

Vznik prvků

aneb
ekologické problémy hvězd a vesmíru



“Kde jsou ty časy, kdy vše bylo průzračné a vesmírnými potoky bublal a řekami se valil jen čistý vodík“

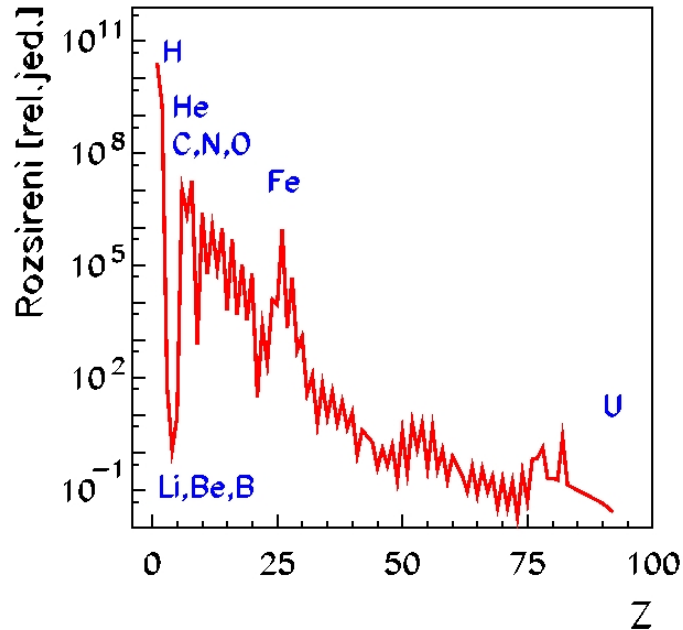
B. Pictoris: “Povzdech nad ztracenými časy”

- 1) Úvod
- 2) Primordiální nukleosyntéza
 - a) Vznik helia
 - b) Vznik těžších prvků
 - c) Co můžeme zjistit?
- 3) Nukleosyntéza ve hvězdách
 - a) Spalování vodíku
 - b) Spalování helia
 - c) Produkce těžších prvků po železo
 - d) Produkce prvků těžších než železo
- 4) Závěr



Úvod

"Teorie o vzniku chemických prvků musí vysvětlit rozšíření jednotlivých prvků ve vesmíru"



Pozorované rozšíření prvků ve vesmíru
(C.A. Barnes et al: *Jaderná astrofyzika*,
Camb. University Press 1983)

Počáteční podmínky - chemické prvky vzniklé
ve Velkém třesku

Chemické prvky vzniklé v průběhu života hvězd

Silně závisí na pravděpodobnostech různých jaderných reakcí

Pár těch, kteří spojili jadernou fyziku a astrofyziku:

Hans Bethe



F. Hoyle



W.A. Fowler



R. Davis



Původ vesmírného vodíku

$t \sim 10^{-4} \text{ s}$ $T \sim 2 \cdot 10^{12} \text{ K}$ chladnutí \rightarrow hmota se mění z podoby
volného seskupení kvarků a gluonů
(kvark-gluonového plazmatu) do seskupení hadronů
Neustálé vznikání a zanikání různých hadronů a antihadronů

Zmenšování teploty \rightarrow zmenšování hustoty energie \rightarrow
postupné ubývání těžších hadronů (rezonancí)

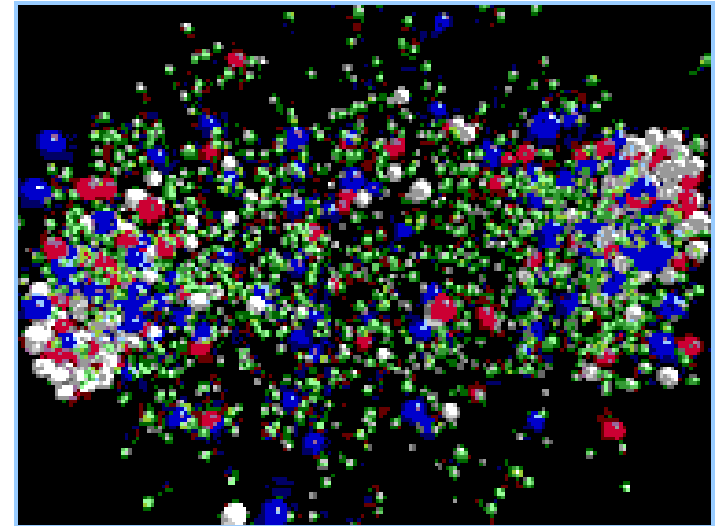
Zůstávají baryony s nejmenší klidovou hmotností - nukleony
(protony a neutrony) - hadronizace hmoty

a vznik helia

$t \sim 1 \text{ s}$ $T \sim 10^{10} \text{ K}$ jsou možné vázané stavy
nukleonů \rightarrow vznikají lehká jádra
($E_d = 2,2 \text{ MeV}$ energie disociace deuteronu)

$t \sim 200 \text{ s}$ $T \sim 10^9 \text{ K}$ energie nestačí na reakci $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$:
(rozpad neutronů nevázaných v jádrech $T_{1/2} = 10,4 \text{ m}$)
(trvání nukleosyntézy zhruba 17 m)

**zůstávají pouze protony (vodík) a určité množství lehkých
prvků (hlavně ^4He - má velmi vysokou vazbovou energii)**



Hadronizace kvark-gluonového
plazmatu ve srážce těžkých iontů
(Simulace frankfurtské skupiny)



Snímek ve směru středu Galaxie

Reakce primordiální nukleosyntézy

Produkce deuteria: $n + p \rightarrow d + \gamma + 2,22 \text{ MeV}$

Produkce tritia (nepozorováno, nestabilní): $n + d \rightarrow {}^3\text{H} + \gamma + 6,26 \text{ MeV}$

Produkce helia 3: $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma + 5,49 \text{ MeV}$

