

Alkuräjähdyksestä tähtien nukleosynteesiin: Olemme tähtipölyä

Maailmankaikkeus on valtava, dynaaminen kangas, joka on maalattu tähtien valolla ja niiden luomilla alkuaineilla. Alkuräjähdyksen katastrofaalisesta syntymästä kaukaiseen, hiipuvaan tulevaisuuteen kylmässä kosmoksessa tähtien sukupolvet – populaatiot III, II ja I sekä niiden mahdolliset seuraajat – ovat muokanneet maailmankaikkeuden kemiallista, fysikaalista ja biologista kehitystä. Tulisten elämien ja räjähtävien kuolemien kautta tähdet ovat luoneet alkuaineet, jotka muodostavat galakseja, planeettoja ja itse elämän. Tämä essee tutkii kosmisia aikakausia, sukeltaen tähtien sukupolvien alkuperään, ympäristöihin ja perintöön, tarkastellen yksityiskohtaisesti tähtien nukleosynteesiä – alkemistisia prosesseja, jotka voimistavat tähtiä ja tuottavat maailmankaikkeuden alkuaineet. Essee huipentuu syvälliseen totuuteen, että olemme tähtipölyä, uudestisyntyneitä muinaisten tähtien tuhkasta, ja pohtii tähtien muodostumisen tulevaisuutta pimentyvässä universumissa.

Luku 1: Alkuräjähdyks ja kosmoksen aamunkoitto

Maailmankaikkeus alkoi noin 13,8 miljardia vuotta sitten alkuräjähdyksellä, tapahtumalla, jossa oli ääretön tiheys ja lämpötila ja jossa kaikki aine, energia, avaruus ja aika syntyivät singulariteetista. Tämä alkukantainen inferno, kuumempi kuin 10^{32} K, piti perustavanlaatuiset voimat – gravitaation, sähkömagnetismin, vahvan ydinvoiman ja heikon ydinvoiman – yhtenäisessä tilassa, ohikiitävässä kosmisen symmetrian hetkessä.

Kosminen laajeneminen ja jäähtyminen

Alle 10^{-36} sekunnissa inflaatio – eksponentiaalinen laajeneminen – venytti maailmankaikkeuden subatomisista mittakaavoista makroskooppisiin ulottuvuuksiin, tasoittaen epäsäännöllisyyksiä ja kylvään tiheysvaihteluja, jotka myöhemmin muodostivat galakseja. 10^{-12} sekunnin kohdalla vahva voima erottui elektroheikosta voimasta, jota seurasi sähkömagnetismin ja heikon voiman erottuminen noin 10^{-6} sekunnissa, kun lämpötilat laskivat alle 10^{15} K:n. Nämä erottelut loivat fysiikan lait, jotka ohjaavat ainetta kvarkeista galakseihin.

Alkukantaisten alkuaineiden muodostuminen

Yhden sekunnin kuluttua maailmankaikkeus jäähdyi noin 10^{10} K:iin, jolloin kvarkit ja gluonit pystyivät kondensoitumaan protoneiksi ja neutroneiksi vahvan voiman kautta. Seuraavien muutaman minuutin aikana – alkuräjähdyksen nukleosynteesin (BBN) aikakaudella – protonit ja neutronit fuusioituivat muodostaen alkukantaiset alkuaineet: noin 75 % vety-1 (^1H , protonit), 25 % helium-4 (^4He) ja pieniä määriä deuteriumia (^2H), helium-3:a (^3He) ja

litium-7:ää (${}^7\text{Li}$). Korkea lämpötila ($\sim 10^9$ K) piti nämä ytimet ionisoituneina, ylläpitäen varattujen hiukkasten plasmaa.

Rekombinaatio ja kosminen mikroaaltotausta

Noin 380 000 vuoden kuluttua (punasiirtymä $z \approx 1100$) maailmankaikkeus jäähdyi noin 3000 K:iin, jolloin protonit ja heliumytimet pystyivät vangitsemaan elektroneja rekombinaatiossa. Tämä neutraloi plasman, muodostaen stabiileja vety- ja heliumatomeja. Aiemmin vapaiden elektronien hajottamat fotonit vapautuivat, luoden kosmisen mikroaaltotaustan (CMB) – lämpökuvan, joka on nyt punasiirtynyt 2,7 K:iin laajenemisen vuoksi. CMB:n pienet vaihtelut (~ 1 osa 10^5 :ssä) paljastavat kosmisen rakenteen siemenet, jotka ovat nykyään havaittavissa observatorioilla, kuten Planck.

