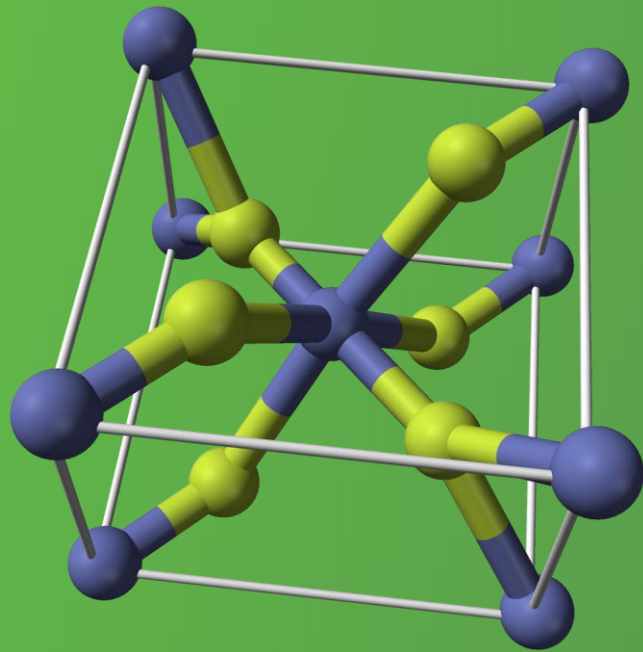




**TAL
TECH**

KEEMILISTE ELEMENTIDE TEKKIMINE TÄHTEDES

Toomas Tamm
Anorgaaniline keemia II
Kevad 2022

Elementide levik universumis

Vesinik: u. 88,5 % kõigist aatomitest universumis.

Heelium: u. 11,3 %.

Need kaks elementi kokku annavad üle 99,9 % kõigist aatomitest universumis ja u 99 % kogu nähtava aine massist.

Peatüki materjal põhineb õpikul „Greenwood ja Earnshaw: Chemistry of the Elements“ (1997) ning internetiallikatel.

Elementide levik

Maal

Maal (maakoores) on enim levinud hapnik (46 %), räni (28 %), alumiinium (8,2 %).

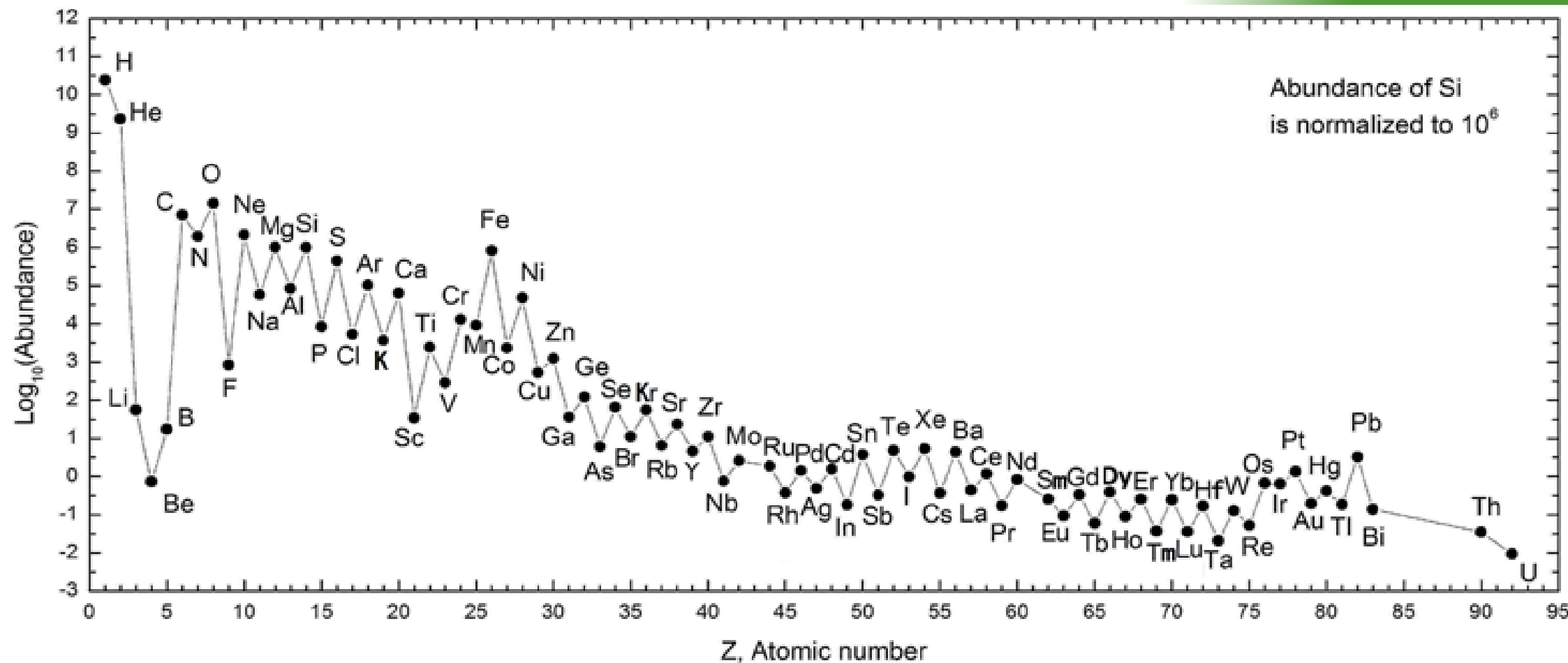
Suhteliselt palju (5,6 %) on rauda. Usutakse, et Maa sisemuses on raud domineeriv element.

Vesinikku on 3,1 % aatomite arvu järgi ja 0,15 % massist.

Heeliumi on atmosfääris u. 5 ppm ruumala järgi. Maakoores tekib He pikkamisi juurde radioaktiivsel lagunemisel (α -osake on He tuum). Mõne USA maardla maagaas sisaldab kuni 7 % He.

