



# Gravitační vlny: nové „okno“ do vesmíru

**Petr Kurfürst**

Masarykova univerzita, U3V

15. listopad 2022

# Gravitace jako „křivý“ prostoročas

Další přelomové práce Alberta Einsteina po roce 1905:

- *Základy obecné teorie relativity* - 1916
- *Přibližná integrace rovnic pole gravitace (předpověď gravitačních vln)* - 1916
- *Kosmologické rozvahy k obecné teorii relativity* - 1917
- Předcházející důležité úvahy a formulace:
  - princip ekvivalence: působení (homogenního) gravitačního pole a zrychlující vztažné soustavy je totožné - 1907
  - ohyb světla a frekvenční posuv v gravitačním poli (určení ohybu světelného paprsku gravitačním polem Slunce) - 1912
  - popis relativistické teorie gravitace na základě formalismu diferenciální geometrie (Carl Friedrich Gauss, Bernhard Riemann, Gregorio Ricci, Tullio Levi-Civita, Marcel Grossmann) - 1913



# Gravitace jako „křivý“ prostoročas



- 1915: Einsteinovy **rovnice gravitačního pole** :
- *Gesetz des Gravitationsfeldes* - Analogon der Poisson-Gleichung  
 $\Delta\phi = 4\pi G\rho$
- Im *Materiefreien* Fall:  $R_{\mu\nu} = 0$
- *Tensorgleichung* statt skalarer, *Tensordichte* der Energie  $T_{\mu\nu}$  statt Skalardichte  $\rho$

geometrie                      energie - hmota

↓                                      ↓

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

- rozložení **hmoty** určuje křivost prostoročasu
- křivost prostoročasu řídí pohyb **hmoty**

# Gravitace jako „křivý“ prostoročas



- 1915: Einsteinovy **rovnice gravitačního pole** :
- *Gesetz des Gravitationsfeldes* - Analogon der Poisson-Gleichung  
 $\Delta\phi = 4\pi G\rho$
- Im *Materiefreien* Fall:  $R_{\mu\nu} = 0$
- *Tensorgleichung* statt skalarer, *Tensordichte* der Energie  $T_{\mu\nu}$  statt Skalardichte  $\rho$

geometrie

energie - hmota

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

kosmologická konstanta

The equation is enclosed in a red rectangular box. Red arrows point from the labels to the corresponding terms in the equation: 'geometrie' points to  $R_{\mu\nu}$ , 'energie - hmota' points to  $T_{\mu\nu}$ , and 'kosmologická konstanta' points to  $\Lambda$ .

- konstanta  $\Lambda \rightarrow$  stacionární vesmír
- dnes spojována s tzv. **temnou energií**

# Gravitate jako „křivý“ prostoročas



## Über Gravitationswellen.

VON A. EINSTEIN.

(Vorgelegt am 31. Januar 1918 [s. oben S. 79].)

Die wichtige Frage, wie die Ausbreitung der Gravitationsfelder erfolgt, ist schon vor anderthalb Jahren in einer Akademiearbeit von mir behandelt worden<sup>1</sup>. Da aber meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht genügend durchsichtig und außerdem durch einen bedauerlichen Rechenfehler verunstaltet ist, muß ich hier nochmals auf die Angelegenheit zurückkommen.

Wie damals beschränke ich mich auch hier auf den Fall, daß das betrachtete zeiträumliche Kontinuum sich von einem »galileischen« nur sehr wenig unterscheidet. Um für alle Indizes

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

setzen zu können, wählen wir, wie es in der speziellen Relativitätstheorie üblich ist, die Zeitvariable  $x_4$  rein imaginär, indem wir

# Gravitate jako „křivý“ prostoročas

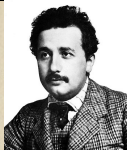
156 Gesamtsitzung vom 14. Februar 1918. — Mitteilung vom 31. Januar

so gewählt werden, daß die  $g_{\mu\nu}$  des neuen Systems vier willkürlich vorgeschriebenen Beziehungen genügen. Diese denken wir so gewählt, daß sie im Falle der uns interessierenden Näherung in die Gleichungen (5) übergehen. Die letzteren Gleichungen bedeuten also eine von uns gewählte Vorschrift, nach welcher das Koordinatensystem zu wählen ist. Vermöge (5) erhält man an Stelle von (4) die einfachen Gleichungen

$$\sum_{\alpha} \frac{\partial^2 \gamma'_{\mu\nu}}{\partial x_{\alpha}^2} = 2\kappa T_{\mu\nu}. \quad (6)$$

