



Tähetolm

INVENTUUR

Mis see kivike on? See on lainete lihvitud kivimitükk, kee-
rukas mineraalne struktuur, tilluke osa mererannast ja
samas ajalookapsel. Kõigil neil nägudel on rääkida isiklik lugu,
mille juurde me peatselt jõuame. Ent veel ühest vaatevinklist
nähtuna on kivike erinevat laadi aatomite – paljude, *väga pal-
jude* aatomite – kogum ja sellest võikski ehk algust teha. Kui
kivikesest mõelda sellisel tasandil, sarnaneb see pisut suure
kotitäie assortiikommidega, mida saab liigitada erinevateks sor-
tideks. Aga kui suur see kommikott on? Või teisisõnu, kui palju
aatomeid meie kivike sisaldab?

Ükskõik mille sees olevate aatomite arvu hindamiseks on
lihtne valem. Esimesena turgatas see pähe tänapäeva Itaalias
Piemontes elanud Quaregna ja Cerreto krahvile Amedeo Avo-
gadrole. Avogadro oli õpetlane, filosoof ja õpetaja (kuigi õpetä-
mise katkestasid mõneks ajaks tema revolutsioonilised ja vaba-
riiklikud kalduvused – see on küll pisut järelemõtlematu, kui
su naabruses elab kuningas). Avogadrot huvitas, kuidas aines

sisalduvad osakesed (aatomid ja molekulid) on seotud aine ruumala ja massiga. Aastaid hiljem täiendasid teised teadlased tema varajasi uuringuid ning sajandi jagu hiljem nimetati lõpptulemus Avogadro arvaks. Seega on igas mistahes aine ühe mooli suurus hulgas pisut enam kui 600 000 miljon miljonit miljonit ehk lühidalt öeldes $6,022 \times 10^{23}$ aatomit. Mool ei tähenda siinkohal väikest karvast urge kaevavat neljajalgset ega naha mõningast ebatasasust¹, vaid elemendi aatommassi väljendatuna grammides. Hapniku mool on 16 grammi, sest selle aatommass on 16 ning hapniku aatomituumas on kokku 16 prootonit ja neutronit.

Köögikaal näitab, et meie kivike kaalub umbes 50 grammi. Umbes pool sellest koosneb hapnikust, ülejäänust moodustavad suurema osa räni (aatommassiga 28) ja alumiinium (aatommassiga 27). Näpuotsaga on ka teisi elemente, enamik neist pisut raskemad. Mõistlikult keskmiseks ümardatud aatommass võib seega tõenäoliselt olla umbkaudu 25. Meie 50-grammises kivikeses sisalduvate aatomite arv on järelikult suurusjärgus üks miljon miljonit miljonit miljonit (või umbes sealkandis). Kui meie aatomid oleksid maiustused – kenasti pakkerisse pakitud assortiikommid, kõik erineva sisuga –, läheks meil nende mahutamiseks vaja ligikaudu Kuu-suurust kotti.²

1 Tõlkimatu sõnamäng: ingliskeelne sõna „mole“ tähendab peale mooli ka mutti ja sünnimärki. (*Toimetaja märkus*)

2 Maiustuste osas võib selle ise välja arvutada. Kuu ruumala on umbes 20 000 miljonit kuupkilomeetrit (nagu keegi kannatlik astronoom on tuvastanud), iga kuupkilomeeter sisaldab miljon miljonit liitrit. Meil on köögis mõõdunõu, mis mahutab ühe liitri – sellesse saab sisse toppida 50 kommi. Need numbrid annavad omavahel korrutatuna tulemuseks umbes miljon miljonit miljonit miljonit ehk ligilähedaselt samasuguse arvu, nagu meie kivikeses sisalduvate aatomite hulk. (*Autori märkus*)

Selline on meid ümbritsev hiiglaslik submikroskoopiline maailm. William Blake nägi oma kuulsaks saanud sõnade kohaselt liivateras peituvat maailma – tema intuitsioon vedas teda alt üksnes suurusjärgu võrra.