Produkce helia 4: $D + D \rightarrow {}^4\text{He}$ a ${}^3\text{H} + p \rightarrow {}^4\text{He}$ nebo ${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^4\text{He}$

Produkce lithia 6 (nepozorováno – složitý výpočet i pozorování): ${}^4\text{He} + d \rightarrow {}^6\text{Li}$ (hlavně) a ${}^3\text{He} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li}$

destrukce: ${}^6\text{Li} + p \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H}$

Produkce lithia 7: ${}^4\text{He} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma + 2,47 \text{ MeV}$

Destrukce: ${}^7\text{Li} + p \rightarrow 2{}^4\text{He} + 17,35 \text{ MeV}$

Časová omezenost, efektivní destrukce ${}^7\text{Li}$ a neexistence stabilních jader s počtem nukleonů 5 a 8 vede k omezení produkce prvků v ranném vesmíru na ty nejlehčí.

Možná produkce berylia a bóru: ${}^7\text{Li} + d \rightarrow {}^9\text{Be}$ a ${}^7\text{Li} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{11}\text{B}$

Vzniklo nakonec jen 0,01 % deuteria, 10^{-5} ${}^3\text{He}$ 10^{-10} lithia a berylia a stopy bóru

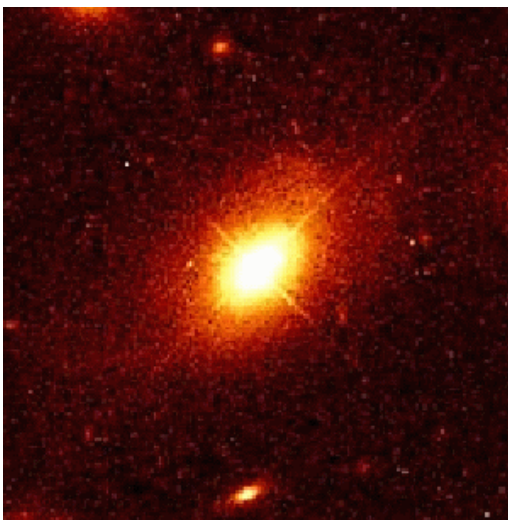
${}^4\text{He}$ je velmi stabilní a jeho množství je perfektní test velkého třesku

d je velmi nestabilní, přežije jen díky rychlému ochlazení vesmíru - množství závisí hustotě protonů a neutronů (rychlostí rozpínání) – indikace existence temné hmoty

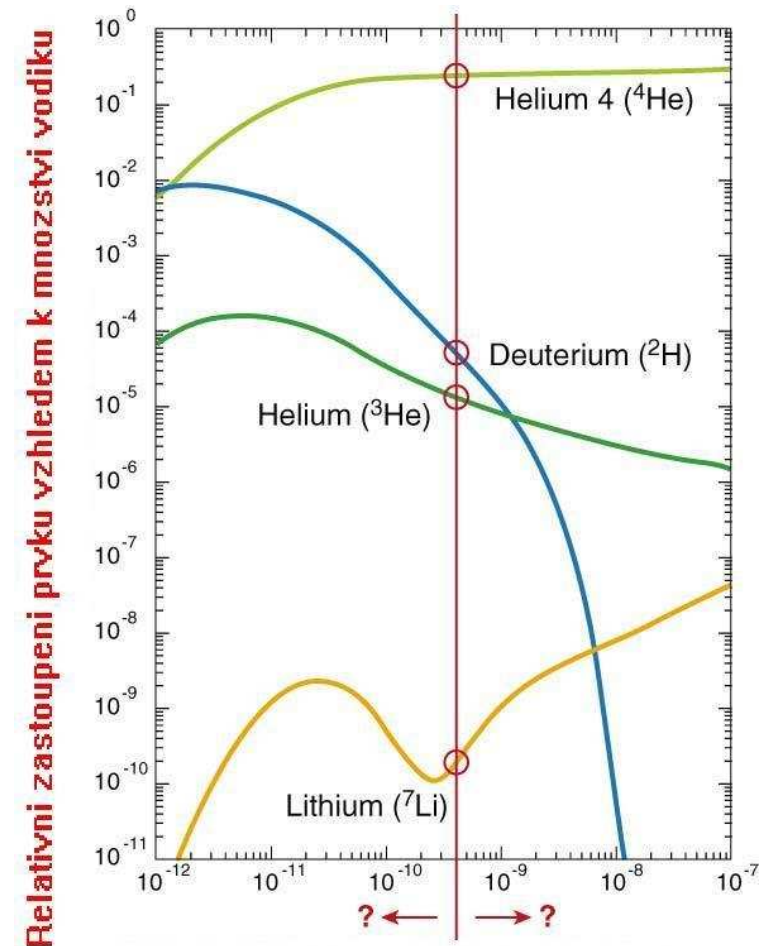
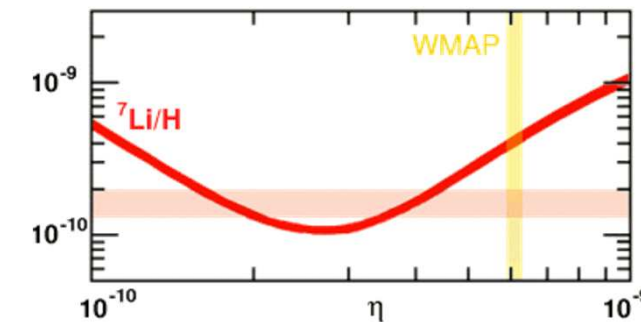
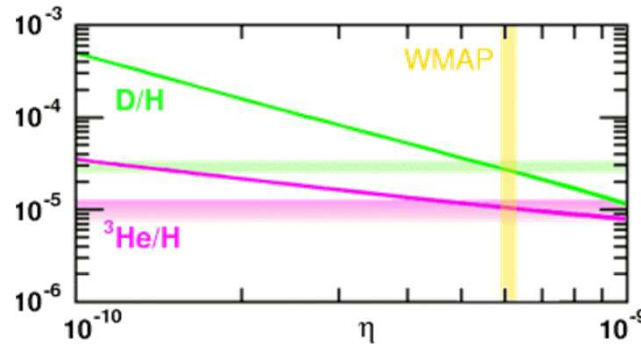
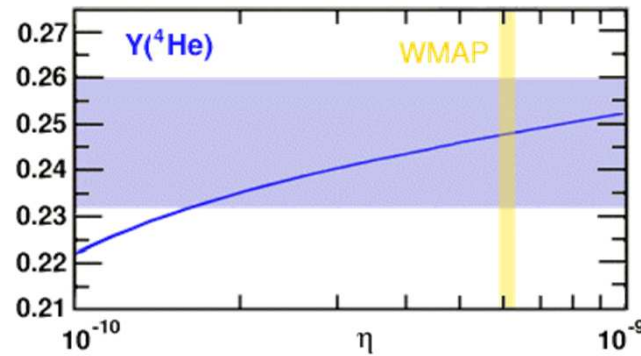
Pozorované množství jednotlivých prvků



