

Speciální
Teorie
Relativity

Fyzika na přelomu 19. a 20. století

Konec fyziky

Nevyřešené problémy

Existence éteru

Hlubší znalosti elmg. pole

Závislost hmotnosti
elektronu na jeho rychlosti

Princip radioaktivního rozpadu

Stáčení perihélia planet



STR, OTR



Kvantová teorie

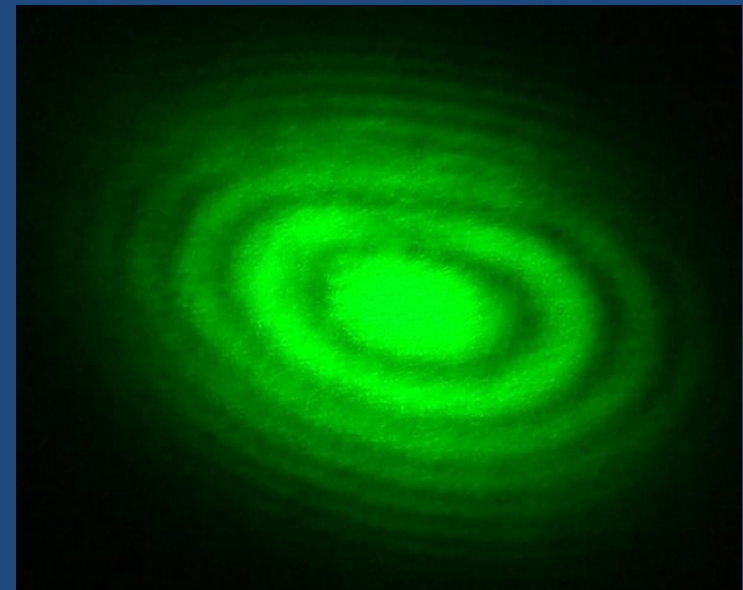
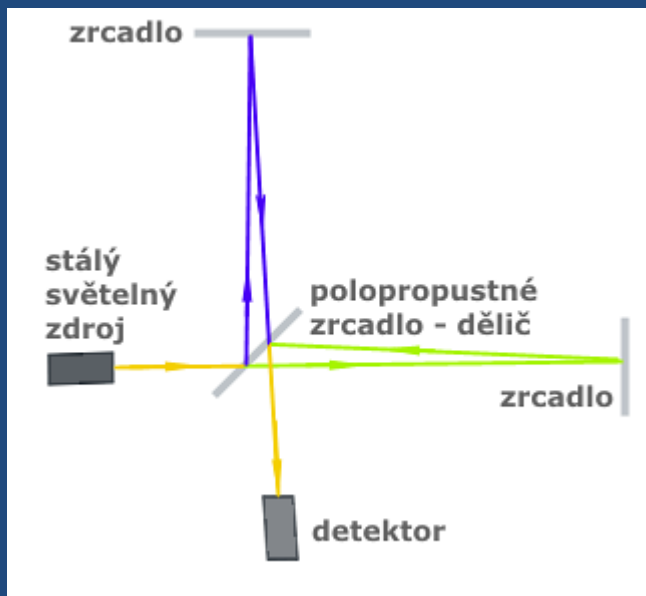
TOE

Od nekonečna ke konstantě

- Starověké Řecko: rychlost světla považována za nekonečnou
- **Středověk: 1638 – Galileo** – experiment s lucernou (měření časové prodlevy mezi odkrytím lucerny a zpozorováním světla ve vzdálenosti cca 1 míle dopadlo negativně)
- **1676 – Ole Rømer** (dánský matematiky a astronom) – studoval pomocí dalekohledu pohyb Jupiterova Měsíce Io který vcházel a vycházel z Jupiterova stínu – zjistil změnu oběžné doby když byl Jupiter blíže Zemi než když byl dále od Země – rychlost světla odhadnutá z jeho výpočtů činila asi 222 000 km/s (dnešní hodnota je cca 300 000 km/s)
- **1728 – Bradley** – 298 000 km/s, uznána konečnost rychlosti světla
- **1849 – Fizeau** – první pozemské měření rychlosti světla (313 000 km/s)
- **1865 – J. C. Maxwell** – ucelená teorie elektromagnetického pole
- $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ **$c = 299\,792\,458\,m \cdot s^{-1}$** (od roku 1983)

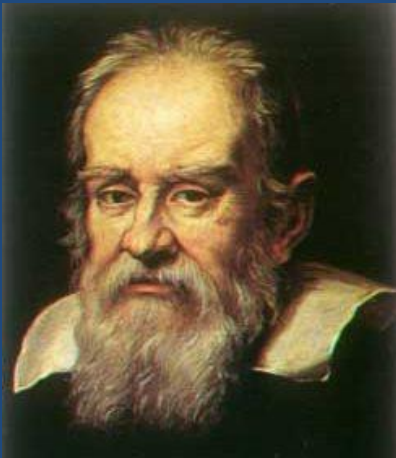
Michelsonův – Morleyův experiment

- vyvrátil existenci éteru
- **Éter** – podle představ některých fyziků šlo o substanci, ve které se šíří světlo podobně jako třeba zvuk v pružném prostředí
- Nebyly pozorovány posuny interferenčního obrazce ve směru pohybu zařízení versus ve směru kolmém na pohyb
- **Důsledek: světlo se šíří ve všech směrech stejnou rychlostí nezávisle na rychlosti zdroje světla**



Předrelativistické období

Galileo Galilei (1564 – 1642)



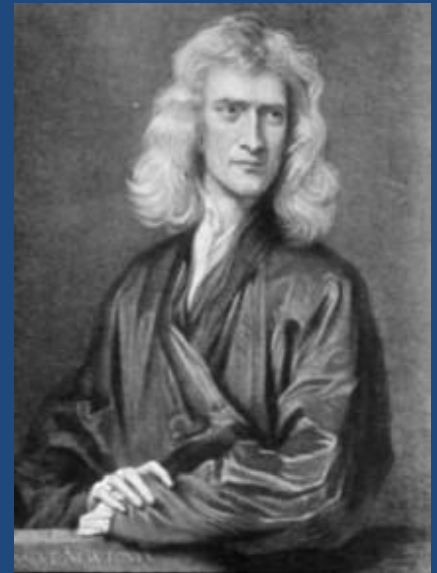
- klasické skládání rychlostí

$$v = v_1 + v_2$$

- Invariance délky: $l_1 = l_2$
- Invariance času: $t_1 = t_2$
- Invariance hmotnosti

$$m_1 = m_2$$

Isaac Newton (1643 – 1727)

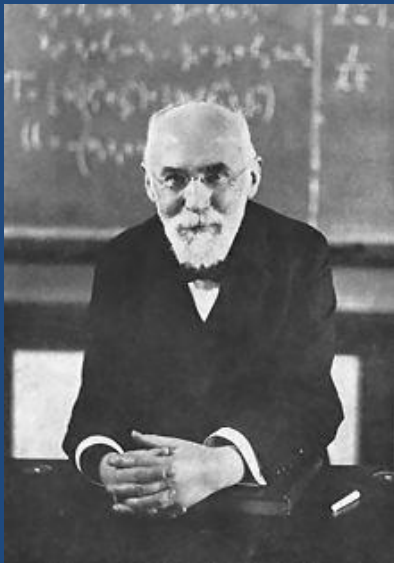


Galileův princip relativity:

Žádným mechanickým pokusem nelze zjistit, zda je jedna inerciální soustava vůči druhé inerciální soustavě v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu.

Relativistické období – základní principy STR

H. A. Lorentz (1853 – 1928)

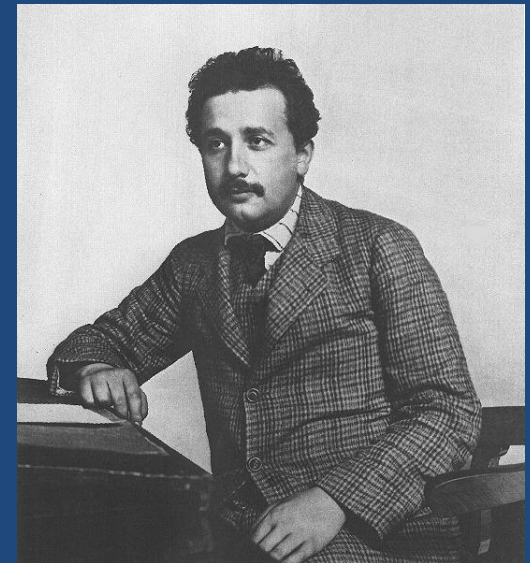


1904 – Lorentz objevil lineární transformace, při kterých se neměnil tvar Maxwellových rovnic

1905 – Einstein publikoval základní principy STR - nezahrnuje gravitaci

1915 – Einstein publikoval základní principy OTR - teorie gravitace

Albert Einstein (1879 – 1955)



Einsteinův princip relativity:

Ve všech inerciálních vztažných soustavách probíhají všechny fyzikální jevy za stejných podmínek stejně – fyzikální zákony mají ve všech soustavách stejný tvar.

Základní principy STR

První postulát – princip relativity:

Ve všech inerciálních vztažných soustavách platí stejné fyzikální zákony.

Druhý postulát – princip konstantní rychlosti světla:

Ve všech inerciálních vztažných soustavách má rychlost světla ve vakuu stejnou velikost. Tato rychlost je nezávislá na rychlosti pohybu zdroje světla nebo rychlosti pohybu pozorovatele a je ve všech směrech stejná.

Důsledky principů STR:

- relativnost současnosti
- dilatace času
- kontrakce délky
- relativistické skládání rychlostí
- Relativistická hmotnost

Relativnost současnosti

Bodová událost

děj, který nastane v určitém místě čtyřrozměrného prostoročasu

$$U = U(x, y, z, t)$$

Př. záblesk světla, dopad částice na určité místo na stínítku

Soumítné události

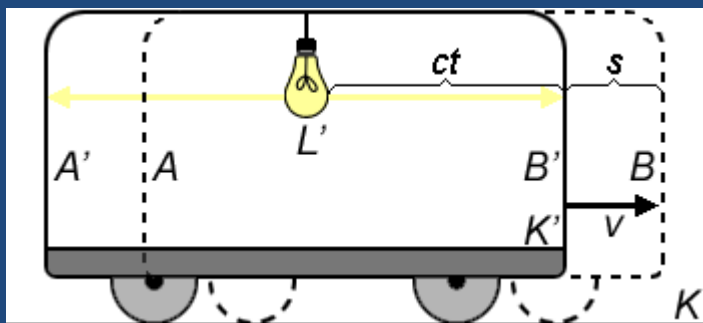
– události, které se odehrály v dané vztažné soustavě na stejném místě

– obě události mají stejné prostorové souřadnice x, y, z

Současné události

– události, které se odehrály v dané vztažné soustavě ve stejném okamžiku

– obě události mají stejné časovou souřadnici t



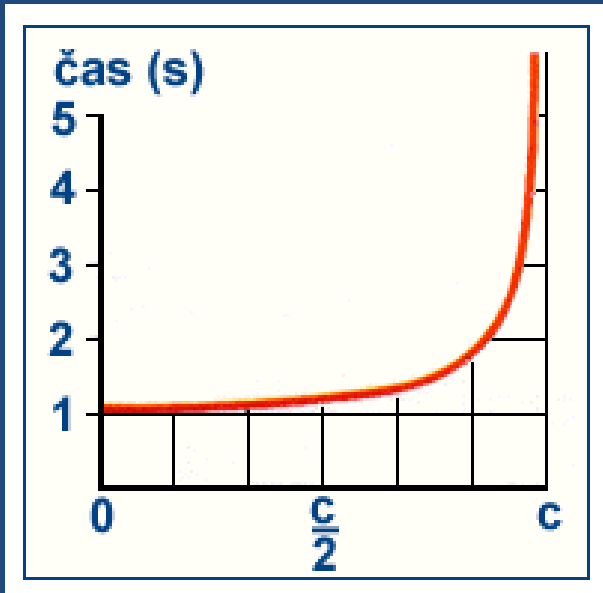
Relativnost současnosti

– dvě nesoumítné události (dopad světla na stěny v bodě A a B), které jsou současné v jedné soustavě (K') nejsou současné v jiné soustavě (K)

Současnost dvou nesoumítných událostí je relativní pojem.

