Základné reakcie jadrovej astrofyziky

1-FYZ-601 Jadrová fyzika

Universe

Visible universe:
75% hydrogen
23% helium
2% heavier nuclei

How are these heavy elements created?

Väzbová energia jadra B(A,Z)

- Hmotnosť jadra:
  $M_N = Z\, m_p + N\, m_n - B(A,Z)/c^2$

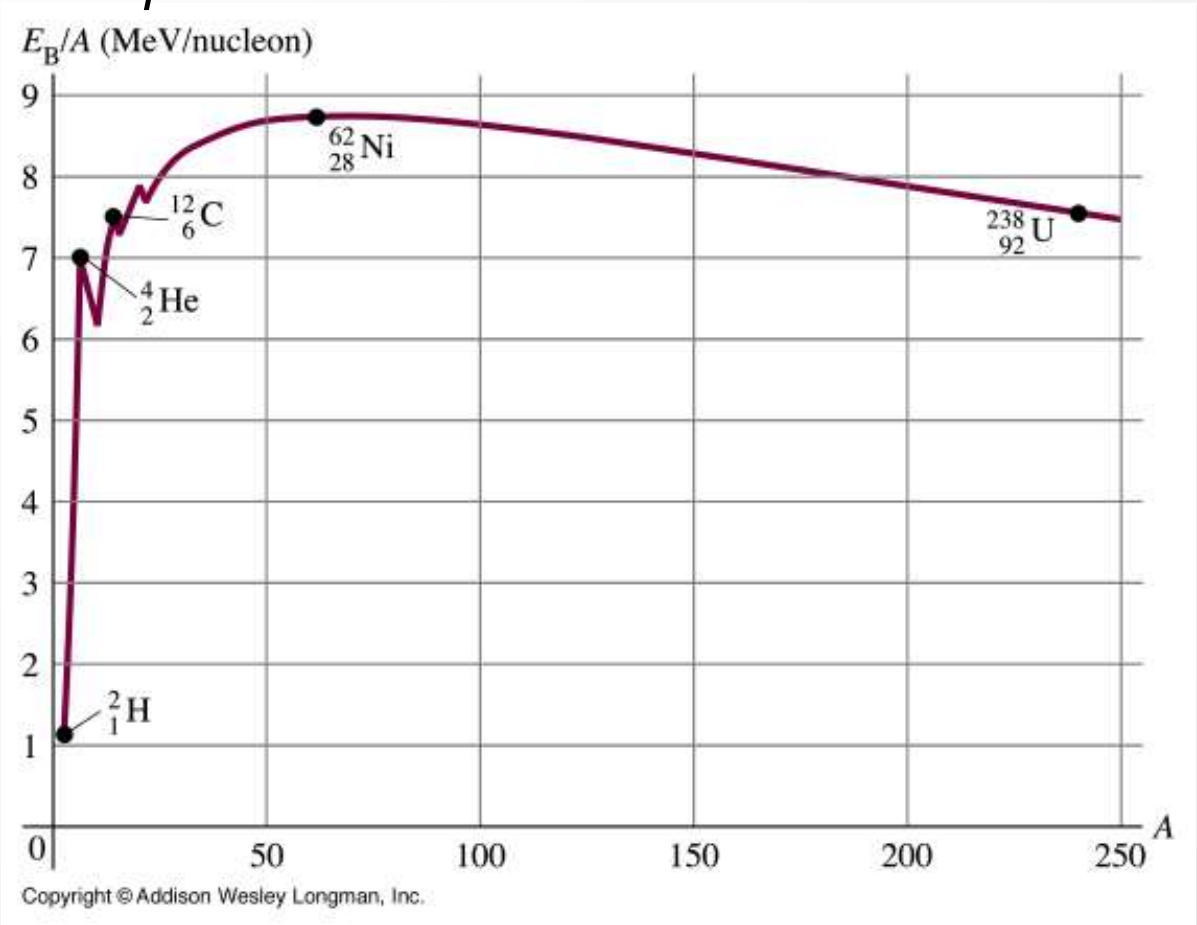
- B(A,Z) pre jadrá s A > 20 platí semi-empirický vzťah:

$$B(A,Z) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_c Z^2/A^{1/3} -$$
$$- a_a (A-2Z)^2/A + a_P((-1)^Z + (-1)^N)/(2A^{1/2})$$

Väzbová energia jadra B(A,Z)

- Hmotnosť jadra:

$$M_N = Z\, m_p + N\, m_n - B(A,Z)/c^2$$



Q hodnoty reakcií

Väzbová energia nukleónov v ľahkých jadrách rastie s hmotnostným číslom *A*

Reakcia	*Q*, MeV	*Q/A*, MeV
$^{2}H + ^{2}H \rightarrow ^{3}He + n$	3.25	0.81
$^{2}H + ^{2}H \rightarrow ^{3}H + p$	4.03	1.0
$^{2}H + ^{3}H \rightarrow ^{4}He + n$	17.6	3.5
$^{7}Li + p \rightarrow ^{4}He + ^{4}He$	17.3	2.2
$^{6}Li + n \rightarrow ^{4}He + ^{3}H$	4 .8	0.7

SYNTÉZA NAJĽAHŠÍCH JADIER PO BIG BANGU

Vývoj v prvotnom vesmíre

- Približne do času 10^{-5} – 10^{-6} s bol vesmír v štatistickej rovnováhe medzi quark-gluónovou plazmou a žiarením.
- Následne QGP kondenzovala za vzniku hadrónov a podivných častíc (obsahujúcich strange quark). Narušenie CP symetrie (napr. pre $\overline{K^0}$ a K^0) mohlo byť príčinou nerovnováhy medzi hmotou a antihmotnou (je však viac alternatívnych vysvetlení, ako napr. rýchle odseparovanie hmoty a antihmoty, éra produkcie masívnych častíc v čase 10^{-36} s čo zodpovedá 10^{28} K resp. 10^{15} GeV).
- Nerovnováha medzi hmotou a antihmotou vedie k pomeru počtu fotónov a hmotných častíc na úrovni 10^9 fotónov na 5 nukleónov.