Seega valitseb meil aatomite üliküllus – kuid millist laadi aatomite? Teeme inventuuri. Tänapäeval on olemas aatomeid loendavad masinad. Väga kallid, luksuslikud mudelid võivad neid lugeda peaaegu ühe aatomi kaupa. Kuid isegi labori standardne aatomiloendur – täpsemalt küll röntgenfluorestsents-spektromeeter – annab piisavalt hea esmahinnangu. See ei loenda aatomeid ükshaaval, vaid mõõdab nende erinevate tüüpide, see tähendab erinevate elementide vahekordi. Meetodi kasutamiseks praktikas tuleb esmalt ohverdada kivike. Päriloo alguses ei läheks see kohe mitte. Seega ohverdame kivikese asemel ühe tema naabritest. Tulemused sobivad meile sama hästi. Sarnaste eesmärkide puhul on kilt (kui ta on pärit samasuguselt pankrannikult samast settekihist samalt mererannalt) ikka üks ja seesama kilt.

Ohverdatav kivike purustatakse, pressitakse graanuliks või sulatatakse klaasistunud kivihelmeks¹. Seejärel suunatakse näidisele kõrge energiaga röntgenikiir ning see kiirgus lööb mõned elektronid oma orbiidilt minema. Teised elektronid, mis langevad allapoole, et hõivata lahkunute koht, saadavad langedes välja kiirgust (footoneid), millel on eripärane energiamuster ja mis seega on elemendi „sõrmejäljeks“. Kiiratud footoneid ja nende energiatasemeid tuvastatakse ja mõõdetakse väga täpselt ning sel moel saab iga elemendi osakaalu kivimiproovis mõõta umbes paariprotsendilise täpsusega.

1 Eesti keeles kasutatakse röntgenfluorestsentsmeetodi proovide puhul terminit „helmes“, geoloogias on proov sageli ümara „plaadi“ (õhukese silindri) kujuga. (*Konsultandi märkus*)

Seejärel on meil nagu atomaarsetel raamatupidajatel umbkaudsete osakaalude kujul olemas üks kivikest iseloomustav näitaja. Kõige levinumat tüüpi aatomite all seisab bilansilehel konkurentsitult esikohal hapnik. Kuna see moodustab umbes poole kivikese massist, on hapniku osakaal selles kivimitüki- keses suurem kui atmosfääris. Vahest üllatab see teid? Nojah, kivikest ei saa hapnikuballoonina kasutada. Kahju küll, sest kui see oleks võimalik, saaksid astronautid Kuu ja Marsi pinnal vabalt hingata. Hapnik on aga pandud luku taha, tugevalt seotud räni ja alumiiniumiga, moodustades erinevate silikaatide näol kivimi mineraalse koostise. Peatselt räägime ka *nendest* palju põhjalikumalt. Kuid praegu piisab, kui öelda, et kõnealuses mineraalses skeletis leidub ruumi ka teiste põhikomponentide jaoks, millest igaüht – rauda ja magneesiumit, kaaliumit ja naatriumit ning ka titaani – on seal paar protsenti. Neile järgnevad pisut vähem kui ühe protsendiga kaltsium, mangaan ja fosfor. Siia võib lisada ka selle kivimiosa, mida laborant nimetab kuumutuskaoks – see haihtub siis, kui kivimipulbrit ahjus küpsetada; suuremalt jaolt on see vesi, peamine vesiniku säilituskoht kivimis (vältimatult hapnikuga seotult) koos kübekese süsinikuga.

