



Galaksit ja kosmologia

FYS2052, 5 op, syksy 2021

E207 Physicum

**Luento 10: Paikallinen galaksiryhmä,
13/11/2023**



Tällä luennolla käsitellään

1. Paikallisen galaksijoukon yleisrakenne.
2. Linnunradan satelliittigalaksit, Suuri ja Pieni Magellanin pilvi, sekä kääpiösferoidaalit.
3. Vuorovesivoimat ja satelliittigalaksien radat.
4. Paikallisen galaksijoukon muut jäsenet, Andromedan galaksi (M31) ja M33, sekä kääpiögalaksit.
5. Galaksien kemiallinen evoluutio.
6. Vastaa soveltuvin osin: **S&G**: luvut 4.1-4.5



10.1 Paikallisen galaksiryhmän yleisilme

- Paikallinen galaksiryhmä koostuu ainakin 80 galaksista, jotka sijaitsevat noin $\approx 2\text{-}3$ Mpc kokoisella alueella.
- Suurimmat galaksit ovat Andromeda (M31), Linnunrata ja M33. Loput galaksit ovat kääpiögalakseja (epäsäännöllisiä ja kääpiösferoidaaleja)
- Paikallisen joukon massa on riittävän suuri, niin että galaksit pysyvät sidottuina joukon painovoimakentässä.

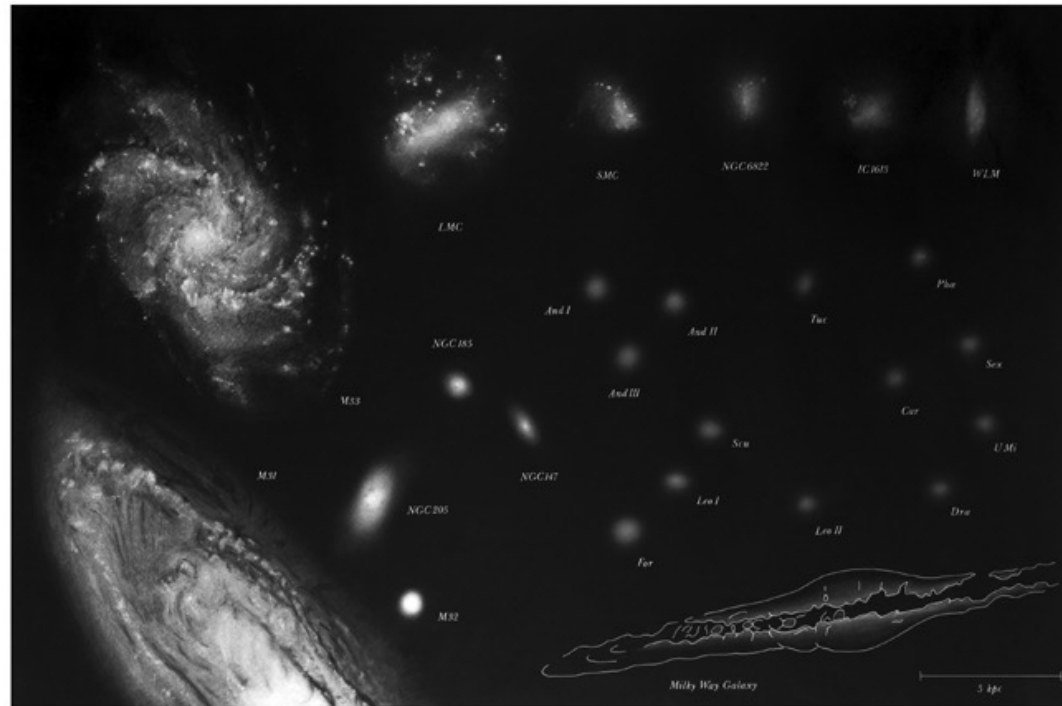


Fig 4.1 (B. Binggeli) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Paikallisen galaksiryhmän jäseniä

- M31 on joukon kirkkain galaksi (noin ~50% kirkkaampi kuin Linnun-rata). M33:n kirkkaus on noin kolmannes Linnunradan kirkkaudesta.
- Yhdessä nämä kolme galaksia vastaavat noin 90%:sta koko paikallisen ryhmän valovoimasta.
- Suuri Magellanin pilvi (LMC) on vielä suhteellisen kirkas epäsäännölliseksi galaksiksi. Kaikki muut galaksit ovat verrattain himmeitä kääpiögalakseja.

<i>Galaxy</i>	<i>Type</i>	<i>d</i> (kpc)	<i>L_V</i> (10 ⁷ L _⊙)	<i>V_r(⊙)</i> (km s ⁻¹)	<i>l</i> (deg)	<i>b</i> (deg)	<i>M</i> (HI) (10 ⁶ M _⊙)
<i>M31</i> (NGC 224)	Sb	770	2700	-300	121	-22	5700
Milky Way	Sbc	8	1500	-10	0	0	4000
<i>M33</i> (NGC 598)	Sc	850	550	-183	134	-31	1500
Large MC	SBm	50	200	274	280	-33	500
Small MC	Irr	63	55	148	303	-44	400
<i>NGC 205</i>	dE	830	40	-244	121	-21	0.4
<i>M32</i> (NGC 221)	E2	770	40	-205	121	-22	<2.5 ^c
<i>NGC 6822</i>	dIrr	500	10	-56	25	-18	140 ^c
<i>IC 10</i>	dIrr	660	16	-344	119	-3	100
<i>NGC 185</i>	dE	620	13	-202	121	-15	0.1
<i>NGC 147</i>	dE	760	12	-193	120	-14	None
Sagittarius	dSph	30	8	170	6	-14	None
<i>IC 1613</i> (DDO 8)	dIrr	715	6	-233	130	-61	60
<i>WLM</i> (DDO 221)	dIrr	950	5	-120	76	-74	60
<i>Pegasus</i> (DDO 216)	dIrr/dSph	760	1	-182	95	-44	3
Fornax	dSph	140	1.5	53	237	-66	<0.7
<i>Sagittarius DIG</i>	dIrr	1050	0.7	-78	21	-16	9
<i>And I</i>	dSph	790	0.5	-380	122	-25	None
Leo I (DDO 74)	dSph	270	0.5	285	226	49	None
<i>And VII/Cas dSph</i>	dSph	760	0.5	-307	110	-10	
<i>Leo A</i> (DDO 69)	dIrr	800	0.4	20	197	52	8
<i>And VI/Peg dSph</i>	dSph	775	0.3	-354	106	-36	
<i>And II</i>	dSph	680	0.2	-188	129	-29	
Sculptor	dSph	88	0.2	107	288	-83	≤0.1 ^c
<i>LGS3</i> (Pisces)	dIrr/dSph	620	0.13	-286	127	-41	0.2
<i>Aquarius</i> (DDO 210)	dIrr/dSph	950	0.1	-137	34	-31	3
<i>And III</i>	dSph	760	0.1	-355	119	-26	None
<i>Phoenix</i>	dIrr/dSph	405	0.09	56	272	-69	~0.2
<i>Cetus</i>	dSph	775	0.09		101	-73	
Leo II (DDO 93)	dSph	205	0.06	76	220	67	None
<i>Tucana</i>	dSph	870	0.06		323	-47	None
Sextans	dSph	85	0.05	225	244	42	None
Draco (DDO 216)	dSph	80	0.05	-293	86	35	None
Carina	dSph	95	0.04	223	260	-22	None
<i>And V</i>	dSph	810	0.04	-403	126	-15	
Ursa Minor	dSph	70	0.03	-247	105	45	None
<i>And IX</i>	dSph	790	0.02	-210	123	-20	
Ursa Major	dSph	~100	0.004	-52	160	54	

