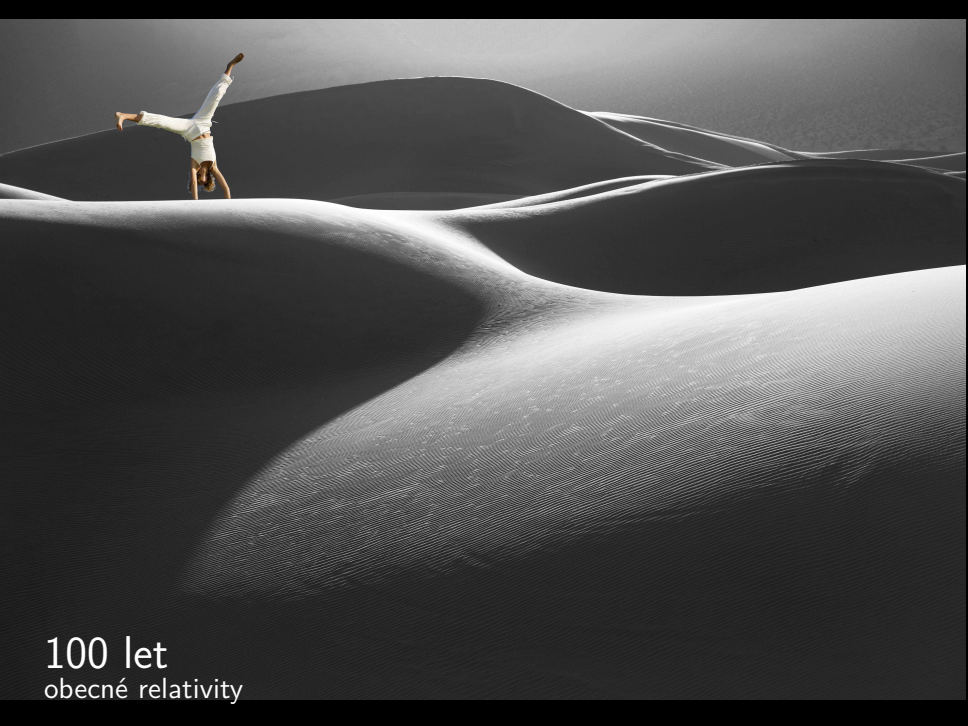
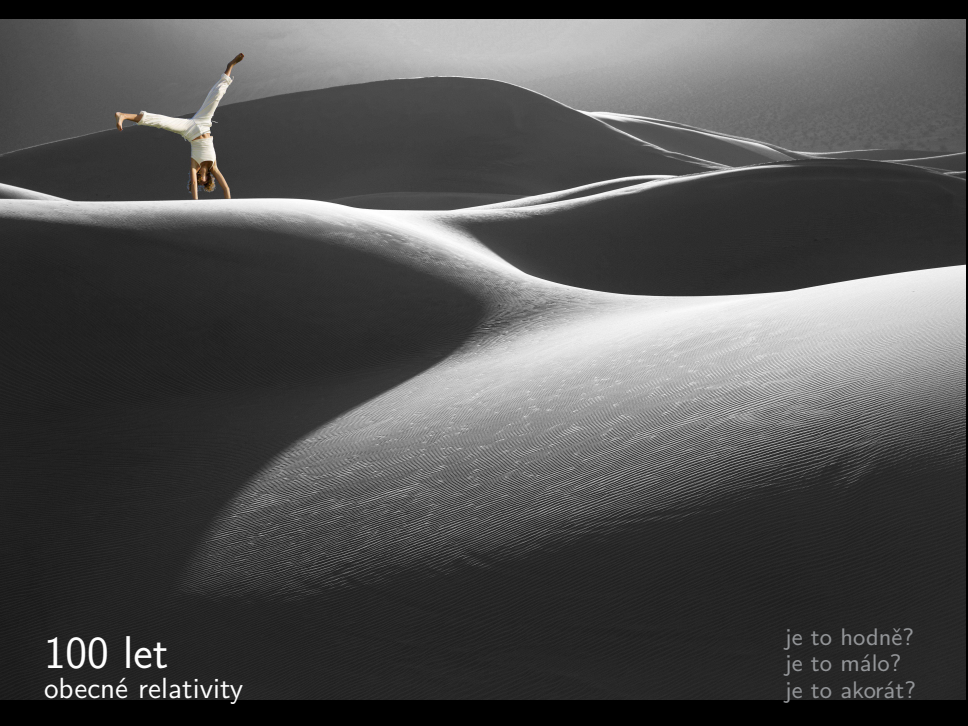




100 let
obecné relativity



100 let
obecné relativity

je to hodně?
je to málo?
je to akorát?

“teorie relativity”

“záleží na úhlu pohledu” (?)

“teorie relativity”

~~“záleží na úhlu pohledu” (?)~~

nezáleží na úhlu pohledu!

“teorie relativity”

~~“záleží na úhlu pohledu” (?)~~

nezáleží na úhlu pohledu!

- hmota (látka a pole) rozlišuje mezi systémy, “pravidla hry” nikoli
 - fyzikální dění a prostoročas se navzájem ovlivňují
 - ale “pravidla hry” jsou *absolutní*
- relativisté (proto) bývají “extrémně platónští”
 - věří v “ideální matematické formy” v pozadí...

Ačkoli je třeba na nebeské pohyby pohlížet jako na nejkrásnější a nejdokonalejší z těch, které existují ve viditelném světě. . . , musíme je přesto považovat za podřízené pohybům . . . skutečně existujícím v jejich pozadí.

Toto lze pochopit rozumem a uvažováním, nikoli spatřit očima. [Platón: Republika]

- princip relativity, kovariance...

The background of the slide is a solid black field. On the left side, there is a vertical line of bright blue and white light. From this line, numerous thin, curved, and slightly blurred streaks of light extend outwards across the black space, creating a sense of motion or a complex geometric pattern. The streaks are most concentrated near the left edge and become more sparse as they move towards the right.

Jak z toho plyne speciální teorie relativity?

speciální relativita vystačí s inerciálními systémy
(proto/že nepočítá s gravitací)



- 1) princip (speciální) relativity: inerciální systémy rovnocenné
- 2) maximální rychlost šíření energie/informace *konečná* (c)
... a dle 1) vůči všem inerciálním systémům stejná!

speciální relativita vystačí s inerciálními systémy
(proto/že nepočítá s gravitací)



- 1) princip (speciální) relativity: inerciální systémy rovnocenné
- 2) maximální rychlost šíření energie/informace **konečná** (c)
... a dle 1) vůči všem inerciálním systémům stejná!

- ⇒ relativita současnosti, kontrakce délek, dilatace času
- ⇒ Lorentzova transformace ⇒ provázání prostoru a času: **PROSTOROČAS**
- ⇒ závislost $m(v)$ ⇒ fyzikálně jiná pohybová rovnice
- ⇒ univerzální vztah mezi hmotností a energií, $E = mc^2$

Jahrbuch

der

Radioaktivität und Elektronik

Unter Mitarbeit

von

S. A. Arrhenius (Stockholm), Fran S. Curie (Paris), J. Elster und H. Geitel (Wolfenbüttel), F. Giesel (Braunschweig), K. Hofmann (München), H. A. Lorentz (Leiden), W. Marckwald (Berlin), E. Rutherford (Manchester), F. Soddy (Glasgow), E. Warburg (Berlin), W. Wien (Würzburg)

und unter besonderer Mitwirkung

von

H. Becquerel in Paris und Sir William Ramsay in London

herausgegeben

von

Johannes Stark

in Greifswald.