Aus (6) erkennt man, daß sich die Gravitationsfelder mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Die  $\gamma_{\mu\nu}$  lassen sich bei gegebenen  $T_{\mu\nu}$  aus letzteren nach Art der retardierten Potentiale berechnen. Sind  $x, y, z, t$  die reellen Koordinaten  $x_1, x_2, x_3, \frac{x_4}{i}$  des Aufpunktes, für welchen die  $\gamma'_{\mu\nu}$  berechnet werden sollen,  $x_0, y_0, z_0$  die räumlichen Koordinaten eines Raumelementes  $dV_0$ ,  $r$  der räumliche Abstand zwischen letzterem und dem Aufpunkt, so hat man

$$\gamma'_{\mu\nu} = -\frac{\kappa}{2\pi} \int \frac{T_{\mu\nu}(x_0, y_0, z_0, t-r)}{r} dV_0. \quad (7)$$



# Gravitace jako „křivý“ prostoročas

156 Gesamtsitzung vom 14. Februar 1918. — Mitteilung vom 31. Januar

so gewählt werden, daß die  $g_{\mu\nu}$  des neuen Systems vier willkürlich vorgeschriebenen Beziehungen genügen. Diese denken wir so gewählt, daß sie im Falle der uns interessierenden Näherung in die Gleichungen (5) übergehen. Die letzteren Gleichungen bedeuten also eine von uns gewählte Vorschrift, nach welcher das Koordinatensystem zu wählen ist. Vermöge (5) erhält man an Stelle von (4) die einfachen Gleichungen

$$\sum_{\alpha} \frac{\partial^2 \gamma'_{\mu\nu}}{\partial x_{\alpha}^2} = 2 \kappa T_{\mu\nu}. \quad (6)$$

Aus (6) erkennt man, daß sich die Gravitationsfelder mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Die  $\gamma_{\mu\nu}$  lassen sich bei gegebenen  $T_{\mu\nu}$  aus letzteren nach Art der retardierten Potentiale berechnen. Sind  $x, y, z, t$  die reellen Koordinaten  $x_1, x_2, x_3, \frac{x_4}{i}$  des Aufpunktes, für welchen die  $\gamma'_{\mu\nu}$  berechnet werden sollen,  $x_0, y_0, z_0$  die räumlichen Koordinaten eines Raumelementes  $dV_0$ ,  $r$  der räumliche Abstand zwischen letzterem und dem Aufpunkt, so hat man

$$\gamma'_{\mu\nu} = -\frac{\kappa}{2\pi} \int \frac{T_{\mu\nu}(x_0, y_0, z_0, t-r)}{r} dV_0. \quad (7)$$



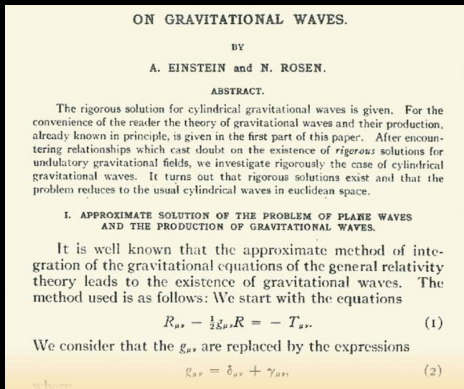
**Avšak jeho pozdější práce vykazují mnoho nejistoty**

# Gravitace jako „křivý“ prostoročas

Einstein & Rosen 1936, *Physical Review* (podáno):

**Předpokládané gravitační vlny neexistují!**

(Článek odmítnut prof. H. P. Robertsonem z Caltechu)



Einstein & Rosen 1937, *Journal of Franklin Institute*, **223**, 43:

**Tak zpět: Gravitační vlny skutečně existují!** (po opravě formální chyby ve volbě souřadnic, kterou Robertson odhalil při recenzi článku z roku 1936)



# Gravitace jako „křivý“ prostoročas

Einstein 1939, *Annals of Mathematics*, 40, 922:  
„Důkaz“ že černé díry nemohou v přírodě existovat



ANNALS OF MATHEMATICS  
Vol. 40, No. 4, October, 1939

## ON A STATIONARY SYSTEM WITH SPHERICAL SYMMETRY CONSISTING OF MANY GRAVITATING MASSES

BY ALBERT EINSTEIN

(Received May 10, 1939)

If one considers Schwarzschild's solution of the static gravitational field of spherical symmetry

$$(1) \quad ds^2 = -\left(1 + \frac{\mu}{2r}\right)^4 (dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2) + \left(\frac{1 - \frac{\mu}{2r}}{1 + \frac{\mu}{2r}}\right)^2 dt^2$$

it is noted that

$$g_{44} = \left(\frac{1 - \frac{\mu}{2r}}{1 + \frac{\mu}{2r}}\right)^2$$

vanishes for  $r = \mu/2$ . This means that a clock kept at this place would go at the rate zero. Further it is easy to show that both light rays and material particles take an infinitely long time (measured in "coordinate time") in order to reach the point  $r = \mu/2$  when originating from a point  $r > \mu/2$ . In this sense the sphere  $r = \mu/2$  constitutes a place where the field is singular. ( $\mu$  represents the gravitating mass.)

