



# **Linnunradan rakenne**

## **FYS2053, 5 op, syksy 2022**

D123 Exactum

**Luento 6: Linnunradan yleisrakenne II, halo,  
pallomaiset tähtijoukot ja galaksin keskusta**  
**10/10/2022**



# Tällä luennolla käsitellään

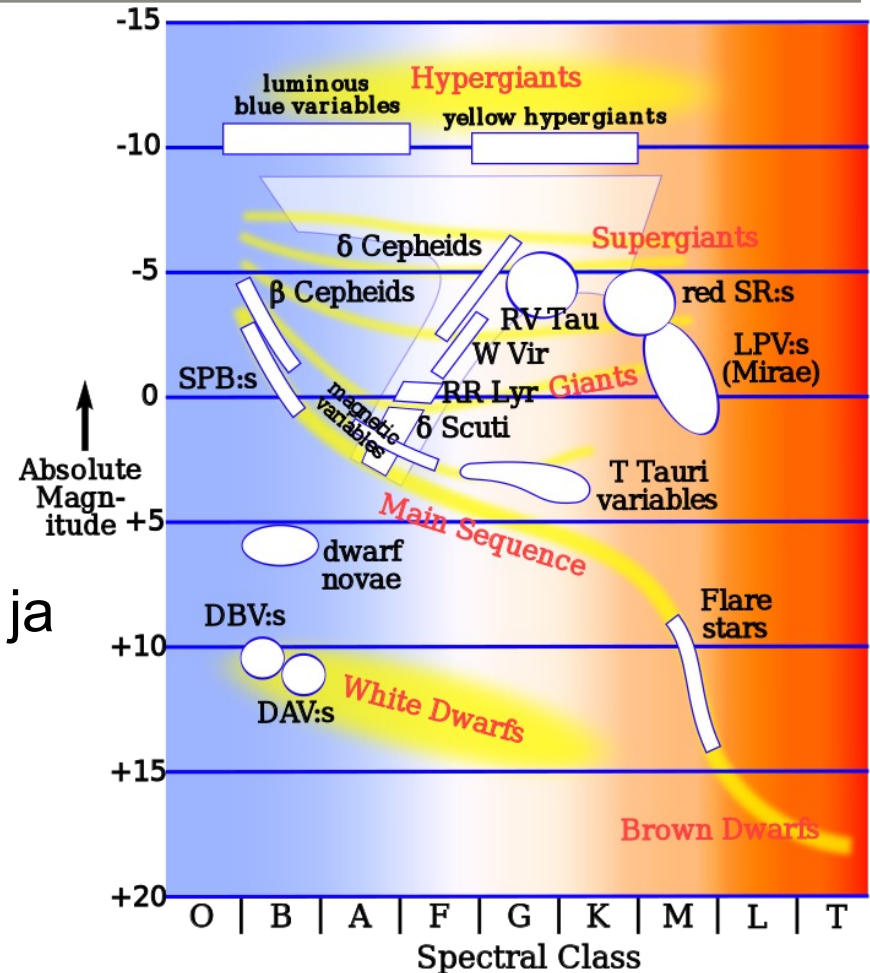
---

1. Sykkivien muuttujatähtien teoria, erityyppisten muuttujien luokittelu sekä niiden soveltaminen etäisyyssmittauksissa.
2. Pallomaisten tähtijoukkojen määrittely, ominaisuudet, etäisyydet ja pimeän aineen määrä niissä.
3. Tähtien ominaisuudet halossa, Linnunradan vanhimpien tähtien ominaisuudet ja kaasupilvien olemassaolo halossa.
4. Linnunradan keskuspullistuma ja sen tähtipopulaatiot sekä Linnunradan sauvarakenne.
5. Linnunradan ytimessä oleva kaasu, tähtipopulaatiot ja supermassiivinen musta aukko.
6. Vastaa soveltuvin osin: **M:** sivut 64-69  
**S&E:** sivut 111-125, 141-147  
**B&M:** sivut 287-296, 327-377, 594-597



# 6.1 Sykkivät muuttuvat tähdet

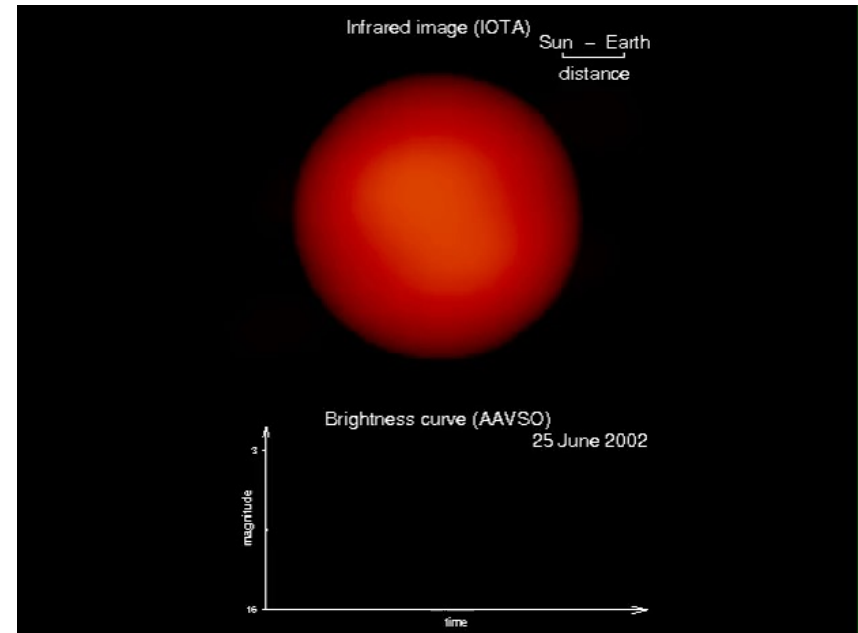
- Kun tähdet ikääntyvät ja kehittyvät pois pääsarjalta ne voivat joutua epästabiilisuusalueelle, jossa ne rupeavat sykkimään periodisesti.
- Nämä tähdet ovat jo kuluttaneet ytimessä olevan vedyn ja ovat siirtyneet fuusioimaan vetyä ydintä ympäröivässä kuoressa.
- Epästabiilisuus on seurausta vedyn ja heliumin ionisoitumisesta tähdissä sijaitsevassa kuoressa, esim. Hel->HeII ja HeIII.





# Sykkimisen perusteoriaa

- Normaalisti lämpötilan noustessa tähden opasiteetti laskee, mutta muuttuvissa tähdissä esiintyy niin kutsuttu  $\kappa$ -mekanismi tähden ionisoituneen helium kerroksen takia  $\rightarrow$  opasiteetti kasvaa kun lämpötila kasvaa He:n ionisoitumisesta johtuen.
- Tähti toimii ikään kuin höyrykone: Painovoima painaa tähden kasaan  $\rightarrow$  opasiteetti kasvaa  $\rightarrow$  paine kasvaa  $\rightarrow$  tähti laajenee  $\rightarrow$  lämpötila ja opasiteetti laskevat  $\rightarrow$  energia ja paine karkaavat  $\rightarrow$  tähti kutistuu painovoiman vetämänä ja kirkastuu.

