



Linnunradan rakenne (FYS2053)

Luento 13: Linnunradan synty ja kehitys

Jorma Harju

05.12.2022, Exactum D123

Tällä luennolla käsitellään

1. Metallien tuotto tähdissä: α -alkuaineet ja rauta
2. Metallirunsauksien käyttö tähtien syntyhistorian tutkimisessa
3. Korrelaatiot tähtien metallipitoisuuksien, ikien ja nopeusdispersioiden välillä
4. Linnunradan halon, keskuspullistuman ja kiekon synty
5. Linnunradan syntyteorioita. Linnunradan tulevaisuus.

Metallien tuotto tähdissä: α -alkuaineet ja rauta

Metallien tuotto tähdissä I

Kaikki vetyä ja heliumia raskaammat alkuaineet (= "metallit") ovat syntyneet tähdissä.

Big Bang Nucleosynthesis (BBNS): H, ^4He , D, ^3He (+Li, Be)

Alkuaineiden merkinnät:

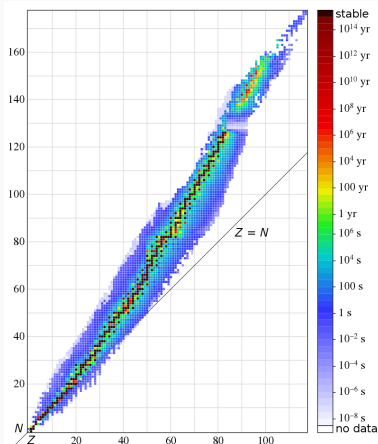
Z protonien lukumäärä

N neutronien lukumäärä

$A = Z + N$ on massaluku

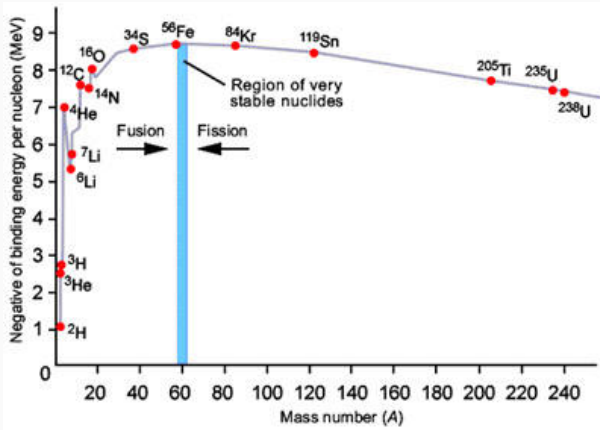
Alkuaineet sijaitsevat

(Z, N)-tasossa **stabiili-**
suusvyöhykkeellä



Metallien tuotto tähdissä II

Rautaytimen (Fe) hajottaminen nukleoneiksi vaatii suurimman energian nukleonia kohti → Ydinreaktiot pyrkivät rautaan.

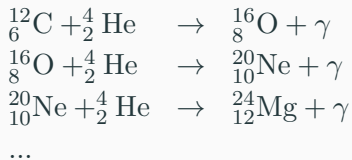


Pienimassaisissa pääsarjan tähdissä vallitseva reaktio on **protoni-protoni-ketju**, jossa protonit yhdistyvät heliumytimiksi

Aurinkoa vähän raskaammissa pääsarjan tähdissä ($M > 1.3 M_{\odot}$) toimii myös **hiilisykli (CNO-sykli)**, jossa ^{12}C toimii katalyyttinä, mutta jossa edelleen protonit yhtyvät ^4He -ytimiksi

Hiili (^{12}C) syntyy **3- α -prosessissa** kolmen heliumytimen (α -hiukkasen) yhdistyessä. Tämä vaatii lämpötilan $T \sim 10^8$ K.

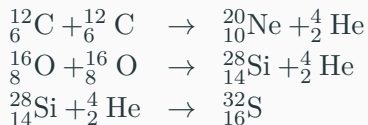
Tämän jälkeen fuusioprosessit voivat korkeissa lämpötiloissa edetä lisäämällä α -hiukkasia hiiliyttimeen:



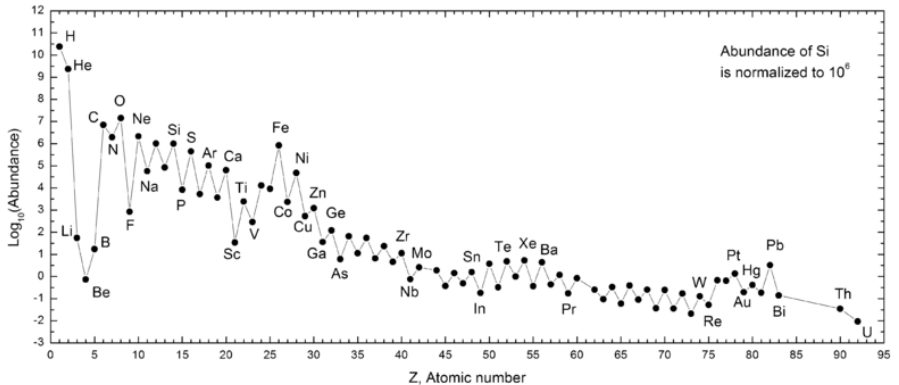
Näin muodostuneita alkuaineiden massaluku on jaollinen neljällä ja niitä kutsutaan α -alkuaineiksi.