Elementide levik Päikesesüsteemis

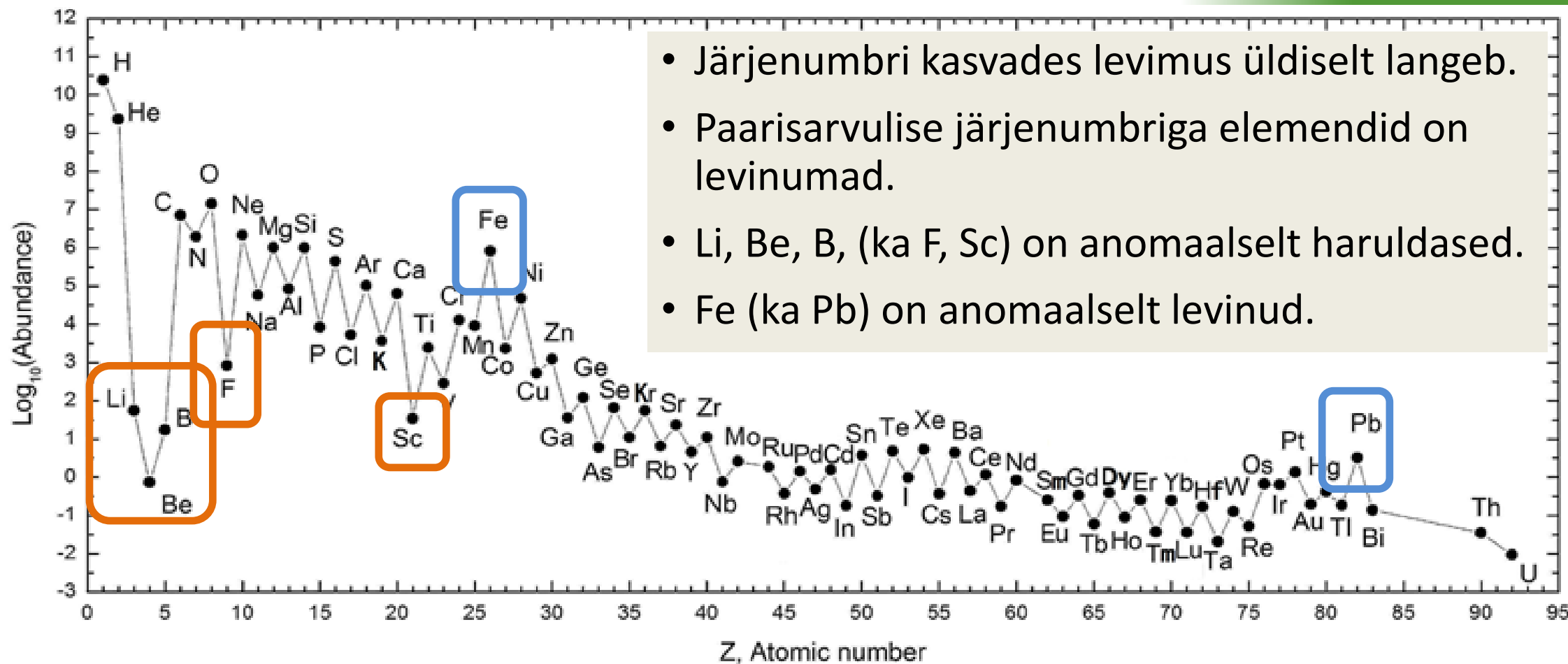
NB! Logaritmiline skaala!



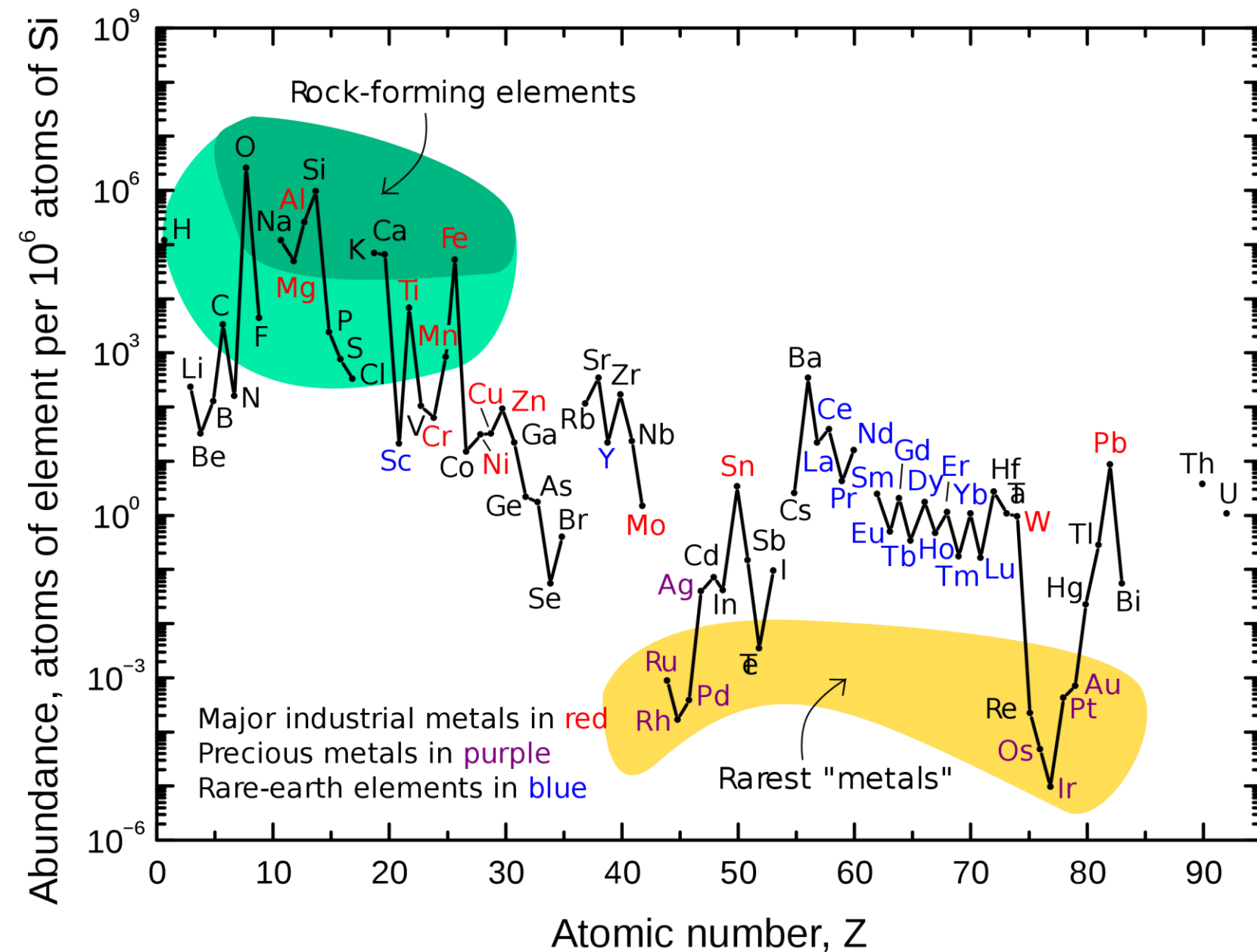
Elementide teke
Anorgaaniline keemia II
K2022

Elementide levik Päikesesüsteemis

NB! Logaritmiline skaala!

