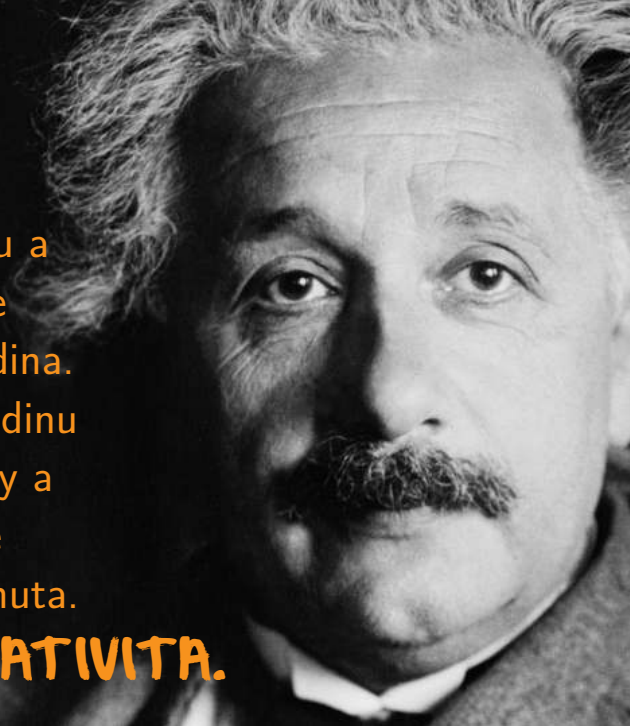


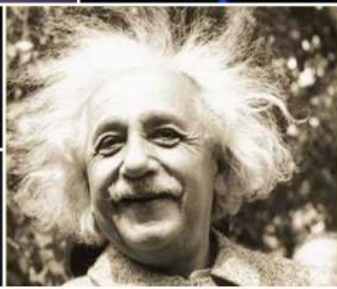
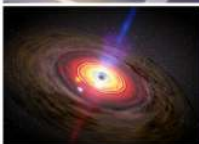
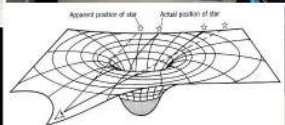
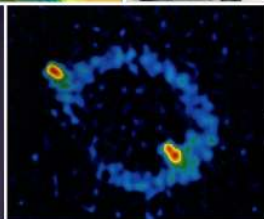
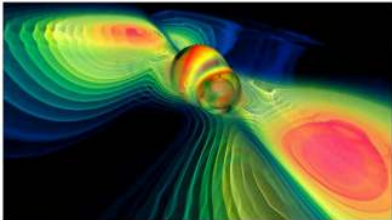


O ČEM (TAKÉ) JE
OBECNÉ TEORIE RELATIVITY?

A black and white close-up portrait of Albert Einstein, showing his characteristic wild hair and mustache. He is looking directly at the camera with a serious expression. The lighting is dramatic, with one side of his face in shadow.

Položte ruku na
rozpálenou plotnu a
minuta vám bude
připadat jako hodina.
Posad'te se na hodinu
vedle hezké slečny a
hodina vám bude
připadat jako minuta.

TO JE RELATIVITA.



- 1 Gravitace poprvé: budiž Newton!
- 2 Princip ekvivalence
- 3 Setrvačné síly v mechanice
- 4 Gravitace podruhé: Einstein
- 5 Ověřování OTR
- 6 Gravitační čočky
- 7 Gravitační vlny
- 8 Gravitomagnetismus
- 9 Pátrání po ČD ve vesmíru
- 10 Použité prameny



Gravitace poprvé: budiž Newton!

- **gravitace** – nejslabší interakce, ve Vesmíru dominantní
- informace o hvězdách, mlhovinách, galaxiích, kvazarech, ...pomocí **elmag. záření** (popř. neutrin, kosmického záření)
– gravitační „symfonii“ posloucháme s klapkami na uších
- „Matematické základy přírodních věd“ (1686–1687)



Newtonův gravitační zákon

$$\mathbf{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^3} \mathbf{r},$$

$$G = 6,673\,84(80) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$



Gravitace poprvé: budiž Newton!



Newtonův gravitační zákon

$$\mathbf{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^3} \mathbf{r},$$

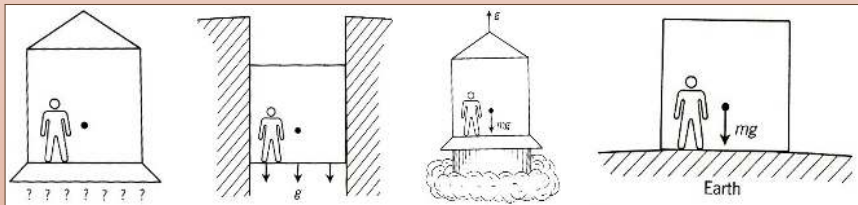
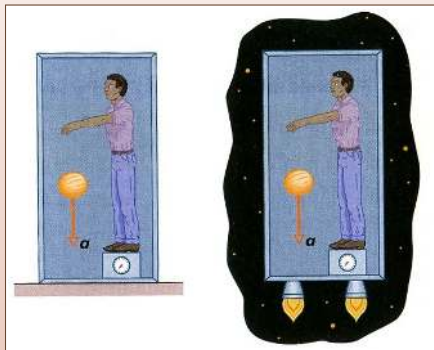
$$G = 6,673\,84(80) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$



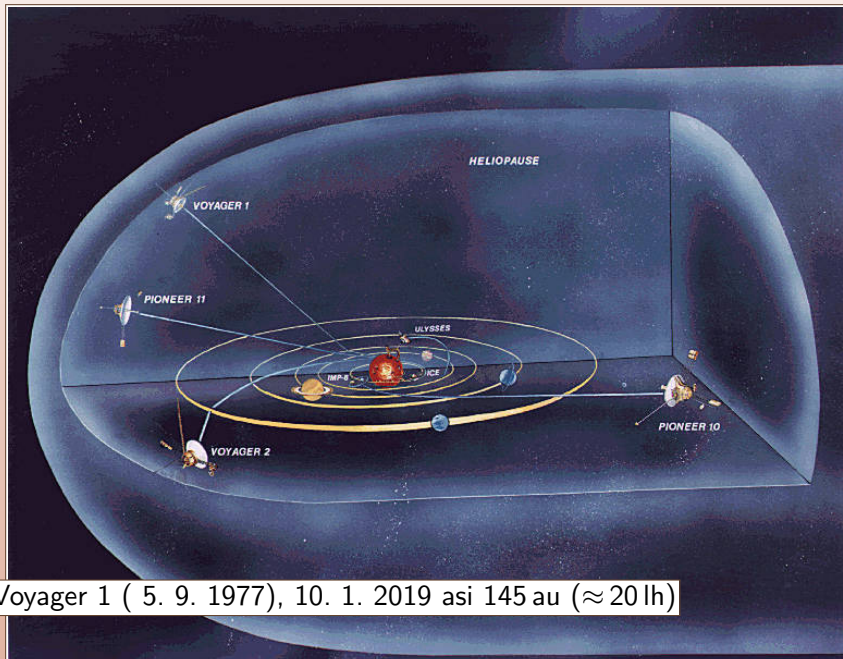
Woolsthorpe manor
odrůda Flower of Kent
strom do roku 1820

Problémy Newtonovy teorie

- okamžité působení na dálku
- co to vlastně je???
- (Hypotheses non fingo – 2. vydání Principií)
- ale ve sluneční soustavě s tím VĚTŠINOU vystačíme!
- Einsteinova nejšťastnější myšlenka $\Rightarrow$ princip ekvivalence



Newton nepatří do starého železa!



Voyager 1 (5. 9. 1977), 10. 1. 2019 asi 145 au (≈ 20 lh)

Princip ekvivalence



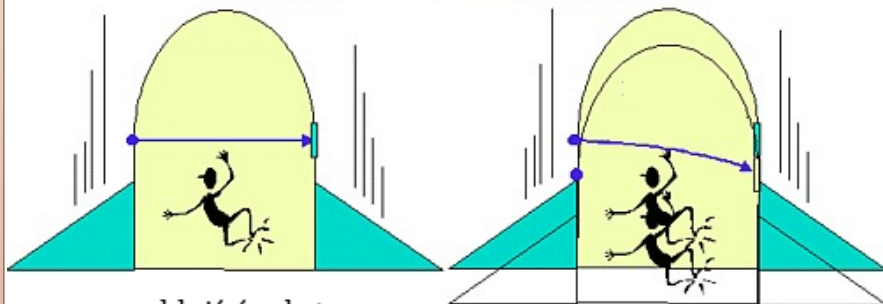
Galileo dimostra la legge di caduta dei gravi, *Giuseppe Bezzuoli* (1841)

Princip ekvivalence

Princip
ekvivalence
a světlo

světelný paprsek

inerciální VS
(bez gravitace)



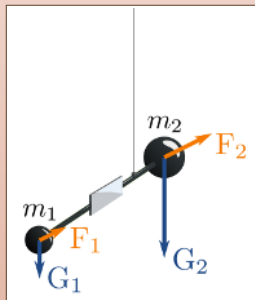
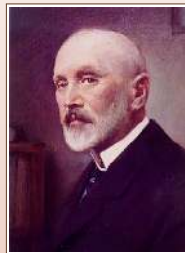
zrychlující raketa

Princip ekvivalence



René François Ghislain Magritte
(1898 – 1967): Golconde

Baron Loránd Eötvös de Vásárosnamény
(27. 7. 1848 – 8. 4. 1919)
experiment: 1906–1909

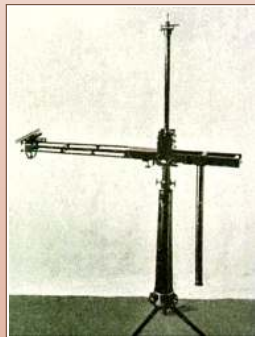
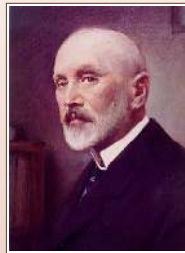


Princip ekvivalence

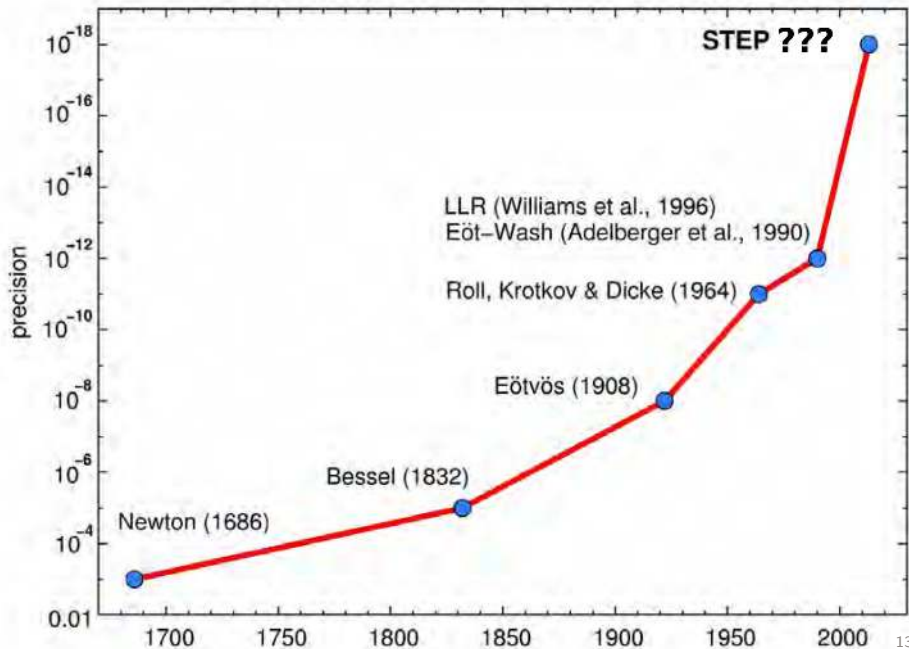


René François Ghislain Magritte
(1898 – 1967): Golconde

Baron Loránd Eötvös de Vásárosnamény
(27. 7. 1848 – 8. 4. 1919)
experiment: 1906–1909

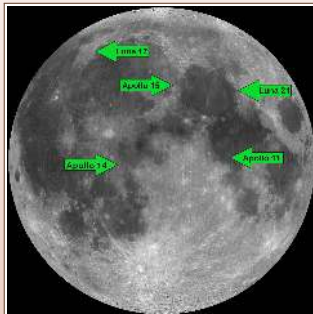
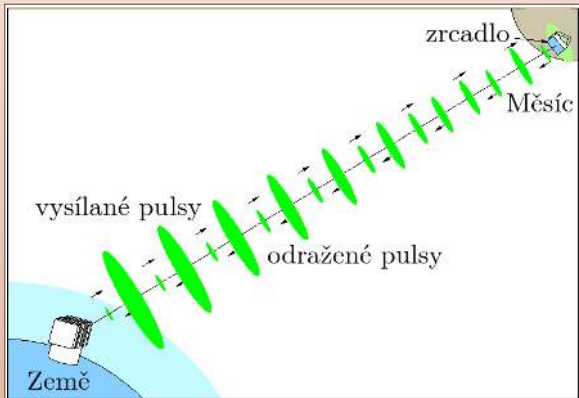


Princip ekvivalence

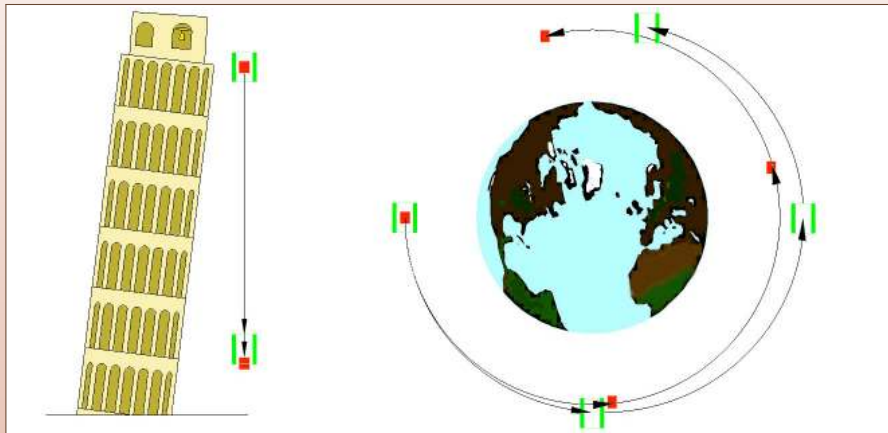


Lunar Laser Ranging

- $\Delta d \approx 3,8 \text{ cm/rok}$
- $\Delta T_{\otimes} \approx 2,3 \text{ ms/století}$ (Edmund Halley, George Darwin)



STEP???