Vierter Band

1907

Mit 58 Figuren im Text und 2 Lichtdrucktafeln

LEIPZIG
VERLAG VON S. HIRZEL

1908

Einstein, Relativitätsprinzip u. die aus demselben gezog. Folgerungen. 411

Durch Siedepunkterhöhungsbestimmungen an den wäßrigen Lösungen kommt Benrath zu dem Schluß, daß nur diejenigen Substanzen, z. B. $CuCl_2$, welche die Blaufärbung verhindern, Komplexe bilden, während diejenigen, z. B. $CaCl_2$, welche die Blaufärbung bewirken, keine Komplexe bilden. Und wenn dies auch aus seinen Resultaten hervorzugehen scheint, so ist immer nicht zu leugnen, daß die Überführungsversuche die Existenz von Complexen im letzteren Fall unzweideutig beweisen. Benrath gibt ja zu, daß solche Komplexe bei höheren Konzentrationen existieren, aber wenn bei höheren Konzentrationen, warum nicht auch bei etwas niedrigeren Konzentrationen? Es handelt sich nur um die relativen Mengen, und wenn Benrath noch behauptet, daß die Bildung solcher Komplexe sich „thermodynamisch wohl kaum begründen läßt“, so kann man hierzu nur bemerken, daß die Thermodynamik wohl kaum etwas damit zu tun hat.

Aus diesen neueren Arbeiten geht deutlich hervor, daß die Frage nach der Ursache der Farbenänderungen bei Kobaltsalzen noch nicht erledigt ist und daß deren Erledigung noch weiterer exakter Versuche bedarf.

Nachtrag III.

Zu dem Kapitel über den Einfluß des Aggregatzustandes, K. Arndt hat auf die Einwendungen von Lorenz kurz geantwortet (Ber. d. d. chem. Ges. 40, 3612—3614, 1907) und beabsichtigt in der Zeitschrift für Elektrochemie ausführlich dieselben zu widerlegen.

(Eingegangen 1. Oktober 1907.)

Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen.

Von A. Einstein.

Die Newtonschen Bewegungsgleichungen behalten ihre Form, wenn man auf ein neues, relativ zu dem ursprünglich benutzten in gleichförmiger Translationsbewegung begriffenes Koordinatensystem transformiert nach den Gleichungen

nejšťastnější nápad mého života ("princip ekvivalence")

...
a v následující
diskusi proto
předpokládáme
úplnou fyzikální
ekvivalenci
gravitačního
pole a
odpovídajícího
zrychlení
vztažné
soustavy.

Tento
předpoklad
rozšiřuje princip
relativity na
rovnoměrně
zrychlený
translační pohyb
vztažného
systému.

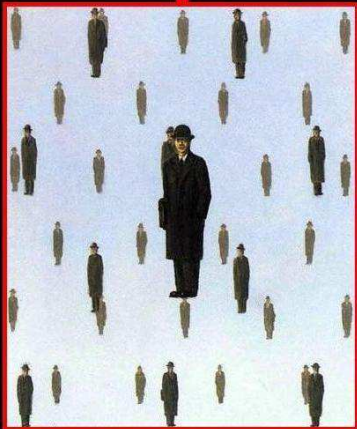
...



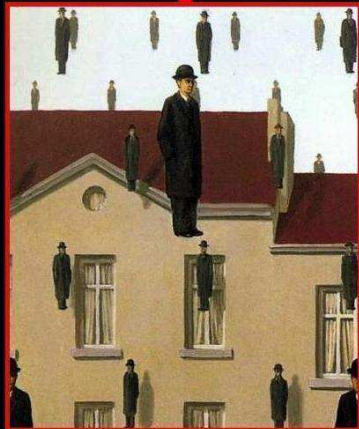




výtah je
urychlen



výtah visí

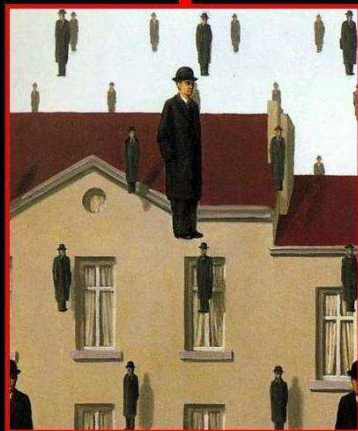
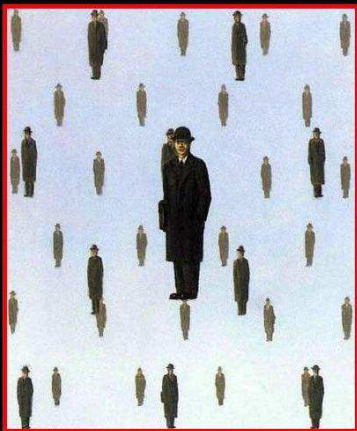


gravitace



(únava materiálu)

výtah volně padá



gravitace





Díky čemu
to tak je?

Nejen pánové,
nýbrž dokonce
všechna
volná tělesa
“padají”
v daném
gravitačním poli
se stejným
zrychlením.
(Galilei, 1589)

GRAVITACE
je
UNIVERZÁLNÍ
INTERAKCE

homogenní a nehomogenní pole

Důsledek:

- vůči (kartézskému) systému volně padajícímu v HOMOGENNÍM poli (a nerotujícímu) se volná tělesa pohybují bez zrychlení
- $\Rightarrow$ je to INERCIÁLNÍ systém!
- $\Rightarrow$ fyzika se vůči němu chová jako ve speciální relativitě

Potíž:

- skutečná gravitační pole jsou nehomogenní
- v NEHOMOGENNÍM poli je volný pád v každém místě jiný
- $\Rightarrow$ volně padající systémy mohou být inerciální JEN LOKÁLNĚ (v malém okolí zvoleného bodu)

Otázka:

- co s tím?

homogenní a nehomogenní pole

přímočaré rozlišení homogenního a nehomogenního pole:
vzájemné zrychlení dvou (blízkých) volných částic... (je nenulové?)

