

# Jaký je náš vesmír?

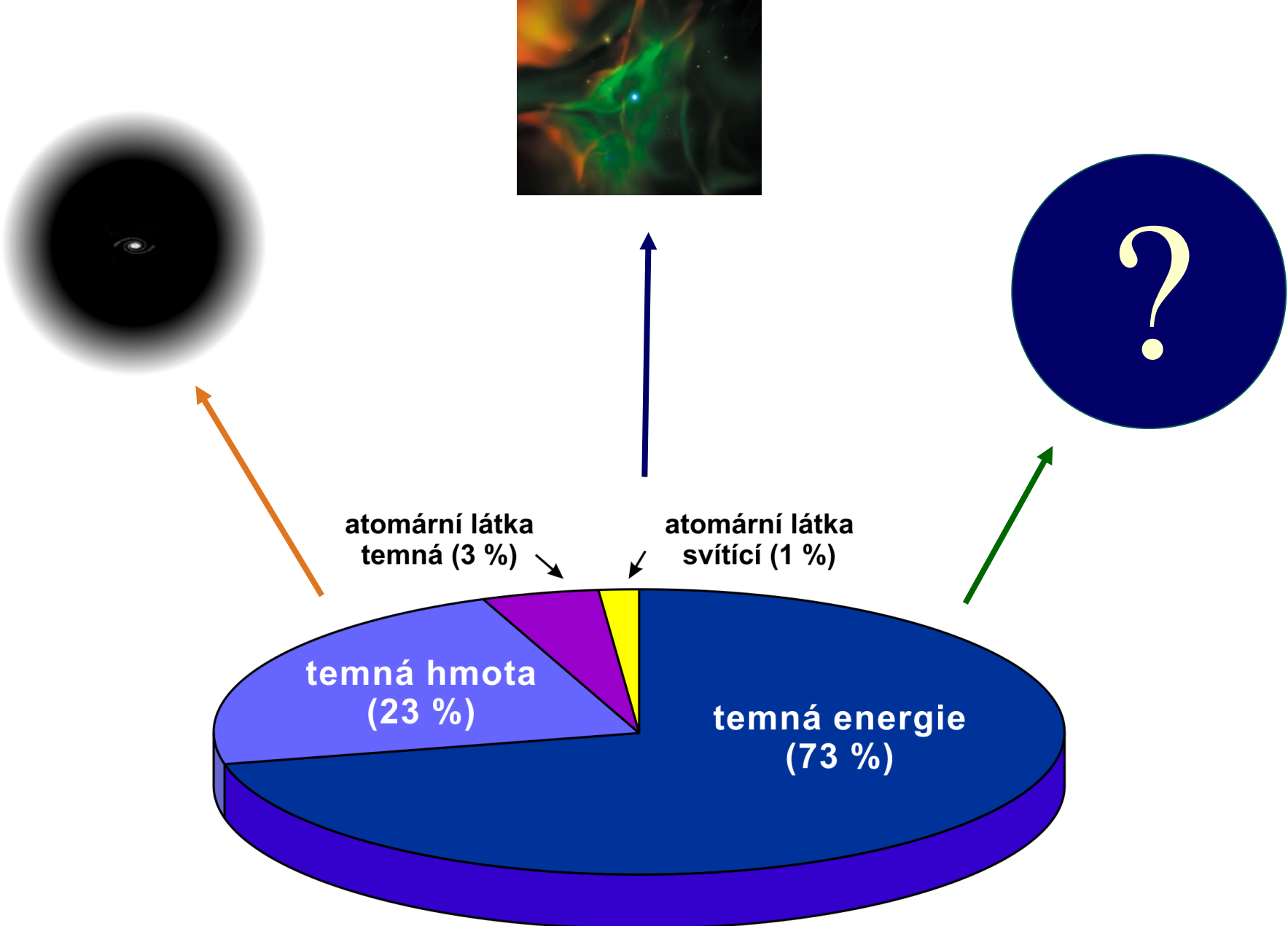
---

Petr Kulhánek  
Univerzita Palackého  
Přírodovědecká fakulta  
21. 1. 2010

[kulhanek@aldebaran.cz](mailto:kulhanek@aldebaran.cz)  
<http://www.aldebaran.cz>



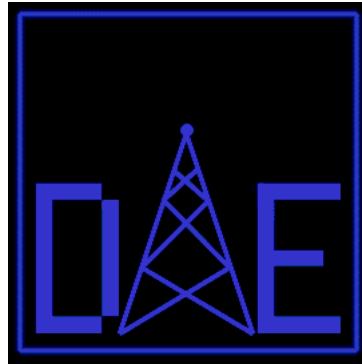
# Složení vesmíru



# Temná energie

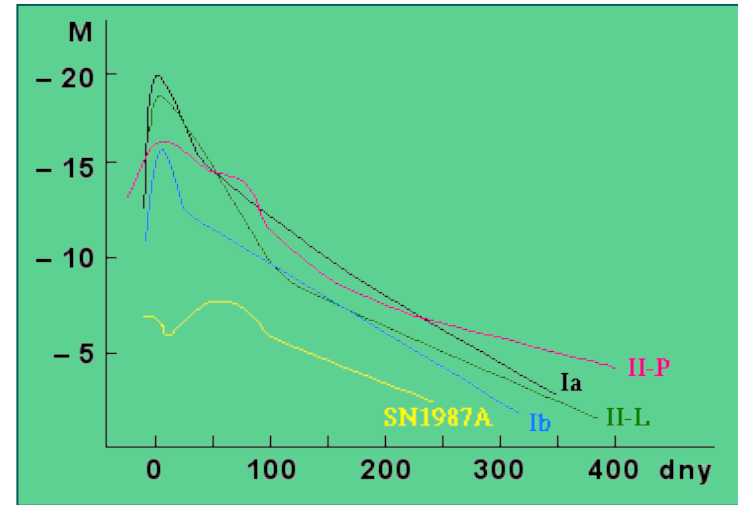
SN Ia

velkorozměrová  
struktura



reliktní  
záření

# Experimenty – supernovy typu Ia



**Supernova typu Ia** - přenos látky z hvězdy na bílého trpaslíka, který zvětšuje hmotnost. Po překročení Chandrasekharovy meze ( $1,4 M_{\odot}$ ) se bílý trpaslík zhroutí do neutronové hvězdy. Explozivnímu termonukleární hoření C, O na Ni 56 v celém objemu trpaslíka. Množství uvolněné energie je vždy zhruba stejné, takže z relativní pozorované jasnosti lze vypočítat vzdálenost příslušné supernovy. Přesnější hodnoty se pak určí z tvaru světelné křivky.

**Adam Riess (Space Telescope Science Institute, Baltimore, 1998) + Saul Perlmutter (Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999):** Měření vzdálenosti a červeného posuvu supernov Ia. Zjištěna urychlovaná expanze. To znamená ve svém důsledku přítomnost temné energie ve vesmíru, která se projevuje záporným tlakem. Nejvzdálenější použitá supernova byl objekt 1997ff.

**Další projekty:** Obě zmíněné skupiny spolu s Alexejem Filipenkem pořídily do roku 2003 soubor 230 supernov. Tyto objekty byly vyhledávány také v *klíčovém projektu HST* pro určení Hubbleovy konstanty i v současných přehlídkových projektech, například projektu GOODS.

