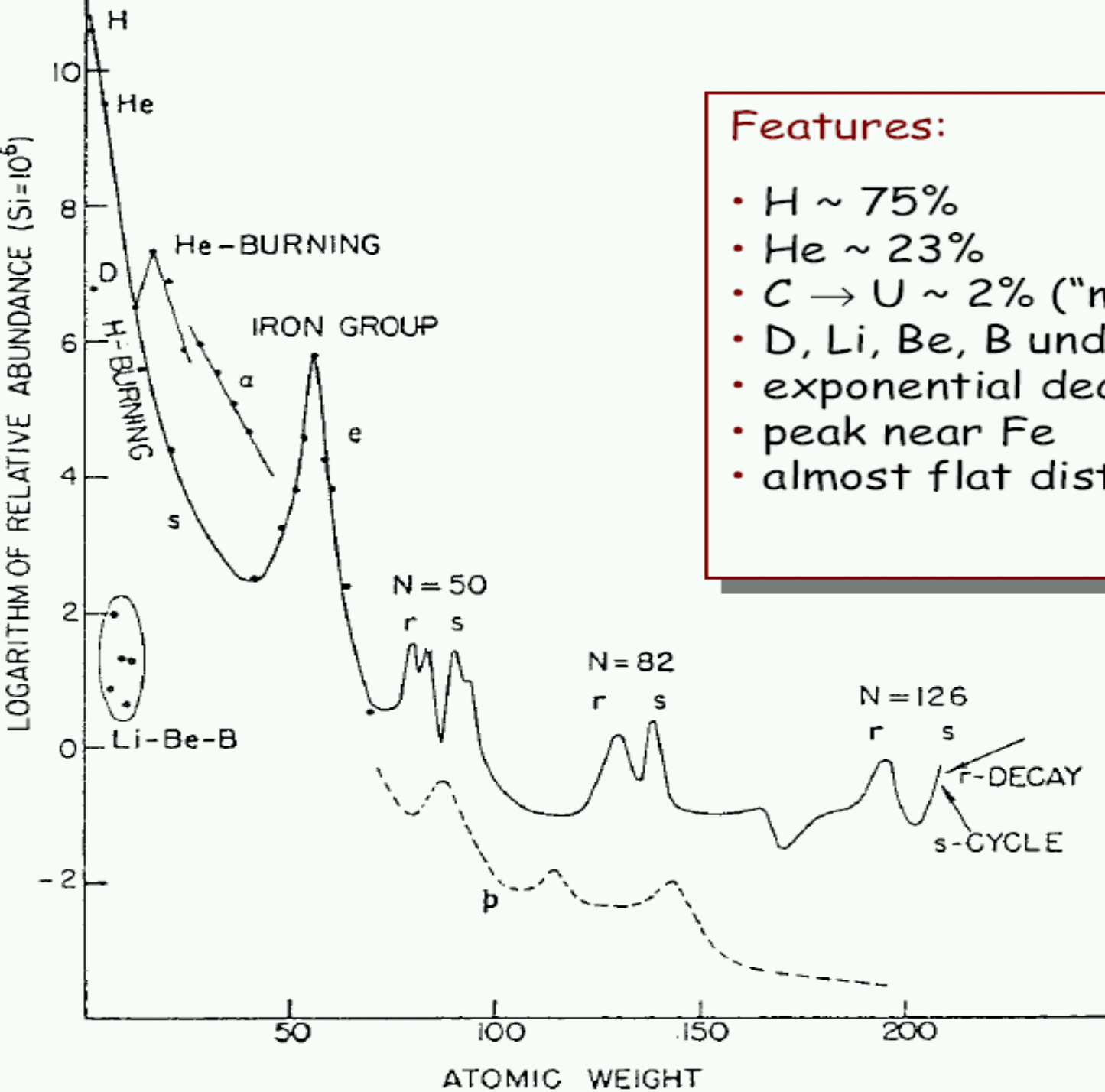




# Elementide süntees

T. Kipper, 2005.

# "COSMIC ABUNDANCE CURVE"



## Features:

- H ~ 75%
- He ~ 23%
- C → U ~ 2% ("metals")
- D, Li, Be, B under-abundant
- exponential decrease up to Fe
- peak near Fe
- almost flat distribution beyond Fe

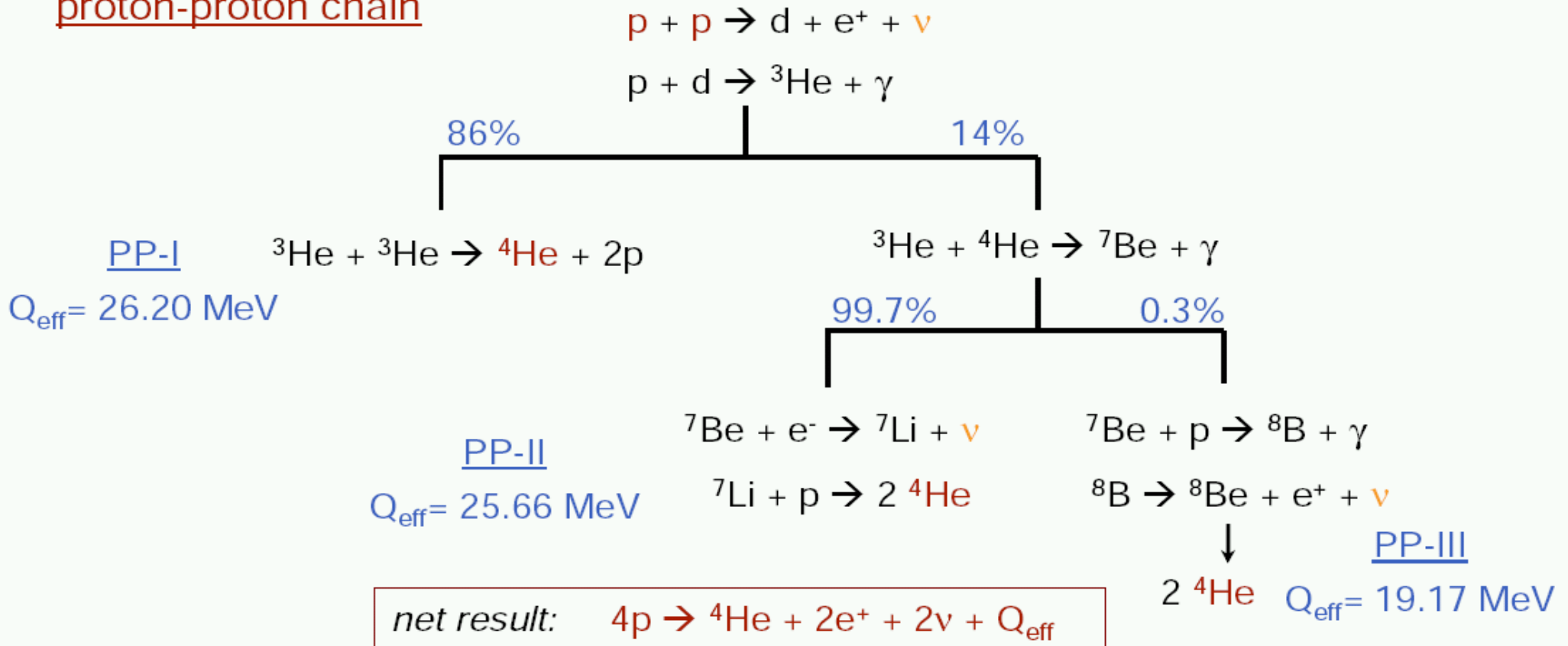


Peale väga kergete elementide sünteesi BBN-s toodetakse enamuselemente tähtedes:

- 1) Eksotermilised järjestikulised tuumapõlemised— H, He, C põlemised,  $\alpha$ -protsess ja tasakaaluline e-protsess. Minimaalne tähe mass, milles tuumareaktsioonid käivituvad on umbes 0.1 Mo.
- 2) Neutronite haaramise protsessid — s-protsess (aeglane) ja r-protsess (kiire).
- 3) Mitmesugused protsessid nagu p-protsess (protonite haaramine) ja "kildude lõhkumine" (spallation) tähtes.