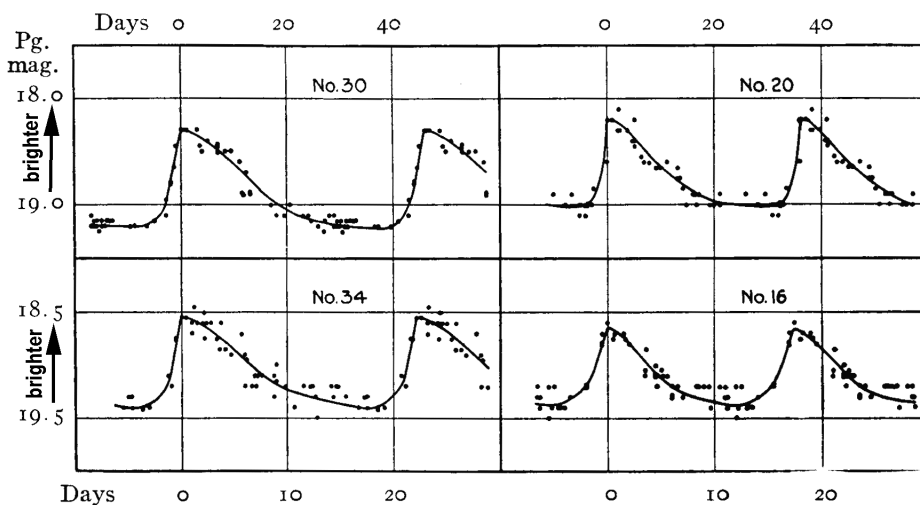


Sykkivä punainen jättiläinen Chi Cygni. Kyseessä on Miramuuttuja, jonka periodi on 408 päivää.



# Klassiset Kefeidit

- Klassiset Kefeidit ovat verrattain nuoria populaation I tähtiä, joiden massat ovat  $M \geq 3 M_{\odot}$ .
- Tähdet sijaitsevat tyypillisesti spiraalihaaroissa ja niiden absoluuttiset magnitudit ovat luokkaa  $-6 \leq M_V \leq -2$ .
- Tähdet noudattavat varsin tarkasti periodi-luminositeetti-relaatiota:  
$$\langle M_V \rangle = -2.78 \log(P/10 \text{ d}) - 4.13$$
- Relaation hajonta on noin 0.3 mag, hajonta on pienempi infrapuna-alueella.

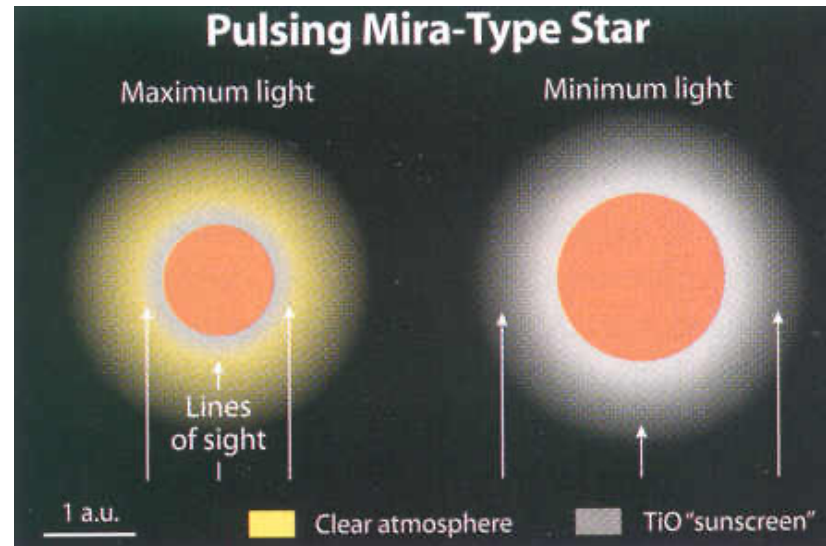


Havaittuja Kefeidi-valokäyriä.



# Mira tähdet

- Mira-tähdet nimetty prototyyppi tähden Miran (Lat. "Ihme", myös Omicron Ceti) mukaan ovat pitkäjaksoisia (~100 d) muuttujia joiden magnitudit voivat vaihdella jopa ~8 magnitudia maksimin ja minimin välillä.
- Tähdet ovat punaisia jättiläisiä lähellä planetaarista sumu-vaihetta. Sykkiminen johtuu ionisoituneen vedyn ja heliumin kerroksista, kuten Kefeidillä. Tähtien atmosfäärit ovat konvektiivisia. Sykkimisen yksityiskohtia ei täysin ymmärretä.

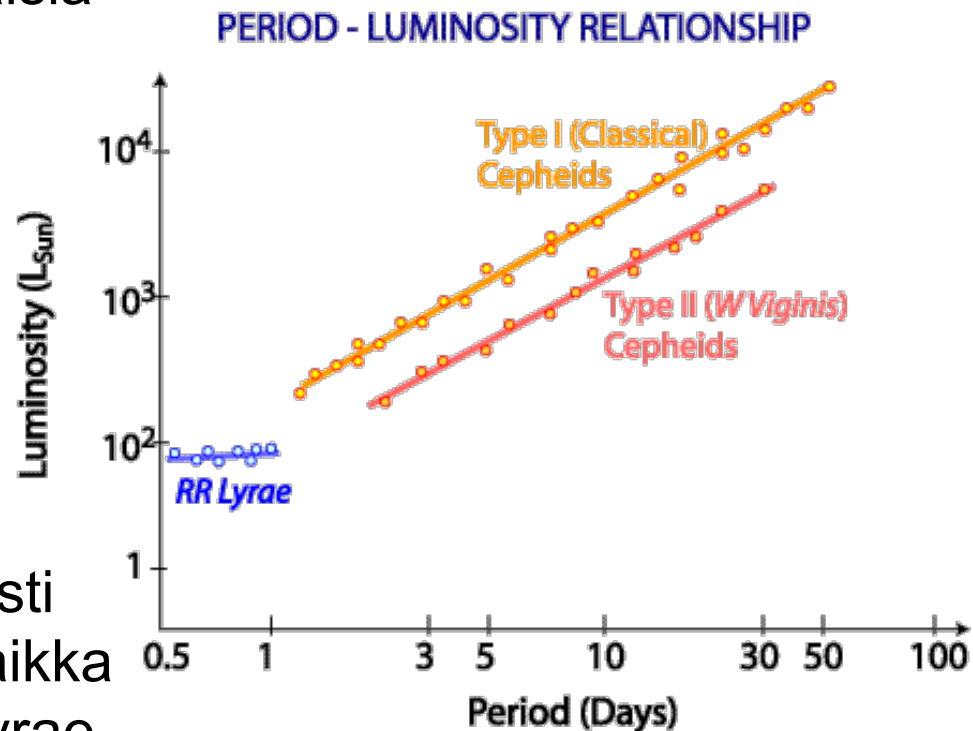


- Prototyyppi Miran magnitudi vaihtelee epäsäännöllisesti välillä  $m_V=2-10$ . Suurin osa valosta infrapuna-alueella, jossa vaihtelu on tätä vähäisempää.



