

# Vznik a vývoj Vesmíru

Karel Smolek

Ústav technické a experimentální fyziky, ČVUT

# Kosmologie 19. století

- Známa Sluneční soustava.
- Hvězdy.
- Mlhoviny (mezihvězdný plyn).
- Jiné galaxie nebyly známy – pozorovaly se, ale byly považovány za zvláštní mlhoviny mezihvězdného plynu se spirálním tvarem.
- Podle tehdejších představ byl Vesmír statický, neměnný.



# Einsteinova rovnice gravitace - opakování

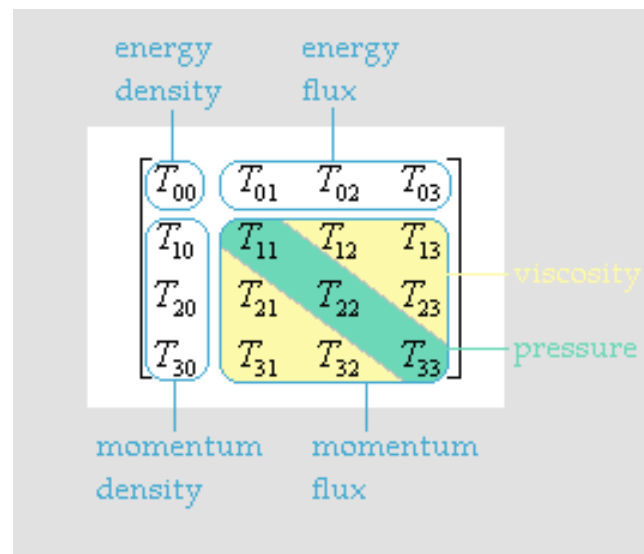
- Určuje vztah mezi parametry určující křivost prostoro-času v malém okolí daného bodu a konfigurací hmoty v tomto okolí.

Tenzor energie-hybnosti = tabulka 16 čísel vyjadřujících hustotu energie, hustotu hybnosti, tok energie a hybnosti vytvářené hmotou v okolí daného bodu.

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi}{c^4} \kappa T_{\mu\nu}$$

Newtonova gravitační konstanta

Einsteinův tenzor = tabulka 16 čísel určujících informace o křivosti v daném bodě, tedy o metrice.



- Einstein postuluje, že hmota se v prostoro-času pohybuje po „rovné“ dráze – geodetice.
- Řešením Einsteinovy rovnice lze určit křivost prostoro-času a pohyb hmoty v něm.

# Einsteinova rovnice gravitace a kosmologie

- Předpokládáme, že v globálním měřítku je rozložení hmoty ve vesmíru prakticky homogenní.
- Pokud známe množství hmoty ve vesmíru (a její rychlost), **můžeme vypočítat geometrii vesmíru a jeho vývoj** (časový vývoj metriky).
- **Einsteinova rovnice však statické řešení nemá.** Podle Einsteinova pohledu na svět byl však vesmír statický.
- **Einstein proto do své rovnice vložil další člen, úměrný metrice**



$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi}{c^4} \kappa T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

**kosmologická konstanta**

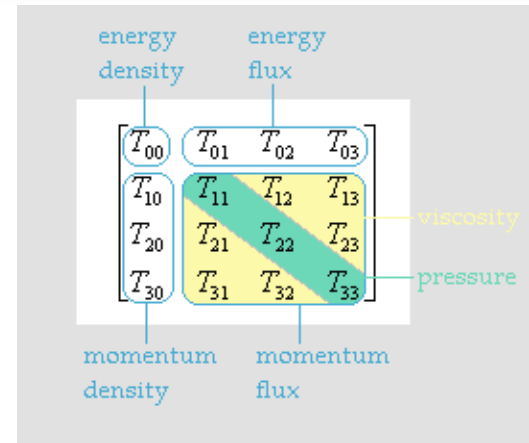
# Kosmologická konstanta

- Einsteinovu rovnici s kosmologickou konstantou

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi}{c^4} \kappa T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

přepíšeme do tvaru:

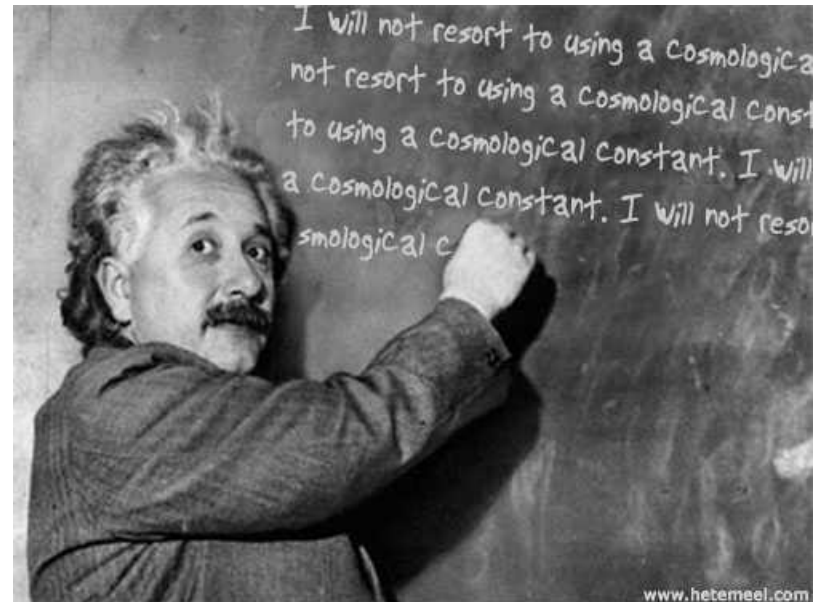
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi}{c^4} \kappa \left( T_{\mu\nu} - \frac{\Lambda c^4}{8\pi\kappa} g_{\mu\nu} \right)$$



- Tento člen přidává na diagonálu tenzoru energie-hybnosti nenulovou složku. **Nenulová kosmologická konstanta má stejný efekt, jako by vakuum mělo nenulovou hustotu energie a projevovalo se tlakem.**
- Kladná hustota energie vakua se projevuje jako záporný tlak způsobovaný vakuem (tendence rozpínat se).
- Záporná hustota energie vakua se projevuje jako kladný tlak způsobovaný vakuem (tendence stlačovat se).

