

## 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 neutrin a fotonů**
- mezi těmito částicemi převládaly slabé interakce



- jádra se ihned rozpadala účinkem vysoce energetických fotonů
- poměr mezi počty fotonů a baryonů  $\dots 10^9$ , tento stav trval zlomek sekundy
- nastala exploze a s následnou expanzí hmoty do vesmíru
- hmota se začala ochlazovat, rychlost slabých interakcí se zmenšovala, až byla menší než rychlost 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

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

- 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<sup>-3</sup>)
- tento vesmírný plyn (převážně <sup>4</sup>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/cm<sup>3</sup>) – další stadium nukleogeneze

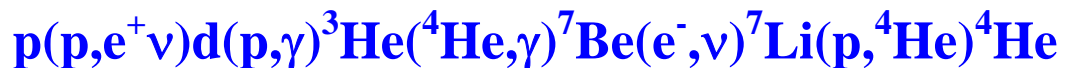
### C) Vznik hvězd první generace

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



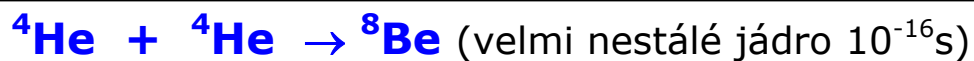
26,2 MeV

- **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

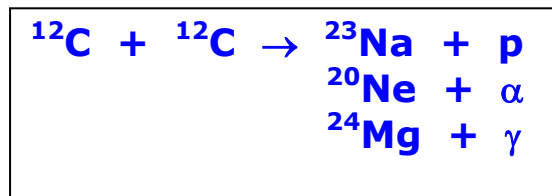
cyklus	zastoupení (%)
ppI	85
ppII	14
CNO	1,5

orr 39

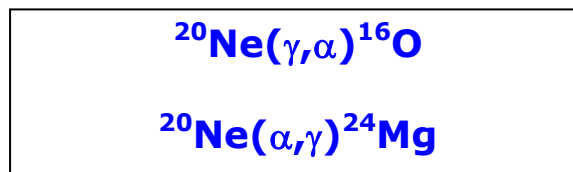
□ vznik těžších nuklidů

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

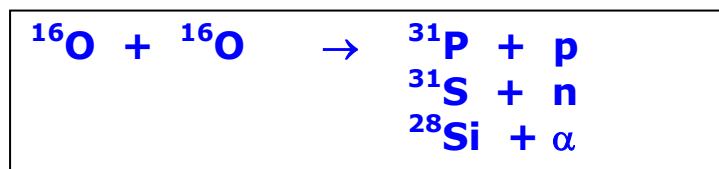
*spalování uhlíku při teplotách  $0,5-1,0 \cdot 10^9$  K*



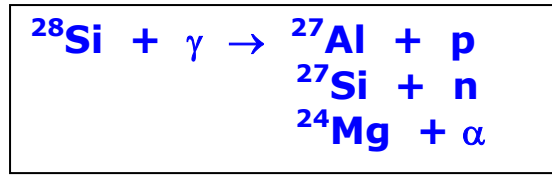
*spalování neonu při teplotách  $1,0-1,50 \cdot 10^9$  K*



*spalování kyslíku při teplotách  $>1,50 \cdot 10^9$  K*



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



atd.