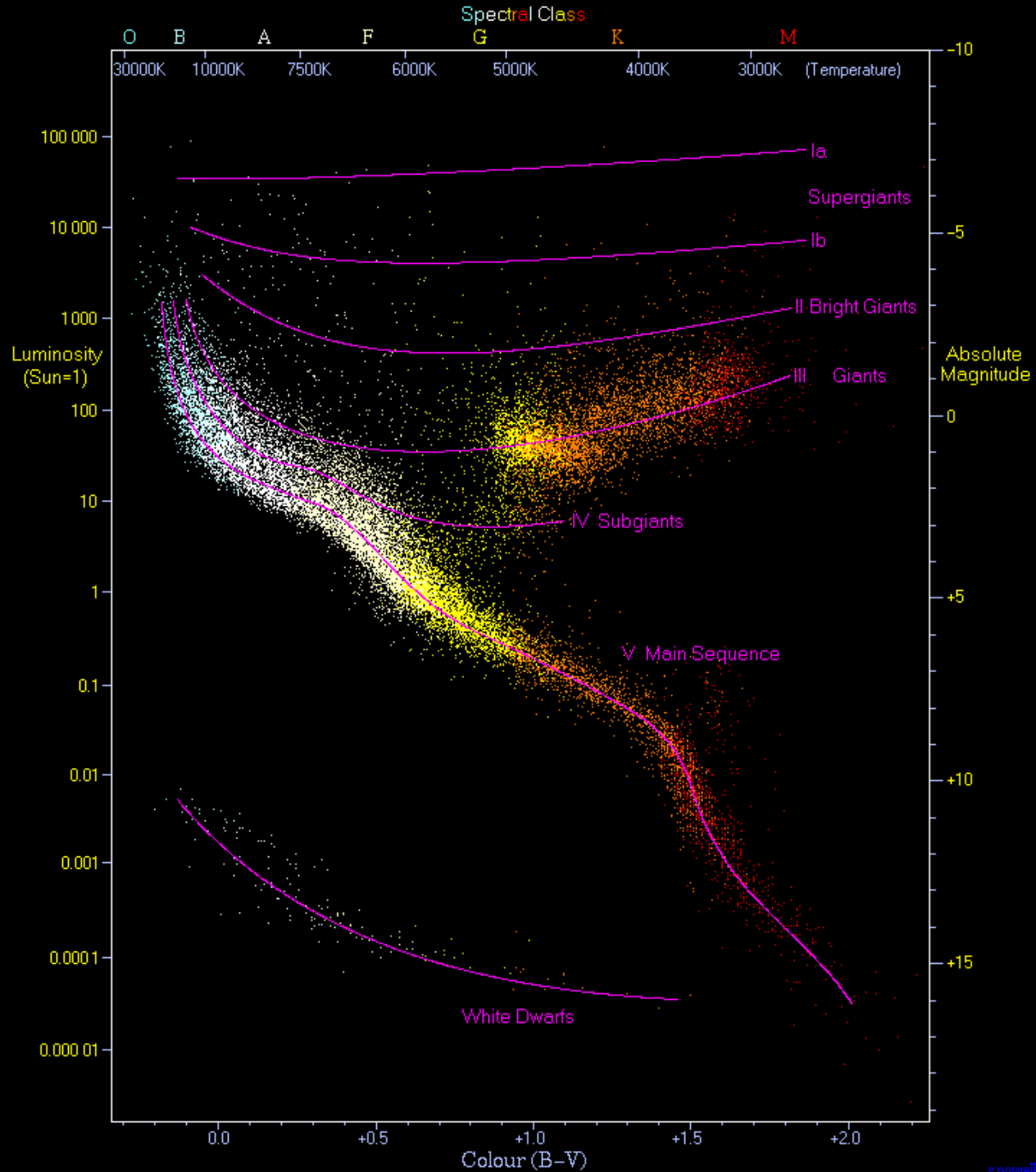


Elementide levik maakoores



Wikimedia commons, public domain

Elementide teke
Anorgaaniline keemia II
K2022



Hertzsprung–Russell'i diagramm

Horisontaalteljel – tähe värvus

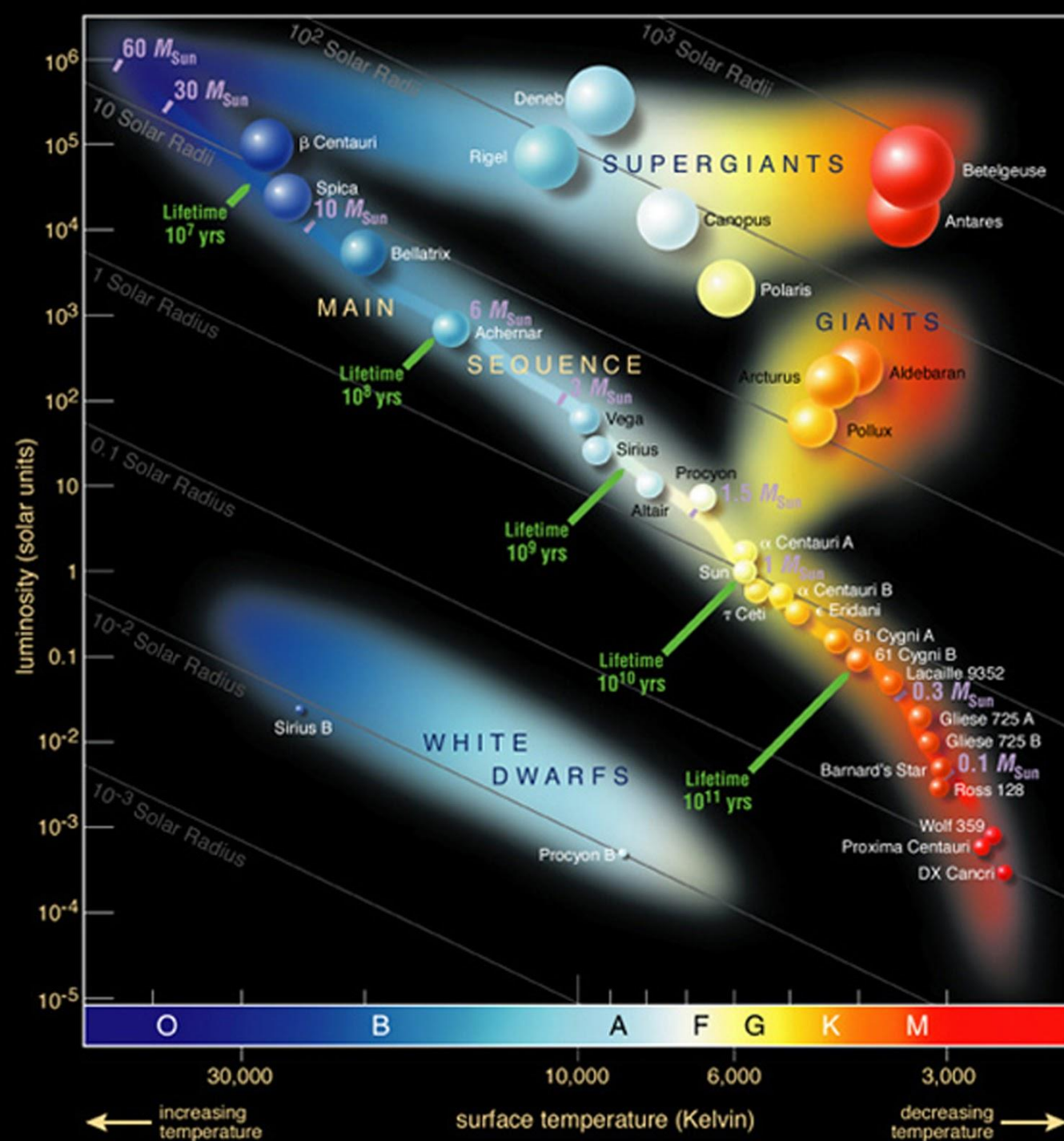
Vertikaalteljel – tähe heledus

Enamik tähti on põhijadas
(*main sequence*).

Richard Powell / Wikimedia commons CC BY-SA 2.5

Elementide teke
Anorgaaniline keemia II
K2022

Hertzsprung-Russell'i diagramm



Tähed tekivad ja surevad väljaspool põhi-
jada, reeglina sellest kõrgemal ja paremal.
Suured tähed on sinisemad ja elavad
lühemat aega.
Väikesed tähed on punasemad ja
pikaealisemad.

European Southern Observatory CC BY 4.0

Elementide teke
Anorgaaniline keemia II
K2022