Pimeät aikakaudet

Rekombinaation jälkeen maailmankaikkeus siirtyi pimeisiin aikakausiin, tähdettömään aikakauteen, jota hallitsivat neutraali vety- ja heliumkaasu. Pimeän aineen haloissa tapahtuva gravitaatiokollapsi alkoi muodostaa tiheitä kokkareita, valmistellen näyttämöä ensimmäisille tähdille. Alkukantaiset alkuaineet, yksinkertaiset ja niukat, olivat raaka-aineita tähtien muodostumiselle, ja pimeä aine tarjosi gravitaation tukirakenteen.

Luku 2: Populaatio III -tähdet – Sukupolvi 1: Kosmiset pioneirit

Populaatio III -tähdet, ensimmäinen tähtisukupolvi, syttyivät noin 100–400 miljoonaa vuotta alkuräjähdyksen jälkeen ($z \approx 20$ – 10), päättäen pimeät aikakaudet ja aloittaen ”kosmisen aamunkoiton”. Nämä tähdet muodostuivat tiheässä ($\sim 10^{-24}$ g/cm³), lämpimässä (CMB ~ 20 – 100 K) ja kemiallisesti koskemattomassa maailmankaikkeudessa, joka koostui lähes kokonaan vedystä (~ 76 %) ja heliumista (~ 24 %), metallisuudella $Z \approx 10^{-10} Z_{\odot}$.

Ympäristö ja muodostuminen

Varhaisen maailmankaikkeuden korkea tiheys mahdollisti kaasupilvien romahtamisen pimeän aineen minihaloissa ($\sim 10^5$ – 10^6 auringonmassaa), saavuttaen tiheydet $\sim 10^4$ – 10^6 hiukkasta/cm³. Gravitaatiopuristuminen lämmitti pilviä $\sim 10^3$ – 10^4 K:iin, mutta jäähdytys riippui molekyyllivedystä (H_2), joka muodostui reaktioiden, kuten $\text{H} + \text{e}^- \rightarrow \text{H}^- + \gamma$, ja sen jälkeen $\text{H}^- + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{e}^-$, kautta. H_2 -jäähdytys pyörimis- ja värähtelysiirtymien kautta oli tehotonta, pitääkseen pilvet lämpiminä ja estäen pirstoutumisen. Korkea Jeans-massa ($\sim 10^2$ – 10^3 auringonmassaa) suosi massiivisia prototähtiä.

Ominaisuudet

Populaatio III -tähdet olivat todennäköisesti massiivisia (10–1000 auringonmassaa), kuumia ($\sim 10^5$ K pintalämpötila) ja valovoimaisia, säteillen voimakasta UV-säteilyä. Niiden korkea massa ajoi nopeaa fuusiota, pääasiassa CNO-syklin kautta (käyttäen varhaisten fuusioiden vähäisiä hiilimääriä), kuluttaen polttoaineen noin 1–3 miljoonassa vuodessa. Niiden kohtalot vaihtelivat: - **10–100 auringonmassaa**: Ytimen romahdussupernovat, jotka

hajottivat metalleja, kuten hiiltä, happea ja rautaa. - **Yli 100 auringonmassaa:** Suora romahdus mustiin aukkoihin, mahdollisesti varhaisten kvasarien siemeniksi. - **140–260 auringonmassaa:** Parinstabiilisuussupernovat, joissa elektronien ja positronien parituotanto aiheutti täydellisen hajoamisen ilman jäännöksiä.

Merkitys

Populaatio III -tähdet olivat kosmisia arkkitehteja. Niiden UV-säteily ionisoi vetyä, edistäen uudelleenionisaatiota ($z \approx 6-15$), tehden maailmankaikkeudesta läpinäkyvän. Niiden supernovat rikastuttivat tähtienvälistä väliainetta (ISM) metalleilla, mahdollistaen populaatio II -tähtien muodostumisen. Säteilyn, tuulten ja räjähdysten palautteet sääntelivät tähtien muodostumista ja muokkasivat varhaisia galakseja. Niiden mustien aukkojen jäännökset saattoivat muodostaa supermassiivisten mustien aukkojen siemeniä galaksien keskuksissa.