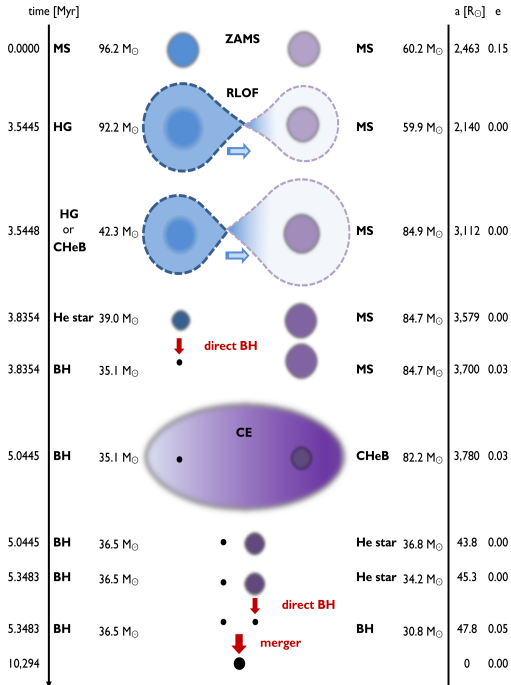
There arises the question whether it is possible to build up a field containing such singularities with the help of actual gravitating masses, or whether such regions with vanishing  $g_{44}$  do not exist in cases which have physical reality. Schwarzschild himself investigated the gravitational field which is produced by an incompressible liquid. He found that in this case, too, there appears a region with vanishing  $g_{44}$  if only, with given density of the liquid, the radius of the field production is chosen to exceed a certain amount.

= důkaz, že i géniové se mohou mýlit ...

# Klíčová role “společných obálek” (common envelopes - CE)

- HG: Hertzsprung-gap hvězda;
- CHeB: centrální hoření helia

Zdroj: Belczynski+ 2016

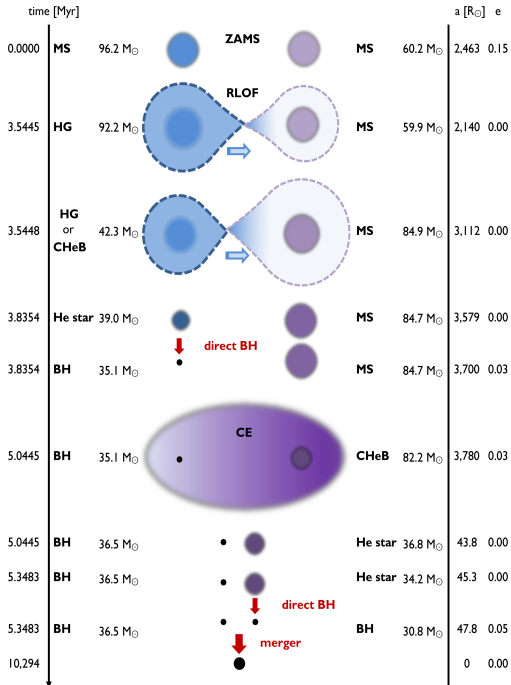


# Klíčová role “společných obálek” (common envelopes - CE)

- CE scénář vedoucí k splynutí černých děr podobný případu GW150914  $\Leftarrow Z = 0.0006$  ( $1/30 Z_{\odot}$ )

- HG: Hertzsprung-gap hvězda;
- CHeB: centrální hoření helia

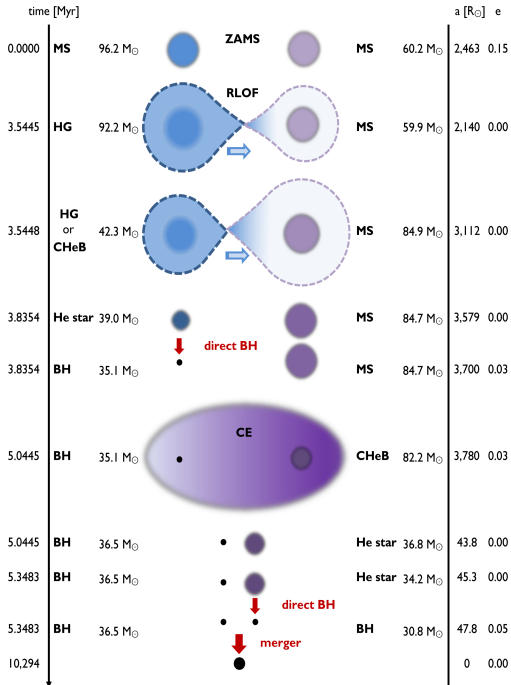
Zdroj: Belczynski+ 2016



# Klíčová role “společných obálek” (common envelopes - CE)

- CE scénář vedoucí k splynutí černých děr podobný případu GW150914  $\Leftarrow Z = 0.0006$  ( $1/30 Z_{\odot}$ )
- Začátek na  $z \sim 0.32$  (2 Gyr po BB, konec na  $z = 0.09$ ) (vzdálenost  $\sim 0.45$  Gpc)
- HG: Hertzsprung-gap hvězda;  
CHeB: centrální hoření helia