Kui temperatuur kokkutõmbuvas tähes ulatub umbes  $10^7$  K algavad prootonite ühinemiseprotsessid. Esimene neist on nn. prooton-prooton ahel:

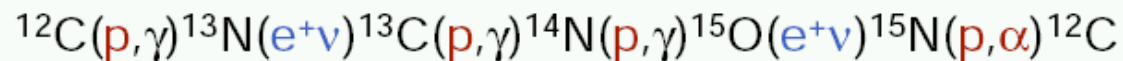
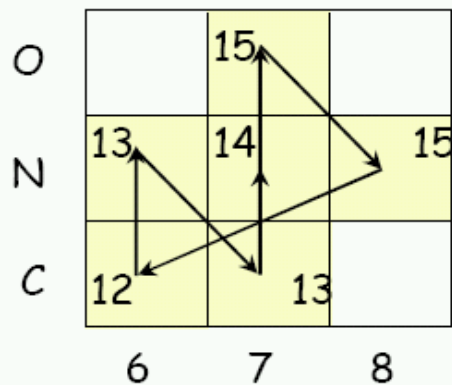
proton-proton chain



Näiteks Päikeses põletatakse sekundis 600 milj. tonni vesinikku 595 miljoniks tonniks heeliumiks ja vabaneb 4.5 miljoni tonni arvel  $\gamma$ -kvante, mis tasapisi pikemate lainetega kvantideks muutudes jõuavad umbes miljoni aastaga pinnani.

Kui temperatuur on kõrgem kui  $1.6 \cdot 10^7$  K ja tähes on varasematest põlvkondadest raskemaid elemente, mis toimivad nn. katalüsaatoritena, rakendub nn. süsiniktsükkel. Päikesel annab see tsükkel umbes 10% H põlemisel saadavast energiast.

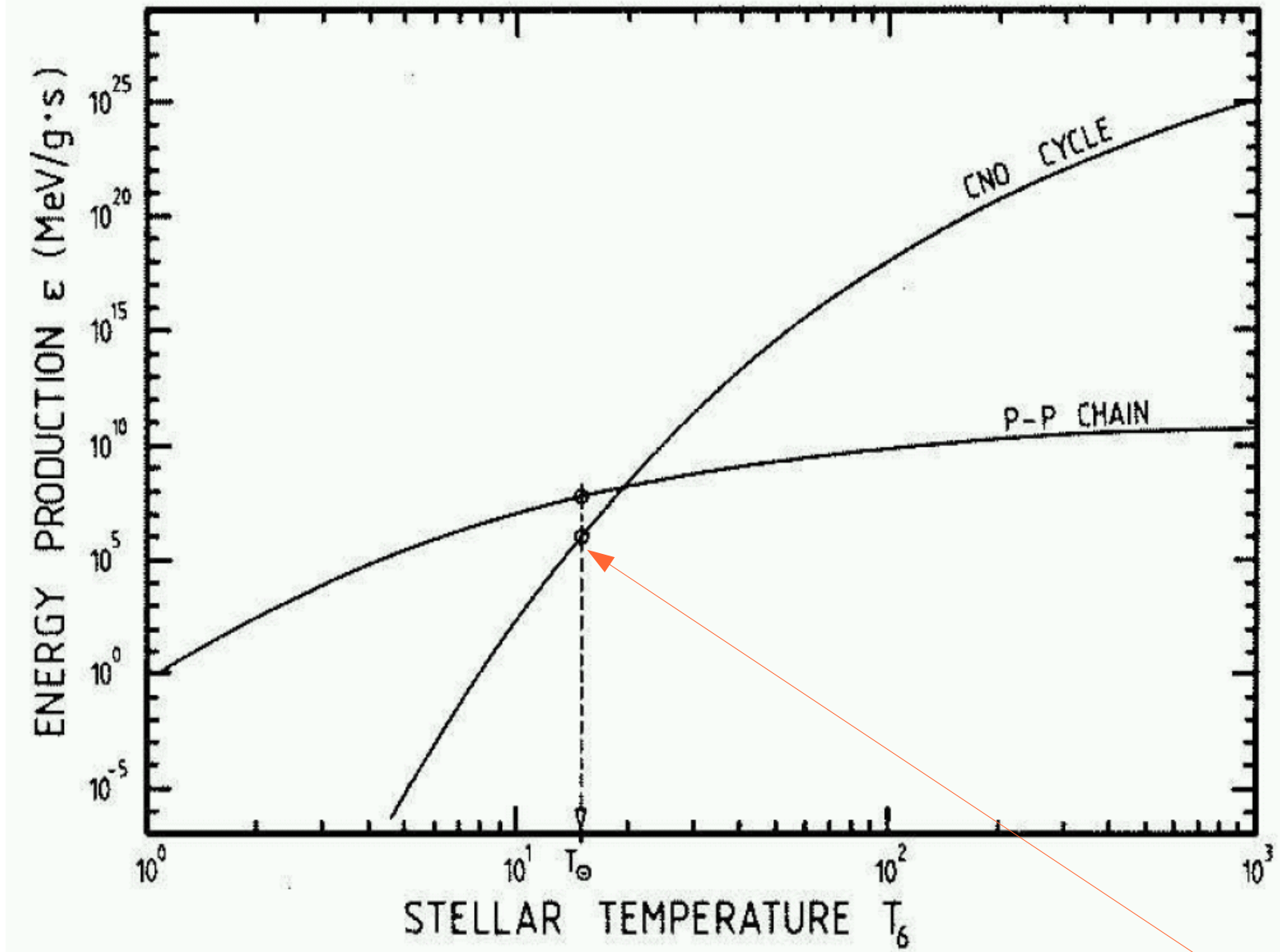
### CNO cycle



Cycle limited by  $\beta$  decay of  $^{13}\text{N}$  ( $t \sim 10$  min) and  $^{15}\text{O}$  ( $t \sim 2$  min)

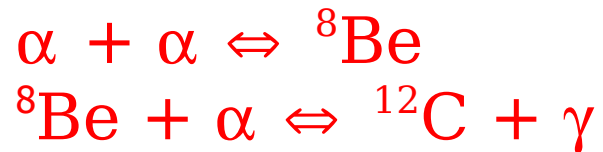
CNO isotopes act as catalysts

$$\text{net result: } 4p \rightarrow ^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu + Q_{\text{eff}} \quad Q_{\text{eff}} = 26.73 \text{ MeV}$$



Prooton-prooton ahela ja süsiniktsükli energaetilise saagise sõltuvus temperatuurist. Päikese temperatuur H põlemise alas on märgitud.

Kui peajadal tähes umbes 10% H-st on põletatud He-ks on väljapoole suunatud kiirgusrõhk ebapiisav vastu t<sup>^</sup>amaks raskusjõule ja järgneb kokkusurumine. Selle jooksul tekib tihe ( $\rho \sim 10^5 \text{ g cm}^{-3}$ ) ja kuum ( $2 \cdot 10^8 \text{ K}$ ) He tuum. Sellel temperatuuril saab ületada Coulomb'i barjääri ja algab He põlemine. Samal ajal vesinik moodustab ulatusliku ümbrise ja täht evolutsioneerub punaseks hiiuks. Peamised reaktsioonid on:



Berülliumi tuum on ebastabiilne  $\alpha$ -osakese emissiooni suhtes (poolestusaeg  $2 \cdot 10^{-16} \text{ s}$ ) ja punase hiiu tuumas oleks berülliumi tasakaaluline suhe heelimisse vaid  $10^{-9}$ , mis, olles küll väike, võimaldab  $3\alpha$  pörgetel toimuda. Energeetiline saagis on 7.3 MeV.

Järgnevates heeliumi põletamise reaktsioonides sünteesitakse raskemaid elemente:



Need reaktsioonid viivad He ammendumisele ja moodustub tuum süsinikust, hapnikust ja neonist.