# Kosmologická konstanta a kosmologie

- Zavedení nenulové kosmologické konstanty do Einsteinovy rovnice bylo čistě umělé, protože v Einsteinově době nebylo nic známo o tom, že by vakuum mohlo mít vlastní hustotu energie.
- Ukázalo se, že **po zavedení nenulové kosmologické konstanty má Einsteinova rovnice pro Vesmír také statické řešení, toto řešení však je nestabilní** – drobná změna v konfiguraci hmoty ve Vesmíru způsobí nestacionární vývoj Vesmíru – rozpínání či smršťování.
- Později se ukázalo, že **Vesmír se rozpíná a tedy nemůže být statický.**
- Einstein své účelové vložení nenulové kosmologické konstanty do své rovnice považoval za největší omyl svého života.
- Na konci 20. století jsme však zjistili, že **v něčem se však Einstein přece jenom nemýlil.**

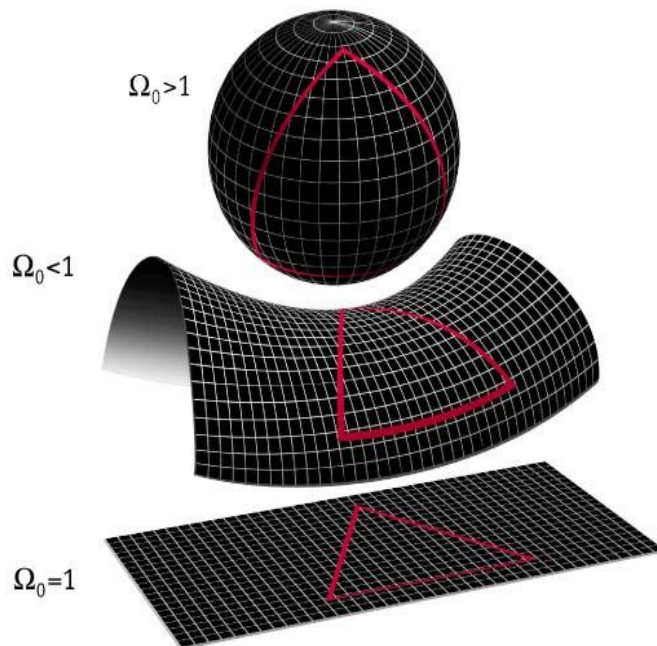


# Friedmannovy modely Vesmíru

- V roce 1922 našel řešení Einsteinovy rovnice pro časový vývoj Vesmíru.
- V závislosti na celkové hustotě energie ve Vesmíru jsou tři možnosti globální geometrie Vesmíru:
  - ✓ Hyperbolická – pokud je hustota menší, než kritická.
  - ✓ Eukleidovská – pokud je hustota rovna kritické hustotě.
  - ✓ Eliptická – pokud je hustota energie větší, než kritická.



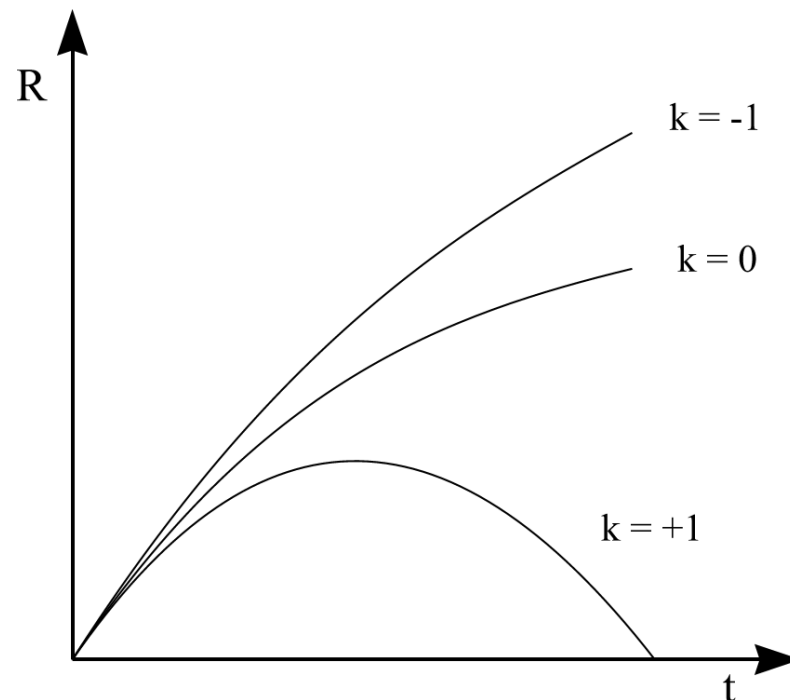
Alexander Friedmann  
(Rusko, 1888-1925)



- Geometrie Vesmíru ještě neurčuje jeho topologii – Eukleidovský Vesmír může být konečný i nekonečný.

# Friedmannovy modely Vesmíru

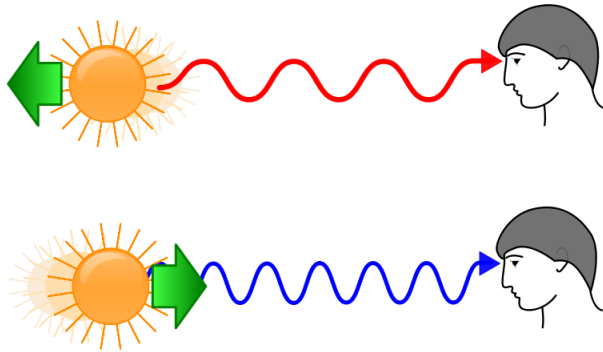
- **Časový vývoj Vesmíru je nestacionární** – Vesmír netrvá věčně, ale vznikl při ději, který nazýváme **Velký třesk** (Big Bang) a od té doby expanduje. Nejedná se však o explozi hmoty, která expanduje do prázdného Vesmíru, ale o rozpínání vlastního prostoru – každé dva body ve Vesmíru se od sebe vzdalují.
- Proti rozpínání působí gravitace hmoty.
- V závislosti na množství hmoty a energie ve Vesmíru se rozpínání může postupně zastavit a přejít ve smršťování. Nebo síla gravitace není dost silná a Vesmír se bude rozpínat věčně.



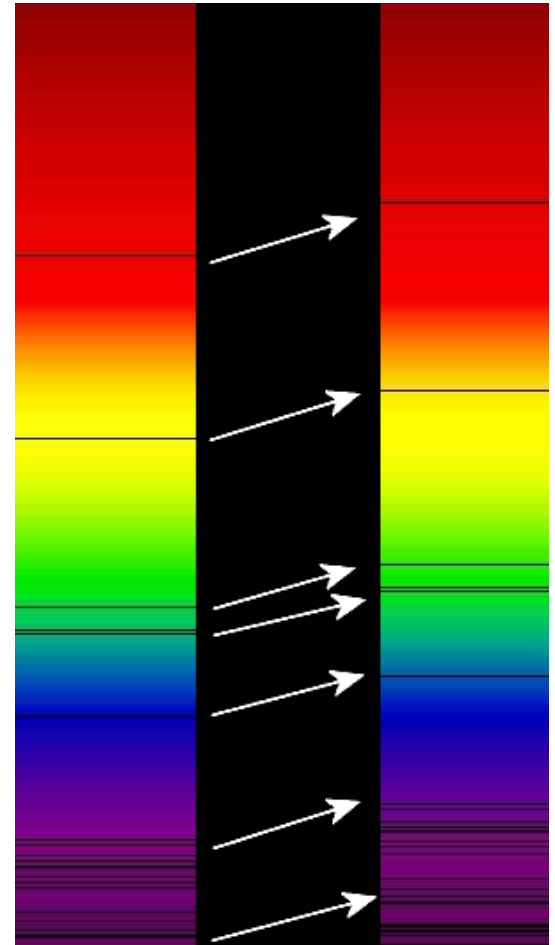


# Rudý posuv

- Podobně jako zvukové vlny, také pozorované **elektromagnetické vlnění mění svou vlnovou délku v závislosti na rychlosti pohybu zdroje** – Dopplerův jev.