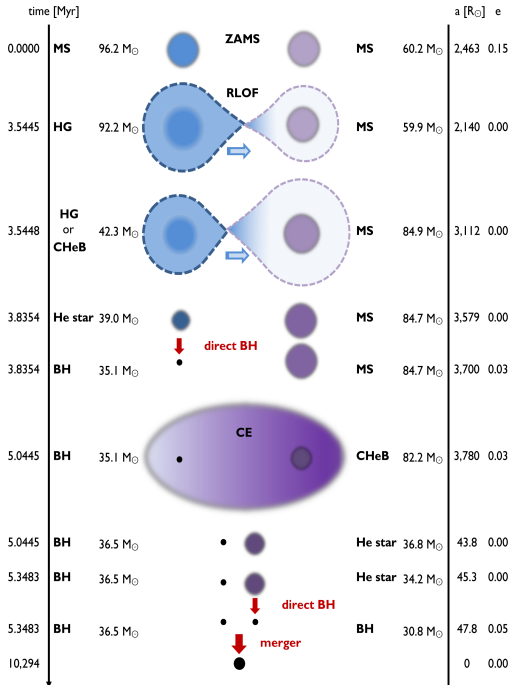
Zdroj: Belczynski+ 2016



# Klíčová role “společných obálek” (common envelopes - CE)

- CE scénář vedoucí k splynutí černých děr podobný případu GW150914  $\Leftarrow Z = 0.0006$  ( $1/30 Z_{\odot}$ )
- Začátek na  $z \sim 0.32$  (2 Gyr po BB, konec na  $z = 0.09$ ) (vzdálenost  $\sim 0.45$  Gpc)
- Orbitální vzdálenost klesne **cca 100krát během CE fáze!**
- HG: Hertzsprung-gap hvězda;  
CHeB: centrální hoření helia

Zdroj: Belczynski+ 2016



# Gravitačně zhroucené hvězdy

---

- Gravitační kolaps nejhmotnějších hvězd → **černé díry**: „nejlehčí“ známá černá díra má hmotnost cca 5 Sluncí
- Gravitační kolaps o něco méně hmotných hvězd → **neutronové hvězdy**: „nejtěžší“ známá neutronová hvězda má hmotnost cca 2,5 Slunce

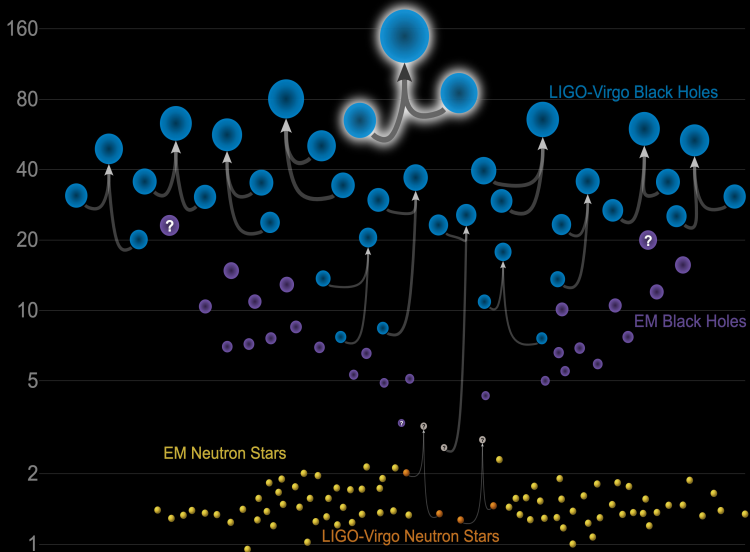
# Gravitačně zhroucené hvězdy

---

- Gravitační kolaps nejhmotnějších hvězd → **černé díry**: „nejlehčí“ známá černá díra má hmotnost cca 5 Sluncí
- Gravitační kolaps o něco méně hmotných hvězd → **neutronové hvězdy**: „nejtěžší“ známá neutronová hvězda má hmotnost cca 2,5 Slunce
- Hádanka: čím je způsobena „mezera“ mezi neutronovými hvězdami a černými děrami, případně, nachází se něco v této **„hmotnostní mezeře“**?