Dilatace času

- V soustavě, která se pohybuje (čárkovaná) vůči jiné rychlostí v plyne čas pomaleji, než v soustavě, která je v klidu (nečárkovaná)



$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\sqrt{1 - \beta^2} \in (0; 1) \rightarrow \Delta t' < \Delta t$$

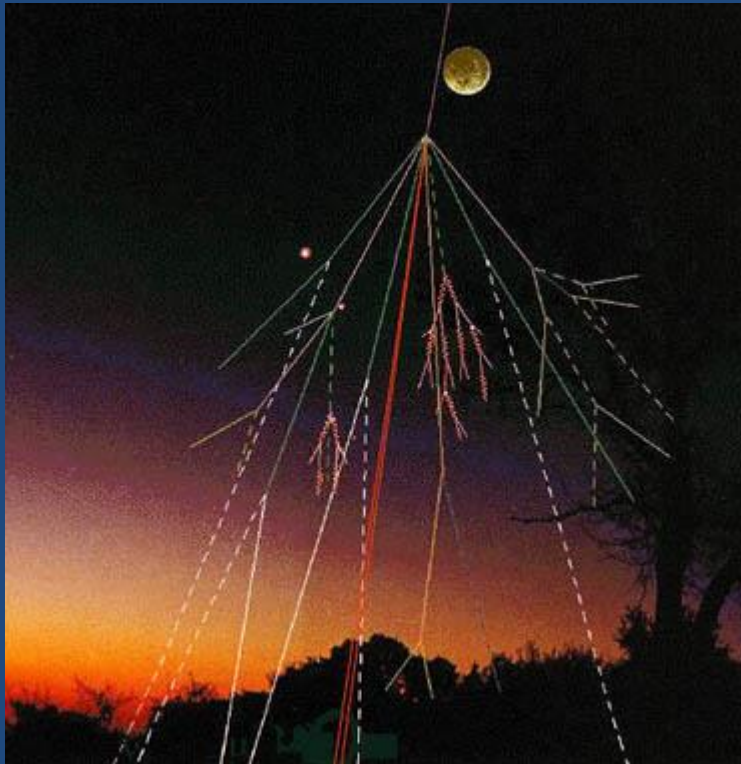
Paradox dvojčat aneb může být syn starší než jeho otec?

- dvojče letící do vesmíru rychlostí blízkou c se vrátí mladší (čas mu plyne pomaleji)
- podobně otec letící do vesmíru může být po návratu mladší než jeho syn

Experimentální potvrzení dilatace času

Miony

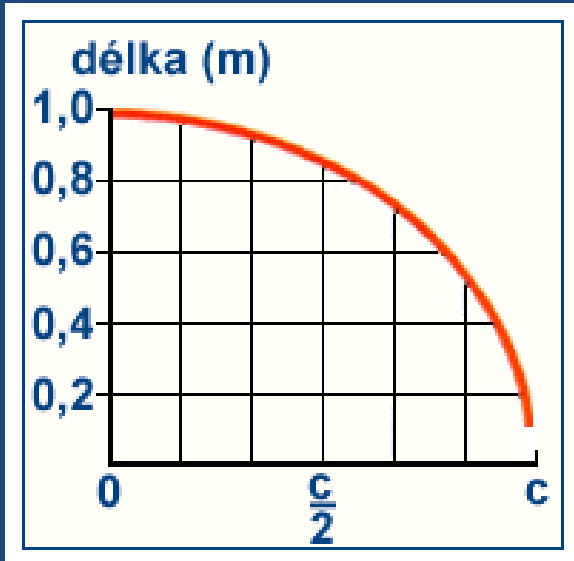
- při dopadu primárního kosmického záření do horních vrstev atmosféry ve výšce cca 20 km vznikají částice zvané **miony**, které mají střední dobu života $t_0 = 2,2 \cdot 10^{-6} s$ a pohybují se rychlostí $v = 0,998 c$



- dráha, kterou by měly v atmosféře urazit je **$s = vt \approx 650 m$**
- na Zemi bychom je tedy neměli vůbec detekovat, ale detekujeme jich značné množství
- použijeme-li k výpočtu dilatační vzorec vychází $\Delta t \approx 1,1 \cdot 10^{-4} s$ a dráha **$s = vt \approx 33 km$**
- **Další experimenty s Cs hodinami v letadle potvrdily dilataci času**

Kontrakce délky

- V soustavě, která se pohybuje (čárkovaná) vůči jiné rychlostí v dochází ke zkrácení rozměrů ve směru pohybu (tedy ne všech rozměrů tělesa)



$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\sqrt{1 - \beta^2} \in (0; 1) \rightarrow l < l_0$$

Experimentální důkazy kontrakce délek

- **přímé pozorování** kontrakce (zmenšené délky tělesa) nebylo pozorováno
- **nepřímé důkazy**: miony, srážky částic v urychlovačích

Relativistické skládání rychlostí

- V soustavě, která se pohybuje (čárkovaná) vůči jiné rychlostí v se pohybuje těleso rychlostí u'
- **Vůči soustavě, která je v klidu (nečárkovaná) má těleso rychlost u**

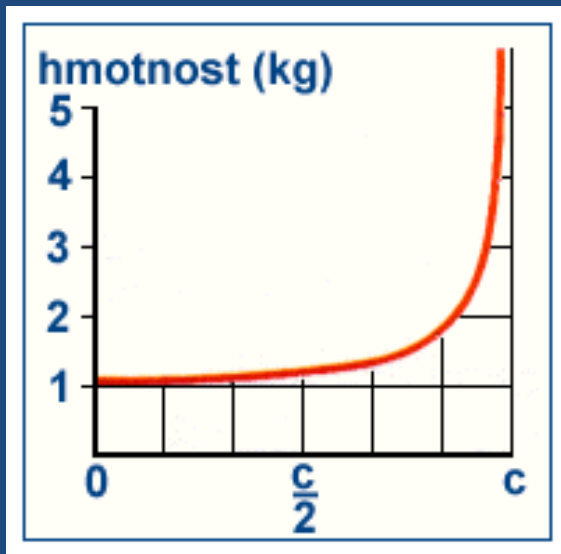
$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$$

Přechod na Galileovu transformaci

- pro $v \ll c$ **přechází vztah v klasické skládání rychlostí**
- $\frac{v}{c^2} \rightarrow 0$, $u = u' + v$

Relativistická hmotnost

- **klidová hmotnost** m_0 tělesa nebo částice pohybující se rychlostí v se s rostoucí rychlostí v nelineárně zvyšuje



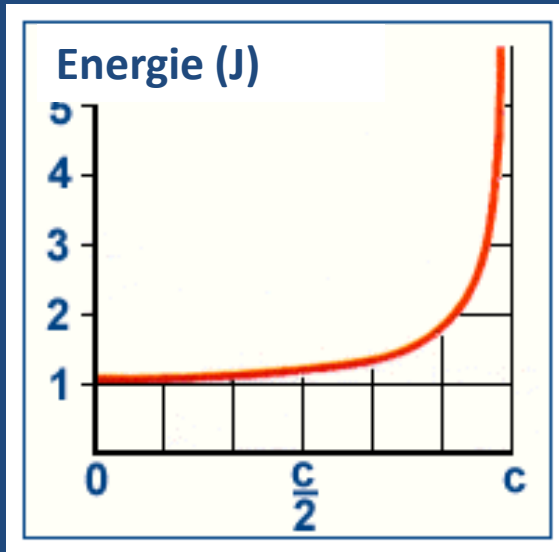
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Proč nemůže těleso nebo částice dosáhnout rychlosti světla?

- S rostoucí rychlostí se zvyšuje dramaticky hmotnost tělesa, potřebujeme tedy k jeho urychlení zvyšovat i působící sílu, která by musela být pro $v = c$ nekonečně velká

Ekvivalence hmoty a energie

- **klidová energie** E_0 tělesa nebo částice pohybující se rychlostí v se s rostoucí rychlostí v nelineárně zvyšuje



$$mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

pro $v < c$ je $v^2/c^2 \ll 1$ a tedy platí

$$mc^2 = m_0 c^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right)$$

Relativistická energie částice

$$mc^2 = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2$$
$$E = E_0 + E_k$$

Ekvivalence hmoty a energie

Klidová energie $E_0 = m_0c^2$

tělesa představuje obrovskou energii v každém kilogramu látky

Uvolnění této energie

- jaderné elektrárny - havárie v Černobylu 25. 4. 1986
- jaderné bomby – poprvé 6. srpna 1945 Hirošima (Little Boy), a 9. srpna 1945 Nagasaki (Fat Man)

Ohřátí vody o 100 °C

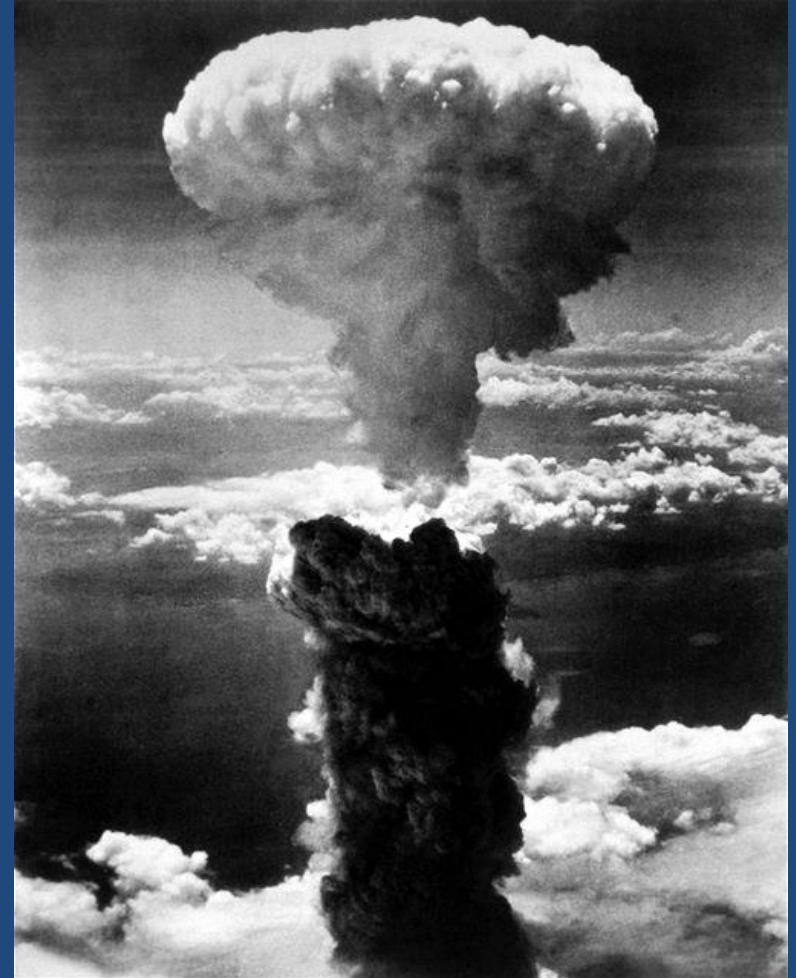
hmotnostní přírůstek je cca $\Delta m = \frac{Q}{c^2} \cong 5 \cdot 10^{-12} \text{ kg}$

Tento přírůstek je neměřitelný.