Mahdollinen havaitseminen ja tulevaisuuden näkymät

Populaatio III -tähtien suora havaitseminen on haastavaa niiden etäisyyden ja lyhyen eliniän vuoksi. James Webb -avaruusteleskooppi (JWST) on antanut vihjeitä: vuonna 2023 GN-z11 ($z \approx 11$) osoitti ionisoidun heliumin (He II) emissiota ilman metallilinjvoja, viitaten populaatio III -tähtiin. RX J2129-z8He II (2022, $z \approx 8$) osoitti myös mahdollisia merkkejä, vaikka aktiiviset galaktiset ytimet (AGN) tai metalliköyhät populaatio II -tähdet ovat vaihtoehtoja. Vahvistus vaatii korkean resoluution spektroskopiaa metallien puuttumisen ja vahvan He II 1640Å -emission varmistamiseksi.

Tulevat instrumentit, kuten Extremely Large Telescope (ELT) ja JWST:n NIRSpec, tutkivat $z > 10-20$, kohdistuen koskemattomiin galakseihin. Simulaatiot viittaavat populaatio III -supernovien havaitsemiseen niiden ainutlaatuisten valokäyrien tai parinstabiilisuusräjähdysten gravitaatioaaltojen kautta. Metalliköyhät populaatio II -tähdet, kuten galaktisessa halossa olevat, voivat säilyttää populaatio III -supernovien saantoja, tarjoten epäsuoria todisteita. Nämä ponnistelut voivat paljastaa populaatio III -tähtien massan, metallisuuden ja roolin kosmisessa kehityksessä.

Luku 3: Populaatio II -tähdet – Sukupolvi 2: Silta monimutkaisuuteen

Populaatio II -tähdet muodostuivat noin 400 miljoonasta muutamaan miljardiin vuoteen alkuräjähdysten jälkeen ($z \approx 10-3$), kun galaksit kokoonpanivat vähemmän tiheässä ja viileämmässä maailmankaikkeudessa. Nämä tähdet muodostivat sillan alkukantaisesta aikakaudesta moderneihin galakseihin, rakentaen monimutkaisuutta metallien rikastumisen kautta.

Ympäristö ja muodostuminen

Maailmankaikkeuden keskimääräinen tiheys laski laajenemisen myötä, mutta tähtiä muodostavat pilvet varhaisissa galakseissa saavuttivat $\sim 10^2-10^4$ hiukkasta/cm³

suuremmissa pimeään aineen haloissa ($\sim 10^7$ – 10^9 auringonmassaa). CMB jäähdyi ~ 10 – 20 K:iin, ja populaatio III -supernovien rikastamat pilvet olivat metallisuudeltaan $Z \approx 10^{-4}$ – $10^{-2} Z_{\odot}$. Metallit (esim. hiili, happi) mahdollistivat jäähtymisen atomilinjojen kautta ([C II] $158 \mu\text{m}$, [O I] $63 \mu\text{m}$), laskien lämpötiloja $\sim 10^2$ – 10^3 K:iin. Pienet määrät pölyä tehostivat jäähtymistä lämpösäteilyn kautta. Vähentynyt Jeans-massa (~ 1 – 100 auringonmassaa) salli pirstoutumisen, tuottaen monipuolisia tähtimassoja.

Ominaisuudet

Populaatio II -tähdet vaihtelevat pienestä massasta ($0,1$ – 1 auringonmassaa, elinikä $>10^{10}$ vuotta) massiivisiin (10 – 100 auringonmassaa, $\sim 10^6$ – 10^7 vuotta). Niitä löytyy galaktisista haloista, pallomaisista tähtijoukoista (esim. M13) ja varhaisten galaksien pullistumista, ja niillä on alhainen metallisuus, tuottaen punertavampia spektrejä. Niiden muodostuminen ryhmissä heijastaa pirstoutumista, ja niiden supernovat rikastuttivat ISM:ää $\sim 0,1 Z_{\odot}$:ään.