Linnunradan satelliitit on **lihavoitu** taulukossa.



Galaksien sijainnit paikallisessa ryhmässä

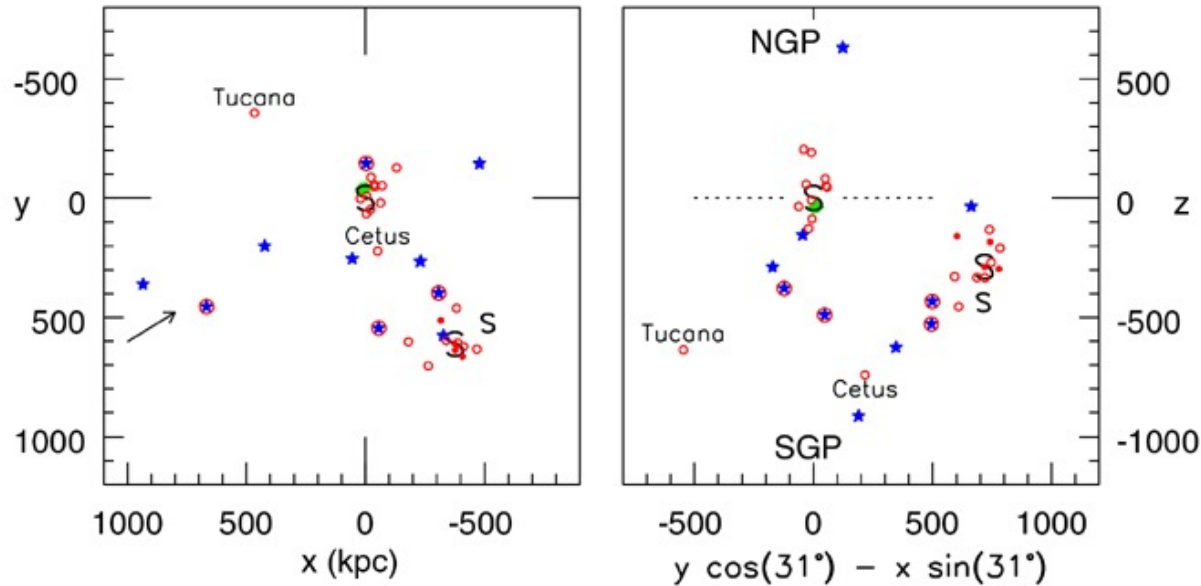


Fig 4.2 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

- Galaksit eivät sijaitse satunnaisissa paikoissa ryhmän sisällä. Suurin osa kääpiögalakseista löytyvät Linnunradan ja M31 läheltä ja ne sijaitsevat suurin piirtein samassa tasossa. Lisäksi on jonkin verran erillään olevia kääpiögalakseja, esim. kuvassa Tucana-galaksi.
- Tähdet ovat epäsäännöllisiä galakseja ja ympärät kääpiösferoideaaleja.



10.2 Linnunradan satelliitit

- Selvästi tunnetuimmat ja kirkkaimmat Linnunradan seuralaisgalakseista ovat Magellanin pilvet, jotka ovat epäsäännöllisiä kääpiögalakseja, joissa on paljon kaasua, tähtiensyntyalueita ja nuoria tähtiä.
- Linnunradan kääpiösferoidaalit (dSph) ovat erittäin diffuuseja ja himmeitä. Niissä ei ole käytännössä ollenkaan kaasua ja ne koostuvat melko vanhoista ja hyvin vanhoista tähdistä. Osa näistä galakseista saattaa olla hajoamassa Linnunradan painovoimakentässä.

