

# Newtonova teorie gravitace

- Gravitace před Newtonem
- Newtonovy Principiae
- Návrat Halleyovy komety
- Znovunalezení Ceres
- Objev Neptunu
- Přistání na Měsíci

# Newtonova teorie gravitace

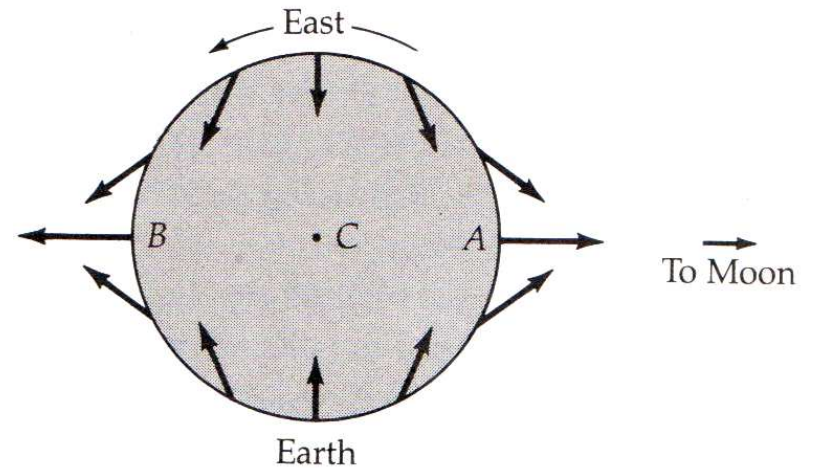
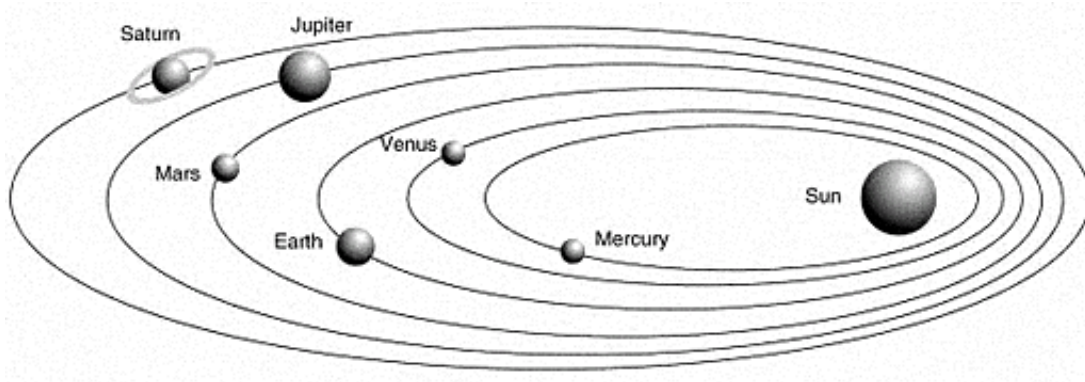
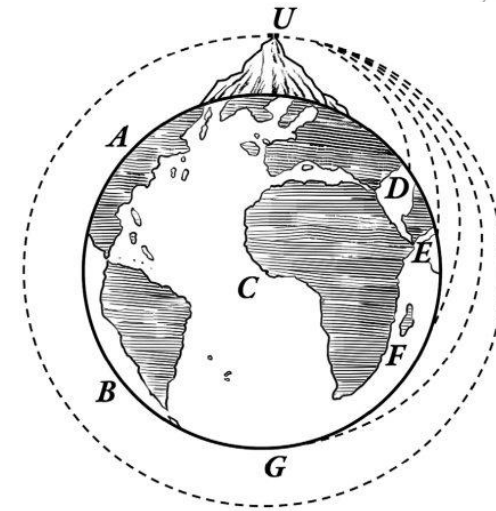
## Gravitace před Newtonem

- Pády a vrhy
- Pohyby planet
- Mořská dmutí

$$\vec{F}_{12} = -\kappa \frac{m_1 m_2}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^3} (\vec{r}_2 - \vec{r}_1)$$

$$\frac{d^2 \vec{r}_1}{dt^2} = -\vec{F}_{12}$$

$$\frac{d^2 \vec{r}_2}{dt^2} = \vec{F}_{12}$$



# Newtonova teorie gravitace

## Návrat Halleyovy komety



Year		Description
240 BC	15 May	First confirmed sighting.
163 BC	20 May	Seen by Babylonians.
87 BC	15 August	Seen by the Babylonians and Chinese.
12 BC	8 October	Watched by Chinese for two months.
66	26 January	'A comet of the kind called Xiphias
141	25 March	Described by the Chinese as bluish-white in colour
218	6 April	Described by the Roman historian Dion Cassius as 'a very fearful star'.
295	7 April	Seen in China, but not spectacular.
374	13 February	Comet passed 13.5 million kilometres from Earth.
451	3 July	Appeared before the defeat of Attila the Hun at the Battle of Chalons.
530	15 November	Noted in China and Europe, but not spectacular.
607	26 March	Comet passed 13.5 million kilometres from Earth.
684	26 November	First known Japanese records of the comet. Seen in Europe and depicted 800 years later in the Nuremberg Chronicle.
760	10 June	Seen in China, at the same time as another comet.
837	25 February	Closest-ever approach to the Earth (5 million km). Tail stretched halfway across the sky. Appeared as bright as Venus.
912	27 July	Seen briefly in China and Japan.
989	2 September	Seen in China, Japan, and (possibly) Korea.
1066	25 March	Seen for over two months in China.
1145	19 April	Depicted on the Eadwine Psalter
1222	10 September	Described by Japanese astronomers as being 'as large as the half Moon
1301	22 October	Seen by Giotto di Bondone
1378	9 November	Passed within 10 degrees of the north celestial pole
1456	8 January	Observed in Italy by Paolo Toscanelli, Arabs said the tail resembled a Turkish scimitar
1531	26 August	Seen by Peter Apian, this sighting was included in Halley's table.
1607	27 October	Seen by Johannes Kepler. This sighting was included in Halley's table.
1682	15 September	Seen by Edmond Halley at Islington.
1758	13 March	Return predicted by Halley. First seen by Johann Palitzsch
1835	16 November	First seen at the Vatican Observatory in August. Studied by John Herschel
1910	20 April	Photographed for the first time. Earth passed through the comet's tail on May 20.
1986	9 February	Reached perihelion on February 9, closest to Earth (63 million km) on April 11.
2061	28 July	Next return of Halley's comet.

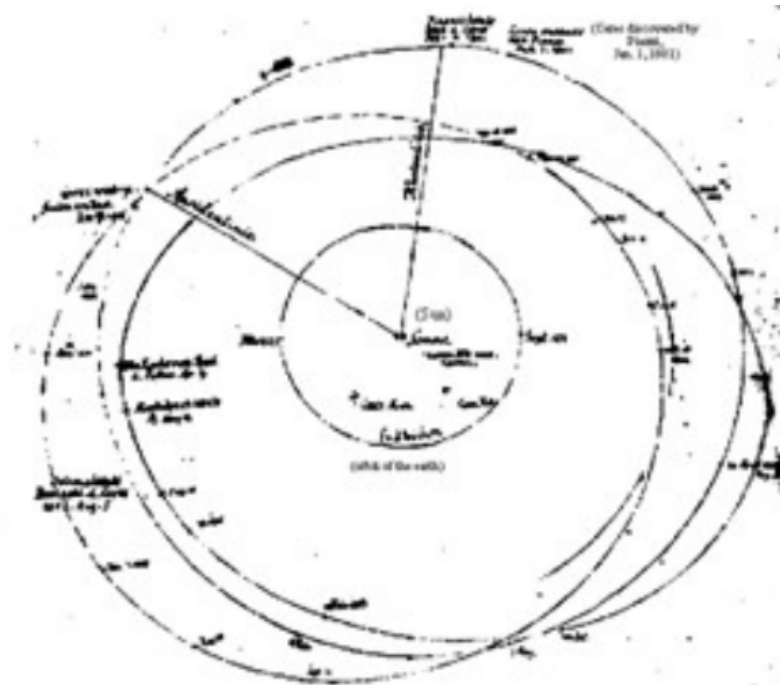
# Newtonova teorie gravitace

Znovunalezení Ceres (největší objekt drahami Marsu a Jupiteru)

