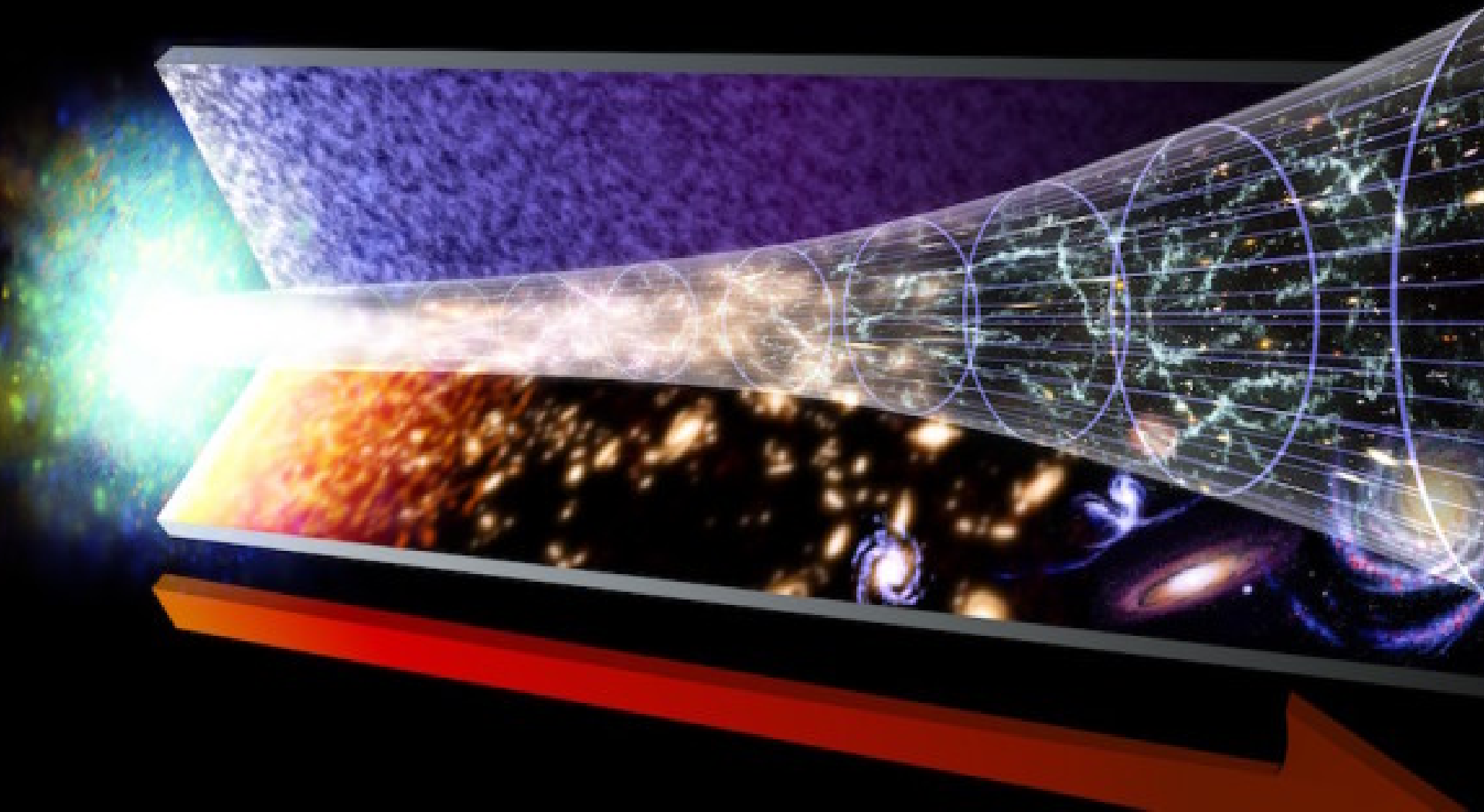
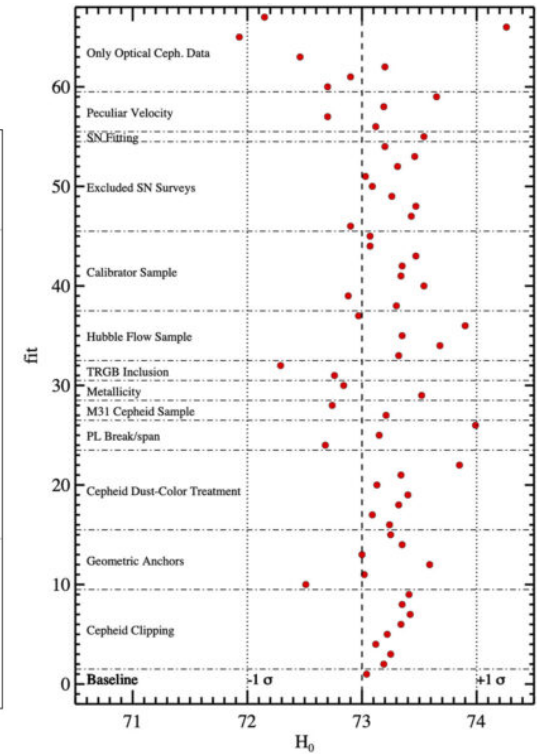
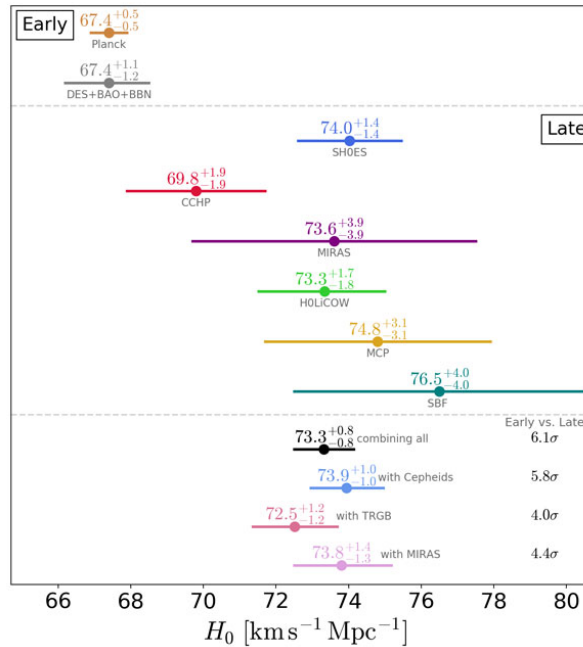
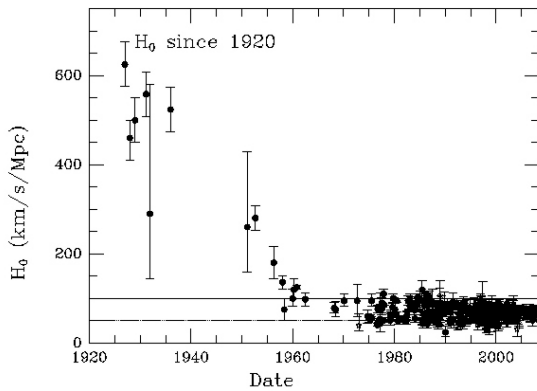


Fyzikální kosmologie 2/2



Jak starý je vesmír?

Odhad pomocí Hubbleovy konstanty
(jenže dnes rozptyl hodnot 9.4 ± 2.1 %)



Počáteční úvaha: rozpínající se vesmír => rychlost rozpínání ovlivněna jedinou silou - gravitací => prázdný vesmír se rozpíná konstantní rychlostí => odhad stáří vesmíru: $1/H$

X

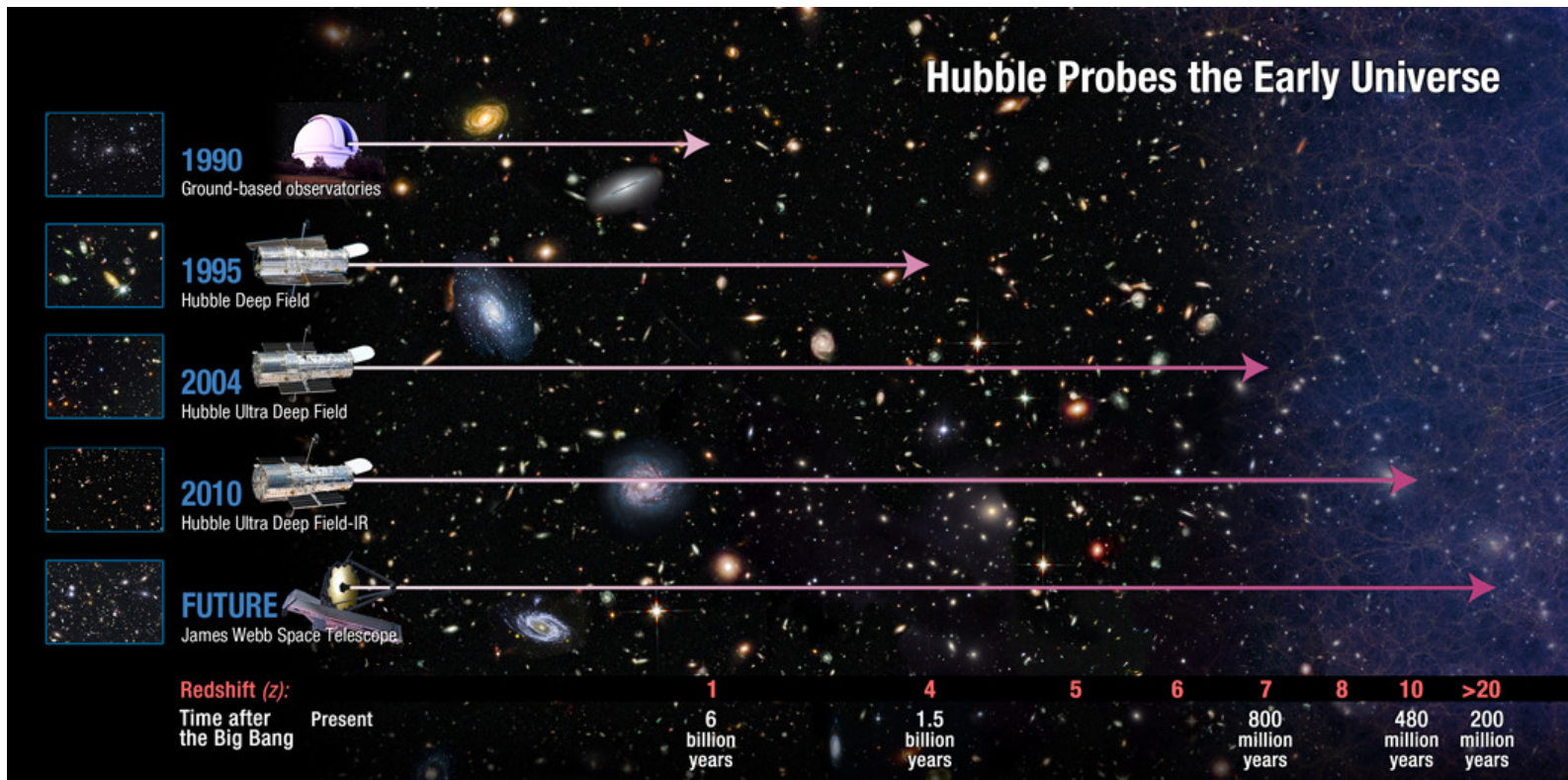
reálný vesmír: menší stáří v důsledku brzdění rozpínání gravitační silou => pro standardní kosmologický model doba existence vesmíru $t < 1/H$

Jak starý je vesmír?