Vesiniku tuumad ühinevad deuteeriumi ja edasi heeliumi tuumadeks:

Reaktsioon	Energia, MeV	Reaktsiooniaeg ($t_{1/2}$)
$^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e$	1,44	$1,4 \cdot 10^{10} \text{ a}$
$^2\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$	5,49	0,6 s
$^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + 2 ^1\text{H}$	12,86	10^6 a
$4 ^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$	26,72	

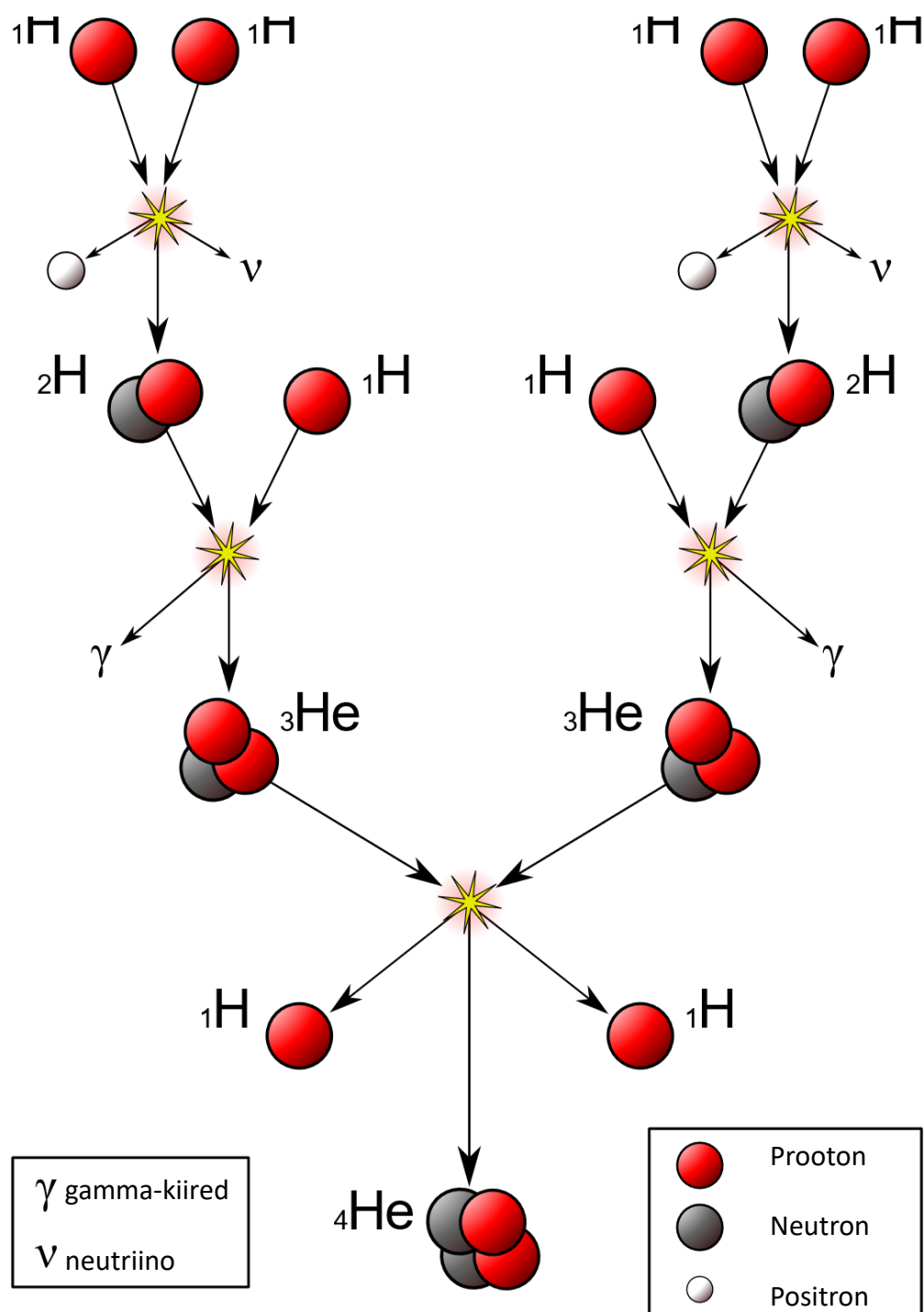
$$1 \text{ MeV/aatom} = 96,5 \cdot 10^6 \text{ kJ/mol}$$

$$T \approx 10^7 \text{ K}$$

$$E = 2,53 \cdot 10^9 \text{ kJ/mol}$$

Vesiniku „põlemine“

Astronoomid nimetavad kõiki elemente peale H ja He „metallideks“.
Nende elementide sisaldus on tähe „metallilisus“ (*metallicity*).