Merkitys

Populaatio II -tähdet edistivät galaktista kehitystä. Niiden supernovat syntetisoivat raskaampia alkuaineita (esim. pii, magnesium), muodostaen pölyä ja molekyylejä, jotka helpottivat tähtien muodostumista. Pienimassaiset populaatio II -tähdet, havaittavissa pallomaisissa tähtijoukoissa ja Linnunradan halossa, säilyttävät populaatio III -supernovien jälkiä. Säteilyn ja räjähdysten palautteet muokkasivat galaktisia kiekkoja ja sääntelivät tähtien muodostumista. Ne loivat perustan populaatio I -tähdille ja planeettakunnille.

Havaintotodisteet

Populaatio II -tähdet ovat havaittavissa pallomaisissa tähtijoukoissa, galaktisissa haloissa ja metalliköyhinä tähtinä (esim. HD 122563, $Z \approx 0,001 Z_{\odot}$). Äärimmäisen metalliköyhät tähdet ($Z < 10^{-3} Z_{\odot}$) voivat heijastaa populaatio III -saantoja. Tutkimukset, kuten SDSS ja Gaia, sekä tulevat ELT-havainnot tarkentavat ymmärrystämme populaatio II -tähtien muodostumisesta ja varhaisten galaksien kokoamisesta.

Luku 4: Populaatio I -tähdet – Sukupolvi 3: Planeettojen ja elämän aikakausi

Populaatio I -tähdet, jotka ovat muodostuneet noin 10 miljardin vuoden takaa nykypäivään ($z \approx 2$ – 0), hallitsevat kypsiä galakseja, kuten Linnunradan kiekkoa. Nämä tähdet, mukaan lukien Aurinko, mahdollistivat planeetat ja elämän metallirikkaiden ympäristöjensä kautta.

Ympäristö ja muodostuminen

Maailmankaikkeus on harva ($\sim 10^{-30} \text{ g/cm}^3$), ja tähtien muodostuminen tapahtuu tiheissä molekyyliopilvissä ($\sim 10^2$ – 10^6 hiukkasta/ cm^3), joita käynnistävät spiraalitiheysaallot tai supernovat. CMB on $2,7 \text{ K}$, ja pilvet, joissa $Z \approx 0,1$ – $2 Z_{\odot}$, jäähtyvät ~ 10 – 20 K :iin molekyylininjojen (esim. CO, HCN) ja pölyemissioiden kautta. Matala Jeans-massa ($\sim 0,1$ – 10

aurionmassaa) suosii pieniä tähtiä, vaikka massiiviset tähdet muodostuvat aktiivisilla alueilla.

Ominaisuudet

Populaatio I -tähdet vaihtelevat punaisista kääpiöistä ($0,08-1$ auringonmassaa, $>10^{10}$ vuotta) O-tyypin tähtiin ($10-100$ auringonmassaa, $\sim 10^6-10^7$ vuotta). Niiden korkea metallisuus tuottaa kirkkaita, metallirikkaita spektrejä linjoilla, kuten Fe I ja Ca II. Ne muodostuvat avoimissa tähtijoukoissa (esim. Plejadit) tai sumuissa (esim. Orion). Aurinko, $4,6$ miljardia vuotta vanha populaatio I -tähti, on tyypillinen.

Merkitys: Planeetat ja elämä

Korkea metallisuus mahdollisti kivisten planeettojen muodostumisen, kun pöly ja metallit protoplanetaarisissa kiekkoissa muodostivat planetesimaaleja. Auringon kiekko tuotti Maan noin $4,5$ miljardia vuotta sitten, ja pii, happi ja rauta muodostivat maankaltaisia planeettoja, kun taas hiili mahdollisti orgaaniset molekyylit. Auringon vakaa tuotto ja pitkä elinikä ylläpitivät asuttavaa vyöhykettä nestemäiselle vedelle, edistään hiilipohjaista elämää miljardeja vuosia. Populaatio I -tähtien monimuotoisuus ajaa jatkuvaa ISM:n rikastumista, ylläpitäen tähtien ja planeettojen muodostumista.

Havaintotodisteet

Populaatio I -tähdet hallitsevat Linnunradan kiekkoa ja ovat havaittavissa tähtien muodostumisalueilla ja joukoissa. Eksoplaneettatutkimukset (esim. Kepler, TESS) osoittavat, että korkean metallisuuden tähdet isännöivät todennäköisemmin planeettoja, ja noin 50% auringonkaltaisista tähdistä saattaa sisältää kivisiä maailmoja. Spektroskopia paljastaa niiden metallirikkaan koostumuksen, jäljittäen kumulatiivista rikastumista.