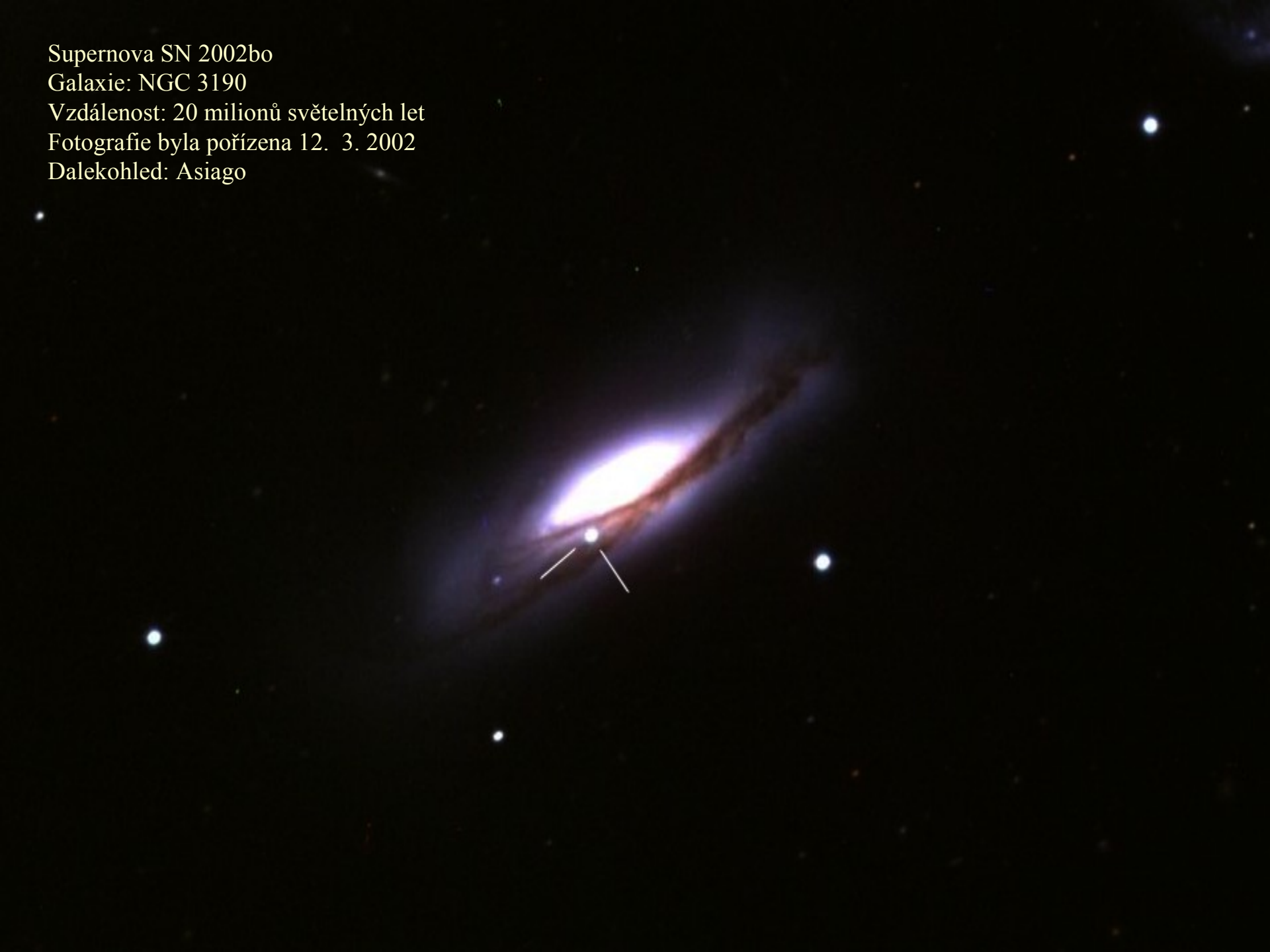
Supernova SN 2002bo

Galaxie: NGC 3190

Vzdálenost: 20 milionů světelných let

Fotografie byla pořízena 12. 3. 2002

Dalekohled: Asiago



ROZMĚR VESMÍRU

Velký třesk

zpomalená expanze

zrychlená expanze

velké rozervání

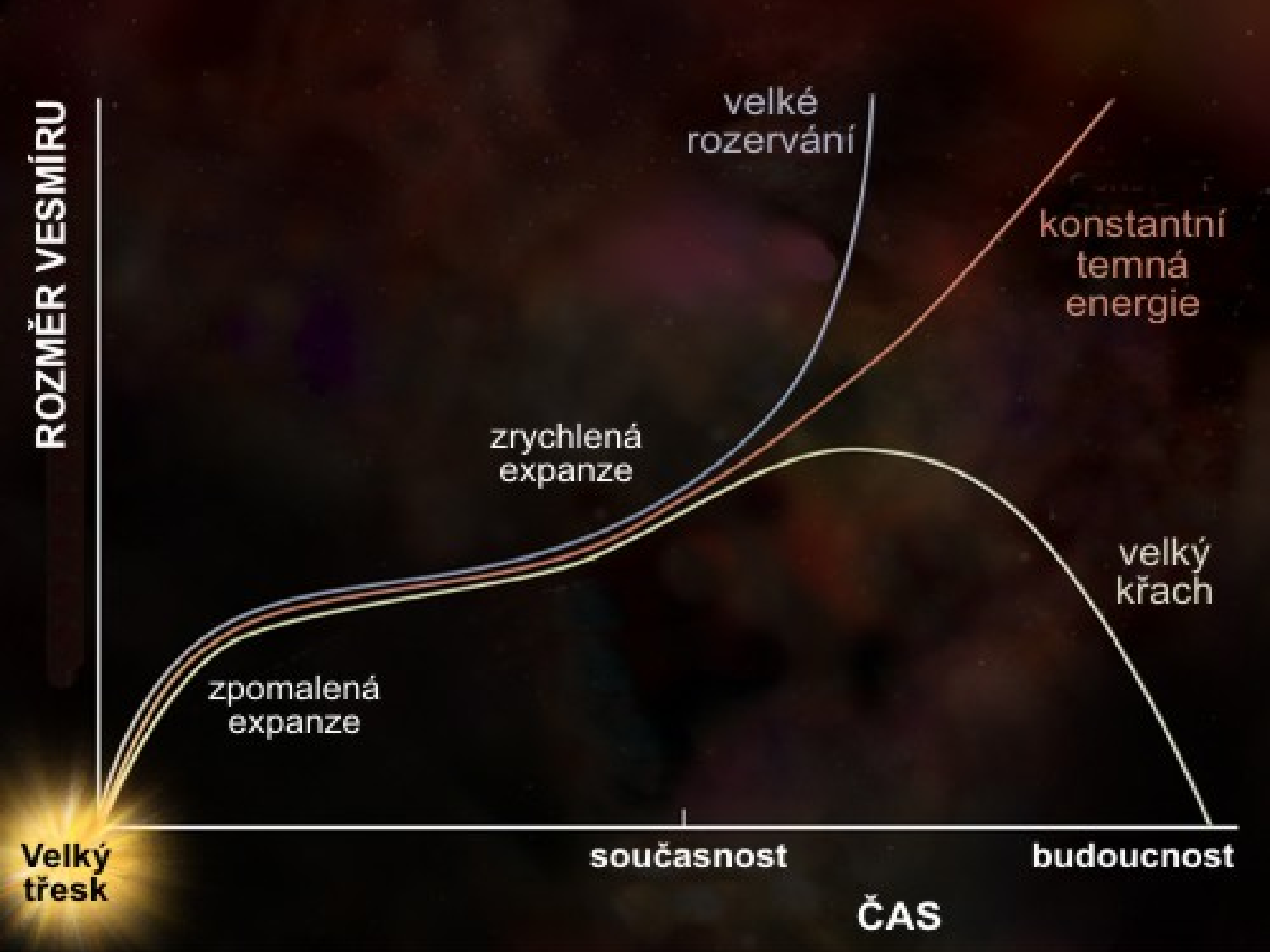
konstantní temná energie

velký křach

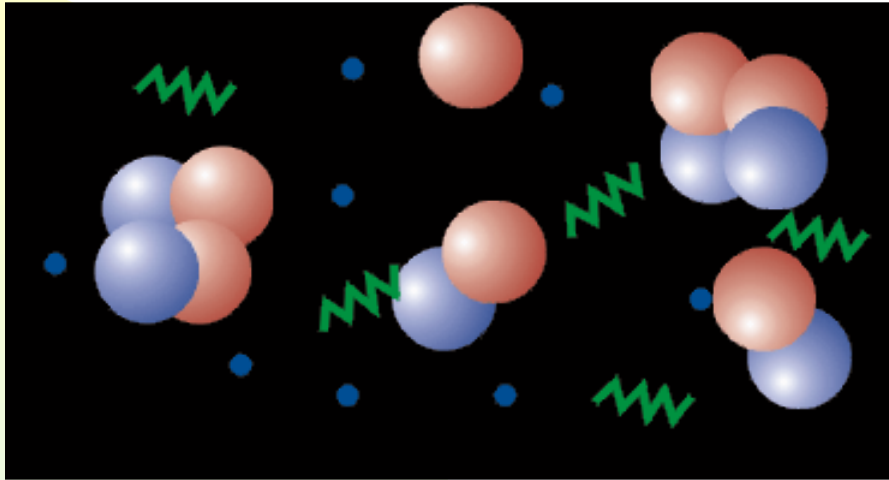
současnost

budoucnost

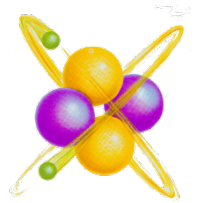
ČAS



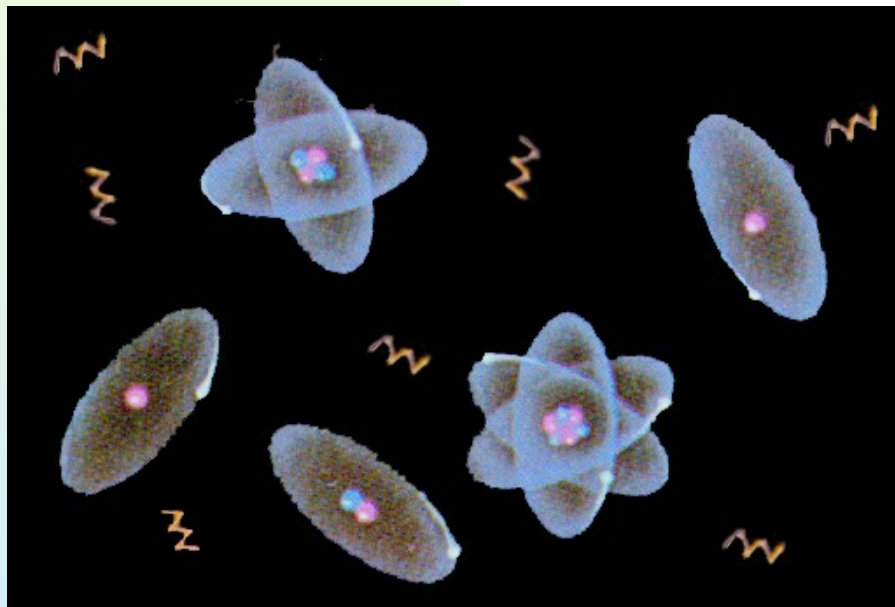
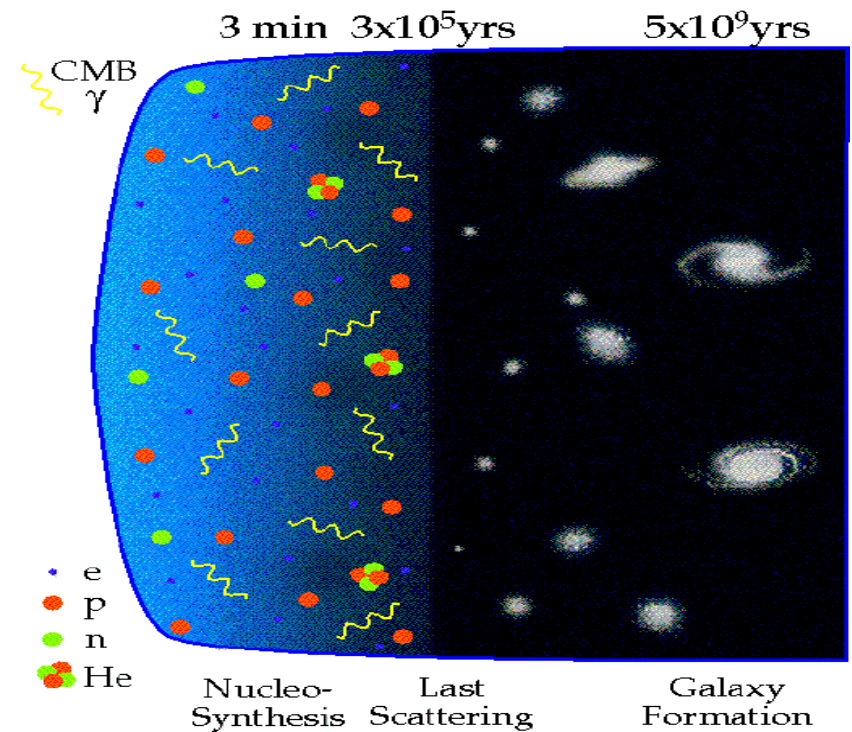
# Experimenty – reliktní záření



Čas: 384 000 let  
Teplota: 4000 K  
Energie: 0.4 eV



## (Very) Brief History

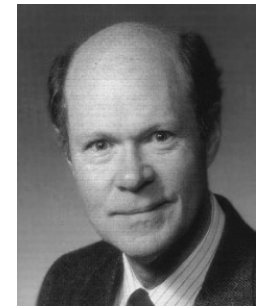
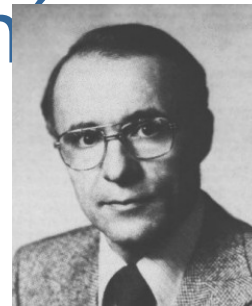


Ralph Alpher, Hans Bethe, George Gamow, 1948

# Experimenty – reliktní záření

Arno Penzias, Robert Wilson, 1965

Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey



1960: A.B. Crawford navrhl anténu pro sledování Echa

1963: ukončení sledování Echa

1965: radiové mapování mléčné dráhy

1965: Astrophysical Journal - dvojčlánek

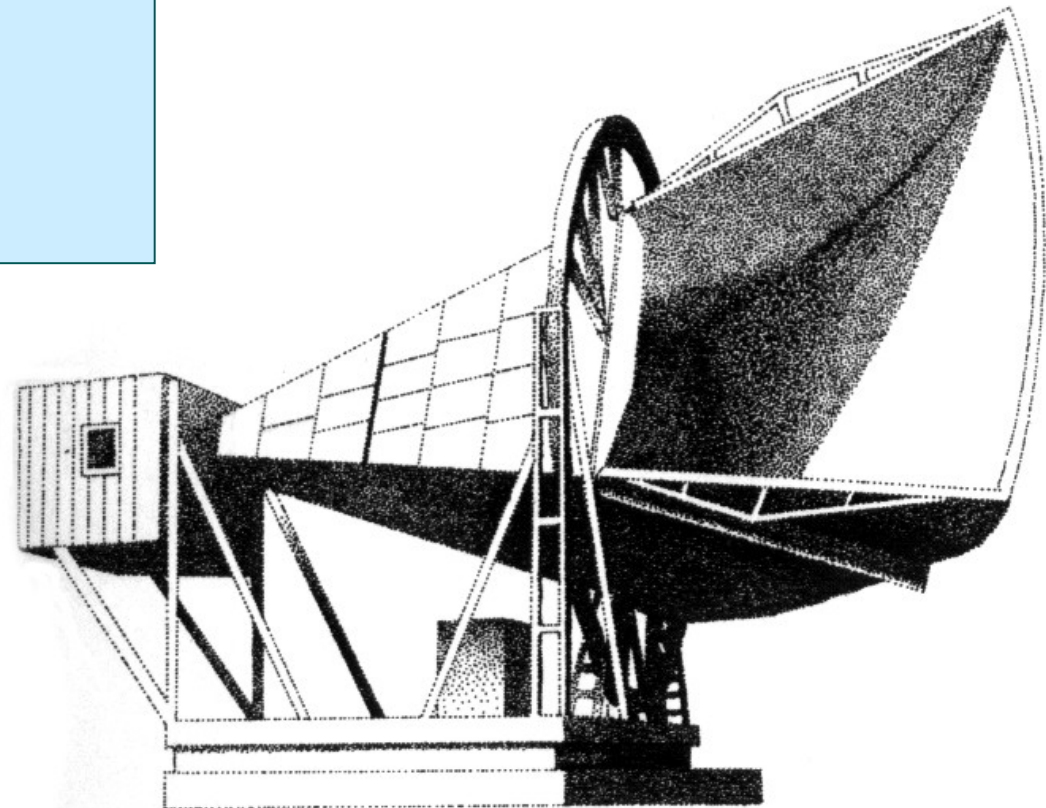
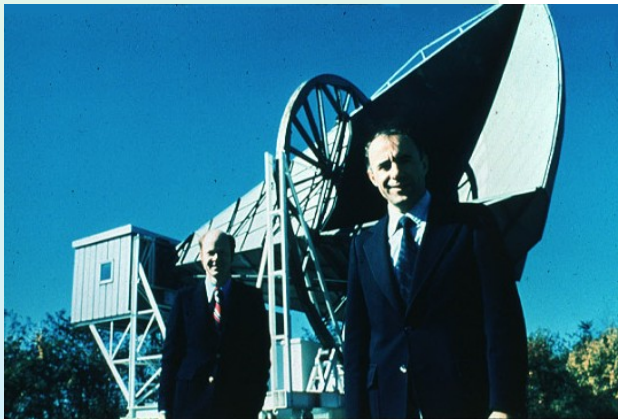
umístění: Murray Hill, New Jersey

vlastník: Bell Telephone Laboratories

sběrná plocha: 25 m<sup>2</sup>

citlivost dopředu/zpět: 3000:1

vlnová délka: 7,3 cm





# Experimenty – reliktní záření

COBE

1989 vypuštění družice

1992 objev fluktuací reliktního záření

$$T = 2.73 \text{ K}$$

$$\delta T/T = 1/100\,000$$

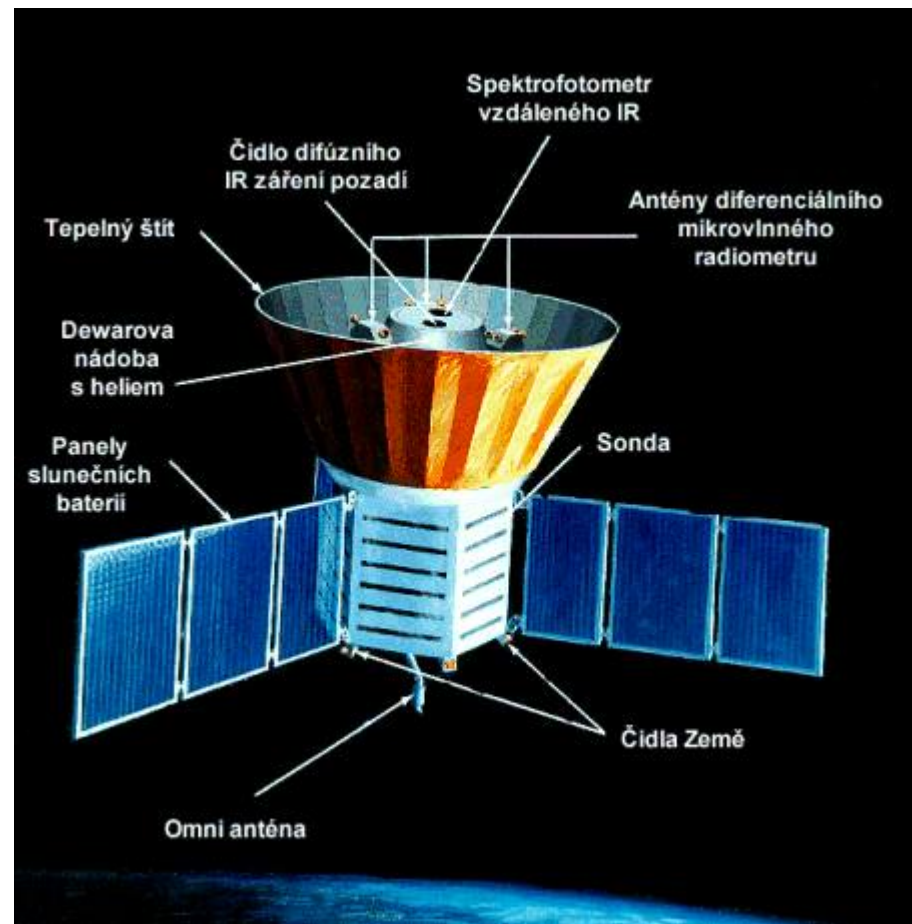
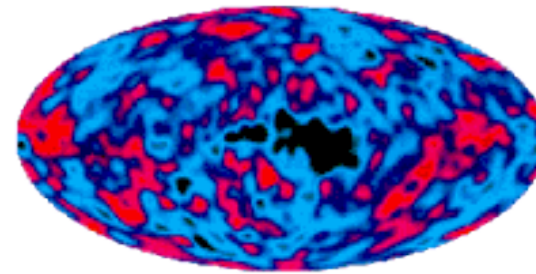
úhlové rozlišení  $7^\circ$