Trpasličí galaxie slouží k určení množství ^4He (foto Hubble)



Vzdálené kvazary ukazují složení ranného vesmíru



Pomer: normální hmota / fotony

Složení hmoty ve vesmíru:

- 1) Baryonová hmota 0,045(1)
- 2) Nebaryonová 0,30(10)
- 3) Energie vakua 0,8(2)

Jaký bude poměr mezi heliem a vodíkem?

Typická energie vazby nukleonu v jádře je v řádu $E \sim \text{MeV} \rightarrow T = (3/2) \cdot kT \sim 10^{10} \text{ K}$

1) Hmotnost protonu a neutronu se liší:

$$E_{0p} = m_p c^2 = 938,27 \text{ MeV}$$

$$E_{0n} = m_n c^2 = 939,57 \text{ MeV}$$

$$E_{0n} - E_{0p} = 1,3 \text{ MeV}$$

$$k = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$$

2) Neutron se rozpadá na proton s relativně dlouhým poločasem rozpadu: 614 s

3) Existují stabilní lehké prvky

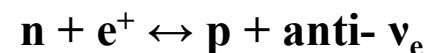
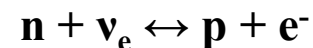
Maxwell – Boltzmanovo rozdělení:

$$P(v) = \left(\frac{m}{2\pi \cdot kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

Boltzman faktor, porovnání stavů s různou energií:

$$N_m \sim m^{3/2} e^{-\frac{E_m}{kT}} = m^{3/2} e^{-\frac{mc^2}{kT}}$$

$$\frac{N_n}{N_p} = \left(\frac{m_n}{m_p} \right)^{3/2} e^{-\frac{m_n c^2}{kT}} = \left(\frac{m_n}{m_p} \right)^{3/2} e^{-\frac{(m_n - m_p) c^2}{kT}}$$



Konstituování poměru n ku p proběhla rychle při teplotě $kT \sim 0,8 \text{ MeV}$

$$\frac{N_n}{N_p} \cong e^{-\frac{1,3 \text{ MeV}}{0,8 \text{ MeV}}} \cong \frac{1}{5}$$

Než se vytvoří helium 4 se část neutronů rozpadne

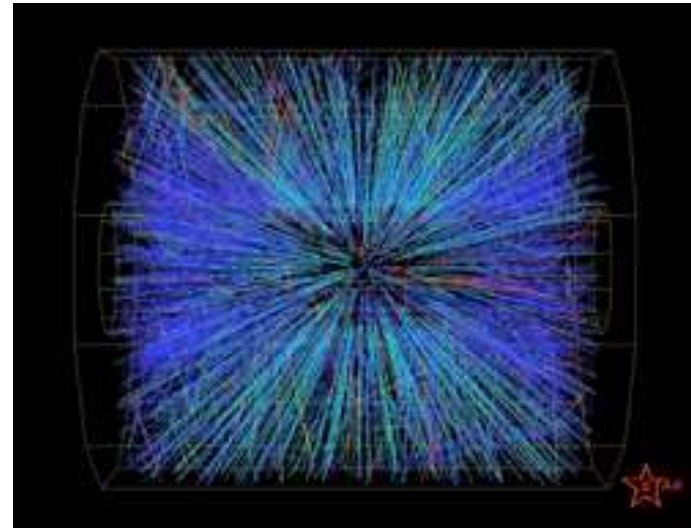
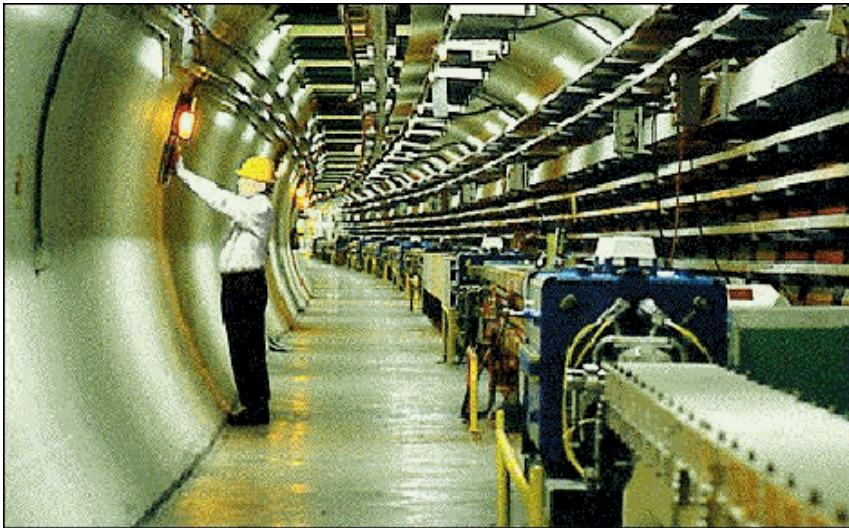
$$\frac{N_n}{N_p} = \frac{1}{5} e^{-\frac{400 \cdot \ln 2}{614}} \cong \frac{1}{8}$$