- Newtonova teorie

prostorové souřadnice (x^1, x^2, x^3) , např. (x, y, z)

vzájemná poloha $\delta x^i := x_{(2)}^i - x_{(1)}^i$

$$\boxed{(\delta x^i)'' = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_i \partial x^j} \delta x^j \left(= \frac{\partial a^i}{\partial x^j} \delta x^j \right)} \quad \Leftarrow \text{“gravitační slapové síly”}$$

– např. (složka $i=3$) $(\delta z)'' = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z \partial x} \delta x - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z \partial y} \delta y - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \delta z$

Φ ... gravitační potenciál, $\vec{a}$... gravitační zrychlení (intenzita pole)

- teorie relativity

prostorčasové souřadnice $(x^0 \equiv ct, x^1, x^2, x^3)$

vzájemná poloha $\delta x^\mu := x_{(2)}^\mu - x_{(1)}^\mu$

$$\boxed{(\delta x^\mu)'' = -R^\mu{}_{\nu\kappa\lambda} u^\nu \delta x^\kappa u^\lambda} \quad \Leftarrow \text{“křivost prostoročasu”}$$

$R^\mu{}_{\nu\kappa\lambda}$... Riemannův tenzor **křivosti** (20 funkcí)

⇒ headline news :



NÁŠ FYZIKÁLNÍ SVĚT JE ZAKŘIVENÝ

“obecná relativita je geometrickou teorií gravitace”

“geometrize teorie/systému/interakce”:

systém se vyvíjí v důsledku působení nějaké interakce (“síly”)

→ na systém žádná interakce nepůsobí, vyvíjí se “volně”,
ale v (*určitým způsobem*) zakřiveném prostoru

Z fundamentálních interakcí geometrizedována jen gravitace. PROČ?

- protože jen GRAVITACE JE UNIVERZÁLNÍ INTERAKCÍ
- $\equiv$ působí na všechno stejně



při popisu jejího působení
LZE
odhlédnout od vlastností
toho, na co působí,
a připsat toto působení
(geometrickým) vlastnostem
prostor-časového “jeviště”



- protože jen GRAVITACE JE UNIVERZÁLNÍ INTERAKCÍ
- $\equiv$ působí na všechno stejně



při popisu jejího působení
LZE
odhlédnout od vlastností
toho, na co působí,
a připsat toto působení
(geometrickým) vlastnostem
prostor-časového “jeviště”



toto není Galilei



“obecná relativita je geometrickou teorií gravitace”

“geometrization teorie/systému/interakce”:

systém se vyvíjí v důsledku působení nějaké interakce (“síly”)

→ na systém žádná interakce nepůsobí, vyvíjí se “volně”,
ale v (*určitým způsobem*) zakřiveném prostoru

Z fundamentálních interakcí geometrizedována jen gravitace. PROČ?

- protože jen **GRAVITACE JE UNIVERZÁLNÍ INTERAKCÍ**
- $\equiv$ **působí na všechno stejně** (Galilei...)
 $\Rightarrow$ při popisu jejího působení lze odhlédnout od vlastností toho, na co působí, a připsat toto působení (geometrickým) vlastnostem prostoro-časového “jeviště”

Jaký typ geometrie lze prostoročasu připsat?

- Gauss, Bolyai, Lobačevskij (1800-1830); Riemann (10.6.1854); Christoffel (1869), Ricci-Curbastro (1900), Levi-Civita (1910-1925)
- speciální (“plochý”) případ: Minkowského prostoročas (speciální relativita)

Gravitační zákon(y)

klíčové otázky:

- 1) Co je zdrojem gravitačního pole? / Co ovlivňuje geometrii prostoročasu?
- 2) Naopak: jak působí gravitace/geometrie na fyzikální systémy?

- Newtonovy gravitační zákony (“aktivní” a “pasivní”):

$$\boxed{\Delta\Phi = 4\pi\rho} \quad \rho \dots \text{ hustota hmotnosti, } \Delta\Phi \stackrel{\text{např.}}{=} \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2}$$
$$\boxed{\vec{a} = -\nabla\Phi} \quad \vec{a} \dots \text{ zrychlení, } \nabla\Phi \stackrel{\text{např.}}{=} \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}, \frac{\partial\Phi}{\partial y}, \frac{\partial\Phi}{\partial z} \right)$$

- ... neslučitelné se speciální relativitou:

- $\Delta\Phi$ neobsahuje změnu v čase $\Rightarrow$ pole se nemůže šířit (šíří se “okamžitě”)
- ρ je *různá* v různých systémech (není invariantní)
- $E = mc^2$, tedy do hmotnosti ($\equiv$ zdroje) přispívá *jakákoli* forma energie (ale E také závisí na vztažném systému)
- tělesa, na která působí *jen gravitace*, se pohybují “volně” ($a^\mu = 0$), jejich “zdánlivé zrychlení” je způsobeno zrychlením vztažného systému ... musí být zahrnuto v definici a^μ

Einsteinovy rovnice (pro gravitaci/geometrii)

- “jakoukoli formu energie” (= zdroj gravitace/geometrie) umí popsat $T_{\mu\nu}$... tenzor energie a hybnosti (např. $T_{\mu\nu} = \rho u_\mu u_\nu$ “nekoherentní prach”)
- druhé derivace Φ odpovídají $R^\mu{}_{\nu\kappa\lambda}$ (viz slapové síly)
 $\Rightarrow$ z něj $R_{\mu\nu} := R^\kappa{}_{\mu\kappa\nu}$, $R := R^\mu{}_\mu$
- + určité speciální vlastnosti $R^\mu{}_{\nu\kappa\lambda}$ (známé z geometrie)
- + požadavek, aby z rovnic automaticky plynuly zákony zachování (pro libovolný “uzavřený” systém: $T^{\mu\nu}{}_{;\nu} = 0$)
- + aby v “newtonovské limitě” (slabé pole, pomalé rychlosti) vycházelo $\Delta\Phi = 4\pi\rho$

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

$$R_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} T g_{\mu\nu} \right) + \Lambda g_{\mu\nu}$$

... Berlín, čtvrtek 25.11.1915, zasedání Pruské královské akademie věd

“Léta trvajících tápání v temnotách, plné napětí a tužeb, kolísání mezi vírou a zemdlením, a pak konečné proniknutí k pravdě, to zná jen ten, kdo to sám zažil.”

historické (i fyzikální) souvislosti: Pokroky MFA, číslo 3 (2015)

Einsteinovy rovnice (pro gravitaci/geometrii)

stručně: “křivost prostoročasu = hustota energie/hybnosti”

... velmi složité rovnice, dostatečně obecné řešení obtížné

- 10 nelineárních (kvazi-lineárních) parciálních diferenciálních rovnic
 - 6 pro 10 složek metrického tenzoru $g_{\mu\nu}$
 - 4 omezují zdroje (v podobě zákonů zachování $T^{\mu\nu}_{;\nu} = 0$)
- geometrie prostoročasu *provázána* s vlastnostmi zdrojů:
fyzikální “jeviště” (prostoročas) *dynamickou součástí problému!*
(na rozdíl od jiných teorií, např. speciální relativity)
- navíc zdroje působí i “samy na sebe” (nelinearita rovnic)
- $\Rightarrow$ velmi obtížné úlohy...
- + potíže s fyzikální/geometrickou interpretací získaných metrik
(různý charakter souřadnic, mnoho řešení nesmyslných...)



⇒ křivost nejen zkoumáme...



křivost si nejen užíváme. . .