10^{-18}

Satellite Test of the Equivalence Principle

<http://einstein.stanford.edu/STEP/>

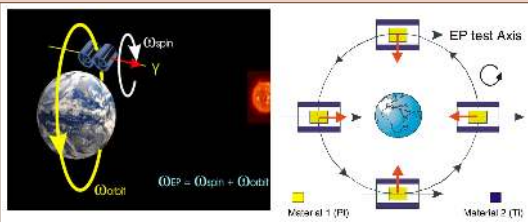
Microscope (25. 4. 2016 – 18. 10. 2018)

 Touboul, P. et al. (2012). The MICROSCOPE experiment, ready for the in-orbit test of the equivalence principle. *Classical and Quantum Gravity*, **29**(18), 184010. DOI:10.1088/0264-9381/29/18/184010.

10^{-15}

Micro-Satellite à traînée
Compensée pour
l'Observation du Principe
d'Equivalence

<https://microscope.cnes.fr>



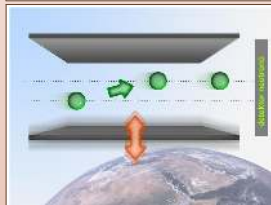
- ⇒ výška okolo 700 km
- ⇒ za 25 let shoří v atmosféře



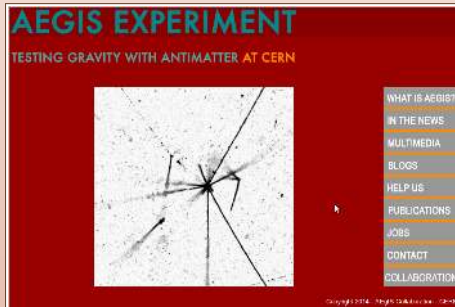
Kvantový ping-pong

- Laueho-Langevinův ústavu v Grenoblu + Vídeň
- Štěpný reaktor – nejintenzivnější kontinuální zdroj neutronů na světě

 Jenke, T., Geltenbort, P., Lemmel, H., & Abele, H. (2011). Realization of a gravity-resonance-spectroscopy technique. *Nature Physics*, **7**(6), 468–472.
DOI:10.1038/nphys1970.



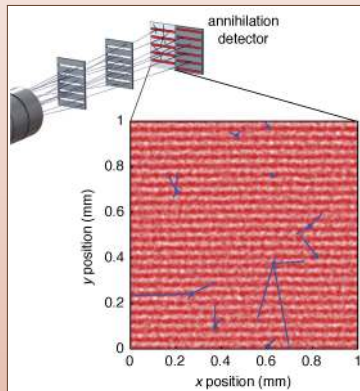
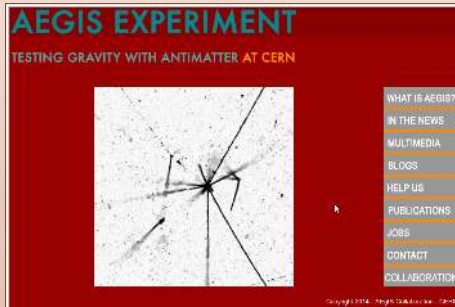
- **Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy**
- Moaré interference aplikovaná na svazky antivodíku v tíhovém poli



<https://aegis.web.cern.ch>



- **Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy**
- Moaré interference aplikovaná na svazky antivodíku v tíhovém poli

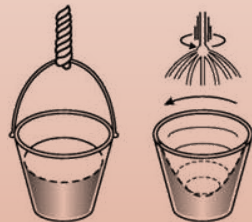


<https://aegis.web.cern.ch>

Spor o původu setrvačných sil

- STR: inerciální VS, mechanické a elektromagnetické děje
- na počátku všeho byl Newton (nebo Aristotelés) ...
- Galileo Galilei Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo (1632), **princip relativity** (pohyb lodi)
- Newtonovy zákony – jak poznáme inerciální soustavu?

Setrvačnost je spojena s pohybem těles vzhledem k absolutnímu prostoru, rotace vůči absolutnímu prostoru je zdrojem **setrvačných (fiktivních) sil** $\Rightarrow$ „Newtonovo vědro“



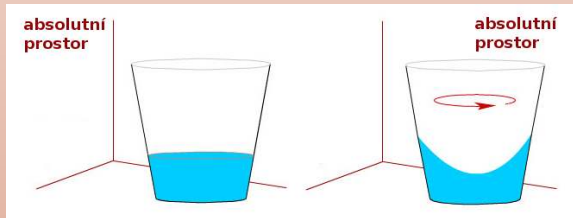
Spor o původu setrvačných sil

- Galileo Galilei Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo (1632), **princip relativity** (pohyb lodí)
- Newtonovy zákony – jak poznáme inerciální soustavu?

Setrvačnost je spojena s pohybem těles vzhledem k absolutnímu prostoru, rotace vůči absolutnímu prostoru je zdrojem **setrvačných (fiktivních) sil** $\Rightarrow$ „Newtonovo vědro“



Závisí na rotaci vody vzhledem k prostoru, ne vědru!





Cementerio de Trenes, poblíž města Uyuni (JZ Bolívie)

Figure 1. John Wheeler lecturing at a conference in Cambridge, UK, in 1971. Wheeler's style was to cover the blackboard with inspirational colored-chalk diagrams and phrases before the lecture, then work his way through them, one by one.



„Hmota říká prostoru, jak se zakřivovat a prostor říká hmotě, jak se pohybovat.“
John Archibald Wheeler (1911–2008)

Obrázek: Misner, C. W., Thorne, K. S., & Zurek, W. H. (2009). John Wheeler, relativity, and quantum information. *Physics Today*, **62**(4), 40–46. DOI:10.1063/1.3120895.





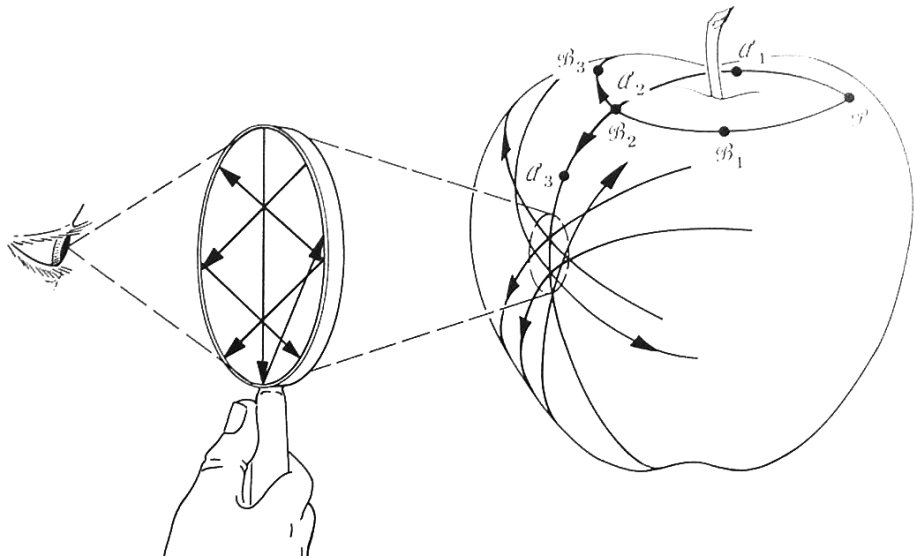
PEVNOST
POZNÁNÍ

Interaktivní
muzeum vědy

Univerzity Palackého
v Olomouci

Máme otevřeno
úterý - pátek: 9:00 - 17:00
sobota - neděle: 9:00 - 18:00





 Misner, C., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A. (1973). *Gravitation*.
 San Francisco: W. Freeman.

Dlouhá cesta k rovnicím

- matematický aparát: Georg A. Pick (Praha), Marcel Grossmann (Zürich 1912)
- červen 1915: přednášky v Göttingen
- Berlín: čtvrtek 4. 11. 1915, 11. 11., 18. 11. (stáčení perihelia) a 25. 11.
- únava, žaludeční problémy
- Hilbert: přednáška 16. 11., 20. 11. (vyšla 31. 3. 1916, korektura přijata 6. 12.); 20. 12. dopis Einsteinovi; variační princip ($\times$ Newton a Leibniz)

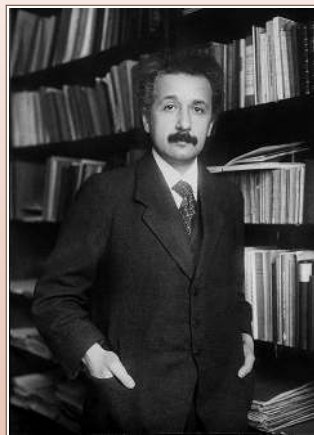
-  Janssen, M., & Renn, J. (2015). Arch and scaffold: How Einstein found his field equations. *Physics Today*, **68**(11), 30–36. DOI:10.1063/PT.3.2979.
-  Grygar, J. (2015). Prolínání astronomie a relativity (1919–2014). *PMFA*, **60**(3), 189–202.
-  Novotný, J. (2015). 100 let obecné teorie relativity. *PMFA*, **60**(3), 177–188.
-  Semerák, O. (2015). Albert Einstein a století obecné relativity. *PMFA*, **60**(3), 215–238.



Dlouhá cesta k rovnicím

- matematický aparát: Georg A. Pick (Praha), Marcel Grossmann (Zürich 1912)
- červen 1915: přednášky v Göttingen
- Berlín: čtvrtek 4. 11. 1915, 11. 11., 18. 11. (stáčení perihelia) a 25. 11.
- únava, žaludeční problémy
- Hilbert: přednáška 16. 11., 20. 11. (vyšla 31. 3. 1916, korektura přijata 6. 12.); 20. 12. dopis Einsteinovi; variační princip ($\times$ Newton a Leibniz)

-  Janssen, M., & Renn, J. (2015). Arch and scaffold: How Einstein found his field equations. *Physics Today*, **68**(11), 30–36. DOI:10.1063/PT.3.2979.
-  Grygar, J. (2015). Prolínání astronomie a relativity (1919–2014). *PMFA*, **60**(3), 189–202.
-  Novotný, J. (2015). 100 let obecné teorie relativity. *PMFA*, **60**(3), 177–188.
-  Semerák, O. (2015). Albert Einstein a století obecné relativity. *PMFA*, **60**(3), 215–238.



Dva rivalové v cílové rovině?

$$G_{im} = -\kappa \left(T_{im} - \frac{1}{2} g_{im} T \right),$$
$$\sum_{\rho\sigma} g^{\rho\sigma} T_{\rho\sigma} = \sum_{\sigma} T_{\sigma} = T$$



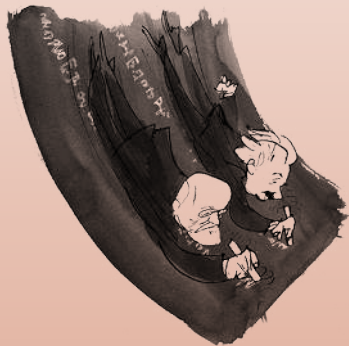
<http://www.einstein.caltech.edu>



Einstein, A. (November 25, 1915). Die Feldgleichungen der Gravitation. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*: 844–847. (Vyšel 2. 12. 2015).



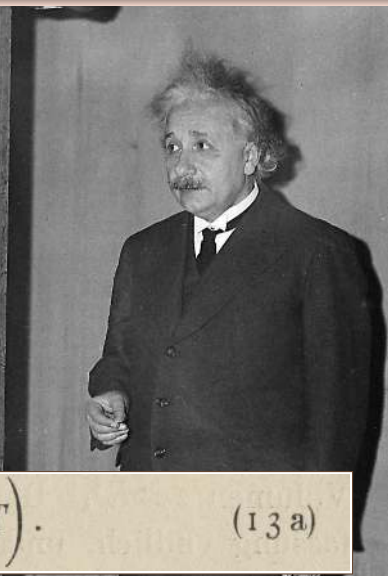
Einstein, A. (1916). Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen Der Physik*, **354**(7), 769–822.
DOI:10.1002/andp.19163540702.