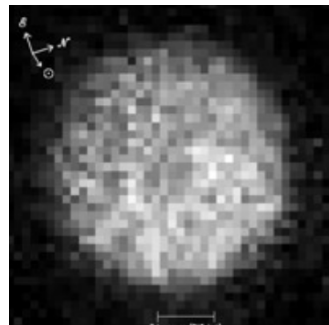


C. F. Gauss

1.ledna 1801 objev Ceres



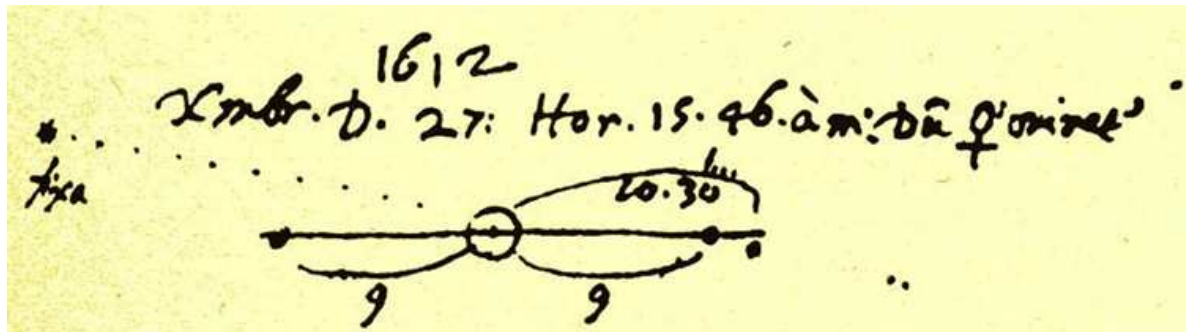
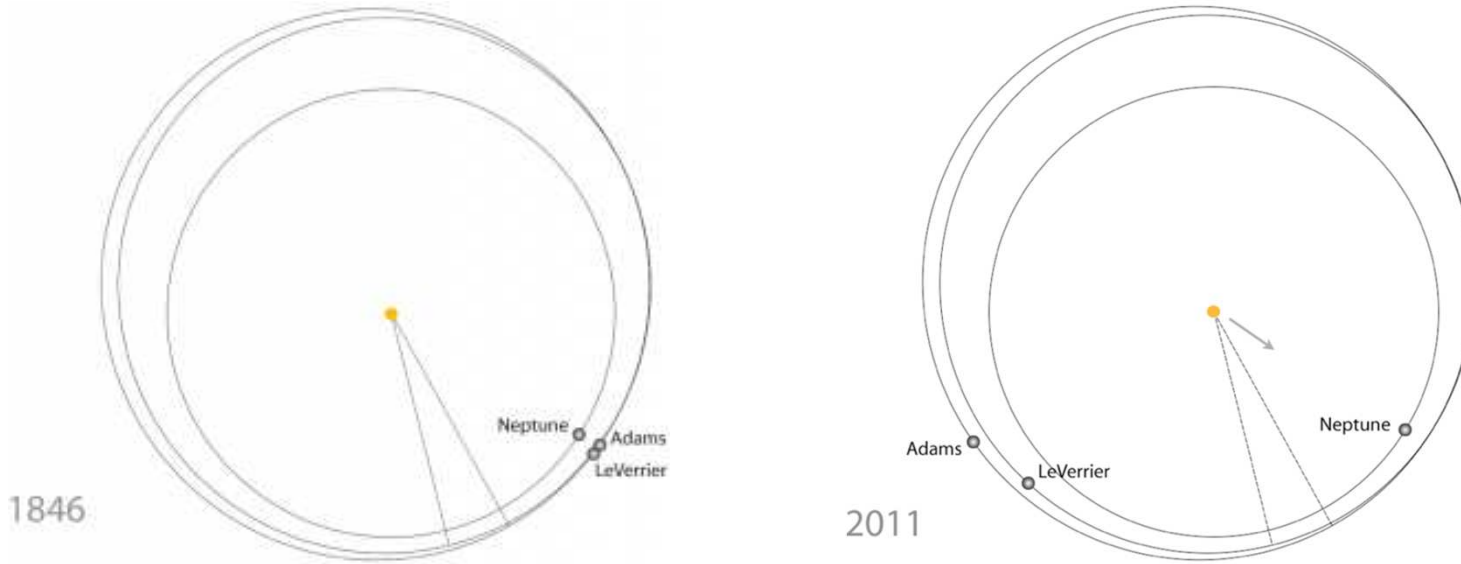
Sketch of the orbits of Ceres and Pallas (nachlaß Gauß, Handb. 4). Courtesy of Universitätsbibliothek Göttingen.



7.prosince 1801 nalezena na základě Gaussova výpočtu

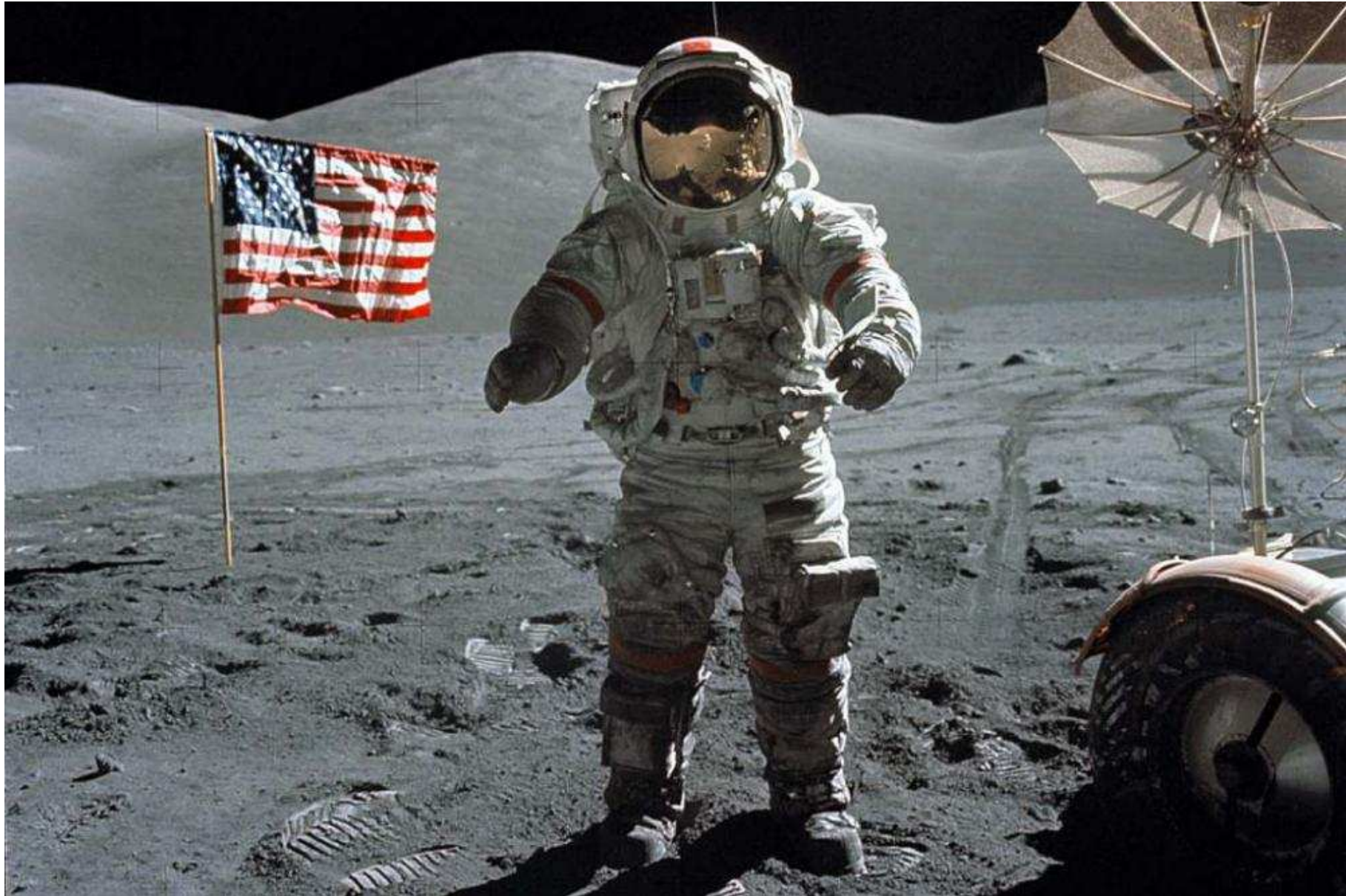
# Newtonova teorie gravitace

## Objev Neptunu



# Newtonova teorie gravitace

Přistání na Měsíci



# OTR

- Základní myšlenka
- Proč věříme OTR, základní testy OTR:
  - ✓ Stáčení perihelu,
  - ✓ Odchylka světla,
  - ✓ Další experimenty



# OTR

## Základní myšlenka - prostoročas

Tři základní pojetí:

Newton (17.století)

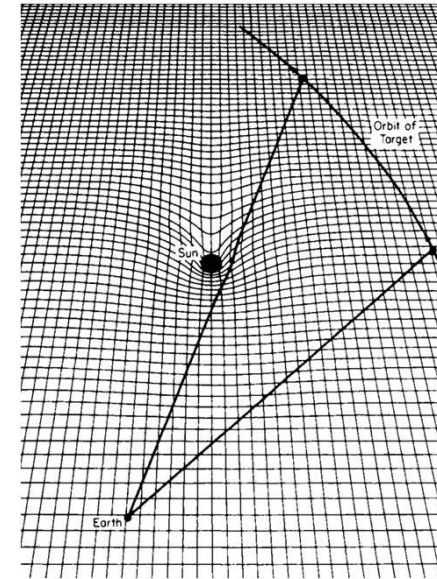
Hmota ← Prostor + Čas

Einstein STR (1905)

Hmota ← Prostoročas

Einstein OTR (1915)

Hmota ↔ Prostoročas

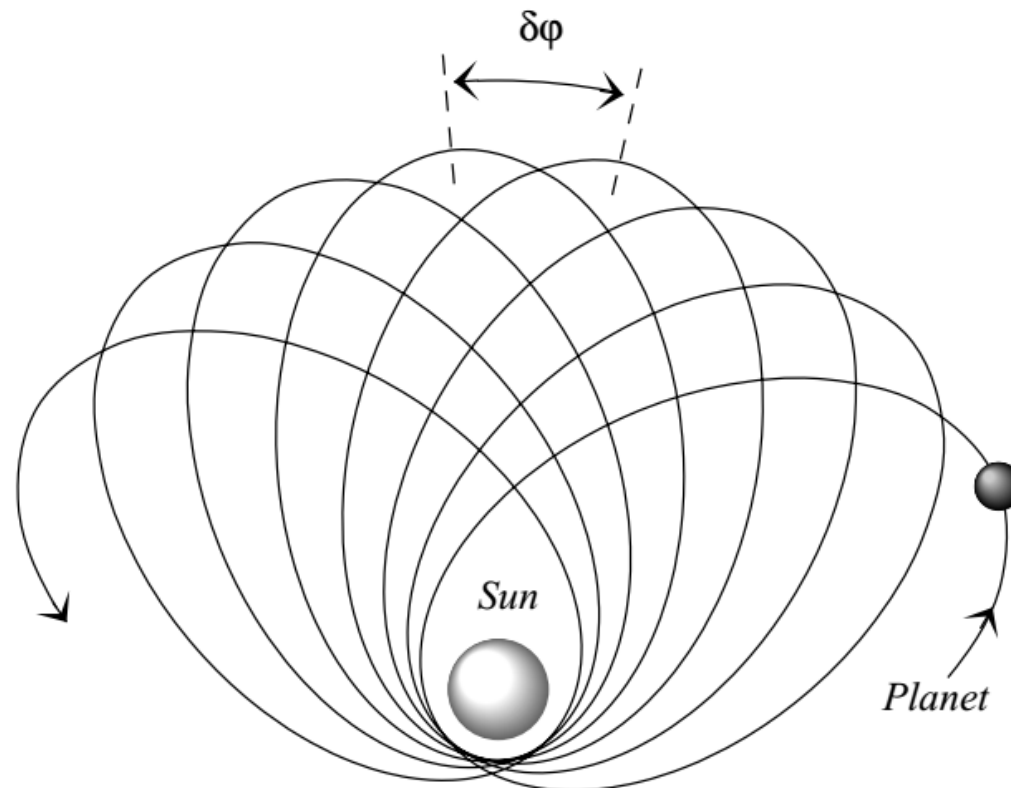


Teorie relativity se zabývá geometrií prostoročasu  
a důsledky, které z toho plynou pro fyziku

# Proč věříme OTR, základní testy OTR

## 1. Stáčení orbit oběžnic

Merkur (Leverrier, 1859) asi o  $43''$  za století rychleji, než odpovídá Newtonovu zákonu. OTR pozorovanou hodnotu vysvětlila (1 %). Dnes potvrzeno u řady jiných objektů.