- Pokud se zdroj vzhledem k pozorovateli přibližuje, vlnová délka se zkracuje (modrý posuv). Pokud se zdroj vzdaluje, vlnová délka se prodlouží (červený posuv).
- Podobně se posouvají k červenému či k modrému konci spektra i spektrální čáry pozorované ve viditelné oblasti spektra (přesně definované vlnové délky elmag. záření, které atomy konkrétních prvků emitují či absorbují). Toho lze využít při měření rychlosti vesmírných objektů.



# Rudý posuv vzdálených objektů

- Edwin Hubble pracoval na ve své době největším Hookerově teleskopu.
- V letech 1923-24 v pozorovaných „spirálních mlhovinách“ identifikoval cefeidy – proměnné hvězdy, jejichž velká svítivost je silně korelovaná s periodou proměnlivosti. Pomocí nich vypočítal vzdálenosti těchto „mlhovin“. Zjistil, že jejich vzdálenost je nesrovnatelně větší, než vzdálenosti všech ostatních pozorovaných objektů. Jedná se tedy o vzdálené systémy hvězd, podobné naší Galaxii.
- Se svým asistentem Milton L. Humasonem měřil rudý (modrý) posuv vzdálených galaxií. Zkombinovali svá a cizí měření (celkem 46 galaxií) a zjistili, že **vzdálenější galaxie v průměru vykazují větší rudý posuv, než galaxie bližší**. Pokud interpretujeme rudý posuv jako míru vzdalování, vzdálenější galaxie se pak od nás vzdalují rychleji než galaxie bližší.



Edwin Hubble  
(USA, 1889-1953)



Hookerův teleskop  
-průměr zrcadla 2.5 m

# Hubbleův zákon

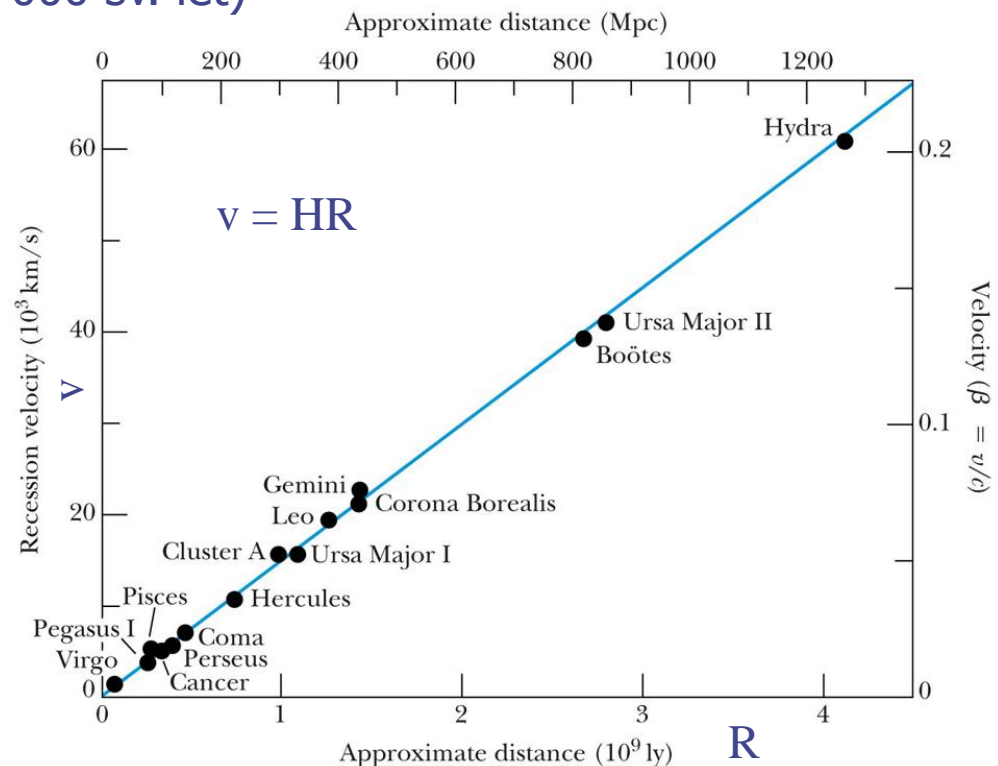
• Hubble s Humasonem proložili naměřenou závislostí rychlosti vzdalování na vzdálenosti galaxie přímkou. **Rychlost vzdalování vzdálené galaxie od nás je podle jejich měření přímo úměrná vzdálenosti této galaxie od nás.** Konstanta úměrnosti se nazývá Hubbleova konstanta. Tento tzv. Hubbleův zákon byl opublikován v roce 1929.

• Přesná měření z poslední doby uvádí hodnotu Hubbleovy konstanty  $H = 71.4 \text{ (km/s)/Mpc}$ . (Mpc – 3 262 000 sv. let)

• Protože naše pozice ve Vesmíru není ničím výjimečná, uvedený Hubbleův zákon platí pro vzdalování libovolných dvou vzdálených objektů ve Vesmíru.

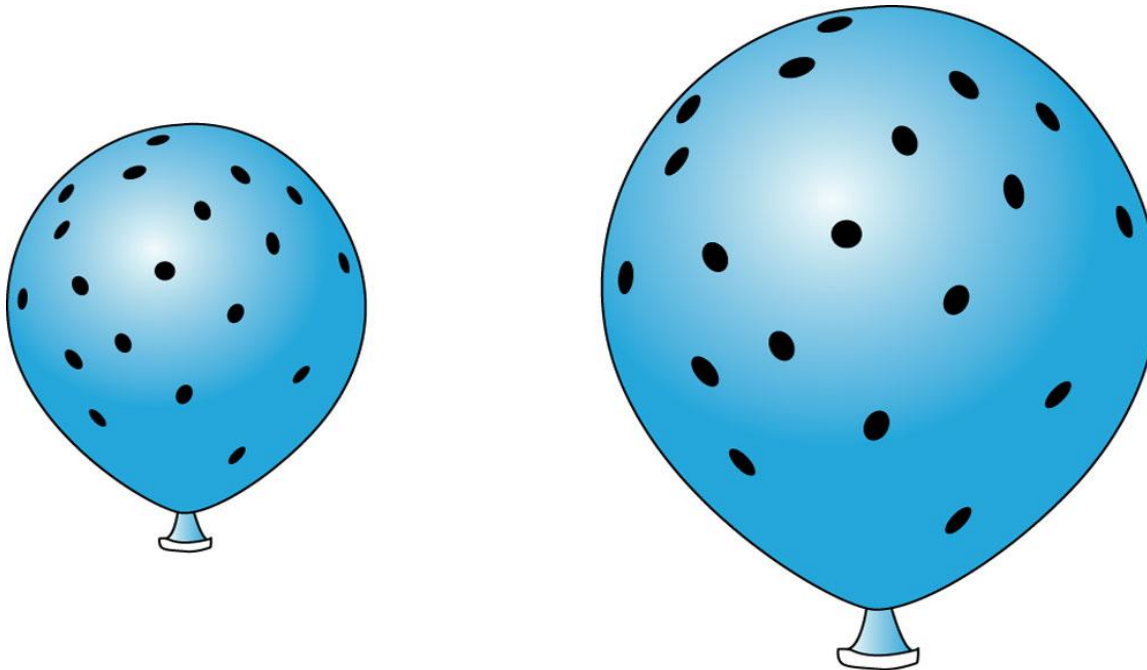
• Hubbleovy výsledky byly prvním důkazem **rozpínání Vesmíru**.