Nüüd võtame käsile haruldused – need elemendid, mida mõõdetakse osakestes miljoni kohta ehk lihtsamalt öeldes ppm-ides. Kuigi need on haruldased, on need kahtlemata mitmekesised; neid on seal suures valikus. Mõned neist on tuttavad, osakaaluga paarsada kuni paarkümmend ppm-i – vanaadium, kroom, vask, tsink, plii, baarium –, teised on veidi vähem tuntud – rubiidium, strontsium, ütrium, tseerium, lantaan, nioobium. Üks või kaks nende seast on pisut pahaendelised – näiteks arseen. Mõned neist aatomitest on radioaktiivsed: need on need, mille puhul neutronite ja prootonite vahetamine

tuumas pole päris korras; milles esineb sisemine ebastabiilsus, tuumapinge. See põhjustab ühel hetkel (mikrosekundite või miljardite aastate pärast, sõltuvalt aatomi tüübist) aatomi poolseksplaksatamise, lõhestumise väiksemateks aatomiteks ja samuti rapnellideks (kõrge energiaga elektronideks, gammakiirteks, neutronite ja prootonite paarideks), mida me radiatsiooni näol pelgame. Näiteks kuulub radioaktiivsete elementide hulka uraan, mis esineb ei rohkem ega vähem kui 16 tüüpi ehk *isotoobina* (kõik radioaktiivsed), millest igaühes on 92 konstantse prootoni kaaslasena erinev arv neutroneid. Sellesse kategooriasse kuuluvad veel toorium ja mõningad kaaliumi, samaariumi ja rubiidiumi isotoobid.

Kivikese leidub veelgi haruldasemaid elemente, mida esineb paar osakest miljardi kohta. Nende tuvastamiseks vajame veelgi tundlikumat varustust – mass-spektromeetreid, milles kivikese materjalist tekitatud kiirendatud plasmad suunatakse magnetite abil nii, et laetud aatomite ehk ionide vood sõelutakse kaalu põhjal hoolikalt välja ja lennutatakse täpselt paigutatud detektoritesse. Siia kuuluvad elemendid, millest kõnelevad poeedid ja piraadid – kuld, hõbe ja plaatina. Neid leidub küll kaduvvääikeses koguses, ent ikkagi on kõiki neid tüüpe aatomeid kivikese mitu miljonit. Peaaegu lõputus džunglis kasvab külluses isegi kõige haruldasemaid orhideesid. Selle asemel et öelda, millised elemendid on meie kivikese olemas, võiks asjade praeguse seisjuures proovida öelda, milliseid seal *ei ole*.

Selliseid on raske leida. Iriidiumist räägitakse sageli kui kõige haruldasemast elemendist maakoores, kus selle keskmine kontsentratsioon on üks osake miljardi kohta. No nii, meie miljoni miljardi miljardi aatomi puhul tähendab see hämmastaval kombel, et kivikese peab olema miljon miljardit iriidiumi

aatomit, iga aatom peaaegu – kuid mitte päriselt – ülimalt lahjendatud tavalisemate naabrite tohtus külluses.

Vähemalt on iriidium stabiilne. Esineb ka elemente nagu uraan, mis seda ei ole. Ebastabiilsete seas on kõige põgene misaltim ja põgusam ülimalt ebastabiilne promeetium, uraani lagunemise kõrvalsaadus. Selle poolestusaeg jääb pisut alla 17 aasta. Ja siiski, kui uraani esineb paar osa miljoni kohta, leidub kivikese üüratus aatomivarakambris tuhandeid promeetiumi aatomeid nähtamatult ja tuvastamatult sisse-välja vilkumas.

Ja viimaks eksisteerib keemiliste elementide perioodilisustabelis hall piirkond, tontlik maailm täis elemente, mis sarnaselt uraaniga on liiga rasked, et olla stabiilsed, kuid mille poolestusaeg on palju lühem. Enamasti tunneme neid tehiselementide nime all: plutoonium, ameriitsium, einsteinium ja mendelevium – ja nüüd ka koperniitsium, kui see nimi heaks kiidetakse¹ (see tähendab, kui ei leita, et see tähendab mõnes keeles midagi väga roppu). Mõni neist, näiteks mendelevium, võib olla tõeline haruldus – võimalik, et kivikese piiritus avaruses ei leidu ühtainsatki aatomit. Kuid teisi üliiraskete aatomite tüüpe, näiteks plutooniumi, oleme *meie ise* praeguseks tuumareaktorites tootnud märkimisväärses kogustes – tegelikult terve kilogrammi. Tuule, lainete ja vooluvee maailma pääsenult on rohkem kui tõenäoline, et meie kivikese ja iga teise mererannal oleva kivikese (ning Maa kõigi mererandade kõigi kivikeste) pinnale on kleepunud selliste elementide kübemeid.