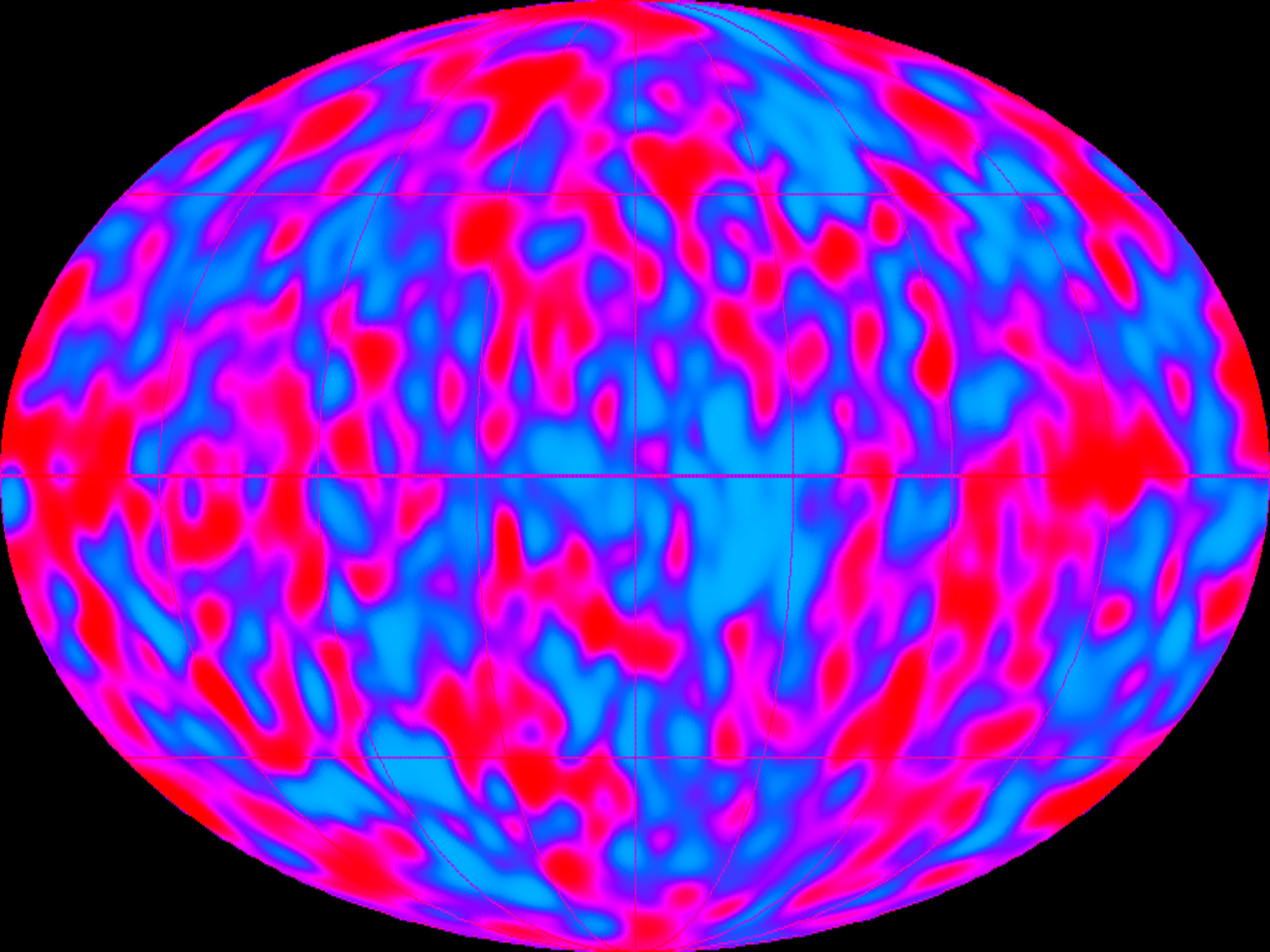
COBE 1992 (rozlišení  $7^\circ$ )

BOOMERanG 1998 (rozlišení  $1/6^\circ$ )

Microwave Anisotropy Probe 2001 ( $0,3^\circ$ )

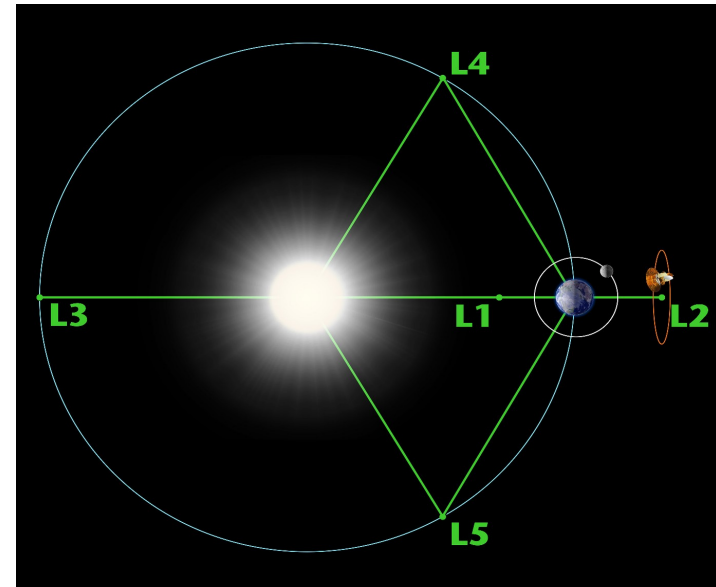
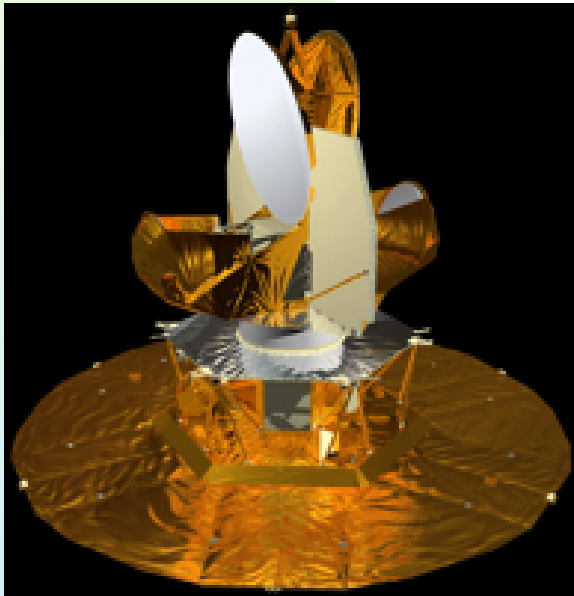
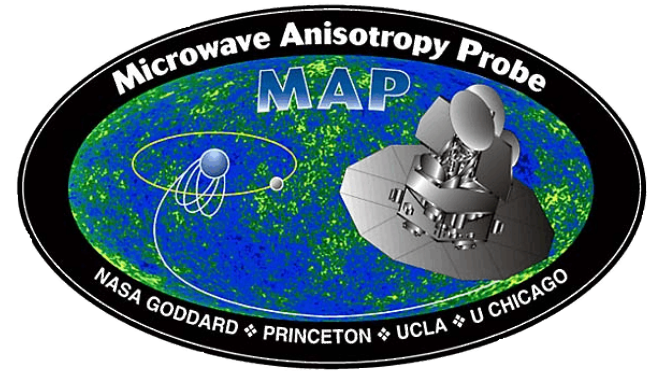
Planck 2008 ( $0,17^\circ$ )

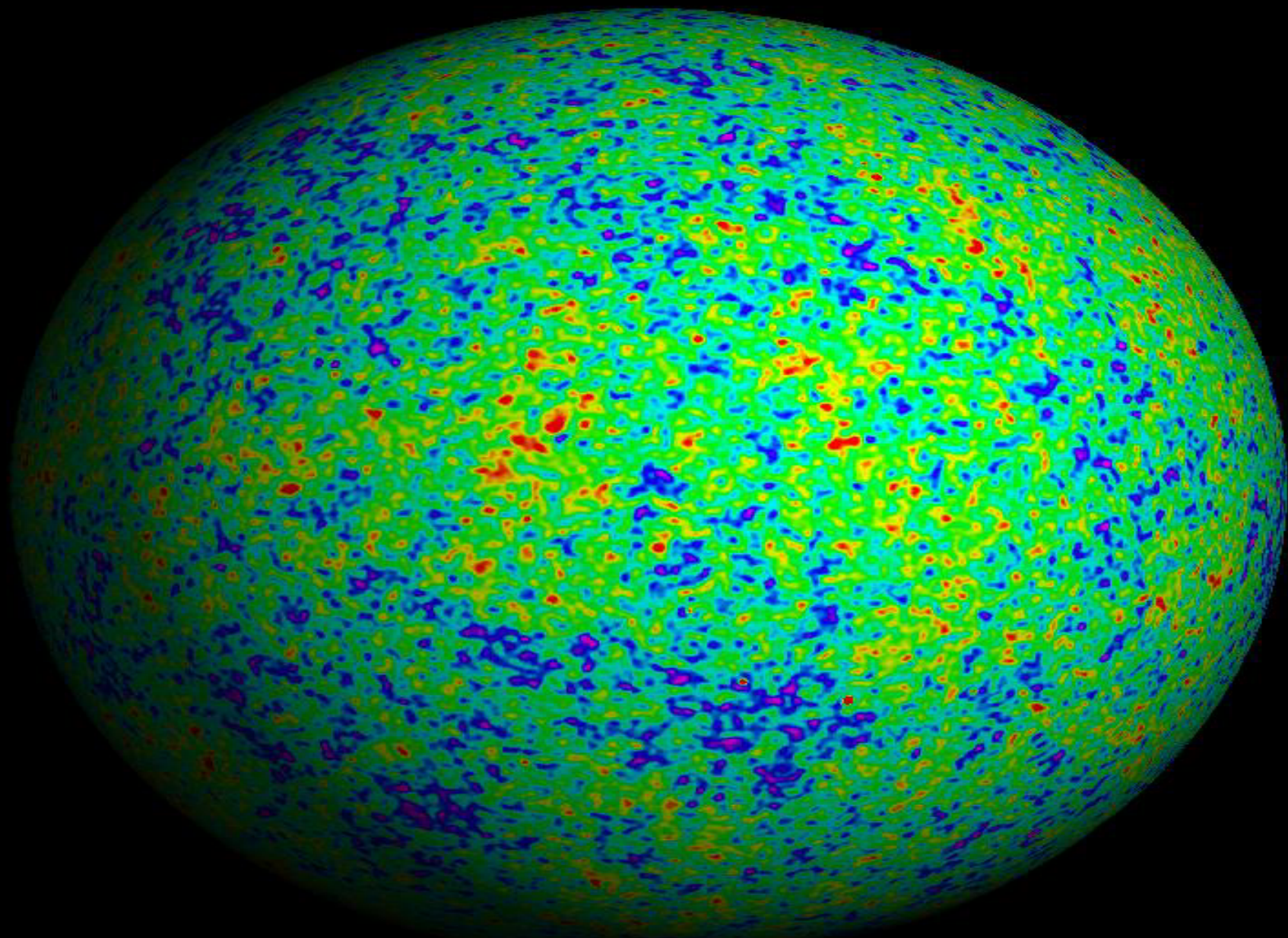




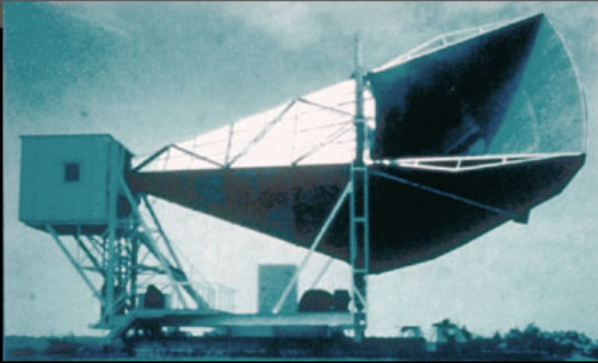
# MAP – Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

start: 30.6.2001  
umístění: L2 Země-Slunce (1 500 000 km od Země)  
na stanovišti: září 2001  
pozorování: 24 měsíců  
úhlové rozlišení:  $0,3^\circ$   
citlivost: 20 K  
frekvenční pásmo: 22 GHz - 90 GHz (3 mm - 14 mm)  
zrcadlo:  $1,4 \times 1,6$  m  
konečná hmotnost sondy: 830 kg

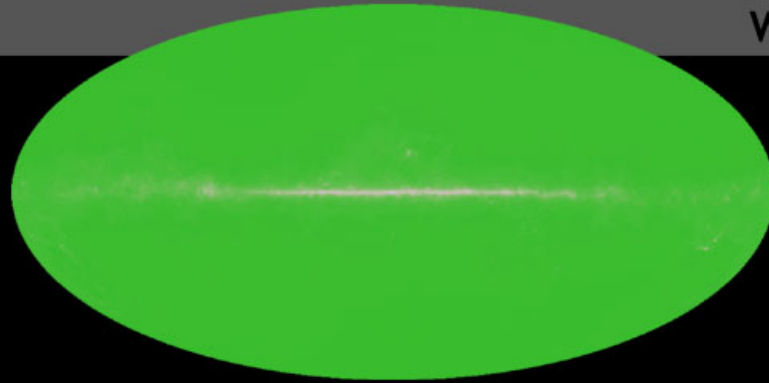




1965

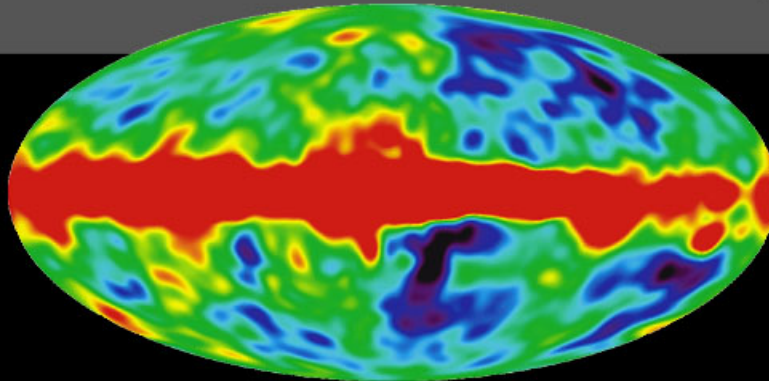


Penzias and  
Wilson



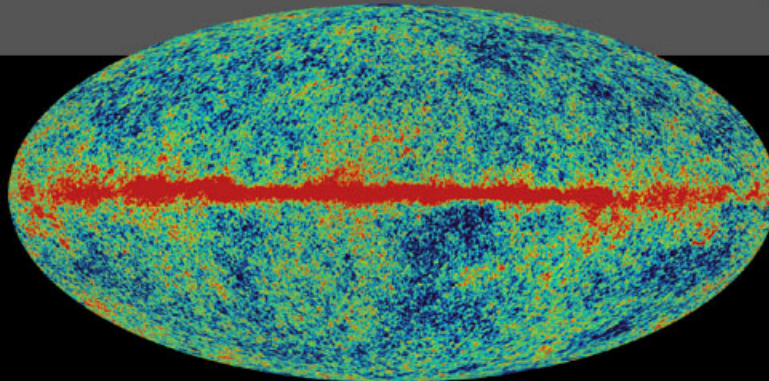
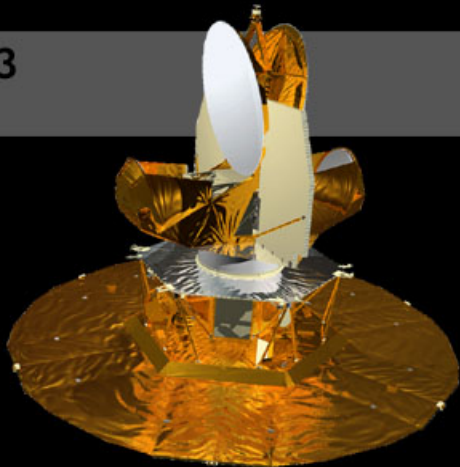
1992

COBE



2003

WMAP



# Experimenty – velkorozměrová struktura vesmíru

SDSS: Sloan Digital Sky Survey

Nadace Alfreda Pritcharda Sloana, založena 1934

Galaxie do 23. magnitudy na čtvrtině severní oblohy

500 miliónů galaxií: pozice, jasnost a barva

1 milión galaxií: spektra

Stanice SDSS: Nové Mexiko, Sacramento Mountains

Dalekohled: průměru primárního zrcadla 2,5 m.

