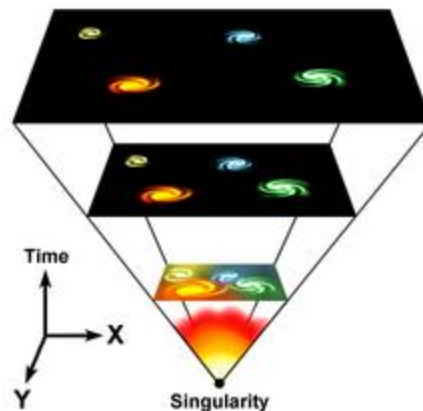


# Standardní model vývoje Vesmíru

- 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.

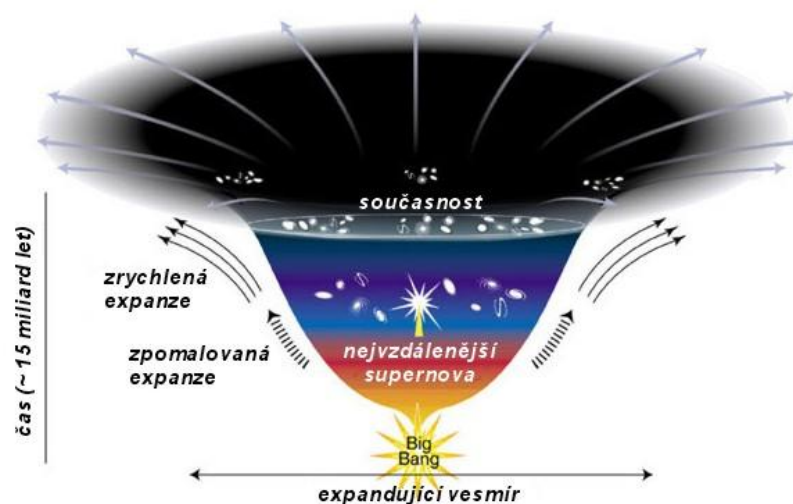


# Epocha Velkého sjednocení

- $10^{-43}$ - $10^{-35}$  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.

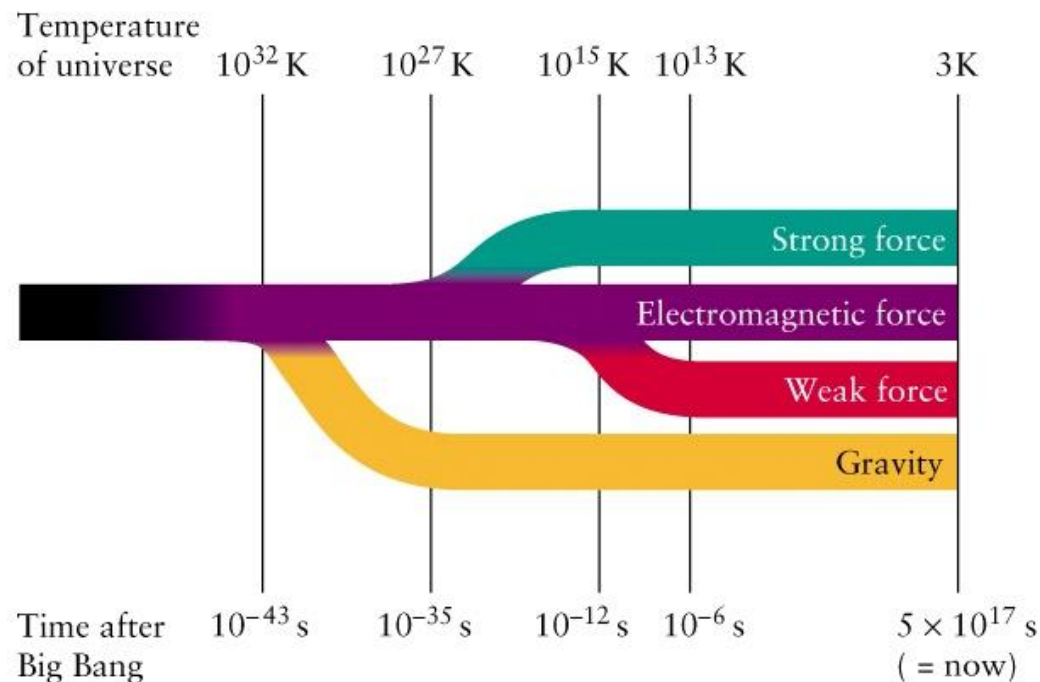
# Inflační epocha

- $10^{-35}$ - $10^{-32}$  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.