Meie kivike on tõepoolest universumi mikrokosmos. Ja neil kivikese aatomitel, mida on kokku rohkem kui sada liiki, on universumis kindel koht ja ajalugu. Siiski tuleb nende koht ja ajalugu omavahel lahus hoida. Kivike, mis on kenasti repre-

¹ Elemendi nimi kinnitati 19. veebruaril 2010. (*Tõlkija märkus*)

sentatiivne maakoore ülaosa suhtes, pole seda – nagu pole ka ülejäänud Maa ja siseplaneedid – kosmilises mõõtkavas. Universum koosneb valdavalt vesinikust ja heeliumist¹ (see koostis muutub, kuid väga aeglaselt). Kivike ja Maa, mille pinnal see lebab, koosnevad hapnikust, ränist, rauast ja teistest taolistest rasketest elementidest; vesinikku leidub peamiselt vee koostisosana ning heeliumisisaldus ei vääri üldse märkimist. Seega vajab kivikese kosmiline erilisus selgitamist. Aga kõigepealt ker- kib küsimus meie kildatükikeses sisalduvate aatomite algsest päritolust. Sest nende sünn on olnud erakordne, nende reis on olnud kujuteldamatult pikk ja need on läbinud maailmu, kuhu ükski kosmoselaev ealeski ei jõua.

ESIMENE REIS

Kust võiks alata esimene reis läbi meie kildakivikese? See peab peale hakkama ainsast algusest, millest me teadlikud oleme; hetkest, mil loodi kogu kivikese olev kraam – nagu ka kraam, millest koosneme *meie ise*, kes me praegu mõtleme sellest kivikese, samuti Maa, mille pinnal me elame, ja kõik, mida me näeme, kui pea kohal laiuvat öötaevast vaatame.

Singulaarne hetk meie ajaloos oli ainukordne moment, mille jooksul ilmselgelt loodi eimillestki miski ning see „miski“ levis seejärel oma tibatillukesest algpunktist laiali, et saada kogu

¹ Vähemalt selles osas, mis puudutab konventsionaalset mateeriat. Universum tervikuna käitub, nagu oleks enamik sellest tehtud mingisugustest muudest salapära-dest asjadest. Üht neist kutsume tumeenergiaks ja see lükkab seda ühes mõõtkavas laiali, teist nimetame tumeaineks, see tirib universumi osi teises mõõtkavas kokku. Kivike on sellel tasandil tähtsusetu, nagu ka (peaaegu) kõik muud meile tuntud aatomid universumis. (*Autori märkus*)

universumiks. See hetk on ristitud Suureks Pauguks ja leidis aset umbes 13,7 miljardit aastat tagasi.

Selles mõttes on kivike sama suur mõistatus nagu kõik muu universumis. Kuidas *suutis* küll selle kivikese – ja Walesi mägede, kust see lahti rebiti, ja maailma, mille pinnal see asub – ja Päikesesüsteemi ja Linnutee ja loendamatu lähedaste ja kaugete galaktikate materia end lahti pakkida ühest punktist – singulaarsusest, millel paljude arvates polnud üldse mõõtmeid? Ja kuidas see suutis end ise lahti pakkida, või pigem paisuda, nagu seda protsessi sagedamini nimetatakse, sellise vaevu usutava kiirusega? Arvatakse, et universum kasvas paigaltstardi hetke mikroskoopilistest mõõtmetest suuremaks kui galaktika vähem kui sekundi jooksul, mis ilmselgelt ületab kiiruselt tublisti valgust ennast. Aatomid meie kivikese, mis praegu on oma mineraalses struktuuris nii vaikne ja vagane, esindavad üksikuid ellujäänuid, mis osalesid peatselt pärast seda singulaarset, ainukordset sündmust aset leidnud lahingus – võitluses subatomaarsete osakeste, kvarkide, leptonite ja nende sugulaste vahel. See oli ülimalt äge lahing ja see peeti kordumatu, paljude triljonite triljonite kraadisel temperatuuril. Enamik neist osakestest lahingut üle ei elanud, sest osake ja antiosake hävitasid üksteist, vallandades sealjuures energiat, millega toita jätkuvat kosmilist lõõma.