# Masses in the Stellar Graveyard

*in Solar Masses*





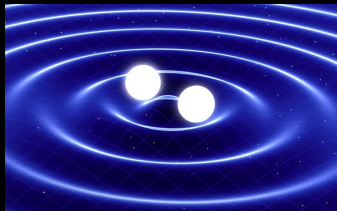
# Ověření principů obecné relativity

---

- V současné době **stovky** ověřujících experimentů:
- Mimo jiné - **přesnost navigačních systémů GPS** (i dalších)
- Zásadní jsou testy **obecné relativity** v extrémně silných gravitačních polích
- Zachycení **gravitačních vln** - detektory **LIGO, VIRGO, KAGRA...**



interferometr LIGO -  
Livingston, Louisiana



systém dvou neutronových hvězd,  
obíhajících velmi blízko sebe

# Ověření principů obecné relativity

---

- V současné době **stovky** ověřujících experimentů:
- Mimo jiné - **přesnost navigačních systémů GPS** (i dalších)
- Zásadní jsou testy **obecné relativity** v extrémně silných gravitačních polích
- Zachycení **gravitačních vln** - detektory **LIGO, VIRGO, KAGRA...**



interferometr LIGO -  
Livingston, Louisiana

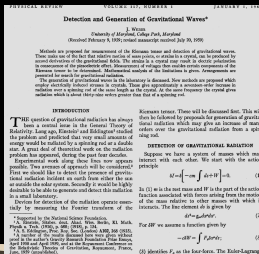
# Ověření principů obecné relativity

---

Propagace gravitačních vln při těsném oběhu kompaktních objektů

# První pokusy o zachycení gravitačních vln

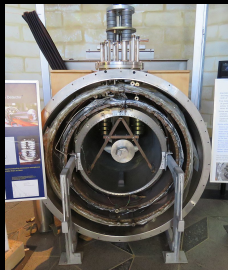
V 60. letech 20. století se Joseph Weber pokoušel jako první zachytit gravitační vlny pomocí mechanických rezonančních (900 - 1000 Hz) detektorů - 2 m dlouhých hliníkových válců (o průměru 1 m) a antén.



# První pokusy o zachycení gravitačních vln

Vylepšené kryogenní detektory v letech cca 1980 - 2000, chlazené na teplotu 4 K až 0,1 K:

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

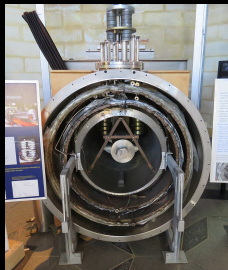


# První pokusy o zachycení gravitačních vln

Vylepšené kryogenní detektory v letech cca 1980 - 2000, chlazené na teplotu 4 K až 0,1 K:

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

Mechanické detektory **nebyly úspěšné** (i přes značnou technologickou vyspělost): důvodem **citlivost** pouze pro **určité frekvence**. Reálné kosmické zdroje multifrekvenční, resp. bez dlouho trvající amplitudy na jediné frekvenci.



# Potvrzení existence gravitačních vln

---

**PSR B1913+16** (pulsar) + **PSR J1915+1606** je binární systém dvou neutronových hvězd v souhvězdí Orla. Objevili jej v roce 1974 **Russell Alan Hulse** a **Joseph Taylor** pomocí radioteleskopu Arecibo.



# Potvrzení existence gravitačních vln

Potvrzení gravitačních vln, které odnáší energii a hybnost. Nobelova cena 1993. Očekává se, že za  $\sim 300$  milionů let obě složky splynou.

## Gravitational Radiation

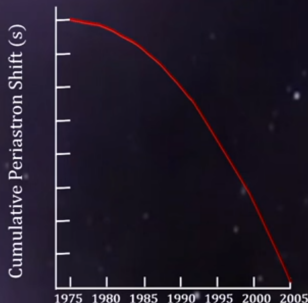
$$P = \frac{dE}{dt} = - \frac{32G^4 (m_1 m_2)^2 (m_1 + m_2)}{5c^5 a^3 (1 - e^2)^{7/2}} \left( 1 + \frac{73e^2}{24} + \frac{37e^4}{96} \right)$$
$$= 7.35 \times 10^{24} \text{ watts}$$

## Orbital Shrinkage

$$\frac{da}{dt} = - \frac{64G^3 (m_1 m_2) (m_1 + m_2)}{5c^5 a^3 (1 - e^2)^{7/2}} \left( 1 + \frac{73e^2}{24} + \frac{37e^4}{96} \right)$$
$$= 3.5 \text{ m/year}$$

$$\frac{dT}{dt} = 76.5 \text{ milliseconds per year}$$

Time till merge = 300 million years





# Přelomová studie Reinerja Weisse 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,<sup>1</sup> 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<sup>2,3</sup> at the University of Maryland have engendered a new interest in the field.