*Per century:*

*Mercury:* 43".03

*Venus:* 8".3

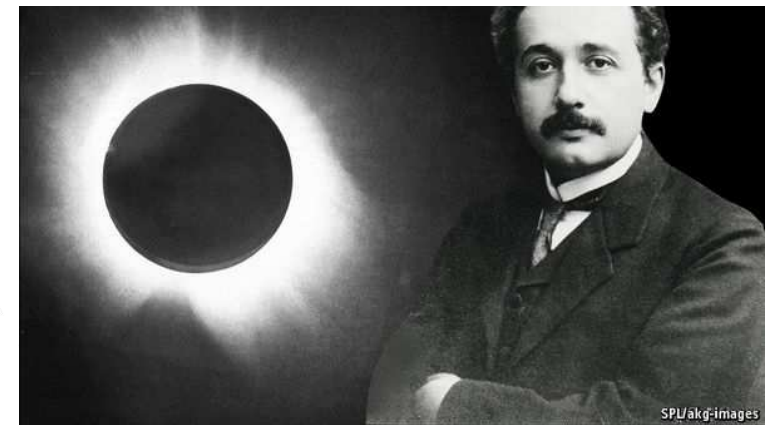
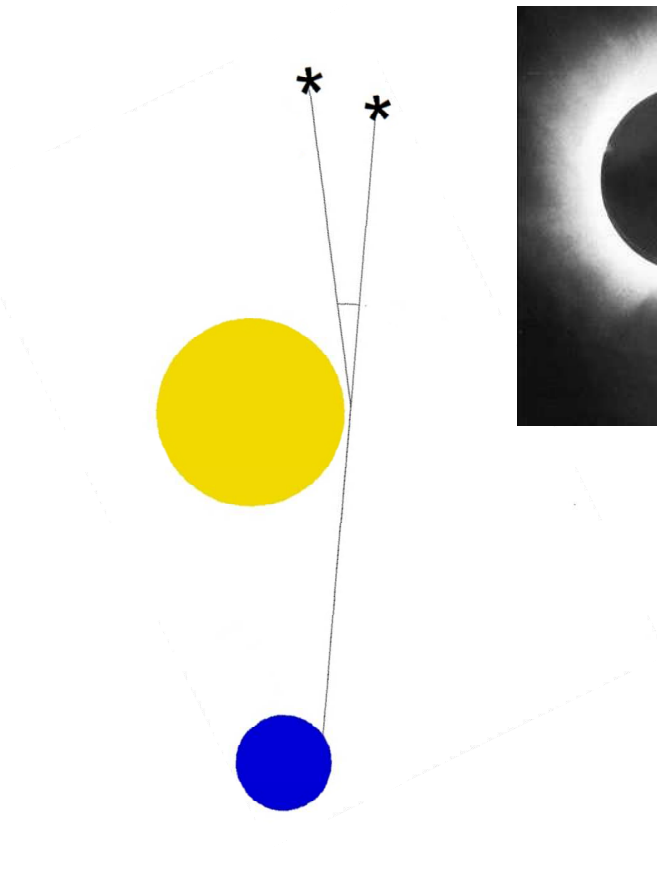
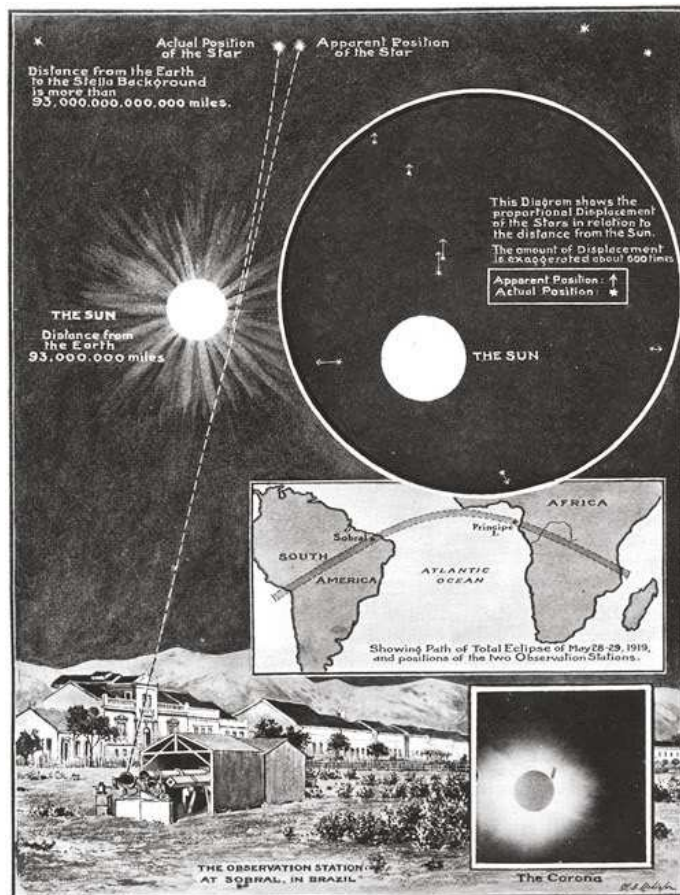
*Earth:* 3".8

# Základní testy OTR

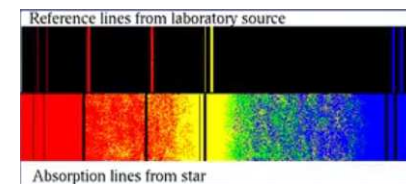
## 2.Ohyb světla v gravitačním poli

Einstein (1915) odchylnka polohy hvězdy na okraji disku Slunce 1,75“  
Zatmění 1919: A. Eddington (1,6 ÷ 2,0)“.

Dnes je k dispozici mnohem více přesnějších dat.



# Základní testy OTR



## 3. Gravitační červený posuv

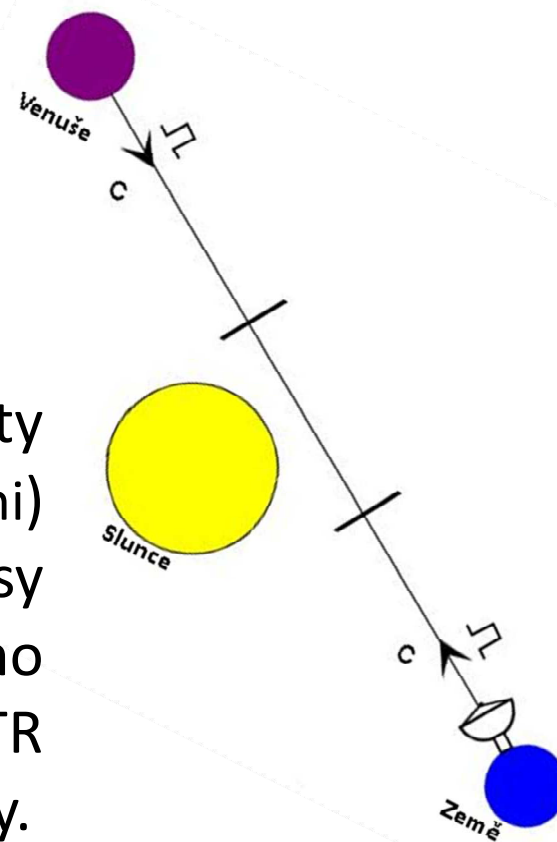
Rozdíl potenciálu gravitačního pole posouvá spektrální čáry k červenému konci spektra, pro povrch Slunce ☀  $z = 2,1 \cdot 10^{-6}$ .

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

Předpověď potvrdil Pound-Rebka (1959) experiment

## 4. Shapirovo zpoždění v silném gravitačním poli

Shapiro (1964): ve chvíli, kdy se vnitřní planety (Merkur a Venuše) nacházejí (pro pozorovatele na Zemi) poblíž konjunkce se Sluncem, probíhají rádiové pulsy ze Země při cestě tam i zpět oblastmi silného gravitačního potenciálu Slunce a jsou ve shodě s OTR zpožděny o měřitelnou hodnotu řádu 0,1 milisekundy.