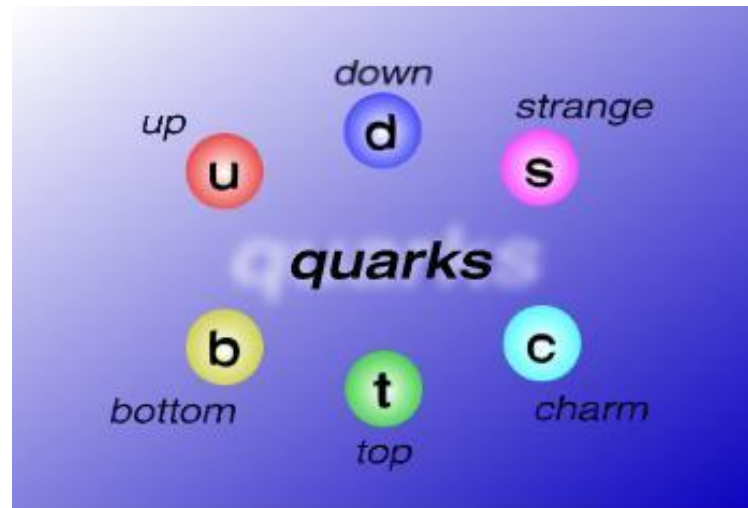
# Elektroslabá epocha

- $10^{-32}$ - $10^{-12}$  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.



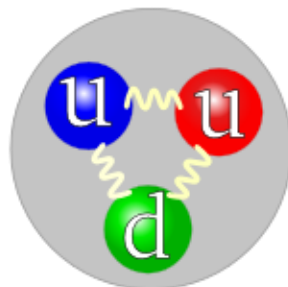
# Epocha kvarků

- $10^{-12}$ - $10^{-6}$  s po Velkém třesku.
- Při teplotě  $10^{15}$  K (energie částic 100 GeV) se od elektro-slabe 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.



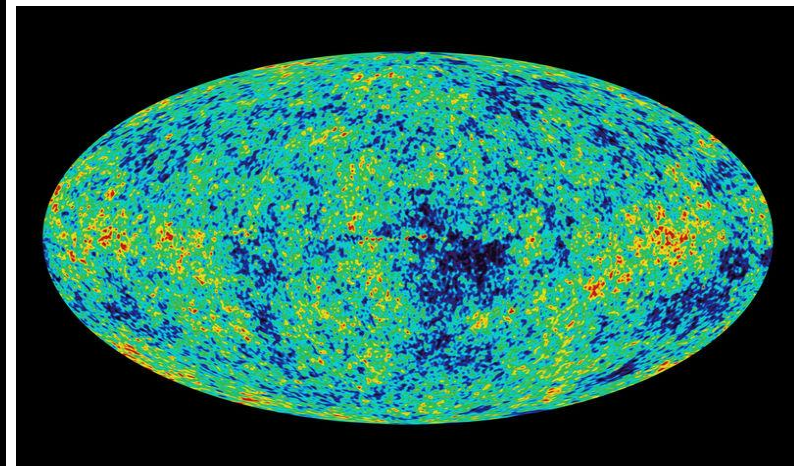
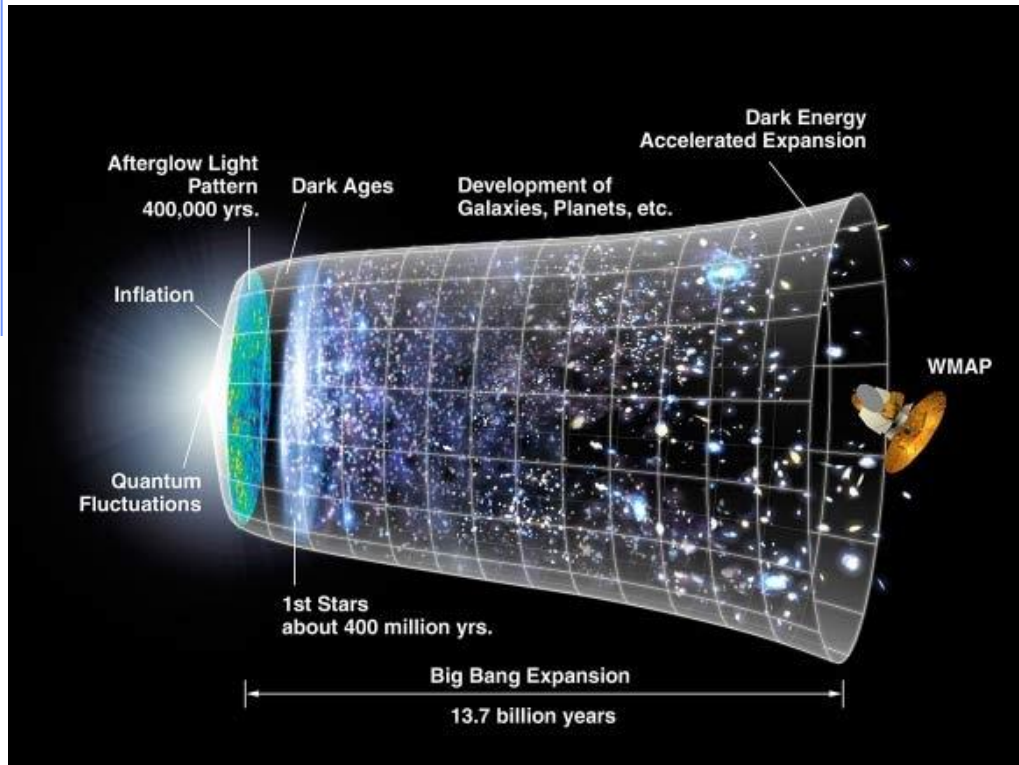
## Dominance hmoty