# W Virginis tähdet

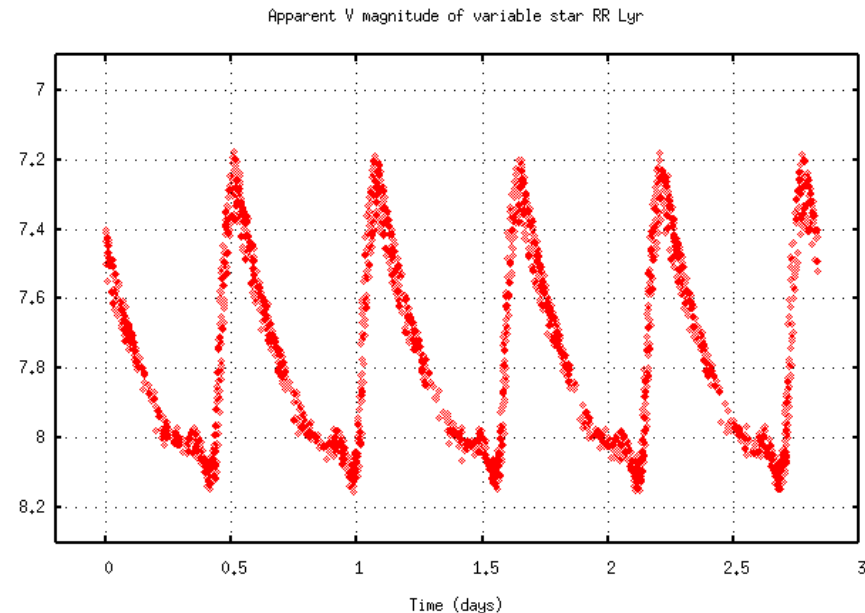
- W Virginis tähdet ovat pienimassaisia metalliköyhiä populaatio II tähtiä.
- Tähdet sijaitsevat tyypillisesti Linnunradan halossa, pallomaisissa tähtijoukoissa, lisäksi ne ovat keskittyneet Linnunradan keskuksen suuntaan.
- Tähtien periodit ovat luokkaa:  $0.8 \text{ d} \leq P \leq 30 \text{ d}$  ja ne voidaan helposti sekoittaa klassisiin Kefeideihin, vaikka ovatkin läheisempää sukua RR-Lyrae tähtien kanssa.





# RR Lyrae tähdet

- RR-Lyrae sijaitsevat HR-diagramman horisontaalihaaran instabiilisuusalueella.
- RR-Lyrae tähdet ovat metalli-köyhiä, verrattain kevyitä ( $\sim 0.8 M_{\odot}$ ) tähtiä, joiden periodit ovat luokkaa  $\sim 0.5$  päivää.
- RR-Lyrae tähdet ovat Pop-II tähtiä, ja ne sijaitsevat erityisesti halossa ja pallomaisissa joukoissa.
- Tähdet ovat klassisiin Kefeidiin verrattuna himmeitä, mutta lyhyen periodisuutensa vuoksi helposti havaittavissa.



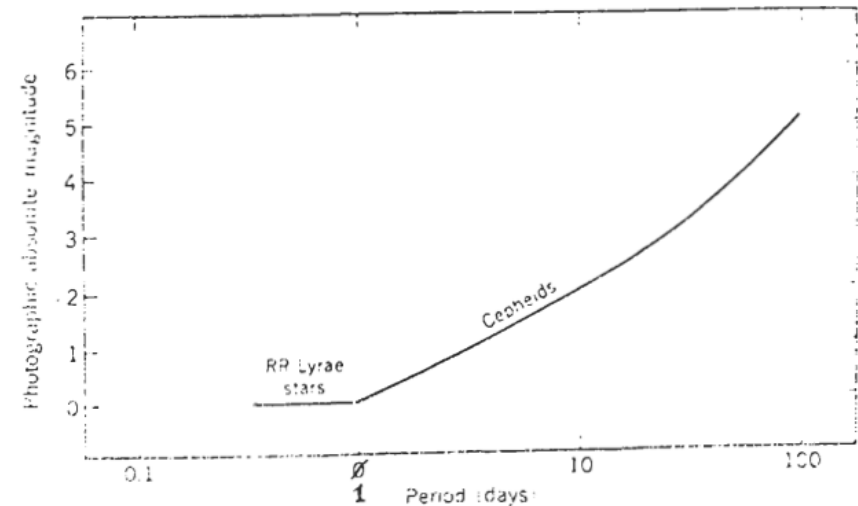
- RR-Lyrae tähdet ovat tärkeitä etäisyysindikaattoreita, varsinkin pallomaisille tähtijoukoille.





# Muuttujien käyttö etäisyyssmittauksissa I

- Henrietta Leavitt (1912) keksi kefeidien absoluuttisen magnitudin  $M_V$  ja periodin  $P$  välisen riippuvuuden pienessä Magellanin pilvessä (SMC.) Aluksi  $M_V$  -asteikon nolla-piste jäi avoimeksi, koska SMC:n etäisyyttä ei tunnettu.
- Nolla-pisteen määrittämiseksi Shapley määräsi Linnunradassa havaittavien Kefeidien ja myös RR-Lyrae tähtien absoluuttiset magnitudit statistisen parallaksin avulla.

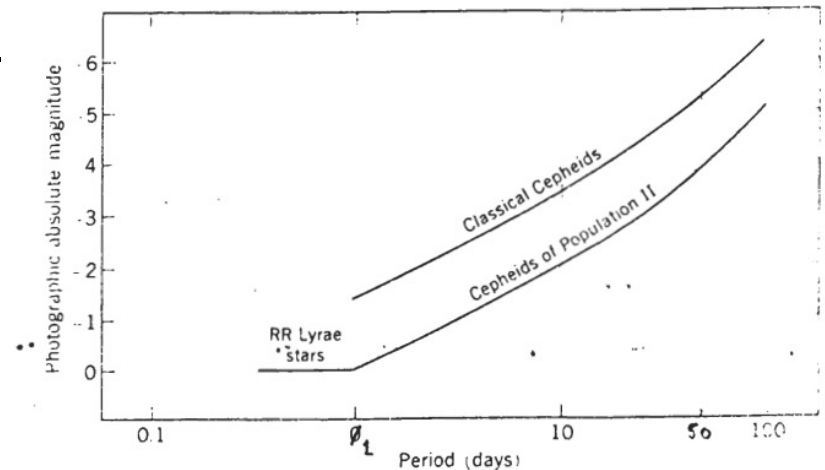


- RR Lyrae tähtien  $M_V \sim 0$  liittyi aukottomasti Kefeidien (W Virginis tähtien)  $M$ - $P$  relaatioon. (Huom. SMC:ssä ei voitu vielä tuolloin havaita RR-Lyr tähtiä).