Závislosť procesov od teploty

V dôsledku malého rozdielu hmotnosti protónu a neutrónu (cca 1.3 MeV) s klesajúcou teplotou narastá počet protónov voči neutrónom.

Pri 10^{12}K je pomer $\frac{N_n}{N_p} = e^{-\frac{(m_n - m_p)c^2}{kT}} \approx 0.985$ teda sú približne v rovnováhe.

Do 10^{-2} s klesla teplota na ~10^{11} K (E = 10 MeV). Jediné ostávajúce leptóny sú elektróny, nakoľko μ a τ majú privysoké hmotnosti a pôvodné sa už rozpadli (M_μ = 105 MeV a M_τ = 1784 MeV). Ešte existuje štatistická rovnováha medzi fotónmi a časticami, pričom prebiehali reakcie ako napr.

$$e^+ + e^- \leftrightarrow \gamma + \gamma$$
$$e^+ + e^- \leftrightarrow Z^0 \leftrightarrow \nu_e + \overline{\nu_e}$$
$$e^+ + e^- \leftrightarrow Z^0 \leftrightarrow \nu_\mu + \overline{\nu_\mu}$$
$$e^+ + e^- \leftrightarrow Z^0 \leftrightarrow \nu_\tau + \overline{\nu_\tau}$$

Taktiež protóny a neutróny sú v rovnováhe,pretože vďaka veľkému množstvu elektrónov a neutrín môžu prebiehať reakcie

$$p + \overline{\nu_e} \leftrightarrow n + e^+$$
$$n + \nu_e \leftrightarrow p + e^-$$

Závislosť procesov od teploty

Pri T > 10^{10} K je kT > niekoľko 1 MeV energia je väčšia ako väzbová energia nukleónov v jadrách (rádový odhad) $\Rightarrow$ nie je možná existencia viazaných nukleónových stavov, prežitie jadier a tým ani nukleosyntéza.
Pri týchto energiách je aj anihilácia v rovnováhe s vytváraním párov e+ e-. V dôsledku veľkého množstvu neutrín a elektrónov stále prebiehaju aj reverzné reakcie zámeny protónu a neutrónu.

Závislosť procesov od teploty

Pri 10^{11}K je pomer neutrónov k protónom $\frac{N_n}{N_p} = e^{-\frac{(m_n - m_p)c^2}{kT}} \approx 0.885.$

V čase 2 – 3 s klesne teplota na 10^{10} K čo kT ~ 1 MeV sa zastavujú efektívne reakcie $p + \overline{\nu_e} \leftrightarrow n + e^+$ a $n + \nu_e \leftrightarrow p + e^-$ ktoré zabezpečovali rovnováhu medzi počtom protónov a neutrónov. Počet neutrónov a protónov tak ostáva zamrznutý na pomere 0.223 pri teplote 10^{10} K.

V čase 1 sekunda, pri teplote 10^{10} K (kT ~ 1 MeV) končia obojsmerné reakcie kreácie a anihilácie elektrónov a prozitrónov. Taktiež interakcie neutrín už nie sú dostatočne efektívne.

Energia fotónov ostáva mierne vyššia od energie neutrín, kvôli zostávajucej možnosti reakcie $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ (už iba jednosmernej), takže vo vesmíre ubúda elektrónov a pozitrónov, čo bráni ďalšej tvorbe neutrónov.

Fotónov ostáva cca $10^9\times$ viac ako hmotových častíc. Celkový náboj častíc ostáva rovnovážny.

Vývoj v prvotnom vesmíre

- Prvá jadrová reakcia je $n + p \rightarrow d + \gamma$. Táto môže prebehnúť až keď klesne energia väčšiny systému výrazne 2.225 MeV (väzbová energia deutéria). Kritickým faktorom je vysoký počet fotónov, ktorých je ~ $10^9\times$ viac ako ako protónov a elektrónov (tých je cca rovnako). Takže podiel fotónov s energiou 2.225 MeV musí byť iba 10^{-9}.
- V skutočnosti keďže neutrónov je iba 20%, je kritický pomer fotónov 0.2×10^{-9}.
- Tento podiel fotónov zodpovedá pomeru $E_0/kT \cong 28$, takže $E_0 = 2.225\ MeV$ zodpovedá strednej energii $kT \cong 0.08\ \mathrm{MeV}$ resp. teplote $9\text{x}10^8$ K.
  Podmienky pre prvú jadrovú reakciu nastávajú teda po cca 250 s.