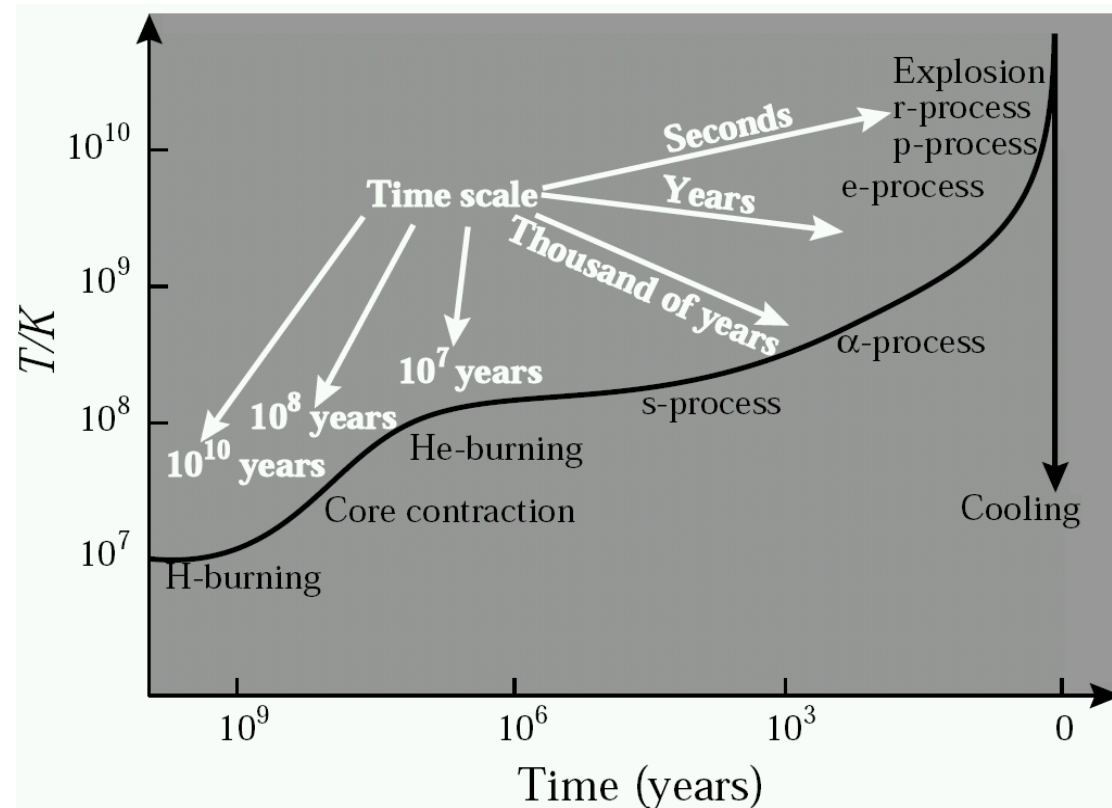
Temperatuuridel umbes  $5 \cdot 10^8$  K saab võimalikuks süsiniku põlemine, kus kahe süsinikutuuma liitumisel toodetakse

$^{24}\text{Mg}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{20}\text{Ne}$  ja uuesti vesinikku ja heeliumi.

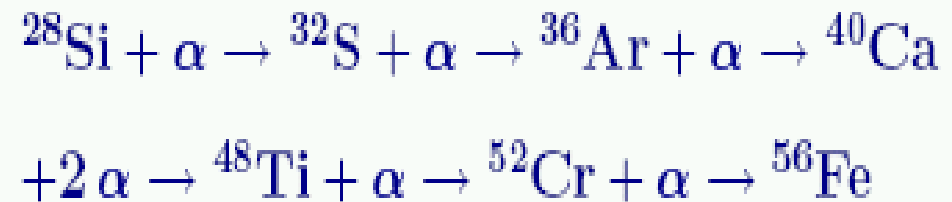
Kui täht lõpetab oma punase hiiu staadiumi massiga mitte üle 1.4 Mo võib ta veelkord kokku tõmbuda tõstes temperatuuri  $10^9\text{K}$ -ni.  $\gamma$  - kiired on siis nii energetilised, et saab võimalikuks endotermiline reaktsioon



Vabanevad  $\alpha$ -osakesed annavad sarnaseid reaktsioone kui varasemad heeliumi põlemise reaktsioonid, kuid nüüd on nende päritolu täiesti teine. See on protsess, mida peetakse vastutavaks nn. alfa elementide  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{44}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ti}$  sisalduste kujunemisel.



$\alpha$ -protsessi reaktsioonid toimuvad mõlemas suunas ja sisaldused lähevad tuumade statistilisele tasakaalule. Sõltuvalt neutronite hulgast saadakse enim stabiilsed elemendid  $^{54}\text{Fe}$  või  $^{56}\text{Fe}$ .



Erinevat tüüpi supernoovad annavad erinevad elementide sisalduste jaotused:

- kollapseeruvad supernoovad (core-collapse): põhiosa **Fe** jääb tuuma, kõige enam 0.1 Mo paisatakse välja. Suur osa **O**-st vabaneb ISM-i.
- termonukleaarsed plahvatused: peamised **Ni** tootjad, Ni laguneb **Fe**-ks (~0.6 Mo).
- hüpernoovad: paiskavad välja nii **Fe** kui ka **O** ja väga palju  $\alpha$ -rikkaid elemente. Nähtavasti olid olulised vaid Universumi varastel etappidel.

Stellar mass ( $M_{\odot}$ )	Stage reached
< 0.08	no thermonuclear fusion
0.1 - 0.5	H burning
0.5 - 8	He burning
8 - 11	C burning
> 11	all stages

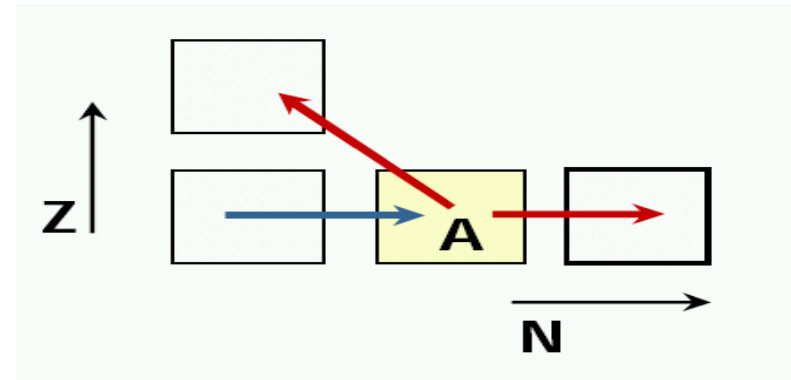
Evolution stages of a  $25 M_{\odot}$  star

Stage reached	Timescale	$T_{\text{core}}$ ( $10^9$ K)	Density ( $\text{g cm}^{-3}$ )
H burning	$7 \times 10^6$ y	0.06	5
He burning	$5 \times 10^5$ y	0.23	$7 \times 10^2$
C/O burning	600 y / 6 months	0.93 – 2.3	$2 \times 10^5 - 1 \times 10^7$
Si melting	1 d	4.1	$3 \times 10^7$
Explosive burning	0.1 – 1 s	1.2 - 7	varies

Raskemaid elemente kui raud sünteesitakse neutronite haaramise reaktsioonides. Kõigepealt **s-protsess**.

Aeglast neutronite haaramist  $\gamma$ -kiirte emiteerimisega peetakse enamiku isotoopide sünteesireaktsiooniks masside vahemikus  **$A=63-209$**  ja enamiku mitte  $\alpha$ -protsessis toodetavatele tuumadele  **$A=23-46$** .

$$\tau_{\beta} \ll \tau_n$$



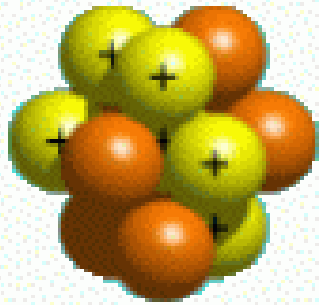
Oluline on, et  $n$  jääb 100 s või isegi aastaid järjestikuste neutronite haaramiste vahel. Sellest siis ka nimetus. Neutronite tihedus peab olema madal  $\leq 10^8 \text{cm}^{-3}$ .

Peamine koht, kus toimub, on He sähvatused peale H segamist  $^{12}\text{C}$  rikastatud tsoonidesse **TP-ABG tähtedes** massidega 1.5- 3  $M_{\odot}$ ,  $T_8 \approx 0.9-2.7$ . **Tehneetsiumi vaatlemine AGB tähtedes on selle oluline tõestus.**

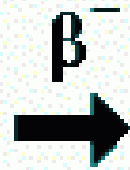
Vähesel määral (nn. weak s-process) ka He põlemisel tuumas ja C põlemine ümbrises massiivsetes tähtedes  $M \approx 25 M_{\odot}$ ,  $T_8 \approx 2.2-3.5$ .