Kas antiaine pääses plehku, et viimaks moodustada antikivikese antiplaneedi antirannikul kusagil kauges antigalaktikas? Sellised ideed täitsid minu noorusaja ulmekirjandust ning astronoomid on otsinud öötaevast reetlikke valgusvälgatusi, mida saadetakse teele siis, kui antiaine galaktikad kohtuvad tavalisest aimest moodustunud galaktikatega ning antiosakesed muutuvad põrkudes puhtaks energiaks. Kahju küll, aga selliseid välgatusi pole täheldatud. Materia kas võitis univer-

sumi raevukate esimeste minutite jooksul veenva ülekaaluga või lebavad need antikivikese kallastel, mis on meie omadest sedavõrd kaugel, et jäävad välja isegi kõige võimsamate teleskoopide pilgu alt.

Ükskõik milline versioon ka tõele ei vastaks, hakkas meie kivikese aatomite aine vähem kui sekundi pärast mängima universumis meile tuttavlikumat osa. Prootonid ja neutronid ilmusid välja universumis, mis, olgugi endiselt jahtuv ja raevukalt paisuv, jäi *tervikuna* tihedalt täidetud termotuumahajuks, kus kiiresti miljardi kraadi suunas langeval temperatuuril tekkisid tulevaste aatomite tuumad. Prooton iseenesest on lihtne vesinikutuum ja see oli – ning on tänapäevani – nähtava universumi kõige levinum ehituskivi. Laske neutronil söösta vastu prootonit ja need kaks kombineeruvad deuteeriumituumaks; lööge nende sekka veel üks prooton (ja soovi korral veel üks neutron) ja teie ees on heeliumituum. Sel moel sai alguse kenake kogus heeliumit, mis moodustas ehk veerandi tollal tekkinud materia. Nende sündmuste imeväikses, tibatillukeses protsendi murdosas lisati edukalt veel üks prooton ja niiviisi ilmusid tulevaste liitiumituumade pisikesed alged.

Möödunud oli kolm minutit. Ja siis oli pikaks ajaks kõik paigas – vähemalt selles osas, mis puutub kivikese ainesse. Meie koostisained on nüüd võtnud tuumade ja elektronide plasma kuju. See kihutab endiselt universumis, mis on läbipaistmatu nagu hernesupp, kui footonid keset pidevalt ringiseivate osakeste massi üksteist pommitavad ja omavahel põrkuvad.

Möödus veerand miljonit aastat. Ja siis tekkis valgus. Universum muutus läbipaistvaks. Elektronid püsisid nüüd koos ning moodustasid neutraalseid aatomeid ja footoneid, mis viimaks suutsid universumit valgustades rännata läbi õhenevate osakeste. Meie kivikese koostisosad kümblesid nüüd hõõguses,

mida saatis välja universum, olles jahtunud kõigest 3000 kraadini Celsiuse juures. Astronoomid suudavad seda valgust siiani tuvastada nõrga järelkumana, kosmilise mikrolaine-taustkiirgusena, mis on nähtav igas suunas, ükskõik kuhu nad taevaskat ei vaataks, kuigi see kiirgus on vahepealse 13,7 miljardi aasta jooksul veninud mikrolaineteks ja jahtunud kolme kraadini ülalpool absoluutset nulli.

See oli suur samm tuttava ja tavapärase suunas. Endiselt kaugemale kihutavate osakeste temperatuur oli langenud tasemele, mille juures kokkupõrgetes tekkinud tuumad suutsid elektronid kinni püüda ja hoida orbiitidel, kuhu need peaaegu igaveseks püsima jäid (kuigi mõistagi olid endiselt alati liikuma valimatult aatomist aatomisse – meie tunneme seda nähtust elektrivoolu nime all). Esmakordselt olid ilmunud vesiniku, heeliumi ja tillukese liitiumikübeme aatomid.