Malý dodatek: kosmologická konstanta

$$\begin{array}{l}
 \left(\frac{m}{\sqrt{1-u^2}}, \frac{mu_i}{\sqrt{1-u^2}}, m + \frac{1}{2}mu^2, mu_i \right) \quad \left| \begin{array}{l} \frac{mu_i}{\sqrt{1-u^2}} \text{ Impuls} \\ m \left(\frac{1}{\sqrt{1-u^2}} - 1 \right) \text{ Kin. Energy} \end{array} \right. \\
 \hline
 = \frac{t' + vx'}{\sqrt{1-v^2}} \quad \left| \begin{array}{l} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1-v^2}} \\ y = y' \\ z = z' \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \sum \frac{1}{\sqrt{1-u^2}} = \frac{2}{\sqrt{1-u^2} \sqrt{1-v^2}} \\
 \sum \frac{u_i}{\sqrt{1-u^2}} = \frac{2v}{\sqrt{1-u^2} \sqrt{1-v^2}} \\
 \text{Hyp. } \sum \mathcal{E}_v = \sum \mathcal{E}_v' \\
 \sum \mathcal{E} = \sum \mathcal{E}' \\
 \mathcal{E}_v = \dot{m} u_v \quad \mathcal{E}_v' = \dot{m}' u_v' \\
 \mathcal{E} = \mathcal{E}_v + m \mathcal{E}_v(u)
 \end{array}$$



$$G_{\mu\nu} - \lambda g_{\mu\nu} = -\kappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right). \quad (13a)$$

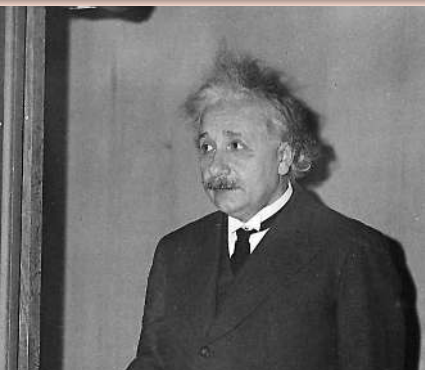


Einstein, A. (1917). Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 142–152.

Malý dodatek: kosmologická konstanta

$$\begin{aligned} & \left(\frac{m}{\sqrt{1-u^2}}, \frac{mu_i}{\sqrt{1-u^2}} \right) \quad \left| \begin{array}{l} \frac{mu_i}{\sqrt{1-u^2}} \text{ Impuls} \\ m \left(\frac{1}{\sqrt{1-u^2}} - 1 \right) \text{ Kin. Energy} \end{array} \right. \\ & \left(m + \frac{1}{2} mu^2, mu_i \right) \\ & \hline & = \frac{t' + vx'}{\sqrt{1-v^2}} \quad \left| \begin{array}{l} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1-v^2}} \\ y = y' \\ z = z' \end{array} \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum \frac{1}{\sqrt{1-u^2}} = \frac{2}{\sqrt{1-u^2} \sqrt{1-v^2}} \\ & \sum \frac{u_i}{\sqrt{1-u^2}} = \frac{2v}{\sqrt{1-u^2} \sqrt{1-v^2}} \\ & \text{Hyp. } \sum \gamma_i = \sum \gamma_i' \\ & \sum \mathcal{E} = \sum \mathcal{E}' \\ & \gamma = \vec{m} u \cdot \vec{F} u \\ & \mathcal{E} = \mathcal{E}_0 + m \gamma(x) \end{aligned}$$



„Obvyklý“ tvar

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



Einstein Proved that

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

*The most Attractive parts
of the Universe are Curvy.*

Feynmanova historka

Přiletěl jsem na konferenci o den později (z nějakého důvodu jsem zahájení konference nestihl), vystoupil z letadla a odešel na stanoviště taxislužby.

„Potřebuju se dostat na University of North Carolina” řekl jsem dispečerovi.

„Kterou univerzitu myslíte?” zeptal se mě. „Státní univerzitu v Raleigh, nebo tu soukromou v Chapel Hill?”

Pochopitelné jsem neměl nejmenší ponětí. „Jsou daleko od sebe?” zeptal jsem se. Z nějakého důvodu mi připadalo, že by měly být poblíž.

„Jedna je odsud na sever, druhá na jih, a obě jsou odsud zhruba stejně daleko.”

Žádný materiál, který by mi pomohl zjistit, která z těch univerzit to je, jsem s sebou neměl. A taky nikdo nepřiletěl o den později jako já.

To mi na druhé straně vnuklo nápad. „Heleďte,” řekl jsem dispečerovi, „ta konference vlastně začala už včera, takže včera vám tu musela vystoupit spousta lidí... Já vám je popíšu: všichni vypadali tak trošku mimo, bavili se spolu a nekoukali pořádně, kam jdou, a v jednom kuse říkali cosi jako: ‚Gé-mí-ný, gé-mí-ný.’”

Dispečerovi se rozjasnila tvář. „To mluvíte o Chapel Hill!”



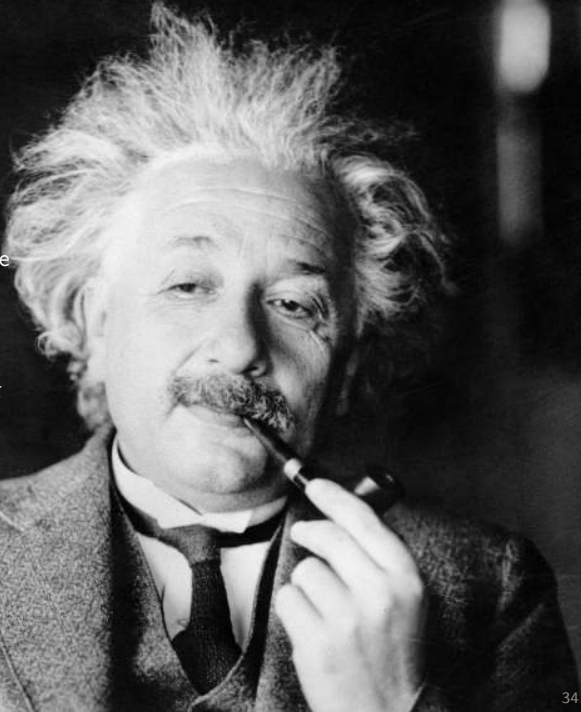
Feynman, R. P. (1989). *To snad nemyslíte vážně!* Praha: Mladá fronta.



„Ve světle již nabytého poznání se nám zdálo to, čeho jsme šťastně dosáhli, téměř samozřejmé, a každý inteligentní student to pochopí bez přílišné námahy. Ale hledání v temnu, plné předtuch a trvajících roky, napjatá touha, střídání naděje a skleslosti a konečně proniknutí k pravdě, to zná jen ten, kdo to sám zažil.“



Einstein, A. (1966). *Jak vidím svět*. Praha: Československý spisovatel.

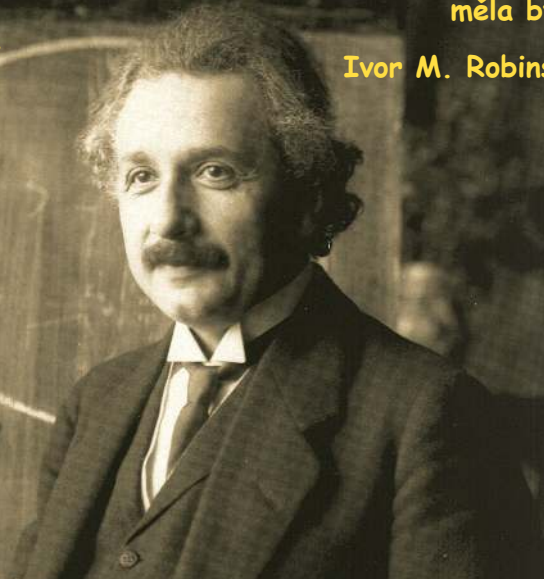


Obecná teorie relativity Vás
přesvědčí, až ji prostudujete.
Proto ji nehájím jediným
slovem.

Arnoldu Sommerfeldovi
8. 2. 1916

Jasně, správnou teorií
gravitace je obecná relativita.
A pokud není, tak by rozhodně
měla být.

Ivor M. Robinson



Obecná teorie relativity

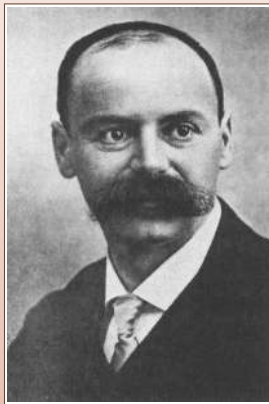
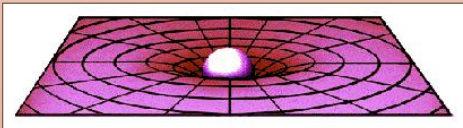
- Einstein na zasedání Pruské akademie věd (25. 11. 1915): nový nástroj k výpočtům – OTR

Gravitace je důsledkem zakřivení prostoročasu!

- Karl Schwarzschild: prostoročas vně (22. 12. 2015)/uvnitř (6. 2. 2016) sférické nerotující hvězdy, kritický poloměr stejný jako Michellův

$$r_g = \frac{2GM}{c^2} = 2M$$

- † 11. 5. 1916, autoimunitní onemocnění kůže a sliznice



ředitel hvězdáren
v Göttingen a
Potsdami

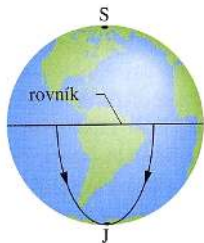
KS: „Jak vidíte, válka je ku mně laskava, navzdory divoké střelbě v rozhodně pozemské vzdálenosti mi dovoluje tuto vycházku do krajiny Vašich myšlének.“

AE: „To jsem nepomyslel, že by přesné pojednání bodového problému bylo tak jednoduché.“



Einsteinturm, Potsdam (sluneční observatoř, 1919-1924 ve spolupráci s Albertem Einsteinem a Erwinem Finlay-Freundlichem)

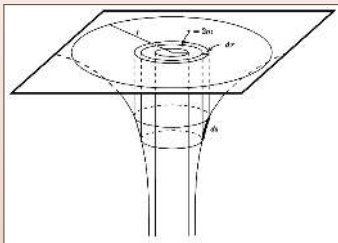
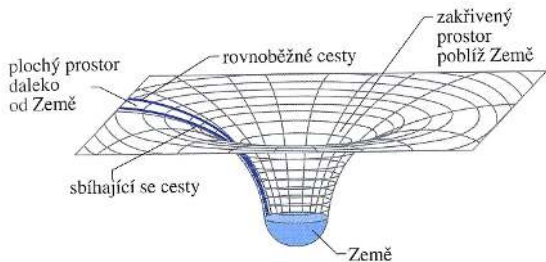
Gravitace je důsledkem zakřivení prostoru a času



(a)

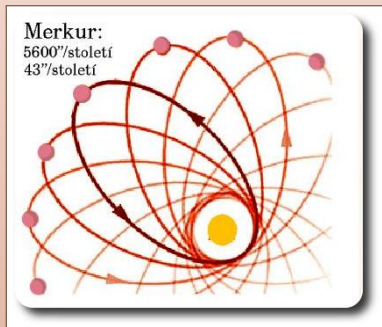
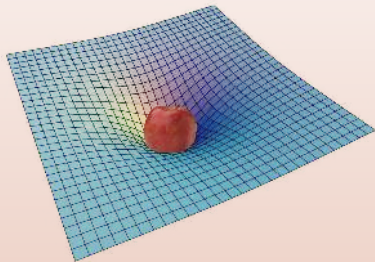


(b)



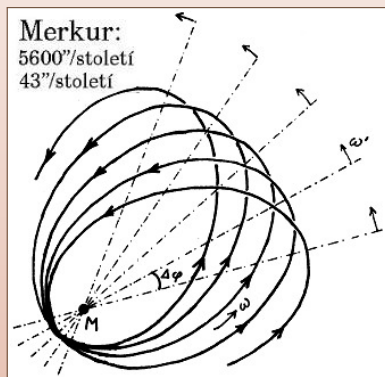
Gravitace je důsledkem zakřivení prostoru a času

- gravitace je důsledkem zakřivení prostoru a času
- každý hmotný bod mění geometrické vlastnosti prostoročasu ve svém okolí (dokonce strhává k rotaci) $\Rightarrow$ žádná síla
- základní experimenty: posun perihelia, ohyb světelných paprsků, gravitační rudý posuv, zpoždování radarových signálů – mnohokrát experimentálně ověřeno



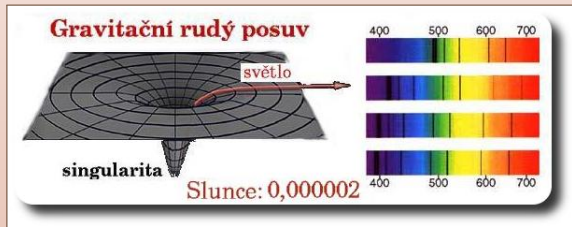
Gravitace je důsledkem zakřivení prostoru a času

- gravitace je důsledkem zakřivení prostoru a času
- každý hmotný bod mění geometrické vlastnosti prostoročasu ve svém okolí (dokonce strhává k rotaci) $\Rightarrow$ žádná síla
- základní experimenty: posun perihelia, ohyb světelných paprsků, gravitační rudý posuv, zpoždování radarových signálů – mnohokrát experimentálně ověřeno

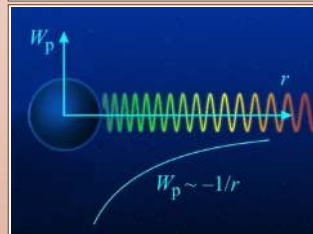


Ověřování OTR: rudý posuv

- zpomalení chodu hodin v gravitačním poli
- změna vlnové délky vysílaných signálů –
rudý posuv

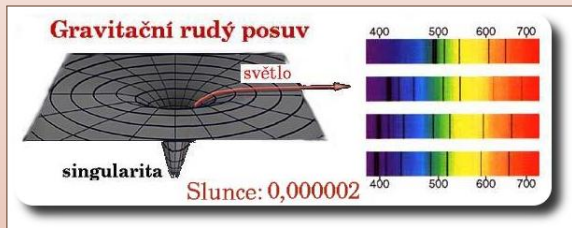


- 1960 – R. V. Pound, G. A. Rebka
- 1965 – R. V. Pound, R. V. Snider
- 1971 – J. C. Hafele, R. E. Keating
- 1976 – Gravity Probe A

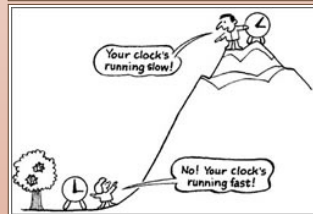


Ověřování OTR: rudý posuv

- zpomalení chodu hodin v gravitačním poli
- změna vlnové délky vysílaných signálů –
rudý posuv



- 1960 – R. V. Pound, G. A. Rebka
- 1965 – R. V. Pound, R. V. Snider
- 1971 – J. C. Hafele, R. E. Keating
- 1976 – Gravity Probe A



Pound & Rebka, 1960–1965

- Harvard, Jefferson laboratory
- věž 22,6 m, ^{57}Co , 14.4 keV, $T_{1/2} = 10^{-7} \text{ s}$
- $\Delta\omega/\omega \cdot 10^{-15}$, Mössbauerův jev

 Pound, R. V., & Rebka, G. A. (1959). Gravitational Red-Shift in Nuclear Resonance. *Physical Review Letters*, **3**(9), 439–441.
DOI:10.1103/PhysRevLett.3.439.