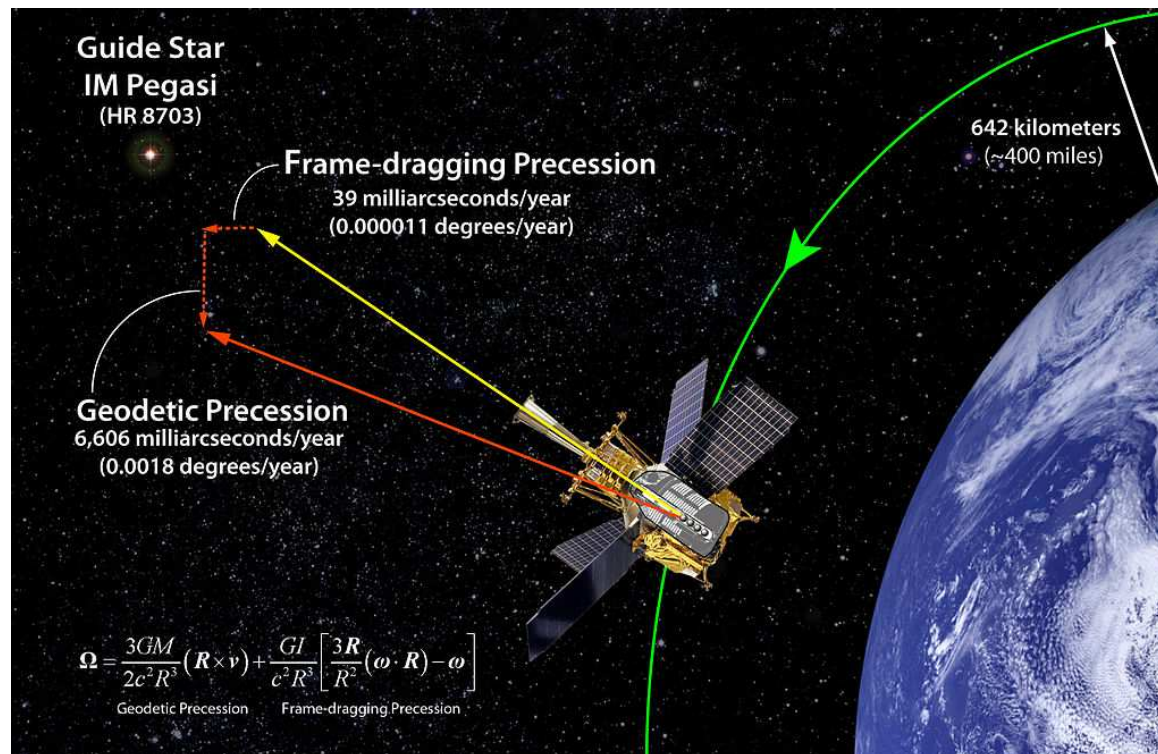


# Základní testy OTR

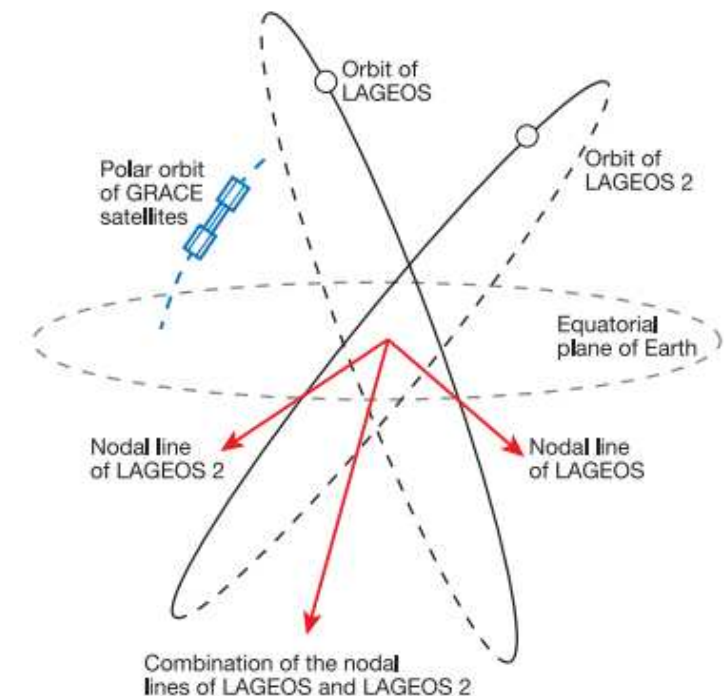
## 5. Zakřivení prostoročasu v okolí Země

Družice Gravity Probe-B, satelity LAGEOS - dva efekty

- geodetická precese
- efekt Lenseův-Thirringův – strhávání inerciálních soustav



2004-2011



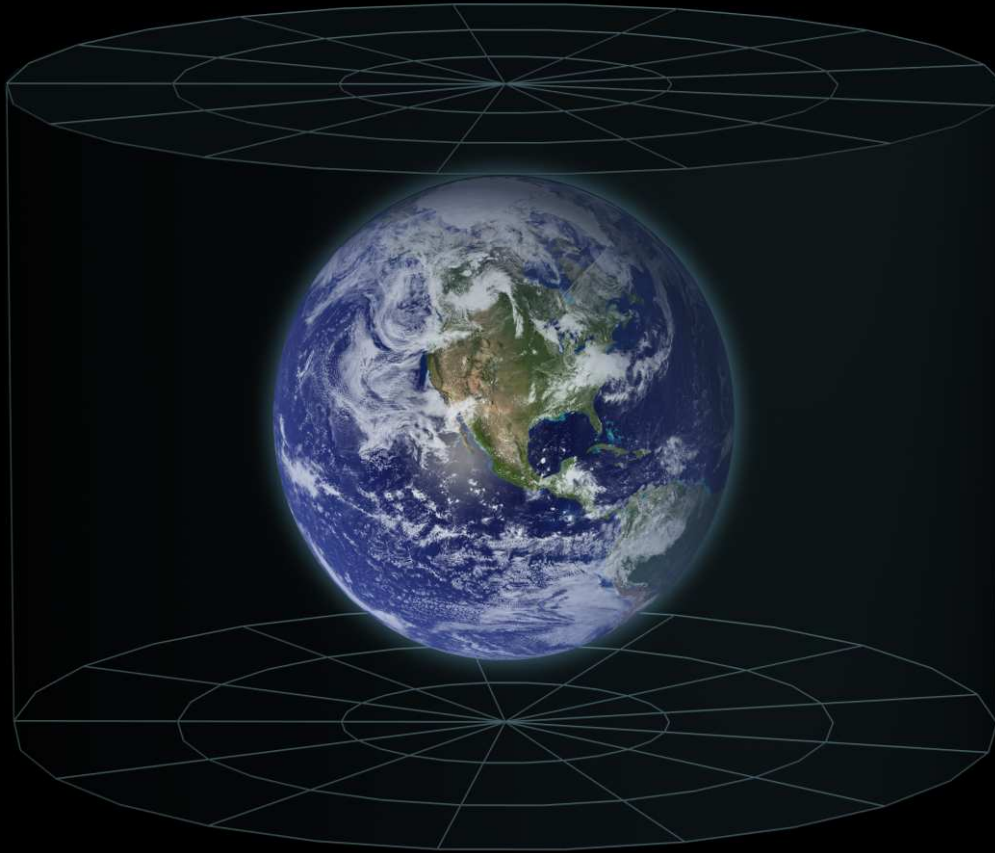
2012 - 2015

# Relativistická kosmologie

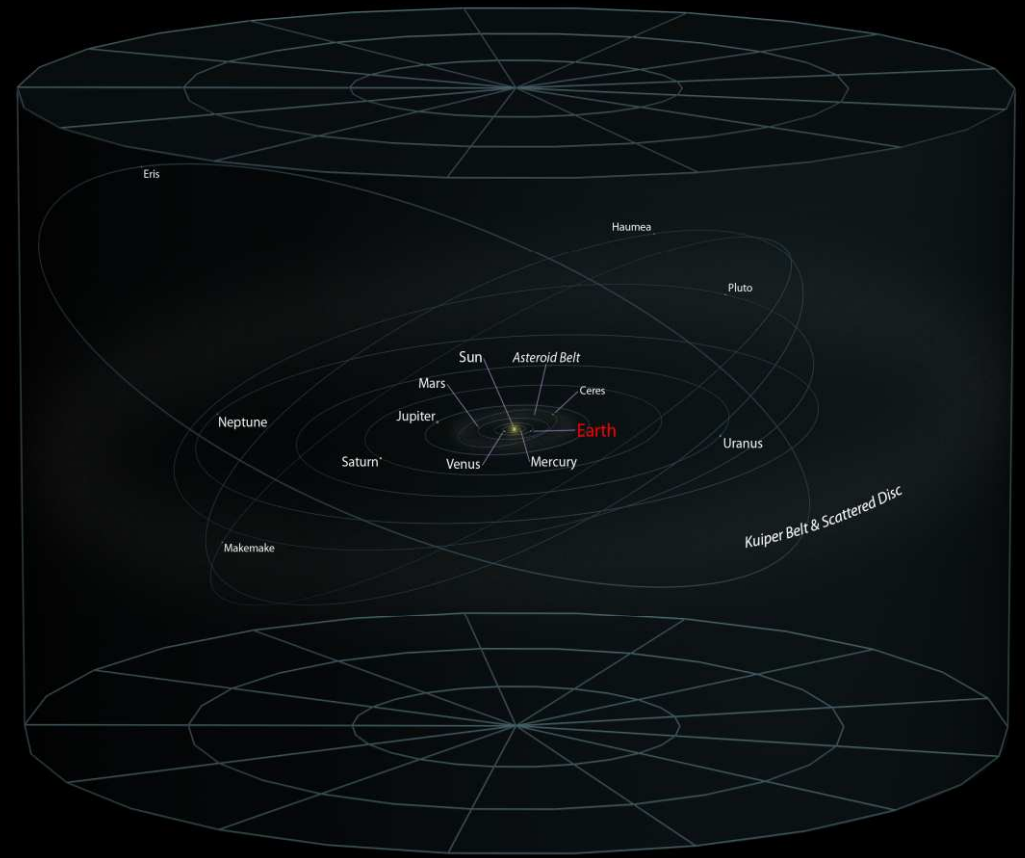
- Co je vesmír? Vesmírné struktury.
- Kosmologický princip
- Einsteinovy rovnice a kosmologický člen
- Modely vesmíru