Ja nii oli sündinud ka paar meie kivikese aatomit. Seega on kõigist kõige iidsem sugupuu vesinikul, mis oli seotud kilda aines olnud veemolekulidesse. Mõistagi ei anna see kuidagi märku oma üüratust iidsusest. Prooton aatomi keskmes on niisama hea kui uus, ainuke elektron selle orbiidil on sama väsimatu nagu siis, kui see esimest korda oma kohale maandus.

Enamik kivikese aatomitest pidi oma sünni ootama märksa kauem. Nende toormaterjalideks olid kaugustesse tormavad vesiniku- ja heeliumipilved, mis täitsid noort paisuvat universumit. Suuremate aatomite ehitamiseks läks vaja veelgi alkeemiat. Kuid ahje, milles selline ehitustöö toimuda saaks, ei olnud veel kaugeltki võimalik rajada.

Kui aatomid kaugustesse kihutasid, toimus see tihenevas pimeduses; pimeduses, mis süvenes, kui temperatuur jätkuvalt langes ja esimesest valguspahvakust sündinud hõõgus tasahaa-val tuhmus. Nüüd saabus gaasipilvede aeg ja kõikehõlmava

korrapäratuse teke. Sest meie loo edasine areng – ja loomulikult viimaks kroonikute ilmumine – sõltus Suure Paugu kõrvalekalletest.

Oleks algne plahvatus olnud ideaalselt korrapärane ja saatnud oma toodangu paisuvasse universumisse laiali täiesti ühtlaselt, oleks universumi arengulugu olnud pidevalt hõrenevate ja pidevalt jahenevate üksikute aatomite hajumine, mis muutunuks kaugemale levides üha üksildasemaks. Ent selles plahvatuses esinesid fluktuatsioonid, ebakorrapärad, mida võib näha veel praegugi regionaalsete varieeruvustena selle ürgse, peaaegu jahtunud, avakosmost täitva universaalse järelkuma intensiivsuses.

Seal, kus gaasipilved olid tihedamad, tuli mängu gravitatsioon (veel üks Suure Paugu leiutisi ülejäänud füüsikaseaduste ja -jõudude kõrval). Vesiniku ja heeliumi aatomid ning üksikud liitumiaatomite eelkäijad hakkasid varajase universumi pika Tumeda Ajastu jooksul aeglaselt üksteise poole tõmbuma. Massiivsemates pilvedes langes gaas pidevalt tiheneva hiiglasuure gaasikera südamikku. Võimetuna kaugemale kulgema, aeglustus gaasi liikumine pidevalt. Gaasi kokkusurumise ajal muundus liikumise energia kuumuseks. Kui ühes esimestest moodustunud gaasikeradest kerkis kuumus umbkaudu 100 miljoni kraadini, algasid tuumareaktsioonid ja universumis hakkas särama tibatilluke uue valguse täpik. Esimene tähtsulatusahi oli sisse lülitatud ja esimene täht sündinud.

See oli hädavajalik eeldus suure hulga meie kivikese materjali loomiseks, kuid loomine ise pidi veel ootama. Äsja süttinud tähe tuumast ikka veel ei piisanud, et sellest oleks võinud saada lastetuba, kus kasvatada heeliumist suuremaid aatomeid ning 100 miljonit kraadi Celsiuse järgi oli endiselt liiga külm, et se pistada kõike seda, mida meil vaja läks. Sellise temperatuuri

juures jagub ühes tõttavas vesinikutuumas piisavalt energiat, et saada võitu eemaletõukavusest, mis alasti prootoneid tavaliselt üksteisest eemal hoiab, ning vesinikutuum suudab põrkuda teise tuumaga. Kui need on surutud piisavalt lähestikku, võib tugev tuumajõud kaks tuuma kokku lukustada. Neli prootonit kombineeruvad seejärel heeliumituuma tekitavas reaktsioonide seerias, mille käigus läheb kaotsi tilluke massiosa. Kadunud mass muundub energiaks ja sealjuures üsna hiiglaslikeks energiakogusteks, nagu Einstein näitas, kui avastas maailma kuulsaima võrrandi $E = mc^2$. Võrrand lihtsalt konstateerib, et tekitatud energia võrdub kaotatud massiga, mis on korrutatud valguse kiirusega ja seejärel veelkord korrutatud valguse kiirusega. Valguse kiirus ruudus on 9×10^{16} (meetrit sekundis)². See arv on määratult suur. See on tähte käigus hoidva termotuumajõu mõõtu.

