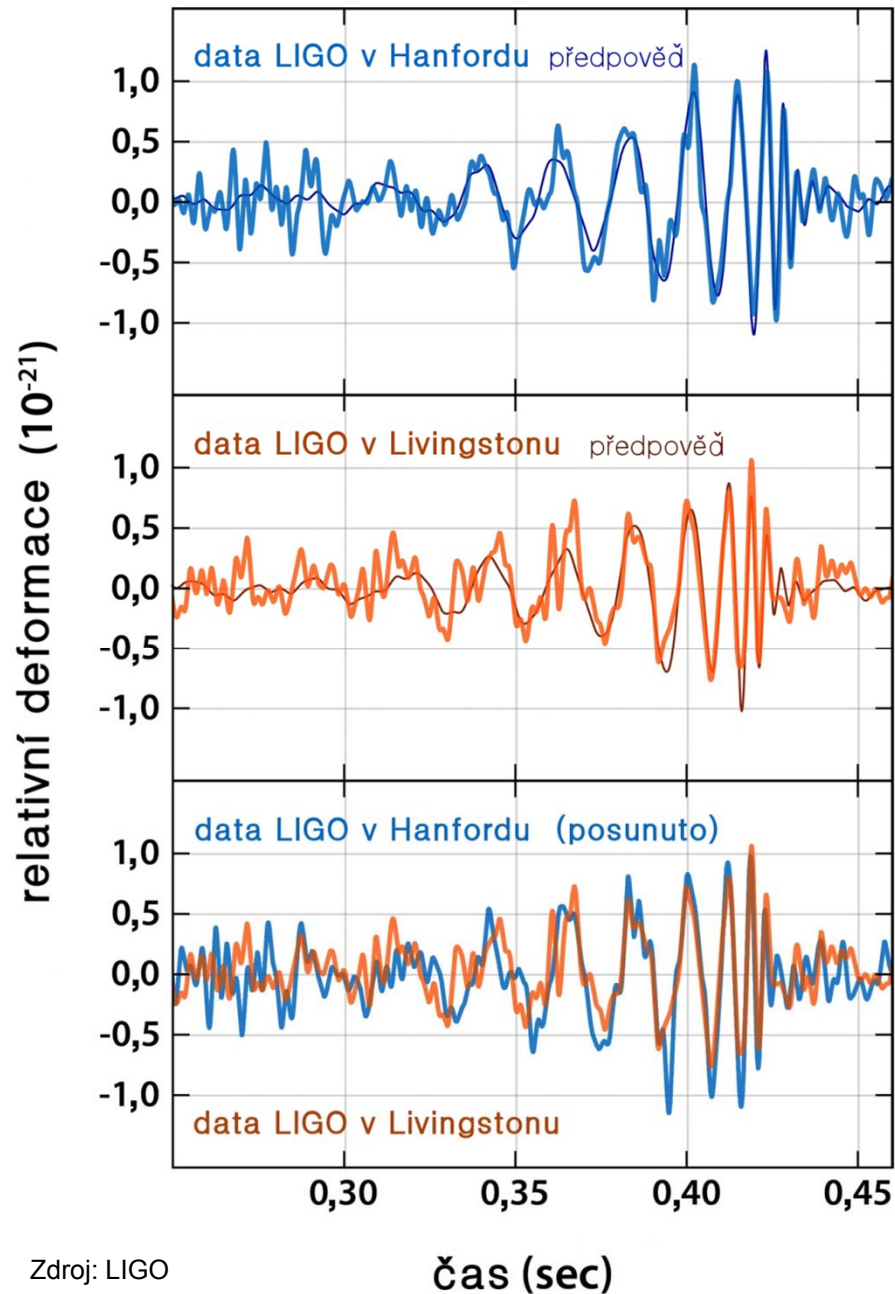
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

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.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.116.061102](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102)