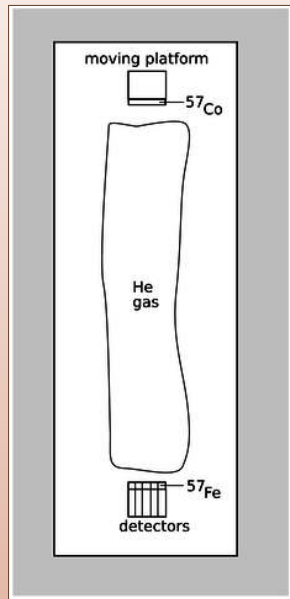
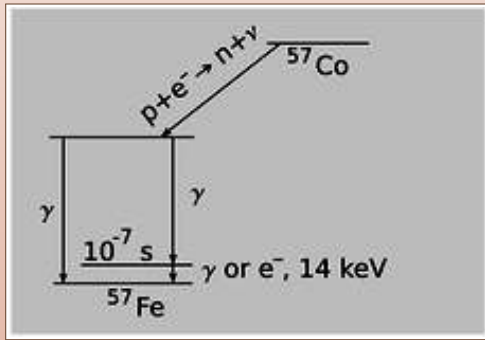
 Pound, R. V., & Rebka, G. A. (1960). Apparent Weight of Photons. *Physical Review Letters*, **4**(7), 337–341. DOI:10.1103/PhysRevLett.4.337.

 Pound, R. V., & Snider, J. L. (1964). Effect of Gravity on Nuclear Resonance. *Physical Review Letters*, **13**(18), 539–540.
DOI:10.1103/PhysRevLett.13.539.



Pound & Rebka, 1960–1965

- Harvard, Jefferson laboratory
- věž 22,6 m, ^{57}Co , 14.4 keV, $T_{1/2} = 10^{-7} \text{ s}$
- $\Delta\omega/\omega \sim 10^{-15}$, Mössbauerův jev



Hafele & Keating

Clock serial No.	$\Delta\tau$ (nsec)	
	Eastward*	Westward
120	- 57	277
361	- 74	284
408	- 55	266
447	- 51	266
Mean		
± S.D.	- 59 ± 10	273 ± 7
Predicted		
± Error est.	- 40 ± 23	275 ± 21



Hafele, J. C., & Keating, R. E. (1972).
Around-the-World Atomic Clocks: Observed
Relativistic Time Gains. *Science*, **177**(4044), 168–170.
DOI:10.1126/science.177.4044.168.

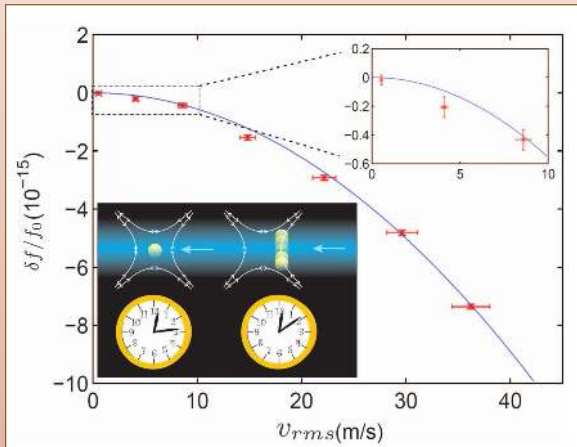


Optické hodiny ve službách TR



Chou, C. W., Hume, D. B., Rosenband, T., & Wineland, D. J. (2010). Optical Clocks and Relativity. *Science*, **329**(5999), 1630–1633. DOI:10.1126/science.1192720.

- ionty $^{27}\text{Al}^+$, laserové chlazení, přesnost optických hodin 10^{-18} s
- rychlosti okolo 10 m/s a výškový rozdíl 30 cm!

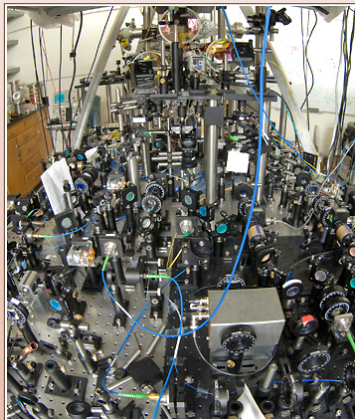


Využíváme kvantové experimenty

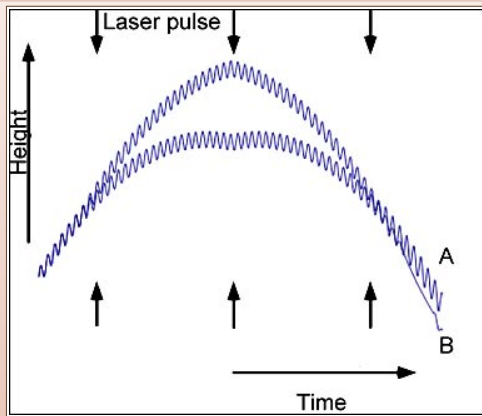
- kvantová interference atomů, přesnost $7 \cdot 10^{-9}$, svislá vzdálenost: 0,12 mm
- laserem chlazené atomy vzhůru ve vakuové komoře
- atom v kvantové superpozici stavů, studujeme vliv na fázový rozdíl



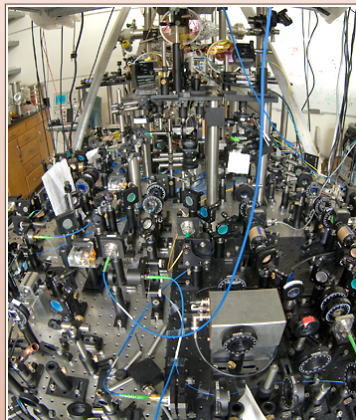
Müller, H., Peters, A., & Chu, S. (2010). A precision measurement of the gravitational redshift by the interference of matter waves. *Nature*, **463**(7283), 926–929.
DOI:10.1038/nature08776.



Využíváme kvantové experimenty



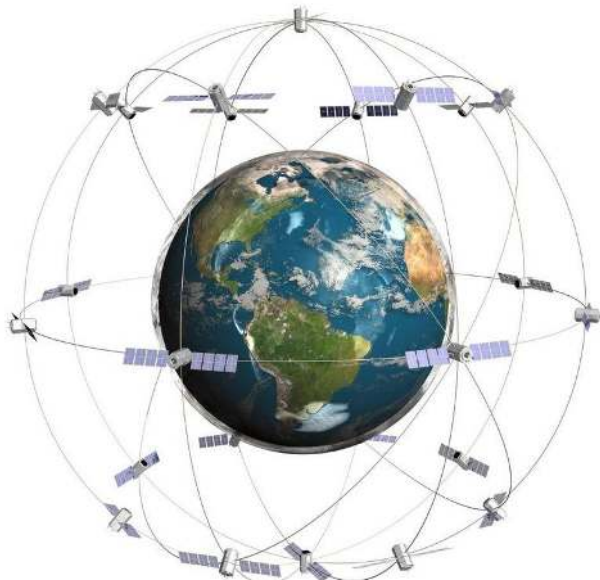
Müller, H., Peters, A., & Chu, S. (2010). A precision measurement of the gravitational redshift by the interference of matter waves. *Nature*, **463**(7283), 926–929. DOI:10.1038/nature08776.



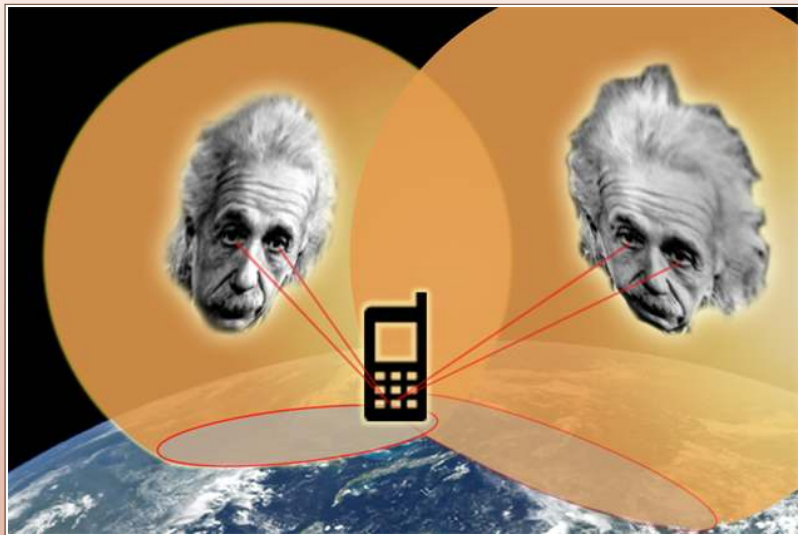
... a ještě máme GPS



... a ještě máme GPS

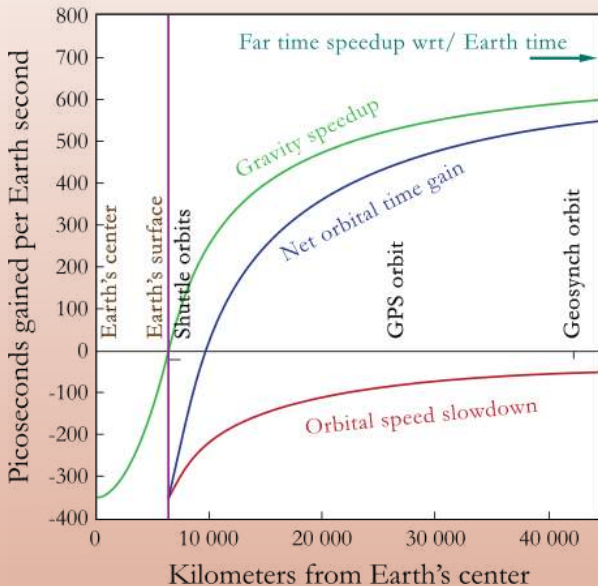


... a ještě máme GPS



... a ještě máme GPS

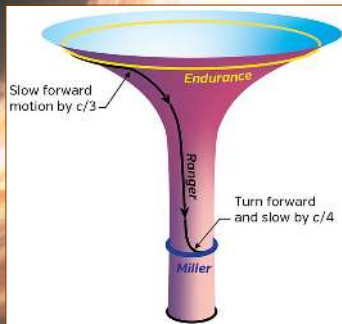
Time Dilation Effects on Earth



- Gargantua – rotující černá díra
- 1 hodina/7 let (faktor $\approx 61\,000$)



Thorne, K. S., & Nolan, Ch. (2014). *The Science of Interstellar*. New York: W. W. Norton & Company.



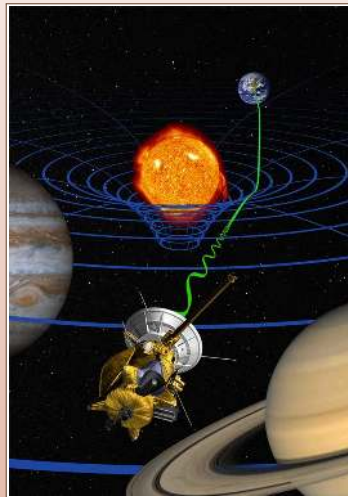
Ověřování OTR: zpožďování radarových signálů

- Irwin I. Shapiro
- Merkur, Venuše: 5 %
- Cassini: 0,002 %
- PSR J1713+0747: $23 \mu\text{s}$

 Bertotti, B., less, L., & Tortora, P. (2003). A test of general relativity using radio links with the Cassini spacecraft. *Nature*, **425**(6956), 374–376. DOI:10.1038/nature01997.

 Camilo, F., Foster, R. S., & Wolszczan, A. (1994). High-precision timing of PSR J1713+0747: Shapiro delay. *The Astrophysical Journal Letters*, **437**, L39–L42. DOI:10.1086/187677.

 Shapiro, I. I. (1964). Fourth Test of General Relativity. *Physical Review Letters*, **13**(26), 789–791. DOI:10.1103/PhysRevLett.13.789.