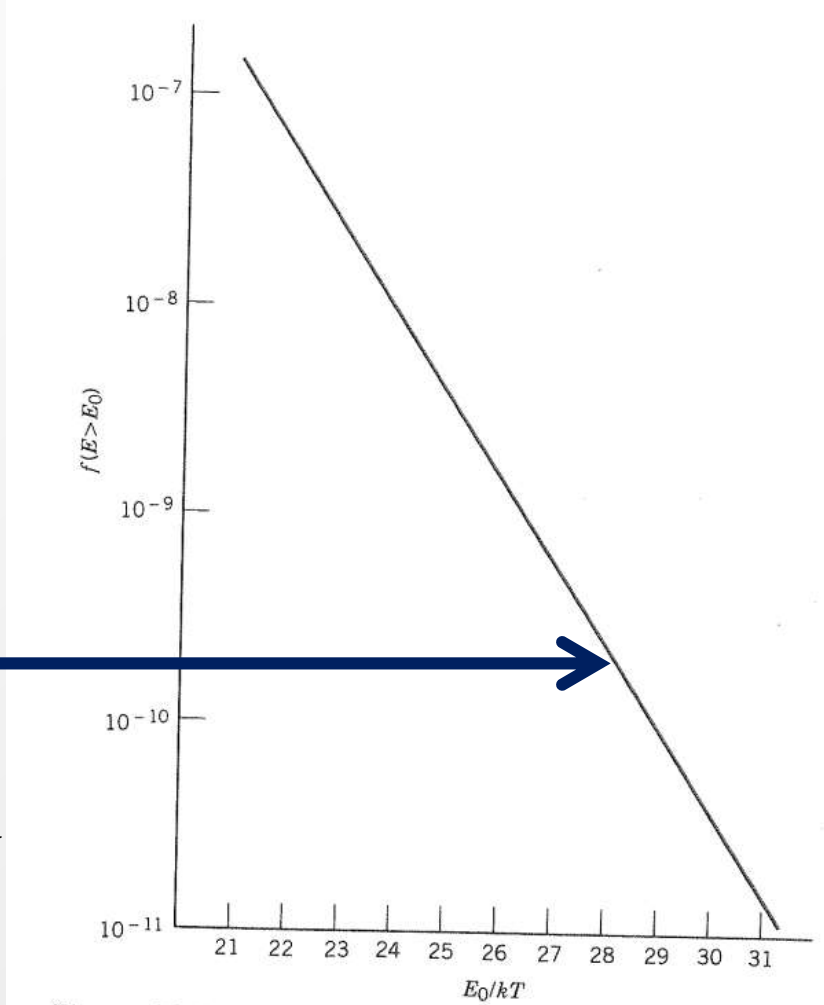


Figure 19.5 The fraction f of photons of energies above E_0.

K.S.Krane, Introductory Nuclear Physics (1988)

Vývoj v prvotnom vesmíre

- Nakoľko neviazaný neutrón sa rozpadáva, celý proces prvých jadrových reakcií a početnosti neutrónov, ktore do nich vstúpia je citlivý aj na dobu života neutrónu, ktorá nie je až natoľko presne známa $\tau_n = 883.3 \pm 1.2_{stat} \pm 3.2_{syst}$ s.
- Následne sa syntetizujú izotopy ^{2}H, ^{3}H, ^{7}Li, ktoré ostávaju stále v podobe ionizovaného plynu, kým teplota neklesne pod 3000 K (cca 700 000 rokov). Vtedy vzniknú podmienky na vznik neutrálnych atómov.
- Fotóny ďalej chladnú až na súčasnú teplotu 2.7 K.

Produkcia jadier s A =3 a 4He

Pri teplote T = 9 x 10^8 K (cca 80 keV) sa formuje deutérium.

Následne sa môžu formovať jadrá s hmotnosťou 3.

$d + d \rightarrow {}^3H + p$ $\qquad$ $d + d \rightarrow {}^3He + n$

Prebiehajúce reakcie môžu byť odlišné od p-p cyklu.

Na záver sa formuje ^4He

${}^3H + p \rightarrow {}^4He + \gamma$ $\qquad$ ${}^3He + n \rightarrow {}^4He + \gamma$

Priama cesta $d + d \rightarrow {}^4He + \gamma$ má veľmi malý účinný prierez.

Väzbová energia ^4He je väčšia ako ľahších jadier. Preto ak je energia fotónov dostatočne nízka na umožnenie produkcie deutéria, umožní sa automaticky aj produkcia ^4He.

Produkcia jadier s A = 7

^{4}He je konečný produkt celého procesu. Jadrá s A = 5 aj A = 8 sú veľmi nestabilné ($T_{1/2}(^5\text{Li}) = 3 \times 10^{-22}$ s a $T_{1/2}(^8\text{Be}) = 6.7 \times 10^{-17}$ s).