- 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

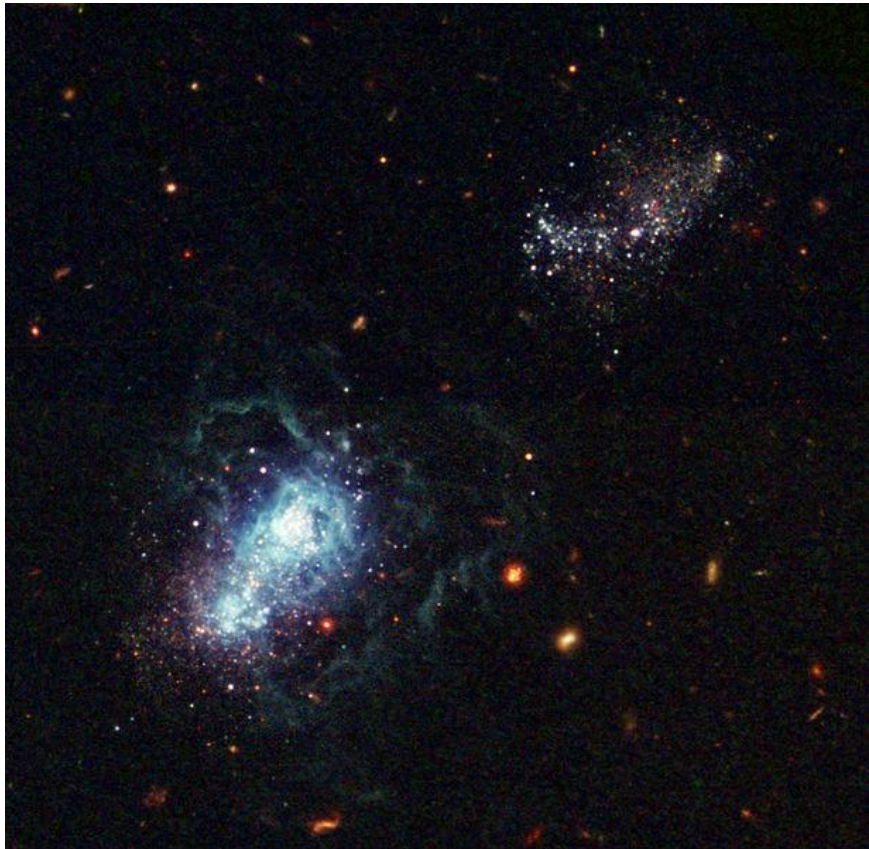
## Rekombinace

- 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**.



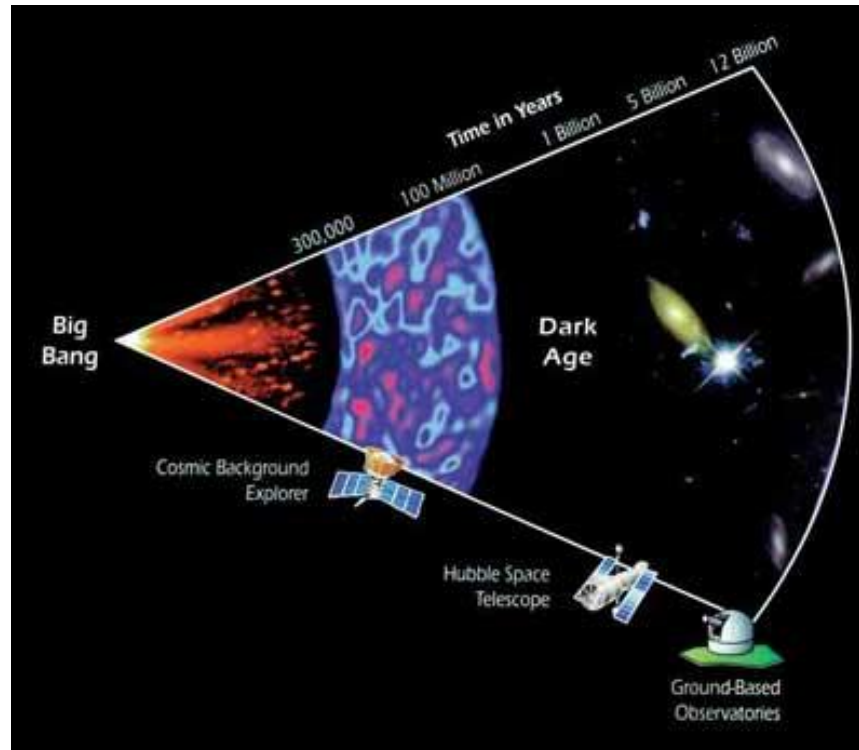
# Epocha hmoty

- 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).