Ověřování OTR: ohyb světla

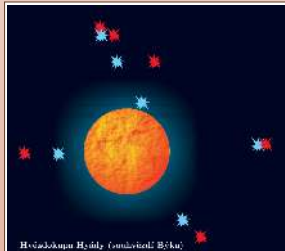
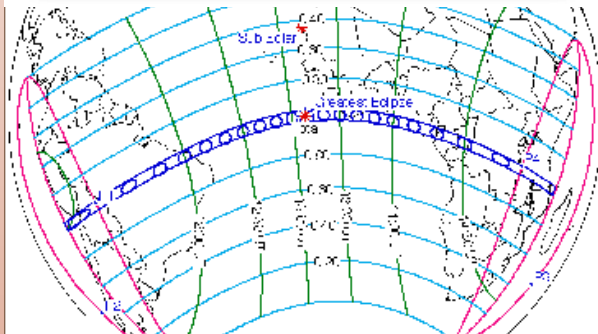
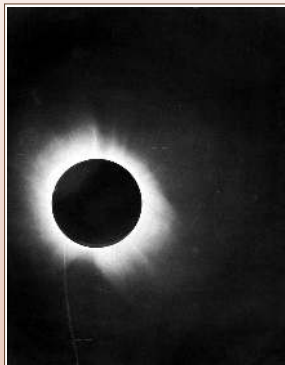
Předpověď: 1,75'

Pozorovaná poloha

Eddington 29. 5. 1919:

Afrika: $(1,61 \pm 30)'$

Brazílie: $(1,98 \pm 12)'$



Ověřování OTR: ohyb světla

Blatt 037

einstein akademie wissenschaften
berlin

Telegraphische Anstalt
124 1023 Telegraphie des Deutschen Reichs.
Antw S
Berlin, Haupt-Telegraphenamt
Kurs Nr. 15

Telegraphische Anstalt
Lickobservatory calif 129/12 50 1r 19/16. - westernunion

three pairs australia tahiti eclipse plates measured by camp
trumpler sixty two to eighty four stars each five of six
measurements completely calculated give einstein deflection
between one point fifty nine and one point eighty six seconds
arc mean value one point seventy four seconds = campbell .+

1,24 7,17

Eddington & Dyson 1919

IX. *A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations made at the Total Eclipse of May 29, 1919.*

*By Sir F. W. DYSON, F.R.S., Astronomer Royal, Prof. A. S. EDDINGTON, F.R.S.,
and Mr. C. DAVIDSON.*

(Communicated by the Joint Permanent Eclipse Committee.)

Received October 30, — Read November 6, 1919.

[PLATE 1.]

CONTENTS.

	Page
I. Purpose of the Expeditions	291
II. Preparations for the Expeditions	293
III. The Expedition to Sobral	296
IV. The Expedition to Principe	312
V. General Conclusions	330

 Dyson, F. W., Eddington, A. S., & Davidson, C. (1920). A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 220(571-581), 291–333. DOI:10.1098/rsta.1920.0009.



Arthur Stanley Eddington
(1882–1944)

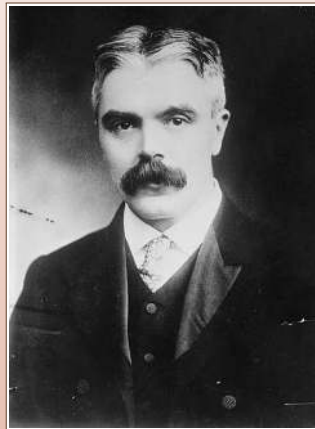
Eddington & Dyson 1919



- Robertson (1991): radiointerferometrie, přesnost 0,02 %

 Kennefick, D. (2009). Testing relativity from the 1919 eclipse—a question of bias. *Physics Today*, 62(3), 37–42. DOI:10.1063/1.3099578.

 Robertson, D. S., Carter, W. E., & Dillinger, W. H. (1991). New measurement of solar gravitational deflection of radio signals using VLBI. *Nature*, 349(6312), 768–770. DOI:10.1038/349768a0.



Frank Watson Dyson
(1868–1939)

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

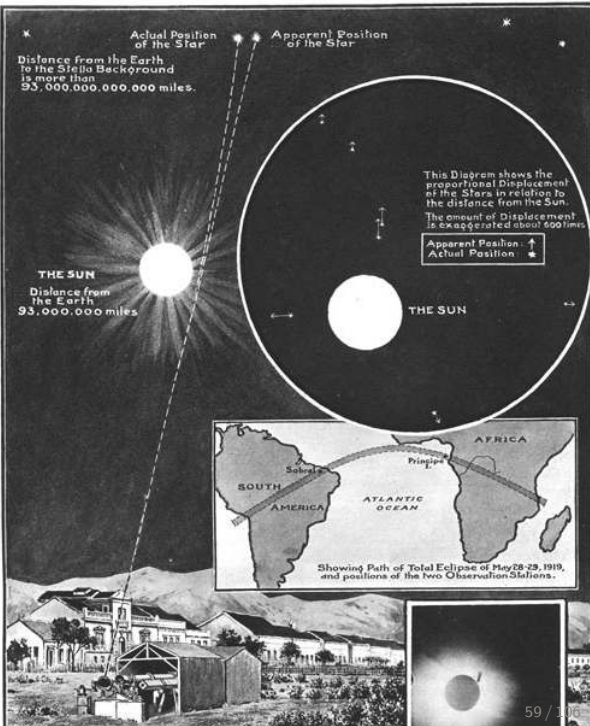
Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

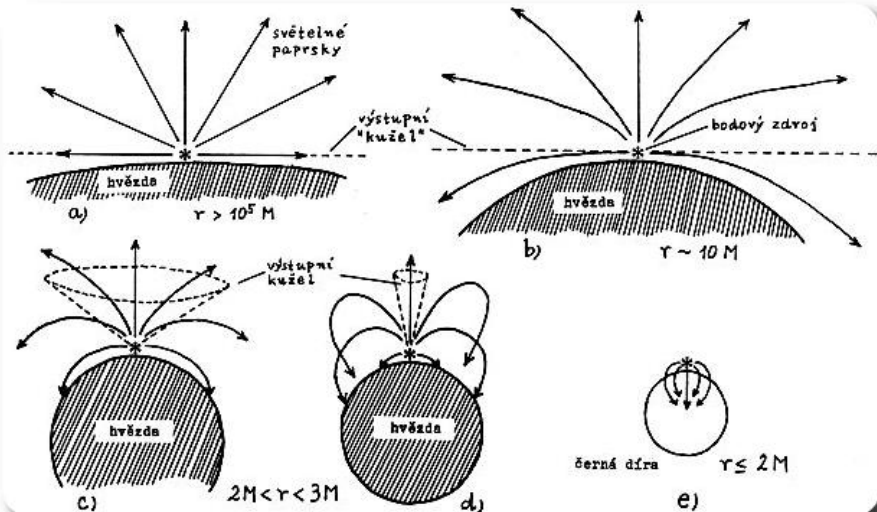
Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.
New York Times, 1919



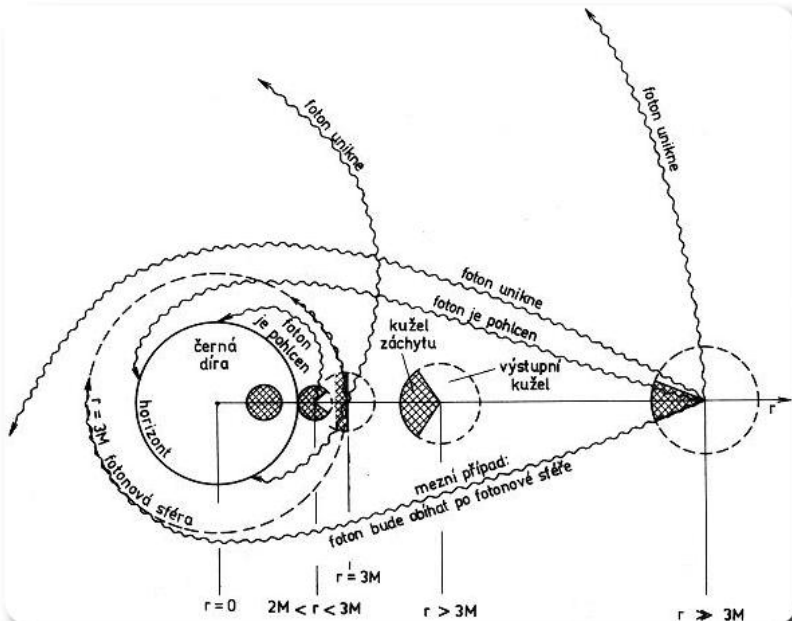
Ověřování OTR: ohyb světla



Ullmann, V. (1986). *Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu*. Ostrava: ČAS.

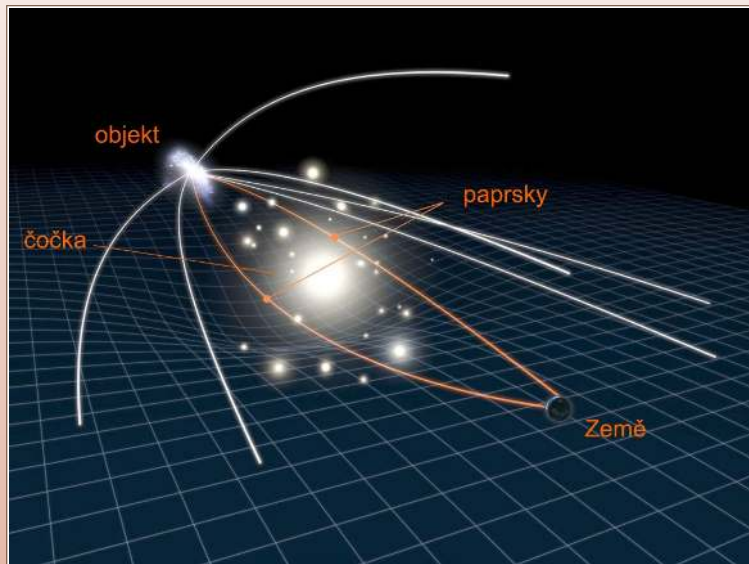
Dostupné z: <http://www.sweb.cz/AstroNuklFyzika/GravitCerneDiry.htm>.

Ověřování OTR: ohyb světla

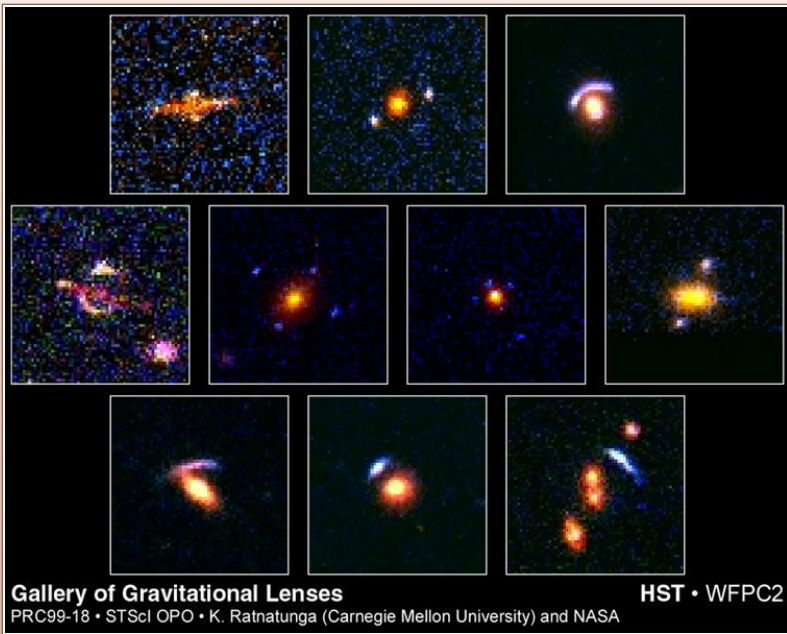




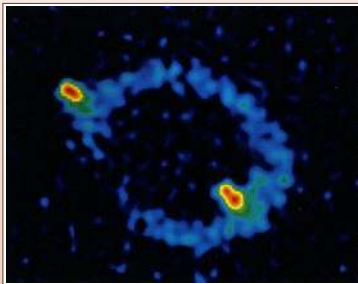
Gravitační čočky



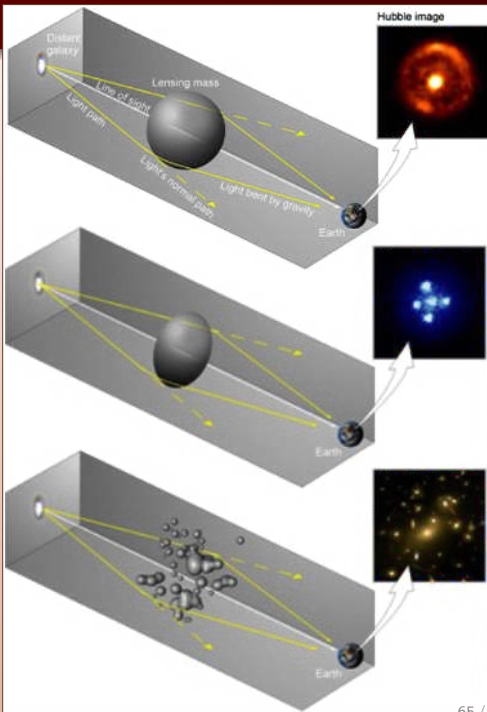
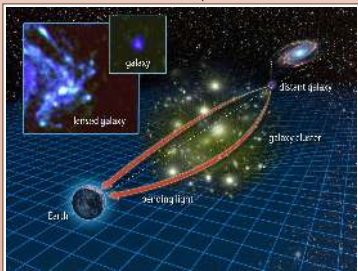
Gravitační čočky



Gravitační čočky



Einsteinův prstenec
MG 1131+0455



 Einstein, A. (1911). Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. *Annalen der Physik*, **340**, 898–908. DOI:10.1002/andp.19113401005.

 Einstein, A. (1936). Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field. *Science*, **84**(2188), 506–507. DOI:10.1126/science.84.2188.506.

 Link, F. (16 mars 1936). Sur les consequences photometriques de la déviation d'Einstein. *Comptes Rendus Acad. Sci. Paris* **202**, 917–919.