• Pozorovaný **rudý posuv nelze interpretovat jako Dopplerův jev** – rudý posuv je způsoben expanzí prostoru, ve kterém se šíří elmag. záření.



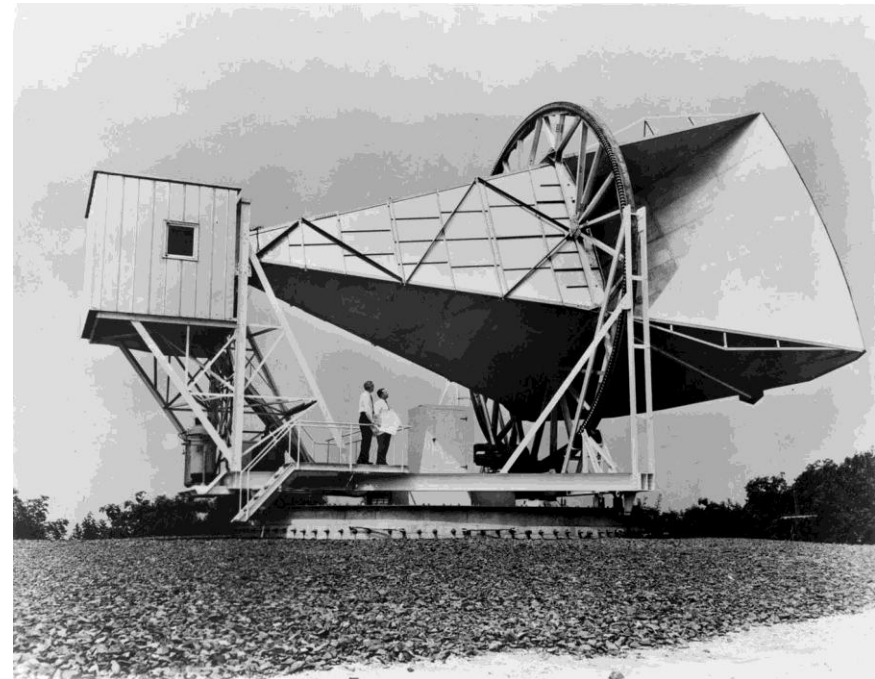
# Expandující Vesmír

- Vzájemné vzdálenosti mezi galaxiemi se zvětšují úměrně jejich vzájemné vzdálenosti.
- Ve Vesmíru **není žádný střed**, od kterého by se vše vzdalovalo.
- Okamžik v minulosti, kdy byl Vesmír v jednom bodu, který se začal rozpínat, se nazývá Velký třesk (Big Bang).



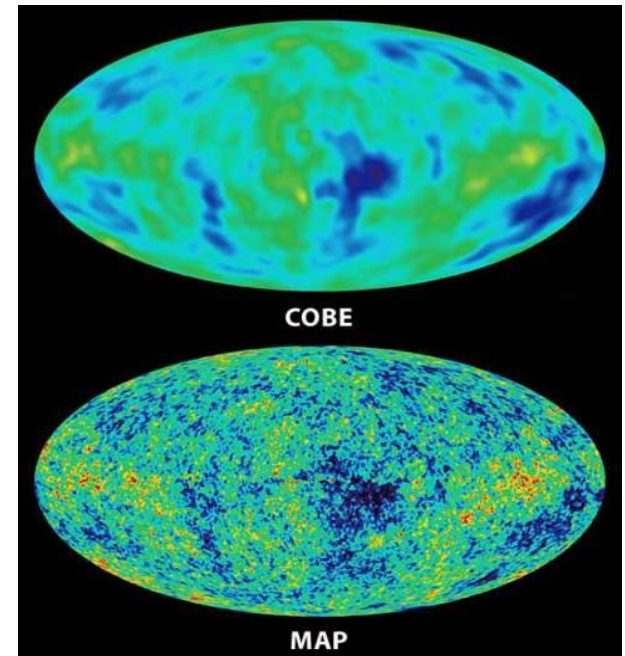
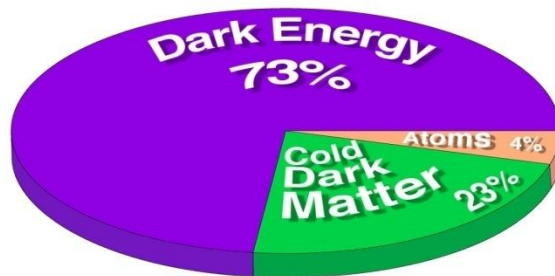
# Reliktní záření

- V roce 1965 pozoroval Penzias a Wilson **mikrovlnné záření**, které k nám přichází z kosmu. Spektrum tohoto záření odpovídá záření absolutně černého tělesa o teplotě 3 K, **přichází k nám izotropně** – ze všech směrů stejně.
- Toto izotropní kosmické mikrovlnné pozadí bylo předpovězeno teorií Velkého třesku. Je to vlastně zbytkové elektromagnetické záření, které zbylo ve Vesmíru z doby, kdy byl Vesmír velmi hustý a žhavý. Označuje se jako **reliktní záření**.
- Obraz Vesmíru pozorovaný v mikrovlnné oblasti spektra je vlastně obrazem Vesmíru v době, kdy Vesmír ochladl a zřidnul natolik, že všudypřítomné elektromagnetické záření prakticky přestalo být ovlivňováno žhavou hmotou – **vývoj elektromagnetické složky Vesmíru se oddělil od vývoje hmoty**. To nastalo asi **380 000 let po Velkém třesku**. V té době měl Vesmír teplotu asi 3 000 K.
- Vlivem rozpínání Vesmíru se spektrum reliktního mikrovlnného záření posunulo k delším vlnovým délkám – odpovídajícím teplotě 3 K.