Päikeses ühes sekundis u 600 miljonit tonni H muutub He'ks.

Selle juures 4,5 miljonit tonni massi muutub energiaks.

Vesiniku „põlemine“

$$E = mc^2$$

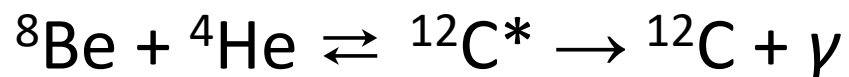
Wikimedia commons, public domain

Elementide teke
Anorgaaniline keemia II
K2022

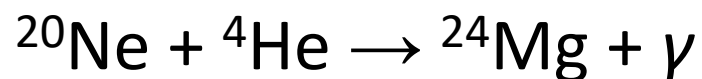
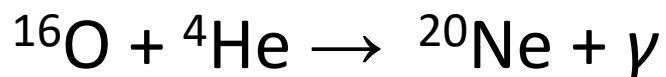
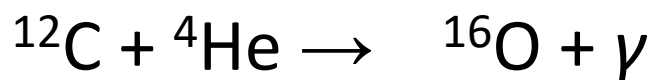
Kui umbes 10 % tähe vesinikust on ära kasutatud, tõuseb He tihedus tähe keskel nii suureks, et algavad tuumareaktsioonid heeliumi tuumade vahel:



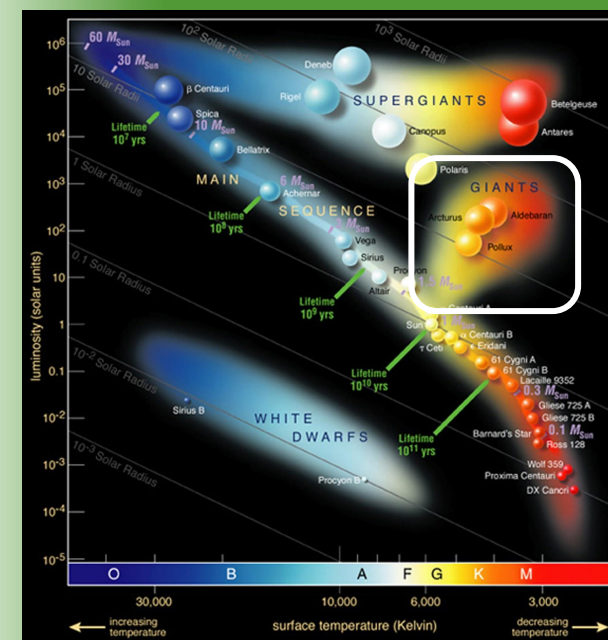
$$K \approx 10^{-9}$$



Süsiniku moodustumine paneb aluse tervele kaskaadile:

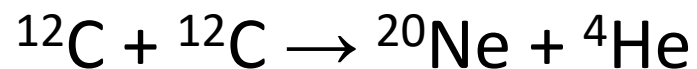
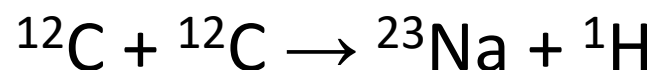
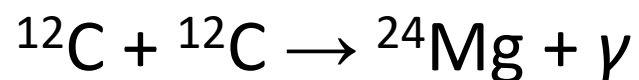


Heeliumi ja süsiniku „põlemine“



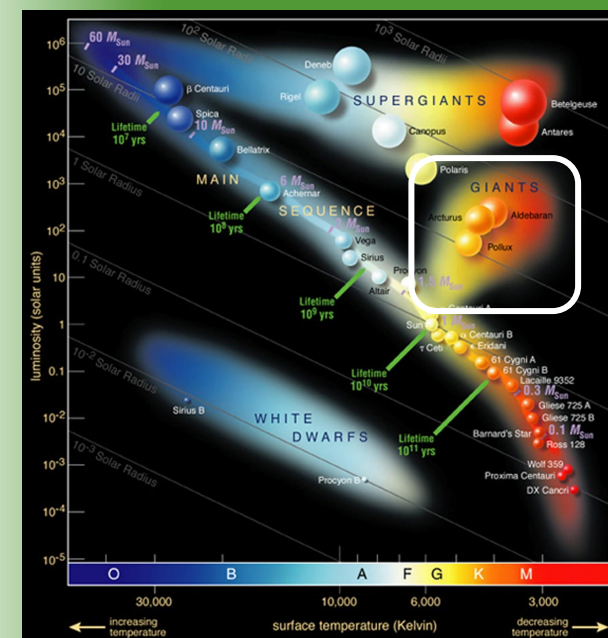
Täht on nüüd punase hiidtähe staadiumis

Raskemate elementide (C jt) koondumine tähe tuuma tõstab tihedust ($\approx 10^4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) ja temperatuuri ($\approx 5\cdot 10^8 \text{ K}$) sedavõrd, et süsiniku tuumad liituvad omavahel:



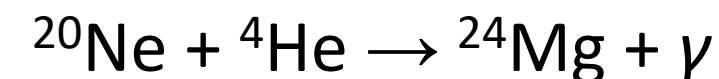
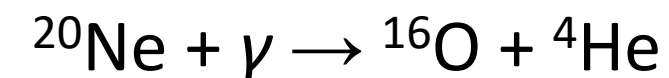
Paneme tähele, et enamuse seni moodustunud tuumi on paarisarvulise järjenumbriga!