Weber has reported coincident excitations in two gravitational antennas separated 1000 km. These antennas are high-Q resonant bars tuned to 1.6 kHz. He attributes these excitations to pulses of gravitational radiation emitted by broadband sources concentrated near the center of our galaxy. If Weber's interpretation of these events is correct, there is an enormous flux of gravitational radiation incident on the Earth.

Several research groups throughout the world are attempting to confirm these results with resonant structure gravitational antennas similar to those of Weber. A broadband antenna of the type proposed in this report would give independent confirmation of the existence of these events, as well as furnish new information about the pulse shapes.

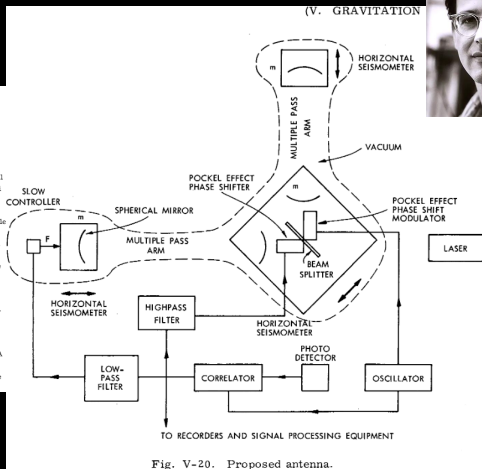


Fig. V-20. Proposed antenna.

První návrh interferometru na principu LASERu

# Detektor gravitačních vln LIGO (→ advanced LIGO)

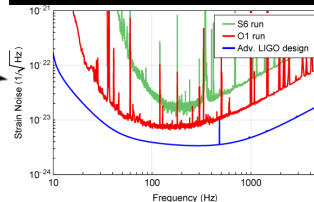
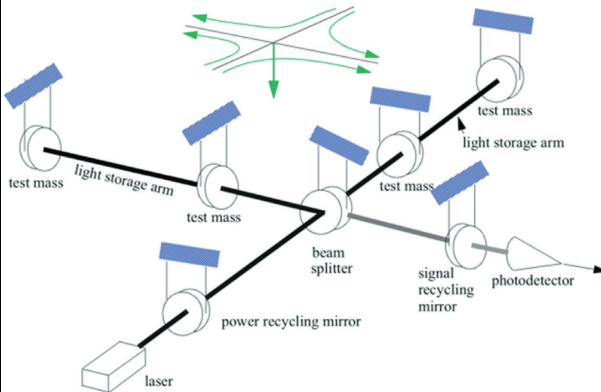
„Observatoř“ LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) sestává ze dvou identických, vzdálených interferometrů s délkou ramen 4 km - 1. záchyt: GW150914



# Detektor gravitačních vln LIGO (→ advanced LIGO)

„Observatoř“ LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) sestává ze dvou identických, vzdálených interferometrů s délkou ramen 4 km - 1. záchyt: GW150914

Advanced LIGO Fabry-Perot Michelson Interferometer Schematic



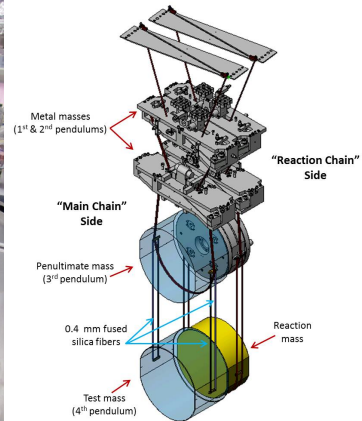
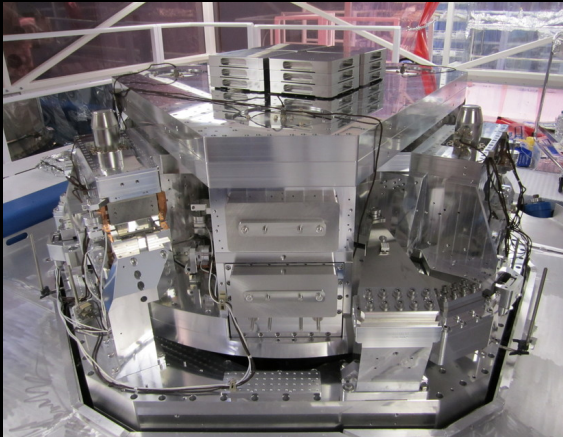
# Detektor gravitačních vln LIGO (→ advanced LIGO)

---

LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)

# Detektor gravitačních vln LIGO (→ advanced LIGO)

„Observatoř“ LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) sestává ze dvou identických, vzdálených interferometrů s délkou ramen 4 km - 1. záchyt: GW150914