# Anizotropie reliktního záření













- První měření ukazovala, že reliktní záření k nám přichází ze všech směrů stejné.
- Velmi přesná družicová měření později pozorovala **drobné anizotropie – oblasti nepatrně teplejší a chladnější**.
- Teplejší oblasti odpovídají oblastem s trochu vyšší hustotou, z tohoto prvotního materiálu se vlivem gravitačního smršťování později vyvinuly galaxie a hvězdy.
- Z velikosti anizotropie reliktního záření bylo možno vypočítat mnoho vlastností Vesmíru.
- Nejpřesnější měření – (Wilkinson) Microwave Anisotropy Probe:
  - ✓ Stáří Vesmíru: 13.7 miliard let (chyba < 1%)
  - ✓ Plochá Eukleidovská geometrie
  - ✓ Většinu Vesmíru tvoří temná energie a temná hmota.



- Temná energie odpovídá vlastní energii vakua – kosmologická konstanta je nenulová!
- **Vesmír expanduje**, od doby 7 miliard let po Velkém třesku **se rychlost expanze v čase zvětšuje**.

# Standarní model elementárních částic - opakování

## matter particles

	1st gen.	2nd gen.	3rd gen.
Q U A R K	 <i>u</i> <i>up</i>	 <i>c</i> <i>charm</i>	 <i>t</i> <i>top</i>
	 <i>d</i> <i>down</i>	 <i>s</i> <i>strange</i>	 <i>b</i> <i>bottom</i>
L E P T O N	 <i><math>\nu_e</math></i> <i>e neutrino</i>	 <i><math>\nu_\mu</math></i> <i><math>\mu</math> neutrino</i>	 <i><math>\nu_\tau</math></i> <i><math>\tau</math> neutrino</i>
	 <i>e</i> <i>electron</i>	 <i><math>\mu</math></i> <i>muon</i>	 <i><math>\tau</math></i> <i>tau</i>

## guage particles

<p>Strong Force</p>  <i>g</i> <i>Gluon</i>
<p>Electro-Magnetic Force</p>  <i><math>\gamma</math></i> <i>photon</i>
<p>Weak Force</p>    <i>W<sup>+</sup></i> <i>W<sup>-</sup></i> <i>Z</i> <i>W bosons</i> <i>Z boson</i>

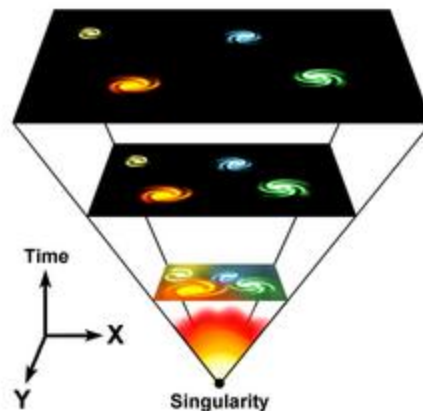
scalar particle



Elements of the Standard Model

# Standardní model vývoje Vesmíru

- Model **expandujícího Vesmíru, který vznikl při Velkém třesku.**
- Model **založen na Obecné teorii relativity a Standardním modelu elementárních částic.**
- Čím blíže jdeme k okamžiku Velkého třesku, tím jsou naše odhady dějů závislé na našich modelech z oblasti částicové fyziky, modelech interakcí částic s extrémní energií.
- Naše modely jsou na urychlovačích částic experimentálně ověřeny pouze do určité energie.
- Při popisu dějů těsně po Velkém třesku fyzikové využívají i modely „za Standardním modelem“ – supersymetrické modely, kvantový popis gravitace,...
- S vývojem znalostí zákonů mikrosvěta se budou zpřesňovat také naše znalosti o vývoji Vesmíru v prvních okamžicích po Velkém třesku.





# Planckova epocha

- Do  $10^{-43}$  s po Velkém třesku.
- **Silná, slabá, elektromagnetická a gravitační interakce mezi částicemi mají stejnou velikost.** Na konci této epochy teplota Vesmíru klesla na  $10^{32}$  K, energie částic na  $10^{19}$  GeV, hustota Vesmíru na  $10^{94}$  g/cm<sup>3</sup>, oddělila se gravitační interakce.
- Podle Obecné teorie relativity tvořila Vesmír v čase 0 s singularita. Kvantové efekty gravitace, případně strunové vlastnosti částic, měly vliv na vývoj Vesmíru v této době, proto není příliš jasné, co se v té době dělo.

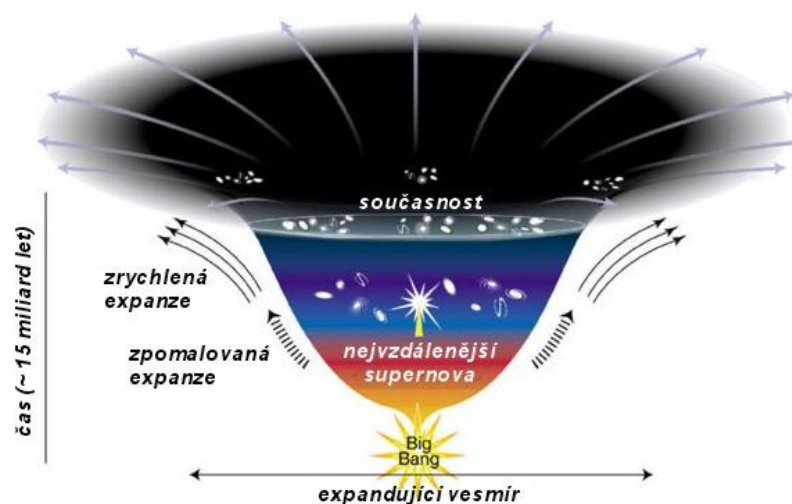


# Epocha Velkého sjednocení

- $10^{-43}$ - $10^{-35}$  s po Velkém třesku.
- Vlivem rozpínání Vesmíru a se **gravitační interakce oddělí od silné, slabé a elektromagnetické interakce.**
- Silná, slabá a elektromagnetická interakce mají srovnatelně velkou velikost, popisuje je model tzv. Velkého sjednocení – GUT (viz přednáška Tajemství mikrosvětla).
- Během této etapy teplota Vesmíru klesla z  $10^{32}$  K na  $10^{27}$  K, energie částic během této etapy klesly na  $10^{15}$  GeV.
- Na konci této epochy, když klesla teplota Vesmíru pod kritickou mez, se přestaly tvořit bosony X a Y (předpovězené GUT), zbylé X a Y se rozpadaly. Tyto procesy narušující CP symetrii a zákon zachování baryonového čísla mohly způsobit nepatrný přebytek kvarků nad antikvarky a tedy později i baryonů nad antibaryony ( $1+10^{10}:10^{10}$ ) – proces baryogeneze. Proto je dnes Vesmír tvořen převážně hmotou a ne antihmotou.