$(13.797 \pm 0.023) \times 10^9$ let (družice Planck 2018)

Lze to nějak ověřit?

dle stáří nejstarších hvězdných objektů - kulové hvězdokupy, někteří bílí trpaslíci – stáří alespoň 12 mld let
měření WMAP, Planck aj.



Velmi raný vesmír

do 10^{-43} s: Planckova epocha

není jednotný popis, více teorií; všechny fyzik. interakce jsou spojeny v jediné univerzální

10^{-43} – 10^{-38} s: epocha velkého sjednocení

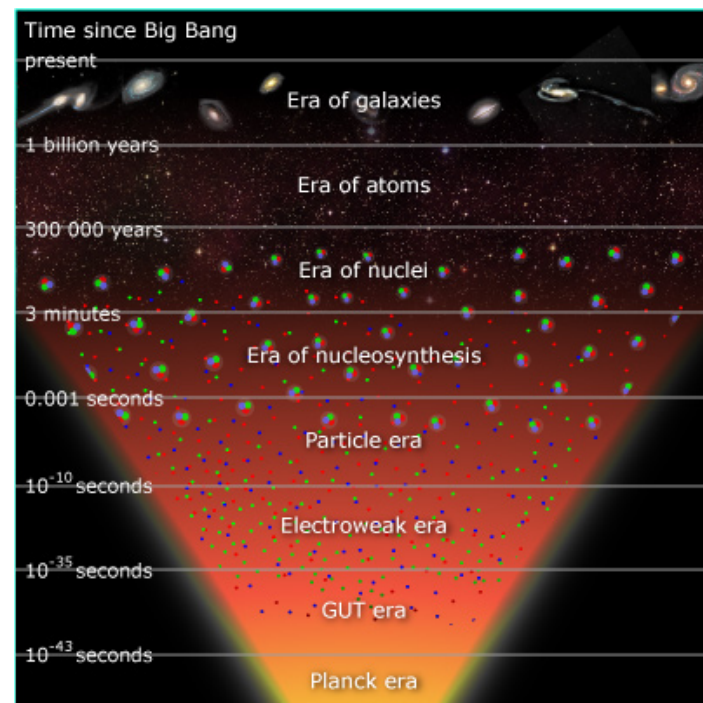
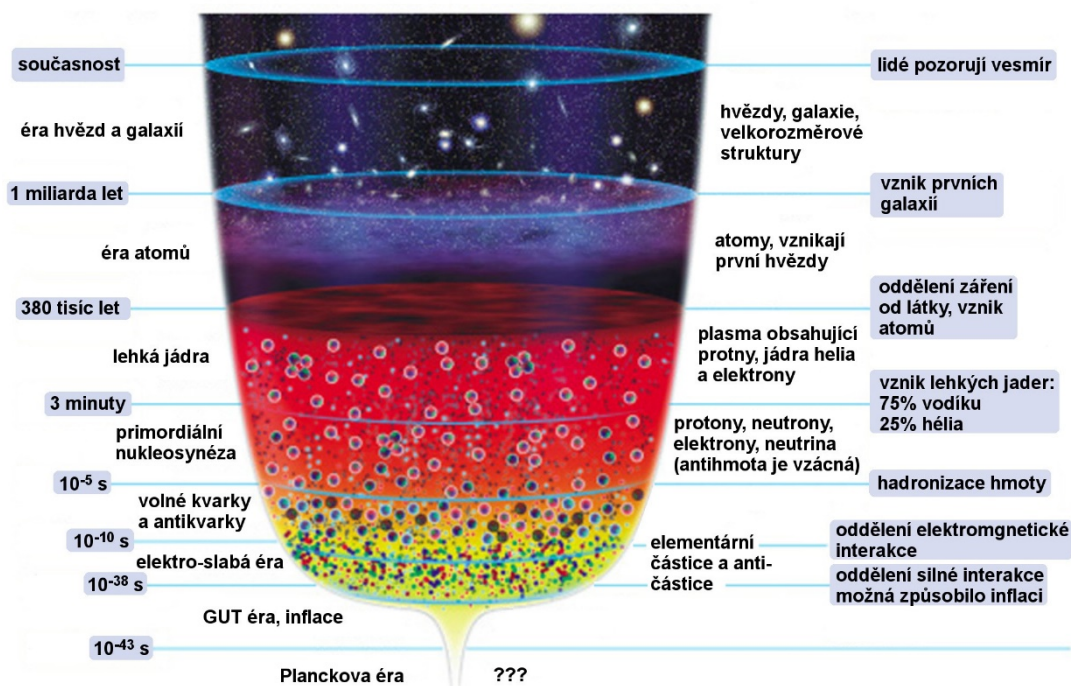
vesmír chladne a rozpíná se; oddělení gravitační interakce

10^{-38} – 10^{-10} s: elektroslabá epocha

začíná oddělením elektroslabé a silné interakce, měly by vzniknout mg. monopóly – nepozorují se -> vyřešeno zavedením inflace

čas od počátku

významné události



Velmi raný vesmír

cca 10^{-38} – 10^{-32} s: inflační epocha

překotné rozepnutí/nafouknutí vesmíru (**inflace vesmíru**) – zvětšení objemu vesmíru o nejméně 78 řádů! (1980 Alan Guth, 1981 Katsuhiko Sato; později Andrej Linde, Paul Steinhardt, Andreas Albrecht)

příčina? - odpudivé síly vyvolané působením záporného tlaku vakua. Souběžně s nafukováním vznikala ve vesmíru i nová hmota

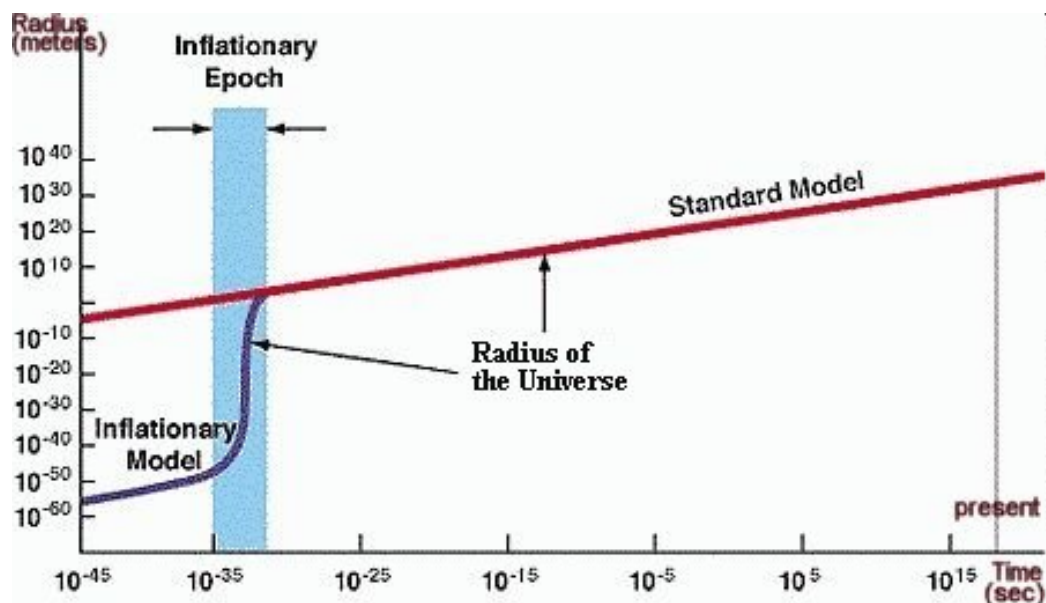
na konci: ve vesmíru kvark-gluonové plazma

řeší nedostatky standardního modelu - problémy horizontu a plochosti vesmíru, neexistence magnetických monopolů