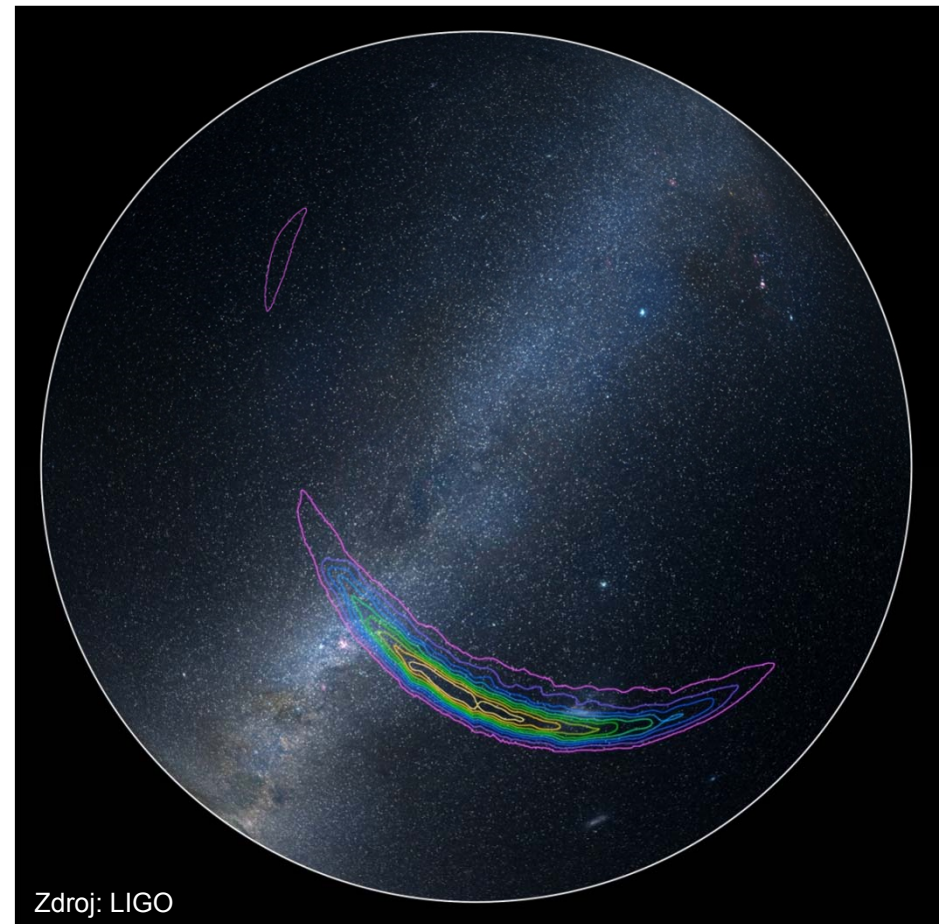
Zdroj: <http://journals.aps.org>

DETEKCE GRAVITAČNÍCH VLN

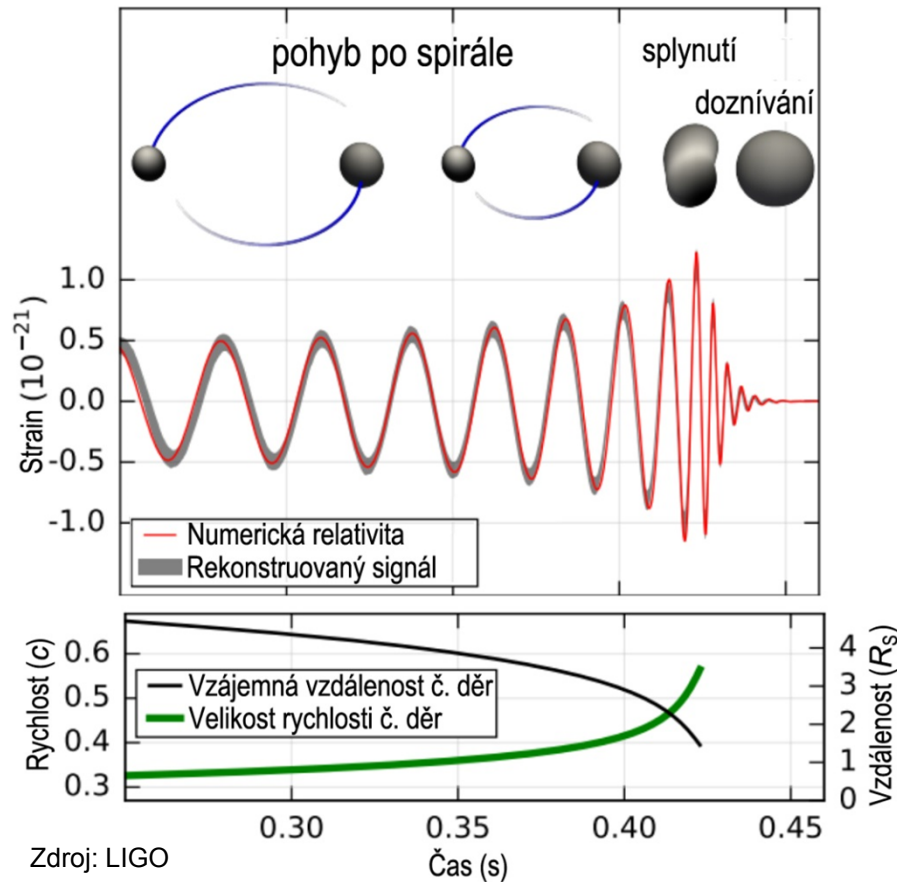


Zdroj: LIGO

- oba detektory LIGO;
- shoda dat s teorií;
- časový posun: 7 ms;
- lze částečně lokalizovat zdroj.



ZDROJ DETEKOVANÝCH GRAVITAČNÍCH VLN



Zdroj: LIGO

dvě černé díry:

- 1,2 Gly od Země;
- $36 M_S$ a $29 M_S$;
- (běžné černé díry: do $10 M_S$).

výsledný objekt:

- $62 M_S$;
- rotuje (tzv. Kerrova černá díra).

Energie $E = 3 M_S c^2$ se během 150 ms vyzářila do gravitačních vln s amplitudou 10^{-21} .

Tomu odpovídá výkon: 10^{48} W.