## Beta-minus Decay

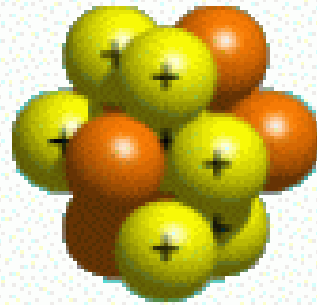
Carbon-14



6 protons  
8 neutrons



Nitrogen-14

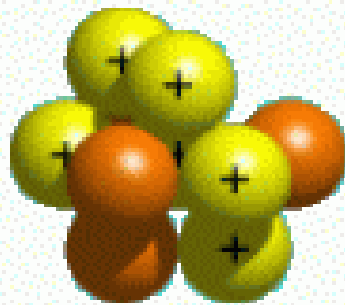


7 protons  
7 neutrons



## Beta-plus Decay

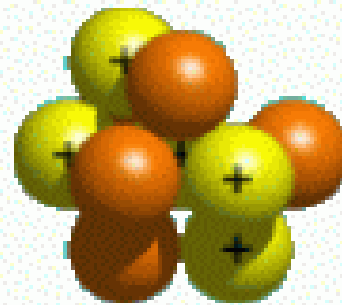
Carbon-10



6 protons  
4 neutrons

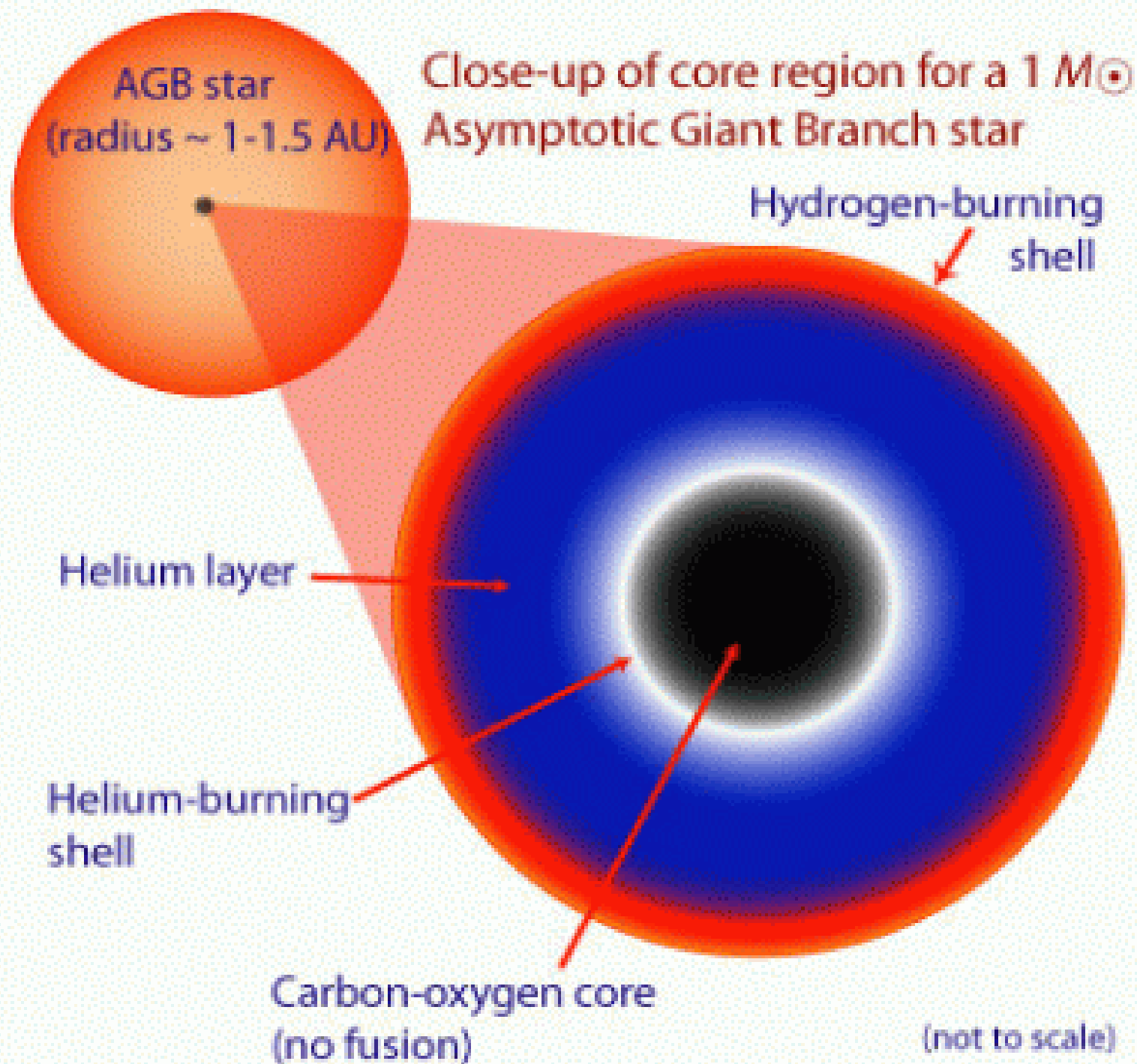


Boron-10

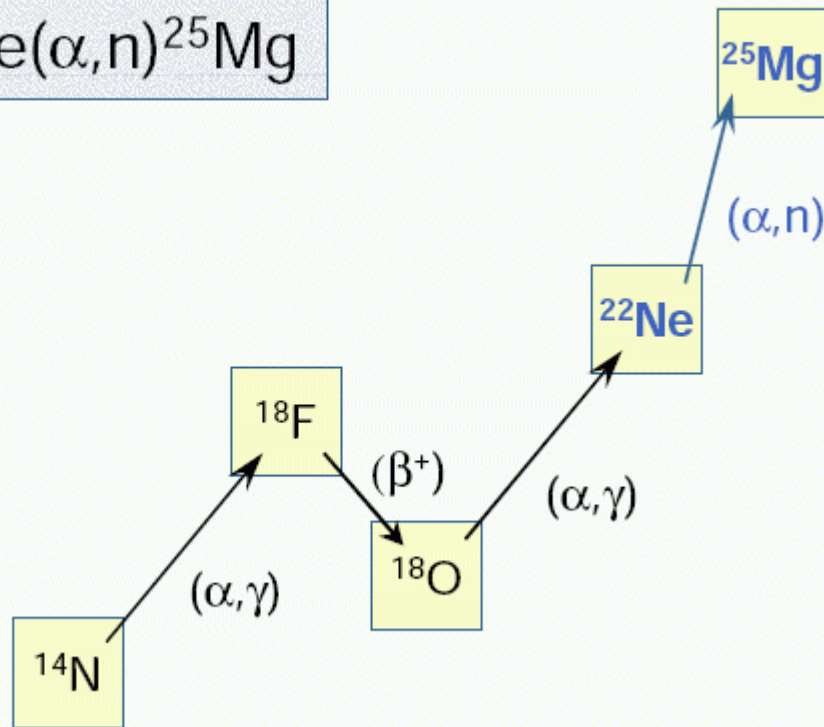
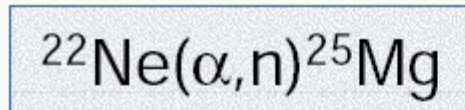


5 protons  
5 neutrons

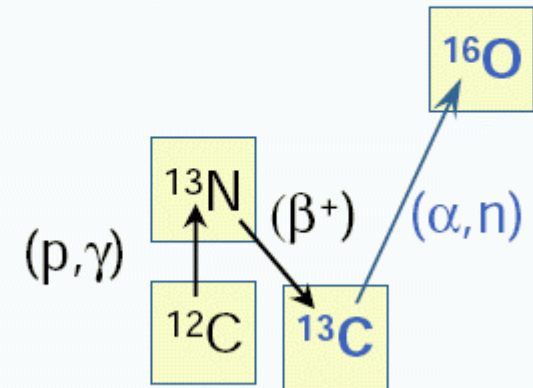
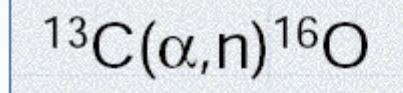




Vabad neutronid on ebastabiilsed, seega peab neid tekkima **in situ**. Paljud  $(\alpha, n)$  reaktsioonid kõlbaksid, kuid sobivaimad on:

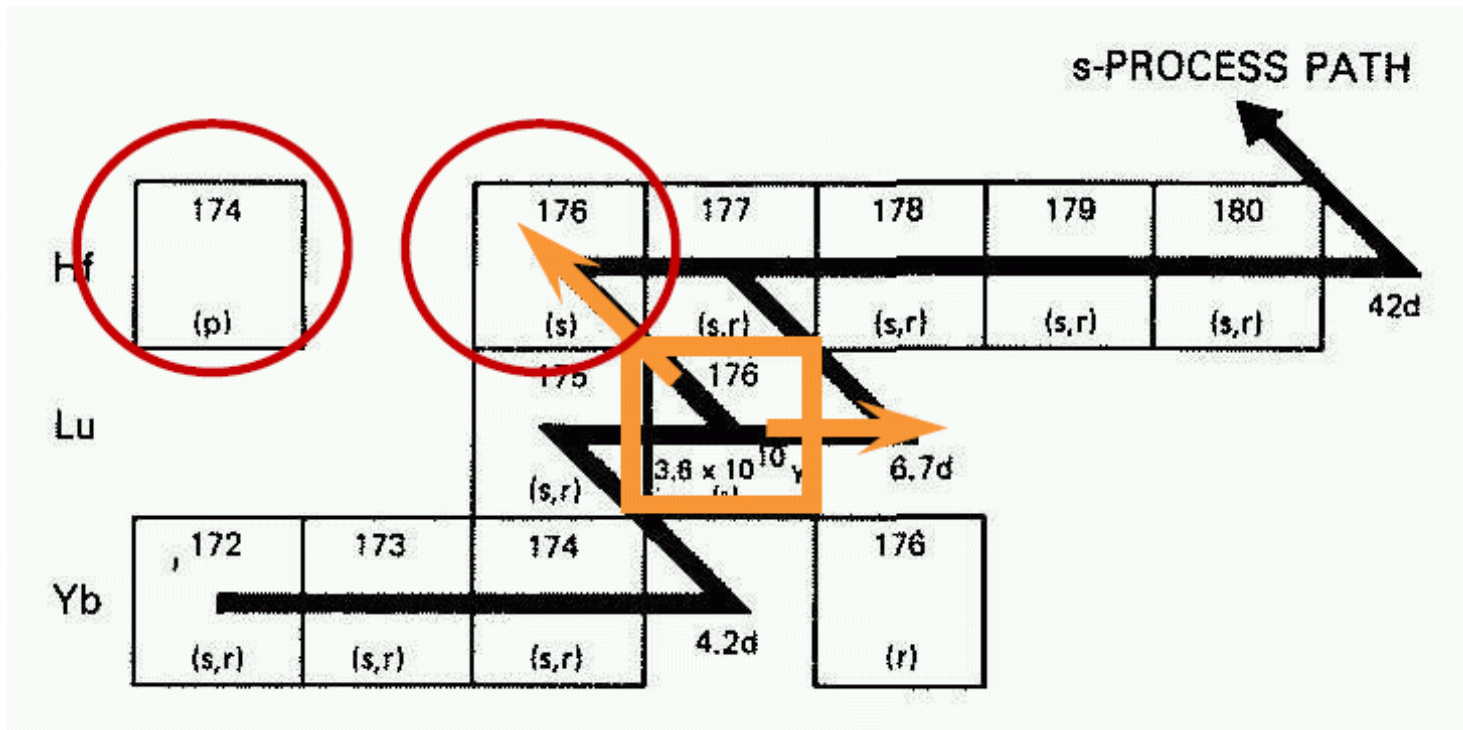


$T^{\wedge}$ tab massiivsetes tähtedes



$T^{\wedge}$ tab TP-AGB tähtedes

Kui beeta lagunemise aeg ja ajavahe neutronite haaramiste vahel on enamvähem võrdsed, toimub s-protsessi jadas hargnemine. Hargnemise kohti on 15-20. Näiteks:



$$^{176}\text{Lu}^{\text{GS}} > ^{176}\text{Hf}$$

$$\tau_{\beta} \approx 5 \cdot 10^{10} \text{ aastat}$$

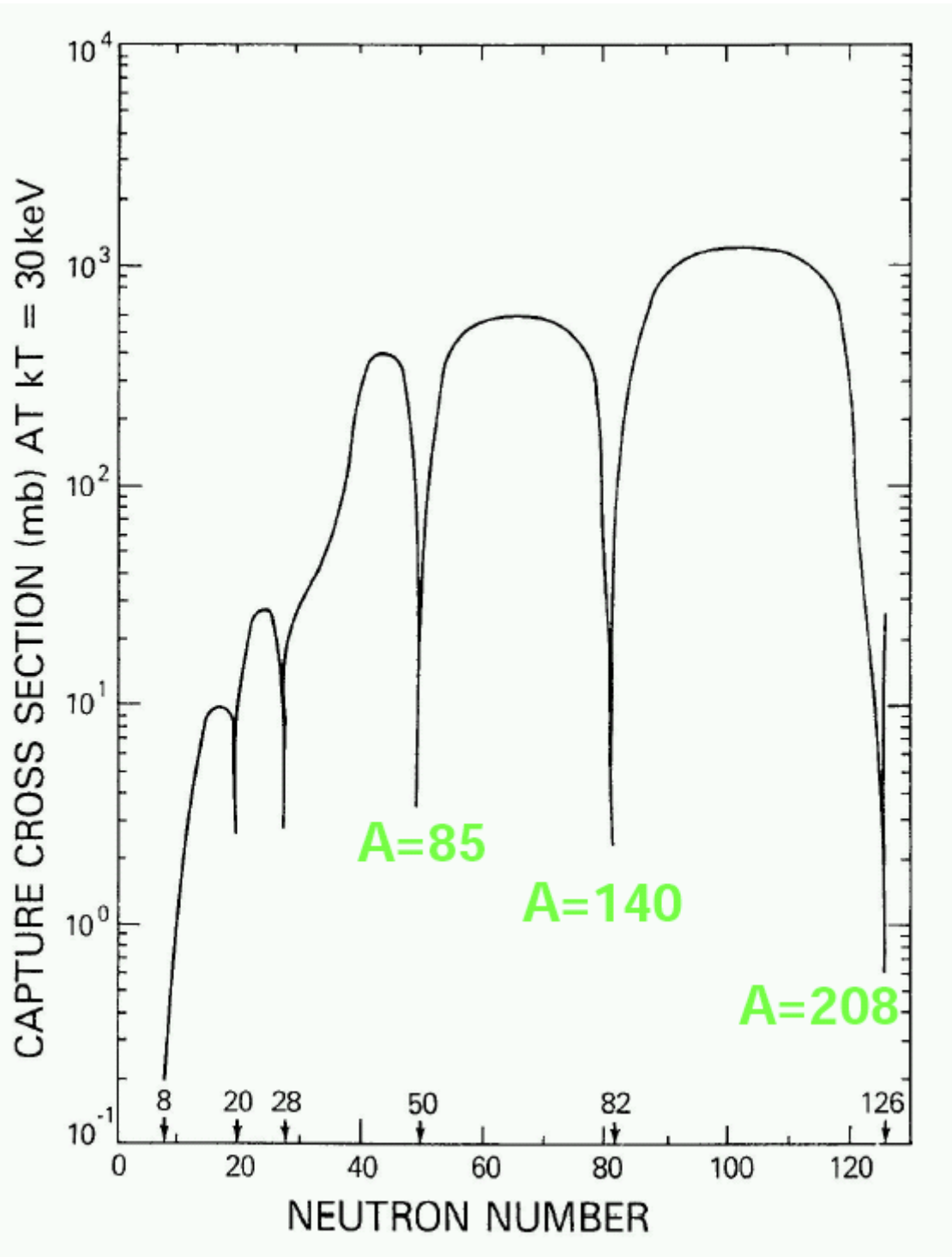
$$^{176}\text{Lu}^{\text{M}} > ^{176}\text{Hf}$$

$$\tau_{\beta} \approx 5.3 \text{ tundi}$$

$$\text{kui } N_n \approx 10^8 \text{ cm}^{-3}$$

$$\tau_n \approx 1 \text{ aasta}$$

Gs -põhitase, M -metastabiilne tase.