... ale dokonce k ní sami přispíváme

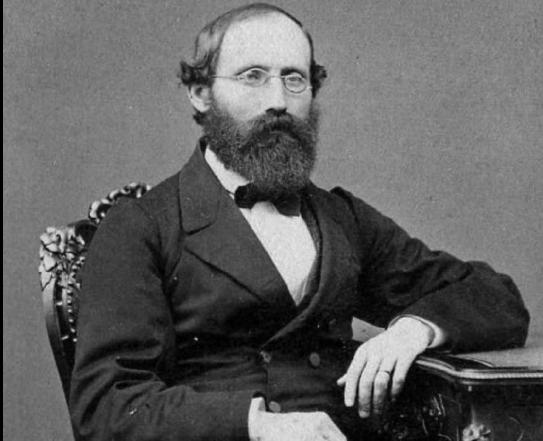




**prostorčas však může být zakřiven i “sám od sebe”
(geometrie i hmota jsou svébytné)**

aplikační oblasti OTR

- extrémně silná (a nehomogenní)
pole kolem velmi hustých objektů
(černé díry, neutronové hvězdy)
+ gravitační kolaps (jejich vznik)
- vesmír na velmi velkých škálách
(kosmologie)
- časově proměnné děje
(gravitační vlny)



Ueber
die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen.

Von
B. Riemann.

Aus dem Nachlass des Verfassers mitgetheilt durch R. Dedekind¹⁾.

Plan der Untersuchung.

Bekanntlich setzt die Geometrie sowohl den Begriff des Raumes, als die ersten Grundbegriffe für die Constructionen im Raume als etwas Gegebenes voraus. Sie giebt von ihnen nur Nominaldefinitionen, während die wesentlichen Bestimmungen in Form von Axiomen auftreten. Das Verhältniss dieser Voraussetzungen bleibt dabei im Dunkeln; man sieht weder ein, ob und in wie weit ihre Verbindung nothwendig, noch a priori, ob sie möglich ist.

Diese Dunkelheit wurde auch von Euklid bis auf Legendre, um den berühmtesten neueren Bearbeiter der Geometrie zu nennen, weder von den Mathematikern, noch von den Philosophen, welche sich damit beschäftigten, gehoben. Es hatte dies seinen Grund wohl darin, dass der allgemeine Begriff mehrfach ausgedehnter Grössen, unter welchem die Raumgrössen enthalten sind, ganz unbearbeitet blieb. Ich habe mir daher zunächst die Aufgabe gestellt, den Begriff einer mehrfach ausgedehnten Grösse aus allgemeinen Grössenbegriffen zu construiren. Es wird daraus hervorgehen, dass eine mehrfach ausgedehnte Grösse ver-

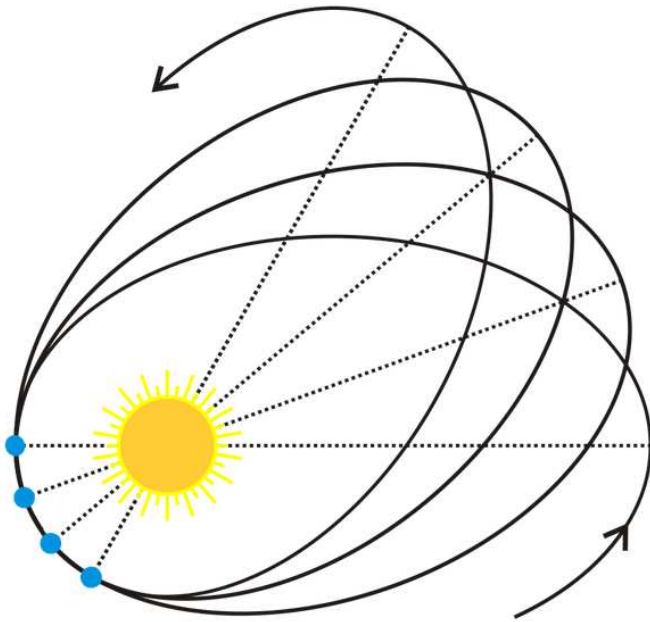
1) Diese Abhandlung ist am 10. Juni 1854 von dem Verfasser bei dem zum Zweck seiner Habilitation veranstalteten Colloquium mit der philosophischen Facultät zu Göttingen vorgelesen worden. Hieraus erklärt sich die Form der Darstellung, in welcher die analytischen Untersuchungen nur angedeutet werden konnten; in einem besonderen Ansatze gedenke ich demnächst auf dieselben zurückzukommen.
Braunschweig, im Juli 1867. R. Dedekind.

- Prostor konstantní křivosti je nutně konečný, pokud je tato křivost kladná, ač jakkoli malá.
- Křivost v každém určitém bodě může mít libovolnou hodnotu, pakliže se v měřitelně velkých oblastech příliš neliší od nuly. ... Můžeme se tedy klidně domnívat, že na velmi malých rozměrech prostor nemusí splňovat axiomy [Eukleidovy] geometrie; dokonce bychom to měli předpokládat, pokud bychom tak dospěli k jednoduššímu vysvětlení jevů.
- Buď tedy musí prostor tvořit diskrétní varietu, anebo musíme příčiny jeho metrických poměrů hledat mimo něj, v silách, které na něj působí. ... To nás přivádí do působnosti jiné z věd, fyziky, kam však vzhledem k určení této práce nebudeme vstupovat.
- Einstein: "Prostor tedy podle této teorie už vůbec není absolutní, nýbrž – přesně jak to tužil Riemann – jeho struktura závisí na fyzikálních vlivech."



“klasické” experimenty a pozorování

posun perihelia (Merkuru)



anomální
 $\Delta\phi = 43''/\text{stol.}$

Le Verrier 1859

Einstein 18.11.1915



ohyb světelných paprsků

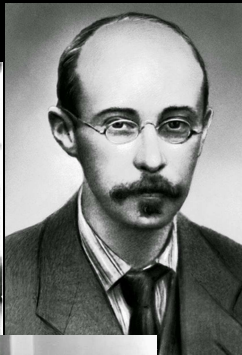
Einstein 1907
a hlavně 1911-12 v Praze

Eddington & Dyson 1919
(velká sláva ...)