Kuid et rohkem prootoneid ja neutroneid suuremateks aatomiüksusteks kokku panna, on vaja veelgi tulisemaid tingimusi. Need, mis valitsevad niisuguses väikeses tähes nagu meie enda oma, ei kõlba. Päike, nagu enamik tähti, on galaktilisel skaalal tavaline aeglane põleja. See on püsivalt põlenud pisut üle 4,5 miljardi aasta, konverteerides oma vesinikukütust aeglaselt heeliumiks. Päike on pakkunud soodsaid tingimusi eluks vähemalt ühel oma planeedil ja soojendanud seda just parasjagu, et elu saaks endale jalad korralikult alla. Sel moel põleb see edasi veel umbes viis miljardit aastat.

Sepikojaks, kus meisterdatakse sedalaadi elemente, mis suudavad moodustada kivise planeedi – ja kivikese –, läheb tarvis tähte, mis on vähemalt kümme korda suurem kui meie Päike. Nende hiidtähtede ahjud on suuremad ning põlevad kuume mini ja kiiremini. Hiidtähed kasutavad kütust aplalt ja võivad isegi oma mahukad vesinikuvarud ammendada pelgalt paari

miljoni aastaga. Kui tuumatuled kuhtuvad, hakkab tähe sise-mus, mis ei suuda enam purustavatele gravitatsioonijõududele vastu seista, kokku varisema. Kuid tänu tihedalt kokku pressitud ja sissepoole langevate aatomite hõõrdumisele tekitab kollaps omakorda kuumust. Kuumus on lihtsalt liikuvate aatomite kiiruse mõõdupuu ning 200 miljoni kraadi juures liiguvad heeliumi aatomid piisavalt kiiresti, et nende tuumad saaksid ühineda, süüdates sellega tuumaahjus taas tule. Siis sünnib süsinik ja universumis saab võimalikuks elu, vähemalt sellisel kujul, nagu meie seda tunneme.

Kuid kiiresti arenevas tähes saab kiiresti otsa ka heelium ning algab järgmine kollabeerumise ja taassüttimise faas. Süsinik ise süttib 800 miljoni kraadi juures ning selle käigus tekib veelgi rohkem elemente: hapnikku, neooni, naatriumit, magneesiumit. Ja nii see jätkub, sest neon, seejärel hapnik ja viimaks räni annavad ahjule üksteise järel kütust ja uute elementide loomise toorainet juurde, tehes seda temperatuuril, mis tähe tuumas ulatub 3000 miljoni kraadini.

Sellisel stellaarsel alkeemial on aga piirid. Tuumade kokkuloõmine ja suuremate aatomite ehitamine vabastab energiat, kuni aatomid saavad nii suureks nagu on näiteks raua, mille tuumas on kokku 56 prootonit ja neutronit. Raua omadest suuremaid aatomeid selle protsessi käigus hõlpsasti teha ei saa, sest nii ulatuslikud liitumised *neelavad* energiat, summutades tuumatuld ja kustutades sel moel ahjusid. Seejärel on lava valmis viimase vaatus jaoks, oivaliseks lõpplahenduseks – ülimaks aatomivabrikuks, kus luuakse meie kivikese suuremad aatomid: valmistatakse vase ja tsingi, arseeni, plii ja lantaani ning ka kulla, hõbeda ja plaatina aatomid. See tähendab, et täht sureb – hiilgavalt, kohutavalt ja produktiivselt.

Tähes leiab aset etendus, millesarnane lõi laineid umbes