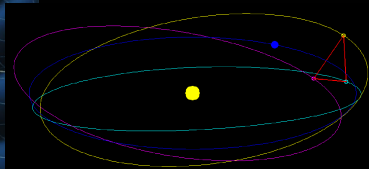
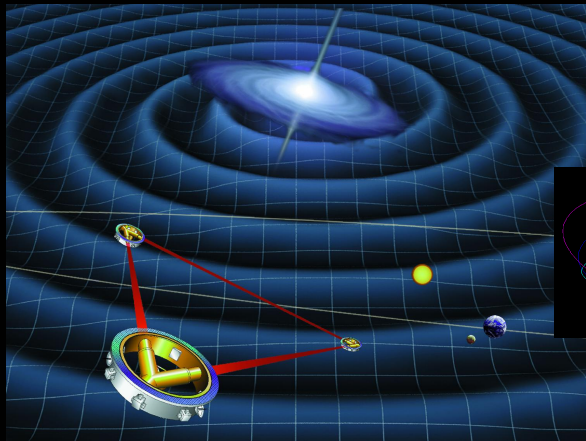
# Detektory gravitačních vln VIRGO a KAGRA

„Observatoř“ VIRGO sestává z jednoho interferometru s délkou ramen 3 km poblíž italské Pisy - 1. záchyt: GW170814; KAGRA je dokončovaná podzemní observatoř obdobných parametrů v Japonsku

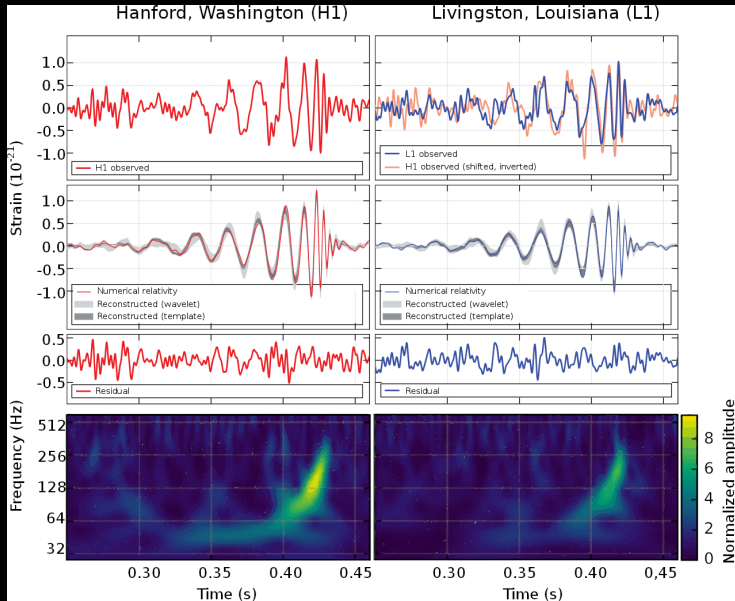


## Výhled: LIGO-India, Cosmic Explorer, (space) LISA,...

„Observatoř“ LISA (Laser Interferometer Space Antenna) je plánovaný projekt ESA. Každá ze tří družic, obíhajících kolem Slunce a vzájemně vzdálených cca milion kilometrů, vyšle identický laserový paprsek k ostatním družicím, ty jej odrazí zpět a došlé paprsky se porovnají v interferometru. Plánovaný start 2034.



# První detekce GW 150914 pomocí LIGO





# První detekce GW 150914 pomocí LIGO

---

Nobelova cena za fyziku 2017:



# První detekce GW 150914 pomocí LIGO

---

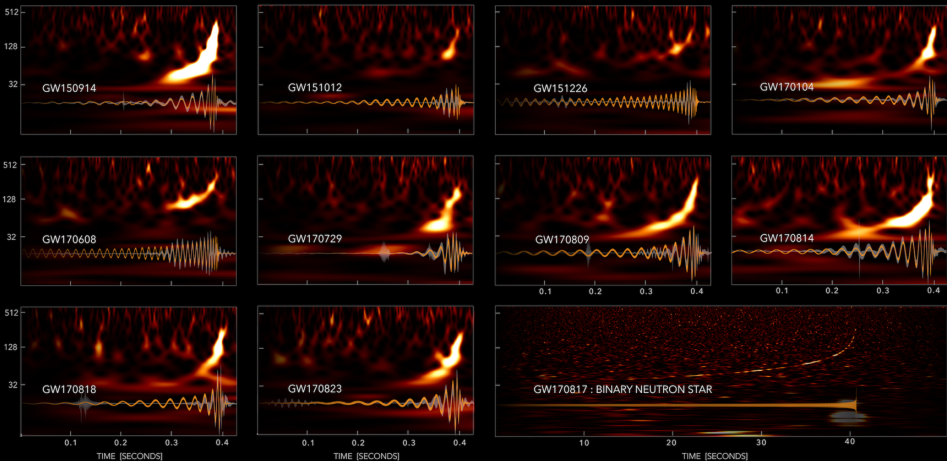
Nobelova cena za fyziku 2017:



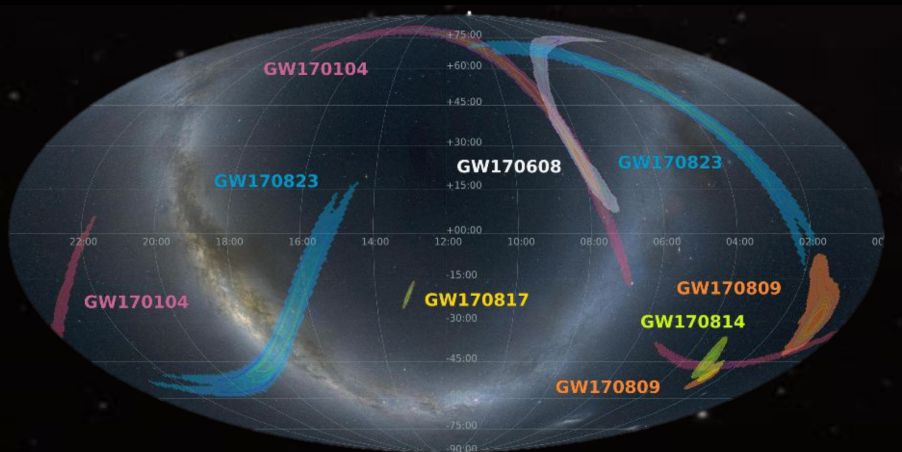
Barry Barish, Kip Thorne, Reiner Weiss

# LIGO/VIRGO detekce gravitačních vln

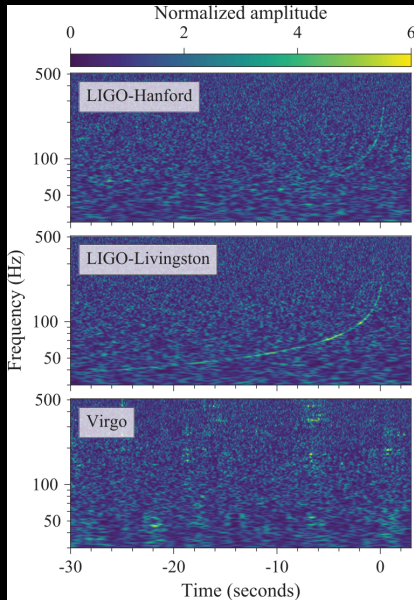
## GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT CATALOG-1



# LIGO/VIRGO detekce gravitačních vln



# LIGO/VIRGO záchyt GW 170817 - první EM protějšek

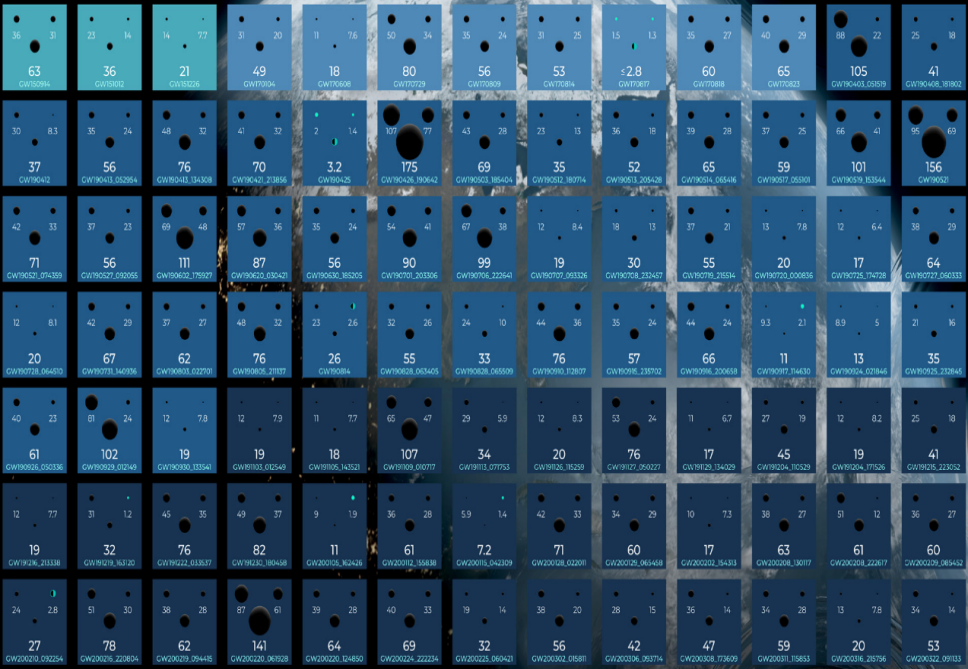


GW170817  
DECam observation  
(0.5–1.5 days post merger)



GW170817  
DECam observation  
(>14 days post merger)





**Děkuji za pozornost**