BUDOUCNOST DETEKTORŮ GRAVITAČNÍCH VLN

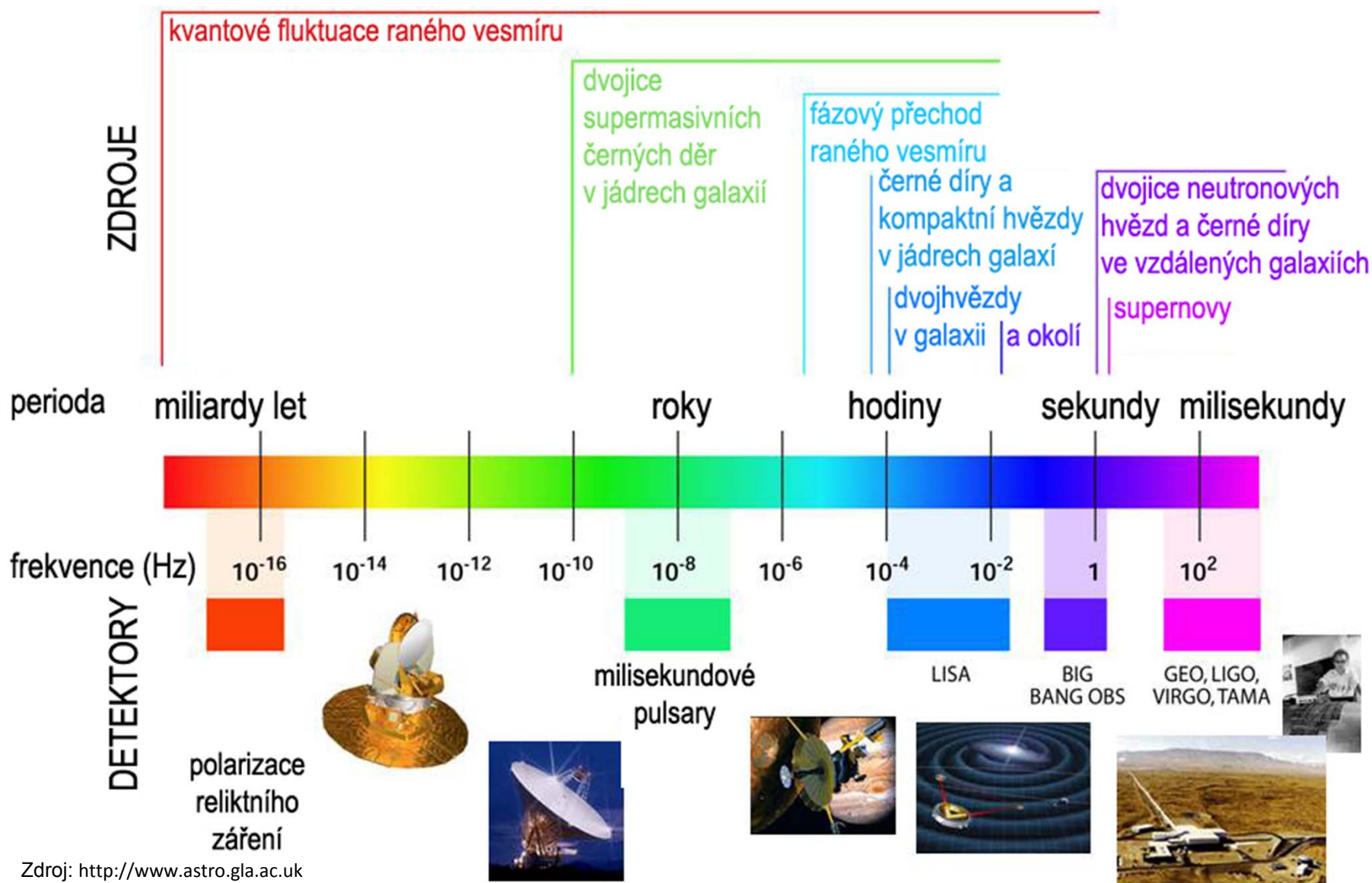
- zlepšení parametrů Advanced LIGO;
- zlepšení parametrů Advanced Virgo a spolupráce s LIGO;
- stavba LIGO-India;
- KARGA – Japonsko, 3 km, 10^{-23} ;
- ET – Evropa, 10 km, 10^{-24} ;
- (e)LISA – vesmír, až 5 Gm;
- postupné rozšiřování frekvenčního rozsahu a citlivosti.

proč tak drahá zařízení stavět:

- další výzkum vesmíru;
- potvrzení – vyvrácení některých (alternativních) teorií;
- technologický pokrok – zlevnění technologií i pro nevědecká použití.