Reaktsioonid süsiniku tuumade vahel



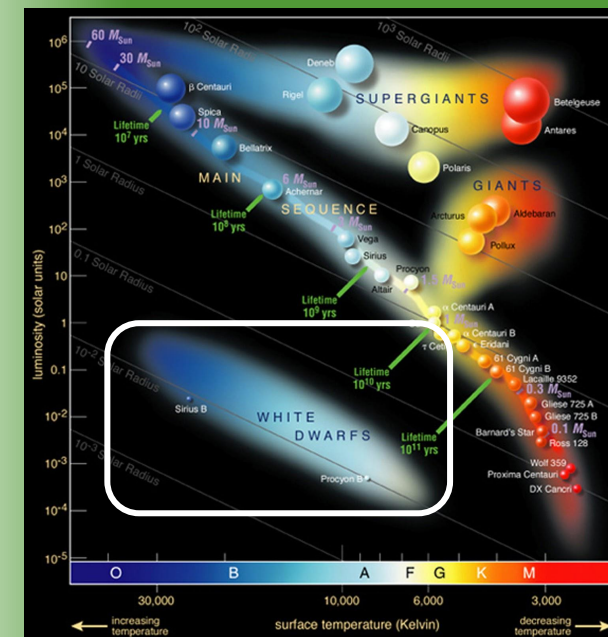
Täht on nüüd punase hiidtähe staadiumis

Väiksema massiga (kuni $1,4 M_{\odot}$) tähtede korral järgneb periood, kus He ja C lõpevad ning T tõuseb $\approx 10^9$ K-ni. γ -kiired löövad ^{20}Ne tuumadest välja α -osakesi (He tuumi), millel on piisavalt energiat ületamiseks teiste Ne tuumade elektrostaatilisest tõukumist:



Analoogsed reaktsioonid võivad toimuda ka ^{12}C , ^{24}Mg jt tuumadega, mis viib raskemate nn „ α -osakestest koosnevate“ tuumade tekkeni.

α -protssess (alfa)

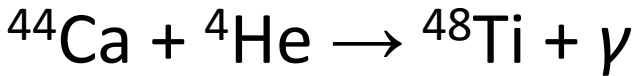
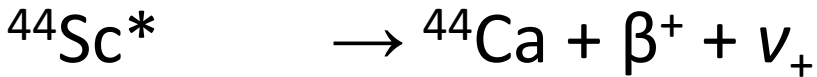
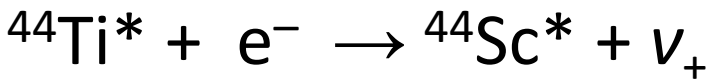
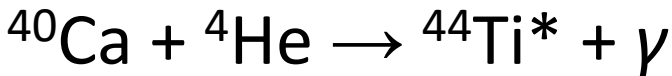


α -protsessi staadiumis on täht ebastabiilne. See on üleminek punasest hiidtähest valgeks kärbuseks ja kestab 100...10000 a.

Tekkivate tuumade sisaldused moodustavad monotoonselt kahaneva rea. Tabelis on ka ^{20}Ne , mis tekib ka eelpool kirjeldatud protsessides C-st ja He-st.

Tuum	(^{20}Ne)	^{24}Mg	^{28}Si	^{32}S	^{36}Ar	^{40}Ca	^{44}Ca	^{48}Ti
Sisaldus	(8,4)	0,78	1,00	0,39	0,14	0,052	0,0011	0,0019

Kuna ^{44}Ti on ebastabiilne, toimub järgnevalt:



α -protsess (alfa)



19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.94
-------------------------------	------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	------------------------------

Suurema massiga tähed ($1,4 \dots 3,5 M_{\odot}$) „põlevad“ kiiremini ja koguvad keskmesse palju heeliumi ajal mil vesiniku põlemine väliskihtides veel jätkub.

e-protsess (equilibrium)

Tuumareaktsioonid viivad tiheduse suurenemiseni, kuni täht plahvatab **supernoovana**. Mõne minuti või isegi sekundi jooksul enne seda ületab temperatuur $3 \cdot 10^9$ K ja toimuvad mitmesugused tuumareaktsioonid α -osakeste, prootonite ja neutronite vahendusel.

Eri tuumade vahel püstitub **tasakaal**, kus kõige stabiilsemad tuumad osutuvad domineerivaks. Peamiselt tekivad tuumad $_{22}\text{Ti} \dots _{29}\text{Cu}$, kusjuures enim tekib stabiilset $^{56}_{26}\text{Fe}$. Sellega seletub raua suur sisaldus universumis, mh Maal.

s- ja *r*-protsess

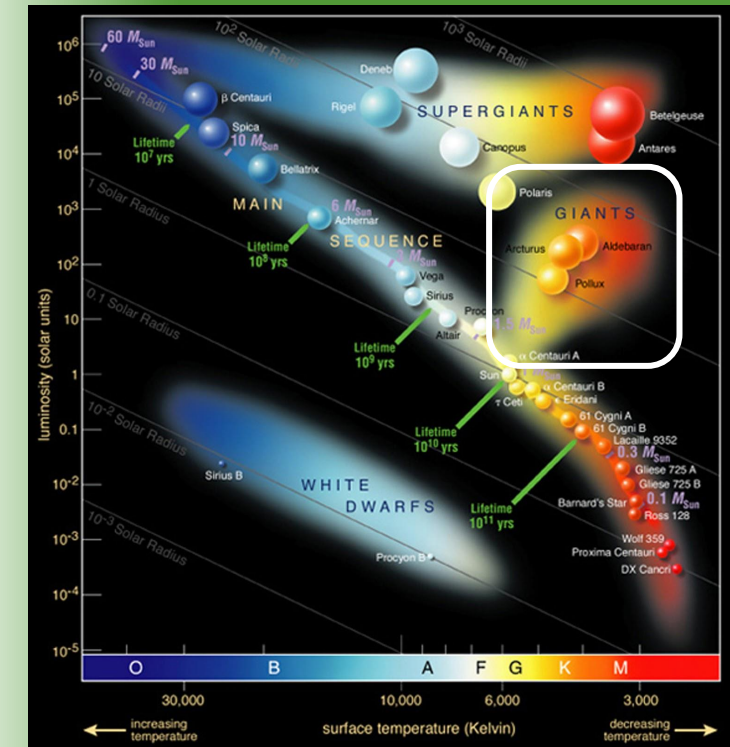
s-protsess – aeglane (*slow*) neutronite absorptsioon

r-protsess – kiire (*rapid*) neutronite absorptsioon

s-protsess toimub pulseerivates punastes hiidtähtedes. See staadium kestab u 10^7 aastat; eri isotoopide tekke kiirused on $10^2 \dots 10^5$ a suurusjärgus.

Tekivad isotoobid massiarvudega 63...209, aga ka enamus mitte- α -protsessi tuumadest massidega 23...46.

Neutronite allikaks on ^{13}C ja ^{21}Ne reaktsioonid ^4He -ga.



Kuna s-protsess on suhteliselt aeglane, jõuavad need tekkivad tuumad, mis on radioaktiivsed, omakorda laguneda. Alles jäävad stabiilsed tuumad.