Tässä prosessissa syntyviä stabiileja alkuaineita ovat ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{32}\text{S}$, ${}^{36}\text{Ar}$ ja ${}^{40}\text{Ca}$.

Heliumin loputtua, jos lämpötila on riittävän korkea, ydinreaktiot voivat jatkua hiilen, hapen ja piin "palamisella", esim.



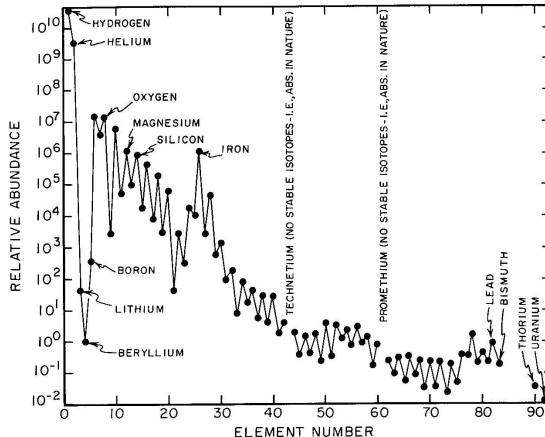
Aurinkokunnan alkuainerunsaudet



Alkuaineiden suhteelliset runsaudet Aurinkokunnassa.
Huomaa likimain eksponentiaalinen väheneminen varaustilavuuden Z funktiona sekä α -prosessista johtuva sahakuvio: parillisia alkuaineita on enemmän.

Rauta-alkuaineet I

Rauta-alkuaineiksi (iron peak elements) kutsutaan alkuaineita, joiden massaluku $40 < A < 65$. Tähän joukkoon kuuluu Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni ja Cu.



Rauta-alkuaineet II


Näitä alkuaineita syntyy tähtien kehityksen myöhäisissä vaiheissa kun ydin on erittäin kuuma.

Raudan lähellä useilla alkuaineilla lähes sama sidosenergia E .

Termisessä tasapainossa runsaus $\propto e^{-E/kT}$

Group

	I		II												III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	1 H																					2 He
2	3 Li	4 Be												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne			
3	11 Na	12 Mg												13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar			
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn				
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo				

stabiili 

puoliintumisaika ↑

* Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
** Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Fuusioreaktioiden kautta ei voi syntyä suuria määriä rautaa raskaampia alkuaineita, koska nämä prosessit vaativat enemmän energiaa kuin niistä saadaan.

Rautaa raskaammat alkuaineet ovat harvinaisia maailmankaikkeudessa ja ne syntyvät kaappaamalla vapaita neutroneja ydinreaktioissa. Näin voidaan rakentaa raskaampia neutronirikkaita ytimiä, jotka voivat sitten β -hajoamisen kautta nostaa varauslukua Z .

Prosessi voi tapahtua hitaasti (**s-prosessi, slow neutron capture**), tyypillisesti AGB-tähdessä. Tällöin syntynyt alkuaine, jos se on radioktiivinen, hajoaa β -hajoamisen kautta ennen seuraavaa törmäystä neutronin kanssa.

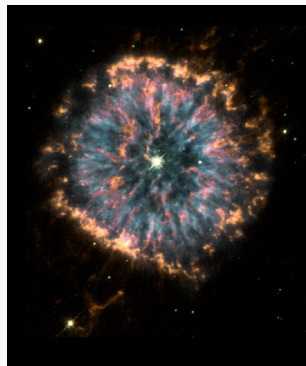
Hyvin neutronirikkaassa ympäristössä (esim. supernova) perättäiset törmäykset ehtivät tapahtua nopeammin kuin radioaktiivinen hajoaminen (**r-prosessi, rapid neutron capture**) ja näin voi syntyä kaikkein raskaimpia luonnossa esiintyviä alkuaineita ($A \geq 130 - 140$, mm. pitkäikäiset radioaktiiviset ytimet Th, U).

Pienimassaisten tähtien metallintuotto

Tähdet, joiden alkumassat ovat alle $8M_{\odot}$ puhaltavat kuollessaan planetaarisen sumun ja jäljelle jää valkoinen kääpiötähti.

Pienimassaisten tähtien evoluutioaikaskaalat ovat hyvin pitkiä ja suurin osa tähden tuottamista raskaimista alkuaineista, C, O ja muista α -alkuaineista lukkiutuu jäljelle jääneeseen valkoiseen kääpiöön.