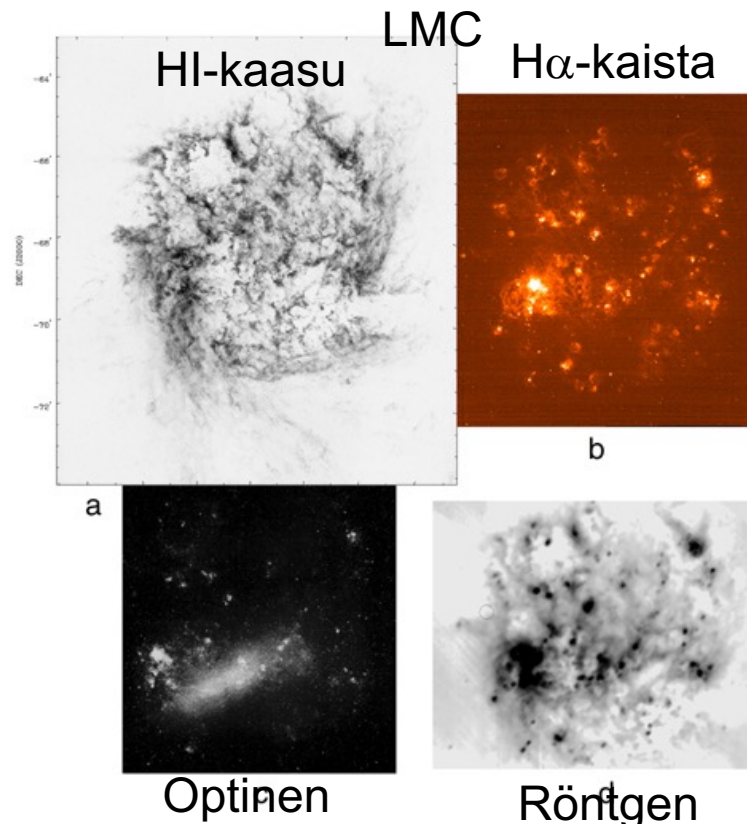
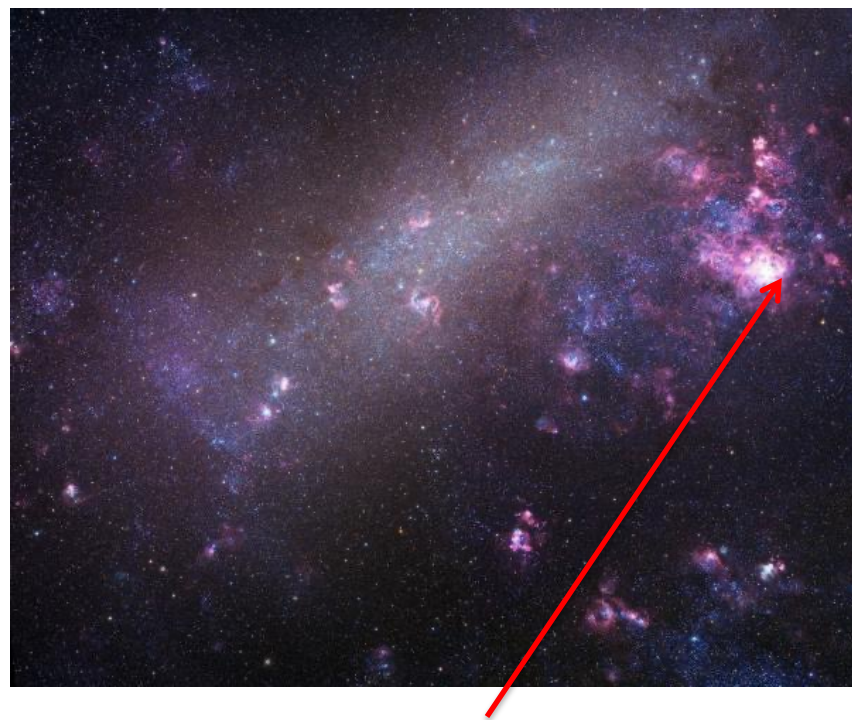


Fig 4.4 (Kim & Staveley-Smith, Henize, IRAS)
'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Suuri Magellanin pilvi (LMC)

- Suuri Magellanin pilvi peittää noin $15^\circ \times 13^\circ$ asteen alueen taivaalla ja sen pisin akseli on noin 14 kpc. LMC:n kirkkaus on noin 10% Linnunradan kirkkaudesta.
- Galaksissa on selvä sauvarakenne ja vain yksi pieni spiraalihaara. Se on kirkas UV-alueella, siinä on hyvin paljon nuoria tähtiä ja kaasun rakenteessa on supernovien aiheuttamia onkaloita.
- LMC:llä ei ole juurikaan 4-10 Gyr vuoden ikäisiä tähtiä, mutta jonkun verran vanhoja pallomaisia joukkoja ja paljon hyvin nuoria tähtiä.



Tarantula-sumu, hyvin aktiivinen tähtien-syntyalue, jonka liepeillä räjähti modernin historian kirkkain supernova, SN1987A.



Magellanin virta (Magellanic stream)

- Magellanin pilvet kiertävät toisiaan ja Linnunrataa. Magellanin pilvet ovat yhteydessä toisiinsa kaasusillan (neutraalia vetyä) kautta ja tämä niin kutsuttu Magellanin virta kiertää noin kolmasosan matkan koko taivaan poikki.
- Magellanin pilvet liikkuvat todennäköisesti melko eksentrisillä radoilla Linnunradan ympäri (periodi noin 2 Gyr) ja niiden lähin ohitus Linnunradan ohi oli arvioltaan noin 200-400 miljoonaa vuotta sitten.

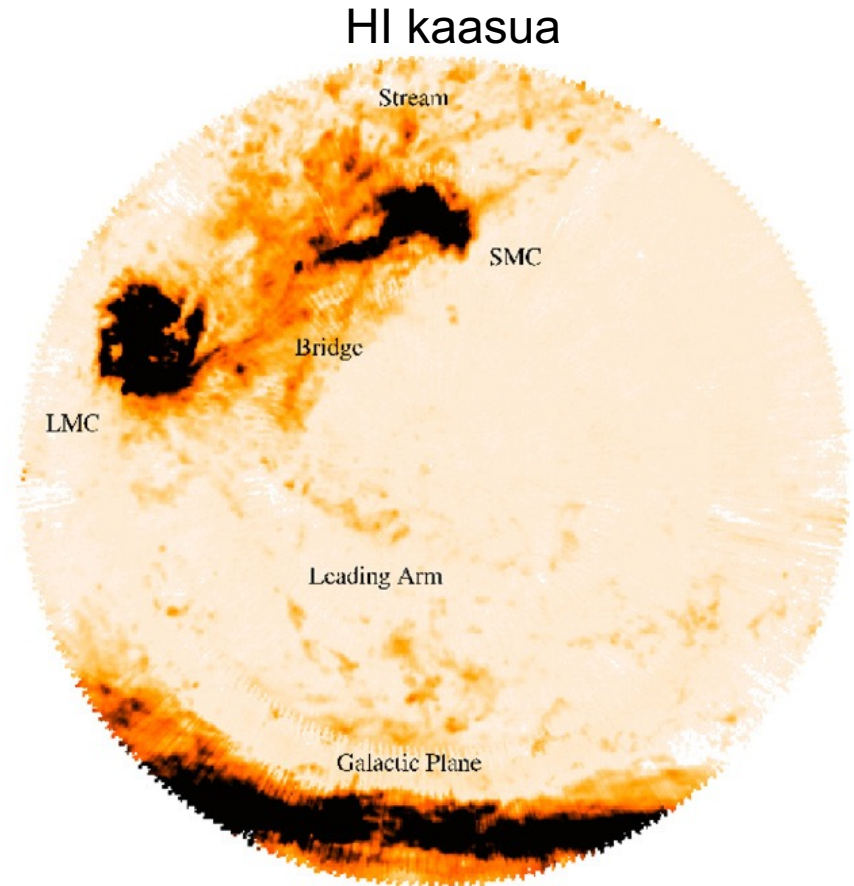
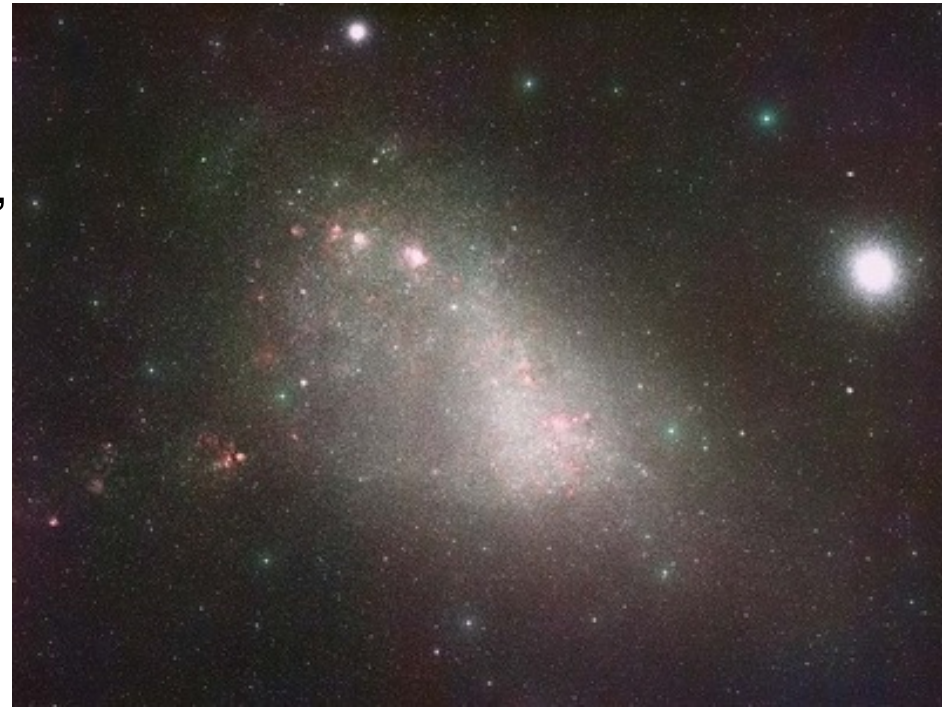