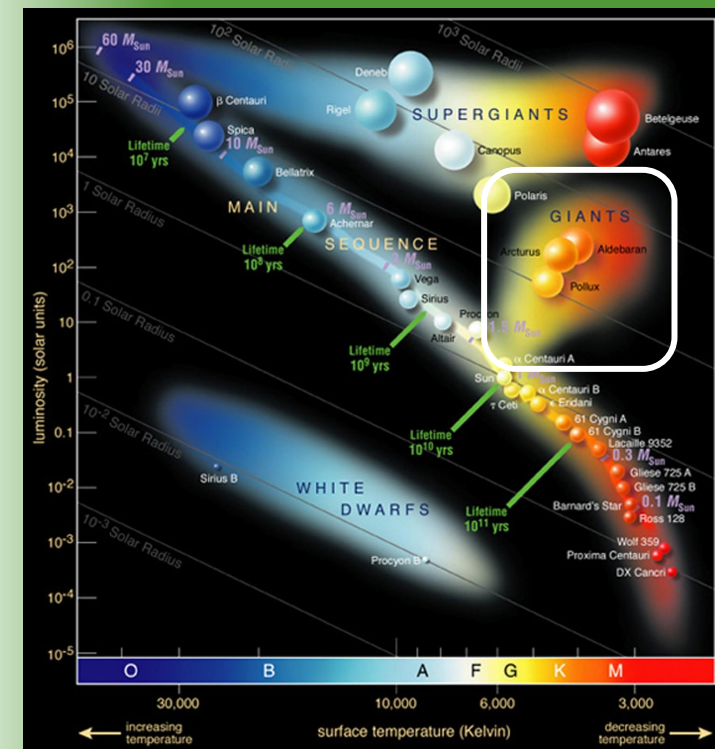
Tuumad, mis „reageerivad“ kergemini energiarikaste neutronitega osalevad uutes reaktsioonides; tuumad mille vastavad „reaktsioonid“ on ebatõenäolised, kogunevad.

Selliste inertsete tuumade hulka kuuluvad

$^{89}_{39}\text{Y}$, $^{90}_{40}\text{Zr}$, $^{138}_{56}\text{Ba}$, $^{140}_{58}\text{Ce}$, $^{208}_{82}\text{Pb}$, $^{209}_{83}\text{Bi}$.

Neid on universumis, sh Maal, teistest enam.

s-protsess



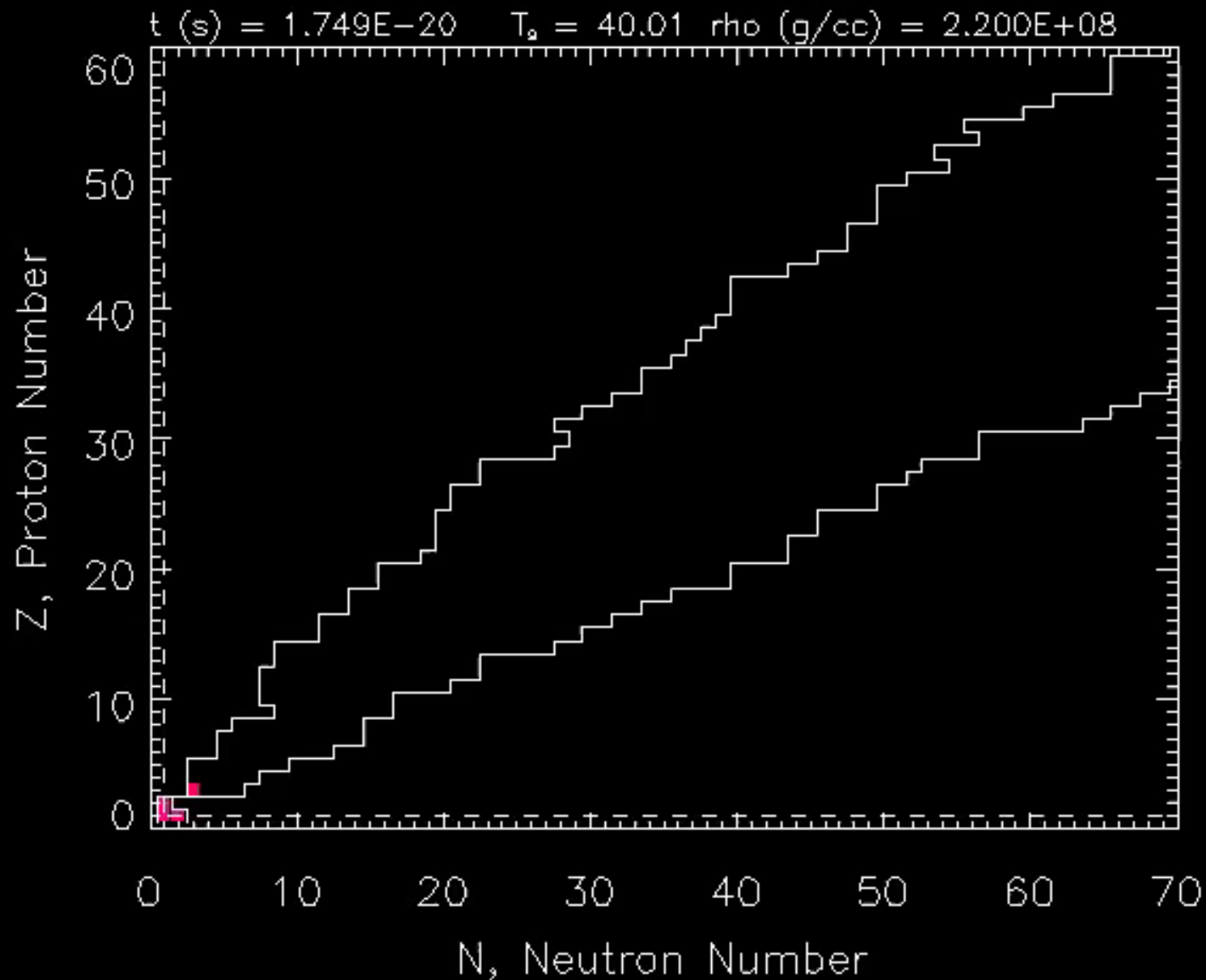
r-protsess

r-protsess (kiire neutronite absorptsioon) toimub supernoova plahvatuse eel, $T \approx 10^9$ K. Kestus alla 100 sekundi.

Lühikese ajaga liitub tuumaga suur hulk (kuni mitusada) neutronit. Kuigi tekkivad tuumad on radioaktiivsed, ei jää enamasti nende lagunemiseks aega. Iga mõnekümne neutroni liitumise järel eraldub kiiresti 8...10 elektroni, alles jäävad prootonid ja suhteliselt stabiilne uus tuum.