BUDOUCNOST DETEKTORŮ GRAVITAČNÍCH VLN

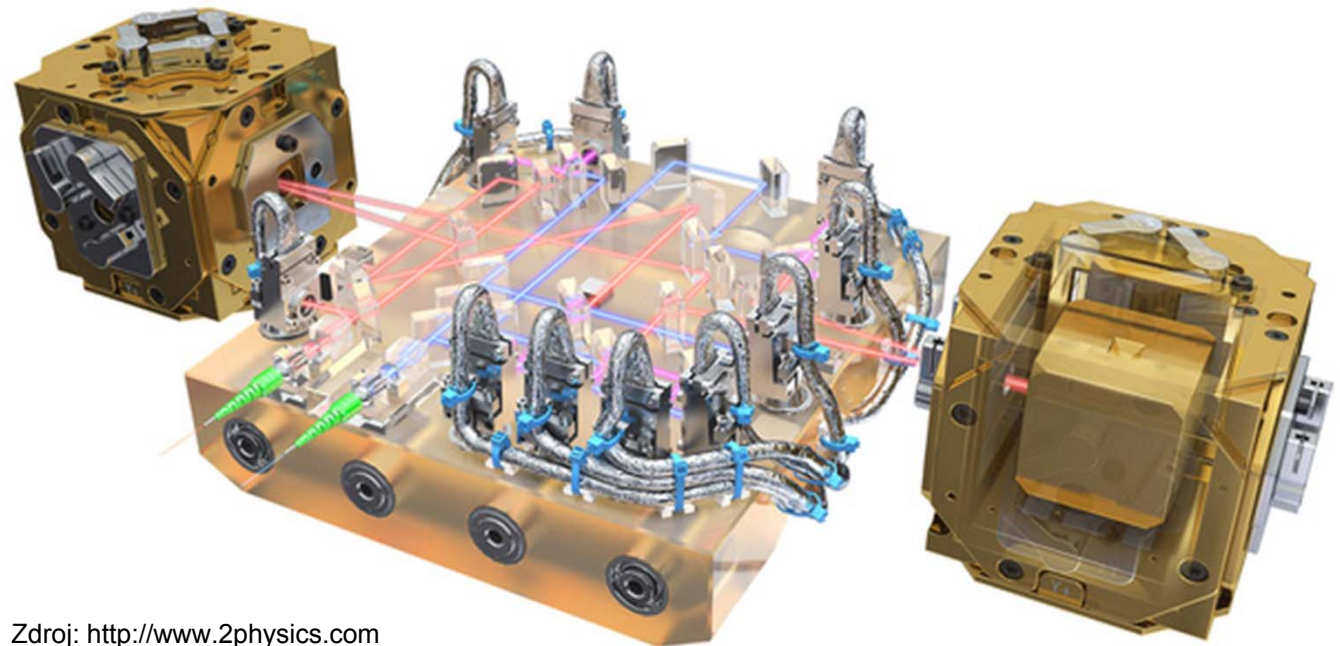
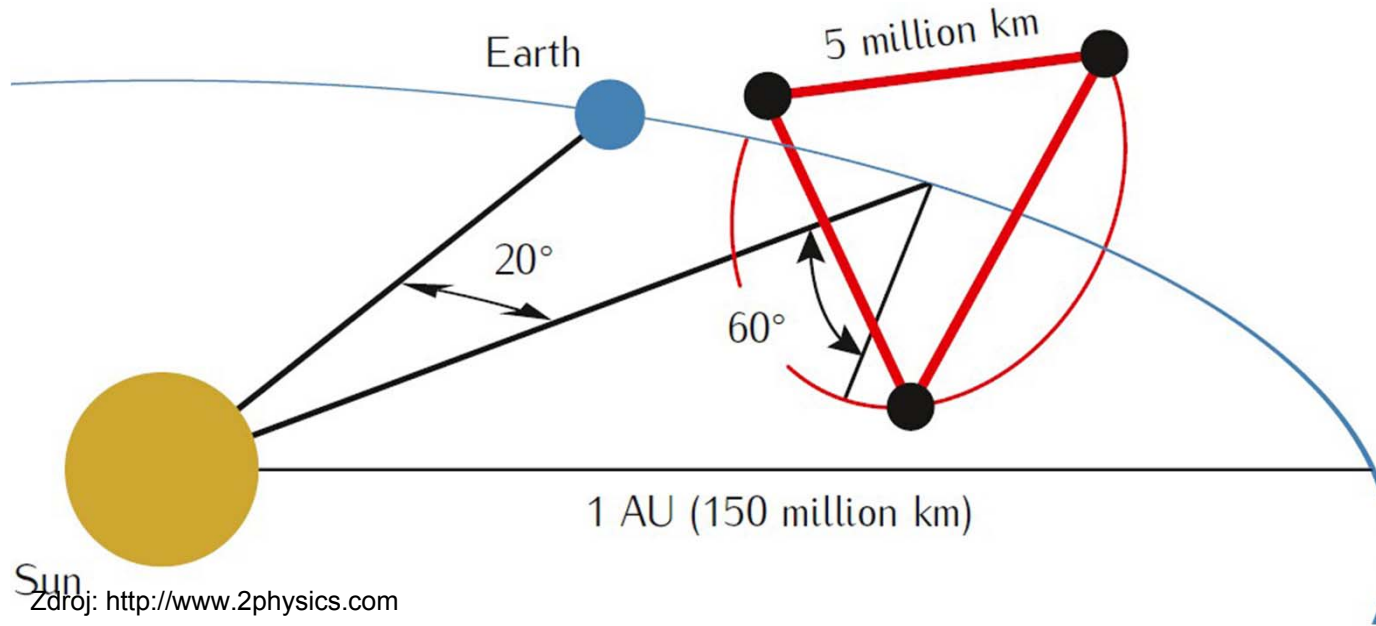
Spektrum gravitačních vln



LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*)

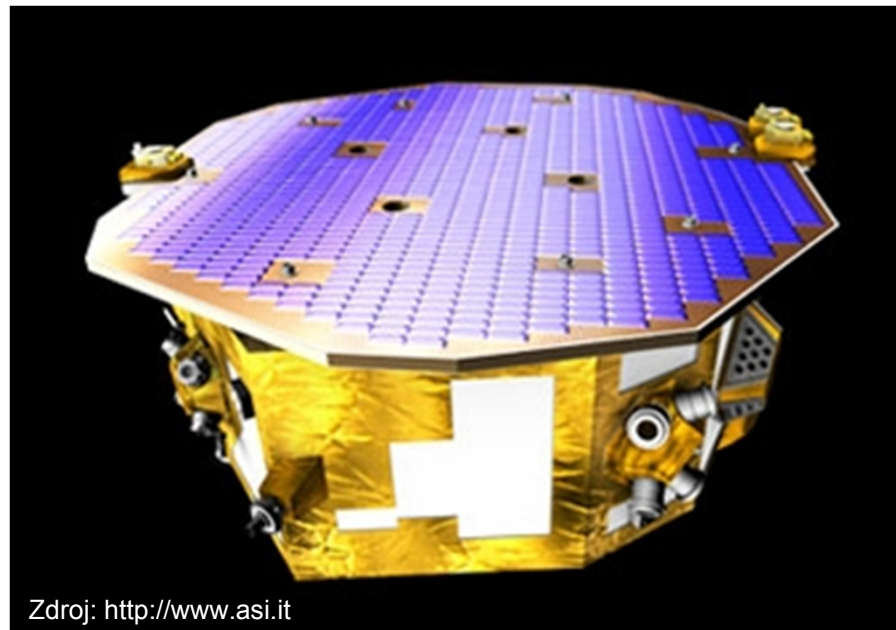
- 3 družice na oběžné trajektorii kolem Slunce;
- délka hlavní poloosy: 1 AU;
- délka ramen: 5 Gm;
- tři družice ve vrcholech rovnostranného trojúhelníka přibližně 20 stupňů od Země;
- frekvence: 0,1 mHz až 1 Hz;
- bezsilová trajektorie:
 - testovací těleso v družici: krychle ze slitiny platiny a zlata („nemagnetická“), 46 mm, 2 kg;
 - družice koriguje motorky (tah řádově μN) svou polohu vůči testovacímu tělesu;
 - interference světla LASERu ze tří družic;
- 2010 – NASA odstoupila, projekt ESA: eLISA;
- zmenšení parametrů (1 Gm, menší teleskopy, ...).