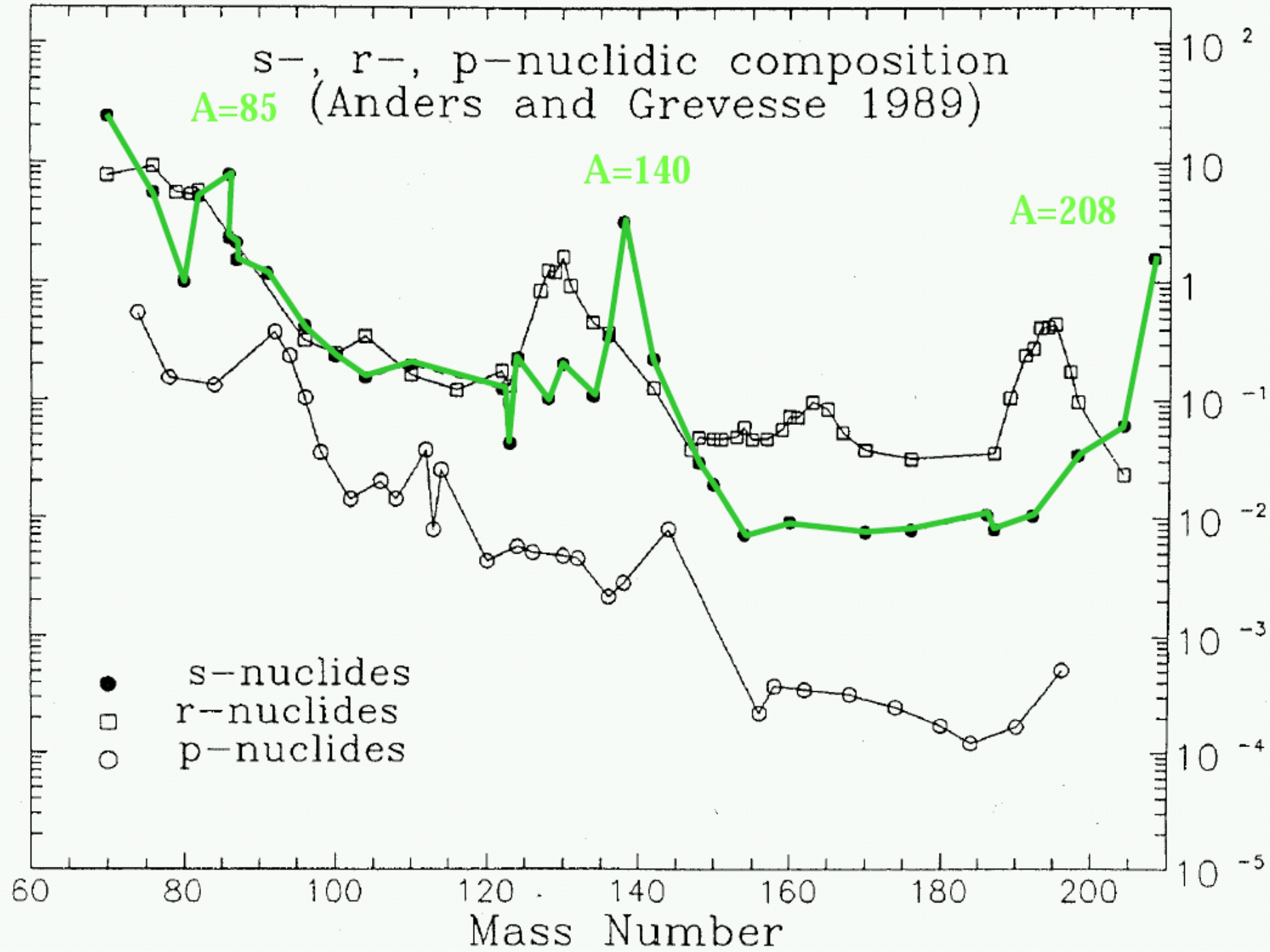
Abundance Normalized to Si=10<sup>6</sup>

s-, r-, p-nuclidic composition  
A=85 (Anders and Grevesse 1989)

A=140

A=208

- s-nuclides
- r-nuclides
- p-nuclides

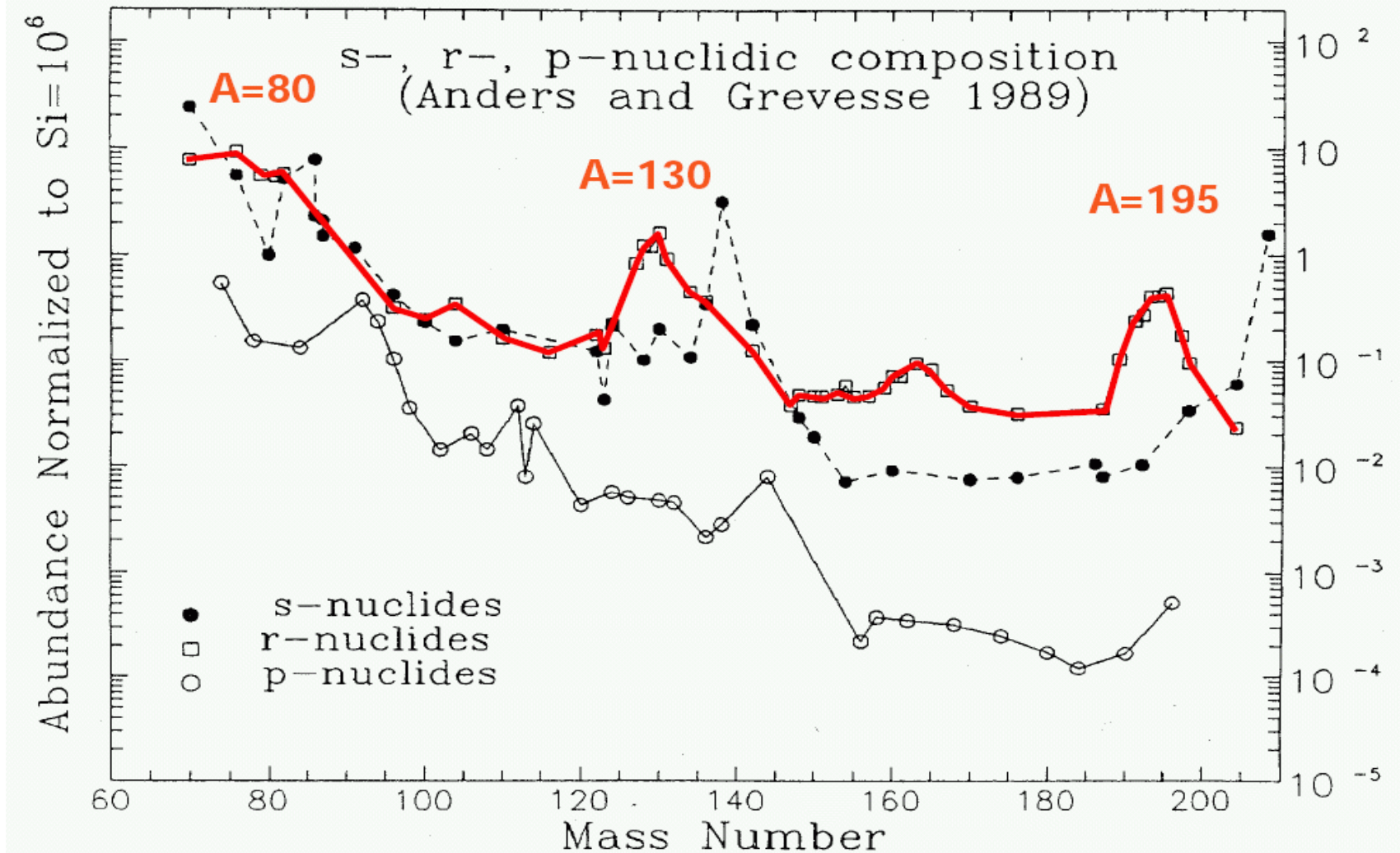


R-protsess. Kiire protsess, kus ebastabiilne tuum haarab enne neutroni kui elektroni.

Neutronite tihedus peab olema suur  $\geq 10^{20} \text{cm}^{-3}$ .

$$\tau_n \ll \tau_\beta$$

$$N_r = N_{\text{solar}} - N_s$$



Temperatuuridel  $10^9$  K (näiteks supernoovade SNII plahvatustel) lisatakse tuumale palju neutrone enne kui  $\beta$ -lagunemine toimub. R-protssessi ajaskaala arvatakse olevat umbes 0.01-10 s, seega kuni 200 neutronit lisatakse Fe tuumale 10-100 sekundiga. Alles siis kui  $\beta$ -ebastabiilsus saab äärmuslikuks ja uute neutronite lisamine "maagiliste massiarvude" kohal lakkab, viib kiire 8-10  $\beta$ -lagunemist toote tagasi stabiilsete tuumade piirkonda. See annab lokaalsed sisalduse maksimumid **A=80, 130 ja 194 juures, s.o. 8-10 massiühikut allpool kui s-protssis.**

On võimalik, et ka mõned neutroniterikkad kergemate elementide isotoobid võiksid ka olla r-protssessi produktid:

**$^{36}\text{S}$ ,  $^{46}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{47}\text{Ti}$ ,  $^{49}\text{Ti}$ ,  $^{50}\text{Ti}$ .**

<helgi elemendil aatomnumbriga üle  $_{83}\text{Bi}$  pole stabiilseid isotoope.

Nende sisaldused on arusaadavad nende radioaktiivsete eelaste lagunemise ajalist kulgu arvestades. Th ja U isotoopite eluead on  $^{232}\text{Th}$   $1.4 \cdot 10^{10}$  aastat,  $^{235}\text{U}$   $7.0 \cdot 10^8$  aastat ja  $^{238}\text{U}$   $4.5 \cdot 10^9$  aastat. Viimase aja arvutused nende isotoopide tekkest näitavad, et Galaktika peaks olema  $1.2\text{--}2.0 \cdot 10^{10}$  aastat vana.

R-protssessi toimimiskoht pole selge. Tõenäolisimad on madala massiga 8-10 Mo ja suure massiga  $>20$  Mo kollapseeruvad (core-collapse) SN. Neutrontähtede ühinemine siiski ei anna vaadeldavaid sisaldusi.