Podporována, ale zatím nedokázána – měly vzniknout tzv. reliktní gravitační vlny

po inflaci (cca 10^{-6} s): baryogeneze

- tvorba baryonů: nevysvětlená nerovnováha hmota - antihmota



10^{-43} seconds
 Temperature 10^{32} K
 Gravity emerges

10^{-35} seconds
 Temperature 10^{28} K
 Inflation era

10^{-4} seconds
 Temperature 10^{13} K
 Antimatter disappears

THERMAL EQUILIBRIUM ERA

10^2 seconds
 10^{11} K

Equal numbers of protons and neutrons

1 billion photons for every proton or neutron

Proton	Neutron	Antineutrino
Electron	Neutrino	Positron

HYDROGEN ERA

1 second
 10^9 K

6 protons for every neutron

HELIUM ERA

100 - 300 seconds
 100,000 K

Almost 25% of visible universe is helium; 75% is hydrogen plus some tritium

Tritium decays with half-life of 12 years, so very little survives

Lithium-7 + photons → Helium-4

Helium-4 + Helium-4 → Beryllium-7 + photons

Helium-3 + Helium-4 → Beryllium-7 + photons

Beryllium-7 + neutron → Lithium-7 + proton

Deuterium + Deuterium → Helium-4 + photons

DEUTERIUM ERA

100 seconds
 10^9 K

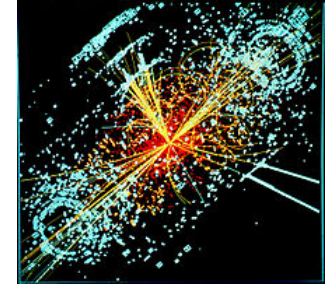
7 protons for every neutron

Deuterium + photon

380,000 years
 Atoms form.
 Cosmic microwave background permeates universe

100 - 200 million years
 First stars form

Raný vesmír



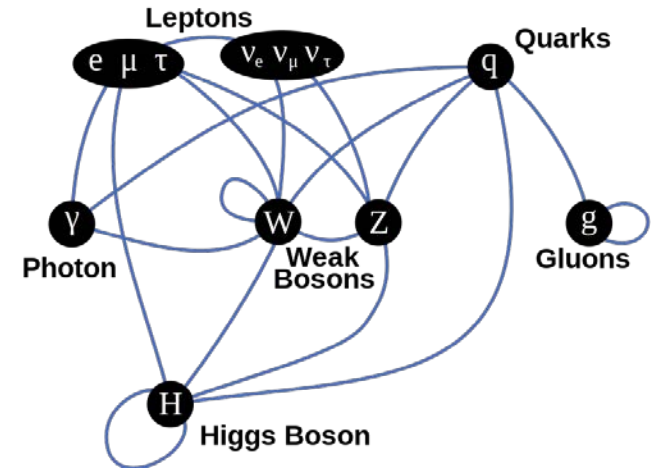
méně spekulací, více fyzikálního zdůvodnění;
supersymetrie vlastností vesmíru => pak porušení při energii $> 1 \text{ TeV}$

10^{-10} - 10^{-6} s - kvarková éra:

všechny interakce odděleny; formují se částice, ale teplota příliš vysoká, aby se kvarky spojily v hadrony

10^{-6} - 1 s - hadronová éra: tvoří se hadrony (protony, neutrony); neutrina přestávají interagovat s baryony – volně putují vesmírem => *kosmické neutrinové pozadí* (obdoba mikrovlnného pozadí, reliktního záření, které bylo uvolněno později) na konci – většina hadronů a antihadronů anihilovala

1 – 10 s – leptonová éra: ve vesmíru dominovaly leptony a anti-leptony; na konci – konec tvorby nových párů lepton-antilepton, většina stávajících anihilovala, zůstal jen malý zbytek leptonů; vesmír byl neprůhledný (rozptýl na volných elektronech);



10 s – 380 000 let: fotonová éra

většina energie vesmíru ve fotonech, které interagovaly s protony, elektrony a event. jádry, na konci - oddělení záření od látky – vznik reliktního záření; před tím vesmír **zcela** neprůhledný, hustota $2 \cdot 10^9$ větší, teplota 3 000 K; ve vesmíru zárodky kup galaxií a buněčné struktury

na začátku fotonové éry 10 s - 10^3 s: primordiální nukleosyntéza: vznik lehkých jader deuteria, helia a lithia (až po He^4 , kde skončila většina neutronů)

hmotnostně 3x více H než He, ostatní – jen stopové množství

konec jaderného vývoje: chladnutí a řídnutí velmi rychlé (jaderné reakce nemohou probíhat)

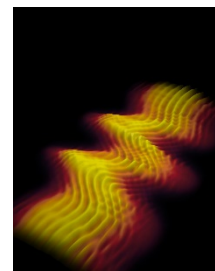
cca 70 000 let: převaha hmoty

hustota nerelativistické hmoty (atomová jádra) = hustotě relativistického záření (fotony); vytvářejí se malé struktury hmoty, dominuje chladná temná hmota – její chování a vývoj nejsou jednoznačně popsány

cca 377 000 let: rekombinace

na počátku H, He ionizovány, bez elektronů; fotony rozptylovány na volných elektronech vesmír se rozpínal => řídnul a chladnul => elektrony zachytávány ionty => hustota vesmíru klesá, tvorba neutrálních atomů H a He (rekombinace) při 3000 K => fotony se naposledy rozptýlily na elektronech => nesou informaci o tehdejší rozdělení látky ve vesmíru; fotony mohou volně cestovat => **vesmír zprůhledně!** = oddělení záření od látky
reliktní záření = otisk tehdejšího vesmíru!

konec fotonové éry – vesmír průhledný ale prázdný – bez zdrojů záření!



Temný věk

= doba mezi vznikem reliktního záření a zrodem prvních hvězd, které začnou epochu reionizace atomů

doba trvání: odhadem 150 milionů až 800 milionů let po VT;

teplota vesmíru – cca 1000 K

důkaz konce: výskyt ionizovaného vodíku, který vesmír zneprůhlednil; k ionizaci vodíku mohly přispět pouze hvězdy, které se po období temnoty začaly houfně objevovat.

pozorování:

první hvězdy - teoreticky pozorovatelné, ale zčervenalé a velmi slabé
2016 – objev galaxie GN-z11 – galaxie, která musela existovat během

následující reionizační éry

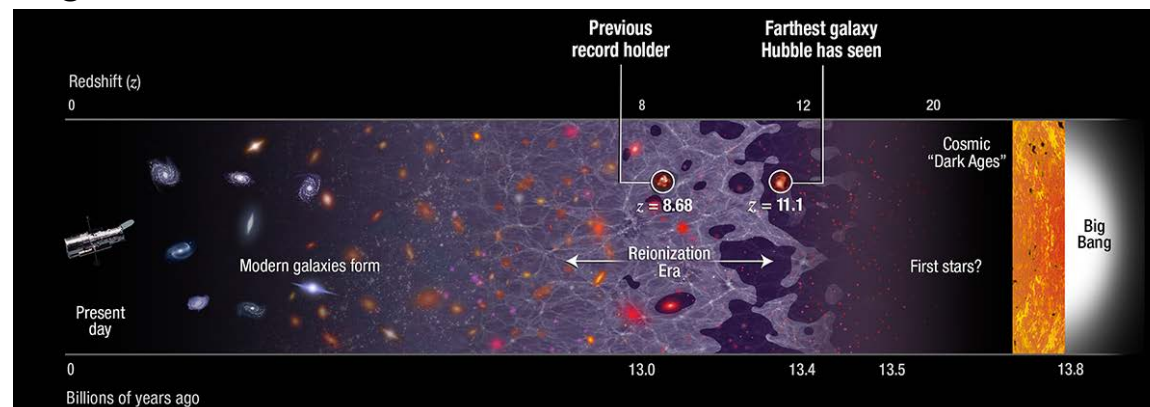
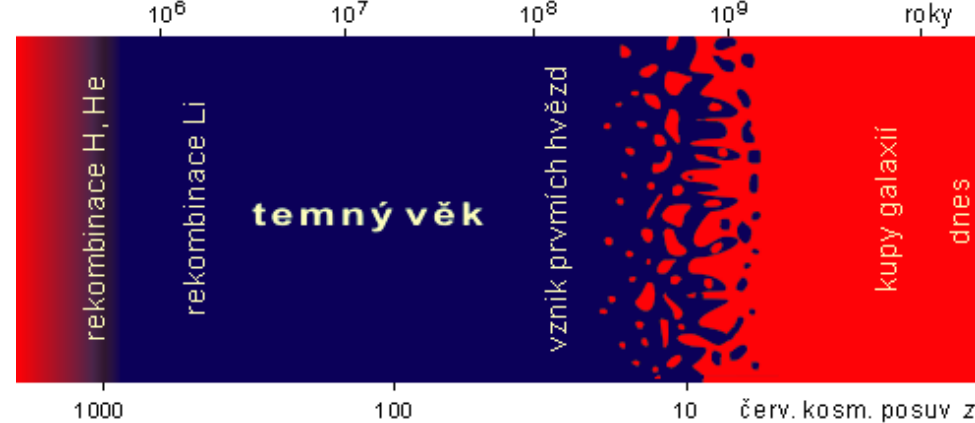
=> okno do této doby