Asymptotic Giant Branch (AGB) -vaiheen tähtituuli rikastaa kuitenkin merkittävästi tähtienvälistä ainetta -merkittävä pölyn tuottaja

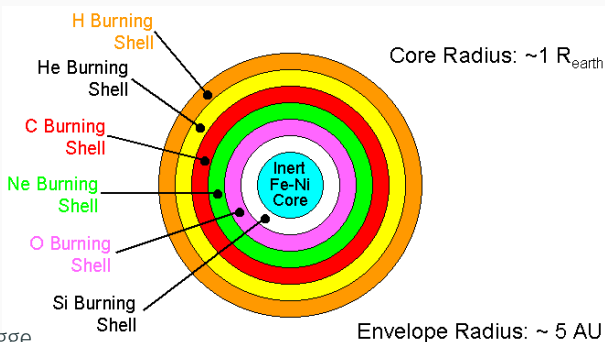


Planetaarisissa sumuissa $[N/H]$ ja $[O/H]$ suurempia kuin ympäröivässä avaruudessa. ($[X/H]$ on logaritminen runsausuhde Aurinkoon verrattuna, Auringolla $[X/H]=0$)

Metallintuotto II-tyyppin supernovissa I

Tähdet joiden alkumassat ovat yli $8M_{\odot}$ kuolevat II-tyyppin (core collapse) supernovissa

Myöhäisessä kehitysvaiheessa massiivisella tähdellä on sipulimainen rakenne, evoluutioaikaskaalat ovat lyhyitä (miljoonia vuosia).



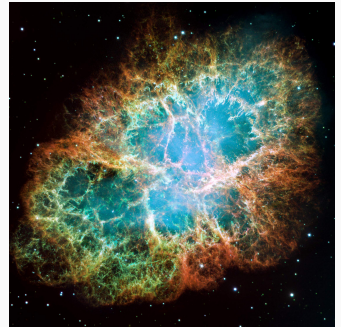
Kuva: R. Pogge

Metallintuotto II-tyyppin supernovissa II

Tähden ulko-osat, joissa on paljon α -alkuaineita leviävät avaruuteen räjähdyksessä.

Tähden ydin romahtaa joko neutronitähdeksi tai mustaksi aukoksi.

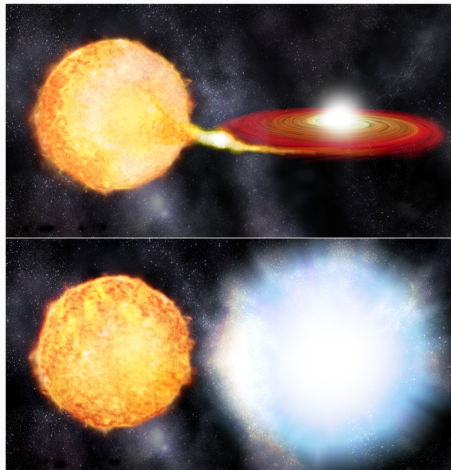
II-tyyppin SN tuottavat enimmäkseen happea ja α -alkuaineita sekä $\sim 1/3$ rautapiikin aineista.



Metallintuotto Ia-tyyppin supernovissa I

Tyyppin Ia supernova syntyy valkoisen kääpiötähden ylittäessä Chandrasekharin rajan ($\sim 1.4 M_{\odot}$) kaksoistähtijärjestelmässä.

Tässä vaiheessa degeneroituneen kaasun paine ei voi estää tähteä luhistumasta ja tähti räjähtää supernovana.



Räjähdyksessä noin puolet tähden hiilestä ja hapesta fuusioituu rauta-alkuaineiksi noin sekunnissa.

Ensimmäiset Ia-tyypin supernovat räjähtävät noin miljardin vuoden kuluessa.

Erittäin tehokas tapa tuottaa rautaa verrattuna II-tyypin supernoviin.

Yhteenveto alkuainesynteesistä

Vallitsevat alkuaineet H ja He ovat syntyneet alkuräjähdyksessä

Pääsarjan tähdet enimmäkseen polttavat vetyä heliumiksi (pp-ketju ja CNO-sykli)

3α -prosessi ($\text{He} \rightarrow \text{C}$) alkaa jättiläisvaiheen lopulla

α -reaktiot tuottavat hiiltä raskaampia alkuaineita yli $\sim 4 M_{\odot}$ jättiläistähdissä

Tyypin Ia ja II supernovat tuottavat rautapiikin alkuaineita, joilla sidosenergia nukleonia kohti saavuttaa maksimin

Rautaa raskaammat aineet harvinaisia - hidas neutronisieppaus tähdissä

Li, Be, B harvinaisia - ohitetaan tai tuhotaan tähtien nukleosynteesissä (kosmisten hiukkasten aiheuttama spallaatio tuottaa näitä jonkin verran)

Metallirunsausten käyttö tähtien syntyhistorian tutkimisessa

$[\alpha/\text{Fe}]$ kronometrinä

Tähtien syntyhistoriaa Linnunradassa voi tutkia mittaamalla niiden metallipitoisuuksia ja korrelaatiota tähtien ikien ja nopeuksien kanssa.

Suurin osa α -alkuaineista tuotetaan hyvin lyhyessä ajassa ($t \sim 10$ miljoonia vuosia), kun taas suurin osa rauta-alkuaineista tuotetaan Ia-typin supernovissa ($t \sim 1$ miljardi vuotta)

Suhdetta $[\alpha/\text{Fe}]$ voidaan käyttää kronometrinä.