Fig 4.6 (Putman/Nature) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Pieni Magellanin pilvi (SMC)

- Pieni Magellanin pilvi peittää noin $7^\circ \times 4^\circ$ asteen alueen taivaalla ja sen pisin akseli on noin 8 kpc.
- SMC on muodoltaan pitkulainen 'sikari' ja näemme sen päältä päin, sen tähdillä ei ole havaittavaa säännöllistä pyörimisliikettä.
- SMC on noin 5 kertaa LMC:tä himmeämpi. Galaksien välinen etäisyys on nyt 20 kpc ja se on ollut lähimmillään ehkä vain 10 kpc. SMC saattaa olla hajoamassa johtuen vuorovesivoimista, jotka aiheuttavat yhdessä LMC ja Linnunrata.



SMC:ssä suurin osa tähdistä ovat iältään 2-12 Gyr, metallipitoisuus on noin 10% Linnunradan arvosta.



Linnunradan kääpiösferoidaalit

- Linnunradalla on useita kymmeniä (lisää löytyy koko ajan) kääpiösferoidaali-seuralaisia.
- Kääpiösferoidaalien pintakirkkaus on noin sadasosa Magellanin pilvistä ja niissä ei ole lainkaan kaasua ja nuoria tähtiä ($t < 2$ Gyr).
- Kääpiösferoidaalit ovat oikeita galakseja, koska kaikki tähdet eivät ole syntyneet samanaikaisesti (vertaa tähtijoukkoihin) ja niissä on suhteessa myös hyvin paljon pimeää ainetta.

Fornax kääpiösferoidaali



Fig 4.8 (D. Malin) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Kääpiösferoidaaleissa voi olla hyvinkin korkea $M/L \approx 100-300$. Metallipitoisuus on erittäin pieni, tyypillisesti $< 1/30$ Linnunradan arvosta.



10.3 Satelliitit ja vuorovesivoimat

- Pieni kääpiögalaksi kiertää suuremman galaksin painovoimakentässä. Kääpiögalaksin tähtiin vaikuttaa muuttuva potentiaali ja energia ei enää säily. Kuuluisa kolmen-kappaleen ongelma, yleiset ratkaisut ovat kaoottisia, mutta kun oletetaan, että kääpiö kiertää ympyrärataa voimme laskea efektiivisen potentiaalin.
- Lasketaan likeyhtälö pyörivässä koordinaatistossa:

$$\mathbf{v}' = \frac{d\mathbf{x}'}{dt'} = \mathbf{v} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}$$

$$\frac{d\mathbf{v}'}{dt'} = \frac{d\mathbf{v}'}{dt} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}' = \frac{d\mathbf{v}}{dt} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}'$$

$$= -\nabla\Phi - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}' - \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x})$$

Coriolis-voima

Keskipakois-voima



Vuorovesivoimat I

- Otetaan sitten pistetulo \mathbf{v}' ja yhtälön välillä (huom. $\mathbf{v}' \cdot (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}') = 0$)

$$-\mathbf{v}' \cdot \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}) = \Omega^2 (\mathbf{x} \cdot \mathbf{v}') - (\mathbf{v}' \cdot \boldsymbol{\Omega})(\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{x}) = \frac{1}{2} \frac{d}{dt'} [(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x})^2]$$

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt'} [\mathbf{v}'^2 - (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}')^2] = -\mathbf{v}' \cdot \nabla \Phi(\mathbf{x}') \quad \text{Viimeinen termi}$$

- Valitaan pyörimisnopeus Ω , niin että se seuraa satelliittia radalla, tällöin potentiaali Φ ei riipu ajasta: $d\Phi/dt' = -\mathbf{v}' \cdot \nabla \Phi$.

$$E_J = \frac{1}{2} \mathbf{v}'^2 + \Phi_{\text{eff}}(\mathbf{x}') \quad \Phi_{\text{eff}}(\mathbf{x}') = \Phi(\mathbf{x}') - \frac{1}{2} (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}')^2$$

- Mallinnetaan sitten satelliittia m ja päägalaksia M : Niiden välinen etäisyys on D ja ne kiertävät yhteisen painopisteen C ympäri kulmanopeudella Ω .