# Muuttujien käyttö etäisyyssmittauksissa II

- W. Baade (1952) yritti havaita RR-Lyr tähtiä Andromedan galaksissa uudella 5-m kaukoputkella, mutta RR-Lyr tähtiä ei näkynyt vaikka olisi pitänyt, mikäli arvioitu etäisyys 300 kpc oli oikea.
- Jonkin ajan kuluttua Baade ymmärsi että Kefeidejä täytyy olla kahta tyyppiä, klassiset (Pop-I) ja Pop-II Kefeidit (W Vir tähdet).
- Havaitut Kefeidit Andromedassa olivat klassisia (Pop-I) mutta niille käytettiin virheellisesti Pop-II W Virginis magnituteja. -> Andromedan uusi etäisyys 600 kpc (oikea etäisyys 780 kpc).

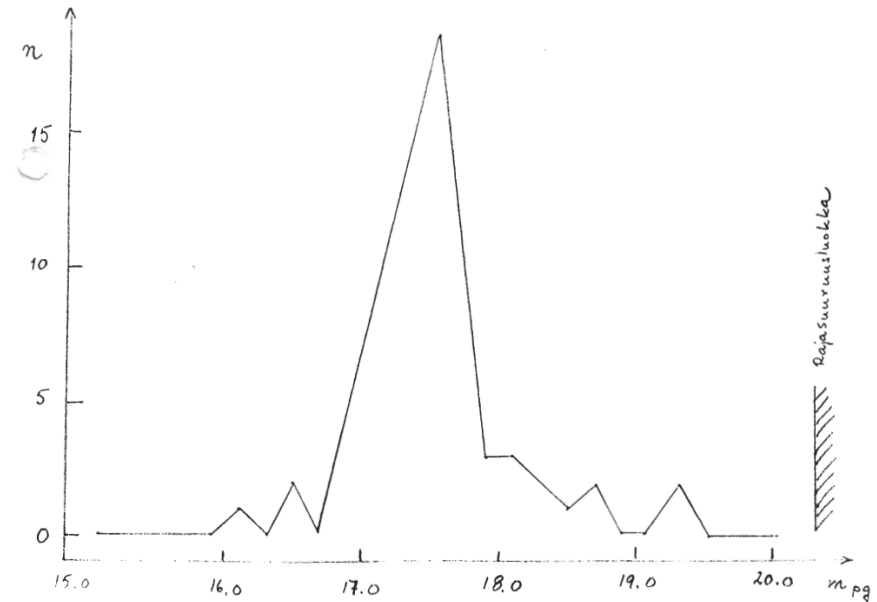


- Tämä havainto myös samalla kaksinkertaisti koko havaittavan maailmankaikkeuden koon!



# RR-Lyr tähdet ja galaksin keskustan etäisyys

- RR Lyr tähdet ovat valovaihtelunsa takia helposti tunnistettavissa  $m_V \approx 20^m$  saakka.
- Muissa galakseissa tehtyjen havaintojen perusteella tiedetään että, RR-Lyr tähdet keskittyvät voimakkaasti Linnunradan keskuksen suuntaan.
- Havaitaan RR-Lyr ISM pölykerroksessa olevien "ikkunoiden" läpi, ts. suunnissa jossa ekstinktio  $A = 1^m .9$ , suunnassa,  $l = 1^\circ, b = -4^\circ$  on normaalia pienempi.



$$m - M - A = 5 \log \frac{r}{10 \text{ pc}},$$

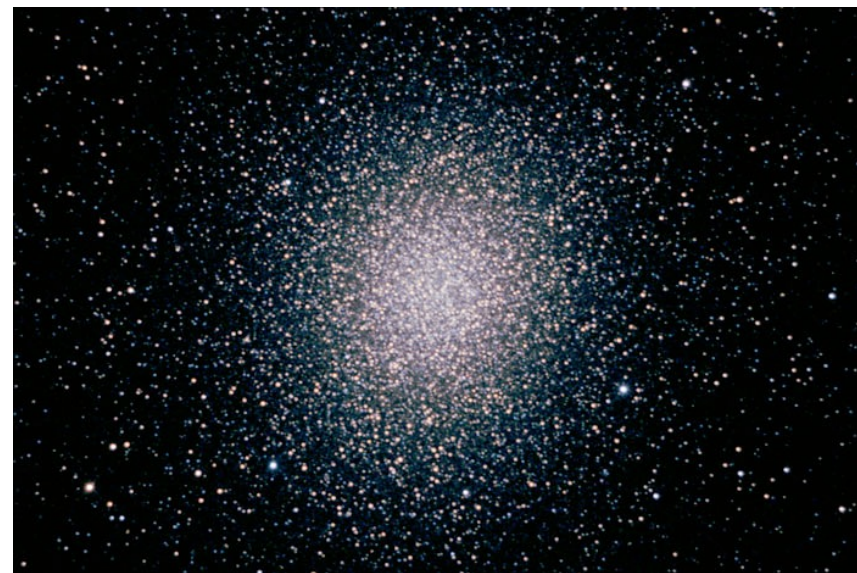
$$A = 1^m .9, \text{ suunnassa, } l = 1^\circ, b = -4^\circ$$

$$17.3 - 0.8 - 1.9 = 14.6 \Rightarrow r = 8.3 \pm 1.2 \text{ kpc}$$



## 6.2 Pallomaiset tähtijoukot

- Pallomaiset tähtijoukot ovat hyvin tiheitä ja massiivisia tähtijoukkoja, jotka koostuvat pääsääntöisesti  $\sim 10^5$ - $10^6$ :sta vanhoista ja metalliköyhistä tähdistä.
- Joukkojen keskimääräiset läpimitat ovat 25 pc (90% valosta tämän läpimitan sisäpuolelta) ja havaittu tähtitiheys on noin 100 tähteä/pc<sup>3</sup>, eli noin tuhat kertaa suurempi kuin Auringon lähistöllä.
- Linnunradassa tunnetaan noin 150 pallomaista tähtijoukkoa.