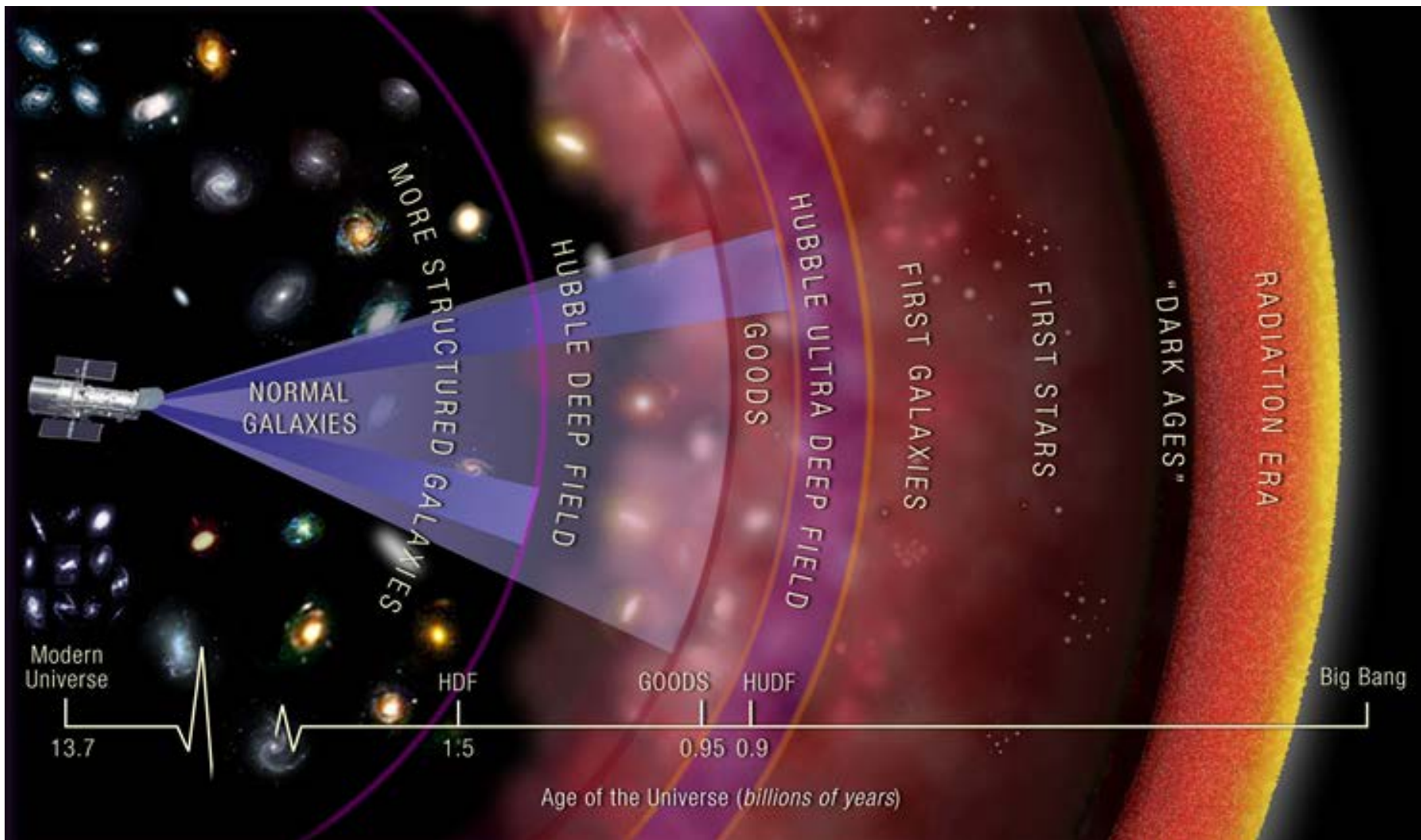
první hvězdy

– cca 13 mld. let staré,

ale

HD140283 - Metuzalém





Od období temna po současnost

Vytváření struktur

tvorba hierarchická – od malých k větším
první struktury – kvasary = jasné aktivní galaxie

Reionizace: 150 milionů - 1 miliarda let

první hvězdy a kvasary, jejich intenzivní záření reionizuje okolní vesmír
od té doby je většina viditelného vesmíru tvořena plazmatem

Tvorba hvězd

první hvězdy (populace III) – začátek procesu přeměny lehkých prvků na těžší

Tvorba galaxií

velké objemy hmoty kolabovaly => vznik galaxií
vznik hvězd populace II a později hvězd populace I
2016 galaxie GN-z11 ve vzdálenosti 13.4 Gly (3 % současného stáří vesmíru)
Hubble Ultra Deep Field – malé galaxie, které se spojují ve větší (13 Gly, jen 5% současného stáří vesmíru);
tenký disk Galaxie zformován před 8.8 ± 1.7 mld let

Vytvoření skupin, kup a nadkup

gravitační interakce – galaxie se shlukují do skupin, kup, nadkup
utváření Sluneční soustavy: před 8 mld let, naše Slunce před 4.56 mld let

Současnost

nejlepší odhad stáří vesmíru: 13.80 ± 0.02 mld let od velkého třesku

největší struktura ve vesmíru je „cosmic web“ – pěnová struktura;

rozpínání vesmíru se zrychluje =>

- žádné další inflační struktury nepřekročí horizont událostí
- nevytvoří se žádné takové gravitačně vázané struktury

Výhled do budoucnosti



korektní předpovědi za hranicemi současné fyziky => ve hře různé scénáře

Velké zamrznutí (Big freeze): 10^{14} let a dále

nejpravděpodobnější, vyplývá ze současné expanze

za cca 10^{14} let – existující hvězdy vyhoří, tvorba nových hvězd ustane,
vesmír potemní

za mnohem delší dobu - galaxie a černé díry se vypaří; částice se rozpadnou
vesmír ve stavu vysoké entropie;

neví se, zda dosáhne termodynamické rovnováhy

Velký křach (Big Crunch): 100+ mld let od současnosti

hustota energie skryté energie záporná nebo vesmír uzavřený => rozpínání

vesmíru se obrátí a vesmír se bude smršťovat do horkého, hustého stavu;

možná část oscilujícího, cyklického vesmíru

podle současných pozorování nepravděpodobný scénář

Výhled do budoucnosti

Velké rozervání (Big Rip): 20+ mld let od současnosti

2003 – Robert Caldwell

hustota skryté energie roste s časem bez omezení (tzv. phantom energy - nepodobá se žádné známé formě energie) => rychlost rozpínání vesmíru se zvětšuje => gravitačně vázané systémy (kupy galaxií, galaxie a nakonec i Sluneční soustava) budou rozděleny; nakonec rozpínání tak rychlé, že budou roztrhány i atomy a molekuly => vesmír skončí jako nezvyklý druh gravitační singularity, když dosáhne rychlost rozpínání nekonečné velikosti

Metastabilita vakua

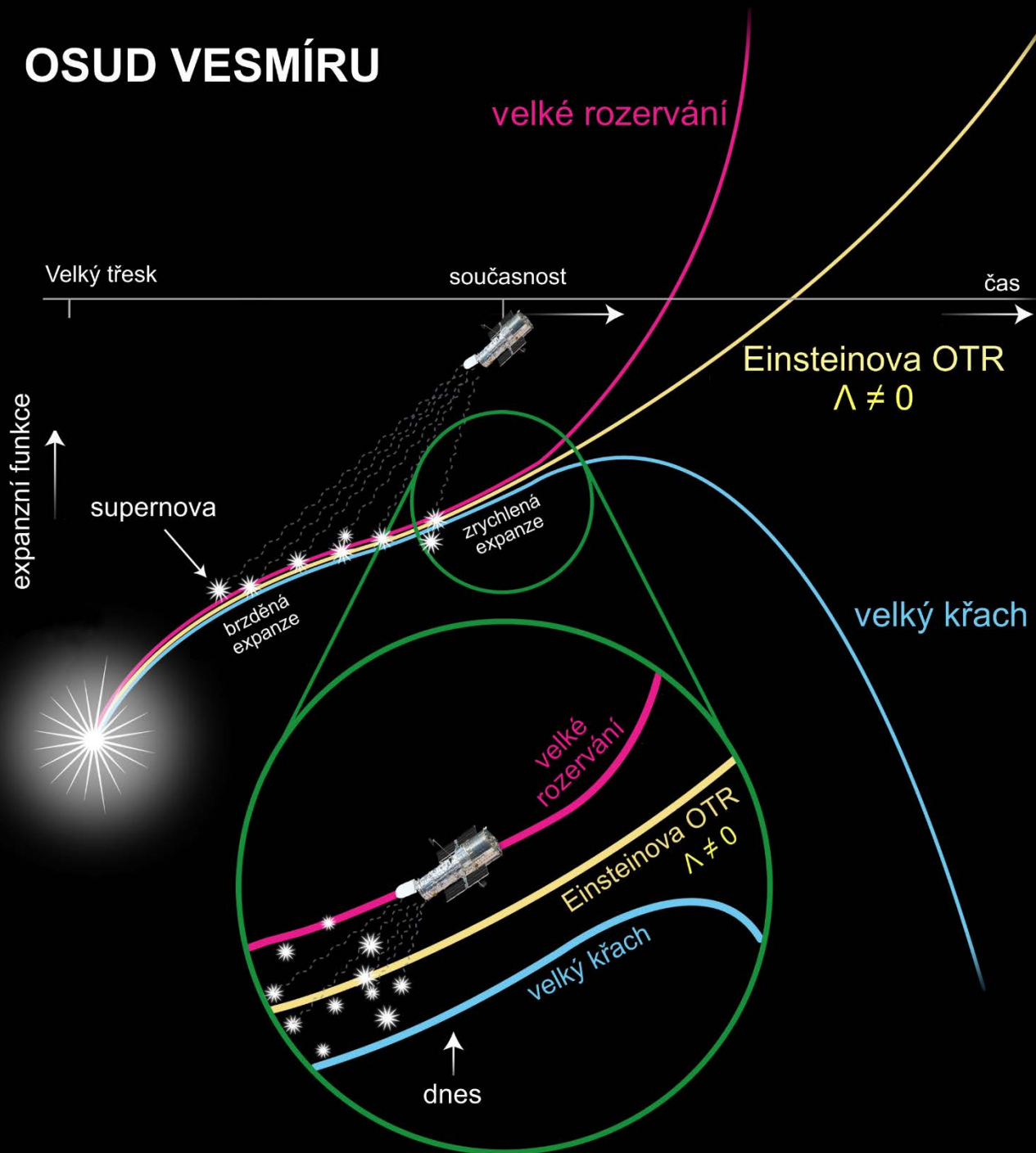
náš vesmír v dlouhotrvajícím falešném vakuu => malá oblast vesmíru může protunelovat do stavu s nižší energií => okamžitě se zničí všechny struktury v této malé oblasti a oblast expanduje takřka rychlostí světla

Tepelná smrt (Heat death): $10^{150}+$ let od současnosti

možný závěrečný stav vesmíru za cca 10^{150} let – vesmír nemá žádnou volnou termodynamickou energii, aby umožnil pohyb nebo život \equiv dosáhne maximální entropie

hypotéza tepelné smrti vesmíru pochází z 50. let 19. st. - William Thomson (lord Kelvin)