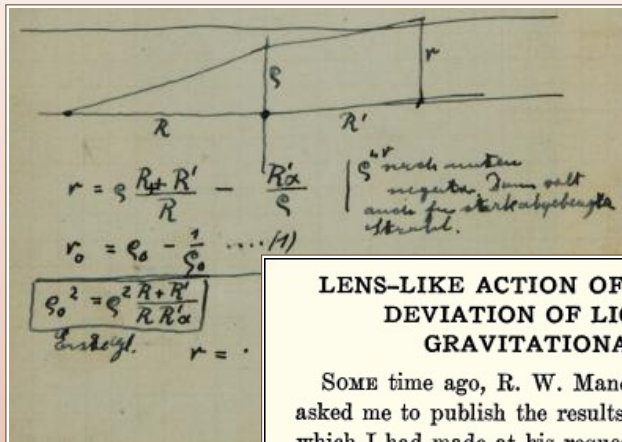
 Walsh, D., Carswell, R. F., & Weymann, R. J. (1979). 0957 + 561 A, B - Twin quasistellar objects or gravitational lens. *Nature*, **279**, 381–384. DOI:10.1038/279381a0; pár kvasarů s identickými rudými posuvy a spektry, 2,7 Gpc, mezilehlá eliptická galaxie 1,0 Gpc



15. 8. 1906, Brno
28. 9. 1984, Paris



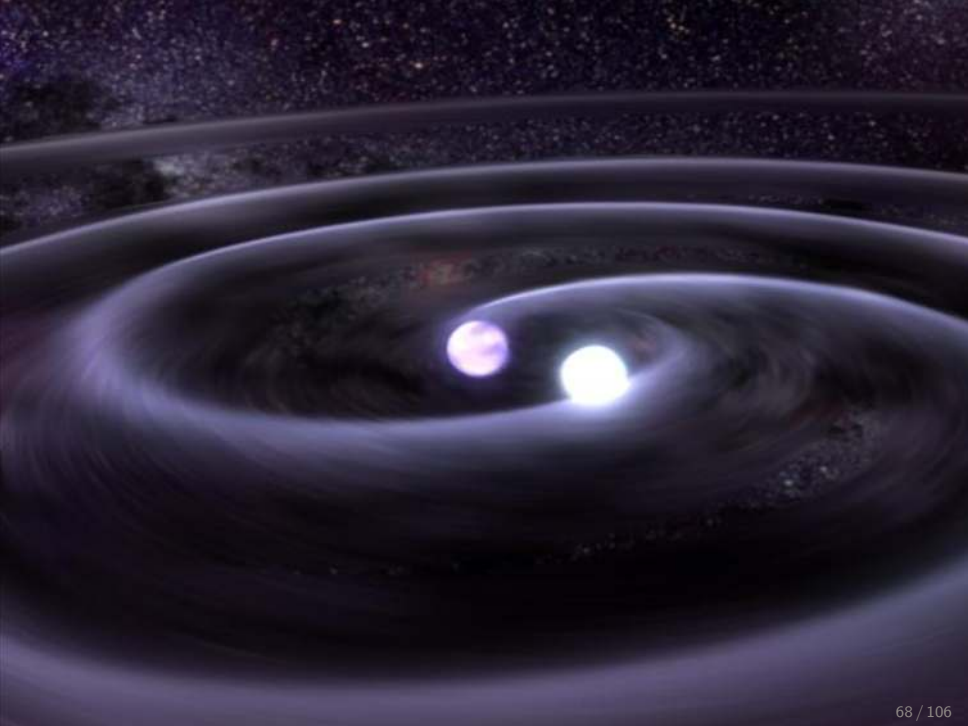
Twin quasar 0957 +
561



LENS-LIKE ACTION OF A STAR BY THE DEVIATION OF LIGHT IN THE GRAVITATIONAL FIELD

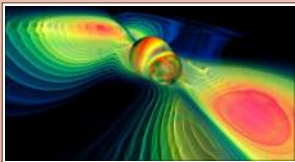
SOME time ago, R. W. Mandl paid me a visit and asked me to publish the results of a little calculation, which I had made at his request. This note complies with his wish.

The light coming from a star A traverses the gravitational field of another star B , whose radius is R_0 . Let there be an observer at a distance D from B and at a distance x , small compared with D , from the extended central line $\overline{AB}$. According to the general

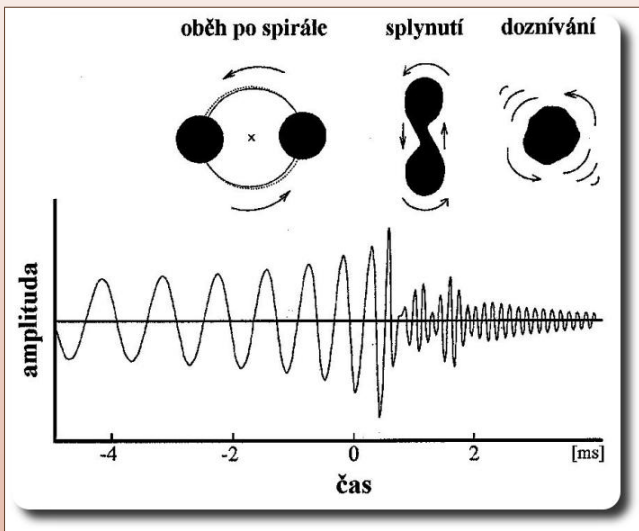


Gravitační vlny

- změna zakřivení prostoročasu (např. splynutí černých děr, neutronových hvězd apod.) $\Rightarrow$ gravitační vlny
- urychlují přibližování černých děr, zaznamenávají historii splynutí, tvar dráhy, rotaci, vzdálenost od Země, nezkrusleny mezihvězdnou hmotou; nelinearita
- pro černé díry s $M = 10 M_{\odot}$ ve vzd. miliardy ly síla vln 10^{-21} (supernovy v Galaxii)



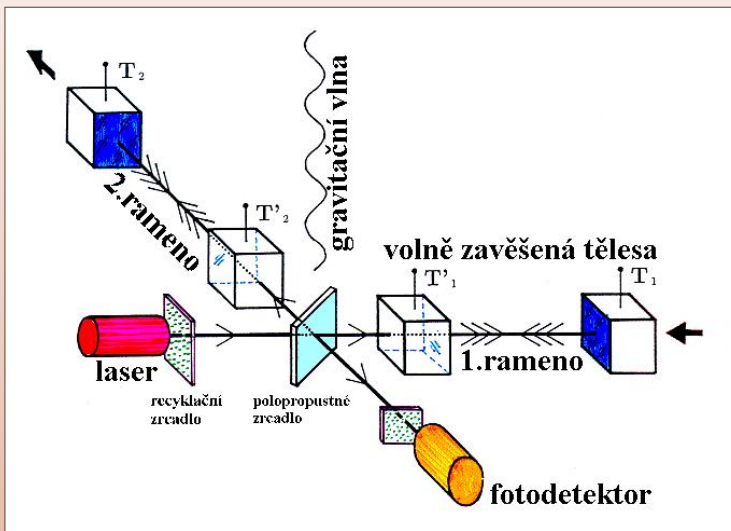
Gravitační vlny



Podolský J Pátrání po gravitačních vlnách

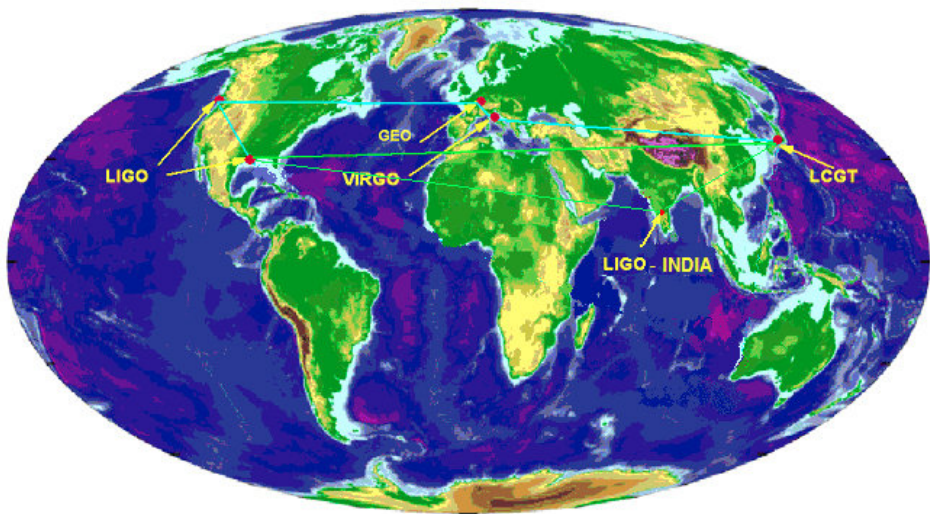
<http://utf.mff.cuni.cz/~podolsky/gravlany2/gravitvln.htm>

Gravitační vlny



 Podolský J Pátrání po gravitačních vlnách
<http://utf.mff.cuni.cz/~podolsky/gravlny2/gravitvln.htm>

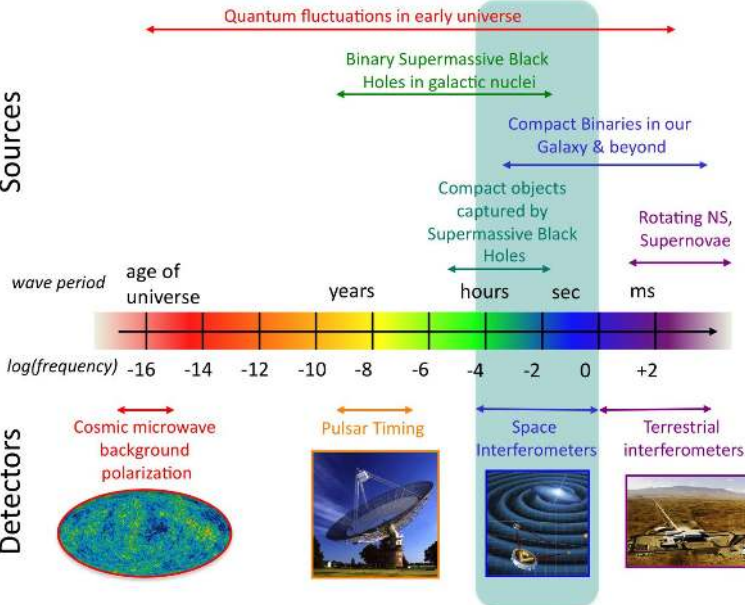
International Network of Interferometric Gravitational Wave Detectors (2016-17)



The Gravitational Wave Spectrum

Sources

Detectors



Advanced Virgo



Advanced Virgo





Barry C. Barish (Caltech)



Kip S. Thorne (Caltech)



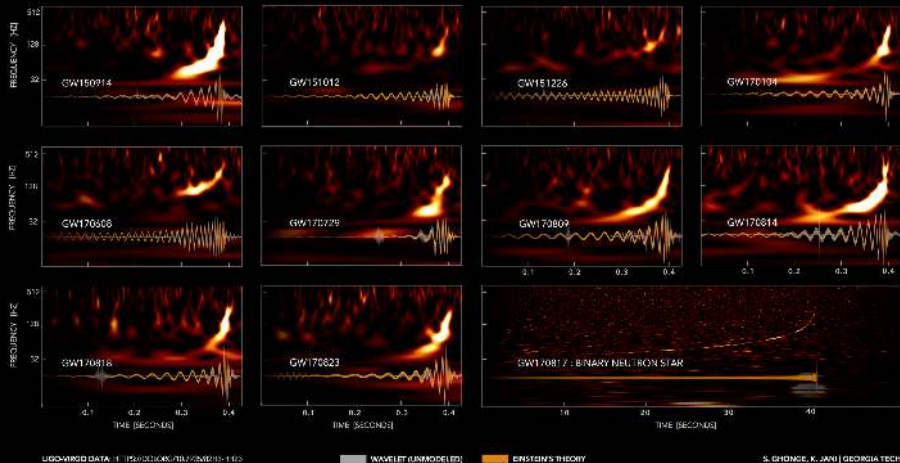
Rainer Weiss (MIT)



2017 Nobel Prize in Physics

**Nobelova cena za fyziku 2017 -
nové okno do vesmíru (polotevřené**

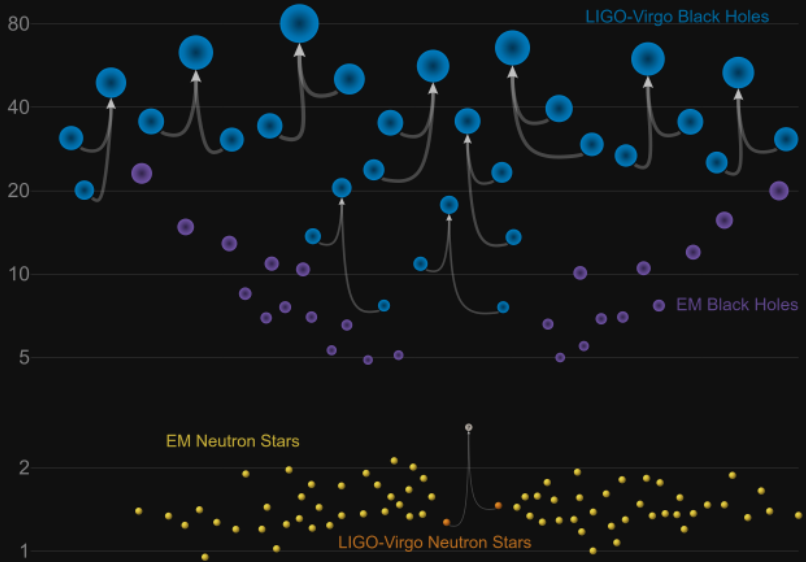
GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT CATALOG-1



<https://www.ligo.org/detections/0102catalog.php>

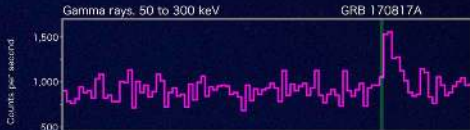
Masses in the Stellar Graveyard

in Solar Masses



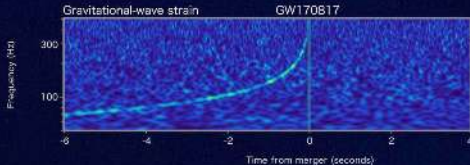
Fermi

Reported 16 seconds
after detection



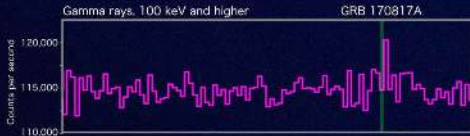
LIGO-Virgo

Reported 27 minutes after detection



INTEGRAL

Reported 66 minutes
after detection



➡ multi-messenger astronomy

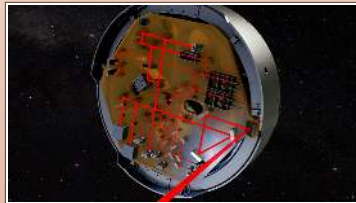
<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/heapow/archive/transients/gw170817.html>

eLISA – další naděje?