Hmotnostně je pak poměr mezi heliem a vodíkem zhruba 1:4

I těžších prvků

Ve velmi malém množství vznikají i další lehké izotopy prvků D , ${}^3\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ i těžší velmi citlivý indikátor vlastností vesmíru v jeho počátečních stavech

Nutné fluktuace v hustotě - mohou vznikat při přechodu od kvark-gluonového plazmatu k hadronům – nutný fázový přechod prvního druhu

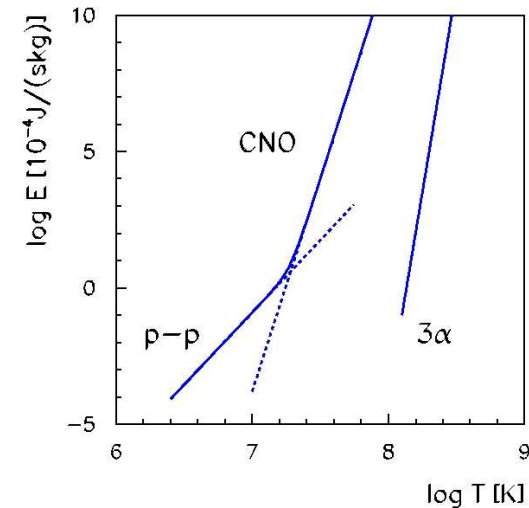
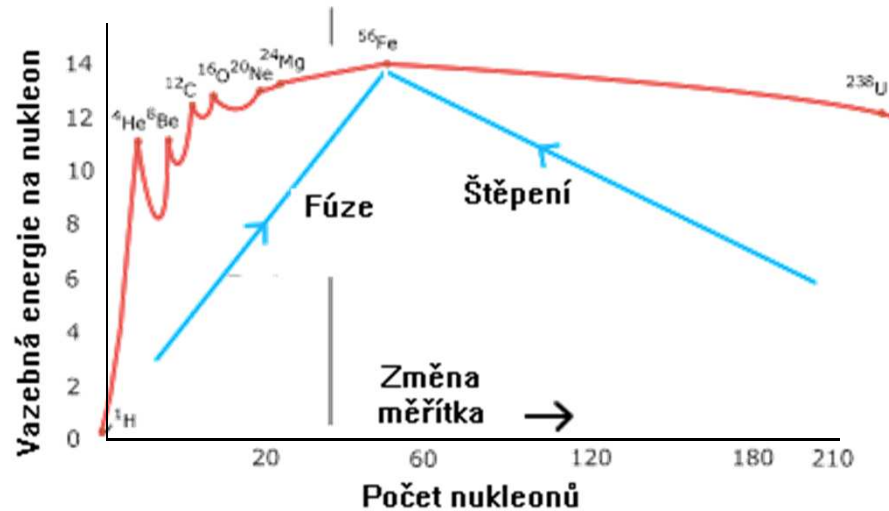


Možno testovat na největších urychlovačích

$t \sim 400\,000$ let $T \sim 4000$ K - zachycení elektronů jádru \rightarrow vznik atomů \rightarrow počátek chemie

$t \sim$ stovky milionů let - formování hvězd a galaxií - vznik prvků ve hvězdách

Zdrojem všeho jsou jaderné reakce



Závislost vazebné energie na nukleon na počtu nukleonů

Závislost rychlosti průběhu (velikosti vydělené energie) reakcí na teplotě

Možnosti získání energie spalováním vodíku případně těžších jader - zdroje energie \rightarrow ohřev hvězdy \rightarrow zabránění gravitačnímu kolapsu hvězdy & zdroj různých chemických prvků

Základní reakce $\text{H} \rightarrow \text{He}$ – reakce jader vodíku (proton – protonová reakce) nebo reakce jader vodíku s těžšími prvky – působí jako katalyzátory (CNO cyklus):

- A) p-p řetězec
- B) CNO cyklus
- C) 3α -proces (Salpeterův)

Velmi silná závislost na teplotě

Ještě vyšší teploty \rightarrow vznik ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg ... dalším spalováním helia, spalování ^{12}C

Těžší prvky – termojaderné reakce ve hvězdách

Coulombovská bariéra:

$$E_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_0} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \frac{Z_1 Z_2 \hbar c}{R_0} = \alpha \frac{Z_1 Z_2 \hbar c}{R_0} \quad \hbar c = 197 \text{ MeV}\cdot\text{fm}$$
$$\alpha = 1/137$$

Pro vodík: $Z_1 = Z_2 = 1, R_0 = 1,1 \text{ fm} \rightarrow E_C = 1,3 \text{ MeV}$

Tepelná energie: $E_T = \frac{3}{2} kT$

$$T = 10^7 \text{ K} \xrightarrow{k = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}} E_T = 1,3 \text{ keV}$$

Tedy:

$$\frac{E_T}{E_C} = 10^{-3}$$

Termojaderné reakce díky chvostu Maxwelova rozdělení a tunelování

Pravděpodobnost tunelování (pro $T = 10^7 \text{ K}$): $\sigma(E_T) \sim e^{-\sqrt{\frac{E_C}{E_T}}} = e^{-\sqrt{1000}} \approx e^{-32} \approx 10^{-14}$