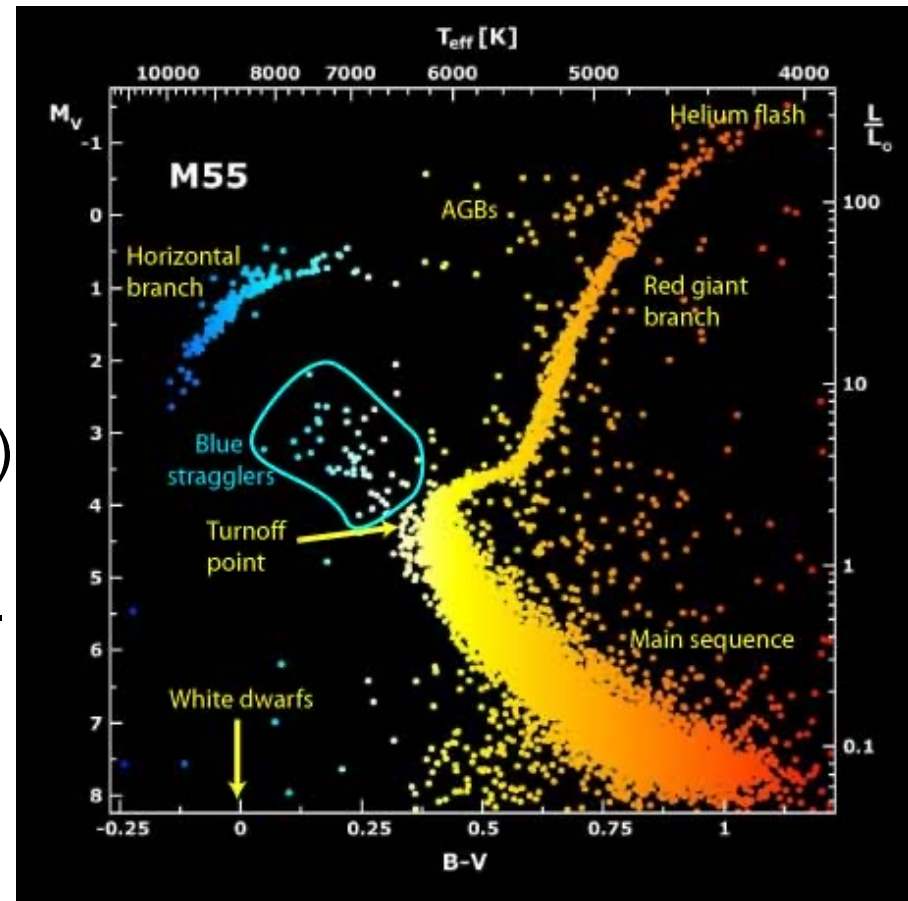


Omega Cen – taivaan absoluuttisesti kirkkain pallomainen tähtijoukko.



# Joukkojen väri-magnitudi-diagramma

- Pallomaiset tähtijoukkojen väri-kirkkausdiagrammat poikkeavat täysin auringon lähiympäristön ja avointen joukkojen diagrammoista.
- Joukkojen metallipitoisuus  $Z \sim 10^{-4} - 10^{-3}$ , noin sata kertaa pienempi kuin Auringolla ( $Z_{\odot} = 0.02$ ) ja ikä yli 10 miljardia vuotta.
- Pääsarja sijaitsee Pop-I ”standardi-pääsarjaa” noin 1 magnitudia alempana V-kaistassa, johtuen tähtien pienestä metallipitoisuudesta (VI-alikääpiöt).





# Pallomaisten tähtijoukkojen etäisyydet

---

- Pallomaiset tähtijoukot sijaitsevat tyypillisesti varsin kaukana Auringosta, lähimmän joukon (M4) etäisyys on noin 4.3 kpc ja kaukaisimpien tähtijoukkojen etäisyys yli 100 kpc.
- Etäisyys voidaan määrätä sovittamalla yhteen pääsarjat, tämä vaatii syviä havaintoja, koska pääsarjan tähtien magnitudit  $m_V \sim 18^m - 23^m$ , riippuen etäisyydestä. Täytyy myös ottaa huomioon että pääsarjan tähdet joukoissa ovat alikääpiöitä, käytetään Pop II pääsarjaa.
- Toinen tapa on käyttää RR-Lyrae tähtien valovaihtelua. Absoluuttinen magnitudi  $M_V \sim +0.6 \rightarrow m_V \sim 20.6$  ( $r=100$  kpc, ei ekstinktiota). Vaikeutena on RR-Lyrae tähtien absoluuttisen magnitudin tarkka määrittäminen.



# Pallomaisten tähtijoukkojen jakauma

- Shapley (1918) pallomaisten joukkojen muodostaman systeemin keskus Sagittariuksen suunnassa ( $r=30$  kpc, nyk.  $r=8.2$  kpc).
- Interstellaarinen ekstinktio hyvin vähäistä koska  $|b| \geq 20^\circ$ . Pilvirakenne: ekstinktio vaihtelee, esim. Linnunradan napojen suunnassa, ekstinktio  $A_V \leq 0^m.03$ .
- Lasketaan värieksessi  $E_{B-V}$  kokonaiskirkkaudesta  $\rightarrow A_V$  ja etäisyys.

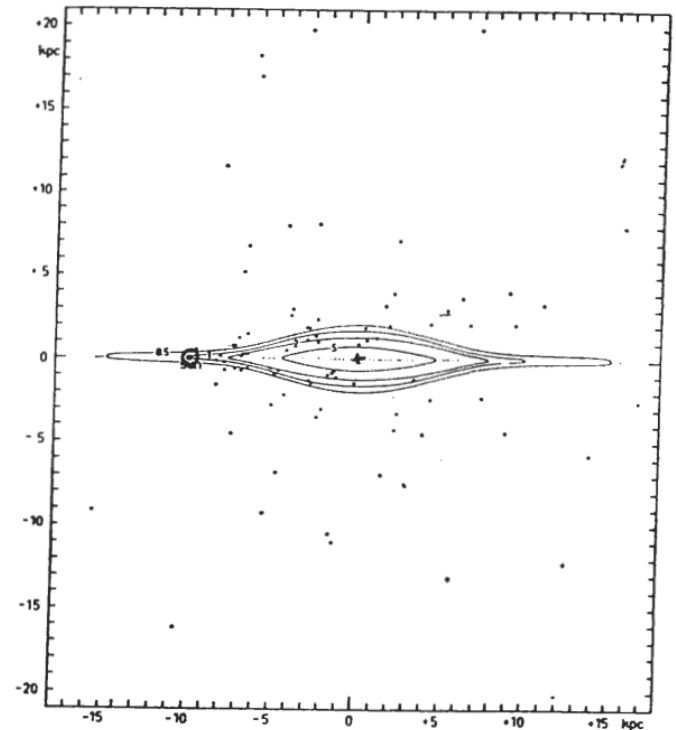
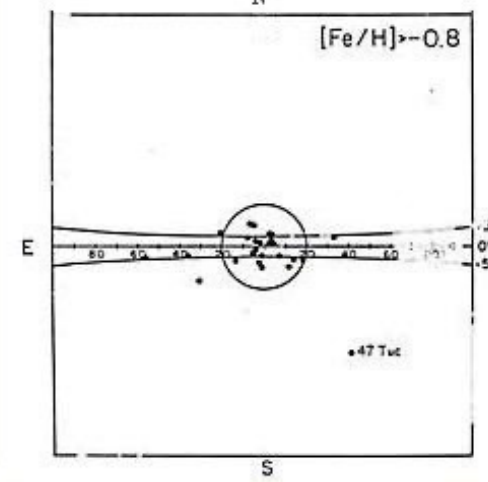
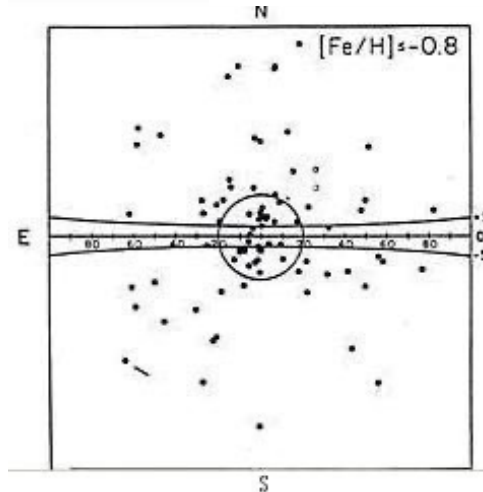
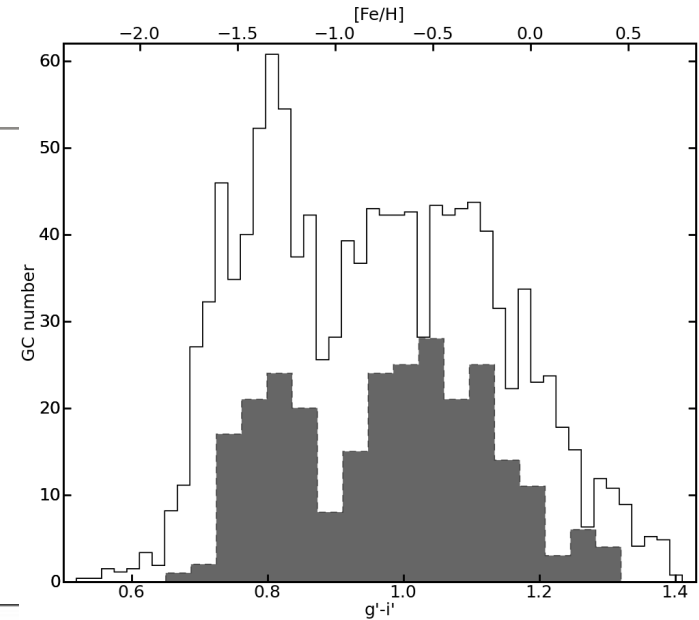