- rozměry na Zemi nelze neomezeně zvětšovat (cena vakuového systému, zakřivení), seismické procesy neumožňují měřit pod 1 Hz
- ESA: eLISA (Evolved Laser Interferometer Space Antenna):

<https://www.elisascience.org>

- rovnostranný $\triangle$ o straně 1 000 000 km, sleduje dráhu Země

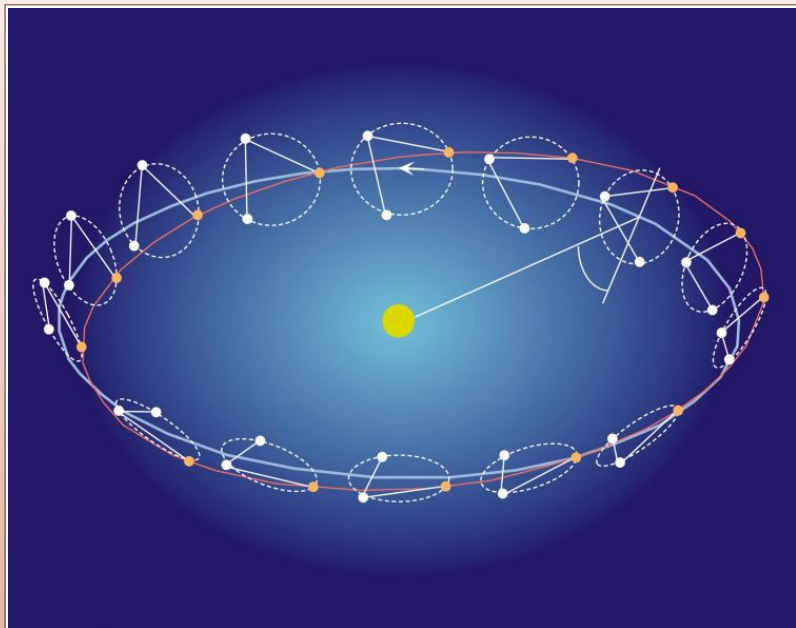


eLISA – další naděje?

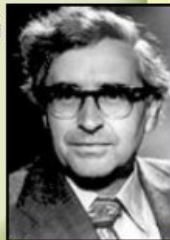
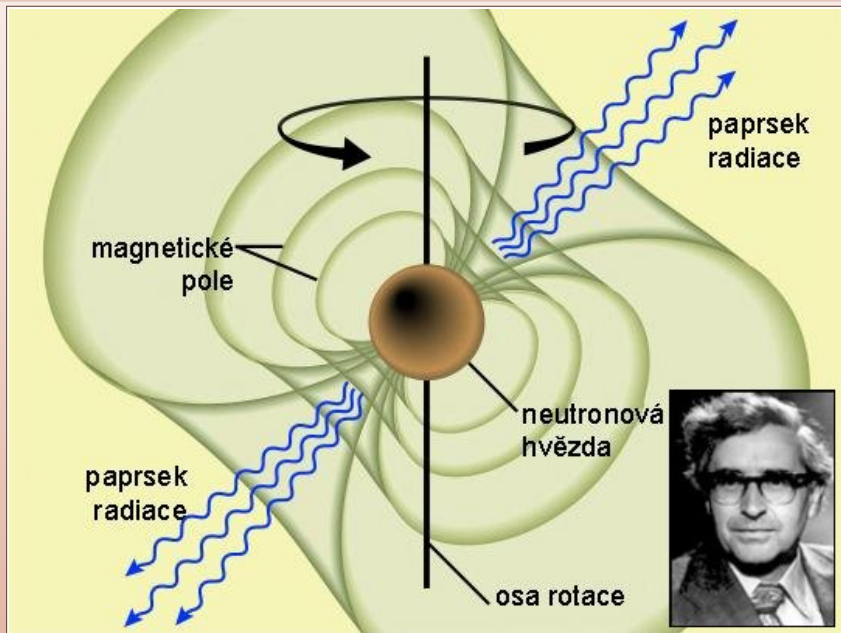
- geodetická „bezsilová trajektorie“ ($\times$ tlak záření, magnetické pole, ...) $\Rightarrow$ referenční krychle (46 mm) z Pt a Au, jemné trysky s tahem μN ; stěny krychle zároveň zrcadlem
- výhody:
 - $h < 10^{-21}$
 - bez seismického rušení
 - jiný frekvenční rozsah $10^{-4} \text{ Hz} - 1 \text{ Hz}$: kompaktní binární systémy
- nevýhody: cena miliardy dolarů (?)
 $\Rightarrow$ testovací sonda „LISA Pathfinder“ start: 3. 12. 2015
- start 2034(?)



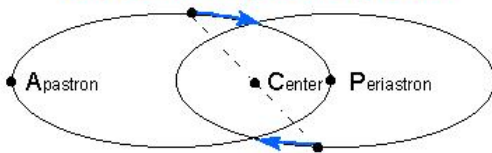
eLISA – další naděje?



Binární pulsary



Hulseův–Taylorův pulsar



$T=7\text{h } 45\text{ min}$

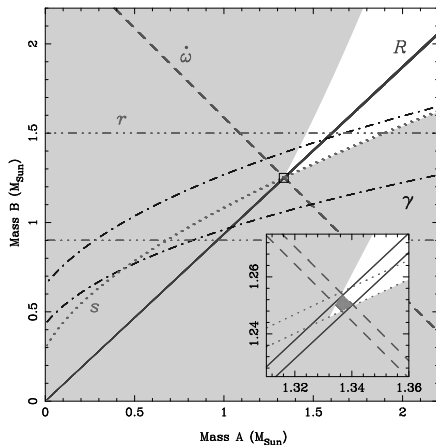
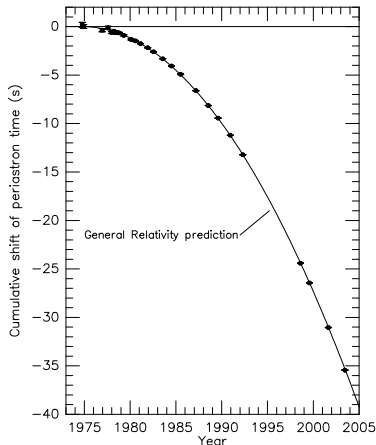


Binární pulsar J0737-3039

- objev v roce 2003, $T = 2,4 \text{ h}$, $\dot{\omega} = 16,88 \pm 0,09^\circ/\text{year}$,
- splynutí asi za 85 miliónů let



Burgay[ová], M[arta], et al. (2003). An increased estimate of the merger rate of double neutron stars from observations of a highly relativistic system. *Nature*, **426**(6966), 531–533. DOI:10.1038/nature02124.



Gravity Probe B



The Gravity Probe B Experiment

...testing Einstein's Universe

Frame-dragging Effect

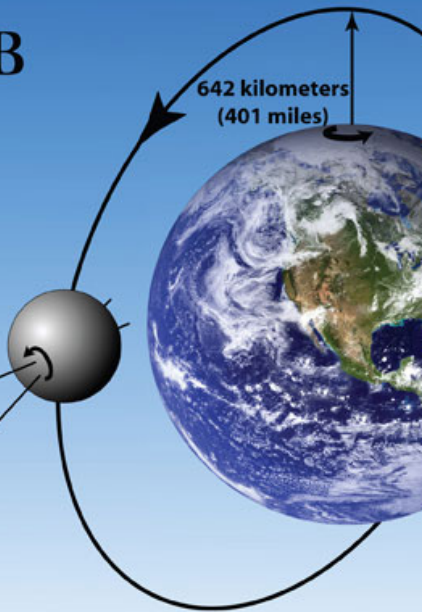
39 milliarcseconds/year
(0.000011 degrees/year)

Guide Star
IM Pegasi
(HR 8703)



Geodetic Effect

6,606 milliarcseconds/year
(0.0018 degrees/year)



The
Exp
...tes

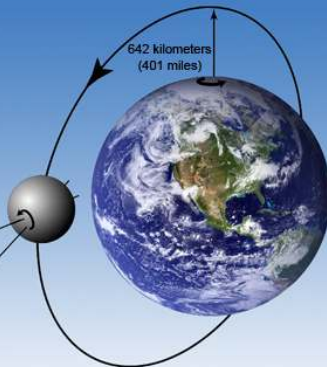
F

Guid
IM P
(HR

Frame-dragging effect
39 milliarcseconds/year
(0.000011 degrees/year)

Guide star
IM Pegasi
(HR 8703)

Geodetic effect
6,606 milliarcseconds/year
(0.0018 degrees/year)



	Measured	Predicted
Geodetic precession (mas)	6602 ± 18	6606
Frame-dragging (mas)	37.2 ± 7.2	39.2

Gravity Probe B

<http://einstein.stanford.edu>

- předchůdce Gravity Probe A (Vessot a Levine 1976, rudý posuv měřený vodíkovými maserovými hodinami, konec v Atlantiku, přesnost $2 \cdot 10^{-4}$)
- start: 20. dubna 2004, cena \$750 milionů
- „létající termoska“ se čtyřmi kuličkami velikosti pingpongového míčku (taveného brazilského křemene, přesnost 40 atomových vrstev), povrch z niobu (supravodivost)



Gravity Probe B

<http://einstein.stanford.edu>

- start: 20. dubna 2004, cena \$750 milionů
- otáčení supravodivého niobu → nenulový magnetický moment měřený vodivou smyčkou (SQUID – Superconducting QUantum Interference Devices)
- naváděcí dalekohled na IČ hvězdu IM Pegasi (300 ly), k ní osy setrvačníků (dvojice s opačnou rotací), její pohyb 0,035"/rok sledován vůči kvasaru (VLBI, data za 10 let)



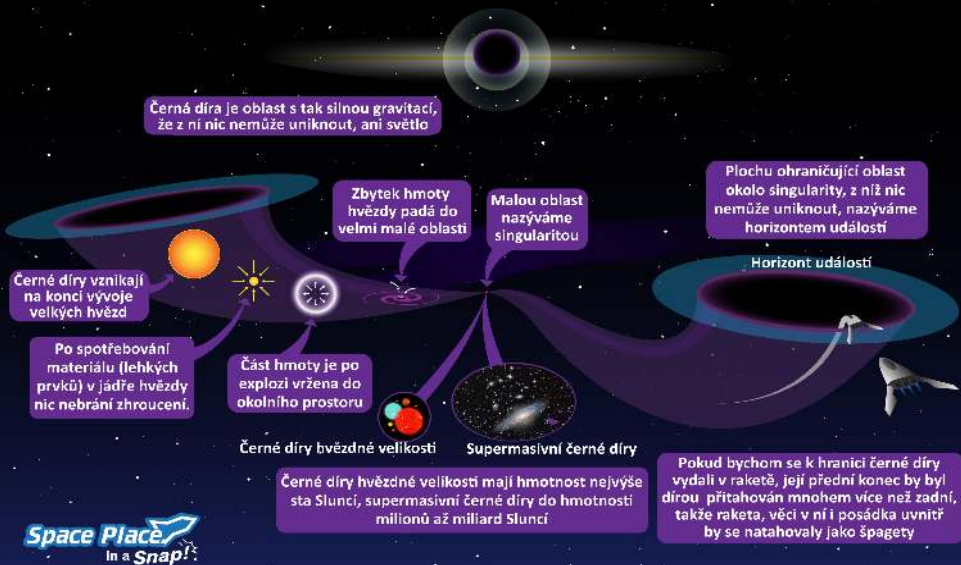
Gravity Probe B – výsledky

<http://einstein.stanford.edu>

- geodetický efekt potvrzen s 15%
- problémy se zpracováním (plán do 2010), šum ze slunečních vzplanutí, neočekávané torzní síly, měla být 10x přesnější $\Rightarrow$ v květnu 2008 NASA zastavuje podporu na analýzu dat navzdory doporučení výboru vedeného C. Willem, součást omezování základního výzkumu v NASA
- Mars Global Surveyor (lorio 2006, 2007, prý přesnost 0,5%)



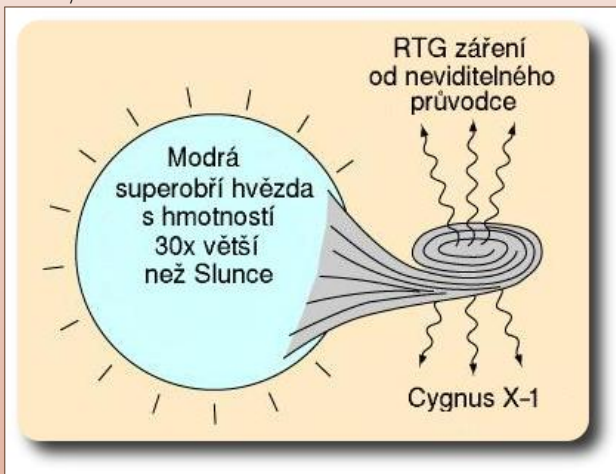
Co je černá díra?