Počet reakcí Q : $Q(E) = n_1 \cdot n_2 \cdot \sigma(E) \cdot P(E)$

Velmi intenzivní závislost na teplotě - energii

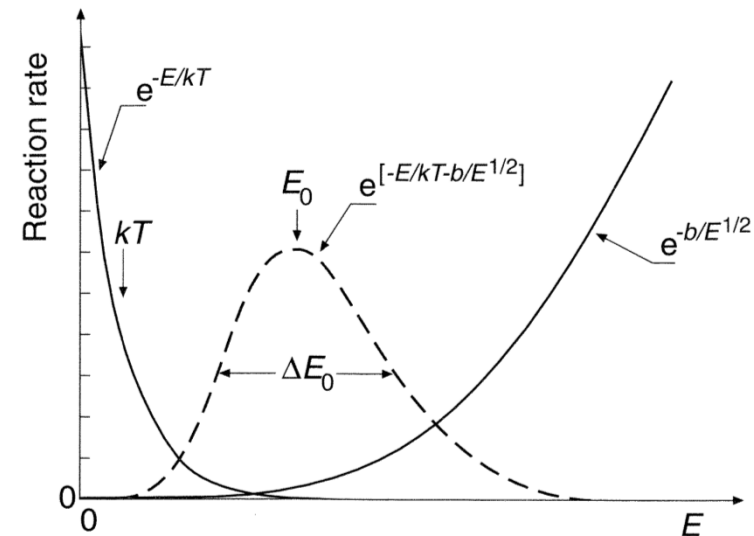
Chvost Maxwell-Boltzmanova rozdělení:

$$P(E) \sim e^{-\frac{E}{kT}}$$

Pravděpodobnost průniku coulombovskou bariérou:

$$\sigma(E) \sim e^{\frac{b}{\sqrt{E}}}$$

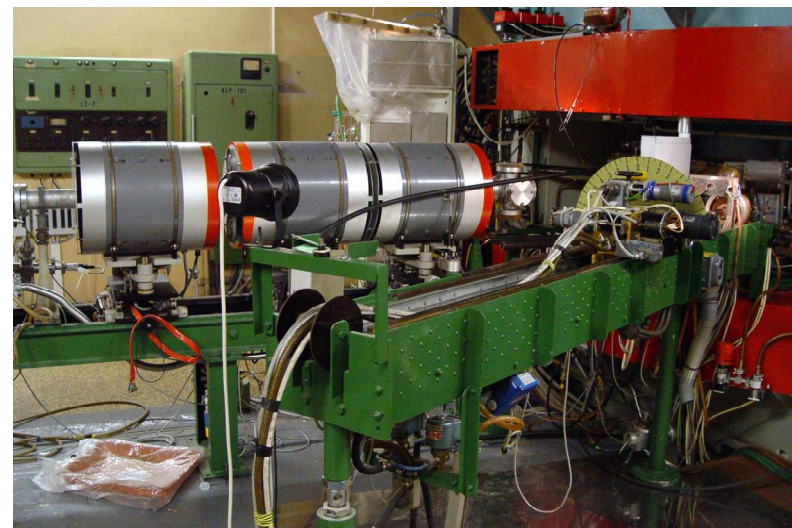
Velmi silný vliv teploty a rezonancí v nízkoenergetické oblasti excitační funkce pro jednotlivé reakce



Problémy s měřením v laboratoři – spousta reakcí i velmi exotických radioaktivních izotopů při velmi nízkých energiích – nutnost extrapolace

Cesta:

- 1) Radioaktivní svazky
- 2) I malé urychlovače lehkých iontů s velmi přesně definovanou energií svazku
- 3) Specifické metody – trojského koně



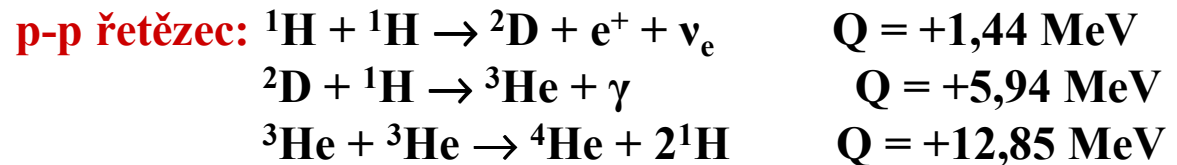
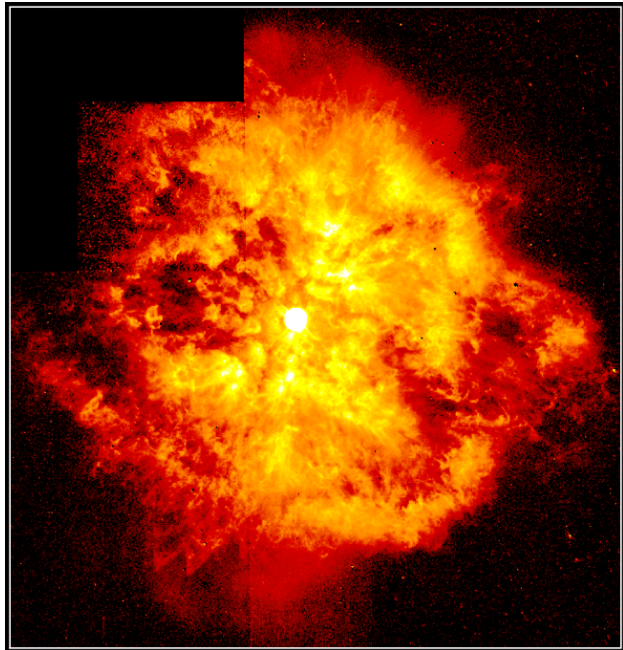
Na cyklotronu ÚJF AVČR se astrofyzikální reakce také studují