Sellistes protsessides on tõenäoliselt tekkinud näiteks

${}_{16}^{36}\text{S}$, ${}_{20}^{46}\text{Ca}$, ${}_{20}^{48}\text{Ca}$, ${}_{35}^{80}\text{Br}$, ${}_{54}^{132}\text{Xe}$, Ir ja Au isotoobid.



r-protsessi mudel

Pange tähele ajaskaalat video ülemises vasakpoolses nurgas! Paremas ülanurgas on tihedus g/cm^3 .

Video: Bradley Meyer
Clemson University, USA

Elementide teke
Anorgaaniline keemia II
K2022

p-protsess

Prootonihaare (*proton capture*) on prootoni liitumine tuumaga koos γ -kvandi kiirgamisega. See seletab mitme suhteliselt palju prootoneid sisaldava isotoobi tekke.

Kokku arvatakse *p*-protsessidel, peamiselt taas supernoovades, olevat tekkinud 36 isotoopi vahemikus ${}_{34}^{74}\text{Se} \dots {}_{80}^{196}\text{Hg}$.

Enamus kõneks olevaid isotoope on paarisarvulise massiarvuga; paarituarvulised on vaid ${}^{113}\text{In}$ ja ${}^{115}\text{Sn}$.

Kerged elemendid

Kerged elemendid Li, Be ja B „jäävad vahele“ He tuumade reaktsioonidel – tekib kohe süsinik. See seletab nende vähese leviku, kuid jätab seletamata, miks need tuumad üldse olemas on.

Samuti leidub universumis ^3He ja ^2H (deuteeriumi) tuumi, mida samuti seni räägitu ei seleta.

Kõik nimetatud tuumad on pealegi termiliselt ebastabiilsed ning neid tähtede spektrites peaaegu ei nähta.

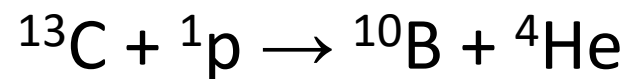
Usutakse, et ^3He ja ^2H pärinevad Suure Paugu aegadest.

x-protsess

${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$ ja ${}^{11}\text{B}$ tekkeks on vajalik „külm“, tähtede-väline, väikese tiheduse juures toimuv protsess.

Tõenäoliselt tekivad need supernoovadest laiali paisatud ja seetõttu väga kiiresti (valguse kiirusega võrreldavalt) liikuvate tuumade, neutronite ja prootonite põrgetel tähtedevahelises ruumis. Sellised osakesed on osa kosmilisest kiirgusest.

Nii näiteks tekivad boori tuumad süsiniku ja lämmastiku põrgetel prootonitega:



Radioaktiivne lagunemine

Supernoova plahvatusel paiskub laiali ka suures koguses radioaktiivseid isotoope. Ajaks, mil sellest materjalist tekivad planeedid ja areneb elu, on enamus neist jõudnud laguneda.

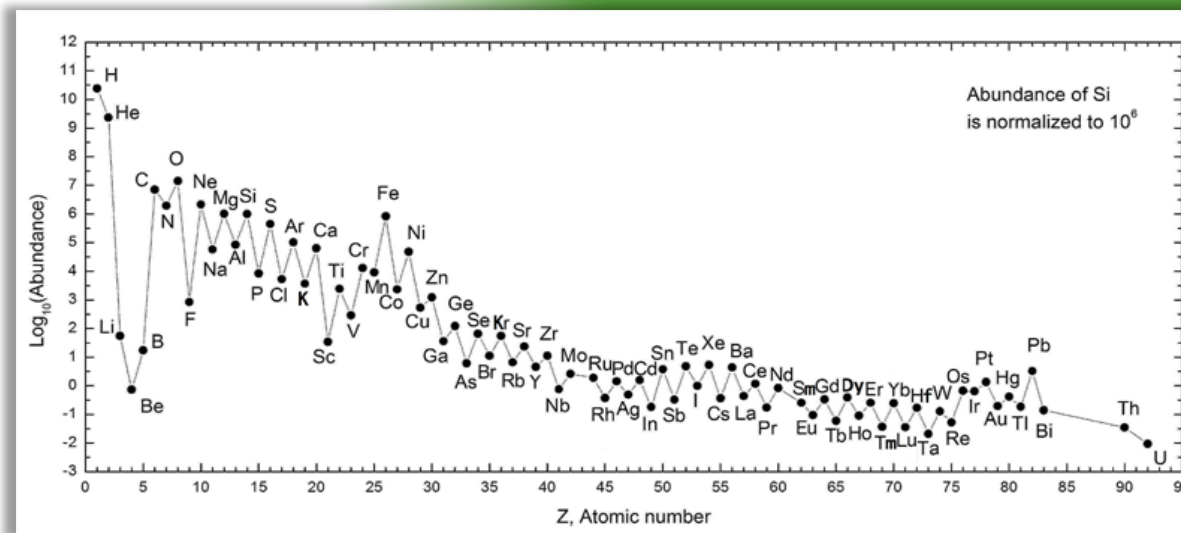
Maal on algsetest radioaktiivsetest elementidest säilinud vaid ^{232}Th ($t_{1/2}=1,4\cdot 10^{10}$ a), ^{238}U ($t_{1/2}=4,5\cdot 10^9$ a) ja ^{235}U ($t_{1/2}=7,0\cdot 10^8$ a).

Elementide levimuste suhete põhjal on välja arvutatud, et need tekkisid supernoovade plahvatustes $10^{10}\dots 6,6\cdot 10^9$ aastat tagasi. Päikesesüsteem tekkis u $(4,6\dots 5,0)\cdot 10^9$ a eest; Galaktika vanuseks saadakse $(1,2\dots 2,0)\cdot 10^{10}$ a.

Kokkuvõtteks

Kirjeldatud protsessid seletavad ära suurema osa teadaolevatest keemiliste elementide sisaldustest.

Teoreetiliselt võimalikke tuumareaktsioone on väga palju; tähtede sisemuses esinevaid tingimusi ei ole võimalik Maal reprodutseerida. Seetõttu ei saa osasid hüpoteese katseliselt kontrollida.



Õnneks oli universumi isotoopide sisaldus Maa tekkimise ajaks välja kujunenud ja keskmised aatommassid on stabiilsed. Vastasel korral oluiks keemia kui kvantitatiivse teaduse teke oluliselt raskendatud.

28bytes / Wikimedia commons
CC BY-SA 3.0

Elementide teke
Anorgaaniline keemia II
K2022