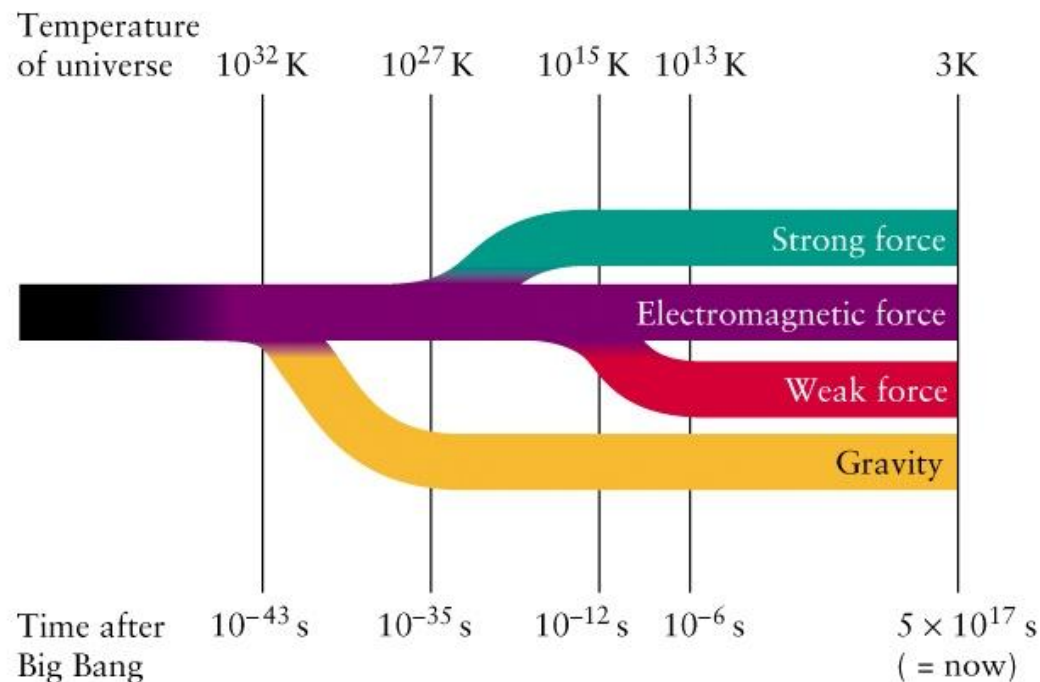
# Inflační epocha

- $10^{-35}$ - $10^{-32}$  s po Velkém třesku.
- **Rapidně se zvýšila rychlost rozpínání Vesmíru.**
- Během této etapy se zvětšil lineární rozměr vesmíru minimálně  $10^{26}$  krát.
- Předpokládá se, že inflační fáze byla způsobena fázovým přechodem na konci etapy Velkého sjednocení. Ten vytvořil tzv. „inflační“ skalární pole, které se projevovalo silným tlakem na expanzi Vesmíru. Z energie tohoto pole se vytvořilo velké množství částic – kvarků a gluonů.
- Vlivem extrémně rychlého rozpínání se smazaly možné nehomogenity, které mohly ve Vesmíru vzniknout v dřívějších fázích. Proto je Vesmír na velkých vzdálenostech prakticky homogenní a izotropní.



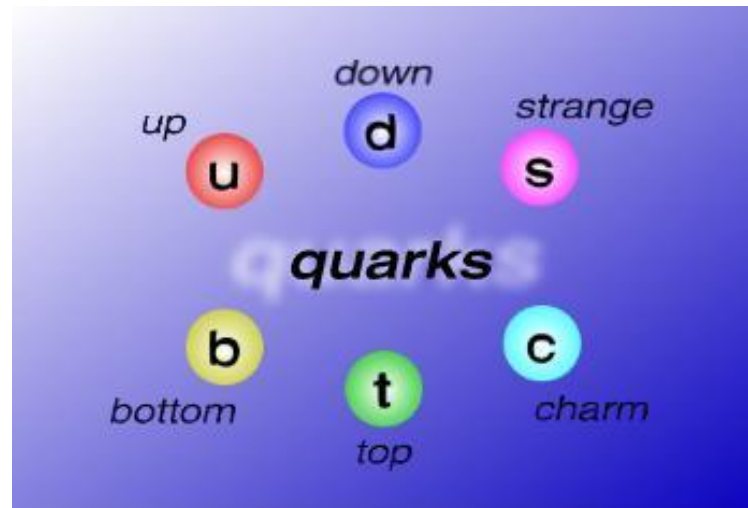
# Elektroslabá epocha

- $10^{-32}$ - $10^{-12}$  s po Velkém třesku.
- Elektromagnetická a slabá interakce jsou stále sjednocené, při teplotě  $10^{27}$  K se oddělila silná interakce.
- Částice mají dosud dostatečné energie, aby při srážkách vznikalo velké množství  $Z^0$ ,  $W^+$ ,  $W^-$  bosonů, Higgsových bosonů.
- Na konci epochy klesla teplota na  $10^{15}$  K.



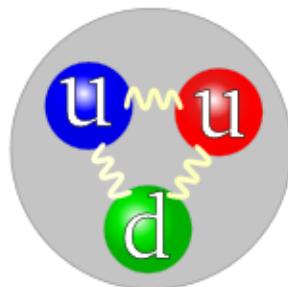
# Epocha kvarků

- $10^{-12}$ - $10^{-6}$  s po Velkém třesku.
- Při teplotě  $10^{15}$  K (energie částic 100 GeV) se od elektro-slabé interakce **oddělila slabá interakce**.
- Od té doby je velikost všech interakcí stejná jako v dnešním Vesmíru.
- Vesmír byl v té době stále příliš horký, kvarky tvořily horkou **kvark-gluonovou plazmu**. Hadrony (částice složené z kvarků) dosud neexistují.



# Epocha hadronů

- $10^{-6}$ -1 s po Velkém třesku.
- Vesmír zchladnul natolik ( $10^{13}$  K, 1 GeV), že byla umožněna tvorba hadronů – vázaných systémů kvarků. V té době tedy vznikly protony a neutrony.
- Antihadrony zanihovaly s hadrony a zbylé hadrony tvoří dnešní hmotu ve Vesmíru.
- 1 s po Velkém třesku byl Vesmír natolik řídký a chladný ( $3 \times 10^{10}$  K, 1 MeV), že velké množství neutrin, které byly ve Vesmíru, přestalo interagovat s ostatními částicemi hmoty (Vesmír se stal pro neutrina průhledný). Od té doby se tato neutrina volně pohybují Vesmírem a tvoří tzv. **reliktní neutrinové pozadí**. Reliktní neutrina mají dnes energii  $\sim 0.0004$  eV, proto nebyla dosud registrována. V každém  $\text{cm}^3$  prostoru se nachází 330 reliktních neutrin.
- Od konce epochy hadronů se vlivem rozpadů začíná snižovat počet neutronů (poločas rozpadu  $\sim 900$  s).