Energie ukrytá v uranu

- vazebná energie jednoho jádra je cca $2,8 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 1757 \text{ MeV}$
- 1 kg uranu U238 obsahuje cca $3 \cdot 10^{21}$ jader což odpovídá energii $9 \cdot 10^{16} \text{ J}$
- 1 kg uhlí poskytne energii 10^6 J
- **1 kg uranu (kulička o $r = 2,3 \text{ cm}$) = 1000 tun uhlí (100 vagónů)**

Hirošima

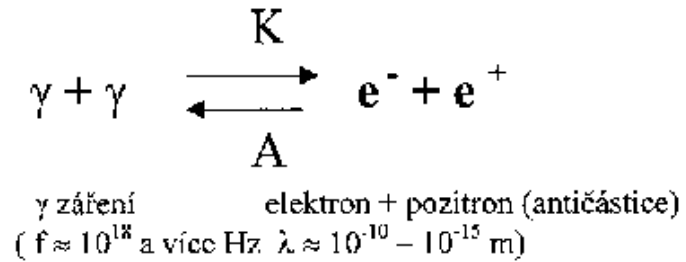


Černobyl

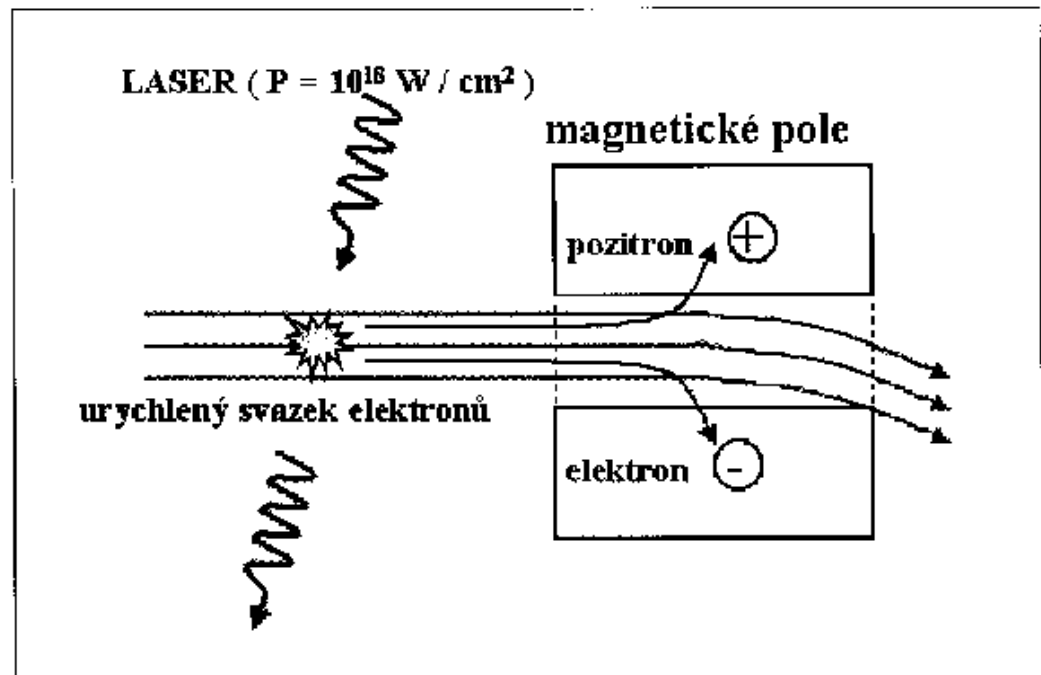
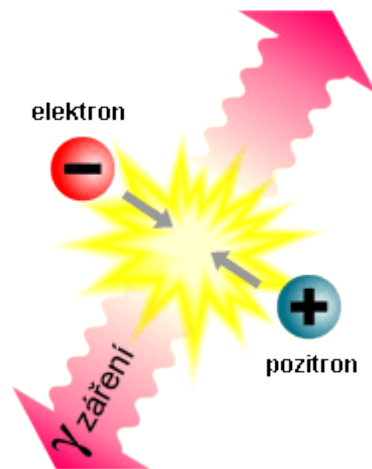


Anihilace a kreace

- uvolnění veškeré energie



r. 1997 - Stanfordova univerzita
v Kalifornii

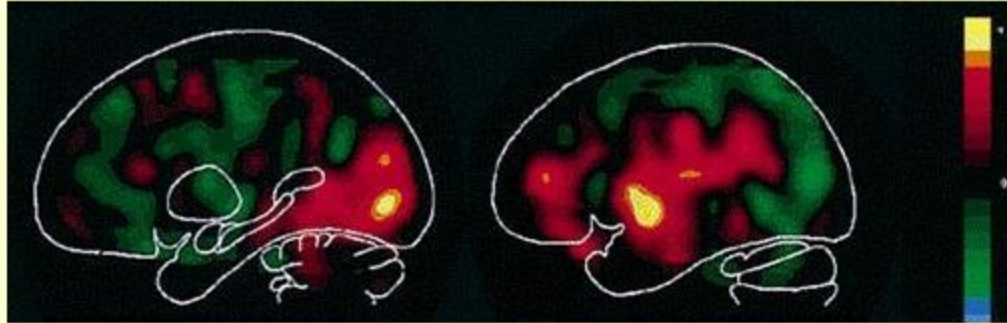


K čemu slouží antihmota

V současné realitě: pozitronová emisní tomografie

Radioaktivní izotopy s pozitronovým rozpadem → anihilace pozitronu v klidu → vznik dvou fotonů (kvant záření gama) letících v opačném směru → jejich zachycením určení polohy

Mozeček



Mozeček poslouchá

PET kamera v GSI
Darmstadt

Velmi dobré prostorové rozlišení (2 mm), stále nové sloučeniny pro PET kamery (systémy **P**ozitronové **E**misní **T**omografie)

Vložení radioaktivního izotopu do sloučeniny usazující se ve studovaném orgánu (přesná diagnostika a medicinský výzkum):

- 1) Určení polohy a rozměru rakovinného nádoru
- 2) Účinnost ozařování při použití těžkých iontů (^{10}C , ^{11}C)
- 3) Určení prokrvené a neprokrvené části
- 4) Určení toho, která část mozku zrovna pracuje

Testy využití anihilace antiprotonů při ozařování nádorů



O becnná

T eorie

R elativity

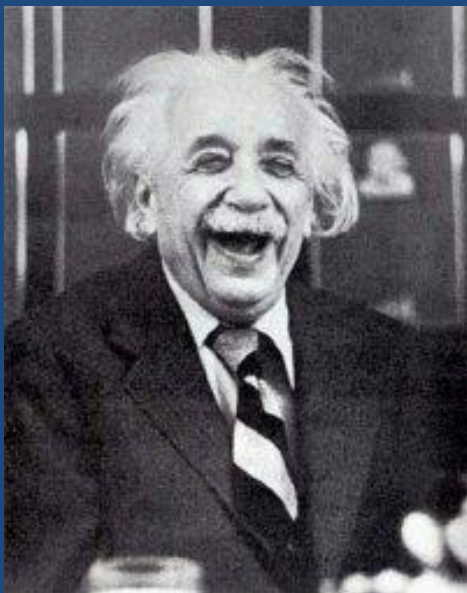
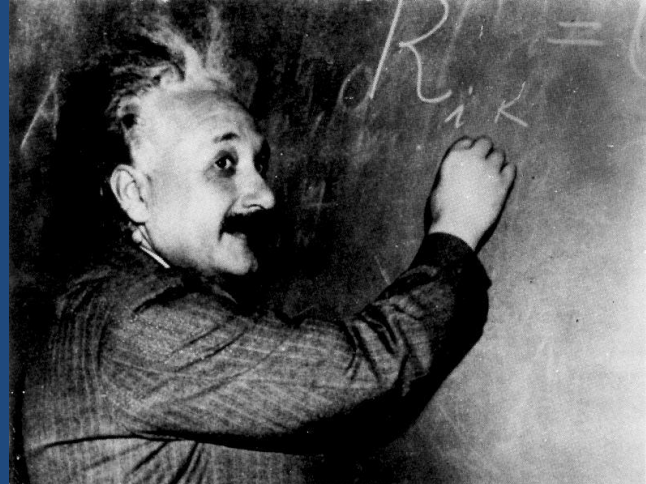
Základní principy OTR

Albert Einstein

1907 – počátky práce na OTR

1911 – 1912: pobyt v Praze

1915 – publikace OTR



Obecný princip relativity – princip kovariance

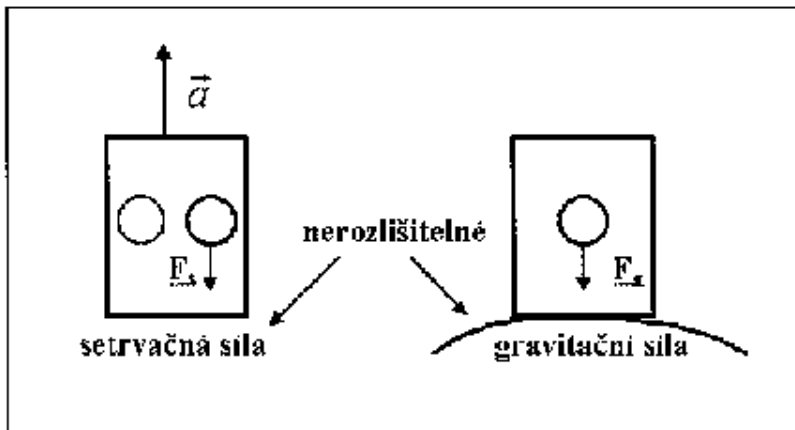
Všechny vztažné soustavy (inerciální i neinerciální) jsou pro popis fyzikálních dějů rovnocenné.

R. P. Feynman: „Fyzikální zákony platí ve vesmíru i tam, kam jsme se ještě nedívali.“

Základní principy OTR

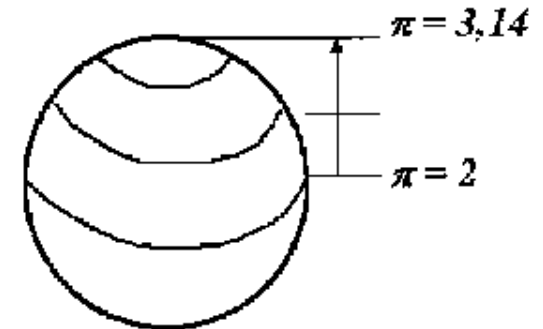
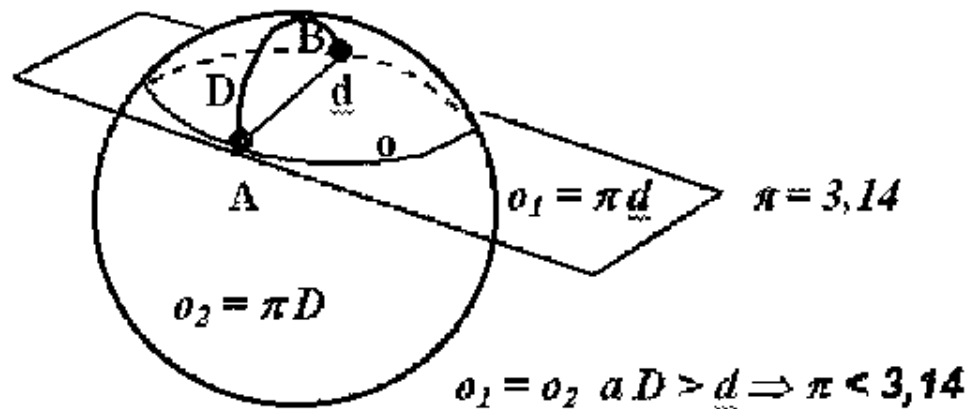
Princip ekvivalence – Eötvösův experiment

Gravitační a setrvačné síly mají stejnou fyzikální podstatu, a platí pro ně stejné fyzikální zákony.



- **gravitační pole má lokálně stejné vlastnosti jako pole setrvačných sil v neinerciální soustavě – slabý princip ekvivalence**
- **setrvačná (zdánlivá) síla: síla je vlastností jen předmětu samého na jiných tělesech nezávislá**
- **rovnost setrvačné a gravitační hmotnosti**

Geometrie prostoru



Nejkratší spojnice dvou bodů – geodetika (u koule: části hlavních kružnic); poměr o/D není stálé číslo

Prostory se od euklidovské roviny liší – veličina def. odlišnost – **KŘIVOST K**

Euklidovská rovina:	$K = 0$	
Koule (sférický prostor):	$K > 0$	uzavřený konečný bez hranic
Sedlo (hyperbolický prostor):	$K < 0$	otevřený

Míra křivosti: pro jednorozměrný útvar (čára): $K \approx 1/R$ R – poloměr křivosti (např. poloměr kružnice)
 pro dvourozměrný útvar (plocha): $K \approx 1/R^2$

Koule – prostor s konstantní křivostí - nakreslený na 1 místě po posunutí nezmění tvar (stejně strany i úhly)

Vajíčko – prostor s měnící se křivostí – 2 Δ mají-li stejné strany nemají stejné úhly