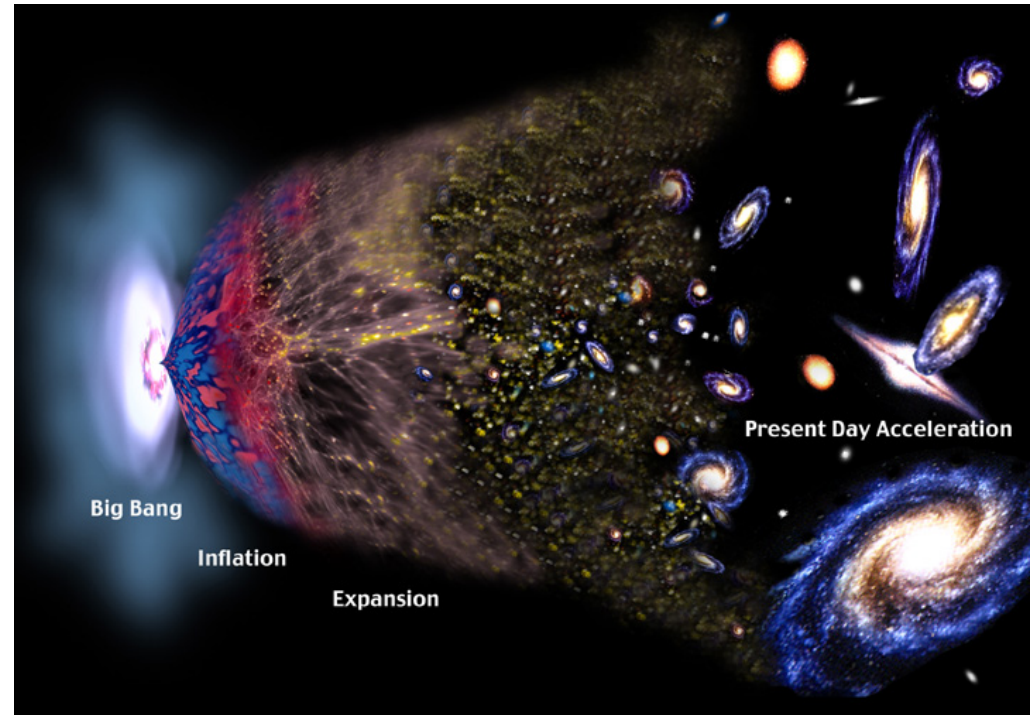
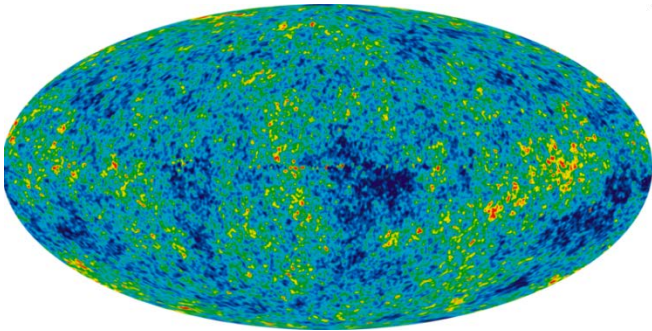
OSUD VESMÍRU



V jakém vesmíru žijeme?

Lze to zjistit?

V principu ano.

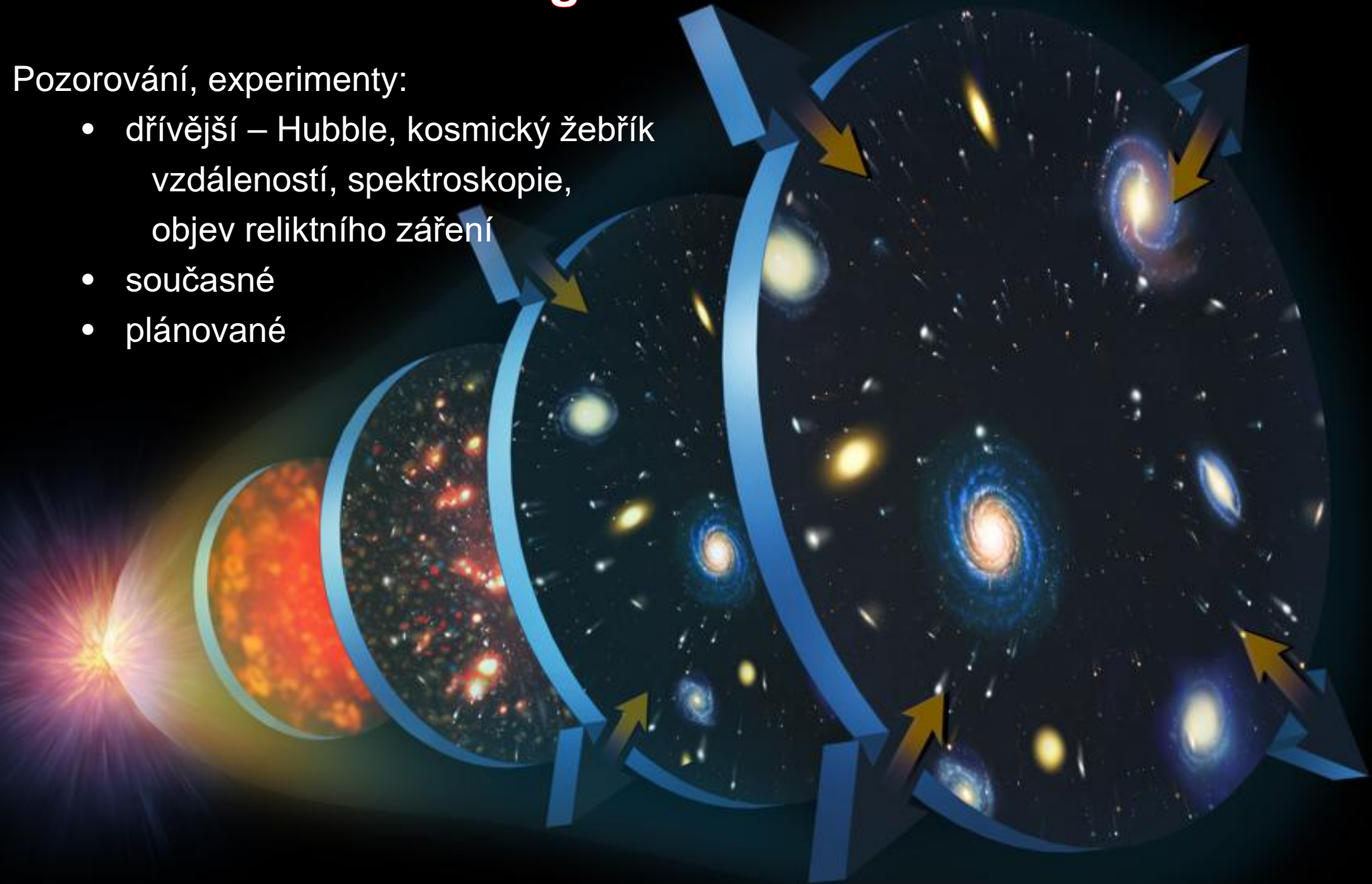


1. dle vzdáleností kup galaxií
x problém určování přesných vzdáleností kup galaxií
2. podle křivosti vesmíru – lze měřit z fluktuací teploty reliktního záření
3. podle hustoty vesmíru
uzavřený vesmír => střední hustota látky > *kritická* (odpovídá 1 atomu vodíku asi v jednom dm^3 prostoru)
x ve vesmíru registrujeme našimi přístroji jen několik procent hmoty
(paradox skryté hmoty - znám už od 30. let 20. století)

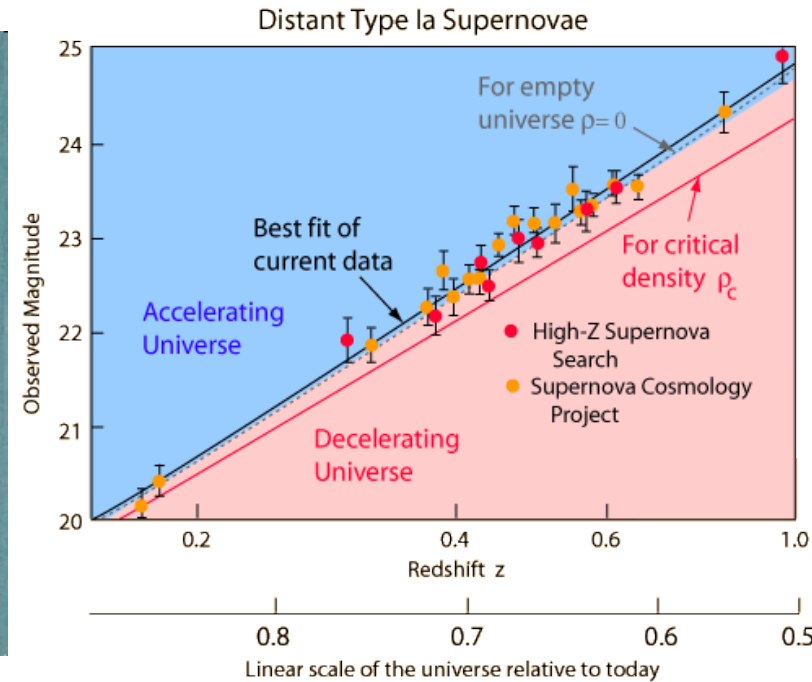
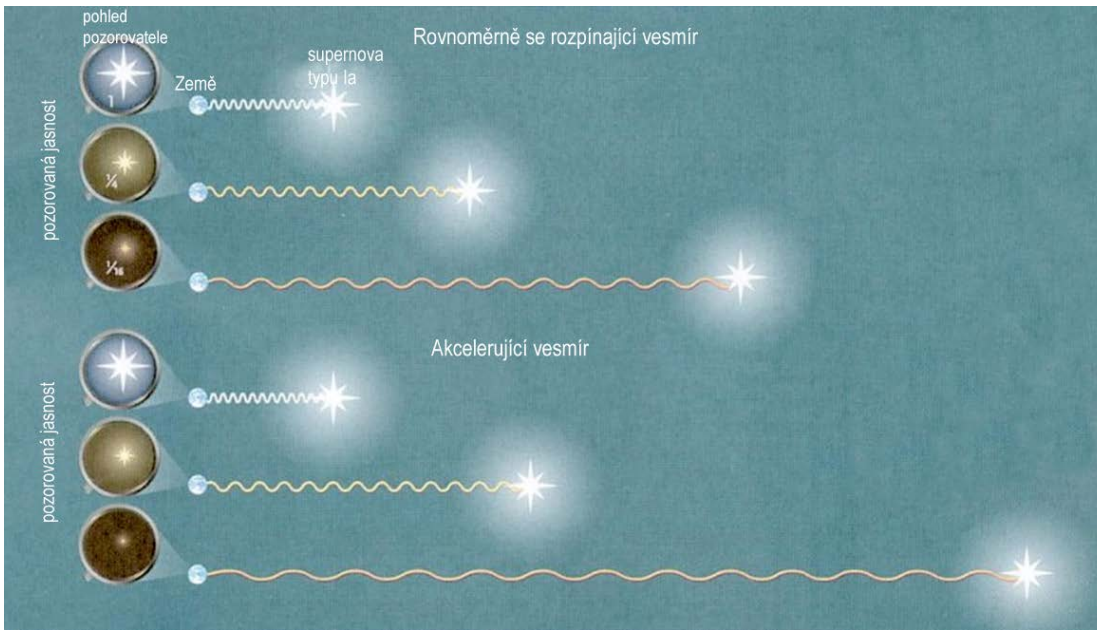
Pozorovací kosmologie