# Co je vesmír? Vesmírné struktury.

EARTH

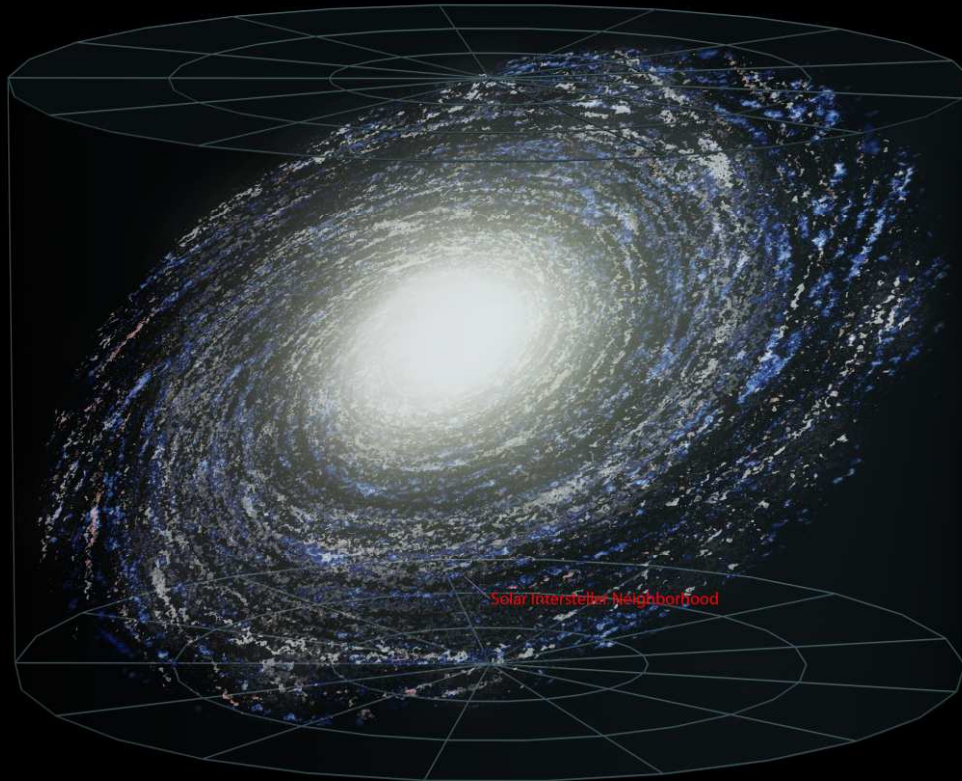


SOLAR SYSTEM

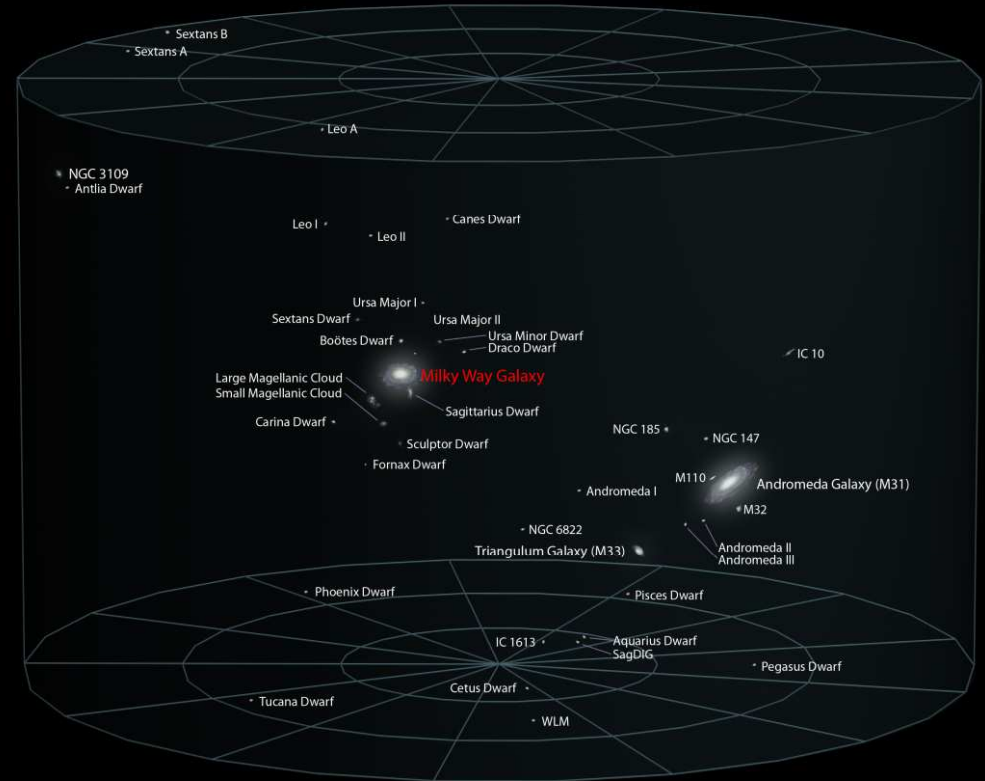


# Co je vesmír? Vesmírné struktury.

## MILKY WAY GALAXY



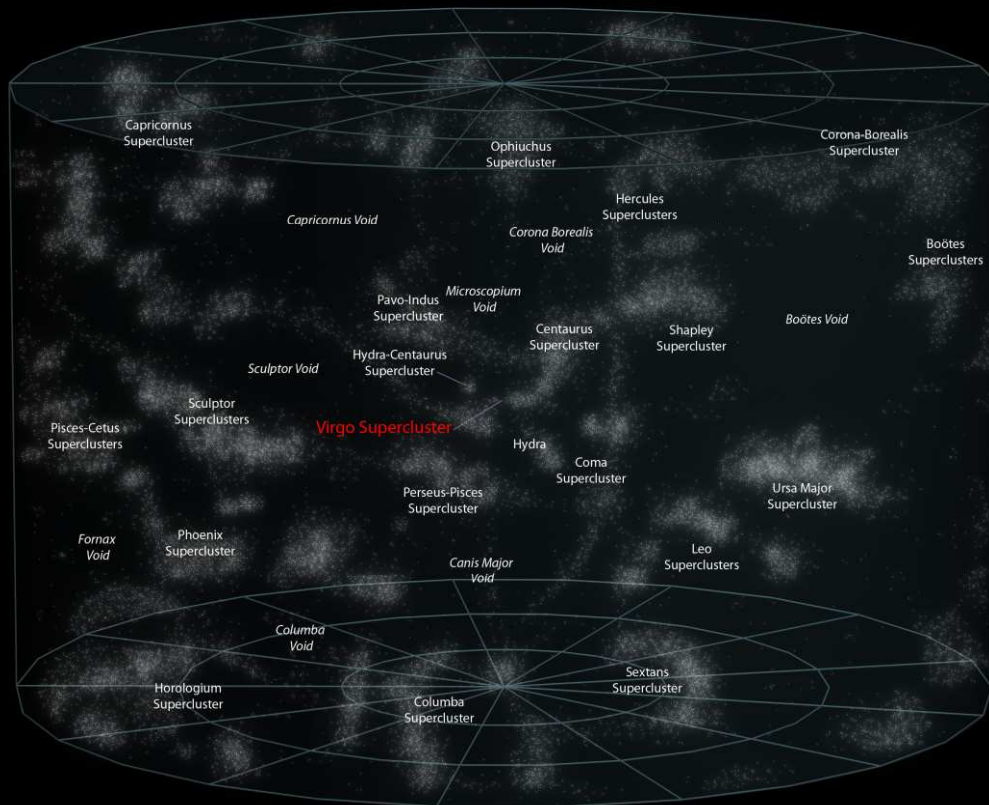
## LOCAL GALACTIC GROUP





# Co je vesmír? Vesmírné struktury.

## LOCAL SUPERCLUSTERS

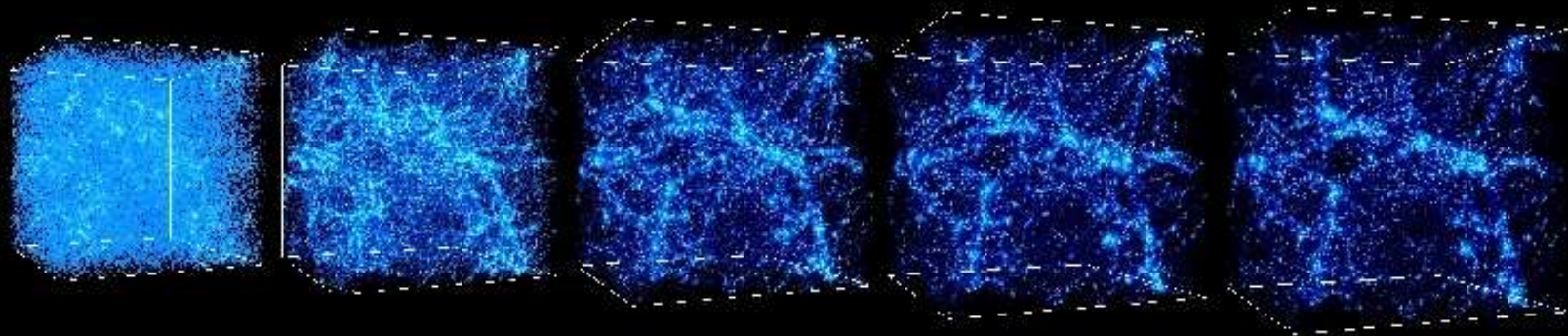
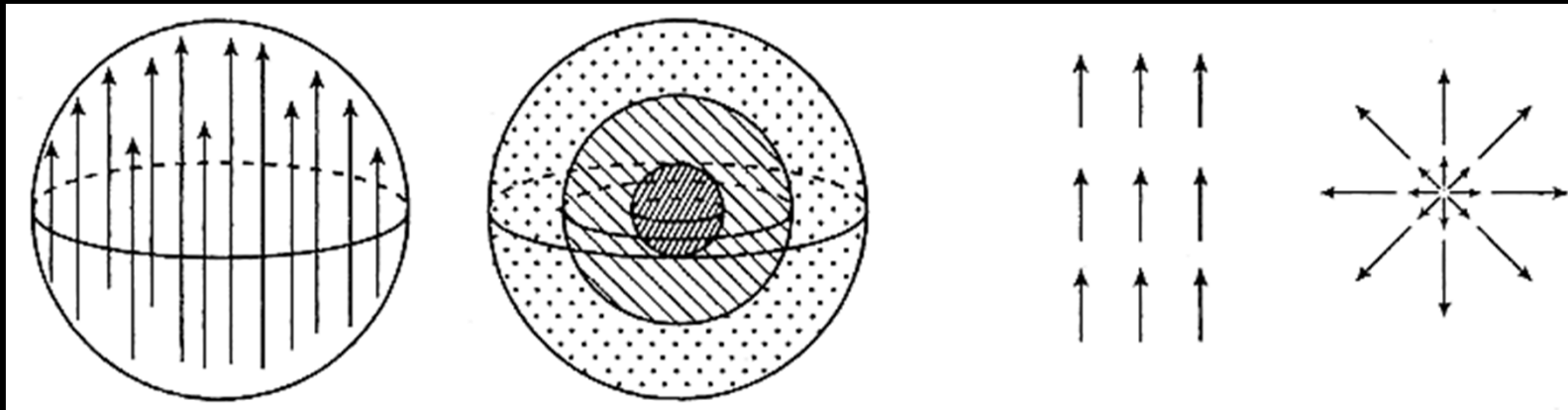


## OBSERVABLE UNIVERSE



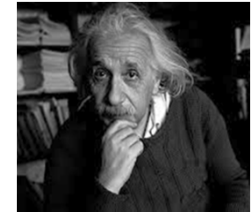
# Relativistická kosmologie

## Kosmologický princip



# Relativistická kosmologie

## Einsteinovy rovnice



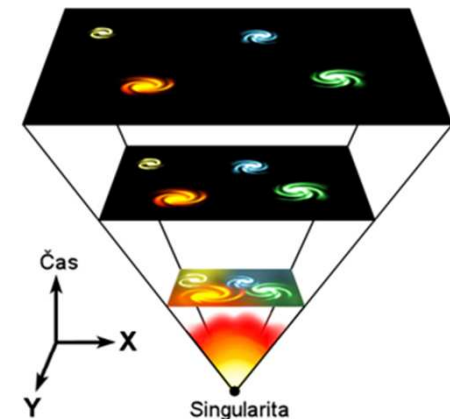
STR - nezakřivený prostoročas, metrika v Minkowskiho souřadnicích, t.j. v inerciálních soustavách spojených Lorentzovou transformací