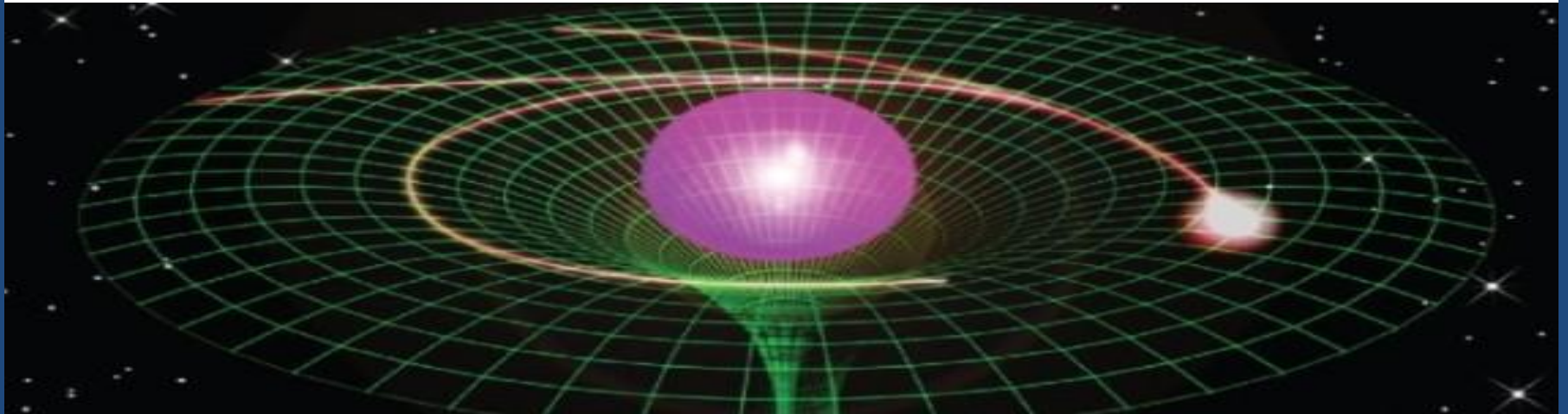
Einsteinovy rovnice pole

Objekt popisující
zakřivený
prostor

=

Objekt popisující
rozložení hmoty a
energie

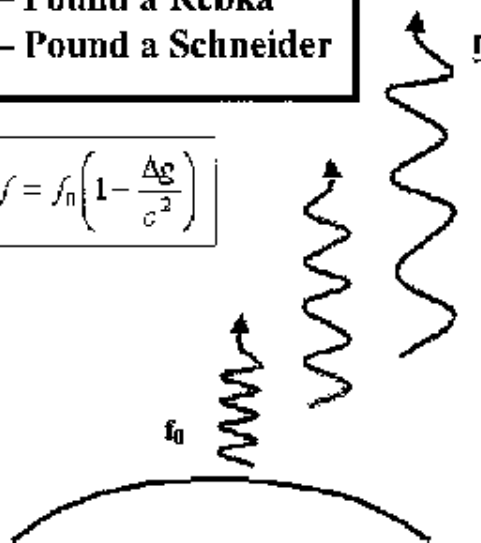
$$\mathbf{R}_{ik} - \frac{1}{2}\mathbf{R}\mathbf{g}_{ik} + \Lambda\mathbf{g}_{ik} = -\frac{8\pi\kappa}{c^4}\mathbf{T}_{ik}$$



Experimentální testy OTR

Gravitační rudý posuv
 1959 – Pound a Rebka
 1965 – Pound a Schneider

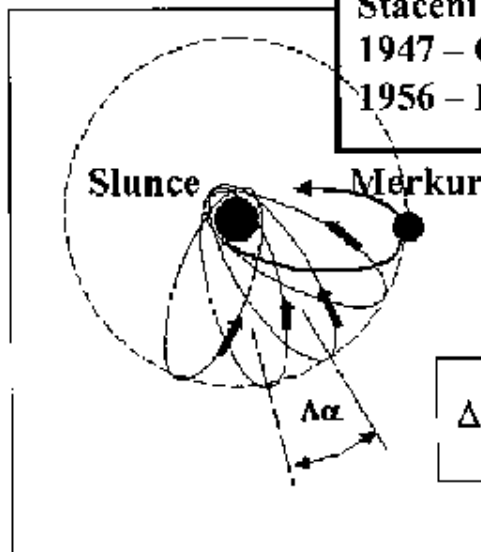
$$f = f_0 \left(1 - \frac{\Delta g}{c^2} \right)$$



Stáčení perihélia planety

1947 – Clemence – 43,03 / 43,11 / 100 let

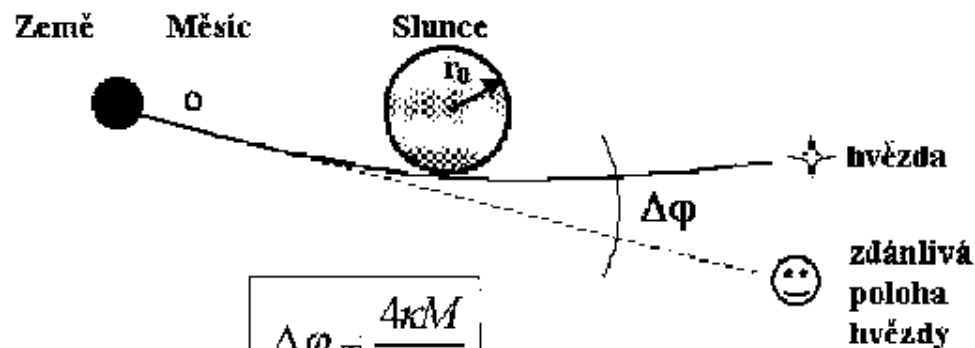
1956 – Duncombe – 43,03 / 42,9



1974 – 1992 – dvojhvězdy:
 PSR 1913 + 16 – binární pulzar
 Posun periastra 4,2° za rok

$$\Delta \alpha = \frac{6\pi k M_S}{c^2 a (1 - e^2)}$$

J.H. Taylor
 R.A. Hulse
 objev PSR
 NC r. 1993



$$\Delta \varphi = \frac{4kM}{r_0 c^2}$$

**Zakřivení světelného
 paprsku v gravitačním
 poli**

Pro Slunce je $\Delta \varphi \approx 1,75''$

29.5.1919 – Eddington – $\Delta \varphi \approx 1,6''$

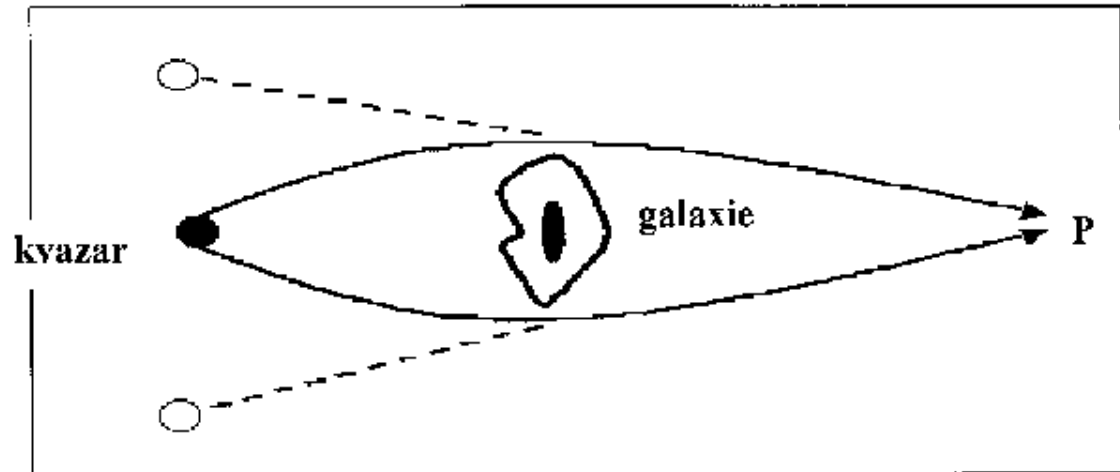
25.2.1952 – $\Delta \varphi \approx 1,7''$

11.8.1999

Gravitační důsledky OTR

Gravitační čočky

1919 – Lodge
1936 – A.E. a Mandl
1979 – D. Walsh –
dva kvazary 0957 + 561
jsou jeden pozorovaný
dvojitě



Černé díry

Schwarzschildův poloměr

Země: $m = 6 \cdot 10^{24}$ kg 6378 km / 8,88 mm

Slunce: $m = 2 \cdot 10^{30}$ kg $7 \cdot 10^8$ m / 2,9 km

Pozorování: v centru Galaxie, v souhvězdí Panny

$$r_g = \frac{2km}{c^2}$$

Schw. sféra –
horizont událostí (nic,
co se stane za tímto
horizontem neovlivní
to co je před ním a
nelze to pozorovat)

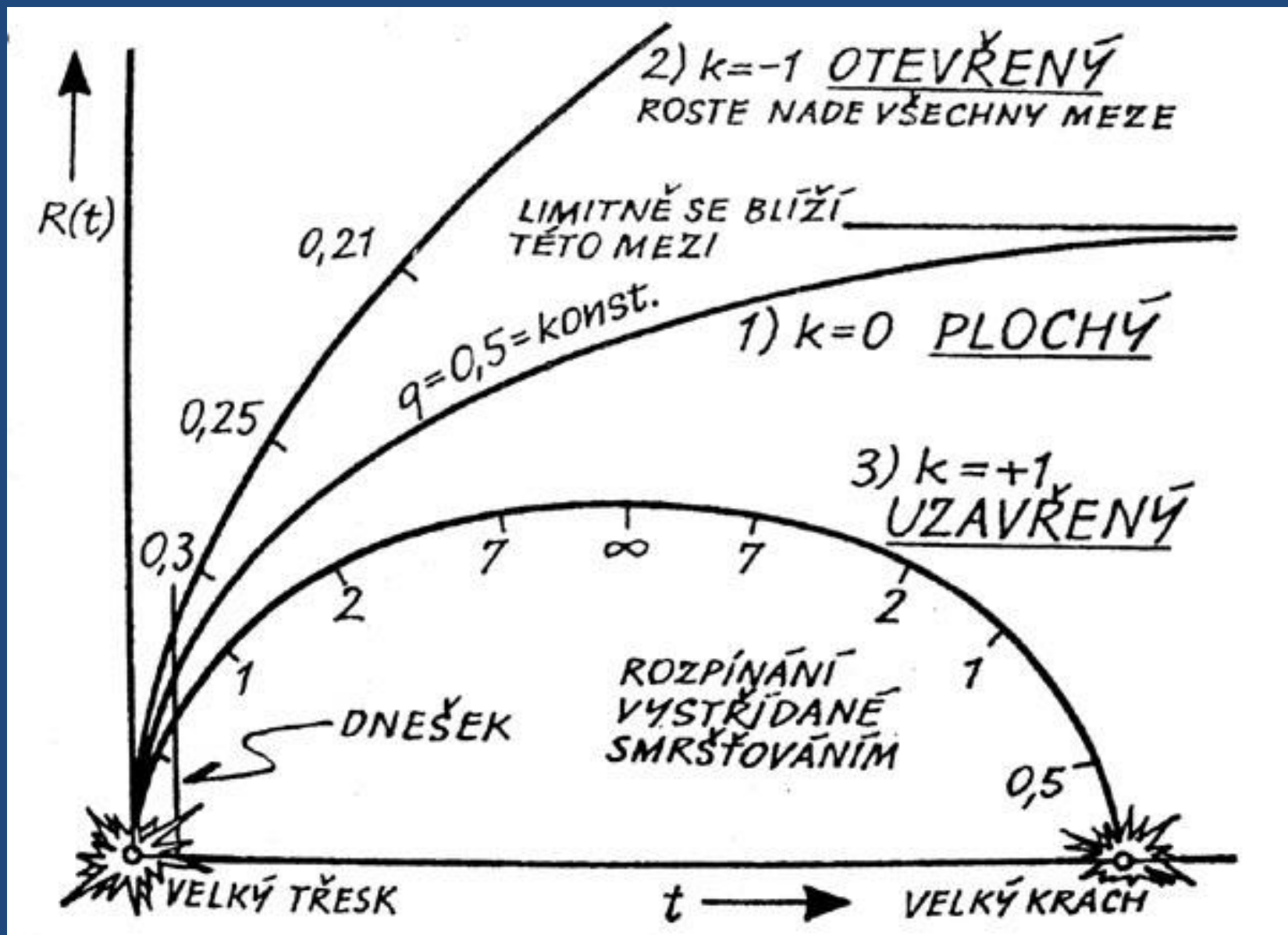
Gravitační vlny

- vznikají při urychlení hmoty; velmi slabé; pohybující se vlnění PČ zakřivení;