Pozorování, experimenty:

- dřívější – Hubble, kosmický žebřík vzdáleností, spektroskopie, objev reliktního záření
- současné
- plánované



Akcelerující vesmír



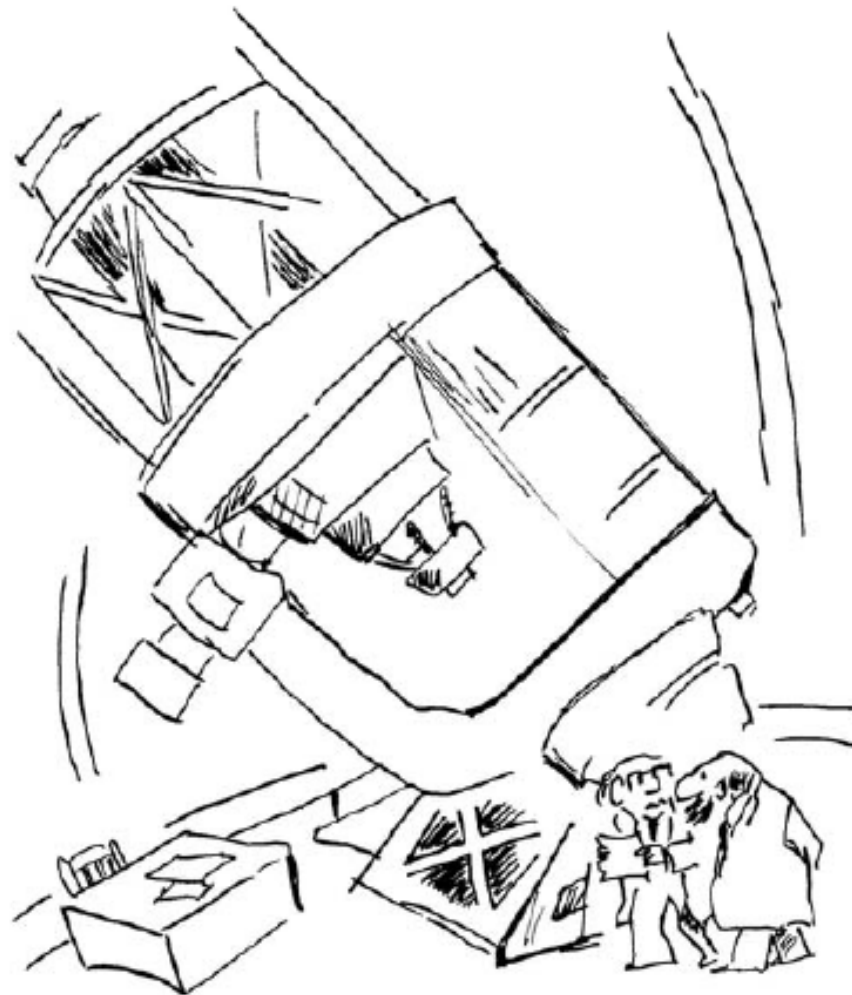
1998 - dva týmy – ze studia supernov typu Ia rozpínání vesmíru zrychluje

Nobelova cena za fyziku 2011

2014, 2015 – různé typy SN Ia => zrychlení rozpínání je menší



Saul Perlmutter, Adam Riess, Brian Schmidt



JEDINÉ, CO VE VESMÍRU NEEXPANDUJE,
JE MŮJ FLAT!

(Podle *Mercury* May-June 1981, 88.)

Červený posun – přehlídkové projekty

1977 – 1982 CfA Redshift Survey

1997-2001 2MASS (Two Micron All-Sky Survey)

1997-2002 - výsledky 2dF Galaxy Redshift Survey – určení velkých struktur v jedné části vesmíru, horní mez pro hmotnost neutrin, hodnota hustotního parametru Ω nerelativ. hmoty

od 2000 - Sloan Digital Sky Survey (SDSS) - 100 milionů objektů, pro galaxie z až 0.4, detekce kvasarů až za $z = 6$;

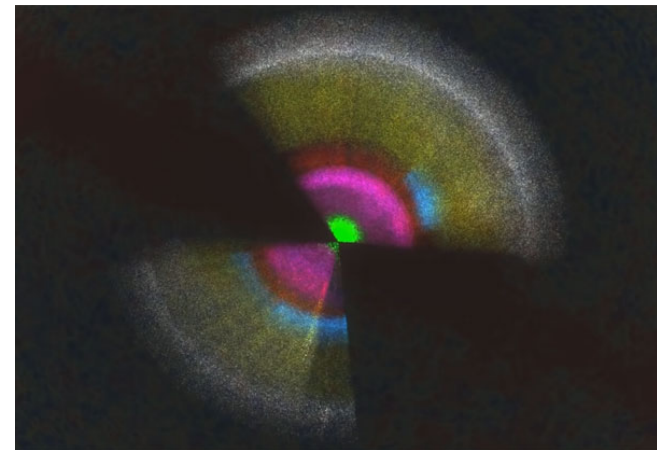
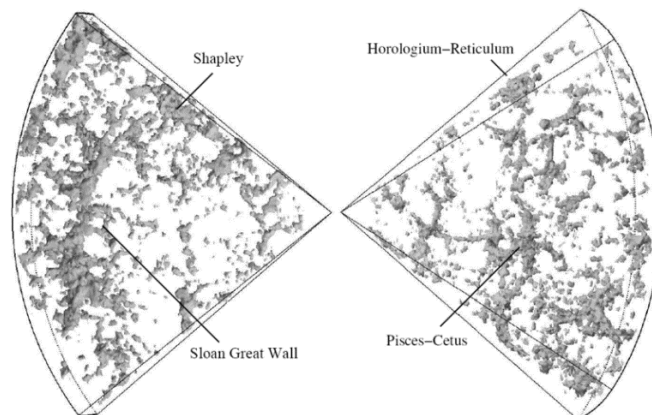
(e)BOSS (The Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey) – od 2009

2001-2004 DEEP2 Redshift Survey – Keckovy dalekohledy, doplňující k SDSS a 2dF

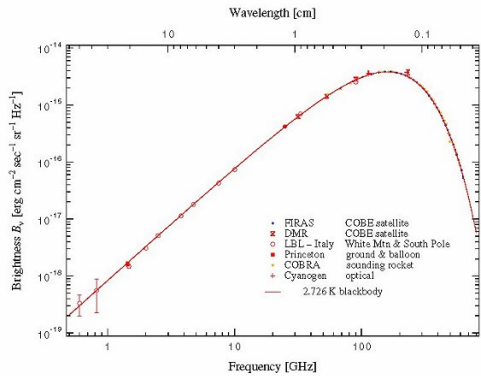
2001-2009 6dF Galaxy Survey

od 2013 – DES (Dark Energy Survey)

GOODS: Great Observatories Origins Deep Survey – 5 observatoří v kosmu (Spitzer, HST, Chandra, Herschel, XMM-Newton)



Reliktní záření



1965



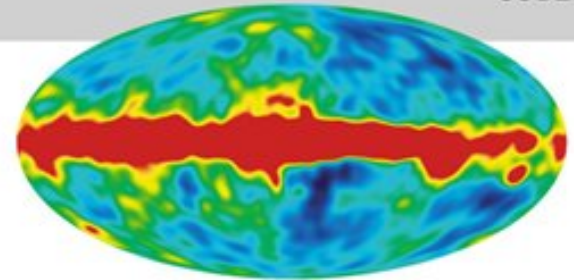
Penzias and Wilson



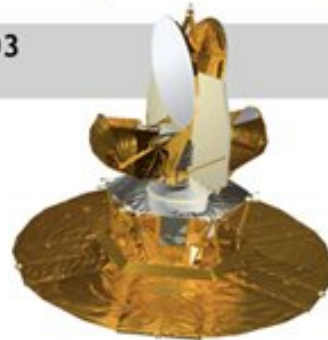
1992



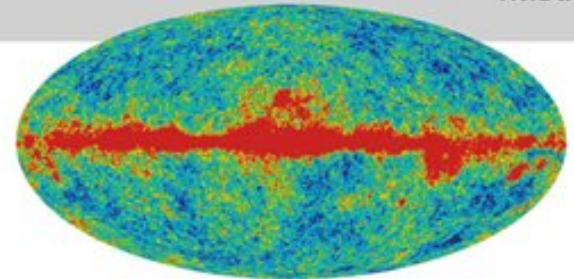
COBE



2003



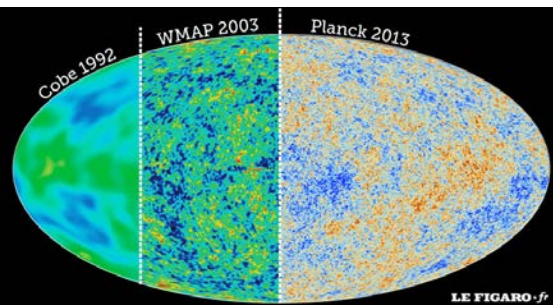
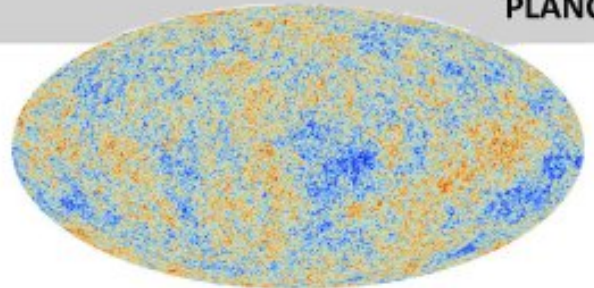
WMAP