V malých množstvách sú možné procesy

$^4\text{He} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$

$^4\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$

$^7\text{Be} + \text{n} \rightarrow {}^7\text{Li} + \text{p}$

a aj spätné procesy

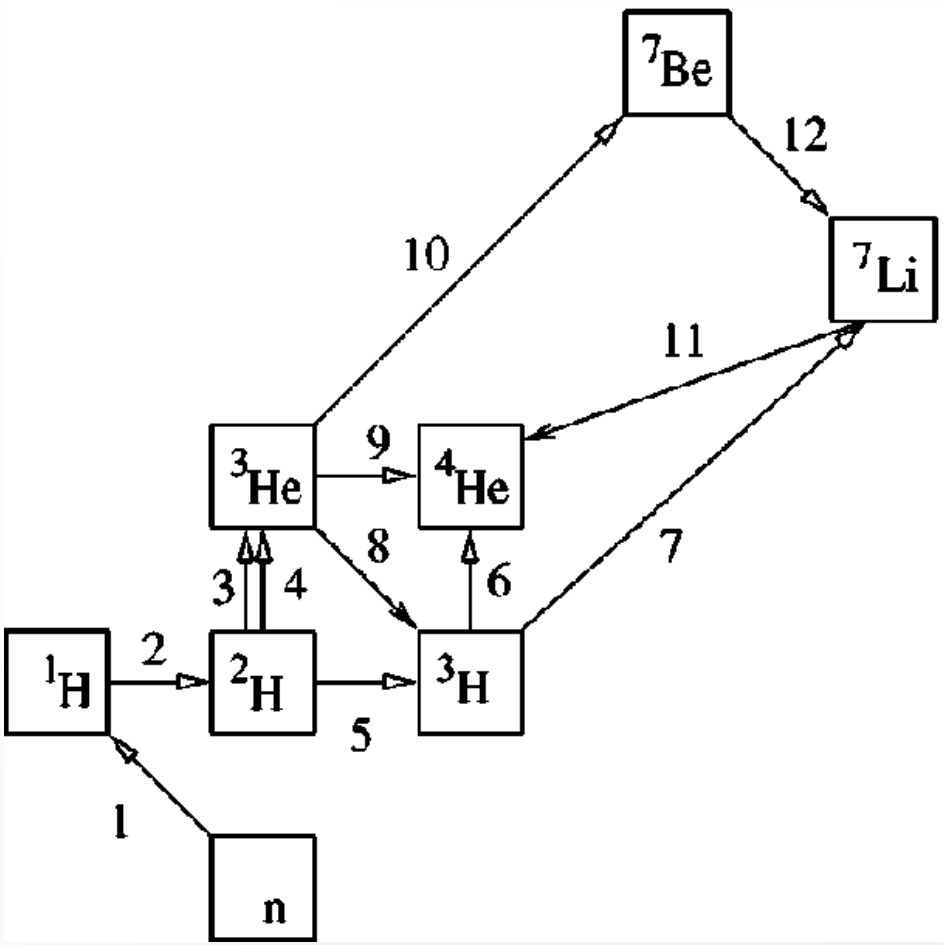
$^7\text{Li} + \text{p} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$

Kulombovská bariéra je však cca 1 MeV čo je už výrazne nad energiou zodpovedajúcej teplote 9×10^8 K.

Všetky neutróny končia nakoniec vo viazanom stave ^{4}He, pričom pomer $N_{^4He}/n_p \cong 0.081$.

Po 250 sekundách, pri teplotách pod 3×10^8 K ($kT \approx 30$ keV) reakcie prakticky zaniknú. Ďalšia tvorba ^{4}He je možná až po vytvorení hviezd.

Reakcie nukleosyntézy



1. $p \longleftrightarrow n$
2. $p(n,\gamma)d$
3. $d(p,\gamma)^3\mathrm{He}$
4. $d(d,n)^3\mathrm{He}$
5. $d(d,p)t$
6. $t(d,n)^4\mathrm{He}$
7. $t(\alpha,\gamma)^7\mathrm{Li}$
8. $^3\mathrm{He}(n,p)t$
9. $^3\mathrm{He}(d,p)^4\mathrm{He}$
10. $^3\mathrm{He}(\alpha,\gamma)^7\mathrm{Be}$
11. $^7\mathrm{Li}(p,\alpha)^4\mathrm{He}$
12. $^7\mathrm{Be}(n,p)^7\mathrm{Li}$

Diagram reakcií počiatočnej nukleosyntézy v štandartnom modeli veľkého tresku.
K.M. Nollet a S. Burles, Physical Review D 61, 123505 (2000)

Produkcia ^{12}C

^{8}Be sa rozpadáva s prakticky rovnakou rýchlosťou ako vzniká ($\tau \cong 10^{-16} s$).

Preto nie je možná produkcia na spôsob

$$^{4}He + {}^{4}He \leftrightarrow {}^{8}Be$$
$$^{4}He + {}^{8}Be \rightarrow {}^{12}C$$

V počiatočnej nukleosyntéze je jeho produkcia zanedbateľná.