Vuorovesivoimat II

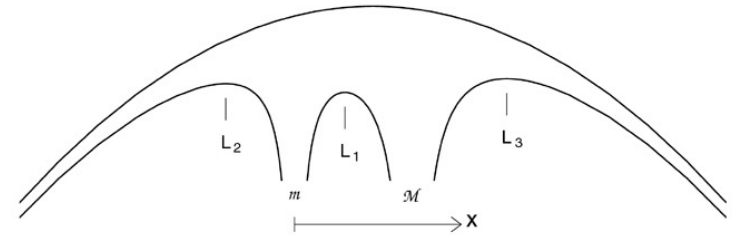


Fig 4.10 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

- Painopiste $x = DM/(M+m)$ ja efektiivinen potentiaali:

$$\Phi_{\text{eff}}(\mathbf{x}) = -\frac{GM}{|D-x|} - \frac{Gm}{|x|} - \frac{\Omega^2}{2} \left(x - \frac{DM}{M+m} \right)^2$$

- Tämän efektiivisen potentiaalin kolme ensimmäistä Lagrangen pistettä saadaan derivoimalla:

$$0 = \frac{\partial \Phi_{\text{eff}}}{\partial x} = -\frac{GM}{(D-x)^2} \pm \frac{Gm}{x^2} - \Omega^2 \left(x - \frac{DM}{M+m} \right)$$

- Kiihtyvyys satelliitille m kun se kiertää yhteistä painopistettä on:

$$\Omega^2 \frac{DM}{M+m} = \frac{GM}{D^2} \Rightarrow \Omega^2 = \frac{G(M+m)}{D^3}$$



Vuorovesivoimat III

- Kun satelliitin massa on paljon pienempi kuin emogalaksin, Lagrangen pisteet ovat lähellä satelliittia m ja ensimmäinen termi voidaan kehittää sarjaksi (otetaan sarjassa huomioon vain kaksi ensimmäistä termiä).

$$0 \approx -\frac{GM}{D^2} - 2\frac{GM}{D^3}x \pm \frac{Gm}{x^2} - \frac{G(M+m)}{D^3} \left(x - \frac{DM}{M+m} \right)$$

- Tästä voidaan lopulta ratkaista Jacobi-säde:

$$x = \pm r_J, \quad r_J = D \left[\frac{m}{3M+m} \right]^{1/3}$$

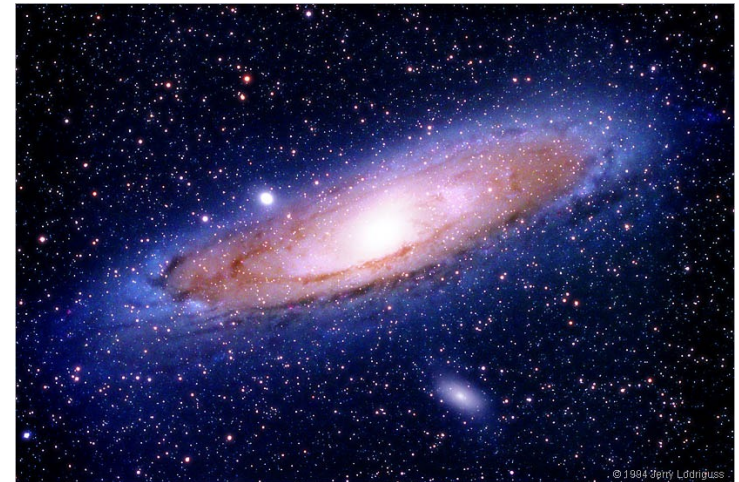
- Muistisääntö: Satelliitti voi pitää tähdet, joiden kiertoaika sen ympärillä on pienempi, kuin satelliitin oma kiertoaika päägalaksin ympärillä. Ulompana olevat tähdet katoavat sen painovoimakentän piiristä.



10.4 Paikallisen ryhmän muut galaksit

- Linnunradan lisäksi paikallisesta galaksiryhmästä löytyy kaksi kirkasta ja suurta spiraaligalaksia: Andromeda-galaksi (M31) ja Kolmion galaksi (M33).
- Andromeda-galaksilla on myös suuri joukko himmeitä seuralaisgalakseja ja kaksi lähellä olevaa kirkasta kääpiöellipsiä (M32 ja M110).
- Lisäksi muutama epäsäännöllinen galaksi ja kääpiösferoidaali on erillään kolmesta päägalaksista.

M31



M33





Andromedan galaksi (M31)

- Kirkas ja suuri spiraaligalaksi ($h_R \approx 6-7$ kpc), $V(R) \approx 260$ kms⁻¹, M31:llä on ≈ 300 pallomaista tähtijoukkoa ja lukuisia seuralaisgalakseja.
- Galaksia kiertää noin 10 kpc päässä sen ytimeistä 'tulirengas', jossa on paljon nuoria tähtiä. Galaksissa on noin 50% enemmän neutraalia kaasua (HI), mutta tähtien syntynopeus on jonkin verran hitaampaa kuin Linnunradassa.