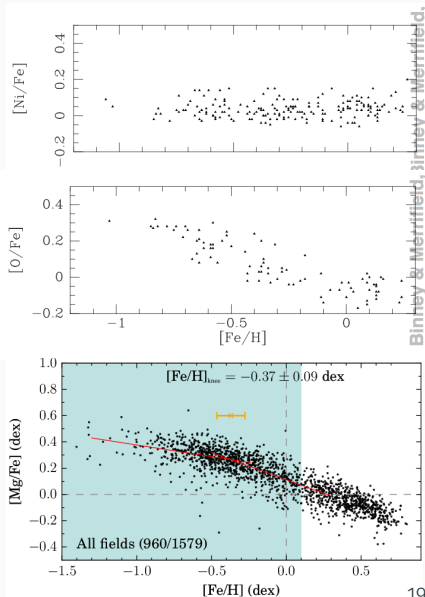
Tähdillä, joilla on korkea $[\alpha/\text{Fe}]$ on yleensä pieni rautapitoisuus $[\text{Fe}/\text{H}]$, koska nämä tähdet syntyivät varhain Linnunradan kiekossa kun α -alkuaineita oli jo runsaasti, mutta Ia-typin supernovat eivät vielä olleet ehtineet tuottaa paljon rautaa.

Metallipitoisuushavainnot I

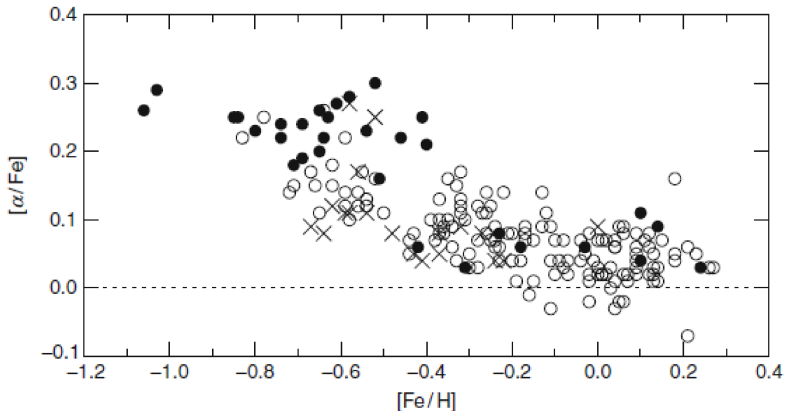
α -alkuaineet: Sekä hapen (O), että magnesiumin (Mg) runsaudet suhteessa rautaan vähenvät kasvavan rautarunsauden (Fe) funktiona kuten teoria ennustaa.

Nikkelin (Ni) runsaus ei muutu raudan funktiona koska nämä alkuaineet syntyvät samoissa reaktioissa.

Alakuva: Rojas-Arriagada et al. 2017



Metallipitoisuushavaintoja II



- ($R < 7$ kpc) ○ ($7 \text{ kpc} < R < 9$ kpc) × ($R > 9$ kpc)

$$[Fe/H] = \lg[N(Fe)/N(H)]_{\star} - \lg[N(Fe)/N(H)]_{\odot}$$

$$[alpha/Fe] = ([Mg/Fe] + [Si/Fe] + [Ca/Fe] + [Ti/Fe])/4$$

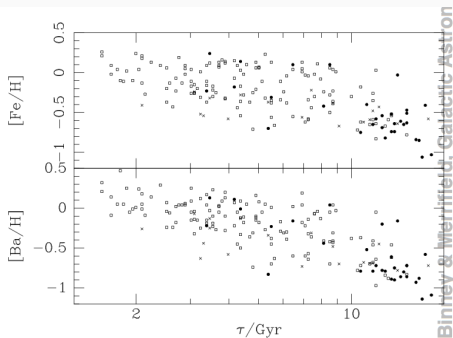
Kuva: Edvardsson et al. (1993)

Metallipitoisuus ja tähtien iät

Tähtien metallipitoisuudet pienenevät keskimäärin systemaattisesti iän (τ) myötä.

Metallipitoisuudessa on hyvin suuri hajonta, myös tähdillä, jotka sijaitsevat samalla etäisyydellä Linnunradan keskustasta.

Hajonta on suurempaa raudalle kuin α -alkuaineille.



⇒ Metallit eivät ole tasaisesti sekoittuneita tähtienvälisessä kaasussa kaikkialla Linnunradassa.

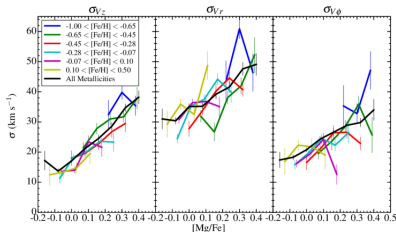
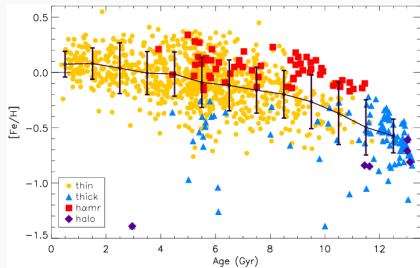
Korrelaatiot tähtien
metallipitoisuuksien, ikien ja
nopeusdispersioiden välillä

Metallipitoisuus ja tähtien nopeudet

Tähtien ikien, nopeusdispersioiden ja metallipitoisuuksien välillä on selvä korrelaatio.