2dF GRS (2 degree Field Galaxy Redshift Survey)

AAT: zrcadlo o průměru 3,9 metru

Spektrograf: 2dF

Místo: Austrálie, 1 150 m n. m.

spektra více jak 260 000 galaxií

pořídí naráz spektra 400 objektů

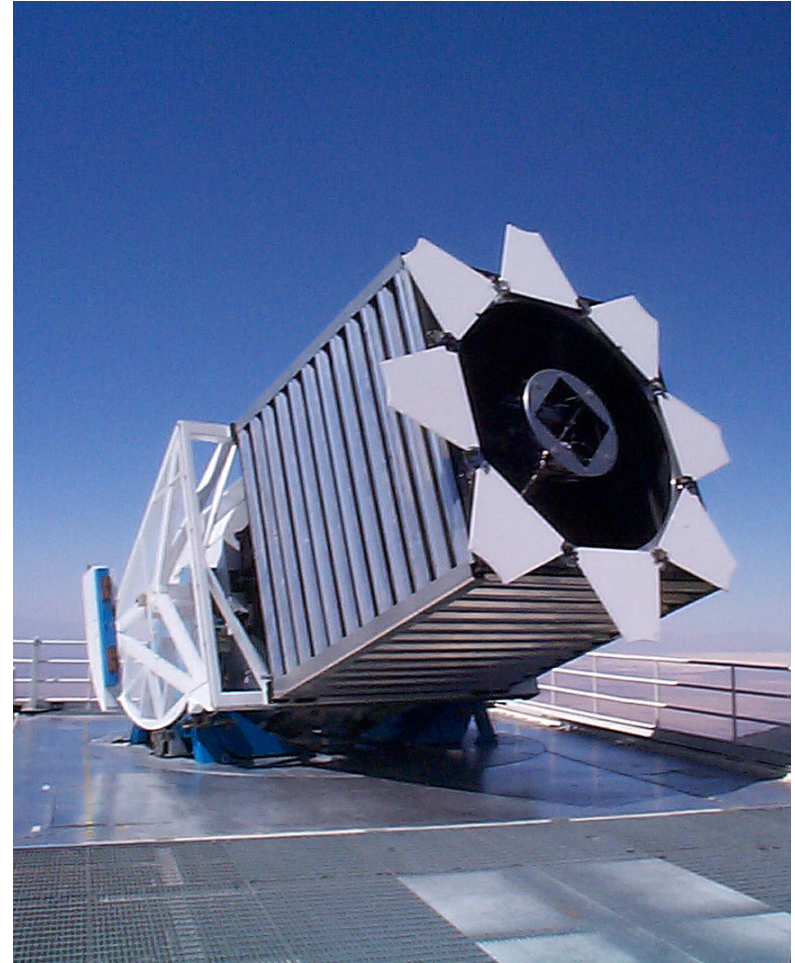
Velká stěna (1991)

Rozměry: 200×600 milionů l. y.

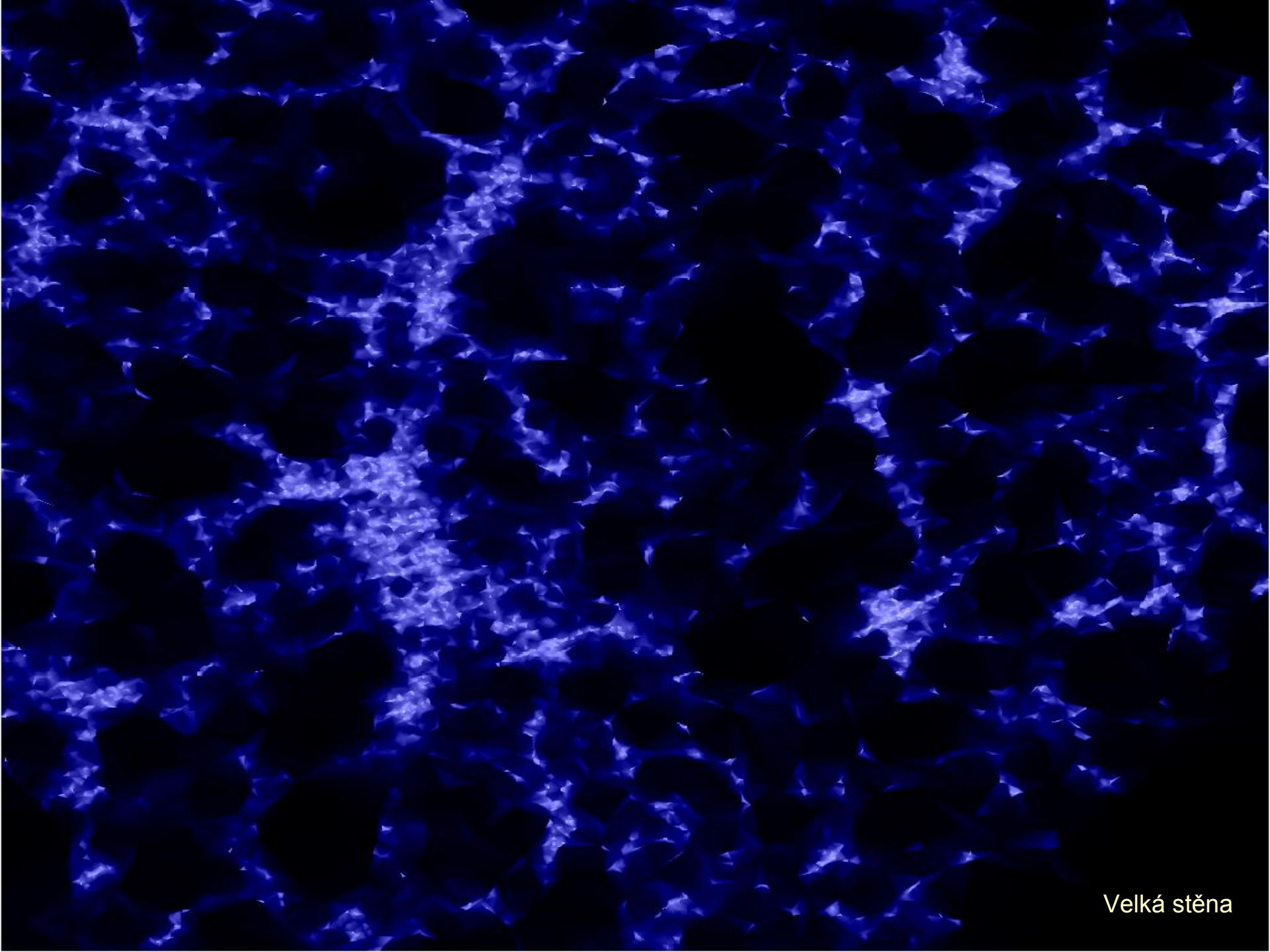
Tloušťka: 20 milionů l. y.

nadkupa ve Vlasech Bereniky

kupa v Herkulu



Přístroj pro přehlídku SDSS

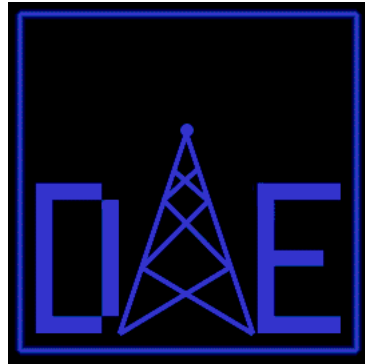


Velká stěna

# Kandidáti na temnou energii

vakuová energie

kvintesence



modifikovaná  
gravitace



# Kandidáti – vakuová energie

- kvantové fluktuace polí
- virtuální páry částice-antičástice
- pole zajišťující narušení symetrií v přírodě

vakuum - netriviální dynamický systém  
polarizace vakua  
Lambův posuv  
stínění náboje

vakuová energie:  $\rho \sim \text{const}$   
kosmologická konstanta  $\Lambda$

předpověď:  $10^{108} \text{ eV}^4$  (standardní model)  
měření:  $10^{-12} \text{ eV}^4$  (SN Ia, SDSS, fluktuace CMB)

Frank Wilczek: cosi nového je za dveřmi ...

Konstantní hustota znamená, že dříve dominovala hmota, v budoucnu temná energie, nyní obě entity řádově shodné

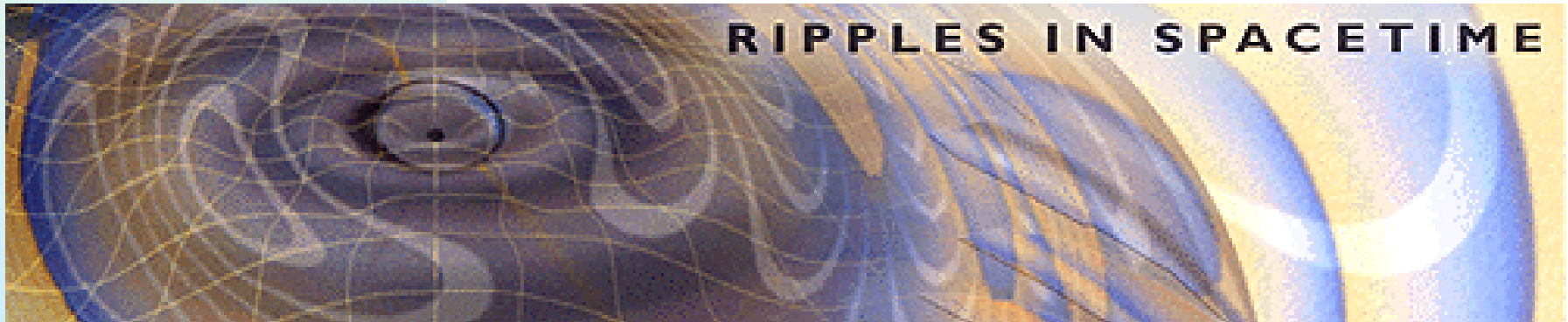
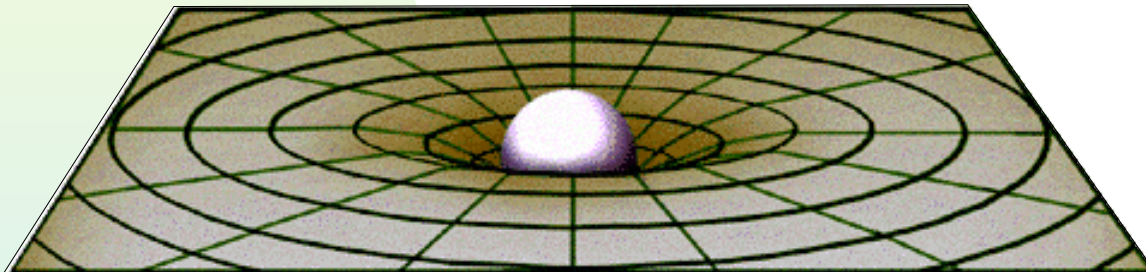


120 pppp

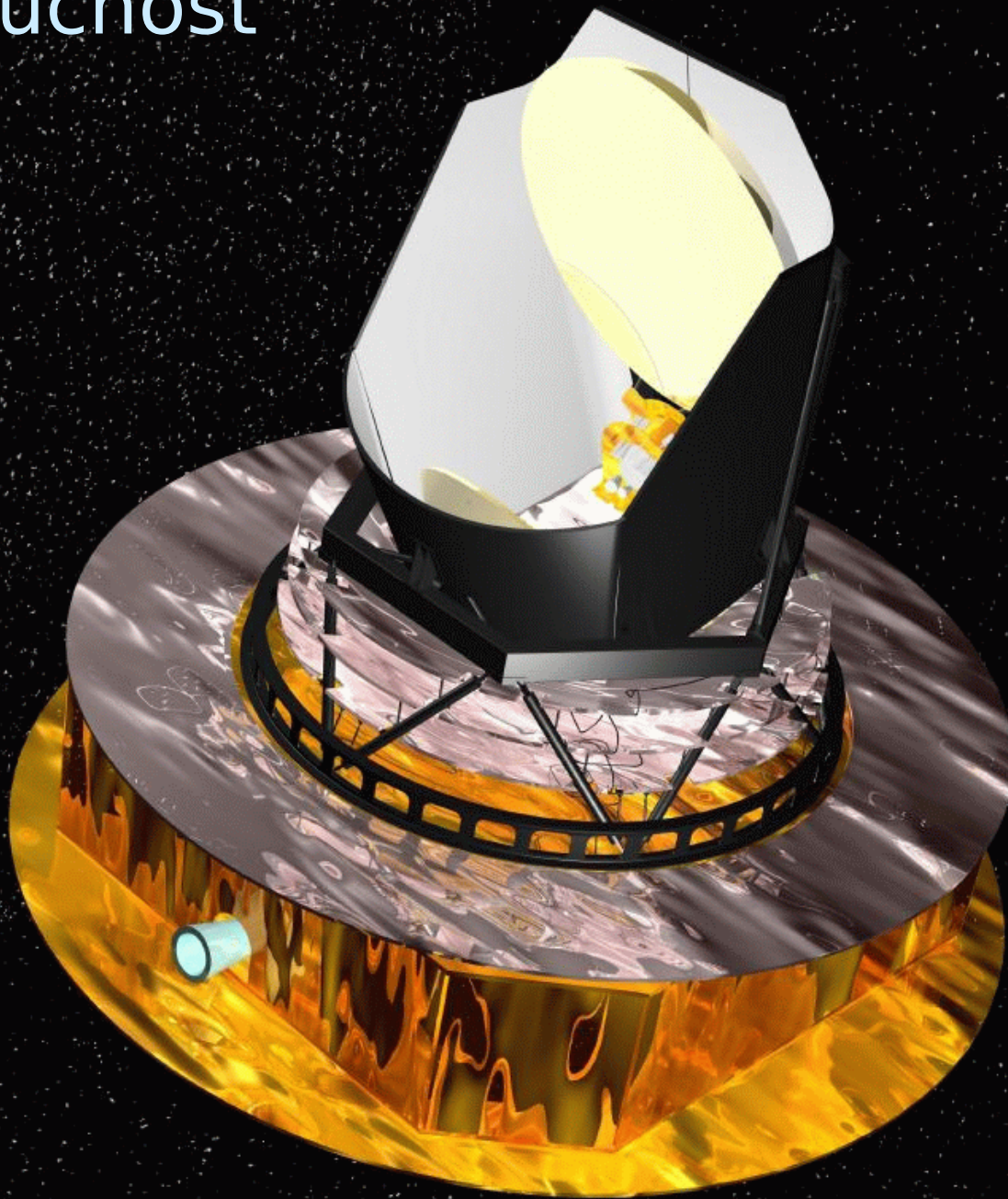
extradimenze, superčástice?