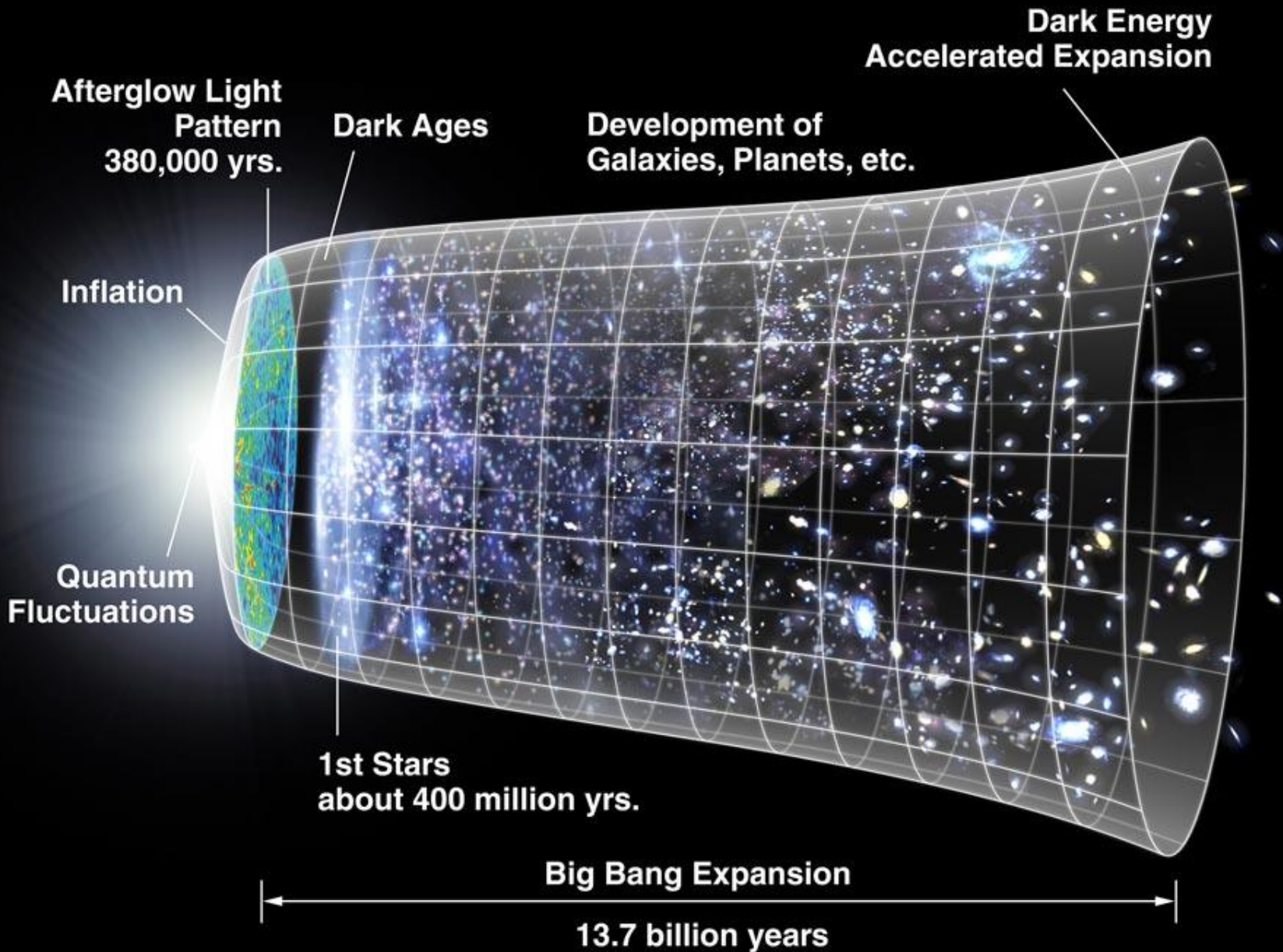
Gravitační zpomalení času

v silných gravitačních polích běží čas pomaleji

Kosmologie

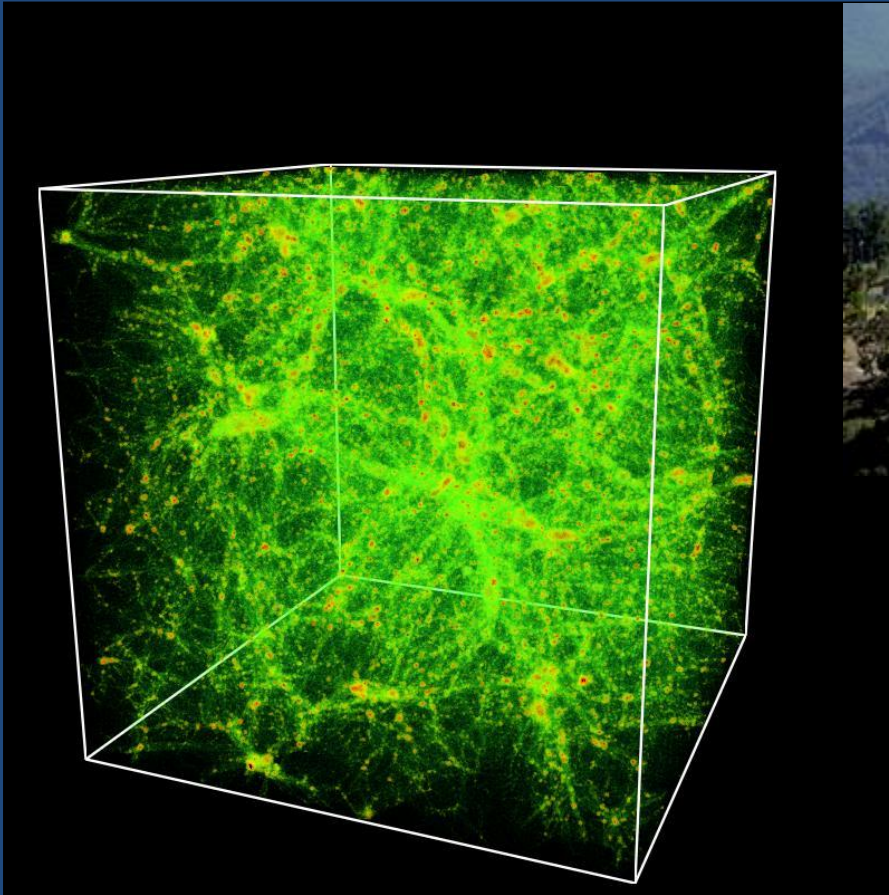


Big-bang



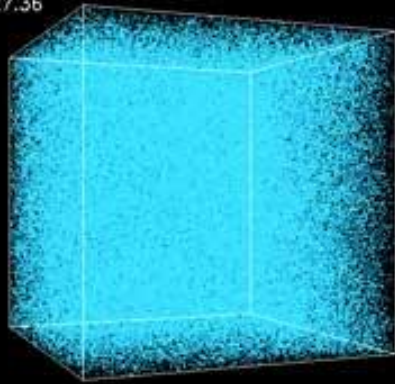
Struktura vesmíru

Velko škálová struktura (large-scale structure) vesmíru zmapovaná anglo-australským dalekohledem KECK I. a II.

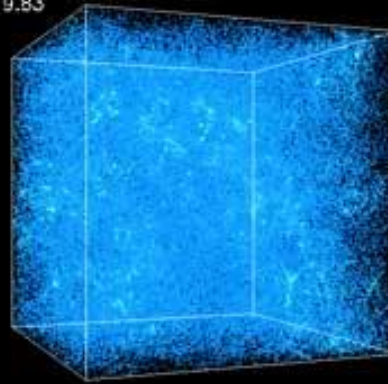


Struktura vesmíru - fáze

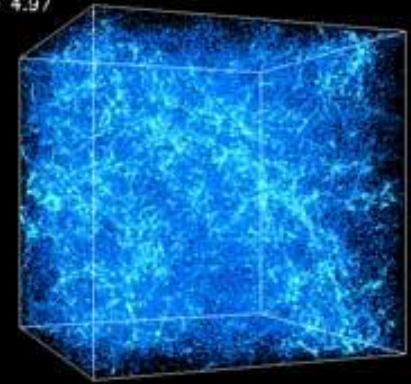
$Z=27.36$



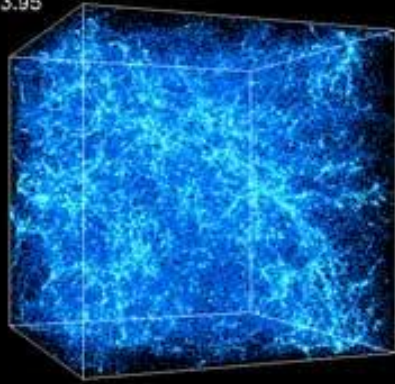
$Z= 9.83$



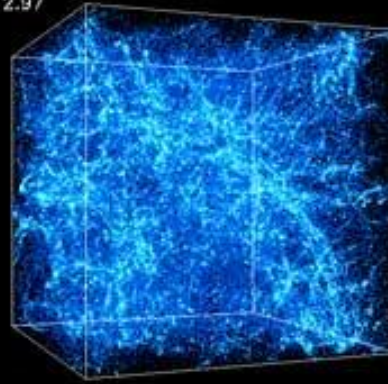
$Z= 4.97$



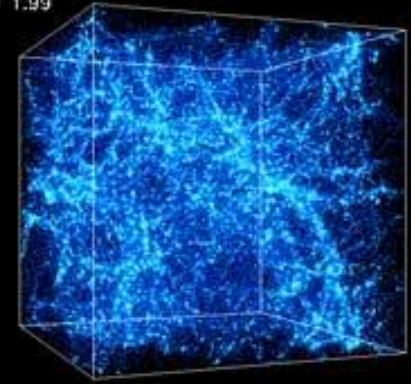
$Z= 3.95$



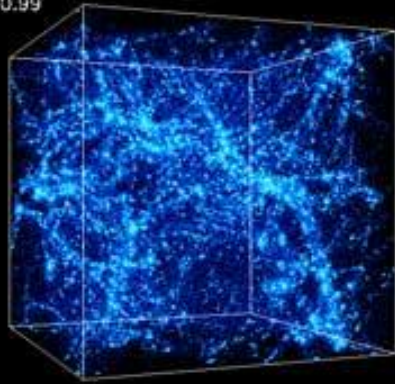
$Z= 2.97$



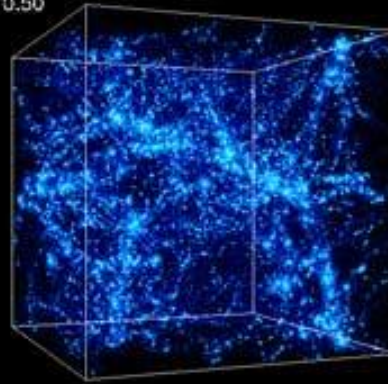
$Z= 1.99$



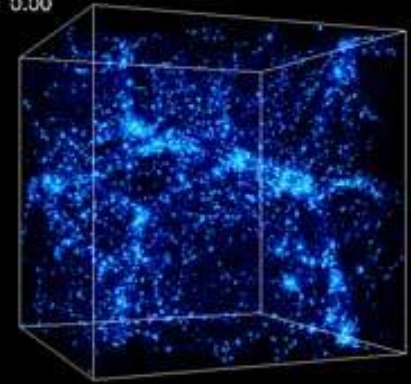
$Z= 0.99$

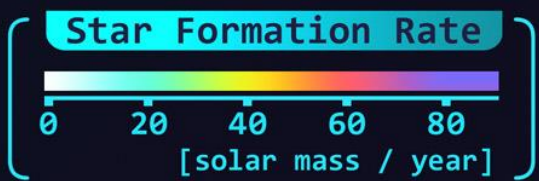
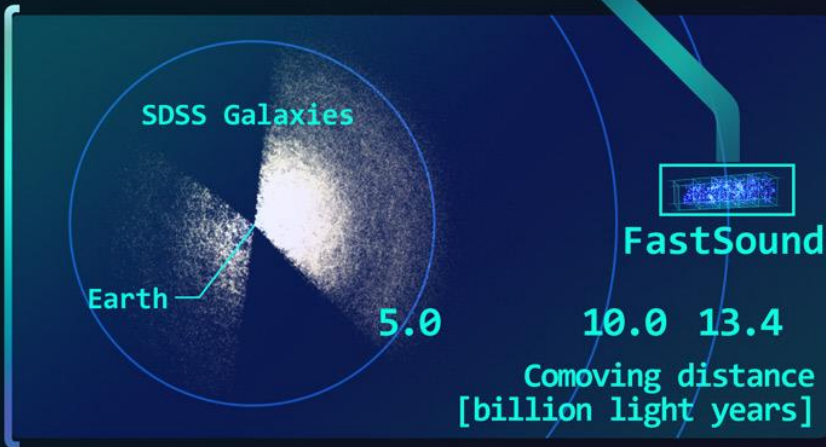
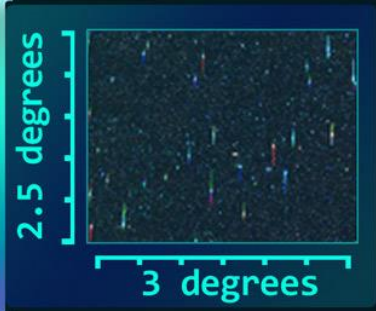
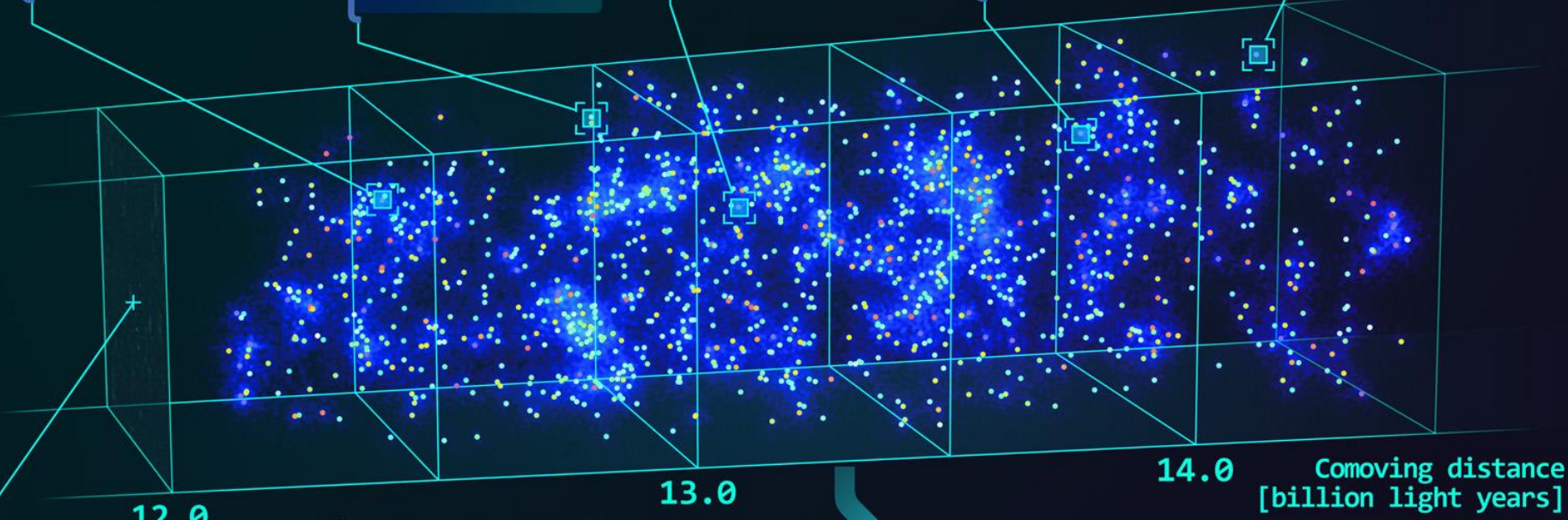