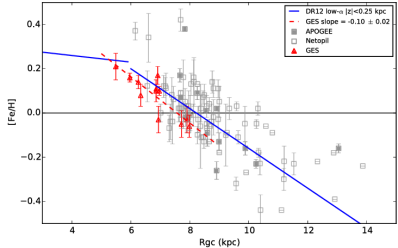
Nuorimmilla tähdillä on suurimmat metallipitoisuudet ja pienimmät nopeusdispersiot, koska ne ovat syntyneet kiekon keskitason tiheästä ja metallipitoisesta kaasusta.

Kuvat: Delgado Mena et al. 2019 (ylempi); Hayden et al. 2017 (alempi, $[Mg/Fe] \propto [Fe/H]^{-1}$)



Metallipitoisuus ja tähtien etäisyydet Linnunradan keskuksesta

Tähtien metallipitoisuus pienenee keskimäärin etäisyyden funktiona Linnunradan keskuksesta. Kuva: Jacobson et al. 2016, Gaia-ESO survey



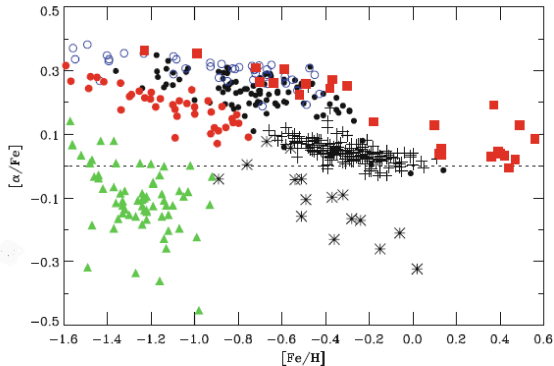
Suurimmat metallipitoisuudet ytimessä ja pienimmät galaksin ulko-osissa, mutta hajonta on melko suurta.

Vastaavia havaintotuloksia myös muissa galakseissa.

Suurempi metallipitoisuus keskusalueella johtuu todennäköisesti suuresta tähtitiheydestä ja syvästä painovoimapotentiaalikuopasta

$[\alpha/\text{Fe}]$ vs. $[\text{Fe}/\text{H}]$ eri tähtipopulaatioille

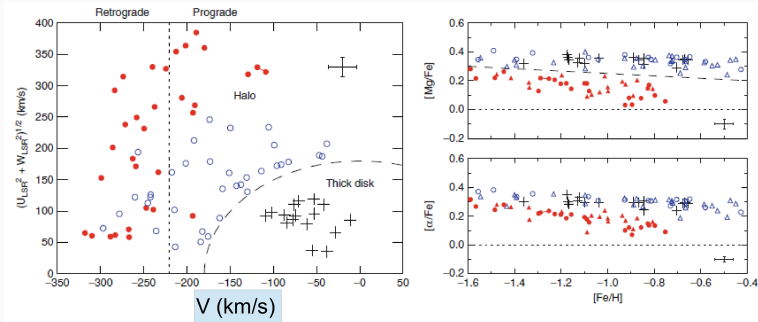
- + ohut kiekko
- paksu kiekko
- keskuspullistuma
- halo - korkea $[\alpha/\text{Fe}]$
- halo - matala $[\alpha/\text{Fe}]$
- * Sagittariuksen kääpiögalaksi
- ▲ Sculptorin kääpiögalaksi



Kuva: P.E. Nissen

Sagittariuksen kääpiögalaksi on sulautumassa Linnunrataan (Ibata et al. 1994). Erittäin matala $[\alpha/\text{Fe}]$ kääpiögalakseissa kertoo hitaasta tähtien synnystä, jolloin tyypin Ia supernovat hallitsevat raudan tuotantoa

Metalliköyhät tähdet Auringon lähiympäristössä



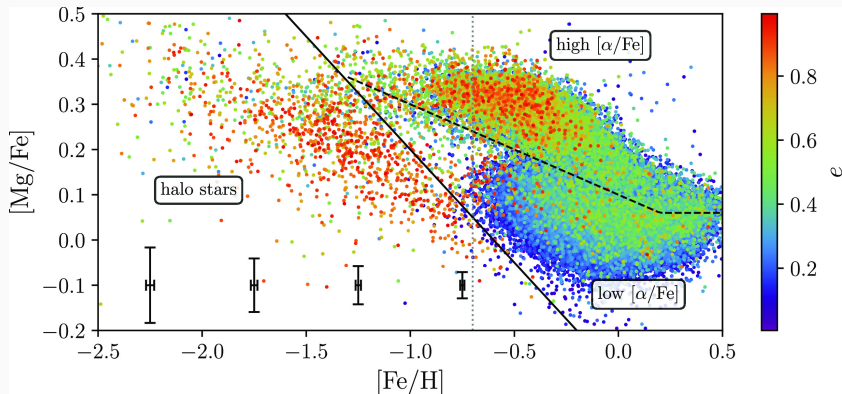
Vasemmalla ns. Toomre-diagrammi (U, V, W : galaktiset nopeuskomponentit). Kahtiajako $[\alpha/Fe]$ arvoissa (oikealla) korreloi tähtien kinematiikan kanssa. Tähdet, joille $[\alpha/Fe] < 0.3$ kiertävät enimmäkseen samaan suuntaan kuin aurinko ja ovat todennäköisesti syntyneet Linnunradan kiekossa.