Fig. 23.6. *The Milky Way system.* The diagram shows the spatial distribution of globular clusters projected on to a plane perpendicular to the galactic plane and passing through the Sun and the galactic centre. Lines of equal mass density are shown, the numbers giving the density with respect to that in the solar neighbourhood. The thin layer of interstellar matter lying in the galactic plane and associated with the extreme (spiral arm) Population I is shown dotted. (After J. H. Oort)



# Pallomaisten tähtijoukkojen luokittelu

- Pallomaiset tähtijoukot voidaan jakaa kahteen populaatioon:
  1. ”Sinisissä” joukoissa metallipitoisuus on hieman korkeampi ja ne ovat jakautuneet hieman lähemmäs kiekon tasoa.
  2. ”Punaisissa” joukoissa metallipitoisuus on hyvin alhainen ja joukot ovat keskittyneet kauas pois Linnunradan tasosta.







# Viriaaliteoreeman sovellus joukkoihin

- Voimme arvioida pallomaisten tähtijoukkojen massoja olettamalla että joukot ovat tasapainossa ja käyttämällä viriaaliteoreemaa:

$$2E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = 0$$

$$E_{\text{kin}} \sim \frac{1}{2} M \sigma^2 \quad E_{\text{pot}} = - \sum_{i,k} G \frac{M_i M_k}{r_{ik}} \approx -G \frac{M^2}{R}$$

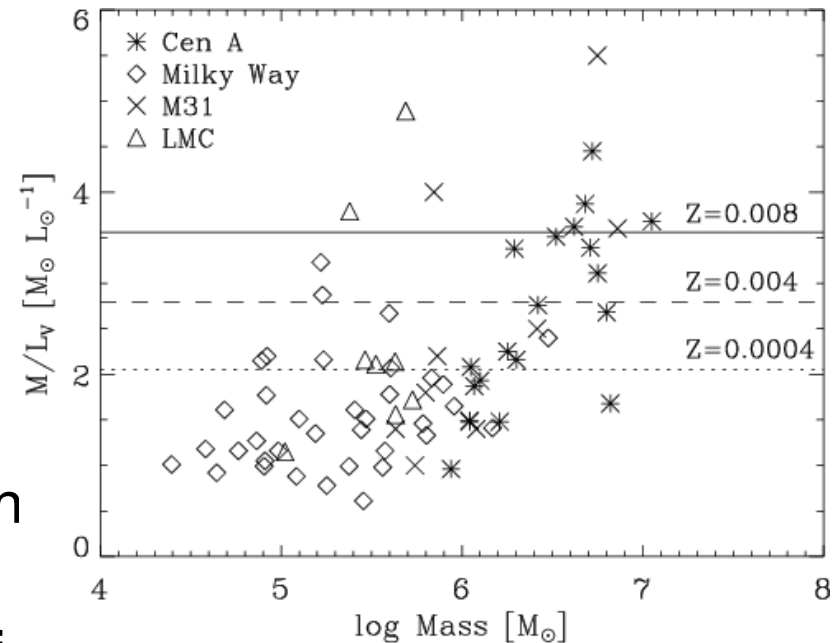
- Tässä  $\sigma$  on joukossa olevien tähtien nopeusdispersio,  $R$  on joukon säde ja  $M$  sen massa, jolle saadaan lauseke:

$$M \sim \frac{R \sigma^2}{G}$$

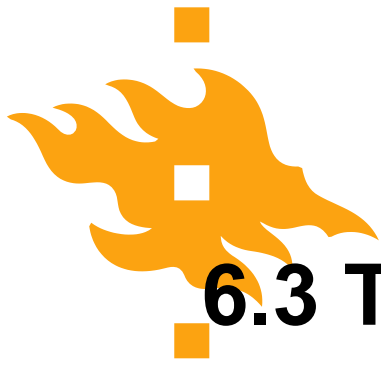


# Massa-valo suhde

- Pallomaisissa tähtijoukoissa nopeusdispersiot ovat tyypillisesti luokkaa  $\sigma \sim 7\text{-}20$  km/s, josta saadaan säteelle  $R=25$  pc massoiksi:  $M \sim 2 \times 10^5\text{-}10^6 M_{\odot}$ .
- Luminositeetit ovat samaa luokkaa Auringon yksiköissä ja massa-valo (M/L: mass-to-light) suhteelle saadaan matala arvio.
- Avoimilla joukoilla M/L vielä pienempi. Toisin kuin galakseissa, pallomaisissa ja avoimissa tähtijoukoissa ei ole siis juurikaan pimeää ainetta.