# Kandidáti – modifikovaná gravitace??

- zakřivení světelného paprsku v gravitačním poli (1,75" u povrchu Slunce),
- gravitační čočky (první objevena v roce 1979),
- stáčení perihelia planet (zejména Merkuru 43" za století),
- gravitační červený posuv,
- zpoždění elektromagnetického signálu,
- kosmologický červený posuv,
- Lenseův-Thirringův jev (strhávání souřadnicové soustavy),
- gravitační vlny,
- černé díry,
- rozpínání vesmíru,
- neukleidovská geometrie časoprostoru.



# Budoucnost



Planck - 2009  
přesnost 0,17°

Planck & Herschel

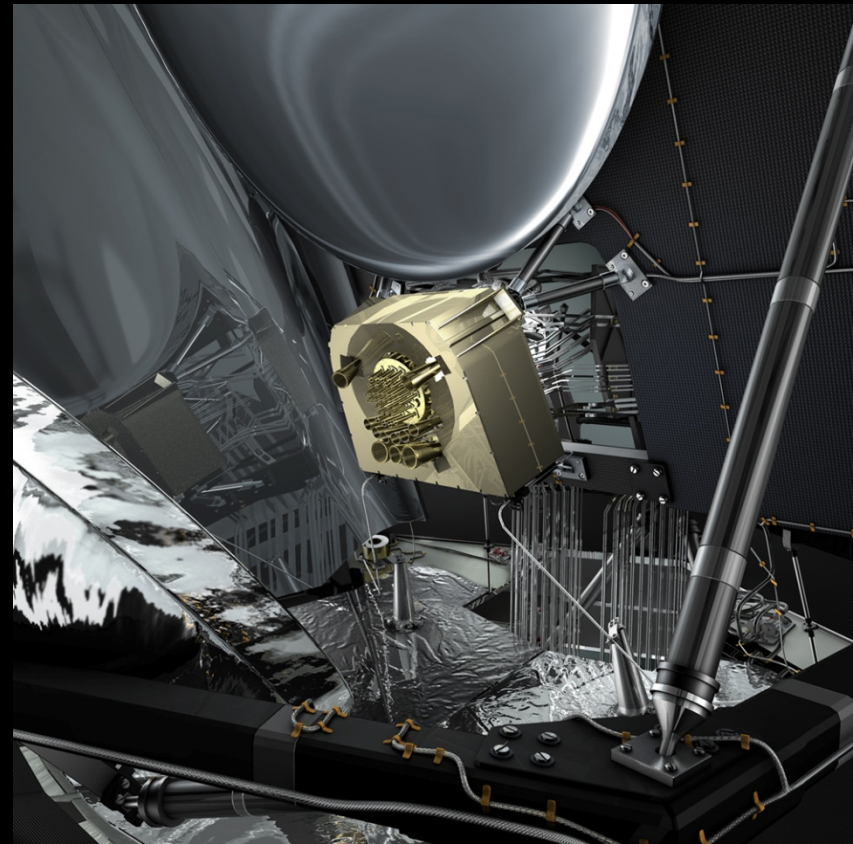
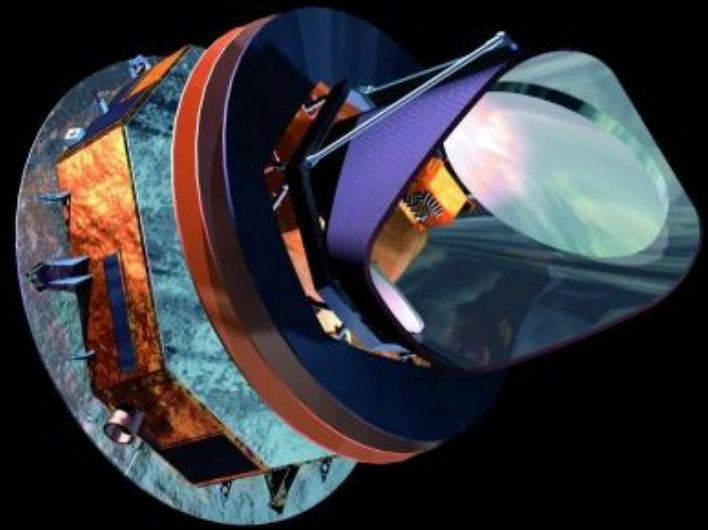


14. 5. 2009

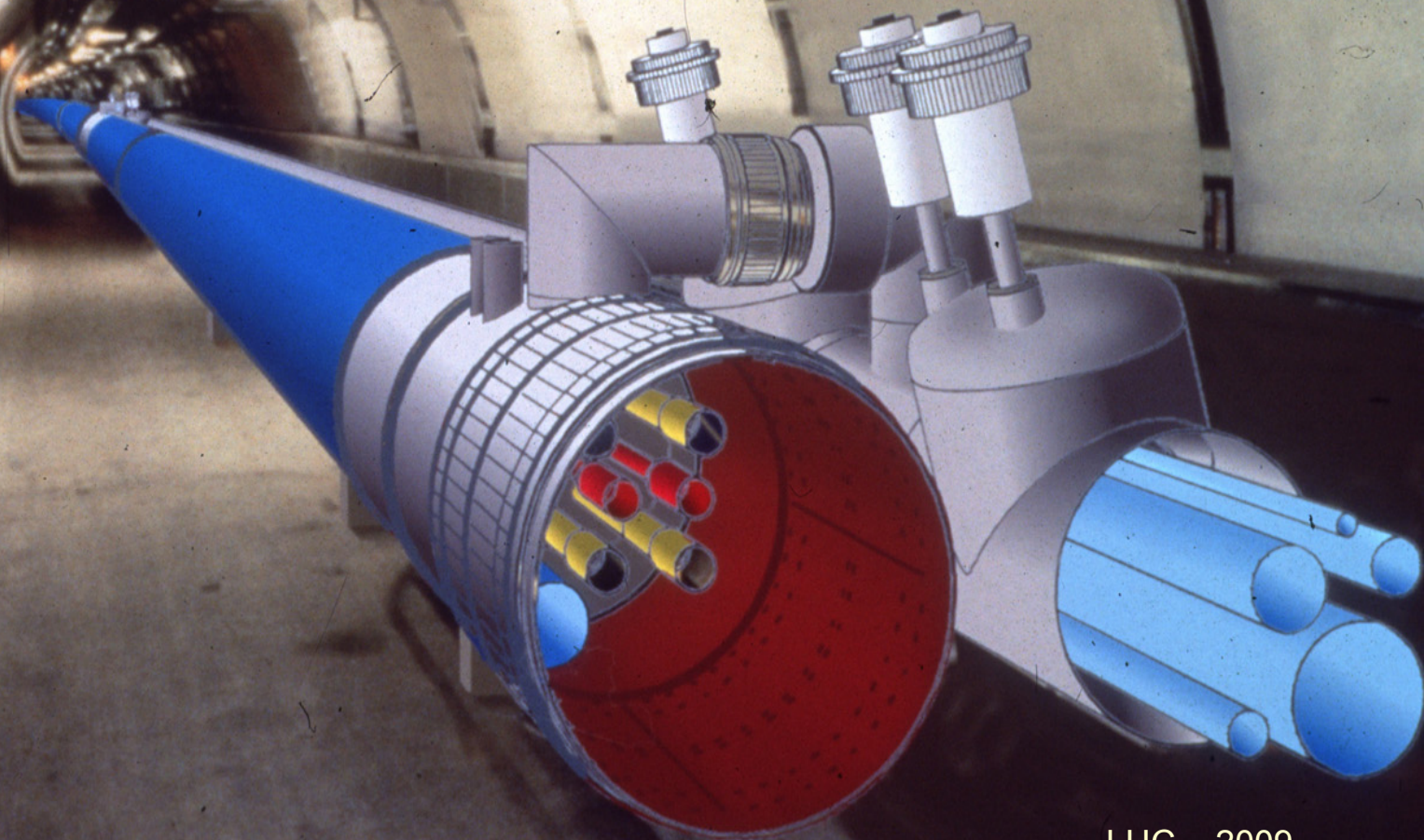


# Planck

- zrcadlo:  $1,9 \times 1,5$  m
  - hmotnost zrcadla 28 kg!!!
  - sonda:  $4,2 \times 4,2$  m
  - hmotnost: 1900 kg
  - úhlové rozlišení:  $0,17^\circ$
  - obor: mikrovlny až submilimetry
  - tepelné rozlišení:  $2 \mu\text{K}$
  - životnost: 15 měsíců
  - teplota:  $-273,05^\circ\text{C}$
  - cena: 700 milionů €
- 
- 1 pasivní chladič (vyzařováním)
  - 3 aktivní chladiče:
    - 20 K Jet Propulsion Laboratory, USA
    - 4 K Rutherford Appleton Laboratory, UK
    - 0,1 K Institut Néel, Grenoble