2015



PLANCK

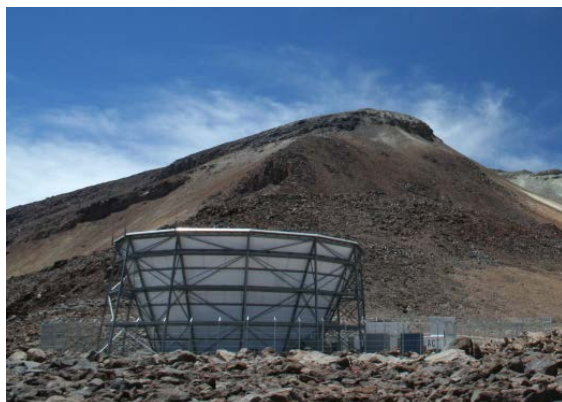


Reliktní záření

Pozemská měření

South Pole Telescope (SPT) – 10m dalekohled na Amundsen-Scott South Pole Station, Antarktida;

pozorování v oborech mikro-, mm- sub-mm- vln elmag. spektra



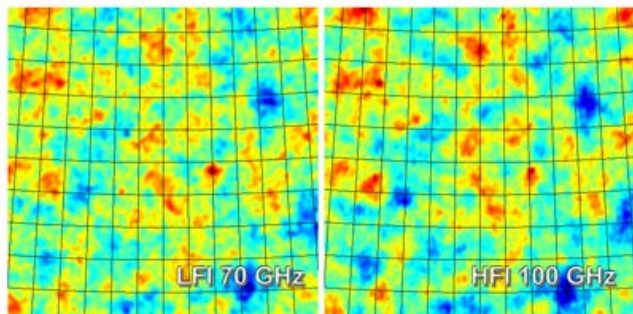
Atacama Cosmology Telescope

(ACT) - 6m dalekohled na Cerro Toco v poušti Atacama (sever Chile)

mikrovlny

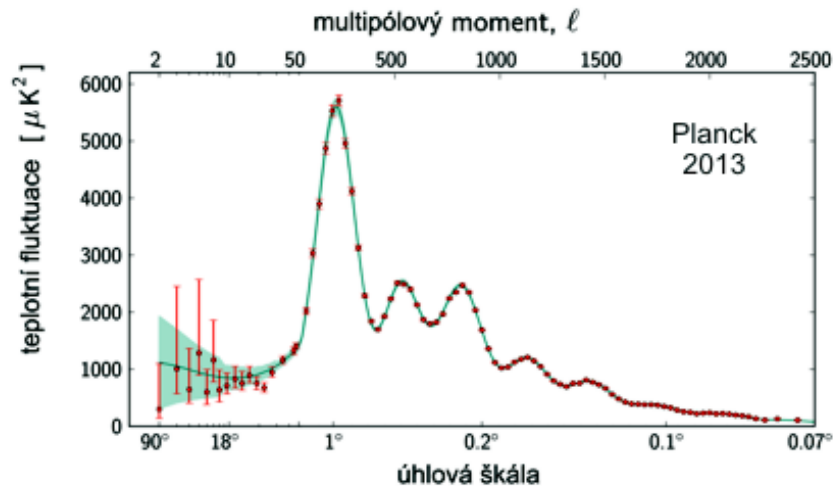
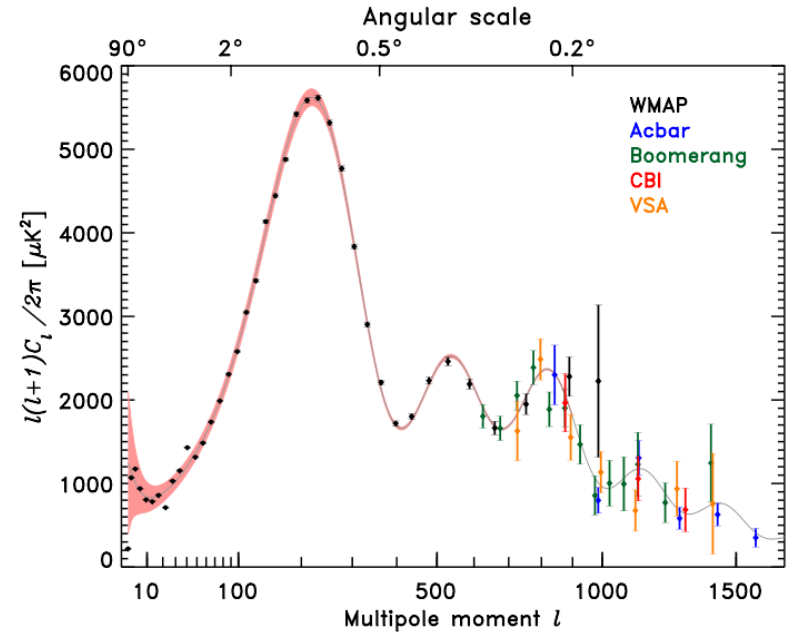
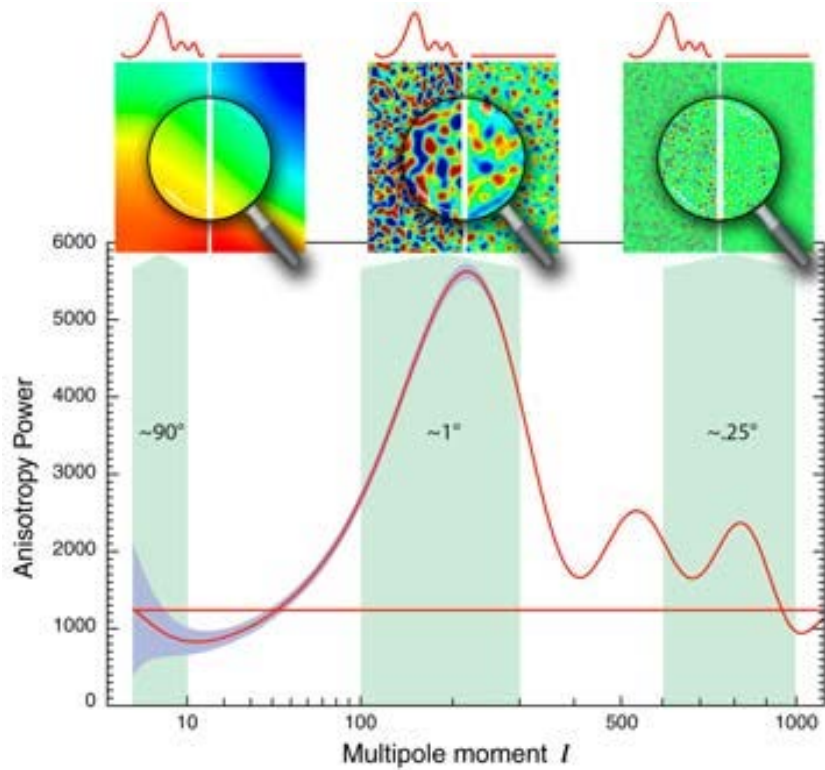
Balónová měření

projekty SPIDER, EBEX, BOOMERang a další



souhrn všech projektů zkoumajících CMB
<http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/expt/>

Fluktuace reliktního záření



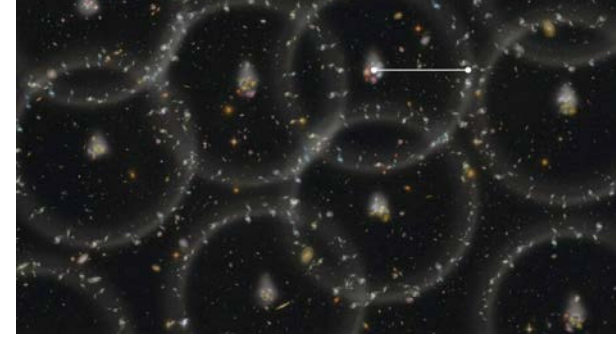
1. vrchol – úhlově největší fluktuace – hustší oblasti gravitačně přitahují okolní hmotu, která je akustickými oscilacemi dále zahřívána a stlačována

2. vrchol – z doby před oddělením záření od látky; některé hustší oblasti dosáhly max. teploty a začaly se tlakem záření rozpínat a ochlazovat (proti gravitaci)