+ paksu kiekko, \circ halo - korkea $[\alpha/Fe]$, \bullet halo - matala $[\alpha/Fe]$

Nissen & Schuster (2010), Kuva: Frebel & Norns

Rautapitoisuus ja radan eksentrisyys

Mackereth et al. 2019, MNRAS 482,3426: eksentrisyys osoitettu väreillä



Linnunradan halon,
keskuspullistuman ja kiekon synty



Linnunradan näkyvä halo koostuu yksittäisistä tähdistä ja n. 150 pallomaisesta tähtijoukosta, jotka ovat jakautuneet symmetrisesti keskustan ja kiekon ympärille.

Halon tähtien yhteenlaskettu massa on 1% luokkaa Linnunradan tähtien massasta

Tähdet ovat enimmäkseen vanhoja (> 12 miljardia vuotta), ja niillä on matalat rautapitoisuudet

Tähdet on ovat eksentrisillä radoilla, ja n. 40% niistä kiertää vastakkaiseen suuntaan kuin kiekko



Aluksi nämä havainnot selitettiin jättiläismäisen alkupilven romahduksella. Tämän mallin mukaan rautapitoisuuden pitäisi vähentyä systemaattisesti Linnunradan keskuksesta lasketun etäisyyden funktiona.

Halotähtien rautapitoisuuden vaihtelut ja tähtivirrat ovat kuitenkin osoittaneet, että halossa on eri-ikäisiä tähtiä ja että Linnunrataan putoaa intergalaktisia pilviä ja kääpiögalakseja



Linnunradan keskuspullistuma on litistynyt pyörivä rakenne, jonka tähtien metallipitoisuudet vaihtelevat melko paljon ($-1 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.5$)

Suurin osa tähdistä on vanhoja ($> 10^9$ v), mutta joukossa on myös nuoria tähtiä, joka saa aikaan sinisen yleisvärin.

Tähtitiheys laskee eksponentiaalisesti ulospäin, kokonaismassa on luokkaa $10^{10} M_{\odot}$, noin 10 – 20% kiekon massasta



Linnunradan keskuspullistuma eroaa monista spiraaligalakseista, joilla se muistuttaa pienoiskokoista ellipsigalaksia, ja on seurausta galaksien yhteensulautumisesta.

Linnunradan keskuspullistuman synnyssä (kääpiö)galaksien törmäykset eivät luultavasti olleet määrääviä.

Pullistuman vanhat tähdet ovat mahdollisesti syntyneet varhaisessa kiekossa sijainneiden massiivisten kaasupilvien luhistuessa ja fragmentoituaessa. Dynaamisen kitkan takia pilven ovat menettäneet liike-energiansa ja vajonneet kohti Linnunradan keskustaa.



Syy nuorien tähtien esiintymiseen voi olla Linnunradan sauvassa tapahtuva liike sisäänpäin. Impulssimomentin säilymisen takia sisäänvirtaavat tähdet ajautuvat keskuspullistumaan.

Keskuspullistuman maapähkinämäinen muoto tukee oletusta, että sauva ohjaa tähtiä paksusta ja ohuesta kiekosta keskuspullitumaan (Fragkoudi et al. 2017, A&A 607,L4)

Ohuen ja paksun kiekon synty I

Paksu kiekko pyörii hitaamin kuin ohut kiekko, mutta kuitenkin samaan suuntaan ja tähdet liikkuvat lähes ympyränmuotoisilla radoilla.

Paksun kiekon tähdet eivät ainakaan kokonaan ole peräisin Linnunrataan pudonneista kääpiögalakseista, jolloin radat olisivat eksentrisiä ja kiertosuunnassa esiintyisi vaihtelua.

Paksu kiekko voi peräisin varhaisesta ohuesta kiekosta, joka on häiriintynyt kääpiögalaksien törmäysten takia (?)

Paksu kiekko on syntynyt ennen ohuen kiekon syntyä kun Linnunradan tasossa oli paljon turbulenttista kaasua (?)

Paksun kiekon tähdet ovat vaeltaneet nykyisille paikoilleen Linnunradan eri osista (?)

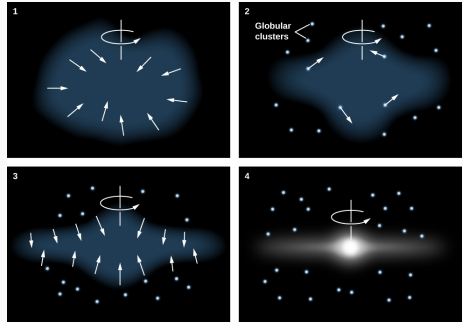
Liikemäärämomentin vaihto tähtien välillä on tehokasta spiraalihaaran co-rotation säteen ympäristössä. Saadessaan tai menettäessään liikemäärämomenttia tähti liikkuu ulos- tai sisäänpäin.

Pitkän ajan kuluessa tiheysaaltojen kulmanopeus muuttuu, ja myös co-rotation säteet muuttuvat. Näin spiraalihaarat hämmentävät tähtipopulaatiota laajalla alueella.