Luku 5: Tulevat tähtisukupolvet: Pimeämpi, kylmempi kosmos

Kun pimeä energia ajaa kosmista laajenemista, maailmankaikkeus muuttuu kylmemmäksi, vähemmän tiheäksi ja metallirikkaammaksi, muuttaen tähtien muodostumista. Noin 100 miljardin vuoden kuluttua ($z \approx -1$) tähtien muodostuminen hidastuu, ja noin 10^{12} vuoden kuluttua se saattaa lakata, johtaen pimeään, entropiseen kosmukseen.

Tulevat olosuhteet

Keskimääräinen tiheys laskee, eristäen galakseja. CMB jäähtyy alle $0,3$ K:n, ja pilvet, joissa $Z > 2-5 Z_{\odot}$, jäähtyvät tehokkaasti metallien (esim. [Fe II], [Si II]) ja pölyemissioiden kautta. Tähtien muodostuminen riippuu harvinaisista kaasukertymistä, sillä suurin osa galaktisesta kaasusta kulutetaan tähtien muodostumiseen, supernoviin tai mustien aukkojen suihkuihin. Galaksien sulautumiset voivat tilapäisesti lisätä tähtien muodostumista.

Tulevien tähtien ominaisuudet

Tulevat tähdet ovat pienimassaisia punaisia kääpiöitä (0,08–1 auringonmassaa, 10^{10} – 10^{12} vuotta) tehokkaan jäähtymisen ja matalan Jeans-massan vuoksi. Massiiviset tähdet ovat harvinaisia, koska korkea metallisuus estää suurten prototähtien kertymisen. Nämä tähdet säteilevät heikkoa infrapunavaloa, himmentäen galakseja. Metallirikkaat kiekot suosivat kivisiä planeettoja.

Kosminen näkymä

Galaksit haalistuvat tähtien kuollessa, jättäen jälkeensä valkoisia kääpiöitä, neutronitähtiä ja mustia aukkoja. Elämä saattaa riippua keinotekoisesta energiasta tai harvinaisista tähtioaseista universumissa, joka lähestyy ”lämpökuolemaa”.

Luku 6: Tähtien nukleosynteesi: Alkuaineiden takominen ja neutriinojen purkaukset

Tähtien nukleosynteesi on kosminen ahjo, jossa tähdet syntetisoivat raskaampia alkuaineita kevyemmistä, edistään maailmankaikkeuden kemiallista kehitystä. Hiljaisesta fuusiosta tähtien ytimissä räjähtäviin prosesseihin supernovissa se tuottaa alkuaineet, jotka muodostavat planeettoja, elämää ja galakseja. Protoniprotoniketju, CNO-sykli, kolmoisalfaprosessi, s-prosessi, r-prosessi, p-prosessi ja fotodisintegraatio, jotka huipentuvat neutriinopurkauksiin, paljastavat alkuaineiden muodostumisen monimutkaiset mekanismit ja mahdollistavat supernovien nopean havaitsemisen.

Protoniprotoniketju

Protoniprotoniketju (pp) antaa voimaa pienimassaisille tähdille ($T \sim 10^7$ K, esim. Aurinko). Se alkaa kahden protonin fuusioitumisella muodostaen diprotonin, joka hajoaa beetahajoamisella deuteriumiksi ($^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e$, vapauttaen neutriinin). Seuraavat vaiheet sisältävät: - $^2\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$ (fotoniemissio). - $^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + 2^1\text{H}$, vapauttaen kaksi protonia.

Pp-ketjulla on haaroja (ppI, ppII, ppIII), jotka tuottavat eri energioiden neutriinoja (0,4–6 MeV). Se on hidas, ylläpitäen Aurinkoa noin 10^{10} vuotta, ja sen neutriinot, jotka on havaittu kokeilla kuten Borexino, vahvistavat tähtien fuusiomalleja.

CNO-sykli

Hiili-typpi-happi-sykli (CNO) hallitsee massiivisissa tähdissä ($>1,3$ auringonmassaa, $T > 1,5 \times 10^7$ K). Se käyttää ^{12}C , ^{14}N ja ^{16}O katalyytteinä fuusioimaan neljä protonia ^4He :ksi: - $^{12}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$ - $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$ - $^{13}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma$ - $^{14}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$ - $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$ - $^{15}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He}$

CNO-sykli on nopeampi, edistään nopeaa fuusiota ($\sim 10^6$ – 10^7 vuotta) ja tuottaen korkeamman energian neutriinoja (~ 1 – 10 MeV), jotka ovat havaittavissa Super-Kamiokande-laitteella.