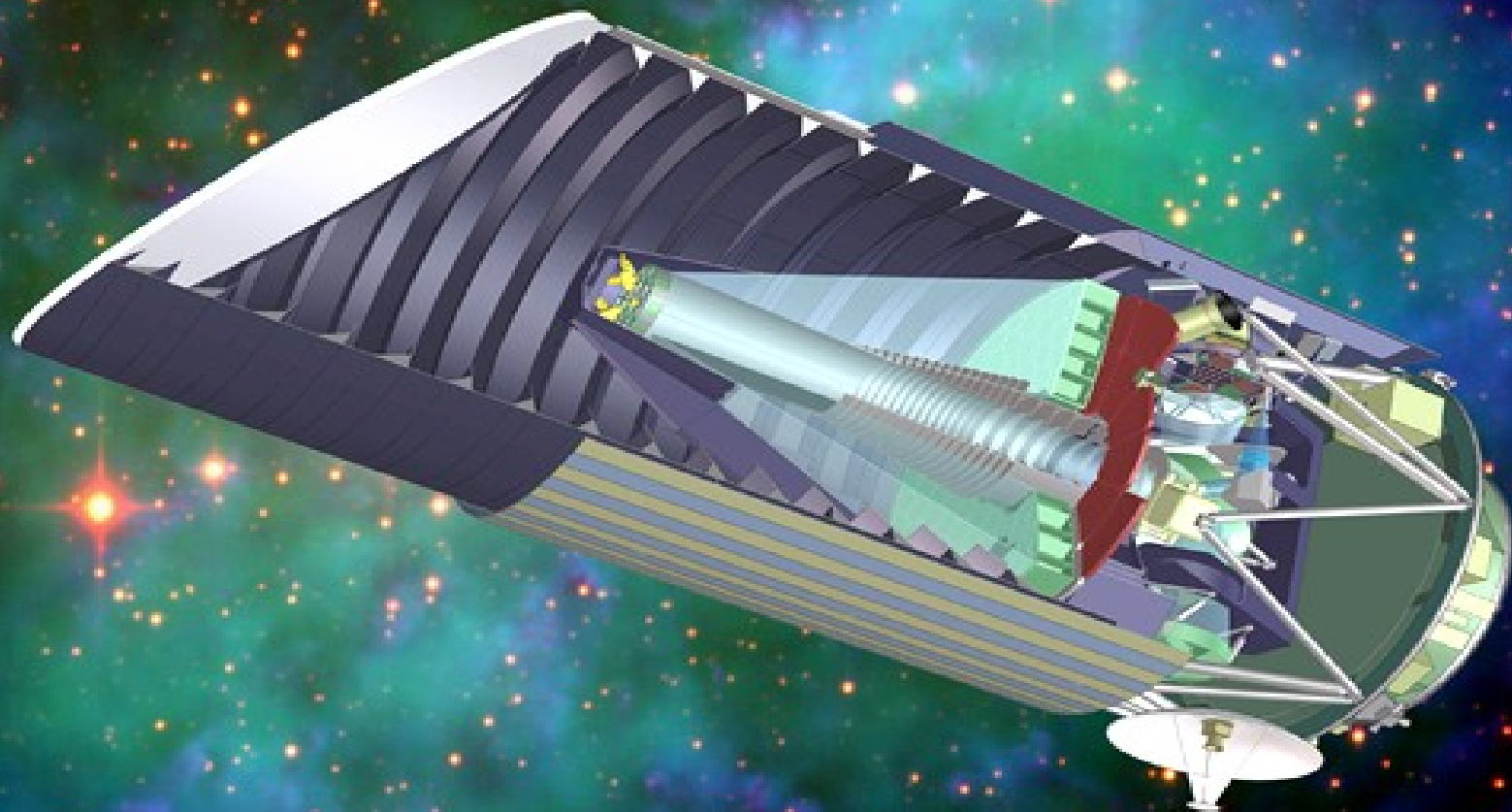


Budoucnost



LHC – 2009  
14 TeV/nukleon

# Budoucnost



SNAP (SuperNova / Acceleration Probe)  
chlazený dalekohled o průměru 2 m

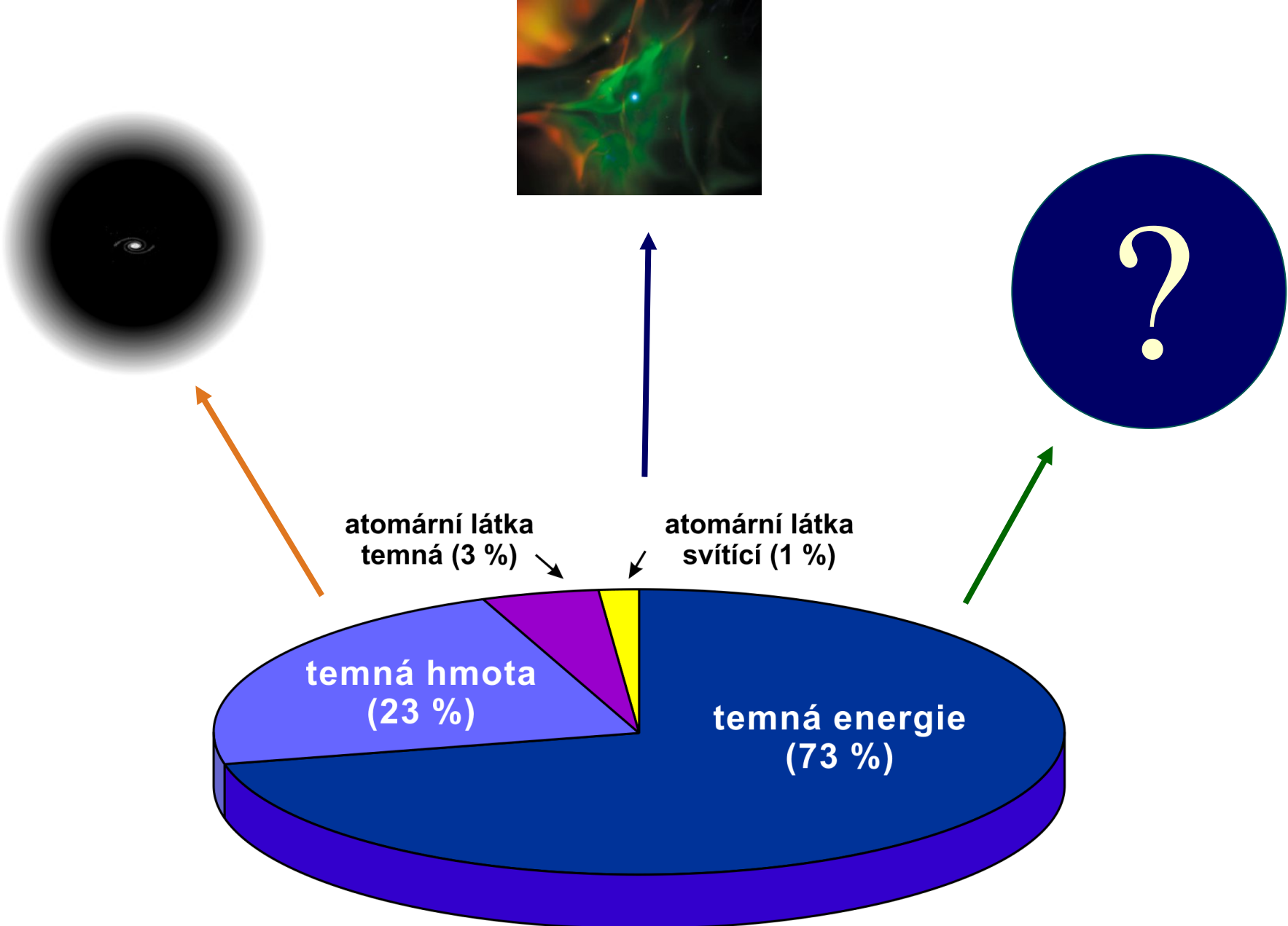
# Temná hmota (23 %)

---





# Složení vesmíru

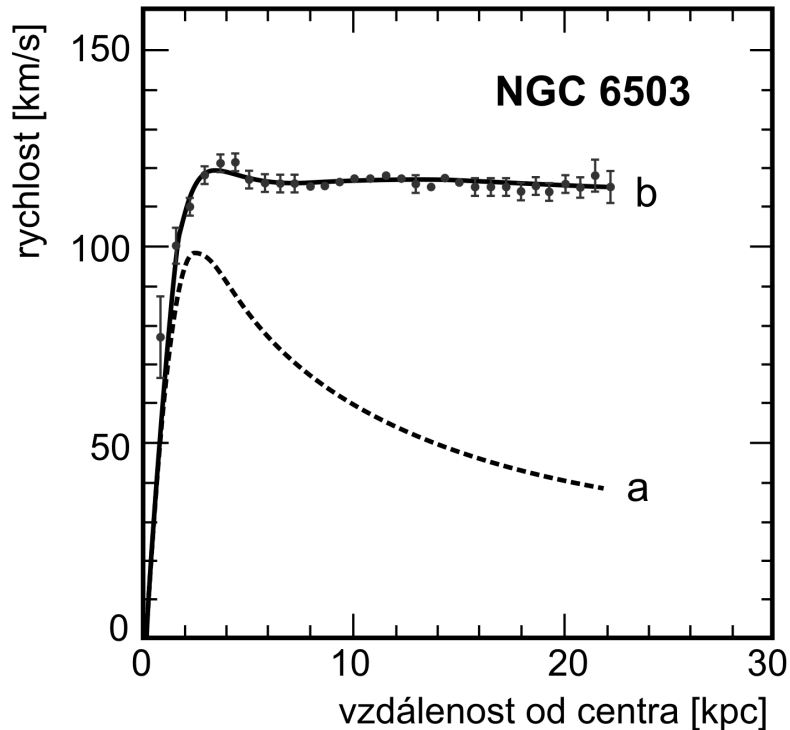


# Temná hmota

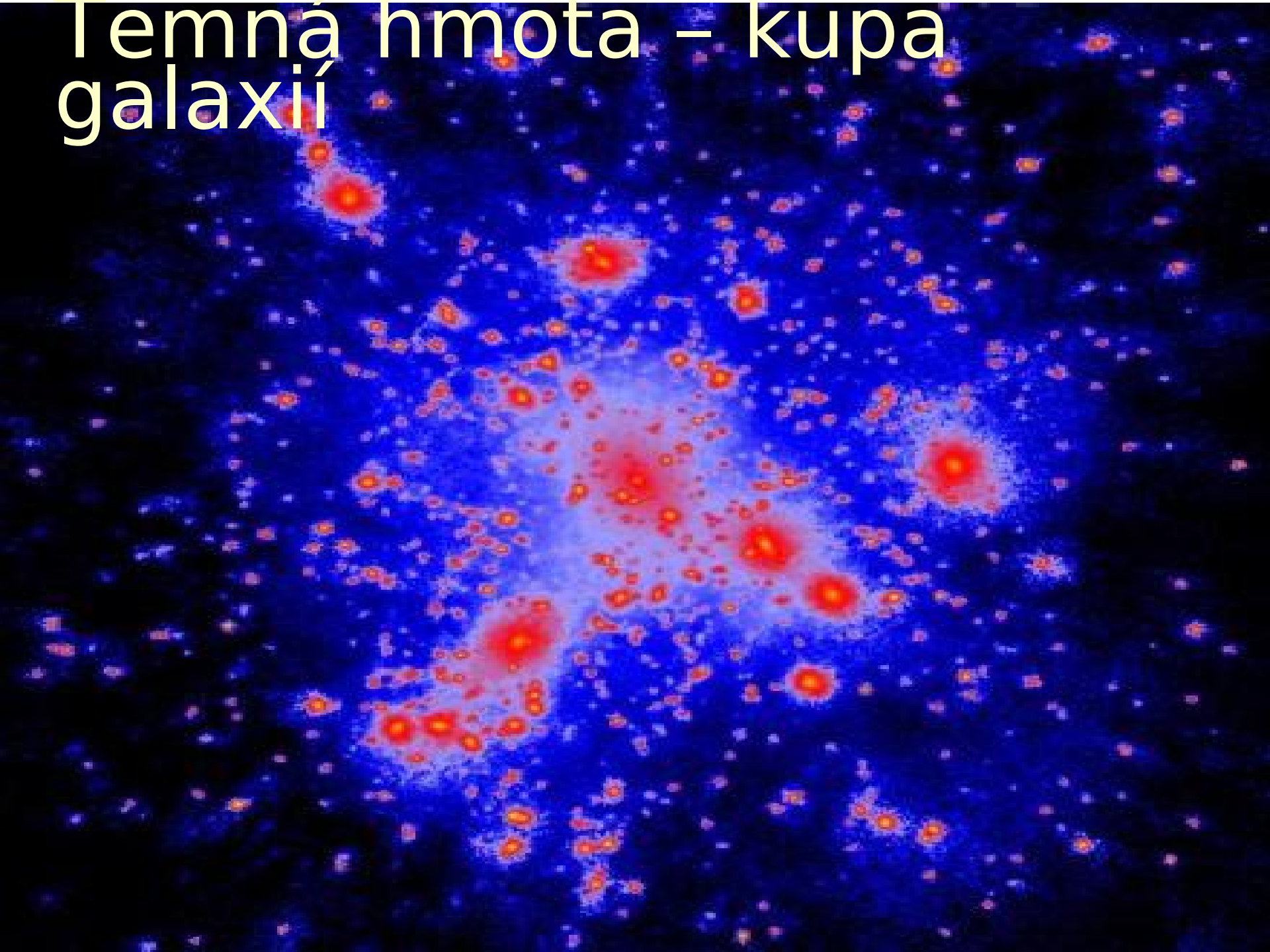
- 1934, F. Zwickey - nesoulad rotačních křivek kup galaxií kupa Vlasy Bereniky)
- nejpřesnější měření na vlně 21 cm
- 50% hmoty galaxií, 23% hmoty vesmíru



Fritz Zwickey (1898-1974)



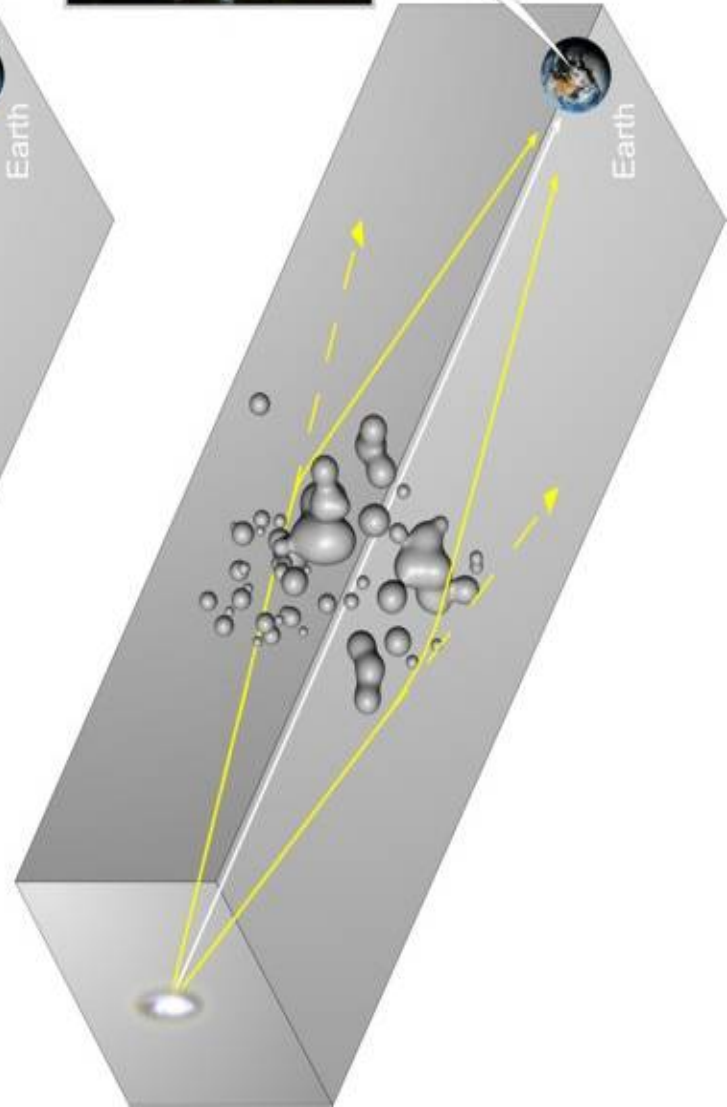
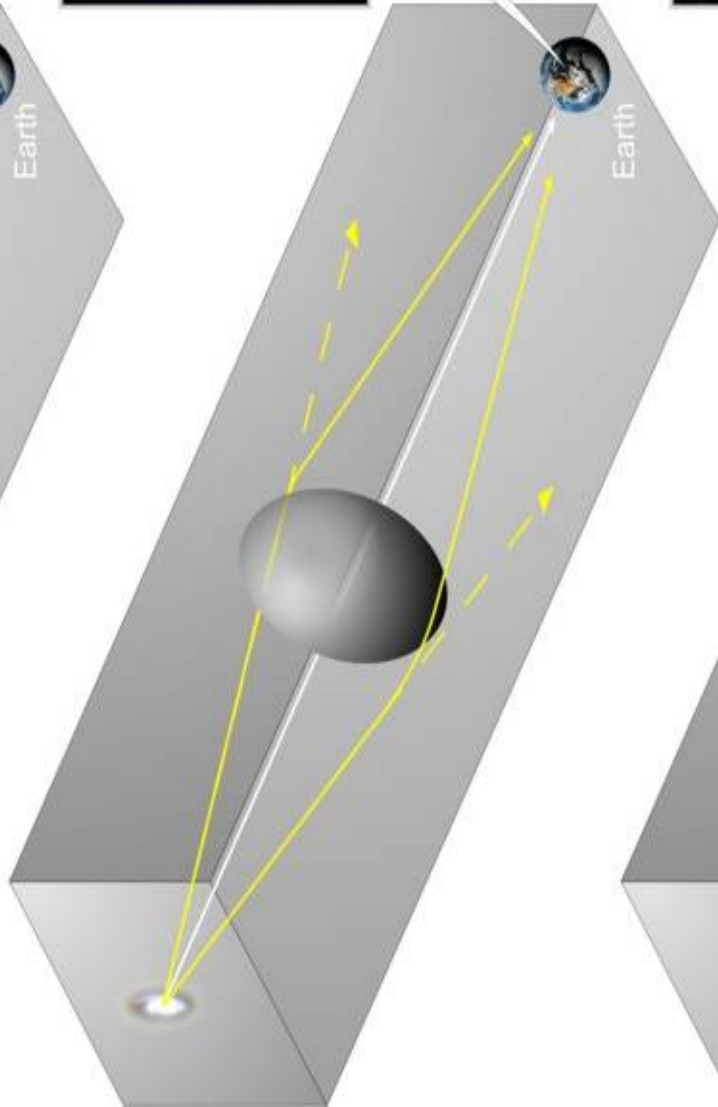
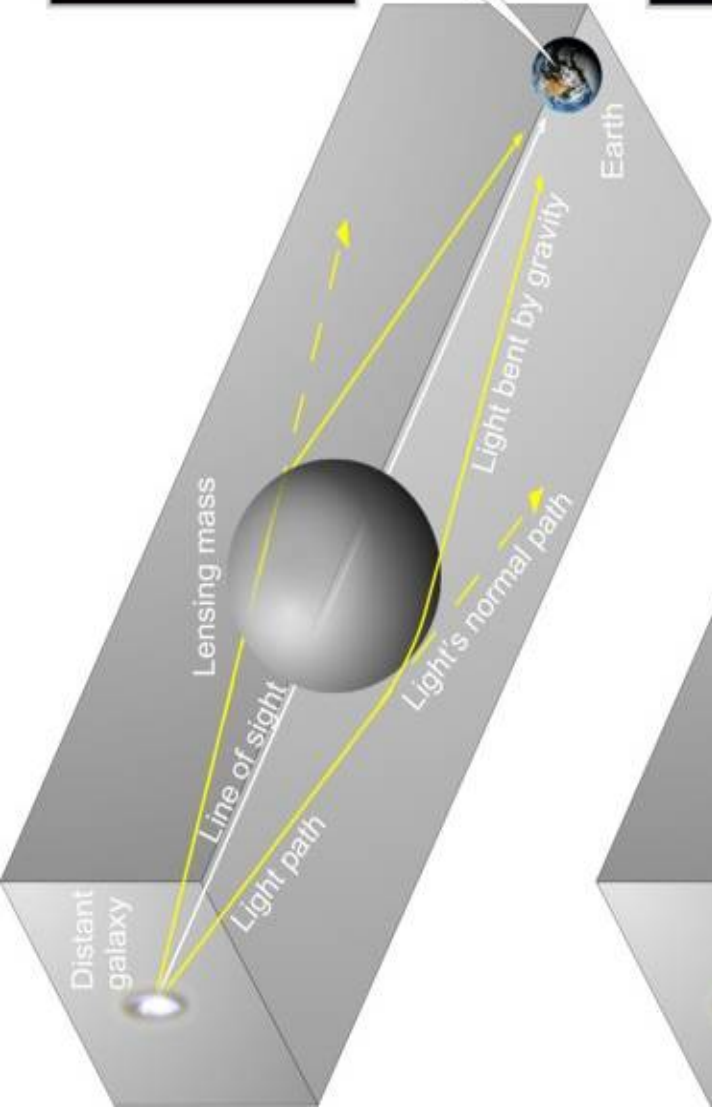
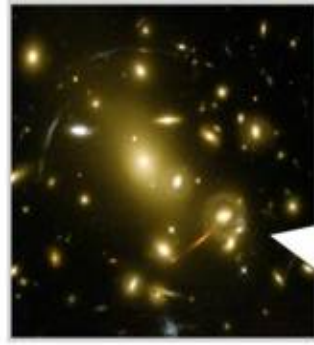
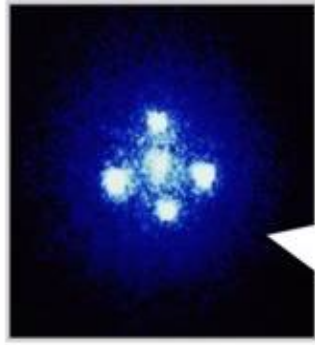
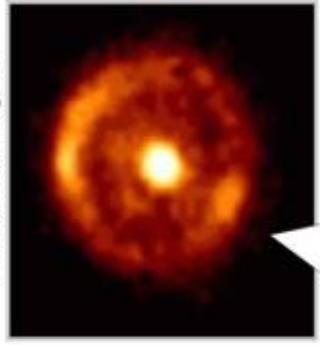
# Temná hmota – kupa galaxií