Nukleosyntéza ve hvězdách – hvězdy jako továrny na výrobu prvků

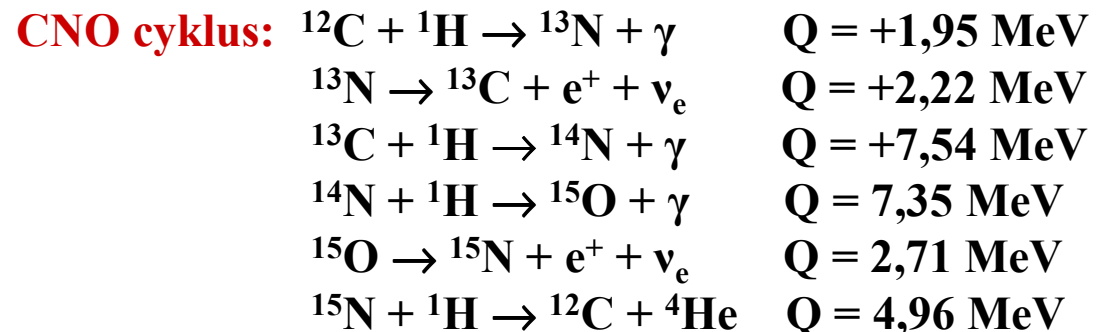
Po velkém třesku byl ve vesmíru vodík, 23 % helia, něco deuteria a lithia. Všechny ostatní prvky vznikly v průběhu dalšího období ve hvězdách během jejich evoluce.

Jaderné reakce ve hvězdách: 1) Odpovídají za zastoupení prvků ve vesmíru
2) Jsou zdrojem energie ve hvězdách

Základní reakce $H \rightarrow He$ – reakce jader vodíku (proton –protonová reakce) nebo reakce jader vodíku s těžšími prvky – působí jako katalyzátory (CNO cyklus)



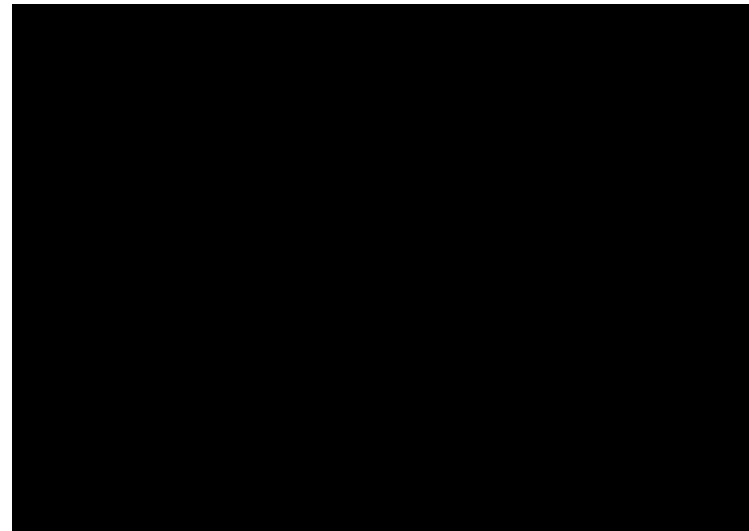
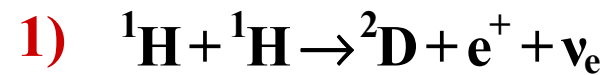
uplatňuje se při $T = 10^{6,8}\text{K} - 10^{7,2}\text{K}$



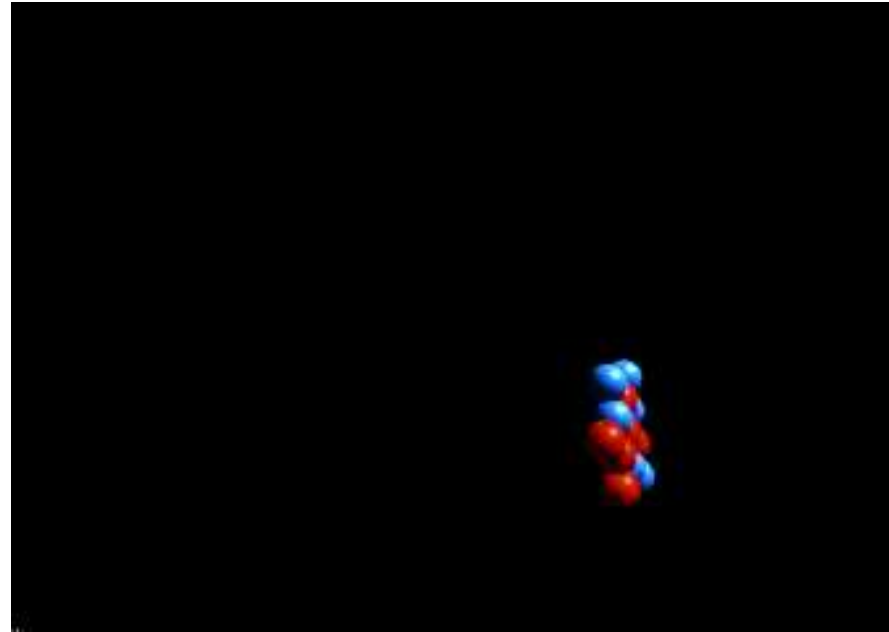
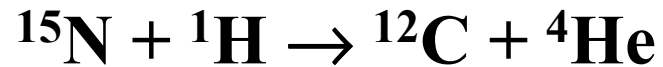
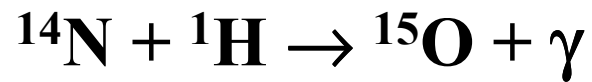
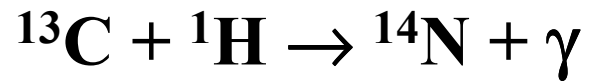
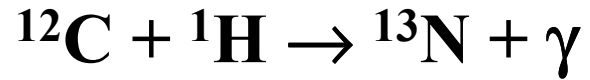
uplatňuje se při $T = 10^{7,2}\text{K} - 10^{7,7}\text{K}$