Linnunradan syntyteorioita.
Linnunradan tulevaisuus.

Linnunradan syntyteorioita - Monoliittinen romahdus I

Monoliittisessa romahdusteoriassa Linnunrata syntyi suuresta yhtenäisestä kaasupilvestä romahtamalla. Aluksi tässä pilvessä oli hyvin vähän metalleja ja se oli lähes vapaassa pudotuksessa.



Pallomaiset tähtijoukot ja halotähdet syntyivät ensin ja siksi niillä on hyvin pienet metallipitoisuudet ja ne liikkuvat pitkulaisilla radoilla.

Monoliittinen romahdus II

Supernovaräjähdykset lisäsivät romahtavan kaasupilven metallipitoisuutta, ja se puristui kasaan tekijällä 10

Pyörimisen ansiosta romahtavasta pilvestä kehittyi pyörivä kiekko ja tähtien synty kaasukiekossa pääsi vauhtiin, josta myöhemmin kehittyi Linnunradan kiekko.

Tämä yksinkertainen malli sopii joihinkin havaintoihin, esim. se selittää miksi melkein kaikki pallomaiset tähtijoukot ovat hyvin vanhoja ja miksi ne kiertävät hyvin elliptisillä radoilla.

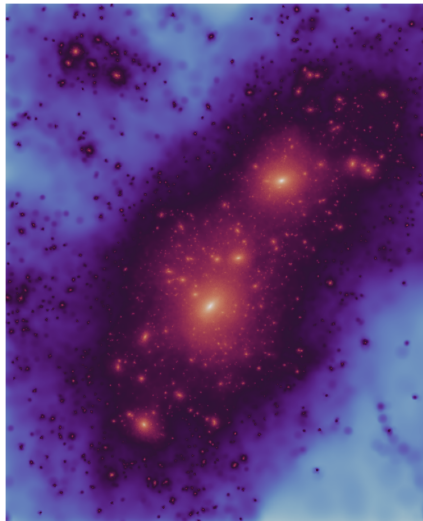
Mutta tämä malli ei ole sopusoinnussa nykyisin vallitsevan [kylmän pimeän aineen](#) mallin kanssa, jonka mukaan suuret galaksit syntyvät pienempien galaksien törmäyksissä.

Hierarkkinen malli I

Hierarkkisessa mallissa Linnunrata syntyi monen pienemmän galaksin yhteensulautumisessa.

Tämä malli on sopii yhteen pimeän kylmän aineen mallin kanssa, jonka mukaan maailmankaikkeuden ensimmäiset galaksit olivat luokkaa $\sim 10^7 M_{\odot}$ ja kaikki suuremmat galaksit ovat syntyneet pienempien galaksien törmäyksissä.

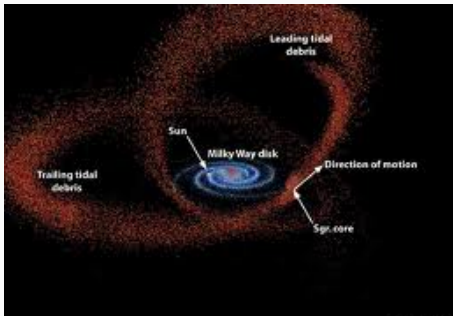
Kuva: Kosmologisen simulaation tuottama paikallisen galaksiryhmän kaltainen galaksiryhmä, jota hallitsevat Linnunradan ja Andromedan analogiat. Kuvassa vain pimeä aine. Till Sawala: Sibelius-projekti



Hierarkkinen malli II

Linnunrata on myös parhaillaan törmäämässä Sagittariuksen kääpiögalaksin kanssa, joka tulee lopulta sulautumaan Linnunrataan.

Linnunradassa on muitakin merkkejä muinaisista törmäyksistä, esim. osa pallomaisista tähtijoukosta on nuorempia ja ne ovat ehkä syntyneet törmäyksissä, lisäksi jotkin pallomaiset joukot voivat olla muinaisten kääpiögalaksien ytimiä (esim. ω Cen).



Törmäävät kääpiögalaksit jättävät jälkeensä tähtivanoja galaksin ulko-osiin, joita voidaan havaita.

Paikallisen galaksiryhmän simulaatio

Seuraavassatuloksia kosmologisesta hydrodynaamisesta simulaatiosta, jossa syntynyt galaksiryhmä muistuttaa paikallista ryhmää (Till Sawala et al. 2016, MNRAS 457, 1931).

APOSTLE simulaatio - pimeä aine (painovoima) + baryoniset prosessit (törmäykset kaasussa, säteilyn ja aineen vuorovaikutus, painovoima)

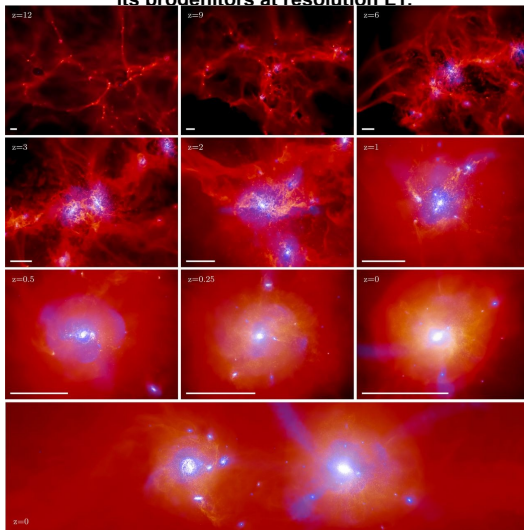
Suuren skaalan Λ CDM-simulaatiosta on valittu bokseja, jotka muistuttavat paikallisen ryhmän alkuehtoja.