Kolmoisalfaprosessi

Yli 8 auringonmassan tähdissä heliumipalaminen ($T \sim 10^8$ K) fuusioi kolme ^4He -ydintä ^{12}C :ksi kolmoisalfaprosessin kautta. Kaksi ^4He -ydintä muodostavat epästabiilin ^8Be :n, joka vangitsee toisen ^4He :n muodostaen ^{12}C :n hyödyntäen resonanssia ^{12}C :n energiatasoilla. Jotkin ^{12}C :t vangitsevat ^4He :n muodostaen ^{16}O :n ($^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$). Tämä prosessi, joka kestää $\sim 10^5$ vuotta, on ratkaiseva hiilen ja hapen tuotannossa, mahdollistaen elämän.

Edistyneet palamisvaiheet

Massiiviset tähdet käyvät läpi nopeita palamisvaiheita: - **Hiilipalaminen** ($T \sim 6 \times 10^8$ K, $\sim 10^3$ vuotta): $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + ^4\text{He}$ tai $^{23}\text{Na} + ^1\text{H}$. - **Neonpalaminen** ($T \sim 1,2 \times 10^9$ K, ~ 1 vuosi): $^{20}\text{Ne} + \gamma \rightarrow ^{16}\text{O} + ^4\text{He}$. - **Happipalaminen** ($T \sim 2 \times 10^9$ K, ~ 6 kuukautta): $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Si} + ^4\text{He}$. - **Pii palaminen** ($T \sim 3 \times 10^9$ K, ~ 1 päivä): $^{28}\text{Si} + \gamma \rightarrow ^{56}\text{Fe}$, ^{56}Ni fotodisintegraation ja vangitsemisen kautta.

Rautahuippuainekset merkitsevät fuusion loppua, koska lisäreaktiot ovat endotermisiä.

S-prosessi (hidas neutronien vangitseminen)

S-prosessi tapahtuu AGB-tähdissä (1–8 auringonmassaa) ja joissakin massiivisissa tähdissä, joissa neutronit vangitaan hitaasti, mahdollistaen beetahajoamisen vangitsemisten välillä (esim. $^{56}\text{Fe} + n \rightarrow ^{57}\text{Fe}$, sitten $^{57}\text{Fe} \rightarrow ^{57}\text{Co} + e^- + \bar{\nu}_e$). Neutronit tulevat reaktioista, kuten $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ AGB-tähtien heliumkuorissa. Se tuottaa alkuaineita, kuten strontiumia, bariumia ja lyijyä, noin 10^3 – 10^5 vuoden aikana, rikastuttaen ISM:ää tähtituulien kautta.

R-prosessi (nopea neutronien vangitseminen)

R-prosessi tapahtuu äärimmäisissä ympäristöissä (supernovat, neutronitähtien sulautumiset) neutronivuon ollessa $\sim 10^{22}$ neutronia/ cm^2/s . Ytimet vangitsevat neutronit nopeammin kuin beetahajoaminen, muodostaen raskaita alkuaineita, kuten kultaa, hopeaa ja uraania (esim. $^{56}\text{Fe} + \text{useita } n \rightarrow ^{238}\text{U}$). Se kestää sekunteja supernovien shokkiaalloissa tai sulautumispurkauksissa ja vastaa noin 50 % raskaista alkuaineista.

P-prosessi (protonien vangitseminen/fotodisintegraatio)

P-prosessi tuottaa harvinaisia protonirikkaita isotooppeja (esim. ^{92}Mo , ^{96}Ru) supernovissa. Korkeaenergiset gammasäteet ($T \sim 2\text{--}3 \times 10^9$ K) fotodisintegroivat s- ja r-prosessin ytimiä (esim. $^{98}\text{Mo} + \gamma \rightarrow ^{97}\text{Mo} + n$), tai protonit vangitaan protonirikkaissa ympäristöissä. Sen alhainen tehokkuus selittää p-ydinten harvinaisuuden.