V průběhu života hvězdy a hlavně během jejího konce, je do prostoru vyvrhováno velké množství obohacené o těžší prvky – velmi aktivní hvězda WR124 vyvrhuje bubliny plynu do mlhoviny M1-67 (snímek Hubbleova teleskopu)

Proton-protonový cyklus



CNO cyklus



Označení					
	protony		pozitrony		neutrino
	neutrony		elektrony		fotony

Spalování helia

Hvězdy s hmotností Slunce a více

při ještě vyšších teplotách ($T = 10^8\text{K}$)

Problém – nejsou stabilní jádra s počtem nukleonů 5 a 8

Vznik ${}^8\text{Be}$ s $T_{1/2} = 6,7 \cdot 10^{-17} \text{ s}$

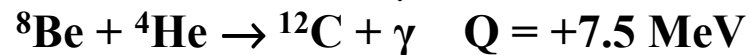
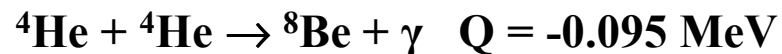
Pro hustotu 10^8 kg/m^3 - 1 ${}^8\text{Be}$ na 10^9 ${}^4\text{He}$

Vznik ${}^{12}\text{C}$ umožněn záchytem dalšího ${}^4\text{He}$ a přechodem do druhého vzbuzeného stavu

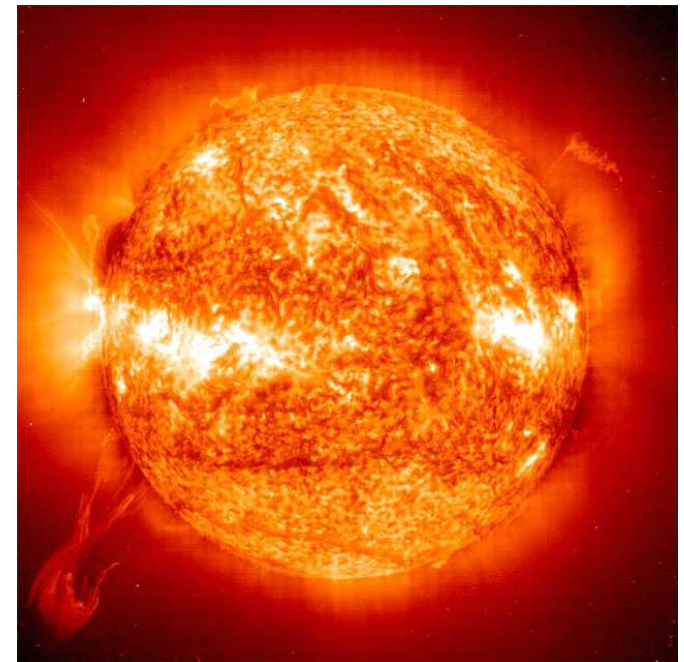
${}^{12}\text{C}$ (0^+ - 7,654 MeV) – rezonance – rozpad s pravděpodobností $4 \cdot 10^{-4}$ do základního stavu

Je třeba dodat energii 287 keV → **chvost Maxwellova rozdělení**

3 α -proces (Salpeterův):

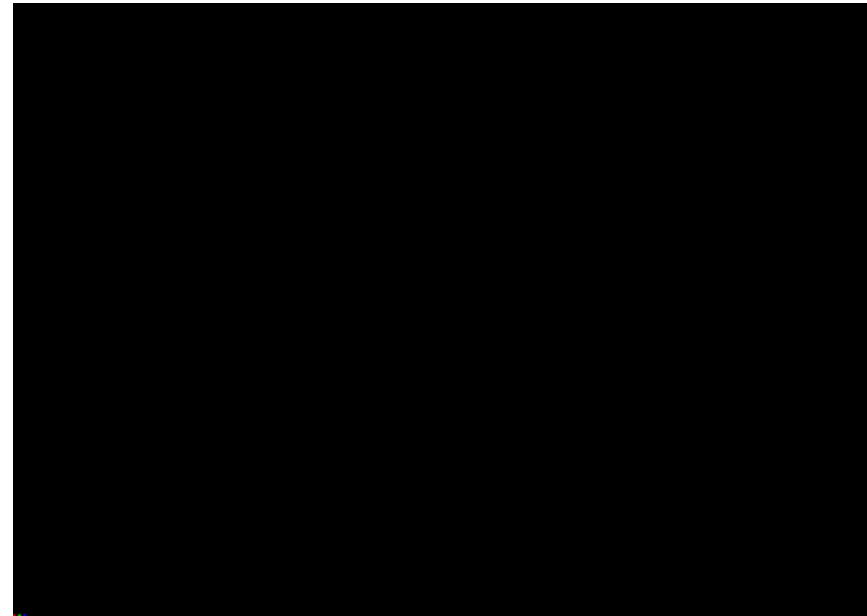
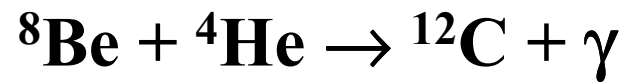
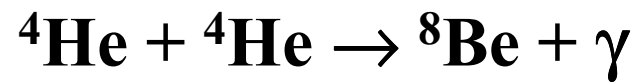