Ryhmään muodostuu kaksi massiivista galaksia (Linnunrata ja Andromeda) ja joukko kääpiögalakseja, joiden jakauma, kinematiikka, ja tähtimassat muistuttavat lähiympäristömme galakseja.

Eryteisesti toisen massiivisen galaksin 11 kirkkainta satelliittia (ympyröity) vastaavat Linnunradan ns. klassisia satelliitteja-

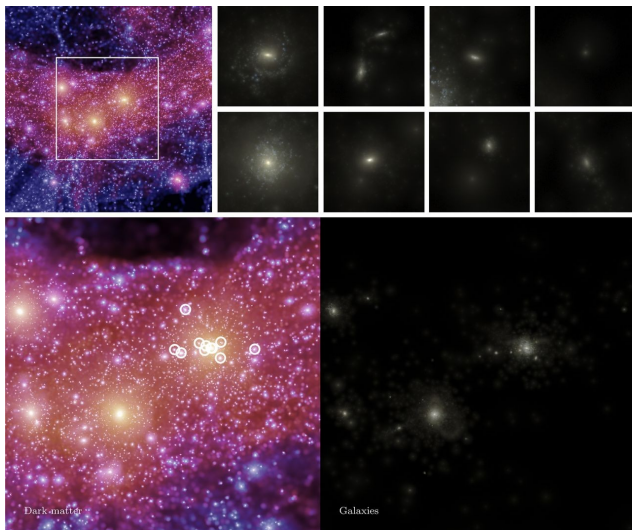
Huomaa ero pimeän aineen rakenteen ja tähtien jakauman välillä (toinen kuva).

Top three rows: evolution of gas density (red colours) and stellar density (blue colours) in a comoving volume of side length $150 \times 200 h^{-1}$ kpc, centred on one of the main LG galaxies and its progenitors at resolution L1.



Till Sawala et al. MNRAS 2016;457:1931-1943

Top left: projected dark matter density in one of our re-simulations at resolution level L2 in a cube of side length 4 Mpc.



Till Sawala et al. MNRAS 2016;457:1931-1943

Hierarkkisessa törmäysteoriassa on myös ongelmia.

Törmäyksiä ei voi olla liian paljon ja liian usein, koska ne aiheuttaisivat suuria häiriöitä Linnunradan kiekkoon, joka on hyvin ohut ja häiriintyy helposti.

Linnunradan paksumpi kiekko on todennäköisesti törmäysten häiritsemä.

Ohutta kiekkoa stabiloi tähtienvälinen kaasu, joka sisäisten törmäystensä takia asettuu aina lähelle keskitasoa.

Nuoret tähdet syntyvät ohuessa kiekossa ja siroavat sen jälkeen suuremmille z -korkeuksille.

Keskuspullistuman synty on epäselvä, mutta ehkä pullistuma syntyi muinaisessa suuremmassa törmäyksessä, jossa myös törmäävässä galaksissa oli paljon kaasua.

Näin saatiin suuri tähtitiheys keskusta, jonka metallipitoisuus myös kasvoi, koska suuren gravitaatiopotentiaalin ansiosta supernovien metallit eivät voineet karata.

Linnunradan tulevaisuus

Kaasun määrä Linnunradassa pienenee hitaasti ja tämän takia nuorten tähtien suhteellinen lukumäärä pienenee. Samalla Linnunrata vanhenee ja punertuu.

Andromeda lähestyy Linnunrataa nopeudella 110 km s^{-1} ja noin 4.5 miljardin vuoden kuluttua kaksi suurta spiraaligalaksia sulautuvat yhteen, muodostaen todennäköisesti suuren ellipsigalaksin.



Aurinko on tuolloin kuolemaisillaan ja sinkoutuneen syntyneen ellipsigalaksin ulko-osiin

Mitä opimme?

α -alkuaineet syntyvät pääasiassa II-tyyppin supernovissa nopeasti ($t \sim 10$ miljoona vuotta), kun taas rautapiikin alkuaineet syntyvät tyyppin Ia supernovissa noin miljardin vuoden aikaskaalalla.

Vanhoilla tähdillä on korkea $[\alpha/\text{Fe}]$ -suhde ja pieni rautapitoisuus $[\text{Fe}/\text{H}]$. Niillä on pitkulaisemmat radat ja suuremmat nopeusdispersiot kuin nuorilla tähdillä.

Linnunradan rakenteessa ja tähtipopulaatioissa on merkkejä sekä monoliittisesta että hierarkkisesta synnystä.

Tiedämme, että Linnunrataan sulautuu kääpiögalakseja, ja tämä sopii kylmän pimeän aineen kosmologiseen malliin. Toisaalta kiekon stabiilisuus kärsisi liian taajoista ja voimakkaista törmäyksistä.