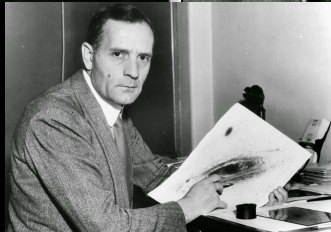
kosmologická expanze, *big bang*

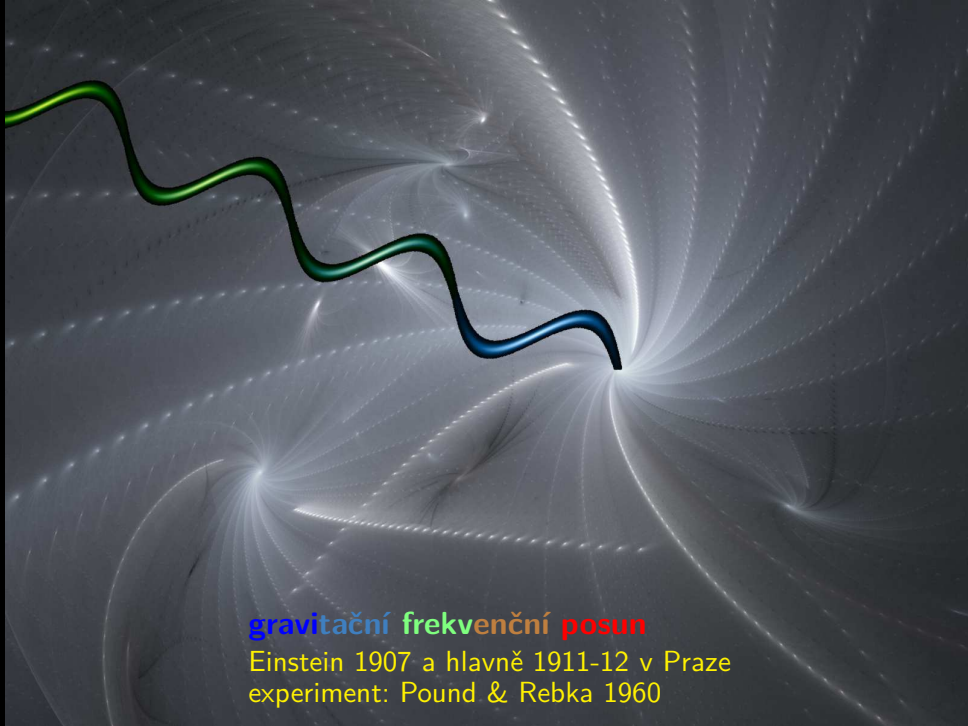
teorie (1917–1931):
de Sitter, Friedmann, Lemaître



pozorování
(1914–1929):

Slipher
Lemaître
Hubble



An abstract visualization of spacetime curvature, possibly representing gravitational waves. A prominent wavy line, colored green on the left and blue on the right, curves across the upper half of the image. The background is dark with intricate, glowing patterns of light blue and white, suggesting complex geometric structures or wave propagation. The overall effect is one of dynamic, curved space-time.

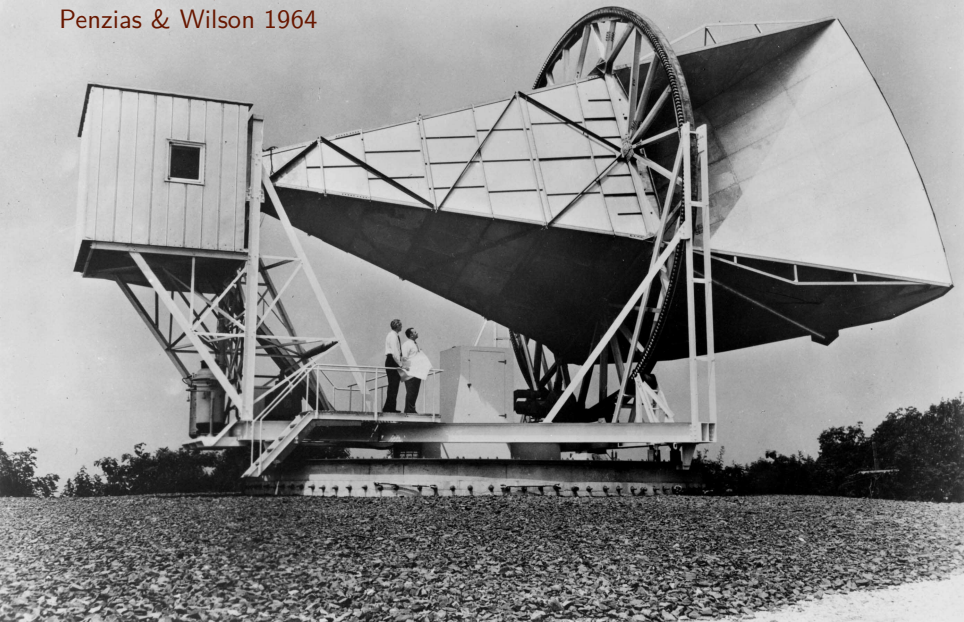
gravitační frekvenční posun

Einstein 1907 a hlavně 1911-12 v Praze
experiment: Pound & Rebka 1960

mikrovlnné záření kosmického pozadí (CMBR)

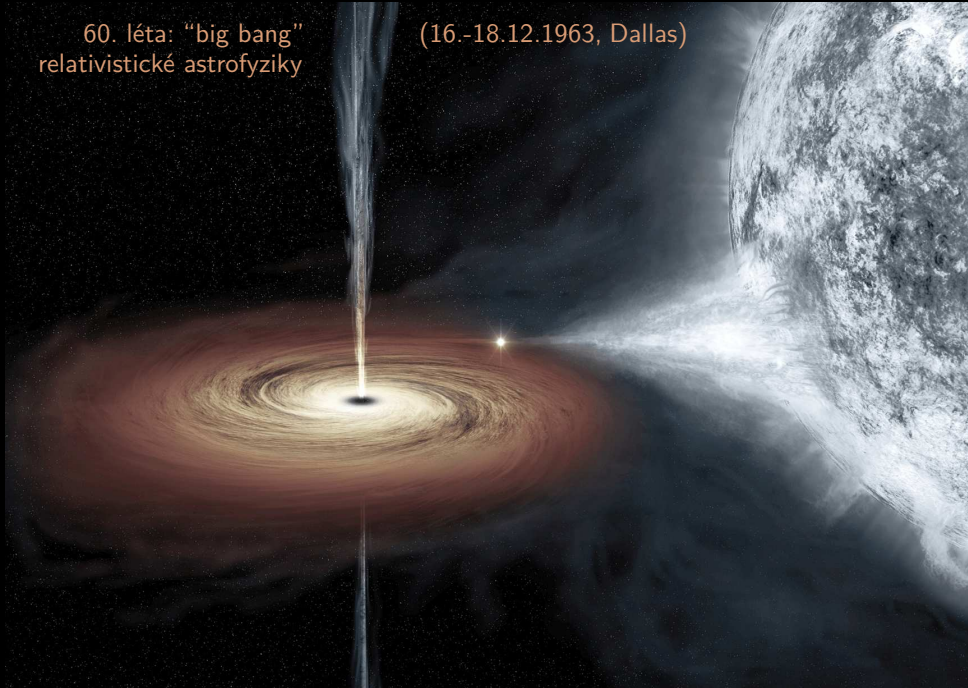
Gamow 1940+

Penzias & Wilson 1964



60. léta: "big bang"
relativistické astrofyziky

(16.-18.12.1963, Dallas)