$$\frac{M/M_{\odot}}{L_V/L_{V,\odot}} \sim 1 - 5$$



## 6.3 Tähtien jakauma Linnunradan halossa

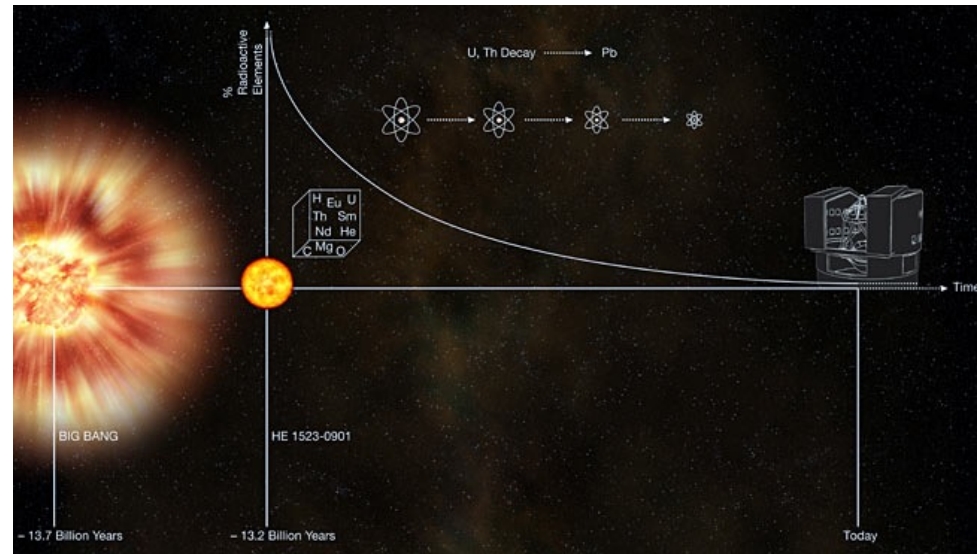
---

- Linnunradan halossa on paljon muitakin tähtiä kuin pallomaisia tähtijoukkoja ja yksittäisiä RR Lyrae tähtiä. Suurin osa tähdistä ovat tavallisia metalliköyhiä alemman pääsarjan tähtiä ja alikääpiöitä.
- Suurin osa näistä tähdistä ei ota osaa yleiseen Linnunradan pyörimiseen. Tähtien radat ovat enemmän radiaalisia ja täten nopeuskomponentit Auringon suhteen voivat olla hyvinkin suuria.
- Tähdet ovat hyvin vanhoja ja niitä voi etsiä joko hyvin pienen metallipitoisuuden avulla (kirkkaampia UV-alueella) tai niiden poikkeuksellisten liikkeiden avulla (kinemaattinen etsintä).
- Tähtien tiheys halossa hyvin alhainen  $10^{-3}$  tähteä/pc<sup>3</sup>, eli noin 100 kertaa pienempi kuin Auringon lähellä.



# Havaintoja hyvin vanhoista tähdistä

- Linnunradan vanhimmat havaitut tähdet sijaitsevat halossa ja joidenkin tähtien metallipitoisuus on jopa miljoona kertaa Aurinkoa pienempi.
- Käyttämällä radioaktiivisia aineita kellona (uraani, torium, jne.), eli vertaamalla niiden runsauksia stabiilien aineiden runsauksiin on eräälle tähdelle saatu iäksi 13.2 Gyr.

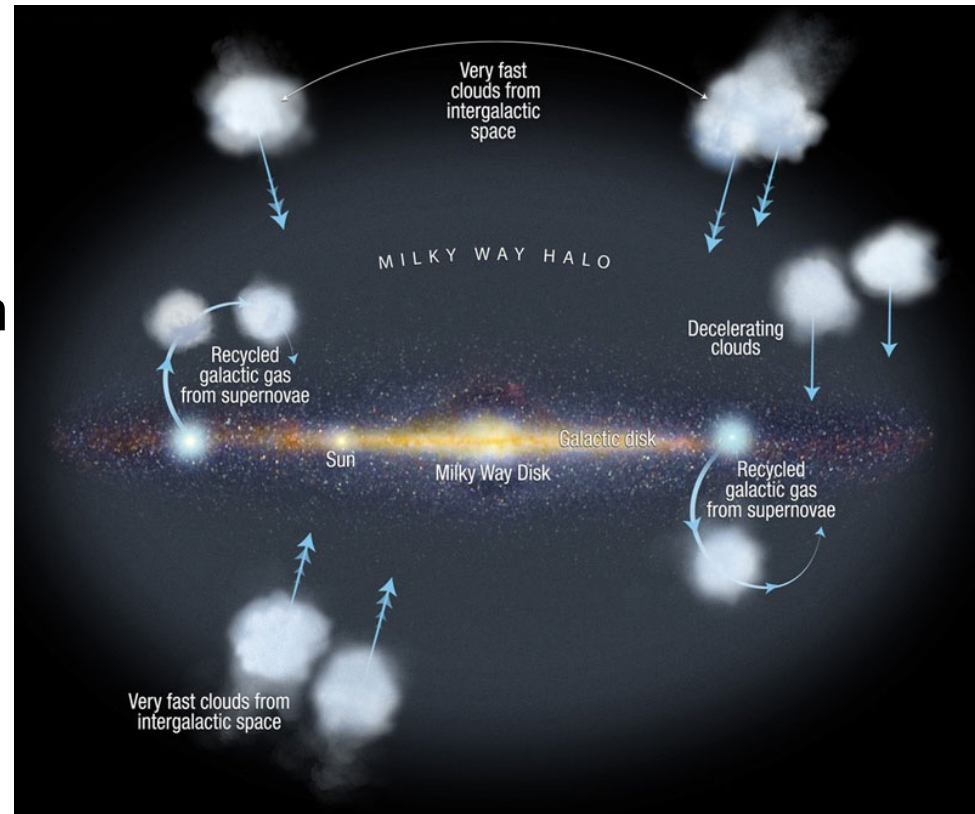


HE 1523-0901 tähti syntyi vain noin puoli miljardia vuotta alkuräjähdyksen jälkeen, tämä tähti oli ehkä osa sitä tähtipopulaatiota, joka seurasi heti massiivisia Pop III tähtiä.