NUKLEOSYNTÉZA VO HVIEZDACH

19. 12. 2018

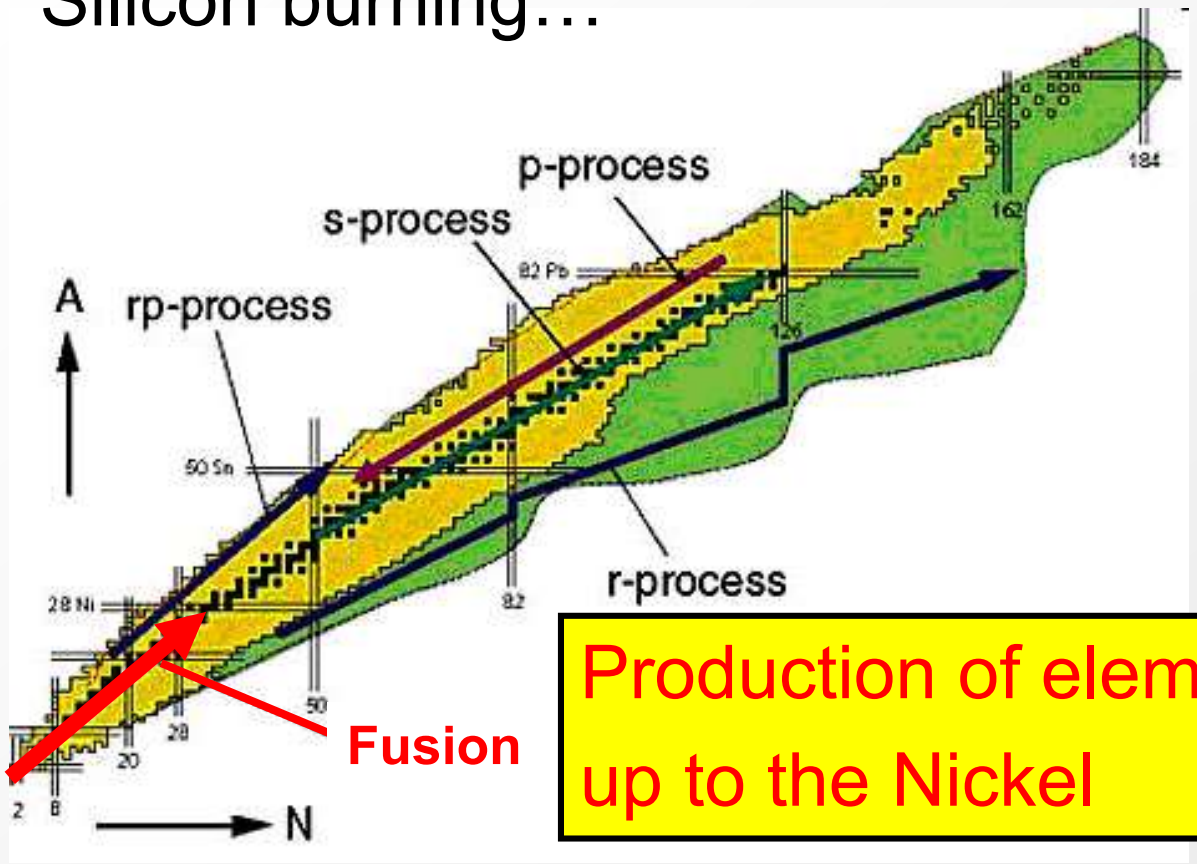
Jadrová astrofyzika

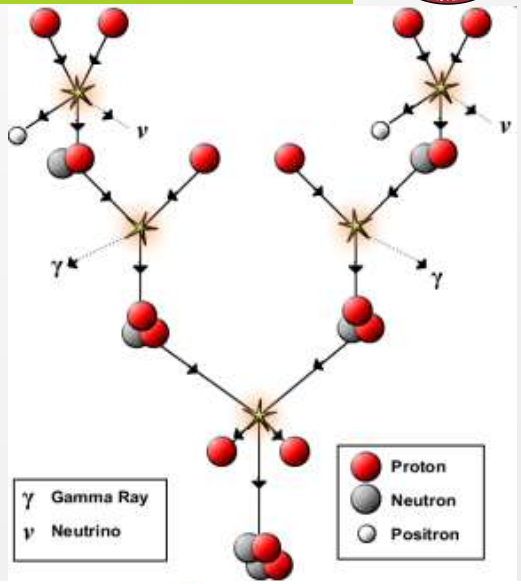
Fusion

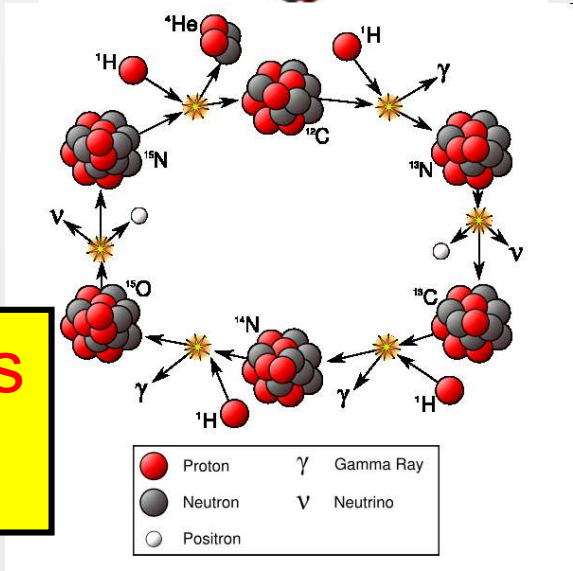
p-p cycle, Triple alpha process

CNO cycle, Oxygen burning,

Silicon burning…







Production of elements up to the Nickel

p-p cyklus

Mimoriadny význam majú reakcie konvertujúce vodík na hélium tzv. p-p cyklus. Opísal ho Bethe (1938)

Prvý možný krok:

$p + p \rightarrow 2H + e^{+} + \nu$ ($E_{\nu} < 0.42$ MeV)

Veľmi nepravdepodobný proces kvôli potrebe tunelovania cez kulombovskú bariéru. 5×10^{-18} eventov s-1 proton-1 (zodpovedá strednej dobe realizácie 1 event za 6×10^{9} rokov).