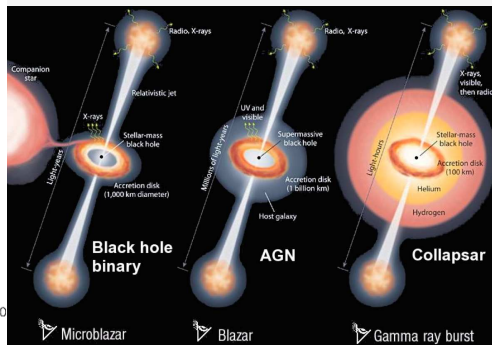
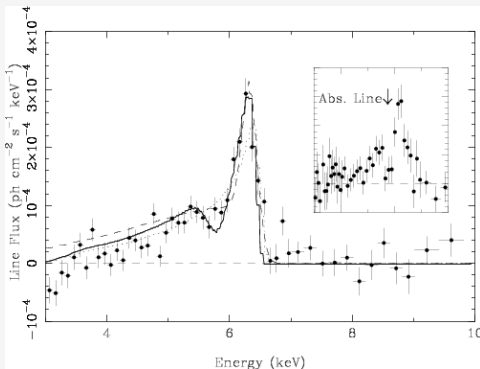
X-zdroje (62), kvasary (63), pulsary (67), záblesky γ (67) + zároveň Kerr (63)



100 let
obecné relativity:

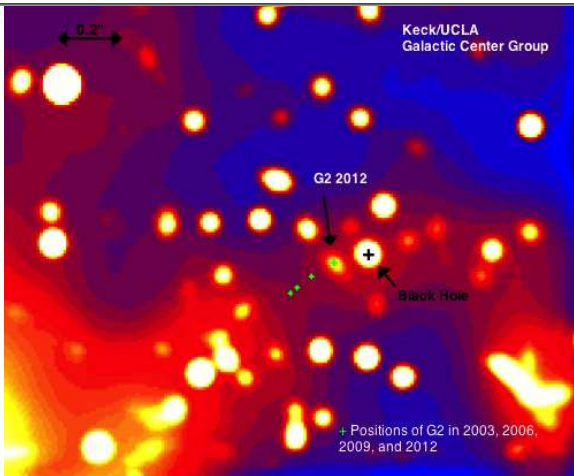
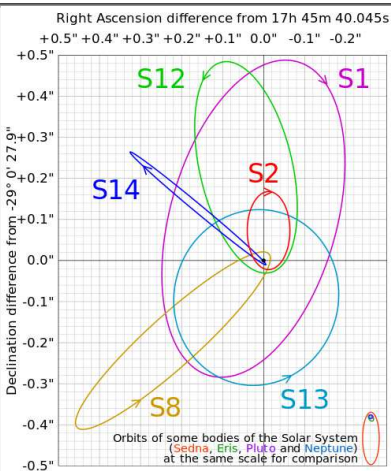
druhá polovina...

(astro)fyzika černých děr

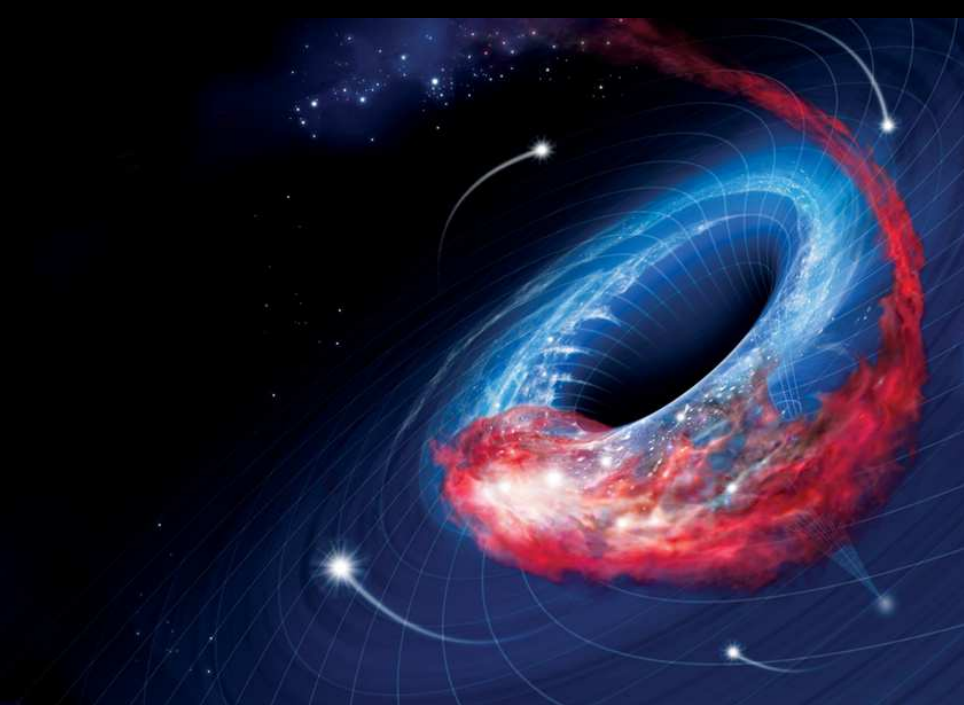


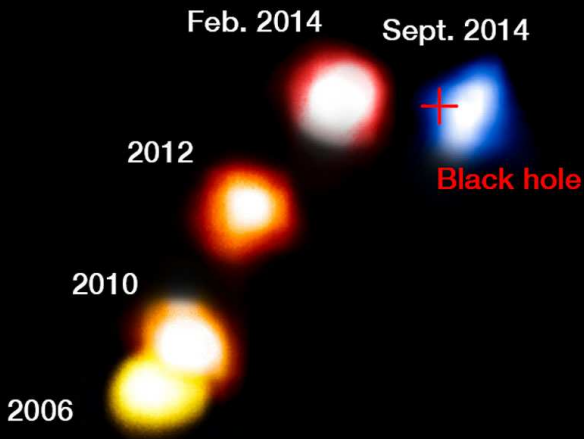
- teorie a modelování akrečních disků kolem černých děr, observační důsledky (různé režimy; mikrofyzika – vizkozita, atomové procesy; role záření a $\vec{B}$; vznik jetů)
- fyzika gravitačního kolapsu / supernovy, hypernovy, záblesky γ / kosmická cenzúra?
- rentgenové dvojhvězdy, jádra galaxií (aktivních i “normálních”)
- fotometrie (rychlá proměnnost; QPOs: kvazi-periodické oscilace)
- spektroskopie (silnou gravitací ovlivněné čáry: $K\alpha$)
- polarimetrie

jádro naší Galaxie (Sagittarius A*)



- černá díra ~ 4.2 miliony hmotností Slunce
- sledování obíhajících hvězd (infračervené, rádiové), modelování centrální hvězdokupy
- oblak G2 (2012-dosud; pericentrum na jaře 2014, jen 163 AU! – srovnej S2: 120 AU)
pozn.: poloměr horizontu č. díry ~ 0.1 AU ($\doteq 20\times$ poloměr Slunce)