OTR - obecně zakřivený prostoročas, metrika závisí na souřadnicích  
Einsteinovy rovnice spojují geometrii s hmotou

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

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

tenzor energie hybnosti



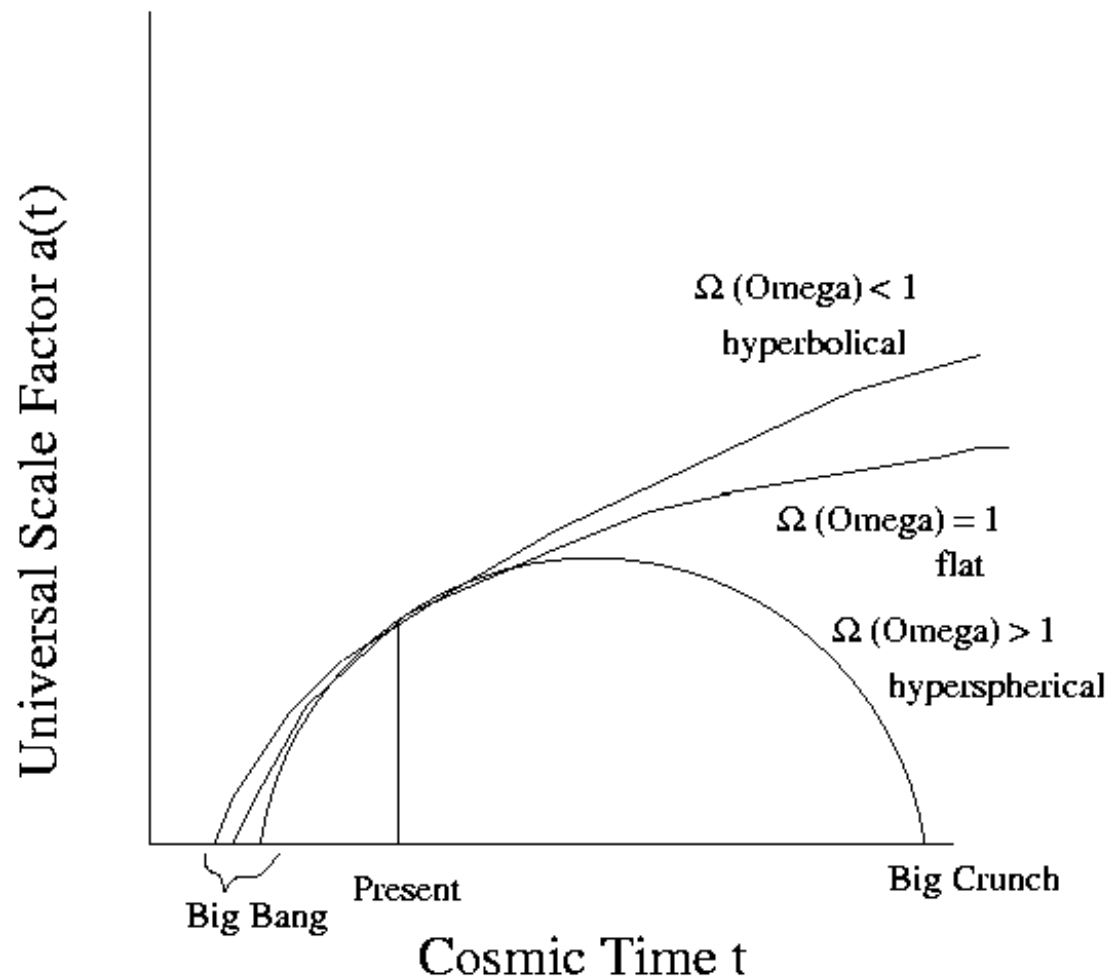
OTR se dnes chápe jako Einsteinova teorie gravitace.  
OTR přechází v STR v malém okolí události.

Analogie přechodu mezi neeukleidovskou a eukleidovskou geometrií

# Relativistická kosmologie

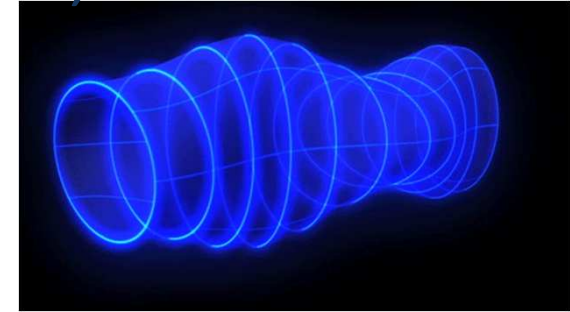
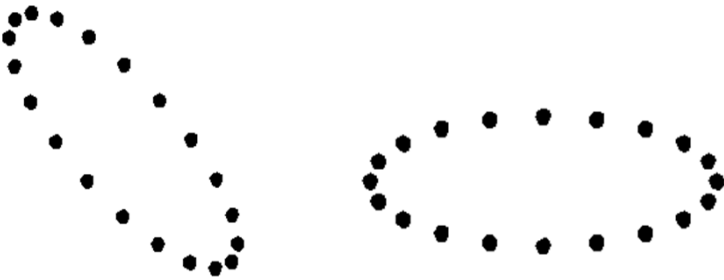
## FLRW modely

Friedmann–Lemaître Models

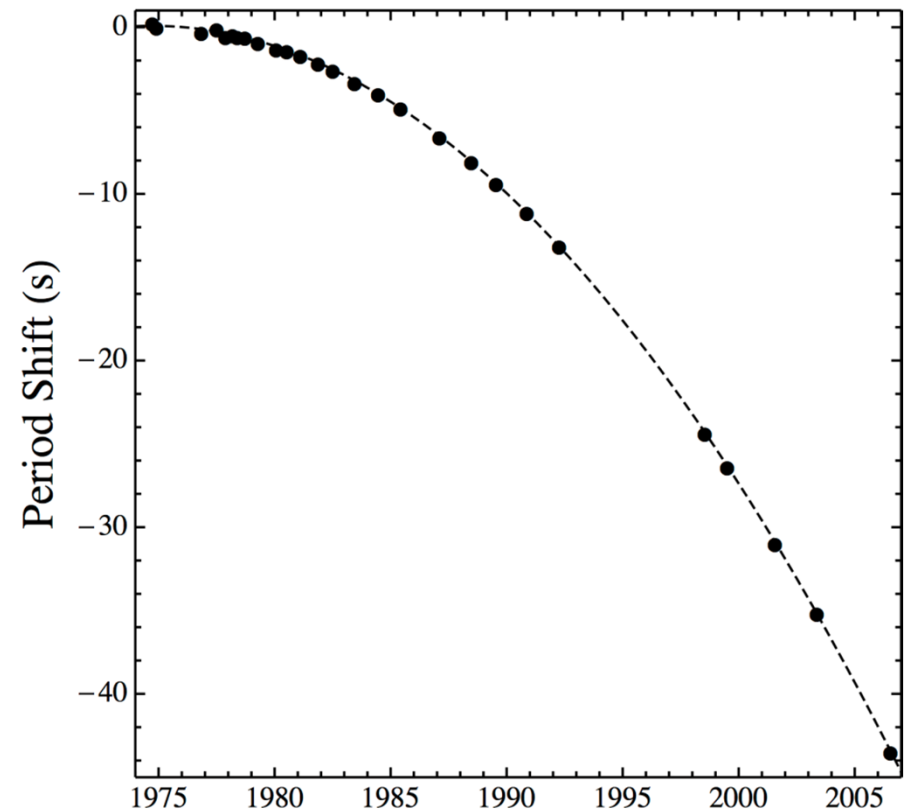
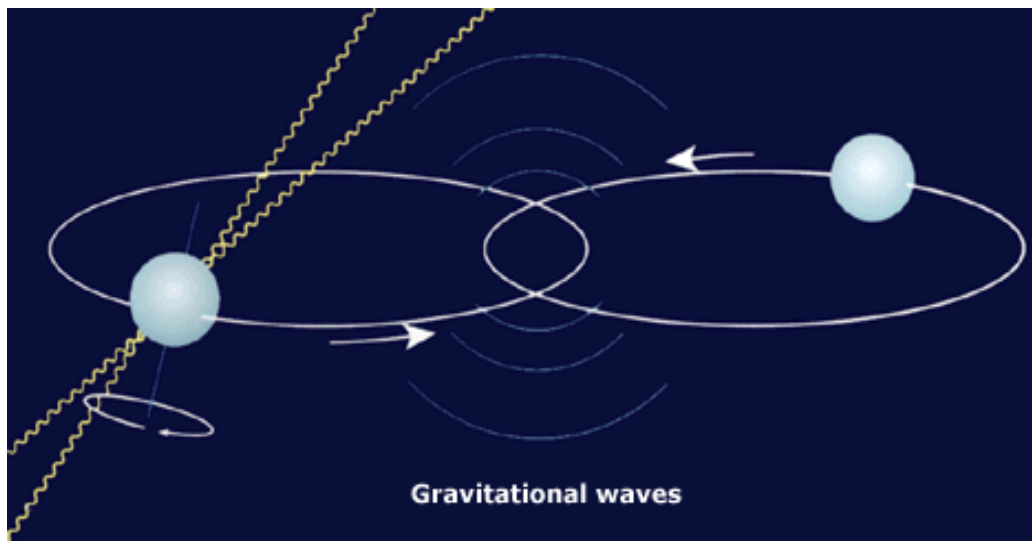