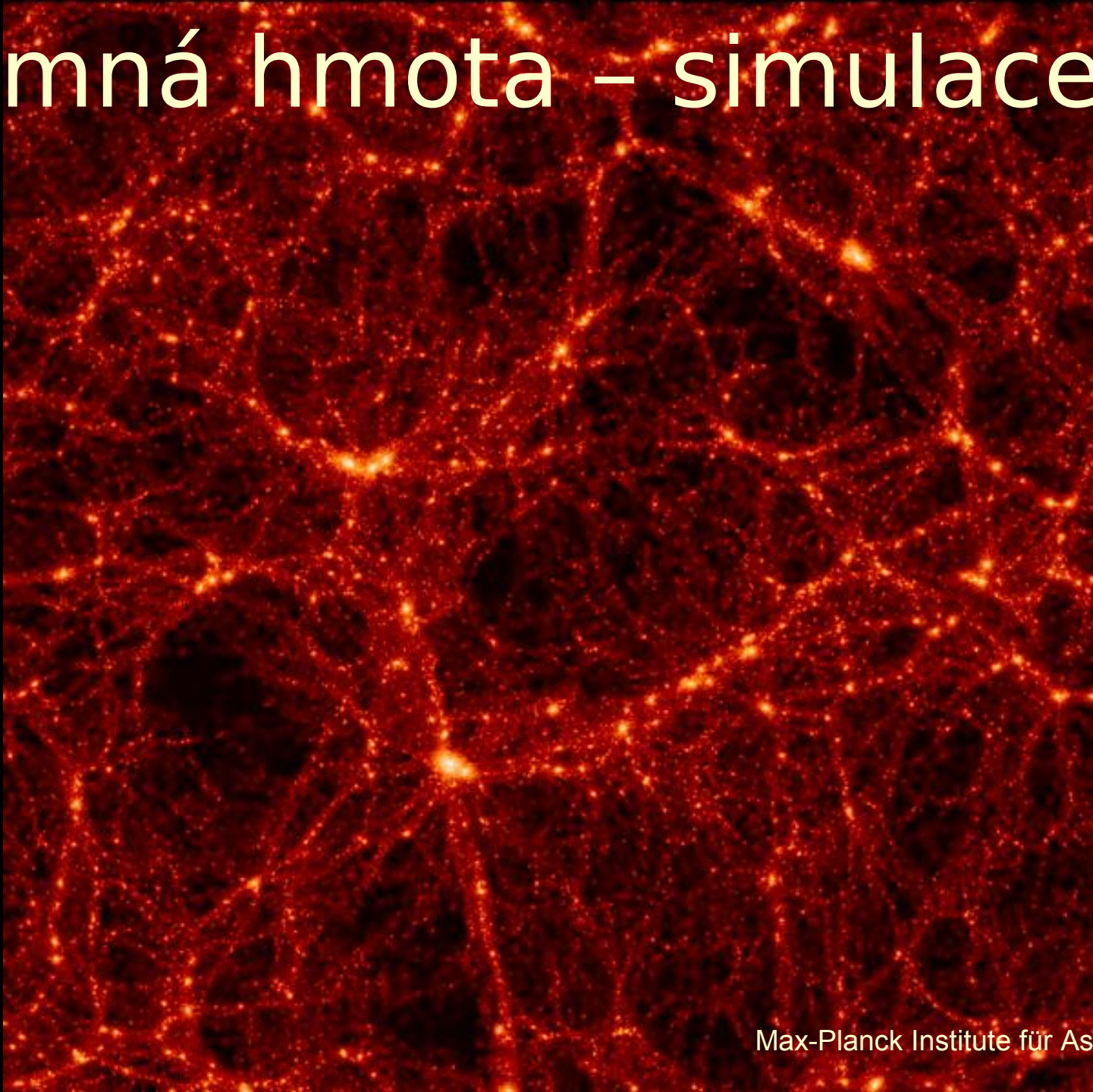
# Temná hmota – kupa galaxií

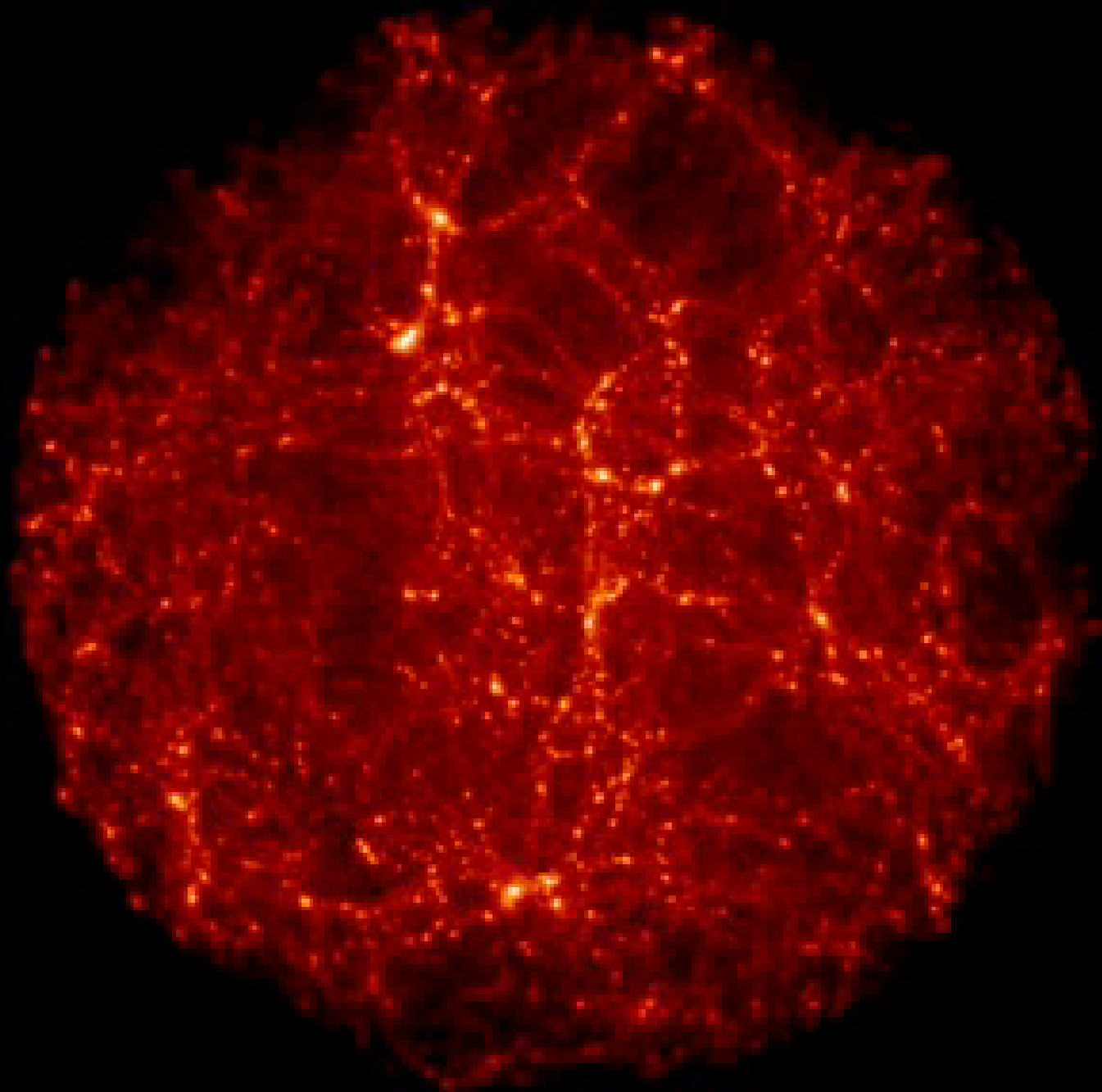


Obrázek gravitačně čočkující kupy galaxií pořízený HST byl zpracován v roce 2005 speciální technikou na univerzitě v Yale. Z efektu gravitačních čoček na jednotlivé členy kupy byla dopočtena temná hmota, která v kupě musí být. Na obrázku je zobrazena modrou barvou. Je vidět, že obklopuje jednotlivé galaxie v kupě.



# Temná hmota - simulace





- **CDM (Cold Dark Matter)** - chladná temná hmota. Tvoří většinu temné hmoty. Každá malá porucha rozložení hustoty přitahuje pomalé částice CDM a ty ji ještě prohlubují. Vznik struktur „*zdola nahoru*“.

- **HDM (Hot Dark Matter)** – horká temná hmota, menší část, jinak by zabránila vytvoření struktur ve vesmíru. Částice HDM by jakoukoli malou poruchu v rozložení hmoty velmi záhy vyhladily. Vesmír s HDM proto může struktury tvořit jen „*shora dolů*“.