eLISA



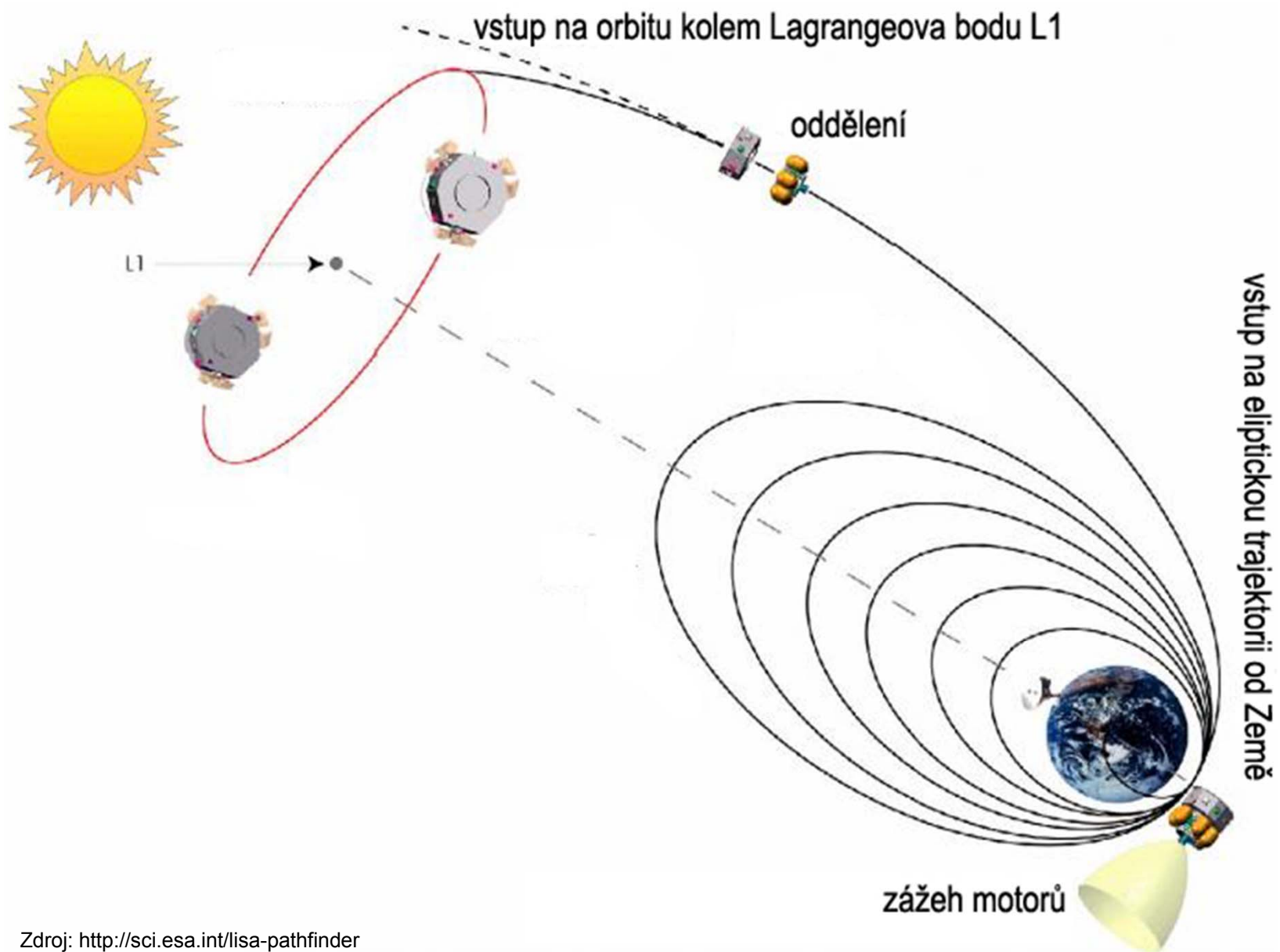
LISA Pathfinder

- testování technologie (e)LISA: měření vzdálenosti 1 Gm s přesností na pm;
- start: 3. prosince 2015;
- 22. ledna 2016 se dostala do Lagrangeova bodu ve vzdálenosti 1,5 Gm od Země;
- 16. února 2016 – uvolnění testovacích krychlí;
- rok testování a pak se rozhodne, zda bude realizován projekt (e)LISA.



Zdroj: <http://www.asi.it>

LISA Pathfinder



Zdroj: <http://sci.esa.int/lisa-pathfinder>

Děkuji za pozornost 😊