Fotodisintegraatio supernovissa

Ytimen romahdussupernovissa fotodisintegraatio rautaytimessä ($T > 10^{10}$ K) hajottaa ^{56}Fe :n protoneiksi, neutroneiksi ja ^4He :ksi (esim. $^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13^4\text{He} + 4n$). Tämä endoterminen prosessi vähentää painetta, kiihdyttäen romahdusta neutronitähteä tai mustaa aukkoa kohti. Shokkiaalto laukaisee räjähtävän nukleosynteesin, heittäen alkuaineita ulos.

Neutriinopurkaus ja supernovien havaitseminen

Ytimen romahduksen aikana noin 99 % supernovan energiasta ($\sim 10^{46}$ J) vapautuu neutriinoina neutronisaation ($p + e^- \rightarrow n + \nu_e$) ja termisten prosessien ($e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$) kautta. Noin 10 sekunnin purkaus edeltää optista räjähdystä ja on havaittavissa laitteilla, kuten Super-Kamiokande, IceCube ja DUNE. SN 1987A:n noin 20 neutriinoa vahvistivat tämän. Useiden detektorien kolmiomittaus paikantaa supernovat sekunneissa, mahdollistaen seurantaobservaatiot optisilla, röntgen- ja gammasäteilypituuksilla, paljastaen esi-isän ominaisuudet ja nukleosynteesin saannot.

Epätasainen runsaus

Alkuaineiden runsaus heijastaa nukleosynteesiä: - **H, He**: ~ 98 % BBN:stä. - **C, O, Ne, Mg**: Runsaita fuusiosta. - **Fe, Ni**: Huippu ydinstabiilisuuden vuoksi. - **Au, U**: Harvinaisia, r-prosessista. - **P-ytimet**: Harvinaisimpia, p-prosessista.

Tapaustutkimus: Uraani-235 ja Uraani-238

^{235}U ja ^{238}U muodostuvat r-prosessin kautta supernovissa tai neutronitähtien sulautumisissa. ^{235}U (puoliintumisaika $\sim 703,8$ miljoonaa vuotta) hajoaa nopeammin kuin ^{238}U (puoliintumisaika $\sim 4,468$ miljardia vuotta). Maan muodostuessa ($\sim 4,54$ miljardia vuotta sitten) $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ -suhde oli $\sim 0,31$ ($\sim 23,7$ % ^{235}U). Noin 2 miljardia vuotta sitten se oli $\sim 0,037$ ($\sim 3,6$ % ^{235}U), riittävä fissioon. Oklo-reaktori Gabonissa muodostui, kun korkealaatuinen uraanimalmi (~ 20 – 60 % uraanioksideja), sedimenttiprosessien tiivistämä, vuorovaikutti pohjaveden kanssa, joka moderoi neutroneja. Isotooppista rikastusta ei tapahtunut; luonnollinen $\sim 3,6$ % ^{235}U mahdollisti kriittisen massan, ylläpitäen ajoittaisia fissioreaktioita noin 150 000–1 miljoonan vuoden ajan, tuottaen isotooppeja, kuten ^{143}Nd , ja lämpöä.

Johtopäätös: Olemme tähtipölyä, uudestisyntyneitä kosmisista tulista

Alkuräjähdysten tulisesta syntymästä haipuvaan tulevaisuuteen tähdet ovat muovanneet maailmankaikkeuden. Populaatio III -tähdet sytyttivät kosmoksen ja takoivat ensimmäiset metallit. Populaatio II -tähdet rakensivat monimutkaisuutta, ja populaatio I -tähdet mahdollistivat planeetat ja elämän. Tähtien nukleosynteesi – pp-ketjun, CNO-syklin, kolmoisalfaprosessin, s-, r- ja p-prosessien sekä fotodisintegraation kautta – loi alkuaineet, ja neutriinopurkaukset signaloivat niiden räjähtävää leviämistä. Oklo-reaktori, jota ohjasi luonnollinen ^{235}U :n runsaus, ilmentää tätä perintöä. Olemme tähtipölyä, uudestisyntyneitä muinaisista tähdistä, kantamassa niiden alkuaineita kehossamme. Kun maailmankaikkeus pimenee, kosminen perintömme saattaa inspiroida tulevia sukupolvia sytyttämään uusia tähtiä, jatkaen luomista entropisessa tyhjyydessä.