# Epocha leptonů

- 1-3 s po Velkém třesku.
- Na konci hadronové epochy velká většina hadronů a antihadronů anihilovala.
- Zůstaly leptony a antileptony, které tvořily většinu částic hmoty ve Vesmíru.
- 3 s po Velkém třesku Vesmír dále ochladl ( $6 \times 10^9$  K, 600 keV), přestaly se tvořit nové leptony a antileptony. Většina antileptonů zanihilovala s leptony. Kvůli narušení CP symetrie v dřívějších procesech, převážily leptony nad antileptony.

## LEPTONS

$$\begin{array}{ccc} e^- & \mu^- & \tau^- \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{array}$$

## ANTILEPTONS

$$\begin{array}{ccc} e^+ & \mu^+ & \tau^+ \\ \bar{\nu}_e & \bar{\nu}_\mu & \bar{\nu}_\tau \end{array}$$

# Epocha fotonů

- 3 s – 380 000 let po Velkém třesku.
- Na konci leptonové éry většina leptonů/antileptonů zanihovala.
- Většinu energie ve Vesmíru tvořily fotony.
- Fotony silně interagovaly s nabitými protony a elektrony.

## Nukleosyntéza

- 100–300 s po Velkém třesku.
- Teplota Vesmíru poklesla natolik, že mohly existovat vázané systémy protonů a neutronů – atomová jádra. Od té doby se počet neutronů přestal snižovat.
- **Vytvořila se lehká jádra** – převážně helium, deuterium.



## Dominance hmoty

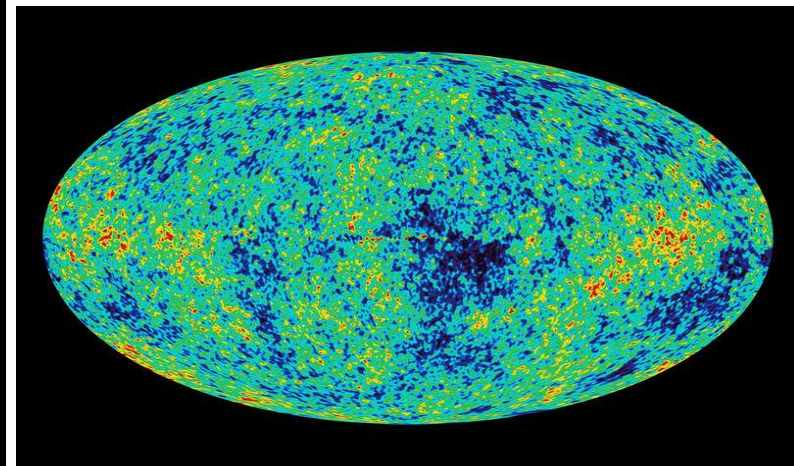
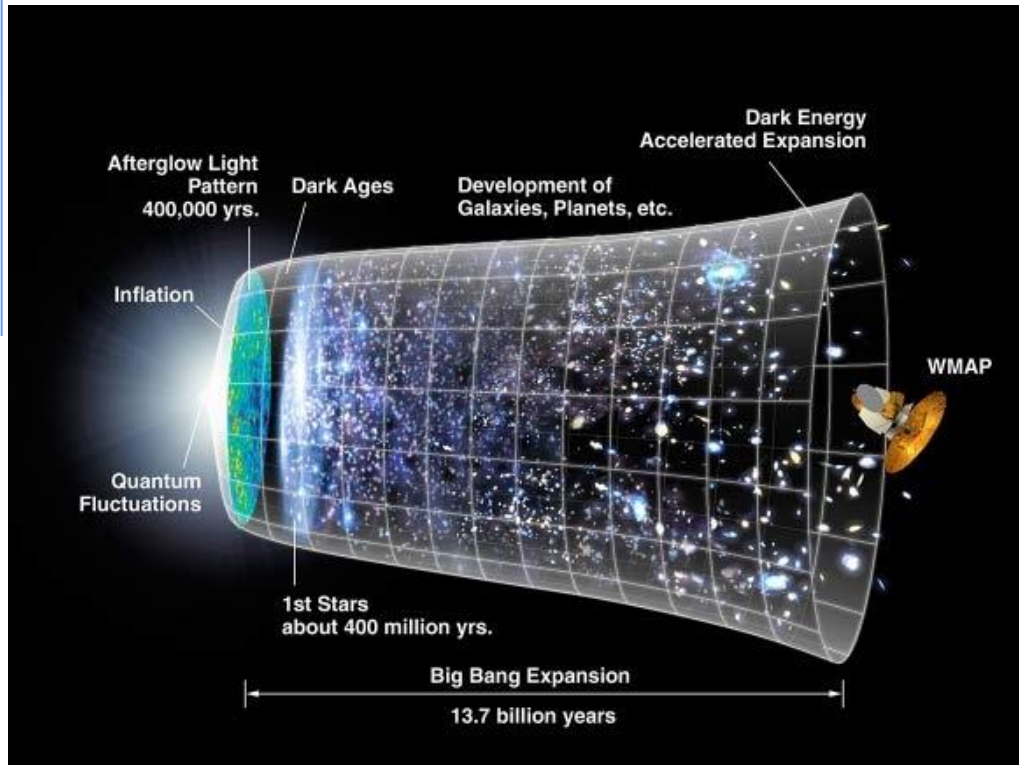
- 70 000 let po Velkém třesku ( $10^3$  K, 1 eV) – do té doby hustota energie záření stejná jako hustota energie hmoty. Poté postupně převládne hmota, vlivem gravitace se začínají tvořit **první nehomogenity hmoty** – budoucí zárodky galaxií.