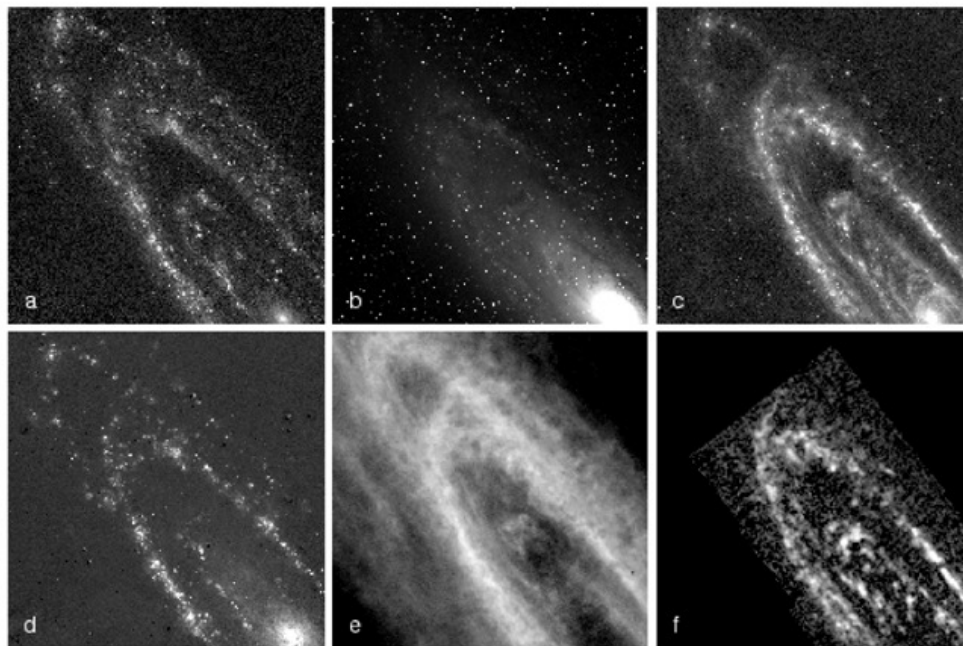


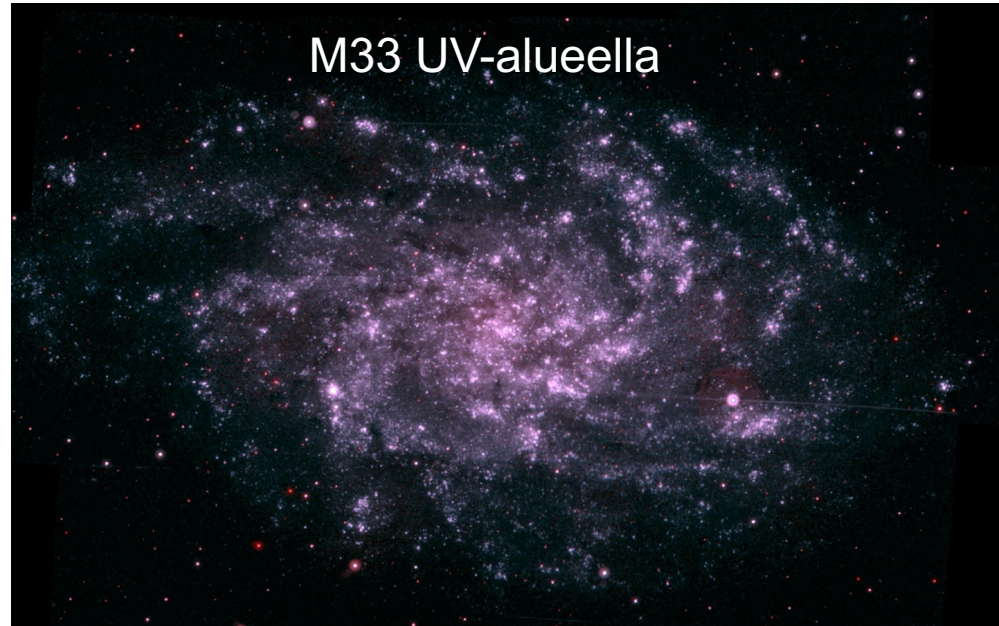
Fig 4.11 (K. Gordon) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Tyypiltään Andromeda on Sab, eli varsin massiivinen spiraaligalaksi, jolta löytyy ytimeistä supermassiivinen musta aukko.



Kolmion galaksi (M33)

- M33 on Linnunrataa pienempi, ($h_R \approx 1.7$ kpc), $V(R) \approx 120$ kms⁻¹. Galaksissa on suhteessa paljon kaasua ja HI-kaasu levittäytyy hyvin laajalle alueelle.
- H α - ja UV-alueen kuvista nähdään, että galaksi rakentuu monimutkaisista kaari- ja kuorimaisista rakenteista, jotka ovat voimakkaiden supernova räjähdysten aikaansaamia.



Tyypiltään M33 on Scd, myöhäisen tyypin spiraaligalaksi. Keskuspullistuma on hyvin pieni (olematon) ja supermassiivista mustaa aukkoa ei ole ainakaan toistaiseksi havaittu.



Kääpiöellipsit ja kääpiösferoidaalit

- M32 on kirkkain kääpiöellipsi ja hyvin tiivis, ehkä kyseessä on suuremman galaksin ydin. Sen lähellä oleva M110 on heikkovaloisempi ja se on selvästi vuorovaikutuksessa Andromedan kanssa.
- Kääpiösferoidaaleilla on hyvin pieni pintakirkkaus, ne ovat melkein 'epäonnistuneita galakseja', jossa ei ole juurikaan tähtiä ja ne ovat alttiita vuorovesivoimille ja saattavat täten hajota.

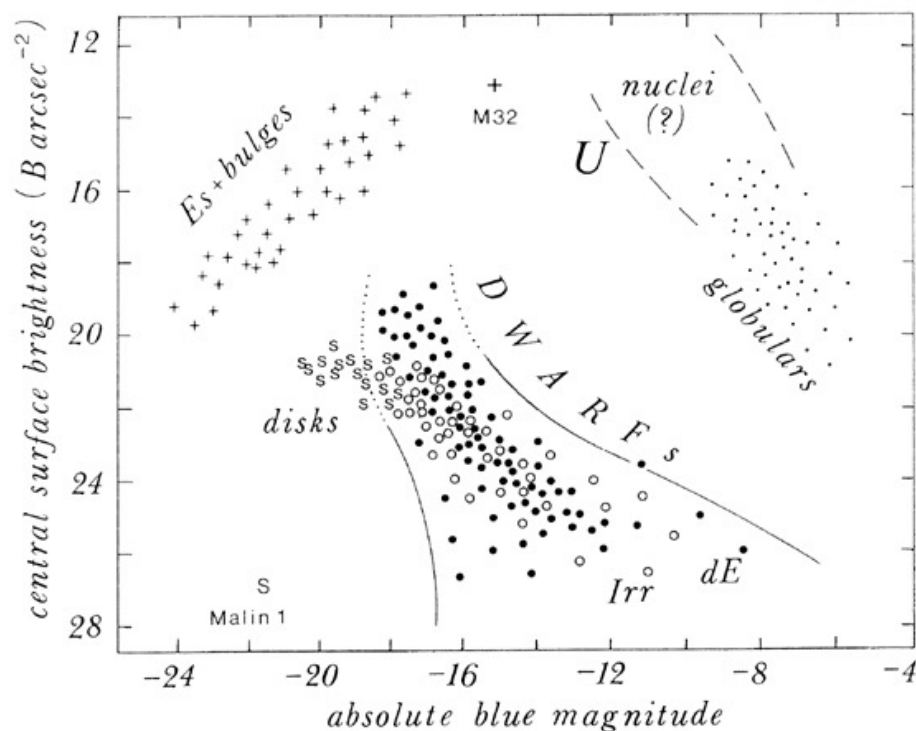


Fig 4.18 (B. Binggeli) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Epäsäännölliset kääpiögalaksit

- Epäsäännöllisillä kääpiögalakseilla on pieni pintakirkkaus, joten kirkkaat, nuoret tähdet erottuvat hyvin.
- Tyypillisesti nopeusdispersio on noin $\sigma \approx 6-10$ km/s ja $V/\sigma \approx 4-5$, säännöllisen liikkeen merkitys spiraali- ja ellipsigalaksien välimaastossa.
- Mahdollisesti pienet galaksit ovat ensin epäsäännöllisiä galakseja ja kun kaasu loppuu niistä tulee kääpiösferoideaaleja?