# Gravitační vlny

- Základní formule: Einstein 1915, 1916, 1918
- Pokusy o ověření
- LIGO



Možný zdroj gravitačních vln



Joseph Weber  
kontroverzní pionýr měření gravitačních vln

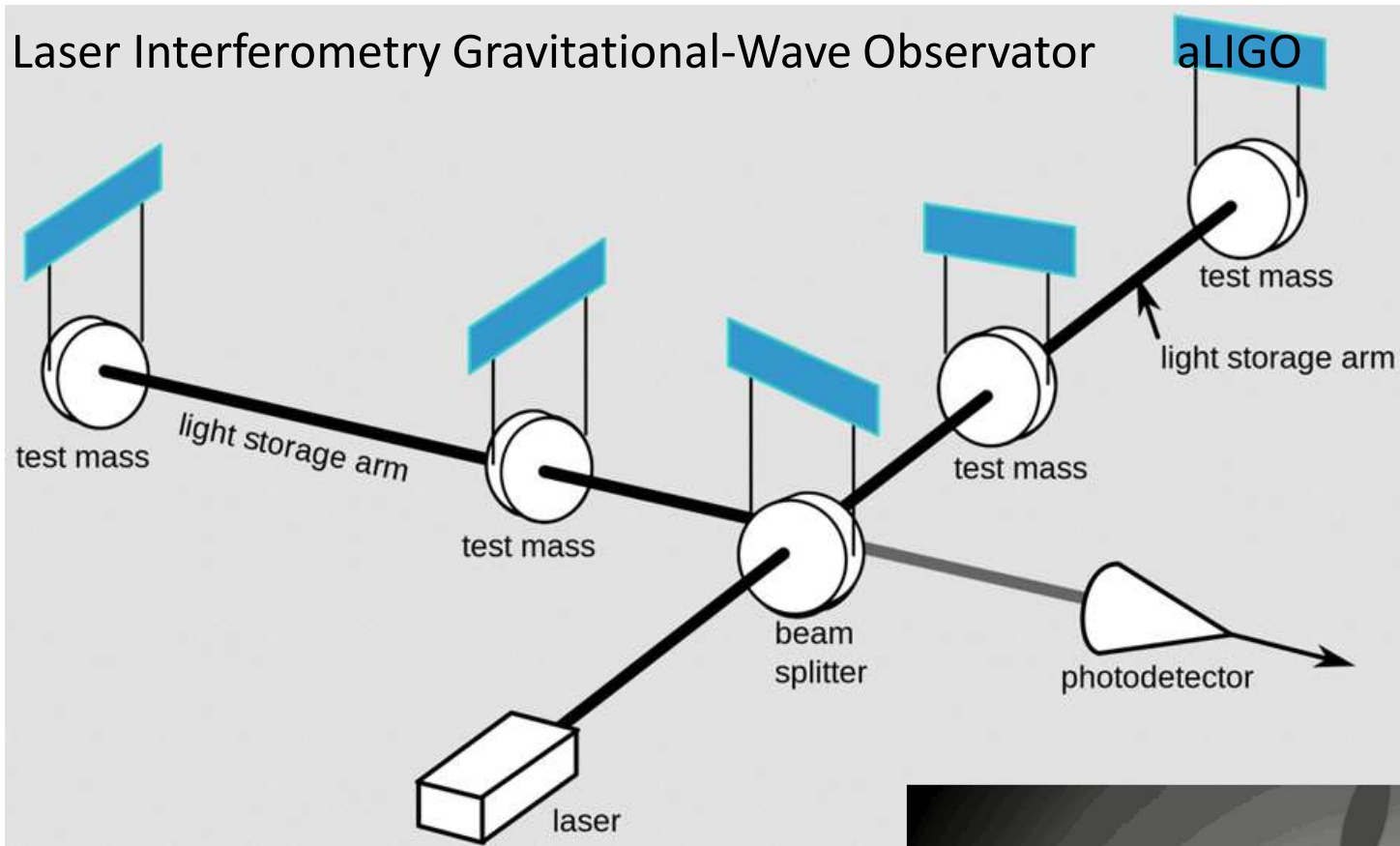
## Gravitační vlny



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.

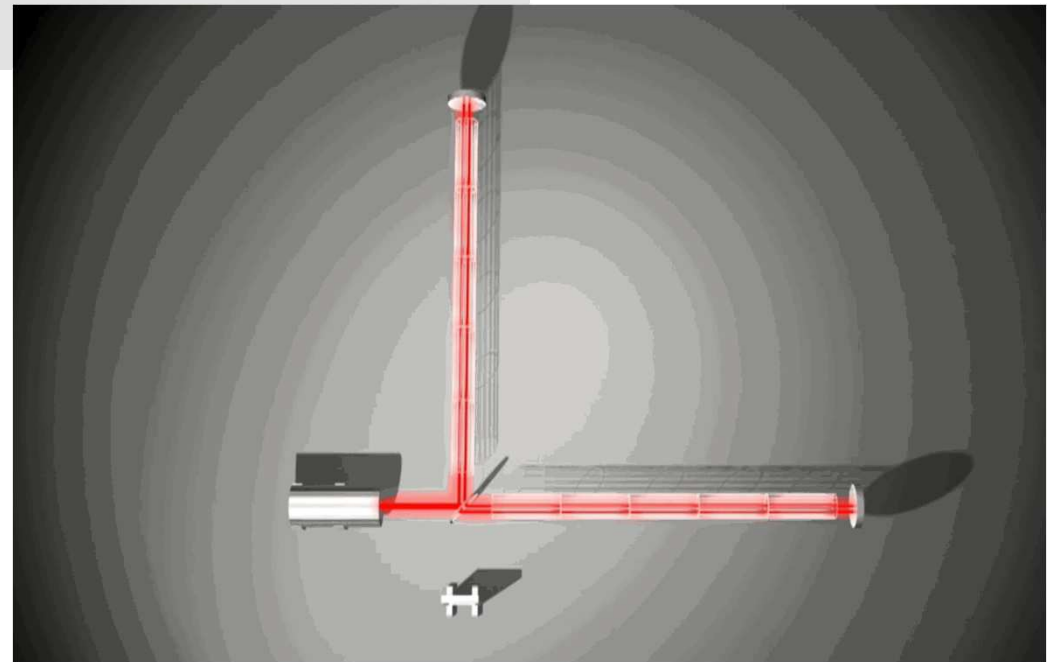
$$h \approx \frac{\Delta L}{L} \approx 10^{-15}$$

# Laser Interferometry Gravitational-Wave Observatory

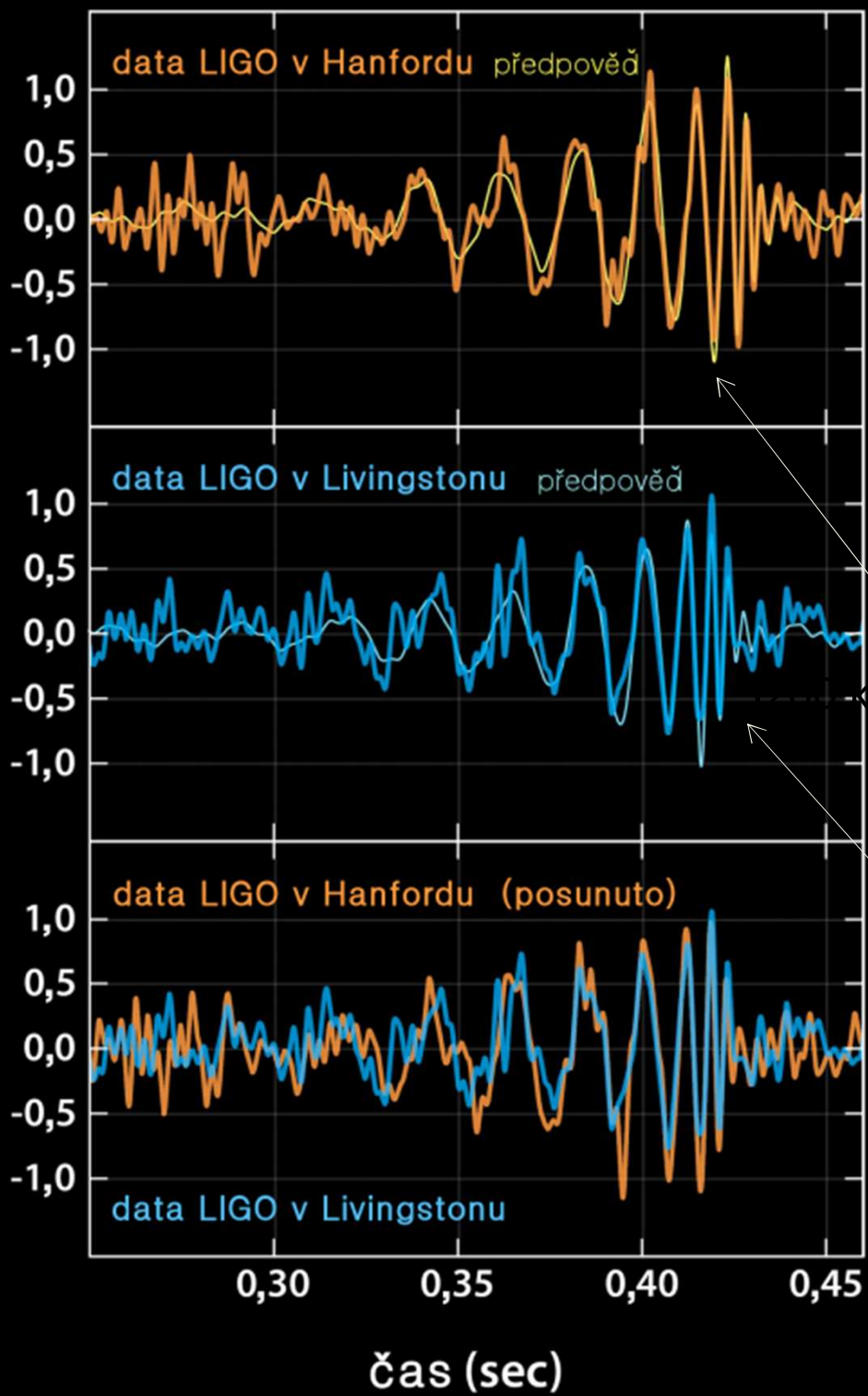


4 km dlouhá ramena

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



relativní deformace ( $10^{-21}$ )