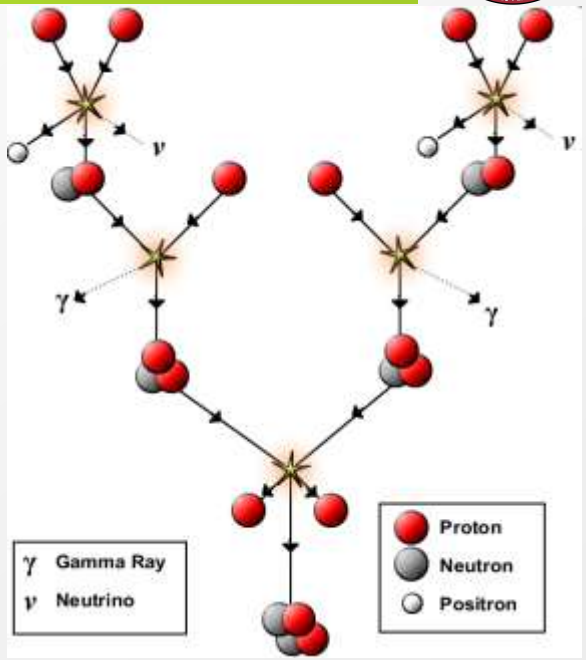
Kompenzované vysokou hustotou a počtom protónov.

$^{2}H + p \rightarrow {}^{3}He + \gamma$ (E = 5.49 MeV)

$^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + 2p$ (E = 12.86 MeV)

Spolu

$4p \rightarrow {}^{4}He + 2e^{+} + 2\nu + 26.7$ MeV



CNO cyklus

Cyklus je založený na uhlíku ^{12}C ako katalyzátore a opísal ho po prvý krát Hans Bethe (1906 - 2005) v r. 1938

$^{12}C + p \rightarrow {}^{13}N + \gamma$

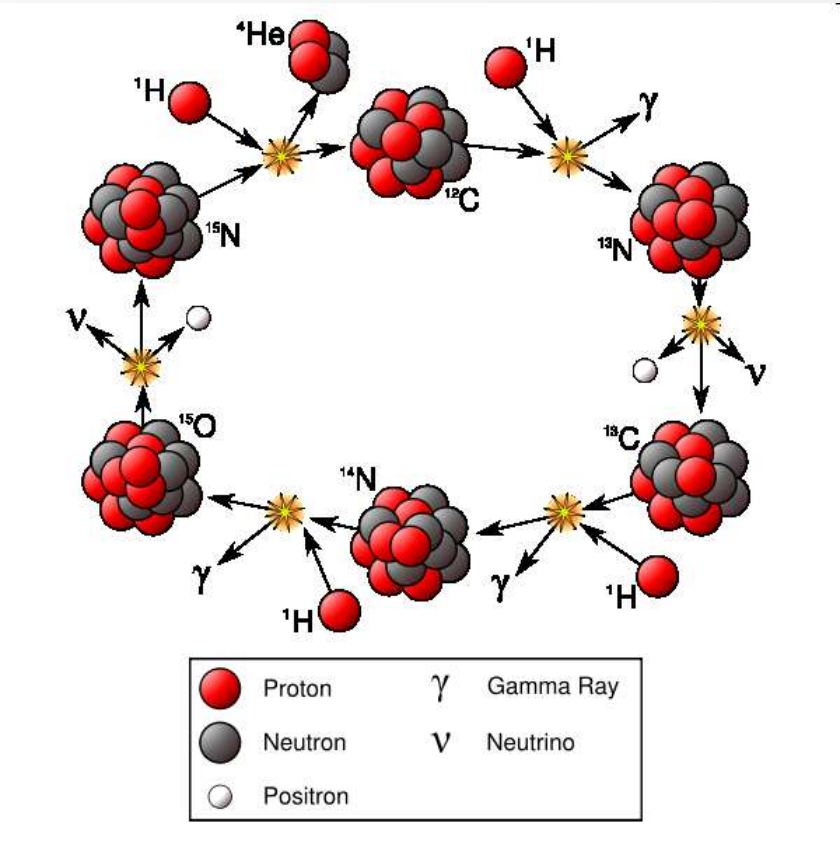
$^{13}N \rightarrow {}^{13}C + e+ + \nu$

$^{13}C + p \rightarrow {}^{14}N + \gamma$

$^{14}N + p \rightarrow {}^{15}O + \gamma$, $t = 3x10^8$ rokov

$^{15}O \rightarrow {}^{15}N + e+ + \nu$

$^{15}N + p \rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He$



Energetická bilancia cyklu:

$4p \rightarrow {}^{4}He + 2e+ 2\nu + 3\gamma$, $Q = 26$ MeV

CNO cyklus má aj alternatívnu podobu, ale predstavuje iba 0.4% prípadov

Úloha ^{12}C

Spomínali sme, že produkcia 12C je prakticky nepravdepodobná, kvôli vysokej nestabilite ^{8}Be.

$$^{4}He + {}^{4}He \leftrightarrow {}^{8}Be$$

$$^{4}He + {}^{8}Be \rightarrow {}^{12}C$$

Reakcia $3\ ^{4}He \rightarrow {}^{12}C$ je však energeticky možná s Q hodnotou 285 keV. Učinný prierez by však mal byť malý.