IC 10: Epäsäännöllinen galaksi

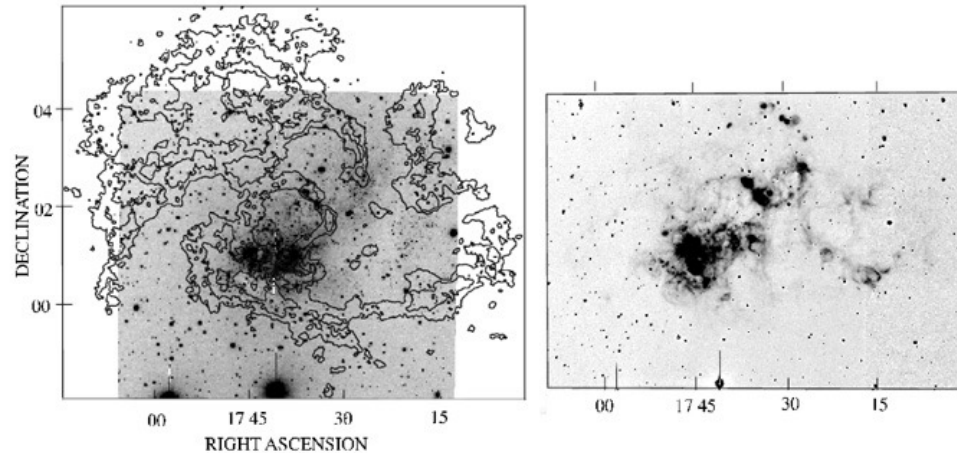


Fig 4.19 E. Wilcots 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Vasemmalla HI ja R-kuva, oikealla $H\alpha$ kuva.



10.5 Kemiallinen evoluutio

- Tähdet muodostavat ytimissään vedystä ja heliumista raskaampia alkuaineita. Mitä nuorempi tähti, sitä suurempi sen metallipitoisuus keskimäärin on.
- Populaatio I: Nuoret korkean metallipitoisuuden kiekkotähdet.
- Populaatio II: Keskuspullistuman ja halon matalamman metallipitoisuuden tähtiä.
- Populaatio III: Ensimmäiset tähdet jossa ei ollut lainkaan metalleja.

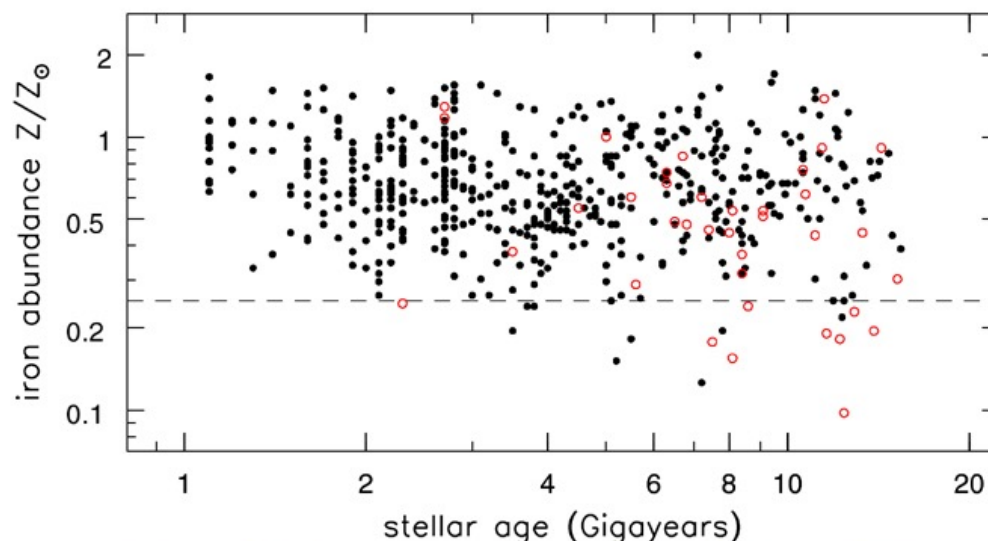


Fig 4.14 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Metallipitoisuudessa on iso hajonta, mutta keskimäärin mitä nuorempi tähti on sitä suurempi sen metallipitoisuus on.



Suljettu laatikko malli (Closed box) I

- Oletetaan yksinkertainen suljettu laatikkomalli galaksille, eli galaksista ei karkaa kaasua ja siihen ei tule lisää kaasua. Oletetaan lisäksi että kaasun metallipitoisuus on kaikkialla sama ja että kaasu on hyvin sekoittunutta. Lopuksi oletetaan että tähdet palauttavat tuottamansa metallinsa hyvin lyhyessä ajassa (eli heti, eng. instant recycling).
1. $M_g(t)$ kaasun massa galaksissa hetkellä t .
 2. $M_*(t)$ galaksin tähtiin lukittu massa hetkellä t .
 3. $M_h(t)$ galaksin metallien kokonaismassa kaasussa hetkellä t , kaasun metallipitoisuus on tällöin $Z=M_h/M_g$.
 4. p (tuotto=yield), keskimääräinen metallituotto tähtimassaa kohti.



Suljettu laatikko malli (Closed box) II

- Käyttäen näitä suureita voimme laskea miten kaasun kokonaismetallimäärä muuttuu ajan funktiona suljetussa laatikossa.

$$\Delta M_h = p\Delta M_\star - Z\Delta M_\star = (p - Z)\Delta M_\star$$

- Metallipitoisuus kasvaa uusien tähtien tuottamien metallien myötä ($p\Delta M_\star$), mutta pienenee samalla $Z\Delta M_\star$ määrällä koska nämä metallit jäävät tähtien sisään. Kaasun metallipitoisuus muuttuu määrällä:

$$\Delta Z = \Delta \left(\frac{M_h}{M_g} \right) = \frac{p\Delta M_\star - Z[\Delta M_\star + \Delta M_g]}{M_g}$$

- Suljetussa laatikossa $\Delta M_\star = -\Delta M_g$, sijoittamalla ja integroimalla saadaan:

$$Z(t) = Z(t = 0) + p \ln \left[\frac{M_g(t = 0)}{M_g(t)} \right]$$



Suljettu laatikko malli (Closed box) III

- Metallipitoisuus kasvaa ajan funktiona. Tähtimassalla $M_*(t)$, joka muodostui ennen aikaa t ja jolla on metallipitoisuus $Z(t)$ on $M_g(0)-M_g(t)$:

$$M_*(< Z) = M_g(0) [1 - \exp \{ - [Z - Z(0)] / p \}]$$

- Kun kaikki kaasu on loppunut metalli pitoisuudet tulisi noudattaa jakaumaa:

$$\frac{dM_*(< Z)}{dz} \Delta Z \propto \exp \{ - [Z(t) - Z(0)] / p \} \Delta Z$$

- Galaksin keskuspullistuman tähdille tämä malli toimii hyvin, jos $p \approx 0.7 Z_\odot$ ja $Z(0) = 0$.