# Konec epochy fotonů

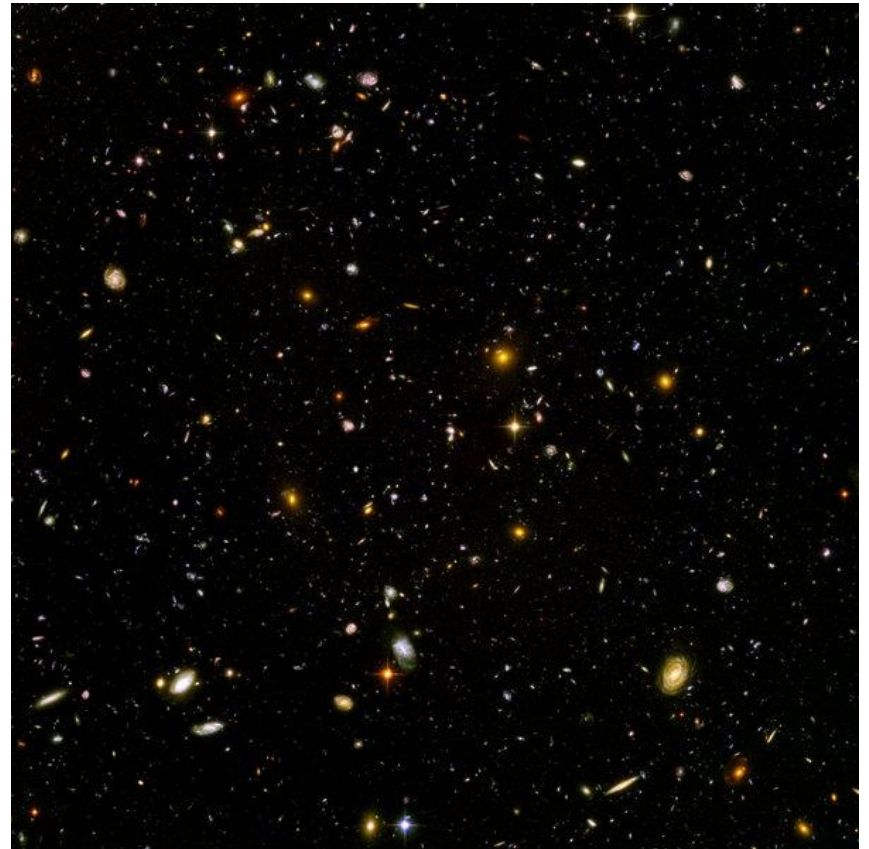
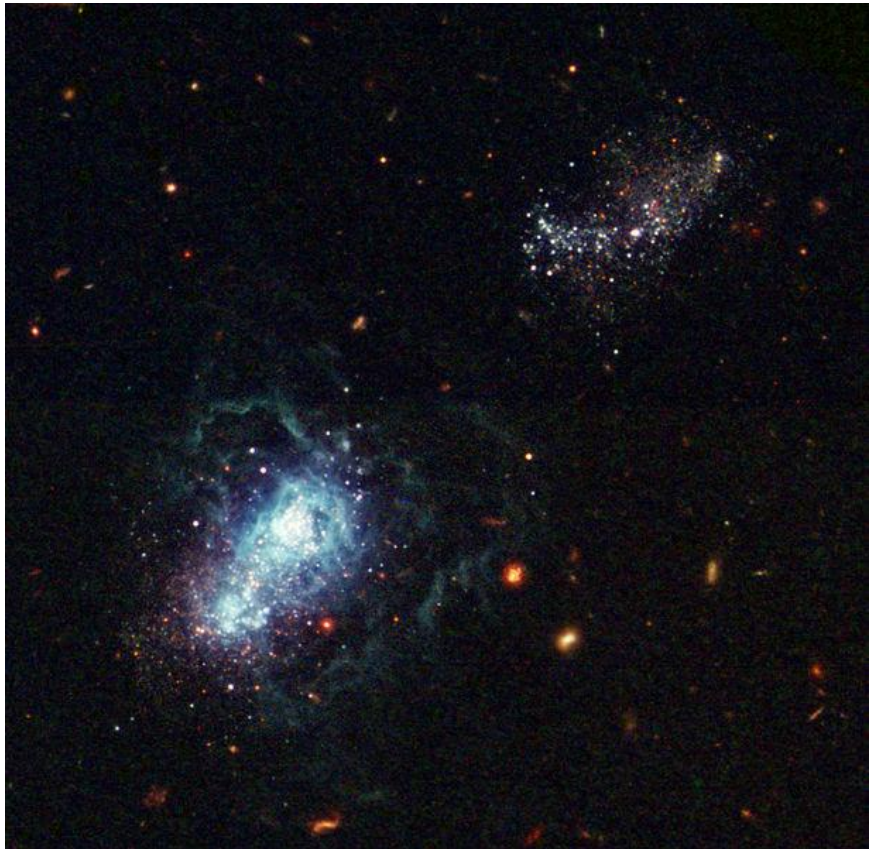
## Rekombinace

- Na konci epochy fotonů (4 000 K, 0.4 eV) **se začínají formovat atomy** vodíku a helia (vznikají vázané systémy elektronů a jader atomů).
- Fotony přestávají interagovat s elektrony a od té doby se volně pohybují jako **mikrovlnné reliktní záření**.



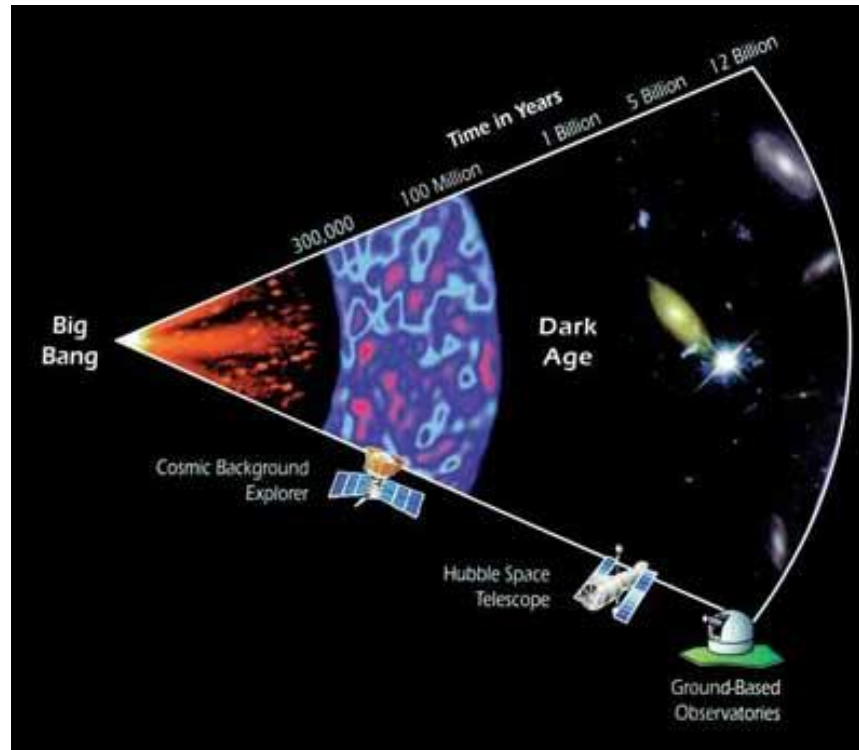
# Epocha hmoty

- Od 380 000 let po Velkém třesku.
- **Následný vývoj Vesmíru určuje gravitace.**
- Vlivem gravitace se formují nejprve struktury malého rozměru (hvězdy), poté galaxie a systémy galaxií.



# Temný věk

- Od 380 000 – 400x10<sup>6</sup> let po Velkém třesku.
- **Dosud neexistují žádné hvězdy.**
- Velmi malé množství vodíku je ionizovaného, proto jediné elektromagnetické záření, které je v té době vytvářeno, má vlnovou délku 21 cm (elektron v el. obalu vodíku, který má stejně orientovaný spin jako proton změní svou orientaci a dostane se tak do stavu s nižší energií - vyzáří při tom foton o specifické vlnové délce 21 cm).



# Tvorba prvních hvězd

- Od  $400 \times 10^6$  let po Velkém třesku.
- Končí doba temna - **tvorí se první velmi masivní hvězdy** (s hmotností  $\sim 100$  Sluncí). Jejich **vývoj je velmi rychlý** ( $10^6$  let).