V 50tych rokoch však Fred Hoyle navrhol ideu existencie rezonančného stavu v ^{12}C s výrazne vyšším účinným prierezom.

W.A.Fowler s jeho teamom identifikoval 0^{+} stav s energiou 7.65 MeV, ktorý sa rozpadával na 3 alfa častice. V nukleosyntéze prebieha presne reverzný proces.

Fúzia ťažších prvkov

Vďaka prítomnosti ^{12}C, taktiež môžu prebiehať reakcie

$^{12}C + {}^{4}He \rightarrow {}^{16}O + \gamma$ (Q = 7.16 MeV, E_b = 3.57 MeV)

$^{16}O + {}^{4}He \rightarrow {}^{20}Ne + \gamma$ (Q = 4.73 MeV, E_b = 4.47 MeV)

$^{20}Ne + {}^{4}He \rightarrow {}^{24}Mg + \gamma$ (Q = 9.31 MeV, E_b = 5.36 MeV)

Pri nedostatku ^{4}He vedie gravitačný kolaps pri masívnych hviezdach k zvýšeniu teploty na 10^9 K a umožní priebeh uhlíkového a kyslíkového horenia

$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{20}Ne + {}^{4}He$ resp. $^{23}Na + p$

$^{16}O + {}^{16}O \rightarrow {}^{28}Si + {}^{4}He$ resp. $^{31}P + p$

Pričom môžu prebiehať aj reakcie s alfa časticami na ťažších jadrách.

Kremíkové horenie

Po reakciách

$^{12}C + ^{12}C \rightarrow ^{20}Ne + ^{4}He$ resp. $^{23}Na + p$

$^{16}O + ^{16}O \rightarrow ^{28}Si + ^{4}He$ resp. $^{31}P + p$

Nie je teplota dostatočná na prekonanie kulombovskej bariéry a reakcia $^{28}Si + ^{28}Si \rightarrow ^{56}Ni$ sa prakticky neuskutoční.

Namiesto nej prebiehaju (γ,α), (γ,n) a (γ,p) ako napr.

$^{28}Si + \gamma \rightarrow ^{24}Mg + ^{4}He$

$^{28}Si + ^{4}He \rightarrow ^{32}S + \gamma$

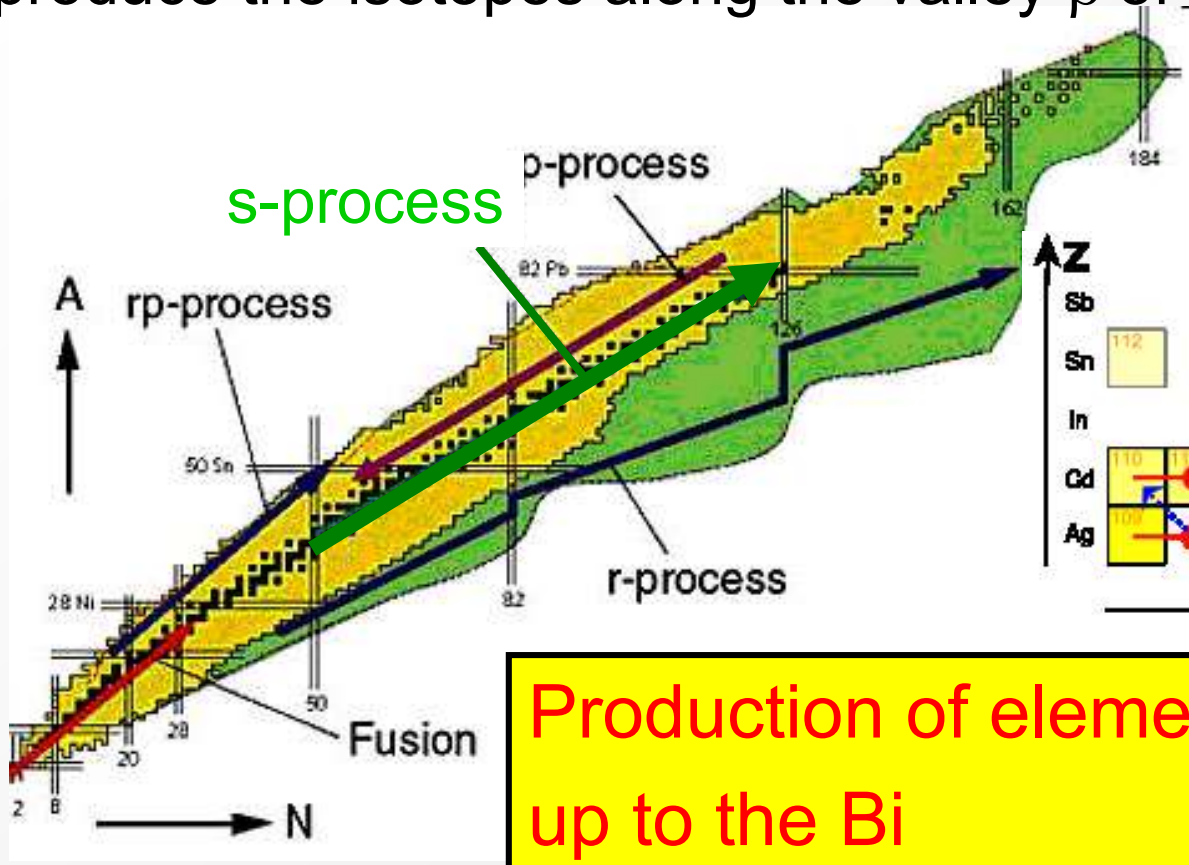
Proces koncči pri ^{56}Fe, v ktorom sa spľovanie zastaví.