$Z= 0.50$



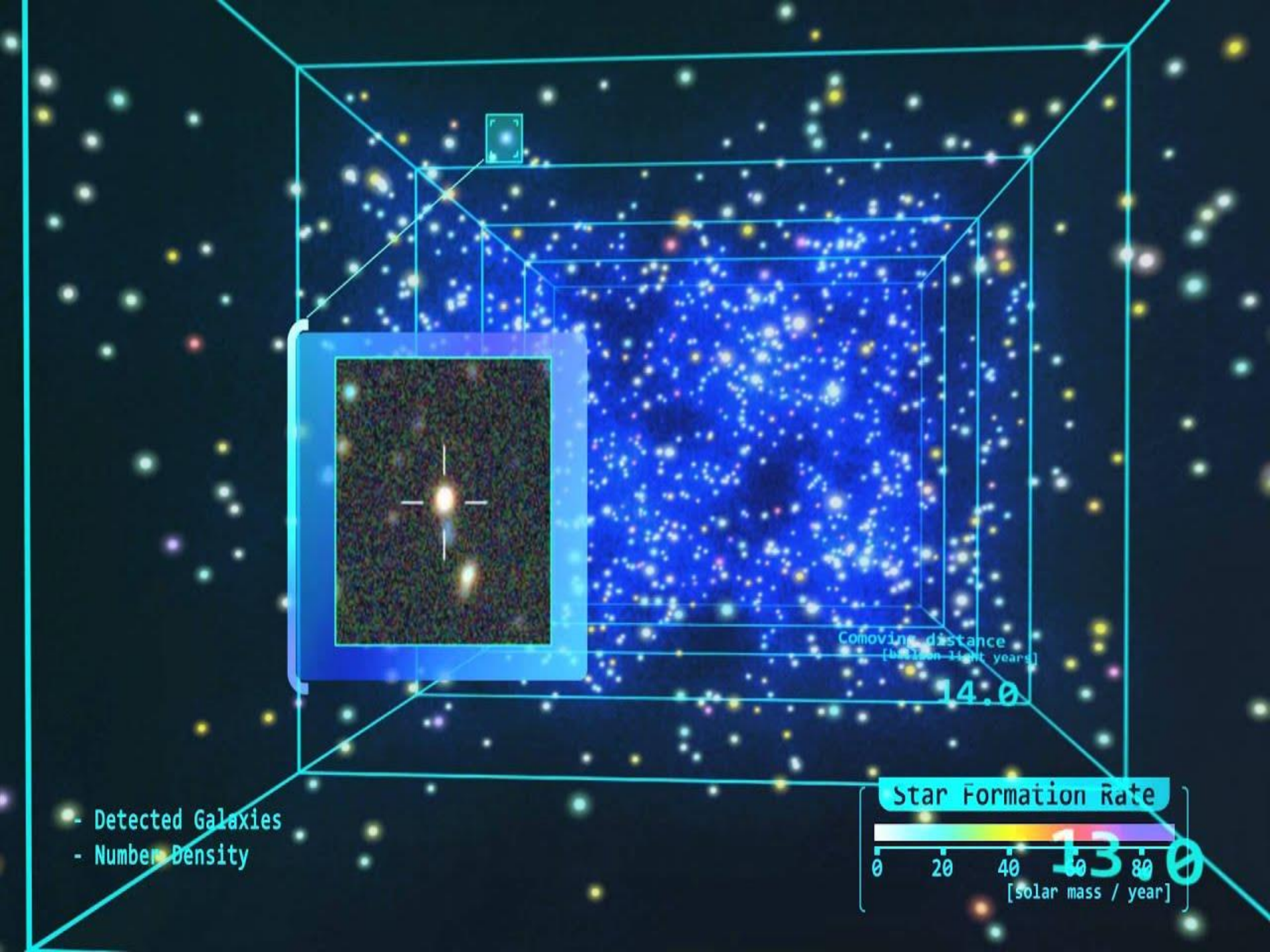
$Z= 0.00$





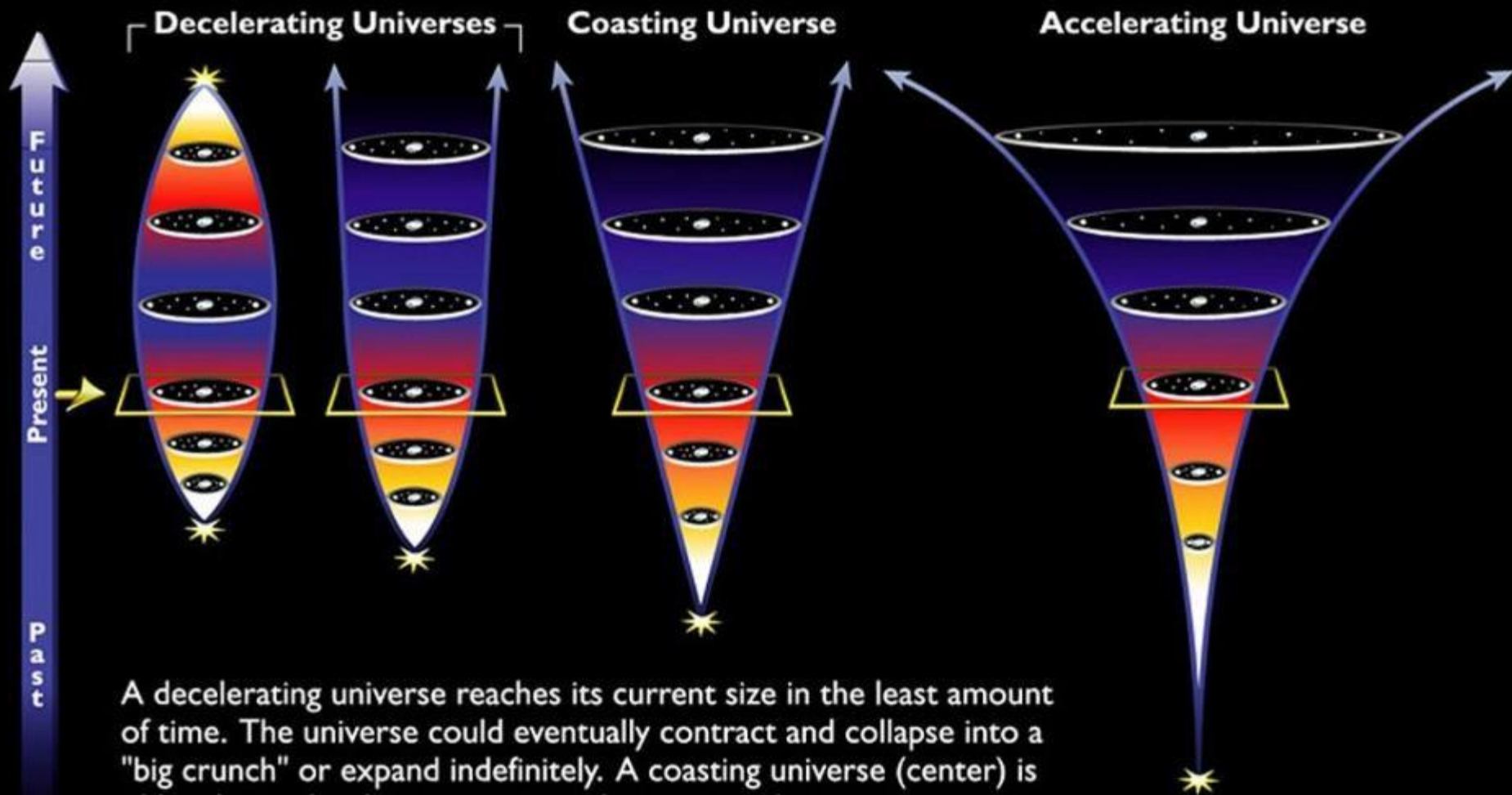
FastSound





Zrychlující vesmír a temná hmota

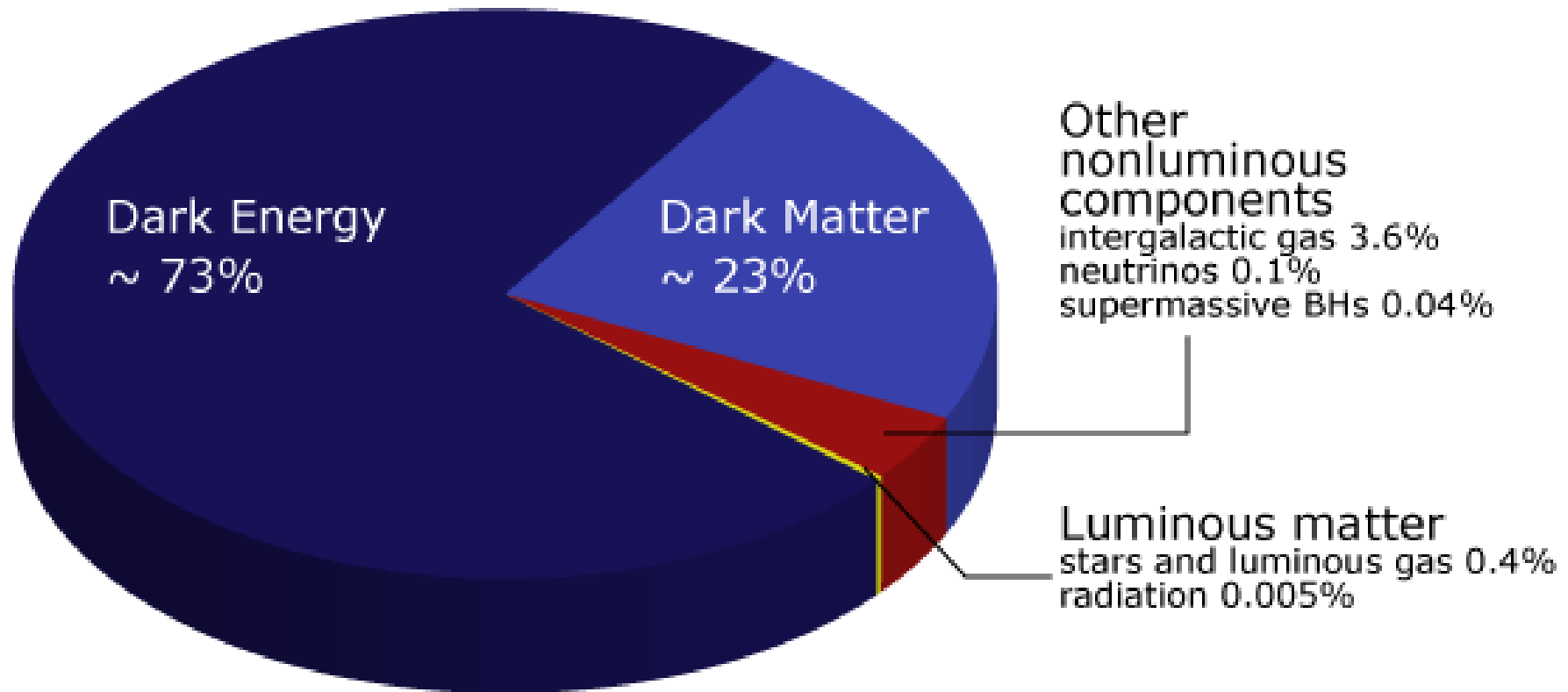
Possible Models of the Expanding Universe



A decelerating universe reaches its current size in the least amount of time. The universe could eventually contract and collapse into a "big crunch" or expand indefinitely. A coasting universe (center) is older than a decelerating universe because it takes more time to reach its present size, and expands forever. An accelerating universe (right) is older still. The rate of expansion actually increases because of a repulsive force that pushes galaxies apart.