Poměr 1. a 2. vrcholu \Rightarrow poměr baryonové a fotonové složky ve vesmíru

Baryonové akustické oscilace

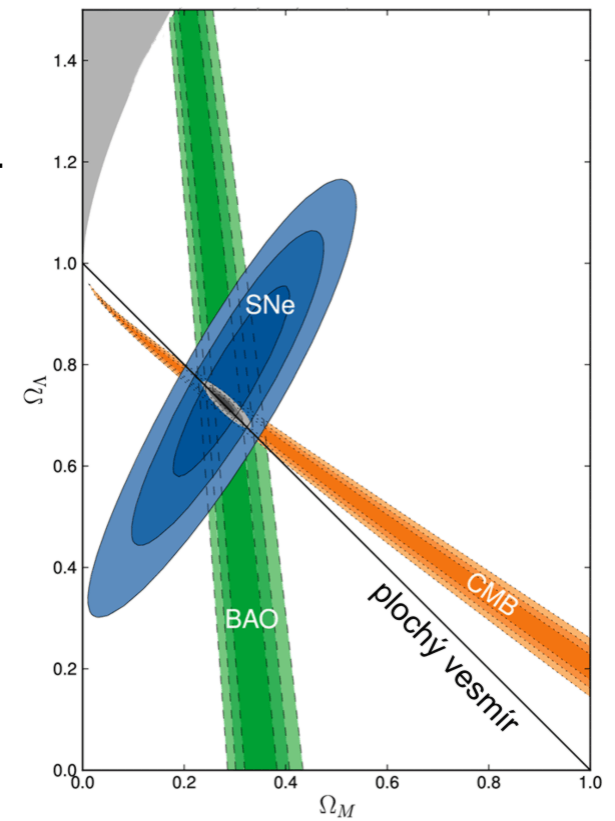
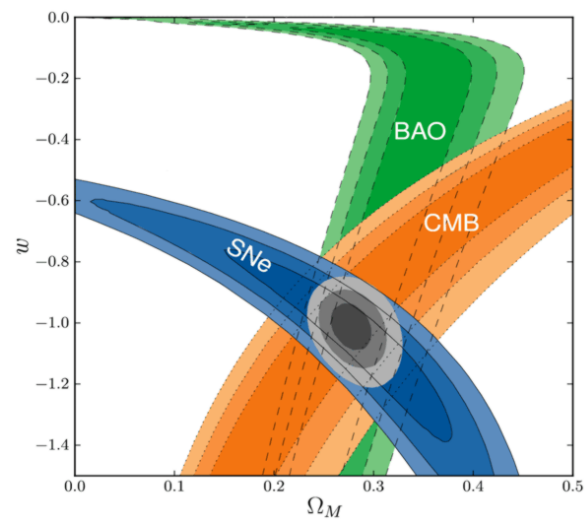
BAO (Baryonic Acoustic Oscillations)



= pravidelné periodické fluktuace v hustotě viditelné baryonické hmoty (způsobeno akustickými vlnami v raném vesmíru)
původní fluktuace v reliktním záření => velkorozměrové struktury vesmíru

BAO slouží jako "standardní pravítko" pro délkovou škálu v kosmologii (délka ~490 Mly v dnešním vesmíru)

měření BAO – pomoc při pochopení podstaty skryté energie (akcelerace vesmíru) stanovením mezí kosmologických parametrů



Další pozorování

Temná hmota

řada experimentů už probíhá – Kanada, Itálie, Španělsko, USA;

detekce – skrytá hmota v Galaxii tvořena WIMPy (Weakly Interacting Massive Particles) => tisíce WIMPů musí procházet každým cm^2 Země za 1s



Kosmická neutrína

snaha o detekci neutrinového záření kosmického pozadí (podobné reliktnímu mikrovlnnému záření, ale z doby 2 s po VT) => okno do velmi raného vesmíru
problém: taková neutrína nyní velmi chladná (1.95 K) => přímo prakticky nepozorovatelná

Gravitační vlny

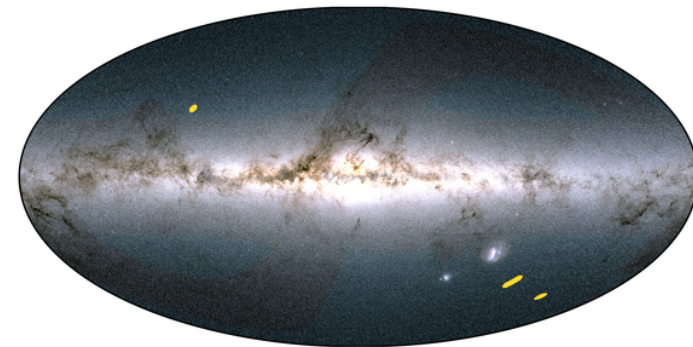
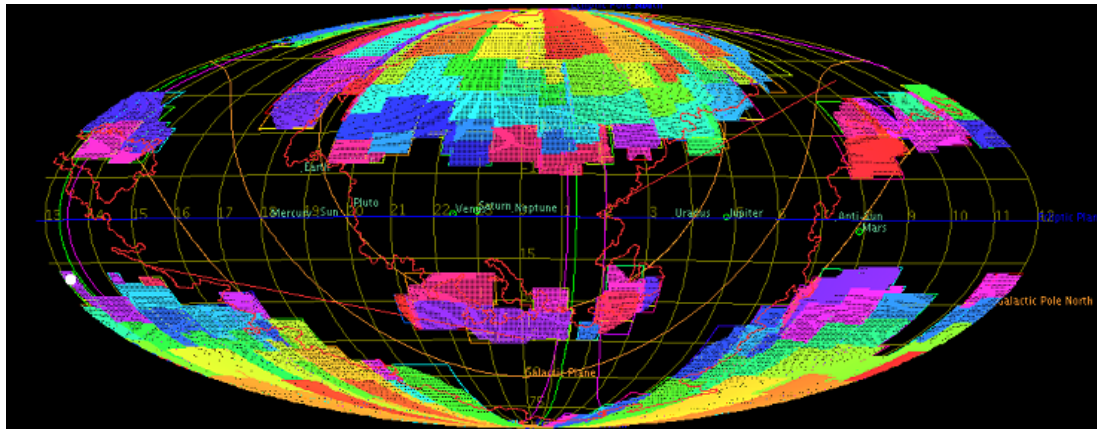
kosmické gravitační vlny pozadí – pozůstatek kosmické inflace
možnosti měření – přímo i nepřímo zkoumáním polarizace CMB
BICEP3, řada detektorů grav. vln LISA, Virgo, GEO 600, TAMA 300 ...

Družice EUCLID



<http://scifleet.esa.int/#/model/euclid>

- start 2023
 - výzkum temné hmoty a temné energie
 - širokoúhlá přehlídka – 15 000 stupňů čtverečních
 - 3 hluboká pole
- => miliardy pozorovaných galaxií a kvasarů

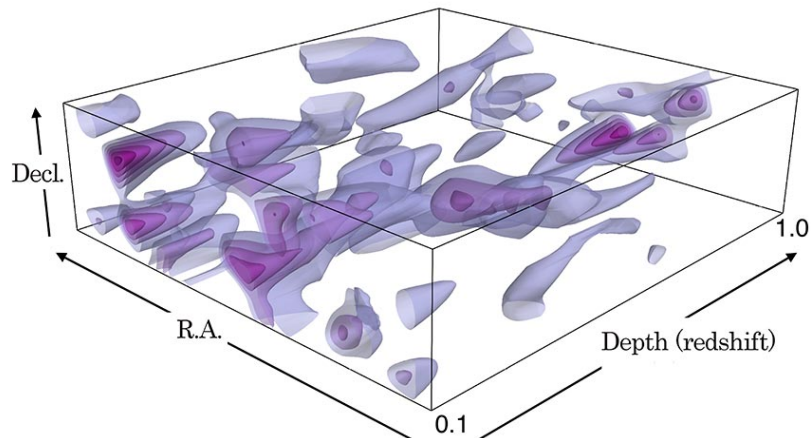


NASA – PICO (Probe of Inflation and Cosmic Origins)

předpokládaný start 2029

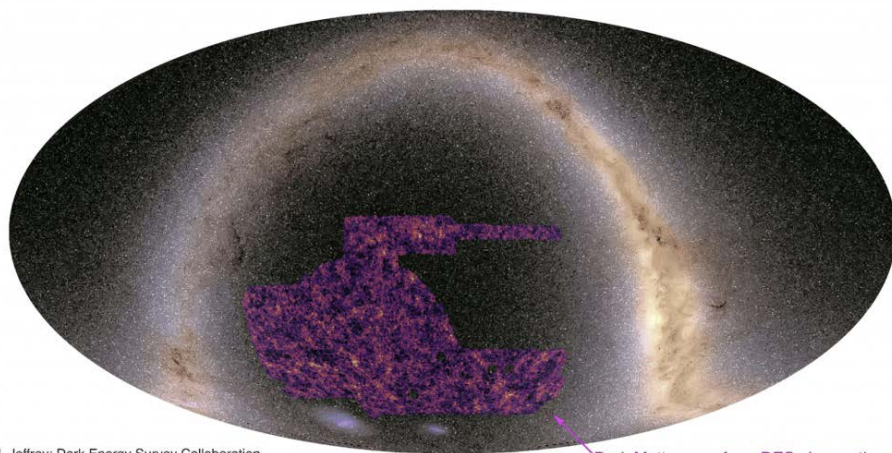
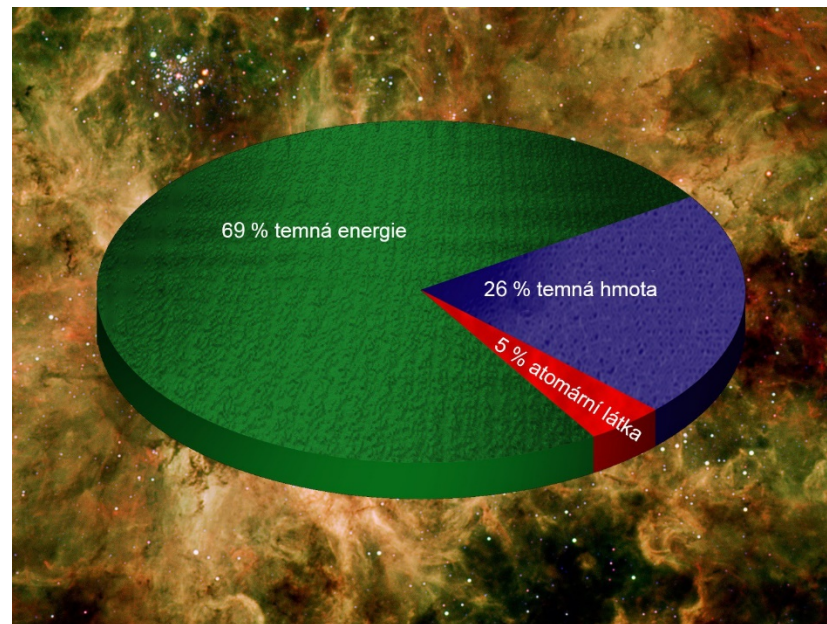
Současný vesmír

Temná hmota. temná energie



Credit: University of Tokyo/NAOJ

3D mapa rozložení temné hmoty ve vesmíru
(Miyazaki et al. 2018)



N. Jeffrey; Dark Energy Survey Collaboration

Dark Matter map from DES observations