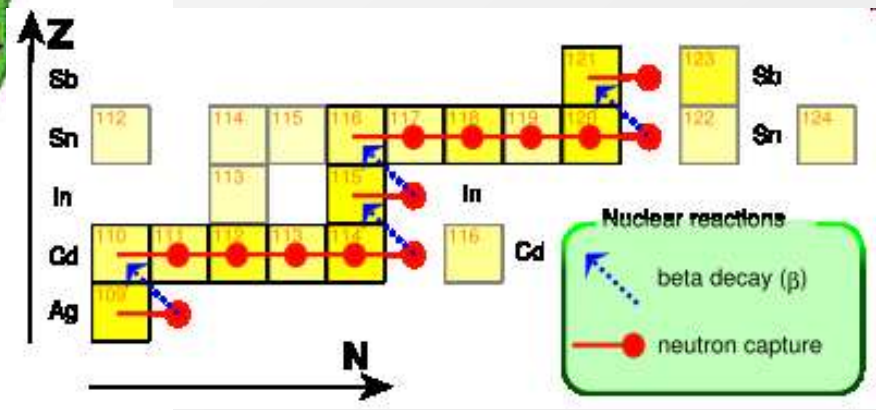
s-process

Slow neutron capture - occurs in the red-giant stars.

low neutron flux (10^5 - 10^{11}/cm^2.s)

produce the isotopes along the valley β of stability



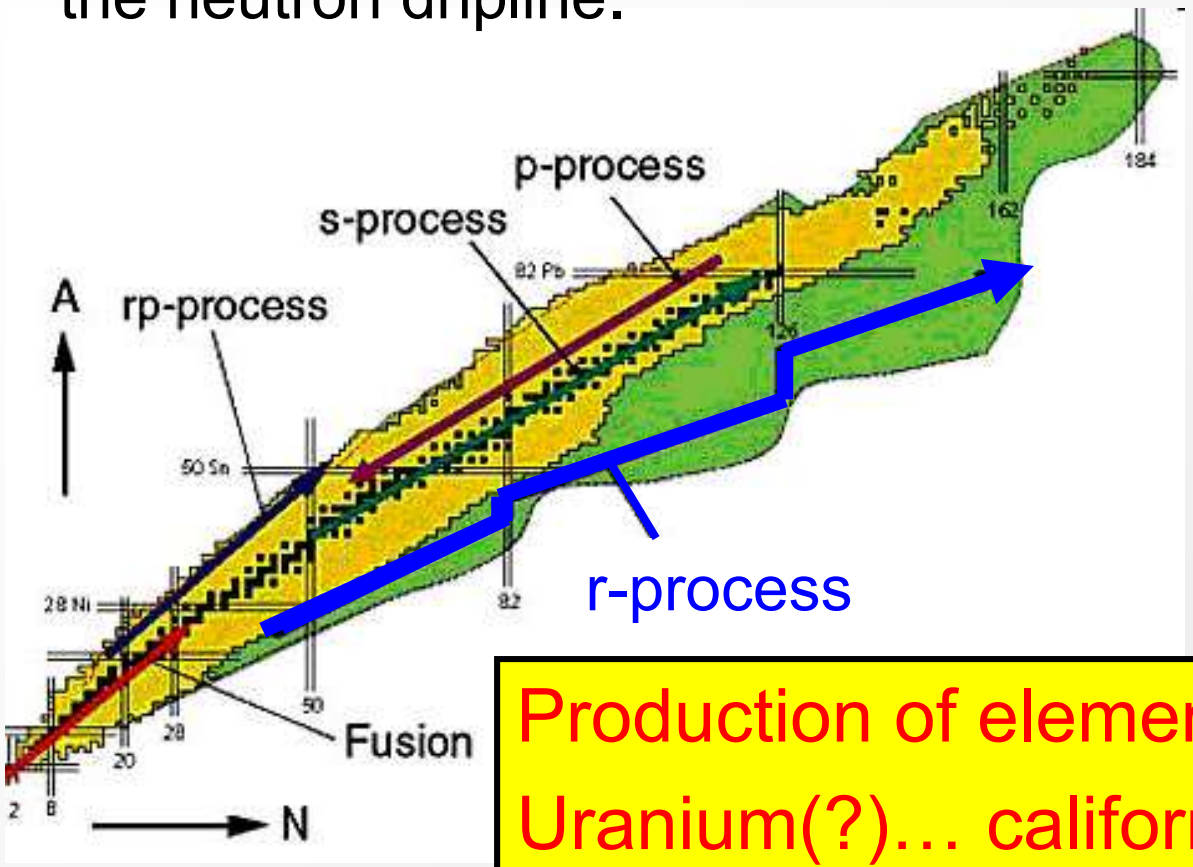


Production of elements up to the Bi

r-process

Rapid neutron capture in Core-collapse supernovae.

High ($10^{22}/cm^2.s$) neutron flux helps to produce isotopes up to the neutron dripline.



Production of elements up to the Uranium(?)… californium(?)… A=298(?)