

10. Termonukleární reakce probíhající ve vesmíru

- exoergické reakce mezi lehkými jádry probíhající za vysokých teplot ($\geq 10^7$ K)
- vznikají jádra těžší s vyšší střední vazebnou energií
- hmota se nachází ve stavu plazmatu (volná atomová jádra a volné elektrony)
- kinetická energie částic je natolik velká, že stačí k překonání potenciálové bariéry a k reakci jader při vzájemných srážkách

Nukleogeneze ve vesmíru

A) „Velký třesk“

- došlo k němu cca před 10 – 15 miliardami let
- hmota a energie vesmíru byla soustředěna v jednom místě o obrovské hustotě
- hmota sestávala z protonů, neutronů, elektronů, pozitronů různých typů neutrín a fotonů
- mezi těmito částicemi převládaly slabé interakce



- jádra se ihned rozpadala účinkem vysoce energetických fotonů
- poměr mezi počty fotonů a baryonů ... 10^9 , tento stav trval zlomek sekundy
- nastala exploze a s následnou expanzí hmoty do vesmíru
- hmota se začala ochlazovat, rychlosť slabých interakcí se zmenšovala, až byla menší než rychlosť rozpínání vesmíru
- neutrina přestala být v rovnováze s ostatními částicemi od okamžiku, kdy teplota klesla na cca 10^{10} K se neutrina volně

šířila prostorem a neúčastnila se interakcí (tj. omezily se slabé interakce, zvláště pak ad 3)

- dochází k anihilaci elektronů a pozitronů
- zůstalo jen tolik elektronů, kolik jich bylo potřeba k neutralizaci náboje protonů
- ⇒ proces ad 3) se stal nevratným a poměr mezi počtem neutronů a protonů se ustálil

$$\mathbf{n : p = 1 : 7}$$

B) Primordiální nukleosyntéza

- nastává několik minut po velkém třesku ($T \sim 10^9$ K)
- začíná se tvořit deuterium



- následují další jaderné reakce

${}^2\text{H}(\text{p},\gamma){}^3\text{He}$	${}^3\text{H}(\text{d},\text{n}){}^4\text{He}$
${}^2\text{H}(\text{n},\gamma){}^3\text{H}$	${}^3\text{He}(\text{d},\text{p}){}^4\text{He}$
${}^2\text{H}(\text{d},\text{p}){}^3\text{H}$	${}^3\text{He}({}^3\text{He},2\text{p}){}^4\text{He}$
${}^2\text{H}(\text{d},\text{n}){}^3\text{He}$	

- vznik těžších jader nebyl možný, neboť i nadále klesá teplota ($T \sim 10^8$ K) a klesá hustota hmoty
- další expanze vesmíru vede ke vzniku vesmírného plynu ($T \sim 10$ K, hustota cca 10^{-13} g/cm⁻³)
- tento vesmírný plyn (převážně ${}^4\text{He}$ a protony, málo deuteria a tritia) zaplňuje vesmír
- v místech, kde se fluktuací zvětšuje hustota hmoty se po cca $10^7 - 10^9$ let začíná hmota gravitací koncentrovat ⇒ **zárodky galaxií a hvězd**
- při gravitačním smršťování se začíná hmota zahřívat ($T \sim 10^7$ K, hustota cca 100 g/cm³) – další stadium nukleogeneze

C) Vznik hvězd první generace

- spalování vodíku na helium probíhá v cyklech, uvolňuje se přitom velké množství energie, které brání dalšímu gravitačnímu smršťování
- proton-protonový cyklus **ppI**



26,2 MeV

- proton-protonový cyklus **ppII**



- spalování helia

- při dalším smršťování hvězdy roste teplota a hustota hmoty
- při teplotě $1,5 \cdot 10^8$ K se začíná spalovat helium

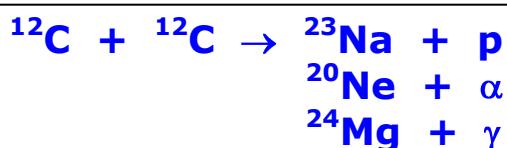


- spalování vodíku v CNO cyklu
 - je umožněno existencí izotopů uhlíku a kyslíku
 - probíhá i v současnosti např. na Slunci

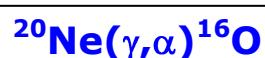
cyklus	zastoupení (%)
ppI	85
ppII	14
CNO	1,5

- vznik těžších nuklidů
 - nukleosyntéza probíhá v nitru hvězd, které jsou 8-30x větší než Slunce:

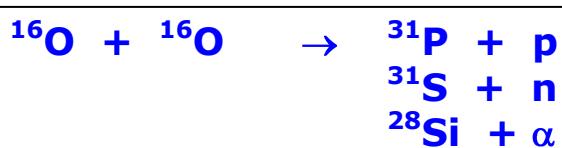
spalování uhlíku při teplotách $0,5\text{-}1,0 \cdot 10^9 K$



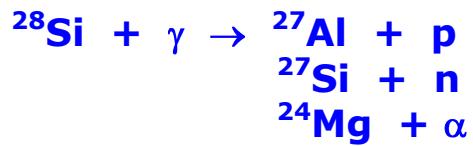
spalování neonu při teplotách $1,0\text{-}1,5 \cdot 10^9 K$



spalování kyslíku při teplotách $>1,5 \cdot 10^9 K$



spalování křemíku při teplotách $\sim 3 \cdot 10^9 K$



atd.