P-protsess, prootonite haaramine. Reaktsioon ( $p, \gamma$ ) seletaks rea prootonite rikaste isotoopide sisaldust, mis on oluliselt madalam, kui normaalsetel ja neutroniterikastel naaberisotoopidel. Ka  $\gamma$  kiirtega neutronite väljalõõmise reaktsioonid ( $\gamma, n$ ) võiksid kõne alla tulla. Sellised reaktsioonid on jällegi seostatavad supernoovadega väga lühikese ajaskaalaga. Välja arvatud  $^{113}\text{In}$  ja  $^{115}\text{Sn}$  on kõigil sel moel toodetud 36 isotoobil paarisarvuline massiarv. Kergeim on  $^{74}_{34}\text{Se}$  ja raskeim  $^{196}_{80}\text{Hg}$ .

Vesiniku plahvatuslik põlemine. Noovades temperatuuridel kuni  $3 \cdot 10^8 \text{ K}$  ja tihedustel umbes  $10^3 \text{ g cm}^{-3}$ .  
Reaktsioonid  $(p, \gamma)$  ja  $(\alpha, p)$  kuumades CNO, NeNa ja MgAl tsüklites.

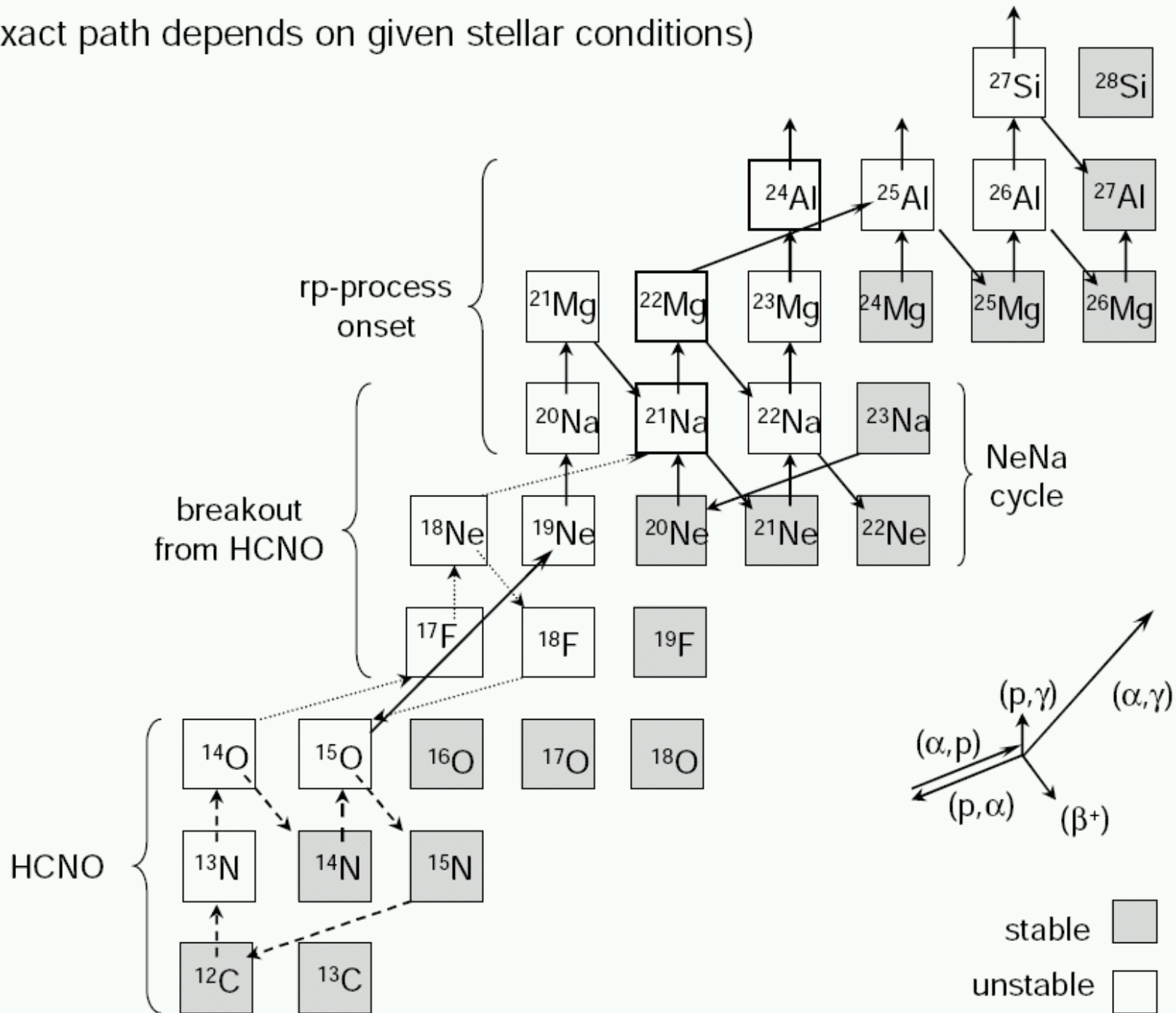
Noovad annavad vähe Galaktika üldisesse sisalduste jaotusse, kuid toodavad mõnd olulist isotoopi nt.  $^{22}\text{Na}$  mille lagunemisel kiirataav  $\gamma$  kiirgus võimaldab kontrollida noovade mudeleid.