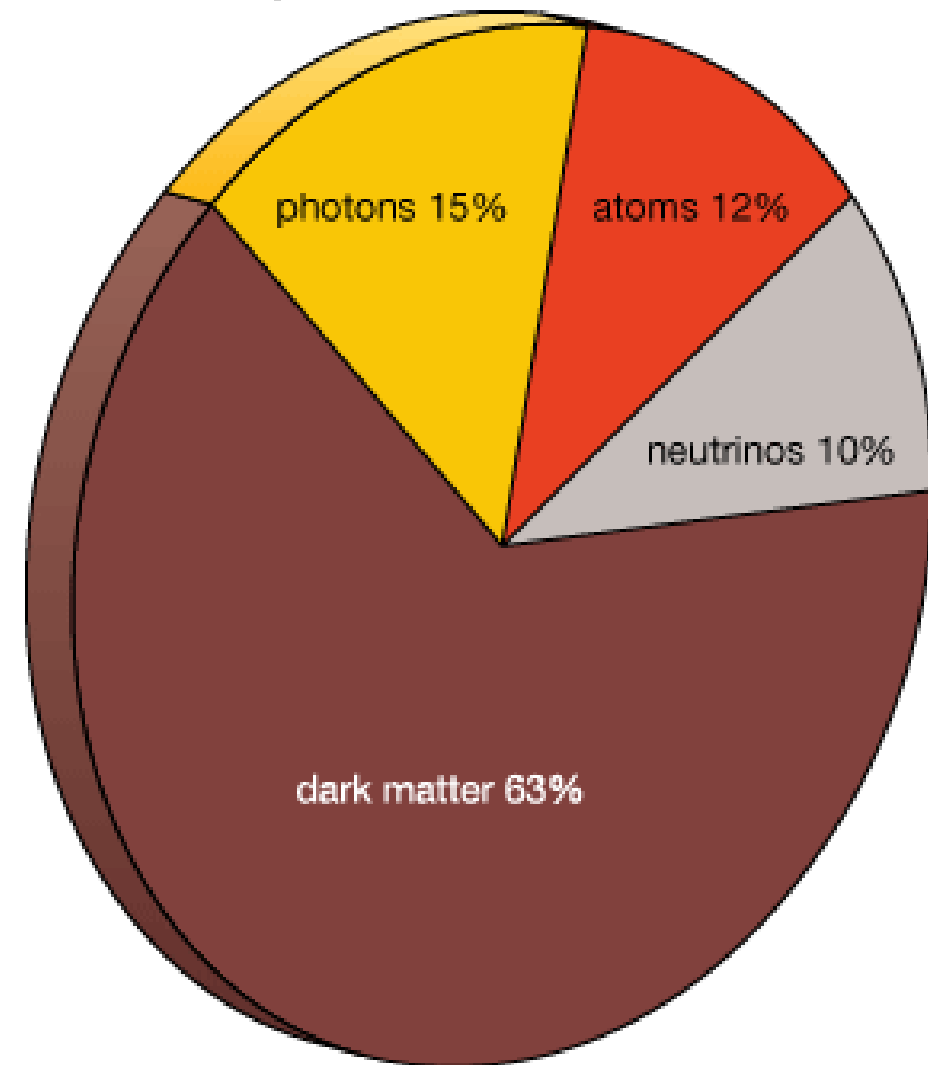
Zrychlující vesmír a temná hmota

- potvrdila se nenulová hodnota kosmologické konstanty
- hustota baryonové hmoty 4 % hustoty vesmíru a 1 % představuje zářící hmotu

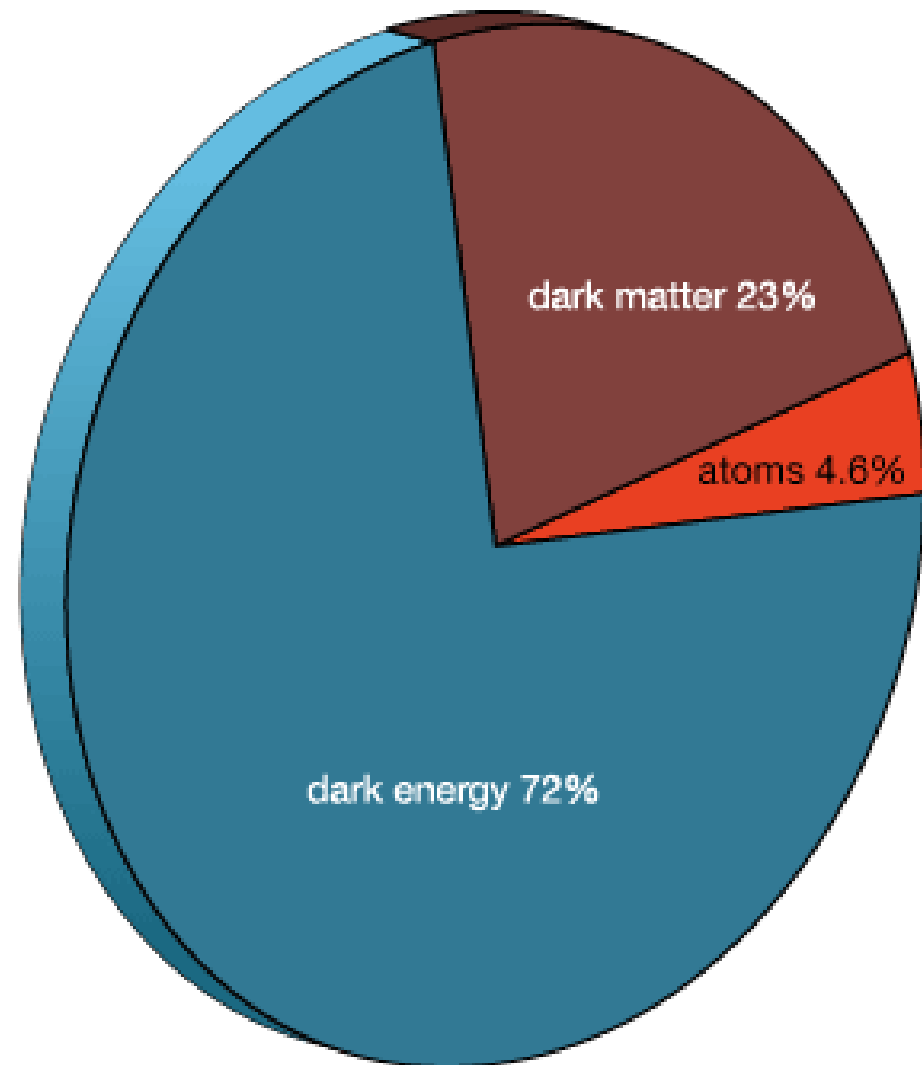


Temná hmota a temná energie

Matter-energy content of the universe

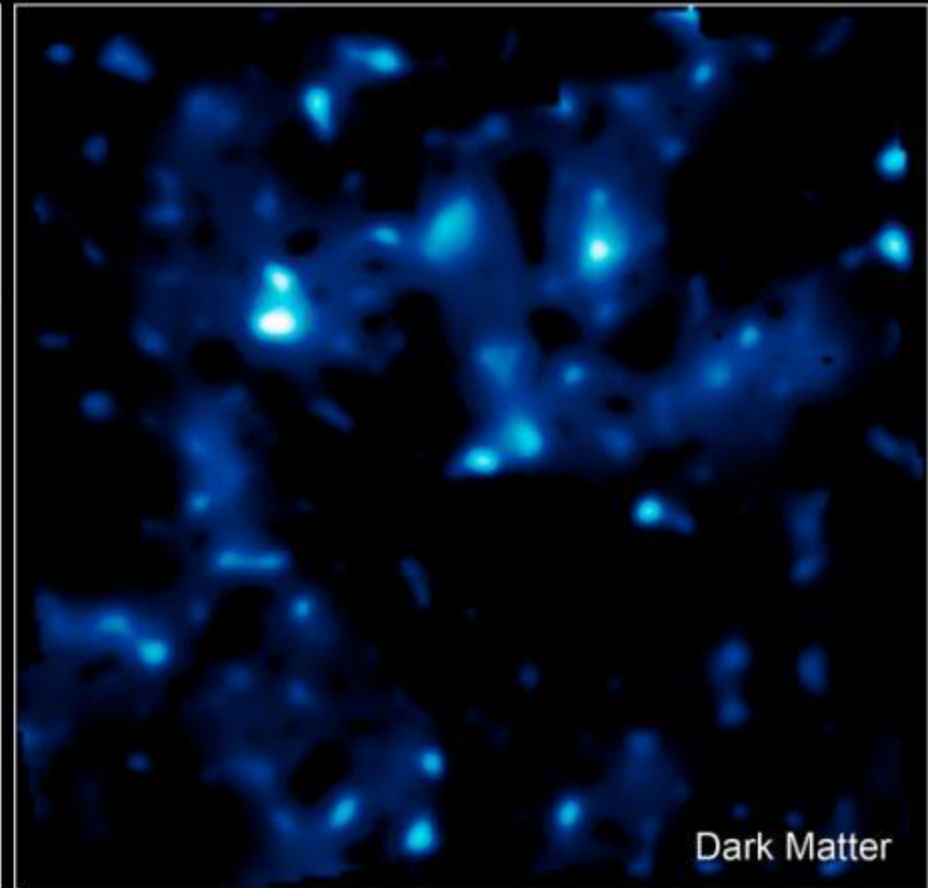
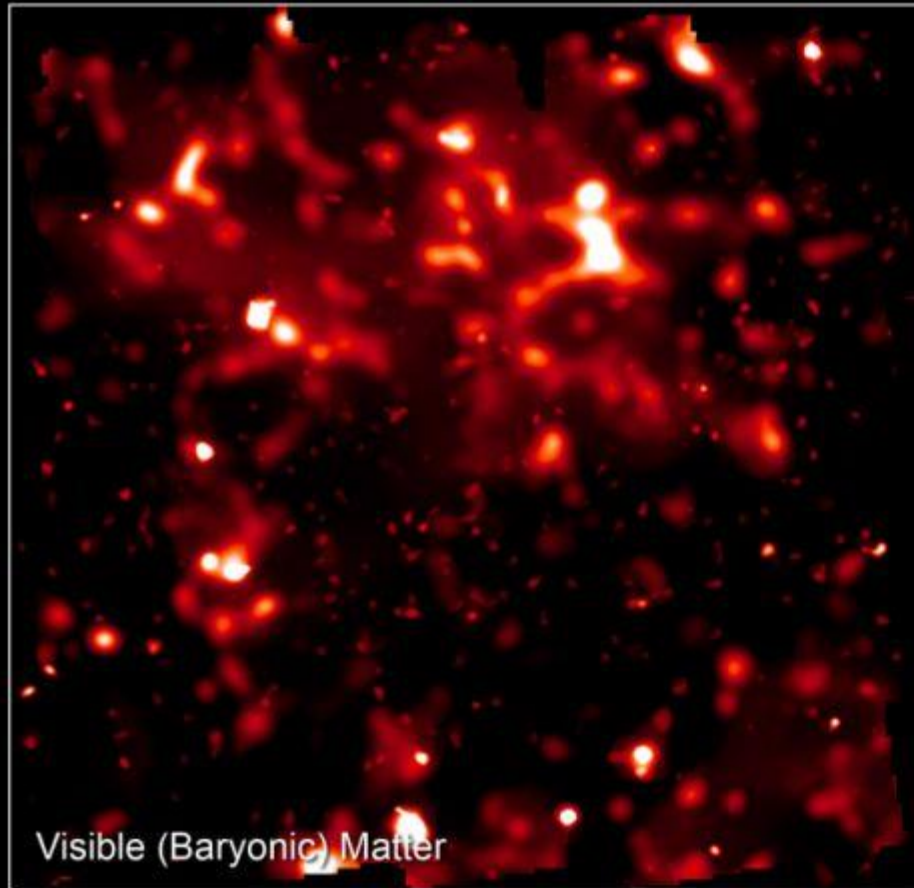