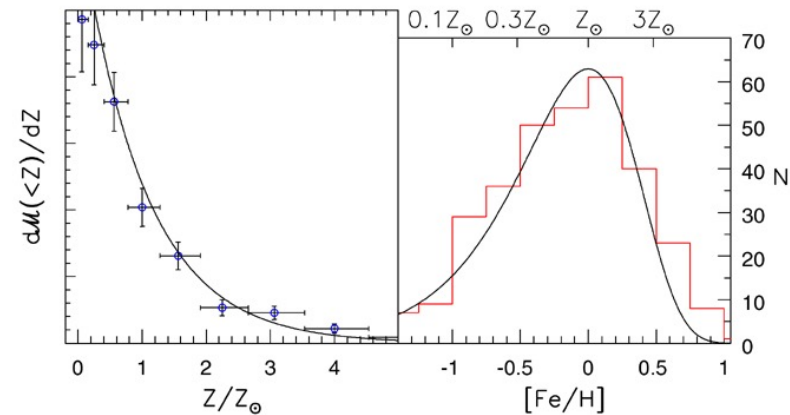


Fig 4.16 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Efekiivinen tuotto

- Toisissa tapauksissa tämä yksinkertainen malli on selvästi pielessä. Esimerkiksi pallomaisissa tähtijoukoissa ei ole kaasua, ja kaikilla tähdillä on sama alhainen metallipitoisuus. Myös kääpiösferoidaaleissa on hyvin vähän kaasua, mutta metallipitoisuudet ovat hyvin pieniä, vain $<1/30$ Auringon vastaavasta arvosta.
- Näissä kohteissa suljettu laatikko-malli ei toimi, koska nämä järjestelmät ovat menettäneet huomattavan osan niiden alkuperäisestä kaasusta. Voimme käyttää jo johdettuja yhtälöitä, mikäli korvaamme tuoton p efekiivisellä tuotolla p_{eff} , joka ottaa huomioon myös kaasun menetyksen. Esim. pallomaisille joukoille $p_{\text{eff}} \approx 0$. Efekiivinen tuotto p_{eff} on aina pienempi kuin oikea tuotto p .



G-tähtien ongelma

- Käyttämällä yksinkertaista suljetun laatikon mallia Auringon ympäristölle, voimme arvioida että noin 40%:lla tähdistä tulisi olla alle neljäsosa Auringon metallipitoisuudesta, kun tuotto (eng. yield) $p=0.74 Z_{\odot}$.

$$\frac{M_{\star}(< Z_{\odot}/4)}{M_{\star}(< Z_{\odot})} = \frac{1 - \exp[-Z_{\odot}/(4p)]}{1 - \exp(-Z_{\odot}/p)} \approx 0.4$$

- Todellisuudessa melko harvalla tähdellä Auringon lähellä on näin vähän metalleja ja tätä kutsutaan G-tähtien ongelmaksi (G-dwarf problem).
- Tämän ongelman voi ratkaista olettamalla että kiekkotähdet syntyivät kaasusta, jolla olikin alun alkaen pieni, mutta nollaa suurempi metallipitoisuus, esim. $Z(0) \approx 0.15 Z_{\odot}$.
- Toinen vaihtoehto on että tähtien synty käynnistyi jo ennen kuin kaikki kaasu oli paikalla galaksissa, tällöin ensimmäiset tähdet lisäsivät metalleja vain osaan kaasua, myöhemmin pienemmän metallipitoisuuden kaasua putosi galaksiin ja metallipitoisuuden kasvu jäi pienemmäksi.



Metallien tuotto

- Suurin osa α -elementeistä (happi, pii, magnesium) tuotetaan II-tyypin supernovissa lyhyessä ajassa (≈ 10 Myr).
- Suurin osa raudasta (Fe) tuotetaan Ia-tyypin supernovissa, tämä on hitaampi prosessi ja vaatii noin (≈ 1 Gyr) kaksoistähtievoluutiota.
- α /Fe-arvoa voidaan käyttää ikämittarina galaksissa ja se kertoo millä aikaskaalalla tähdet muodostuivat.

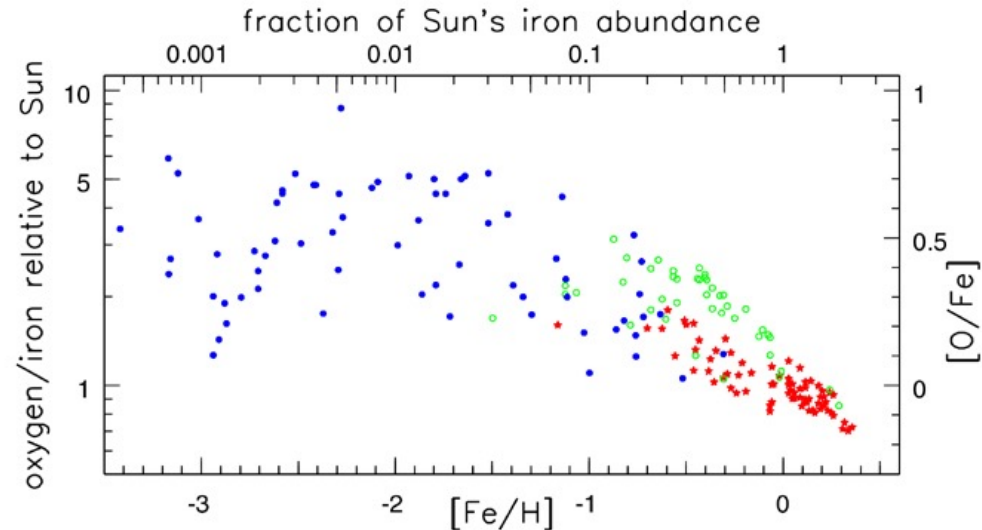


Fig 4.17 (T. Bensby) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Supernovien lisäksi myös punaiset jättiläistähdet tuottavat paljon α -elementtejä useiden miljardien vuosien aikana.



Mitä opimme?

1. Paikallisessa galaksiryhmässä on yli 80 (uusia löydetään koko ajan lisää) galaksia 2-3 Mpc alueella.
2. Suurin osa valosta (90%) tulee kolmesta spiraaligalaksista, Andromedasta (M31), Linnunradasta ja Kolmion (M33) galaksista. Suurin osa joukon galakseista ovat kääpiösferoideaaleja, kääpiöellipsejä ja epäsäännöllisiä galakseja.
3. Vuorovesivoimat hajottavat kiertoradalla olevia satelliittigalakseja, Jacobi säteen ulkopuolella olevat tähdet karkaavat satelliittigalaksista.
4. Suljetulla laatikkomallilla voidaan selittää osittain tähtien metallirunsauksia. Malli ei toimi mikäli kaasua karkaa merkittävästi tai tulee lisää systeemiin sen kehityskaaren aikana.