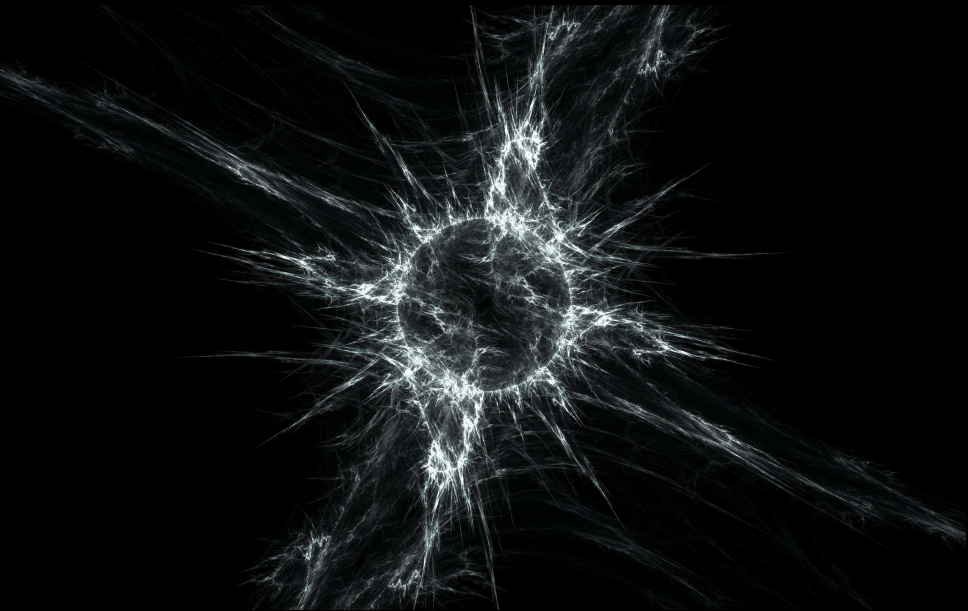




silueta černé díry (*event-horizon telescope*)

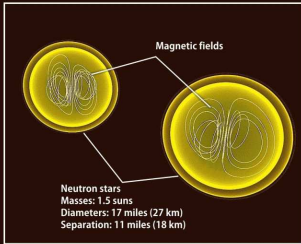


- průměr = $55 \mu\text{as}$ (obloukových mikro-vteřin) / pozn.: díra v M87 asi 2x menší
- VLBI (very-long-baseline interferometry): spojené rádioteleskopy
 $\lambda = 0.87\text{mm}$ (očekávané rozlišení asi $20 \mu\text{as}$)
dosud nejpresnější měření ($\lambda = 1.3\text{mm}$): průměr radiového zdroje $\sim 37 \mu\text{as}$

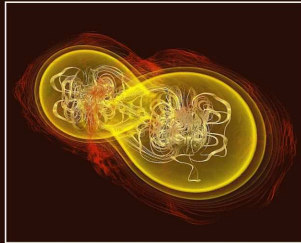


neutronové hvězdy, pulsary

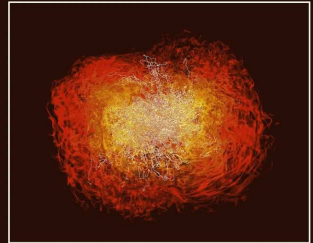
Crashing neutron stars can make gamma-ray burst jets



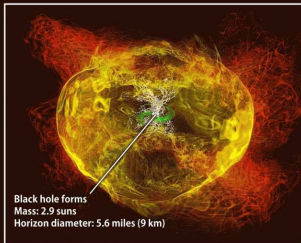
Simulation begins



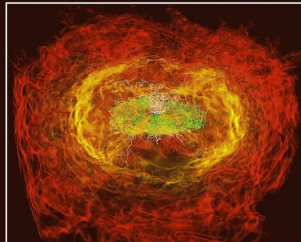
7.4 milliseconds



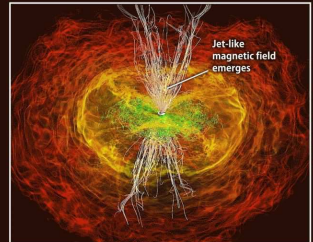
13.8 milliseconds



15.3 milliseconds



21.2 milliseconds



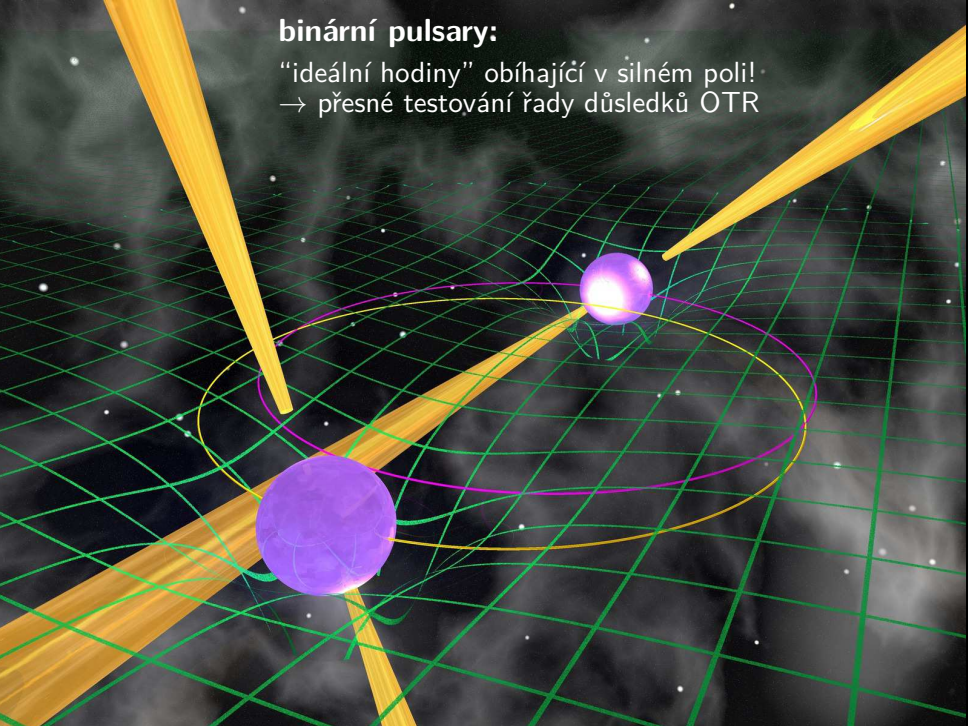
26.5 milliseconds

Credit: NASA/AEI/ZIB/M. Koppitz and L. Rezzolla

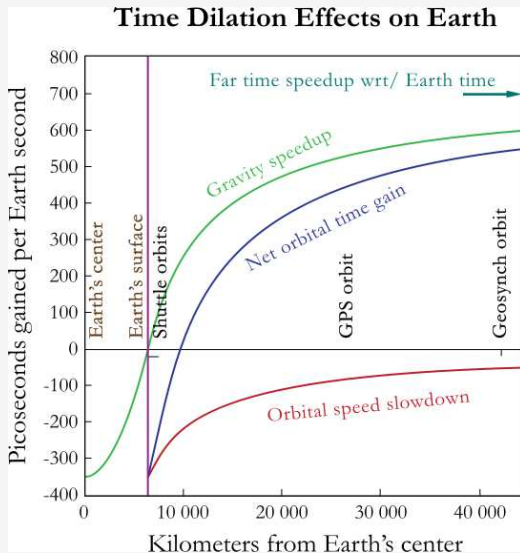
vyzařování gravitačních vln! model (krátkých) záblesků gamma
výzva pro teorii a modelování: numerická relativita

binární pulsary:

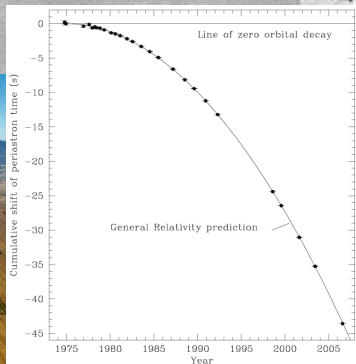
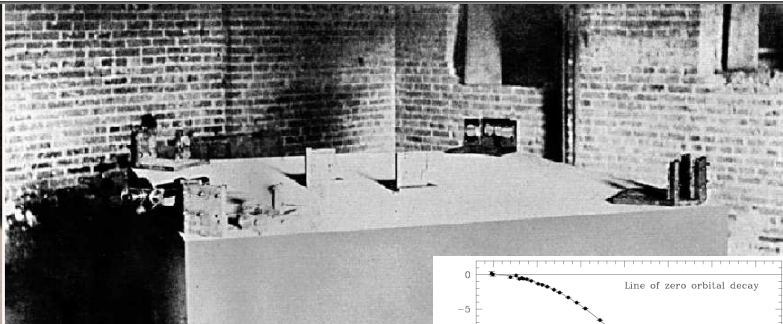
“ideální hodiny” obíhající v silném poli!
→ přesné testování řady důsledků OTR



relativita ve vaší kapse: satelitní navigace



přímá detekce gravitačních vln

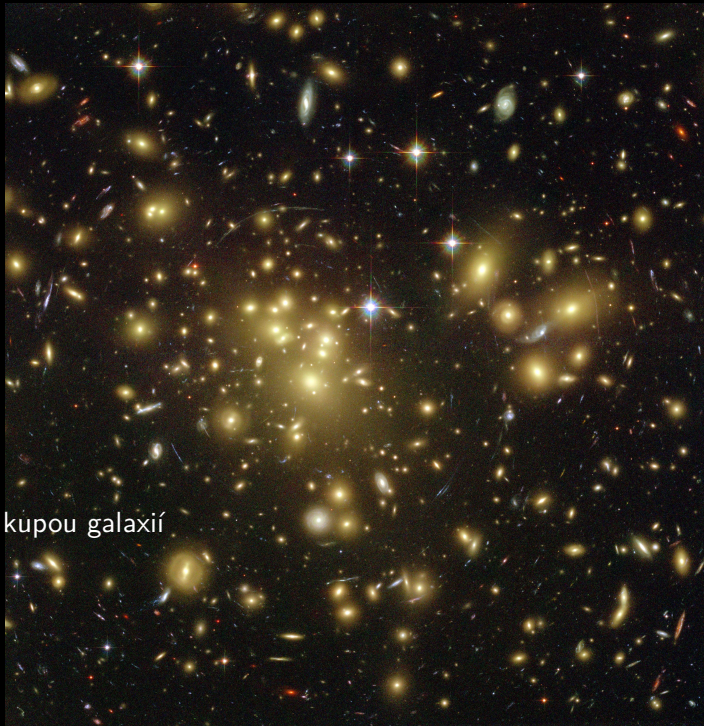


gravitační čočky:

- důsledek ohybu paprsků v gravitačním poli
- využití: “lupa” na vzdálené objekty; exoplanety; kosmologie



čočkování kupou galaxií

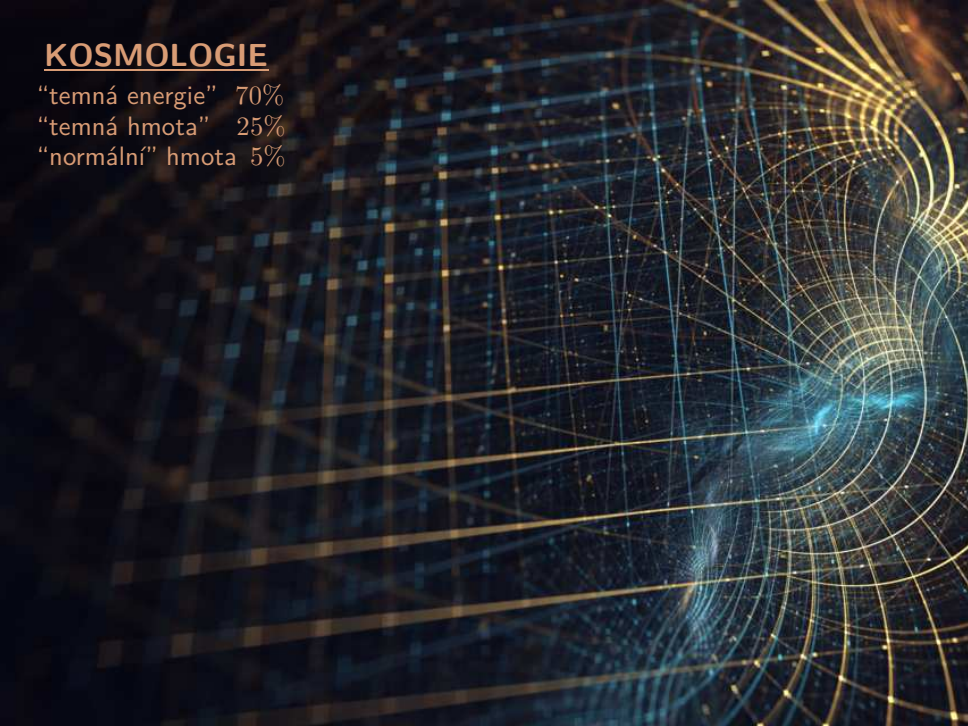


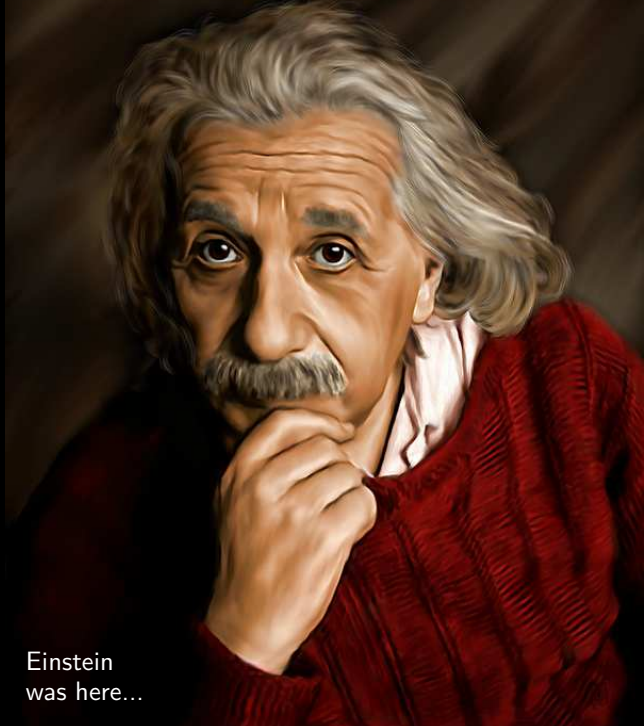
KOSMOLOGIE

“temná energie” 70%

“temná hmota” 25%

“normální” hmota 5%





Einstein
was here...