13.7 billion years ago
(universe 380,000 years old)



today

Rozložení viditelné a temné hmoty pomocí HST



Distribution of Visible and Dark Matter • Cosmic Evolution Survey
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

Orlí mlhovina M16 – Pilíře stvoření



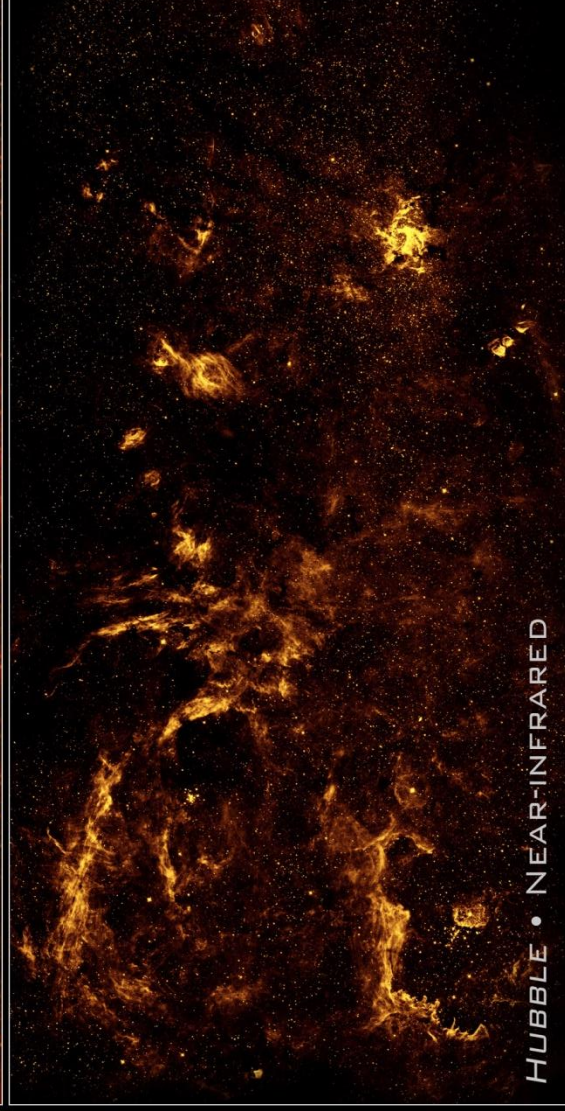
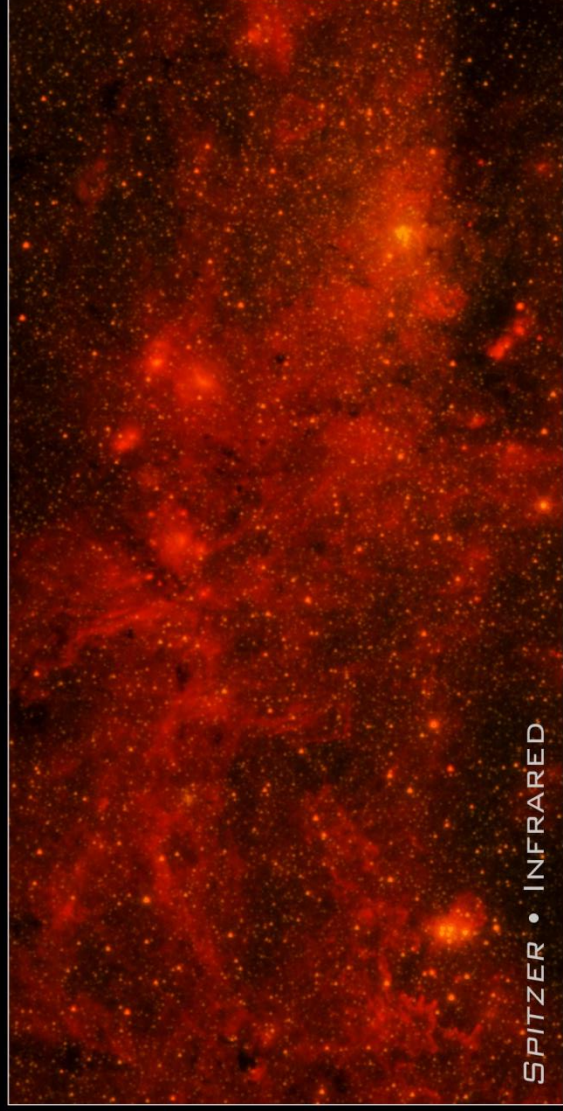
Visible



Infrared

M16 ■ Eagle Nebula
Hubble Space Telescope ■ WFC3/UVIS/IR

CENTER OF THE MILKY WAY GALAXY
NASA'S GREAT OBSERVATORIES



Mlhovina Helix – Boží oko



První fotografie černé díry – 10.4.2019 by Event Horizon Telescope

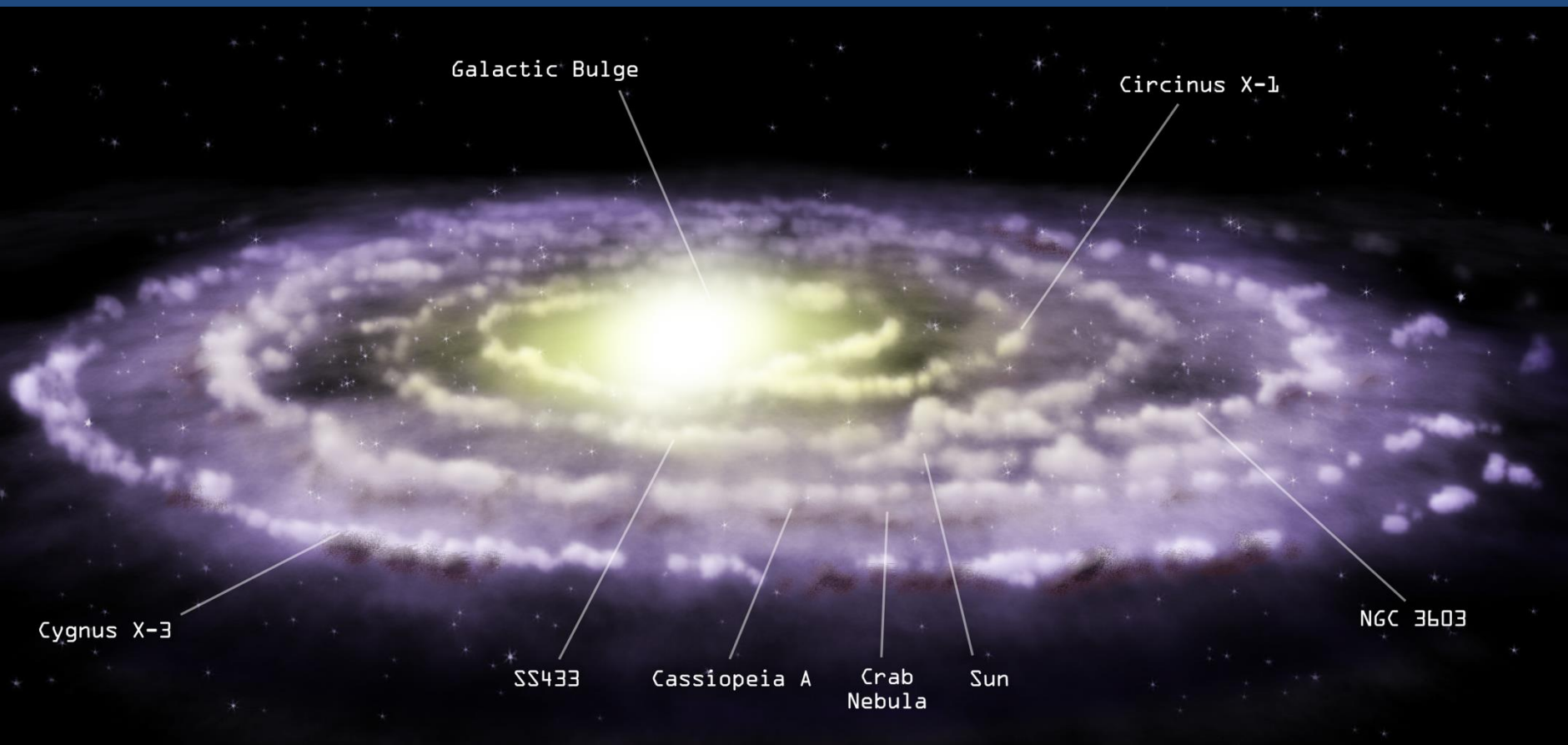


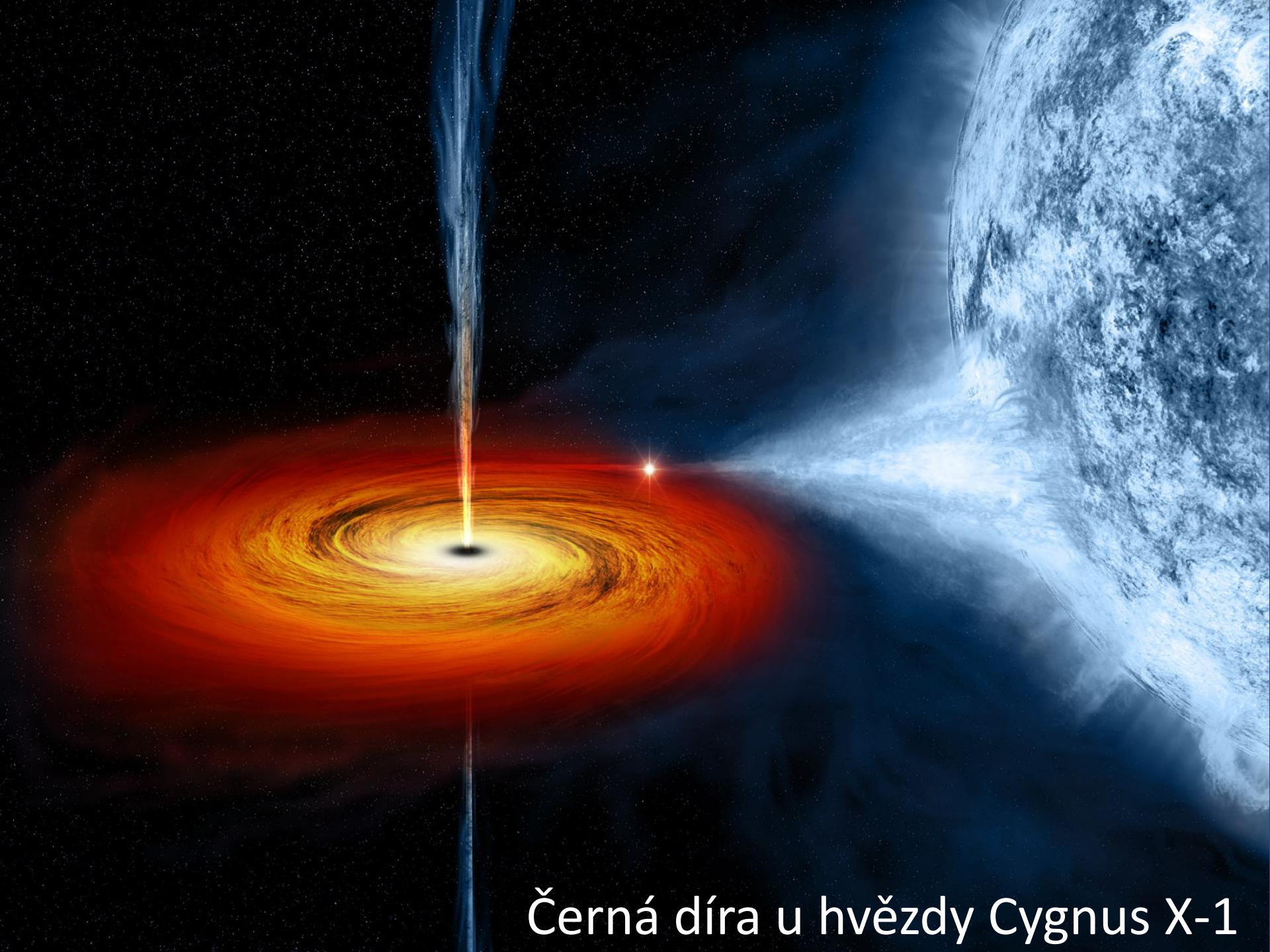
Střed galaxie M87 (Messier 87)

Hmotnost BH: 6,7 miliardkrát větší než naše Slunce

Vzdálenost: 55 ly od Země

Naše Galaxie – Mléčná dráha – Milky Way





Černá díra u hvězdy Cygnus X-1

Teorie superstun a M-teorie

Rozmiary strun