Pátrání po ČD ve vesmíru

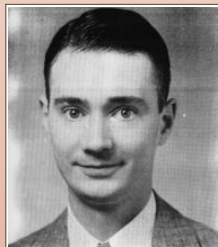
- Cygnus X-1: hvězda $20 - 35 M_{\odot}$ a průvodce HDE226868 min. $6 M_{\odot}$, 6 000 ly, RTG zdroj

 Webster, B. L., & Murdin, P. (1972). Cygnus X-1—a Spectroscopic Binary with a Heavy Companion? *Nature*, **235**(5332), 37–38.
DOI:10.1038/235037a0

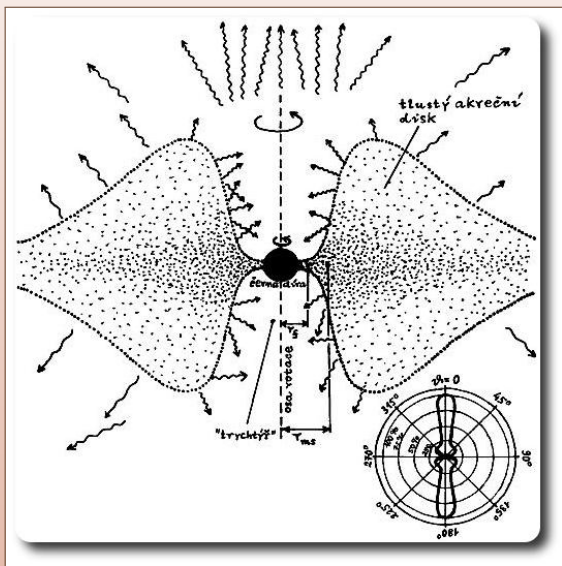


Obří černé díry

- Karl Jansky (1935): rádiový šum z centra Galaxie; dokonce silnější než ze Slunce
- Grote Reber (1939): radioamatér, na dvorku své matky, zdroje Cyg A, Cas A – 1. pozorování černých děr
- 1951: první rádiová galaxie (Ryle, opt. identifikace Baade), záření z gigantických laloků na obou stranách
- Maarten Schmidt (5. 2. 1963): **kvasar** 3C273, $z = 0,16$, velmi daleko, výkon $100\times$ větší než galaxie z prostoru „světelného měsíce“
- nejpravděpodobnější vysvětlení: obrovská rotující černá díra + akreční disk (Donald Lynden-Bell 1969)



Obří černé díry



Ullmann, V. (1986). *Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu*. Ostrava: ČAS.
Dostupné z: <http://www.sweb.cz/AstroNuklFyzika/GravitCerneDiry.htm>.

„Motory“ v centrech galaxií

- zdroj energie v akr. disku: **tření**, $\eta \leq 40\%$
- „**krmení**“ roztáčí ČD na maximální otáčky
- vznik výtrysků: **Blandfordův-Znajekův proces**
- **Aktivní galaktická jádra**, u kvazarů intenzivnější „krmení“, přezáří okolí; významný vliv rotace
- M87 v Panně: vzdálenost 50 miliónů ly, kolimace 10° na 100 miliónů ly
- v centru naší Galaxie ČD $M = 3 \cdot 10^6 M_\odot$



Swift J1644+57: vznik relativistického výtrysku



1. Hvězda velikosti Slunce se dostává do blízkosti supermasivní černé díry ve vzdálené galaxii.



2. Silné slapové síly v blízkosti černé díry začínají hvězdu natahovat, až ji nakonec doslova roztřhají.

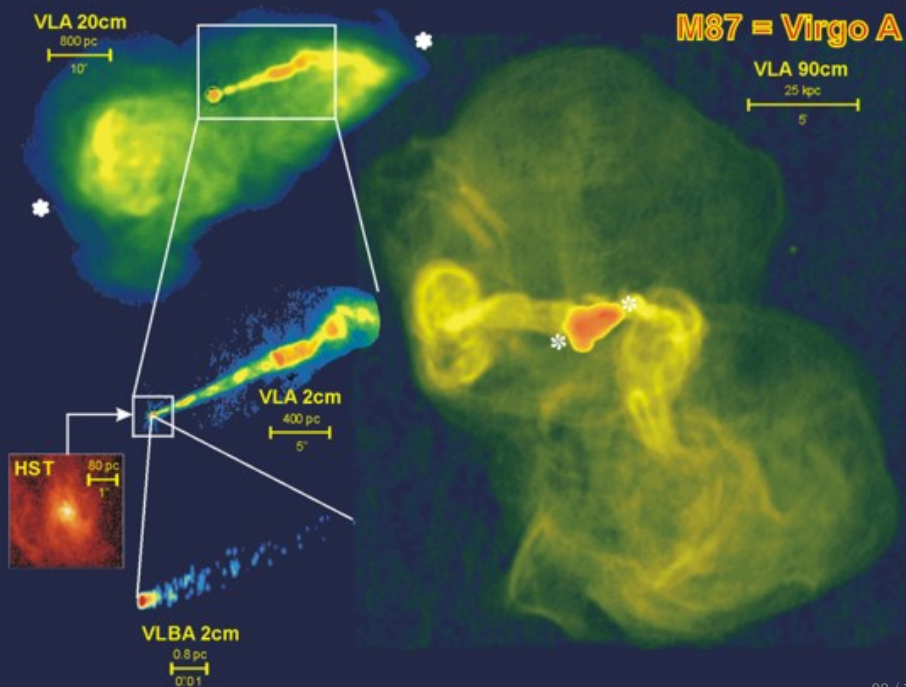


3. Část hvězdy blíž k černé díře postupně obíhá okolo ní a vytváří tzv. akreční disk. Zbytek hvězdy je roptýlen do okolního prostoru.



4. Silné magnetické pole v okolí černé díry vytváří výtrysky částic pohybujících se téměř rychlostí světla. Tyto výtrysky jsou zdrojem rentgenového záření a rádiových vln.

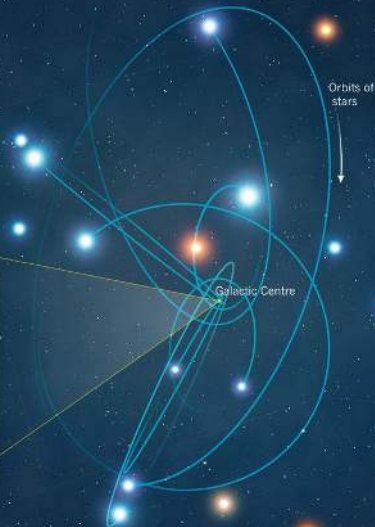
Credit: NASA/Coolidge Space Flight Center/Swift



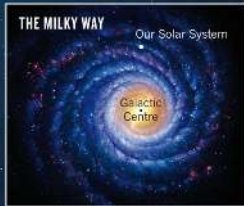
THE MONSTER IN THE MIDDLE

By tracking stars near the mysterious object at the centre of the Milky Way, astronomers have shown that they move in years-long orbits; 8 examples are shown here. These orbits prove that the object packs the mass of 4.1 million Suns into a space smaller than the Solar System, and can only be a black hole.

THE BLACK HOLE



THE MILKY WAY



Další použité prameny

-  Crowell, B. (2009). *General Relativity*. Dostupné z <http://www.lightandmatter.com/genrel/>.
-  Hartle, J. B. (2003). *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*. San Francisco: Addison Wesley.
-  Kulhánek, P. *Sto let obecné teorie relativity* [online]. URL: <http://www.aldebaran.cz/download.php>.
-  Podolský, J.: *Pátrání po gravitačních vlnách* [online]. URL: <http://utf.mff.cuni.cz/~podolsky/gravlny2/gravitvln.htm>.
-  Raine, D., & Edwin, T. (2009). *Black Holes: An Introduction*. London: Imperial College Press.
-  Schutz, B. F. (1985). *A First Course in General Relativity*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
-  Thorne, K. S. (2004). *Černé díry a zborcený čas (Pozoruhodná dědictví Einsteinova génia)*. Praha: Mladá fronta.
-  Wikipedie, otevřená encyklopedie. URL: <http://cs.wikipedia.org>.

Zdroje obrázků: NASA, ESA, Wikipedie



Thorne K S 2004 Černé díry a
zborcený čas (*Pozoruhodná
dědictví Einsteinova génia*)
(Praha: Mladá fronta)

Obrázek: <https://caltechy.org>



Pedro G. Ferreira

Nádherná teorie

Sto let
obecné teorie relativity

VYŠEHRAÐ



Ferreira P G 2015 *Nádherná teorie* (Praha: Vyšehrad).

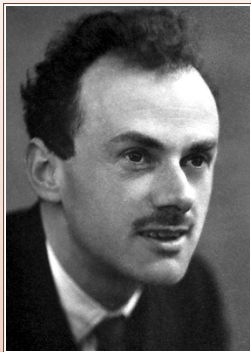


<http://www.ivysehrad.cz/kniha/bezchybna-teorie/>

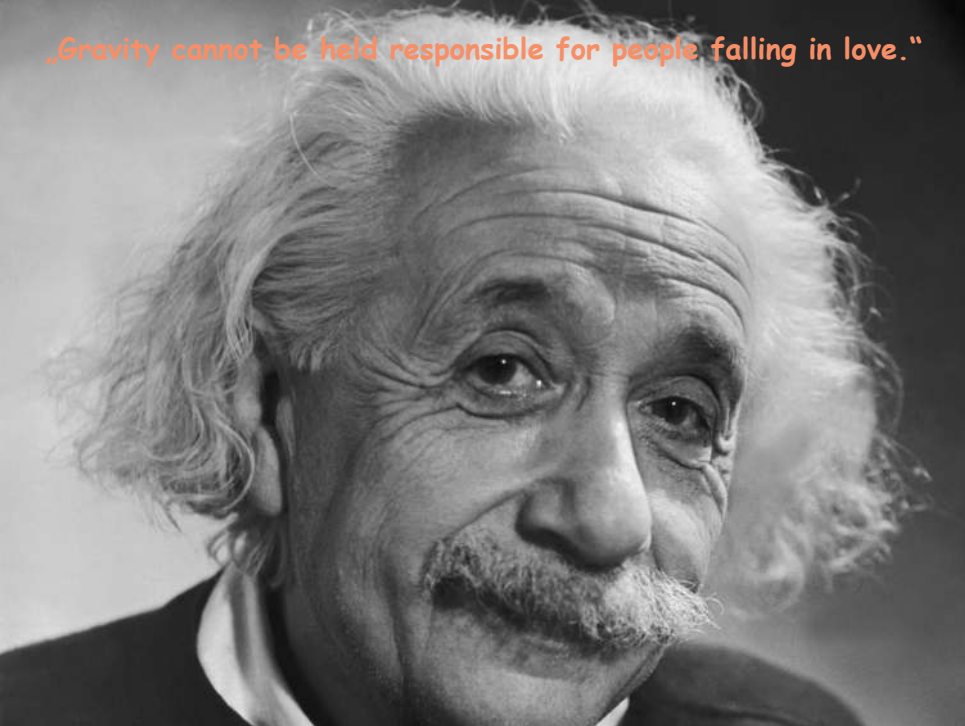


Obrázek: <http://eltrompellot.blogspot.cz/2015/01/un-nou-llibre-sobre-la-teoria-de-la.html>

Einsteinovu obecnou teorii relativity označil nositel Nobelovy ceny a průkopník kvantové mechaniky Paul Dirac za „...pravděpodobně největší objev v dějinách“ a Max Born, jiný z gigantů fyziky 20. století, ji nazval „...nejúžasnějším výkonem lidského uvažování o přírodě, nejobdivuhodnější kombinací filozofické pronikavosti, fyzikální intuice a matematických dovedností“



„Gravity cannot be held responsible for people falling in love.“



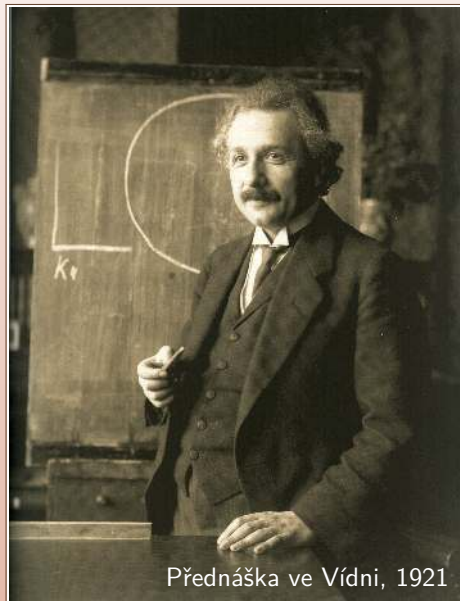
Vysvětlení synovi, proč je tak slavný: „Podívej se na slepého brouka, který leze po povrchu koule. Nevšimne si, že jeho cesta je zakřivena. Mně se poštěstilo, že jsem si toho povšiml.“

Není to tím, že jsem chytřejší, ale tím, že se problémy zabývám déle.

Žádné množství pokusů nikdy nemůže dokázat, že jsem měl pravdu. Jediný pokus však kdykoliv může dokázat, že jsem se mýlil.

Jenom život, který žijeme pro ostatní, stojí za to.

A. Einstein
(1879-1955)





Přírodovědecká fakulta

Univerzita Palackého
v Olomouci

Lukáš Richterek

`lukas.richterek@upol.cz`

Katedra experimentální fyziky PŘF UP

17. listopadu 1192/12, CZ-771 46 Olomouc

<http://muj.optol.cz/~richterek/>

<http://www.slideshare.net/lrichterek>