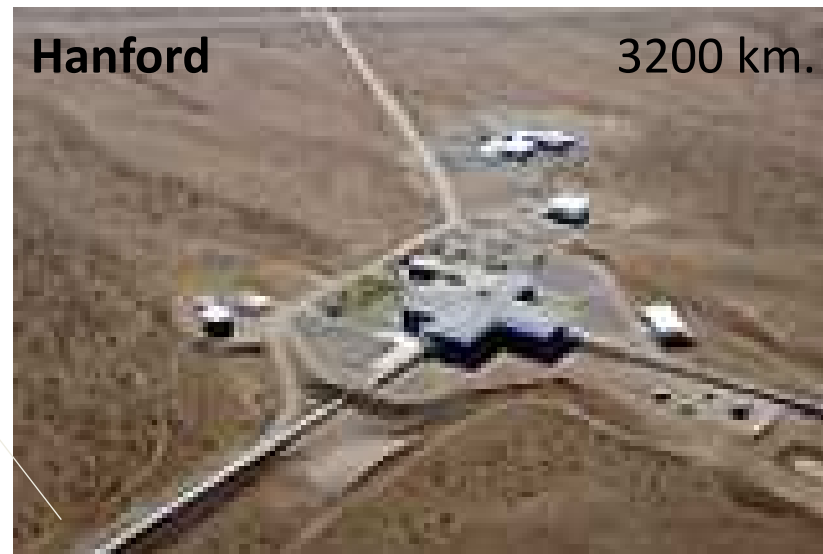
14.9.2015

11. února 2016



Hanford

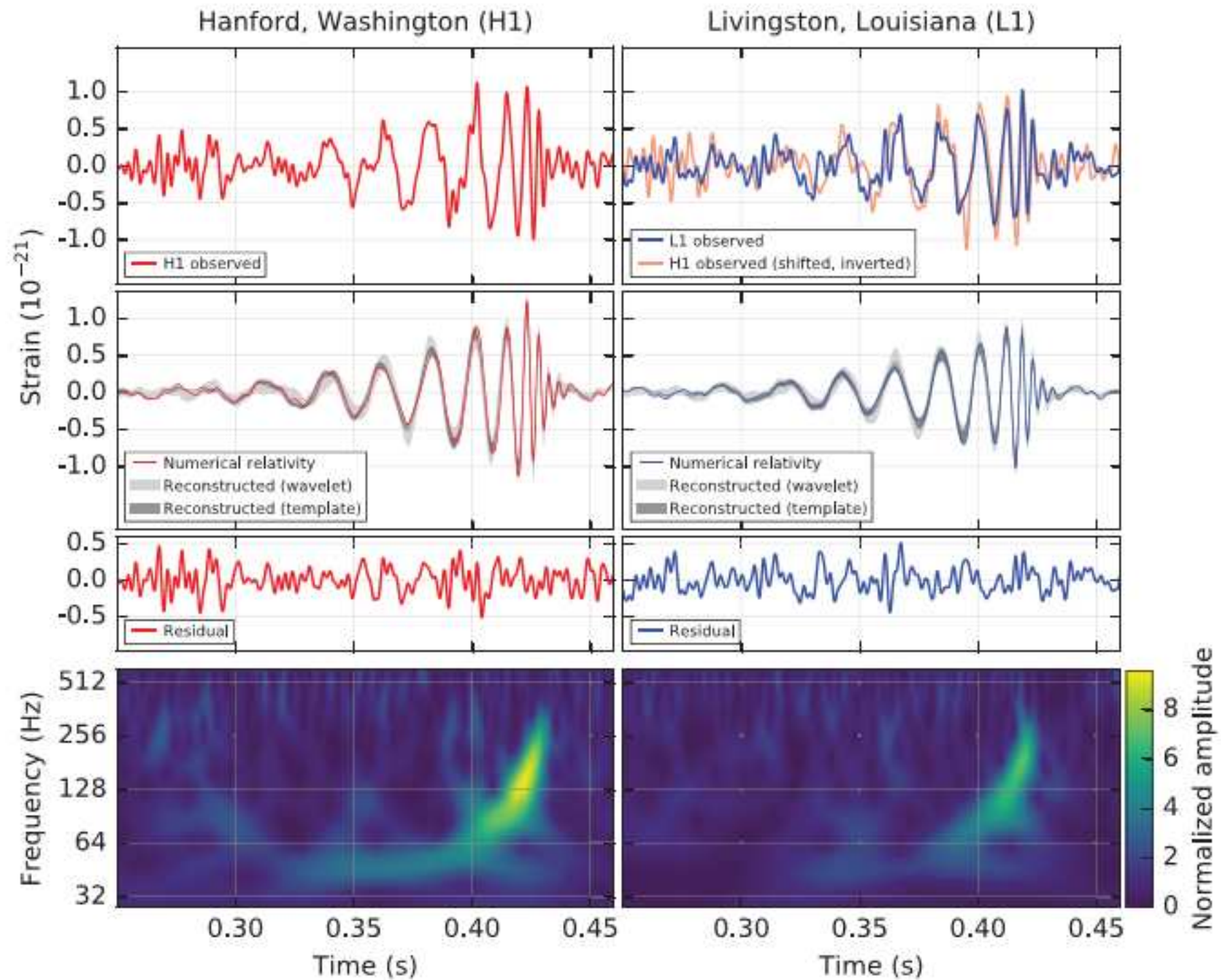
3200 km.



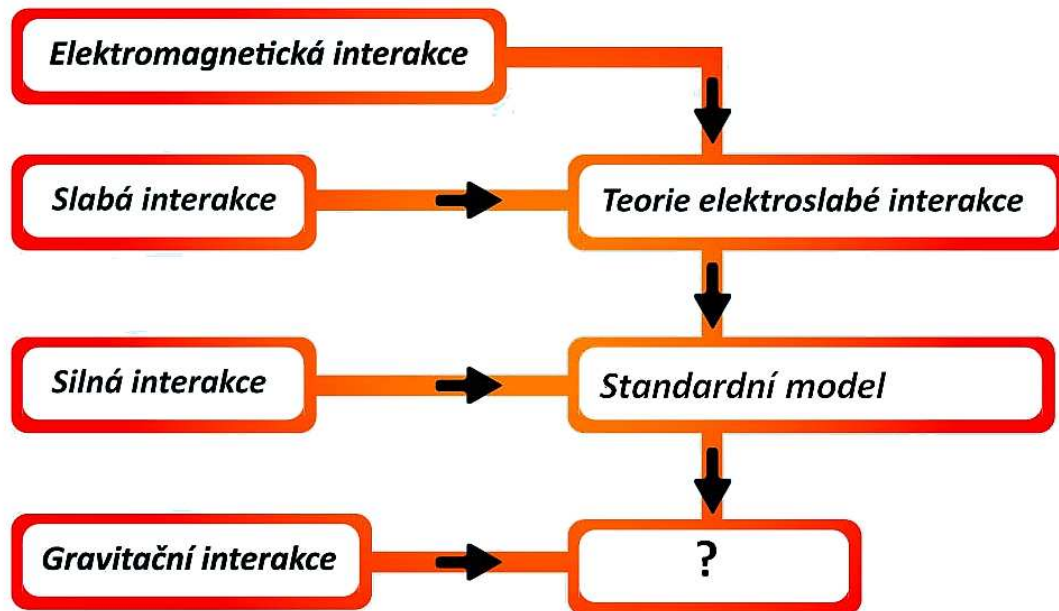
Livingstone







# Snahy o sjednocení interakcí



Mezi OTR a kvantovou fyzikou je stále nepřekonaná propast

Dva vrcholy fyziky:

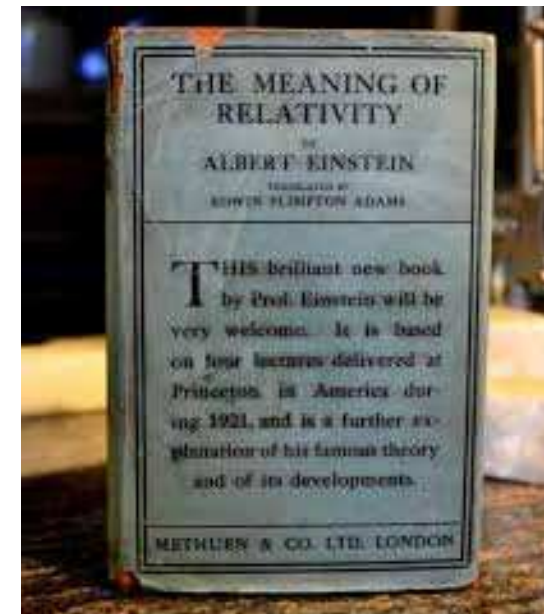
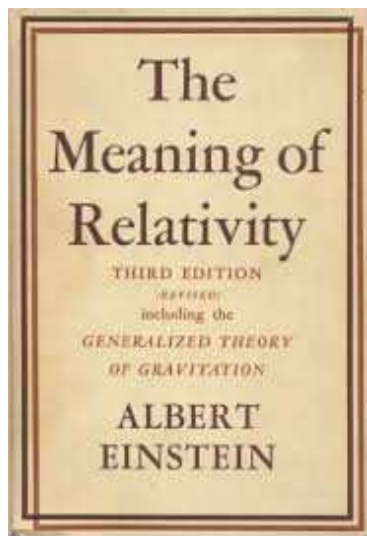
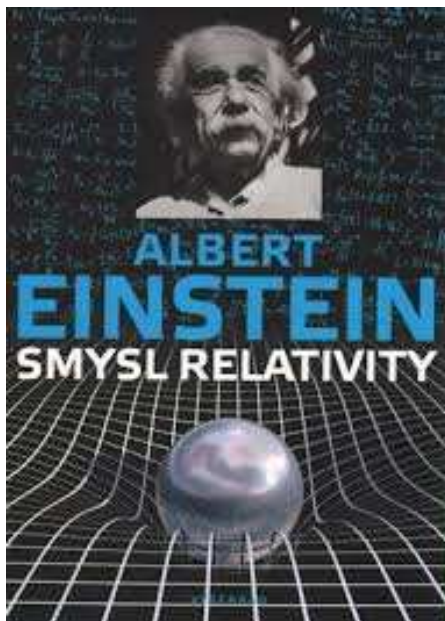
Standardní model elementárních částic

Standardní kosmologický model

Podají se nalézt jejich syntézu?



# Děkuji za pozornost



## Smysl relativity

Albert Einstein  
Nakladatel:  
Vyšehrad 2016  
Přeložil:  
Jan Novotný

The Meaning of Relativity – Princeton 1921

Zpracování 4 Einsteinových přednášek s  
doplněním o novější Einsteinovy poznatky :

v r. 1945 to byl text O kosmologickém problému,  
v r. 1955 Relativistická teorie nesymetrického  
pole

V textu a v kosmologickém dodatku Einstein  
vykládá klíčové myšlenky svých teorií.

Nejen každý fyzik by měl mít aspoň jednu knihu od Alberta Einsteina v knihovničce :-)).