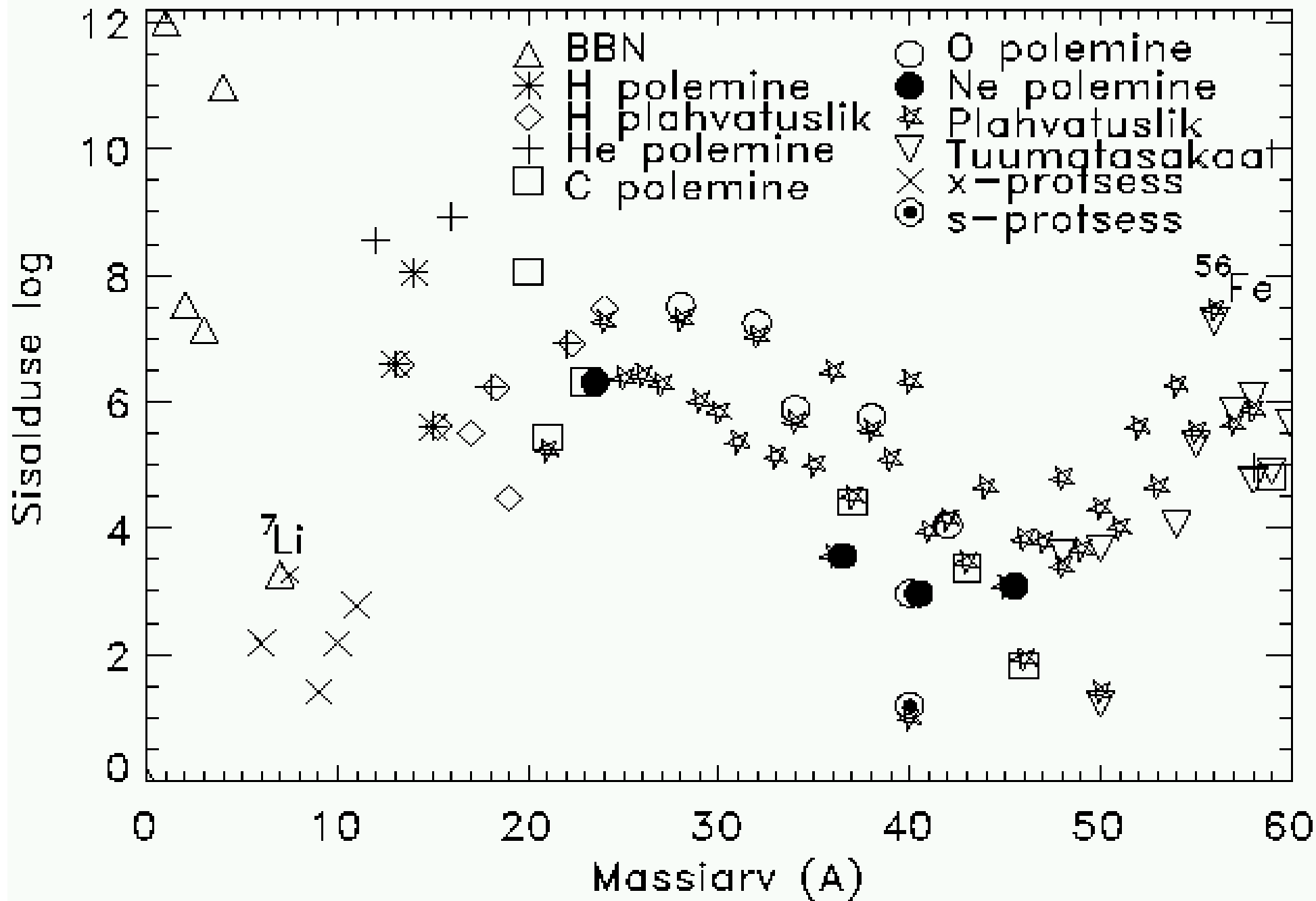


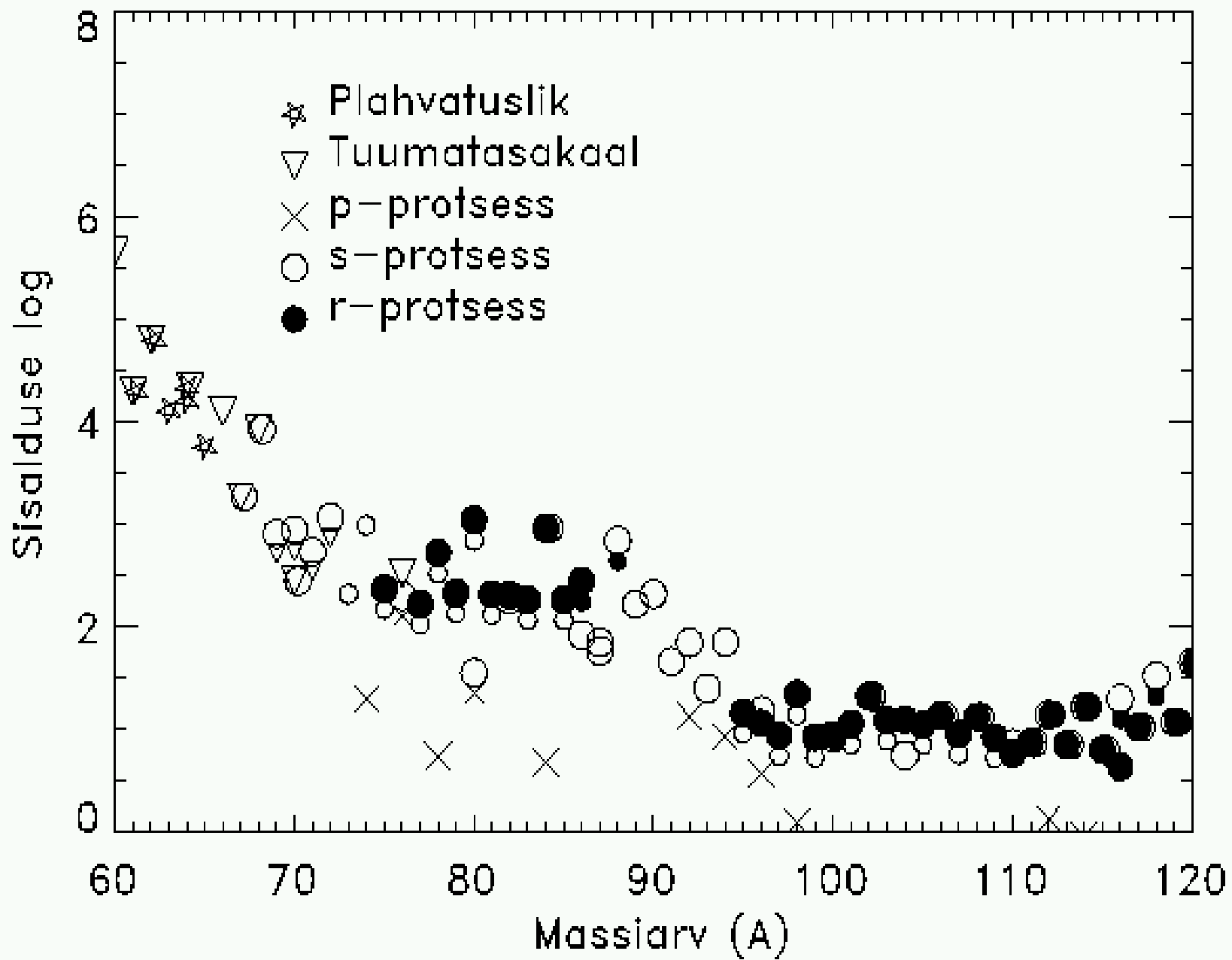
Võimalik toimumiskoht: nn. Thorne-Zytkow'i objektid (punased ülihiid neutronitest tuumaga), kus prootoneid paisatakse põlemisalasse väga kõrgetel ( $10^9 \text{ K}$ ) temperatuuridel.

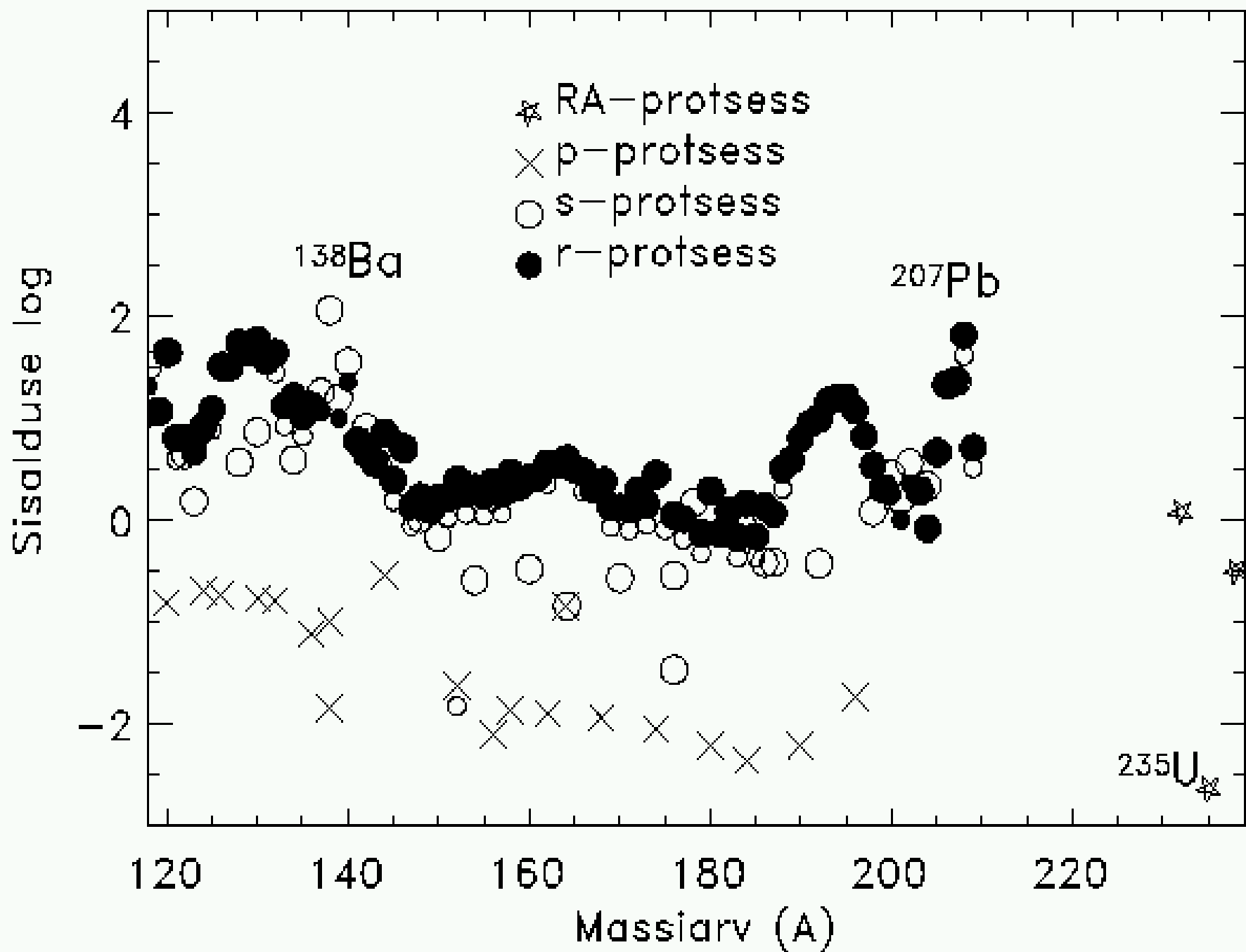
# reaction network for explosive hydrogen burning

(exact path depends on given stellar conditions)











"MY SECRET AMBITION IS TO FIND A NEW ELEMENT, BUT TO TELL THE TRUTH, I DON'T KNOW WHERE TO LOOK."