Všechny prvky těžší než bór vznikají pomocí Salpeterova cyklu



Slunce – i v něm probíhá spalování helia

3 α -proces

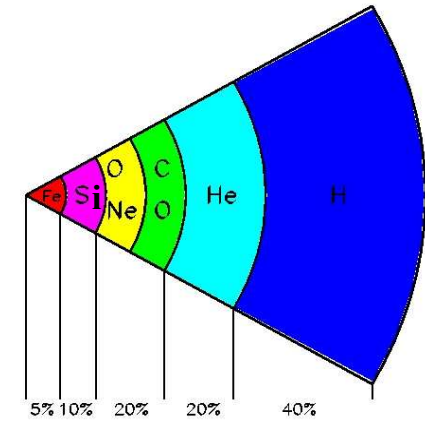
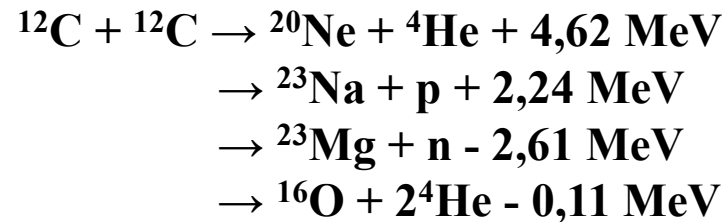


Označení					
	protony		pozitrony		neutrína
	neutrony		elektrony		fotony

Hvězdy těžší než Slunce

Ještě vyšší teploty → vznik ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg ... dalším spalováním helia,

dále pak spalování ^{12}C :



Větší hmotnost hvězdy → větší teplota v nitru → rychlejší průběh reakcí → rychlejší vydělování energie → **vývoj hvězdy je rychlejší – spalování O a Ne - prvky až po železo**

Na vzniku těžších prvků se podílejí (závislost na vazebné energii):

α -proces: syntéza prvků pomocí ^4He procesem (α, γ), vznikají jádra až po ^{40}Ca ($T = 10^9\text{K}$)

e-proces: $T = 4 \cdot 10^9\text{K}$ a $N_p/N_n = 300$ → vznik prvků skupiny železa: V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni

p-proces: prostředí plné vodíku → vznik vzácnějších lehkých prvků ($T = 2,5 \cdot 10^9\text{K}$)

s-proces: záchyt neutronů jádru lehkých prvků nebo prvků skupiny železa. (pomalý „slow“ vůči rozpadu beta) – **hoření supernovy** (produkce neutronů:



r-proces: hodně neutronů → záchyt neutronů probíhající rychle („rapid“) vzhledem k rozpadu beta → vznik těžkých prvků – **exploze supernovy**

Intenzivní vznik ještě těžších prvků – za železem – výbuchy supernov

Evolution hvězdy

Boj s gravitačním kolapsem - hledání stále nových zdrojů energie

zelená - vodík

modrá - helium

červená - uhlík

Jádro - spálení vodíku

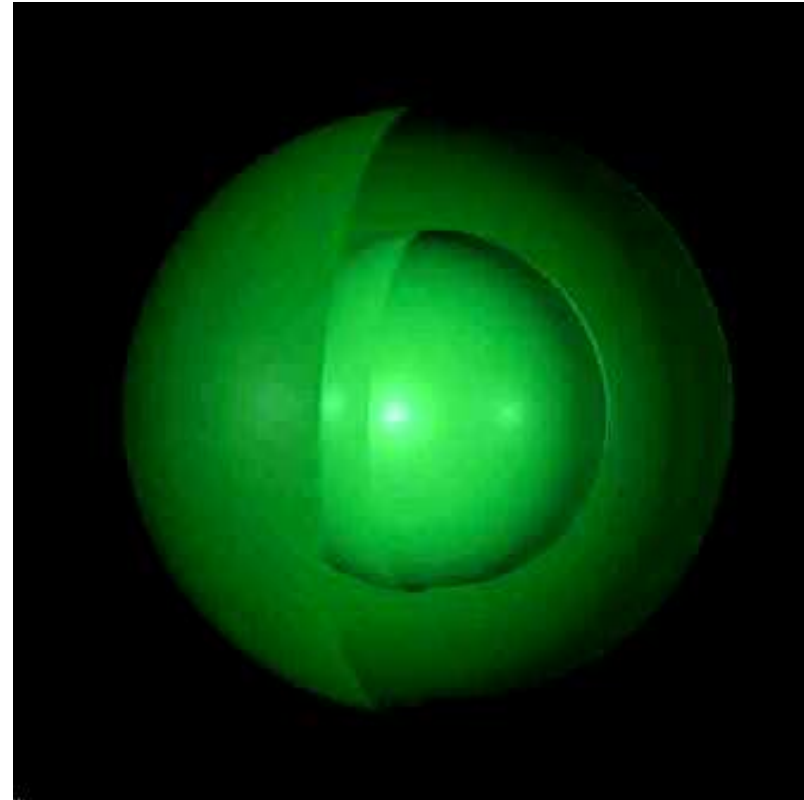
→ **stlačení** → **ohřátí** →

spálení helia →

stlačení → **ohřátí** →

**Posun spalování z jádra
do vnějších slupek**

Odfukování vnějších obálek



Závěr

- 1) V ranných fázích vývoje vesmíru vznikly pouze nejlehčí prvky zhruba po bór (i když pozorování primordiálního berylia a bóru je zatím neprůkazné), ve větším množství pouze helium 4 (jeho množství je naopak bez Velkého třesku nevysvětlitelné).
- 2) Přesné množství helia 3 a 4, deuteria a lithia 7 udává poměr mezi množstvím baryonů a reliktních fotonů. Je tak jedním z důkazů existence temné hmoty a energie. Získaný odhad jejího množství je v souladu s výsledky měření fluktuací reliktního záření.
- 3) Všechny těžší prvky vznikly ve hvězdách, během jejich vývoje.
- 4) V lehkých hvězdách (hmotnost menší než sluneční) probíhá pouze proton protonový cyklus (ten mohl probíhat i v ranném vesmíru) a CNO cyklus.
- 5) Prvky těžší než bór se můžou produkovat jen díky Salpeterovu (3α) cyklu.
- 6) Těžší prvky se produkují díky reakcím s héliem, v ještě těžších hvězdách (při vyšších teplotách) se spaluje uhlík a těžší prvky až po železo.
- 7) Ještě těžší prvky vznikají při výbuchu supernov pomocí r – a s – procesu.