# Temná hmota

## Nebaryonová (23%)

- neutrino (HDM)
- wimpsy (CDM)
- wimpzilly (CDM)
- axiony (CDM)

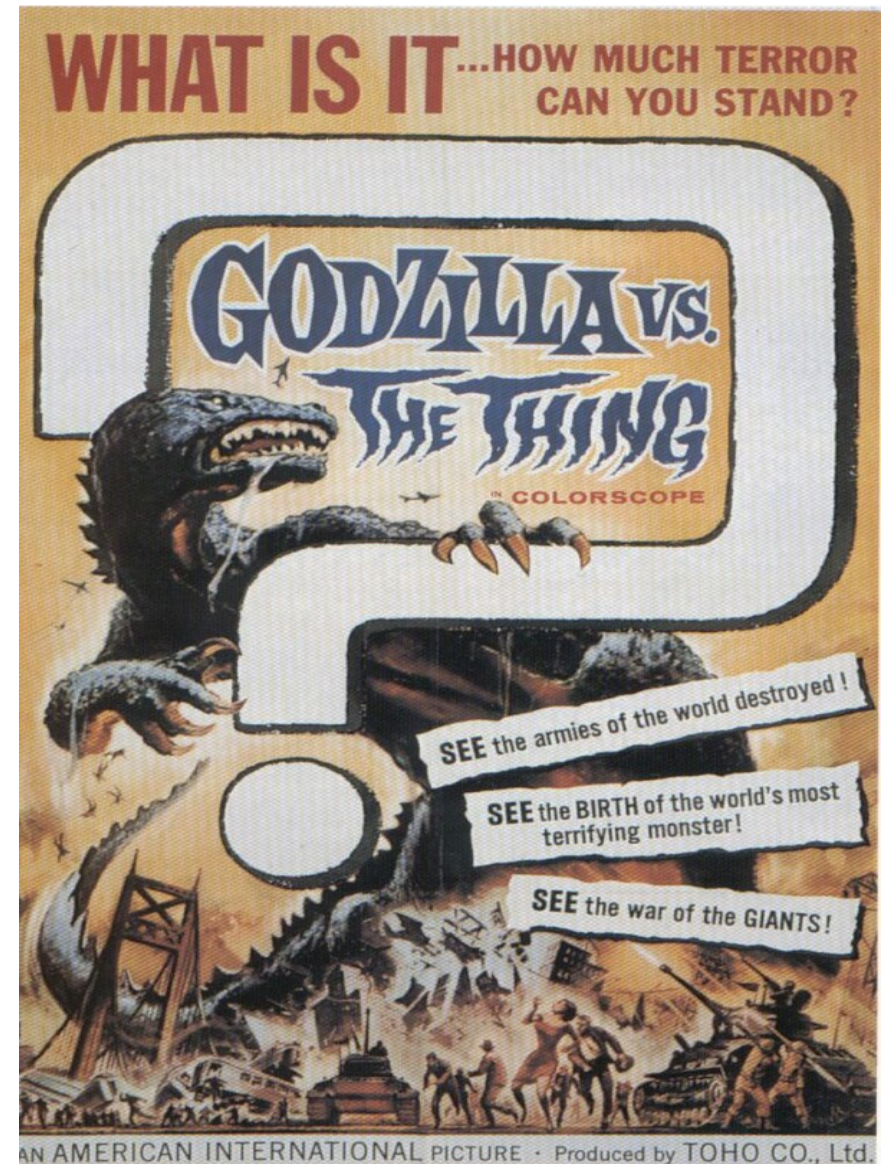
## Baryonová (3%)

- bílí trpaslíci
- neutronové hvězdy
- červení trpaslíci
- černé díry
- objekty planetárního typu
- machos



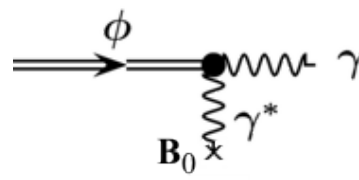
# Nebaryonová temná hmota

- **Neutrino.** Objev 1956. Oscilace 1998.  $300/\text{m}^3$ . Oddělení v 1 sec po Velkém třesku. Max 2% celkové hustoty hmoty-energie. HDM
- **Wimpy** (Weakly Interacting Massive Particles). Reliktní levotočivé superčástice. Více jak 50 GeV.  $500/\text{m}^3$ . Tok  $10\,000/\text{cm}^2\text{s}$ , 220 km/s, s-neutrino (neutralino). CDM.
- **Wimpzilly.** Hmotnější verze wimpů, poinflační relikty. Hmotnost stomiliardkrát vyšší než je hmotnost atomu, tedy  $10^{12}$  GeV až  $10^{16}$  GeV. Snadnější detekce. Rainer Dick, Edward Kolb a Pasquale Blasi. CDM.
- **Axiony.** Souvisí s nenarušením CP symetrie v silné interakci. Předpověděl Frank Wilczek. CDM.





# Axiony



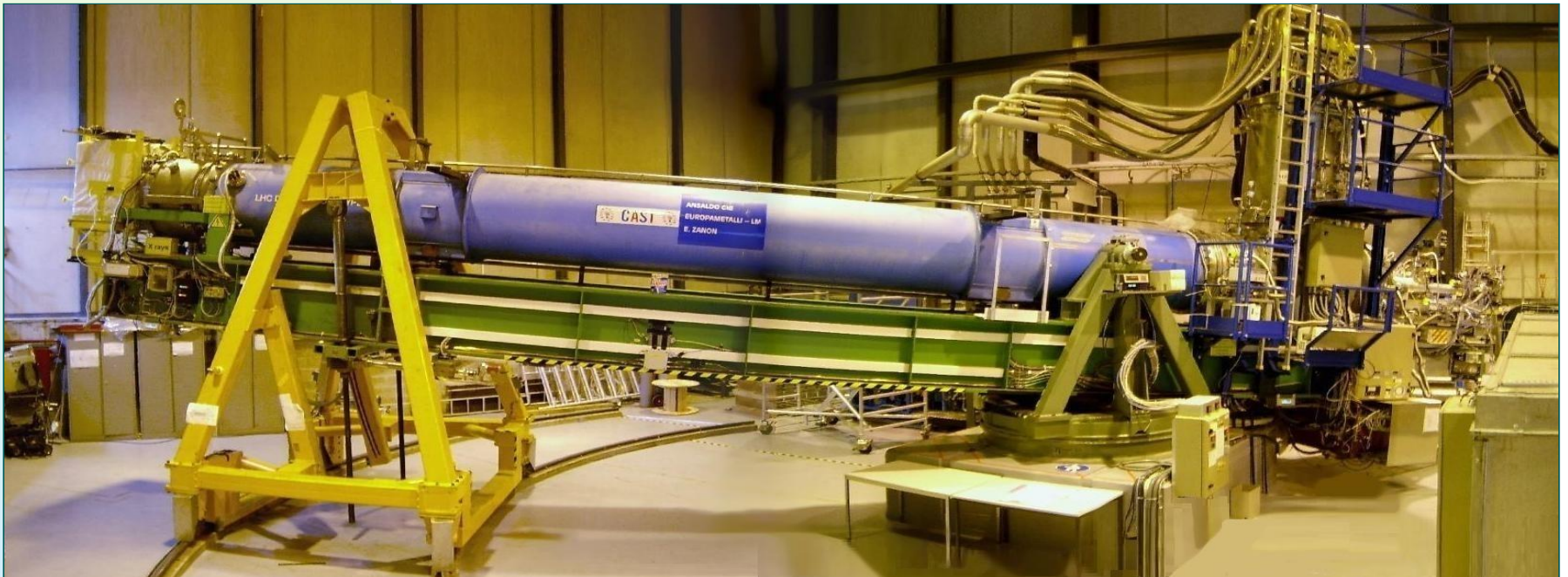
Málo hmotné bosony se spinem 0 postulované kvantovou chromodynamikou. Souvisí s narušením Peccei-Quinnovy symetrie v silné interakci. Navrženy Frankem Wilczekem v roce 2004. Jsou jedním z kandidátů na temnou hmotu. Interagují především slabou interakcí.

## CAST (Cern Axion Solar Telescope)

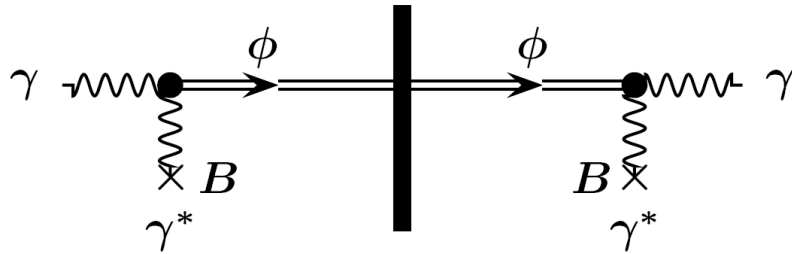
Hledání axionů přicházejících ze Slunce. Primakovův jev. Magnet 9 T, délka 10 m (LHC), detektory ABRIXAS. Svisle pohyb  $\pm 8^\circ$ , vodorovně  $\pm 40^\circ$ . Axiony nepozorovány. 1,5 h ráno a večer.



Frank Wilczek (1951)



# Axiony



## VUV - FEL (Vacuum UltraViolet - Free Electron Laser)

Experiment připravovaný v DESY (Deutsches Elektronen SYNchrotron ) v Německu. Znovuobjevení světla za stěnou.

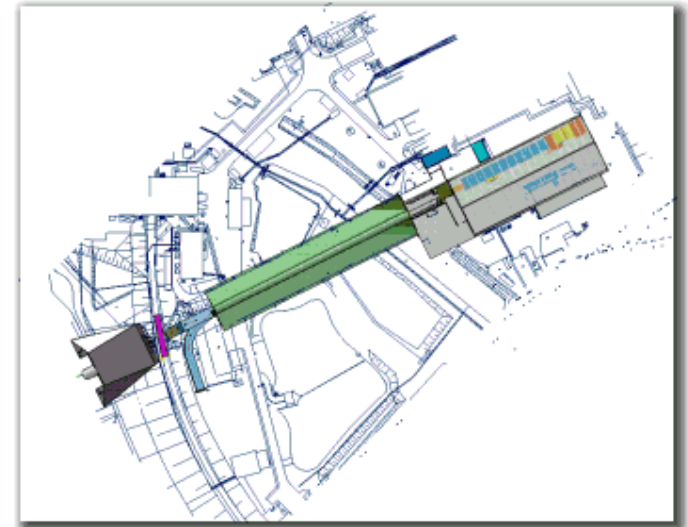
12 dipólových magnetů, každý 2.24 T (6+6),  
 $BL = 27.66$  Tm. Laser laditelný od XUV po měkké RTG.  
Postaví před laboratoří, nevejde se tam.

Nový název (6.4.2006):

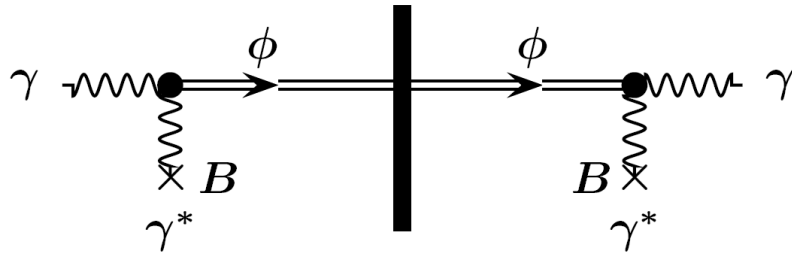
**FLASH (Free-electron LASer in Hamburg)**

Další název (2007):

**ALPS (Axion Like Particle Search)**



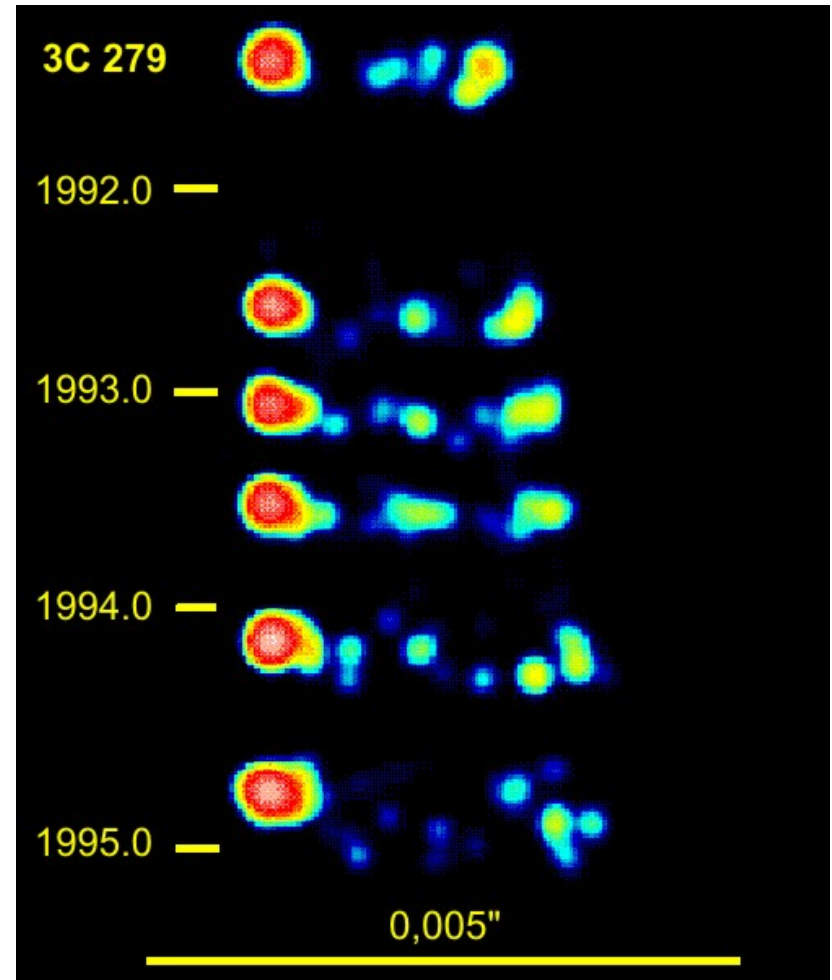
# Axiony



## 3C 279

2007: Malcolm Fairbairn z CERNu, Timur Rashba z MPI a Sergey Troitsky z RAS – nový experiment

Kvazar je každý říjen na spojnici kvazar–Slunce–Země a dochází tedy k jeho zákrytu Sluncem. Lokální mg pole na povrchu Slunce fotony konvertuje na axiony a zpět. Podle PVLAS 2 % fotonů projdou. GLAST



# Tabulka kosmologických parametrů (WMAP, CBI, ACBAR, 2dF)

Parametr	Označení	Hodnota	Poznámka
Hubbleova konstanta	$H$	$(71 \pm 4) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$	$h = 0,71 \pm 0,04$
Tenzorový-skalární poměr	$r$	$< 0,53$	možná 0
Čas rekombinace	$z_{\text{rc}}$	$1\,088 \pm 2$	$\sim 380\,000 \text{ let}$
Čas reionizace	$z_{\text{in}}$	$17 \pm 5$	$t_{\text{in}} \sim 2 \times 10^6 \text{ let}$
Podíl tlak/hustota pro temnou energii	$w$	$< -1; -0,78)$	
Podíl baryonové hmoty	$\Omega_{\text{B}}$	$(4,3 \pm 0,2) \%$	
Podíl temné hmoty	$\Omega_{\text{DM}}$	$(23 \pm 2) \%$	
Podíl temné energie	$\Omega_{\Lambda}$	$(73 \pm 4) \%$	
Podíl záření	$\Omega_{\text{R}}$	$0,046 \%$	
Podíl hmotných neutrin	$\Omega_{\text{N}}$	$\sim 0,1 \%$	dolní hranice
Celková hmota-energie	$\Omega_{\text{TOT}}$	$1,02 \pm 0,02$	snad plochý (1)
Stáří vesmíru	$t$	$(13,4 \pm 0,3) \times 10^9 \text{ let}$	