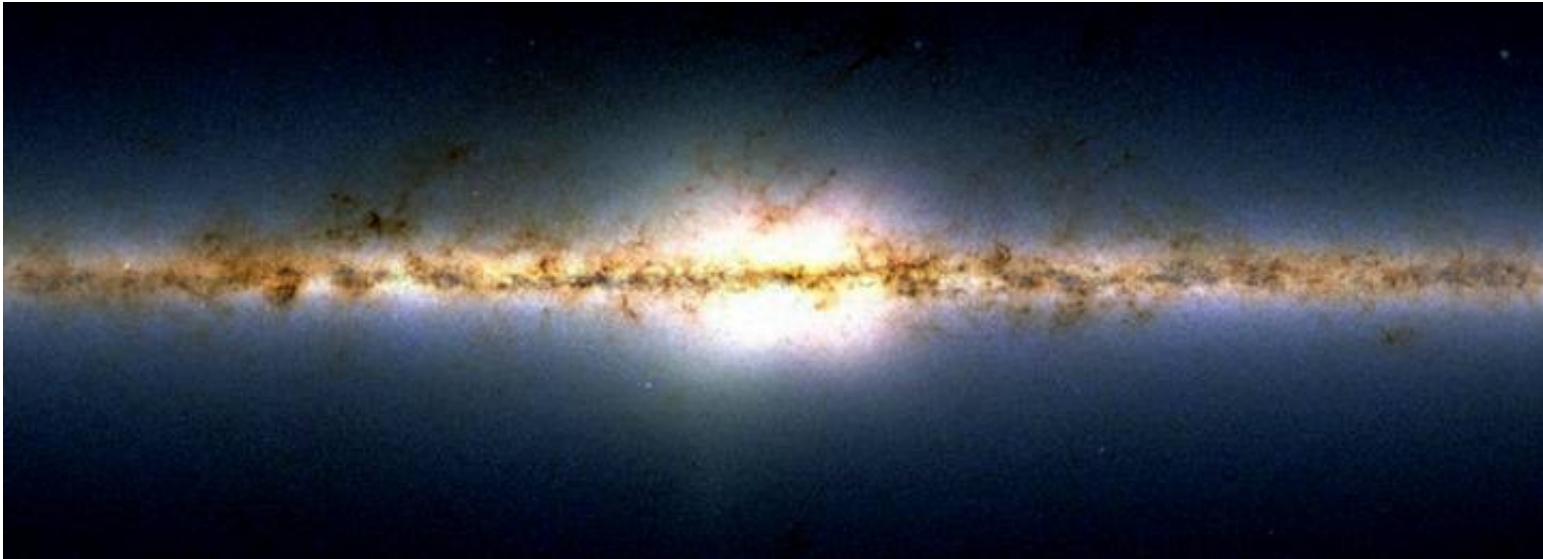


# Kaasua Linnunradan ulko-osissa

- Linnunradan ulko-osissa on nopeasti ( $\geq 90$  km/s LSR suhteen) liikkuvia kaasupilviä (high-velocity clouds).
- Pilvet voidaan havaita neutraalin vedyn 21cm viivassa ja niissä on yleensä hyvin matala metallipitoisuus.
- Nämä pilvet ovat todennäköisesti intergalaktisesta avaruudesta tai naapurigalakseista tulevaa uutta ”rakennusmateriaalia”.



## 6.4 Linnunradan keskuspullistuma

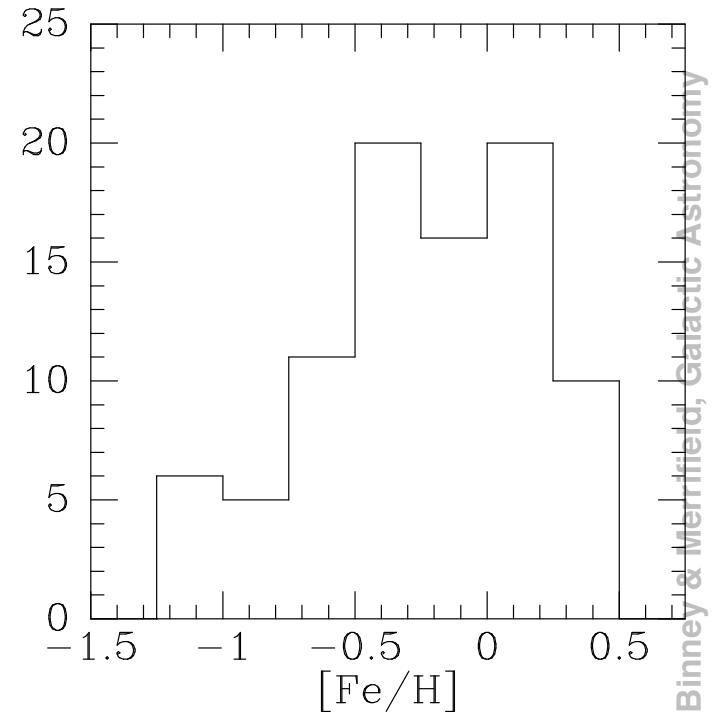


- Linnunradan keskusosissa sijaitsee Linnunradan keskuspullistuma, jonka halkaisija on noin  $\sim 3\text{-}4$  kpc ja massa on luokkaa  $\sim 1\text{-}2 \times 10^{10} M_{\odot}$ .
- Keskuspullistumat muistuttavat rakenteeltaan jossain määrin pieniä elliptisiä galakseja ja niiden tähtijakaumat ovat selvästi erilaiset kuin kiekossa.



# Keskuspullistuman tähtipopulaatio

- Keskuspullistuman tähdet ovat tyypillisesti vanhoja, mutta niiden metallipitoisuus on verrattain korkea, samaa luokkaa kuin Auringon metallipitoisuus tai jopa korkeampi.
- Korkeahko metallipitoisuus on seurausta intensiivisestä varhaisesta tähtiensynnystä ja verrattain suuresta gravitaatiopotentiaalista galaksin keskustassa, joka on estänyt metalleja karkaamasta galaksista.



Keskuspullistuman tähtien metallipitoisuus ( $[Fe/H]=0$  vastaa Auringon arvoa).



# Galaksien sauvarakenne

- Kiekkogalaksien ydinalueilla havaitaan usein sauvamaista rakennetta.
- Kuten spiraalit, sauvat pyörivät tietyllä kuvio-nopeudella, mutta toisin kun spiraalit ne eivät ole tiheysaaltoja!
- Samat tähdet pysyvät sauvarakenteessa ja ne voivat syntyä myös ilman kaasua, toisin kuin spiraalihaarat.
- Sauvoissa esiintyvät asymmetrinen painovoima ohjaa tehokkaasti kaasua galaksin keskusta.

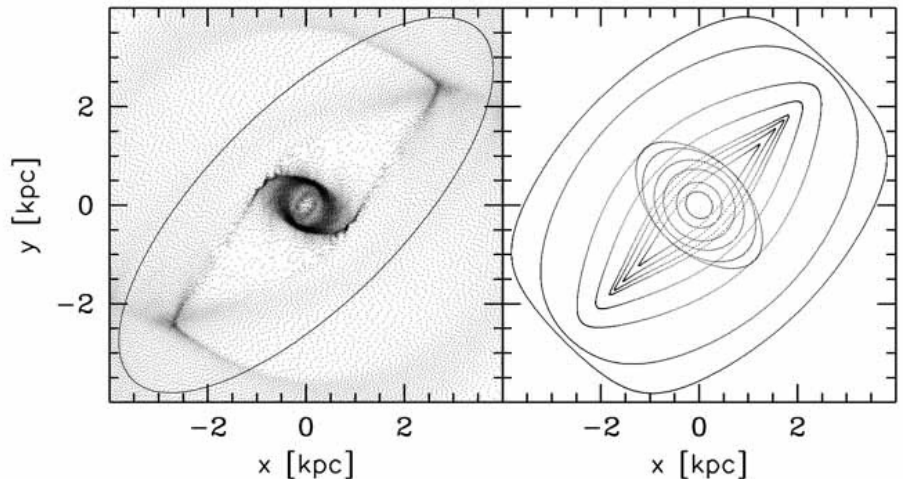


Fig 5.33 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

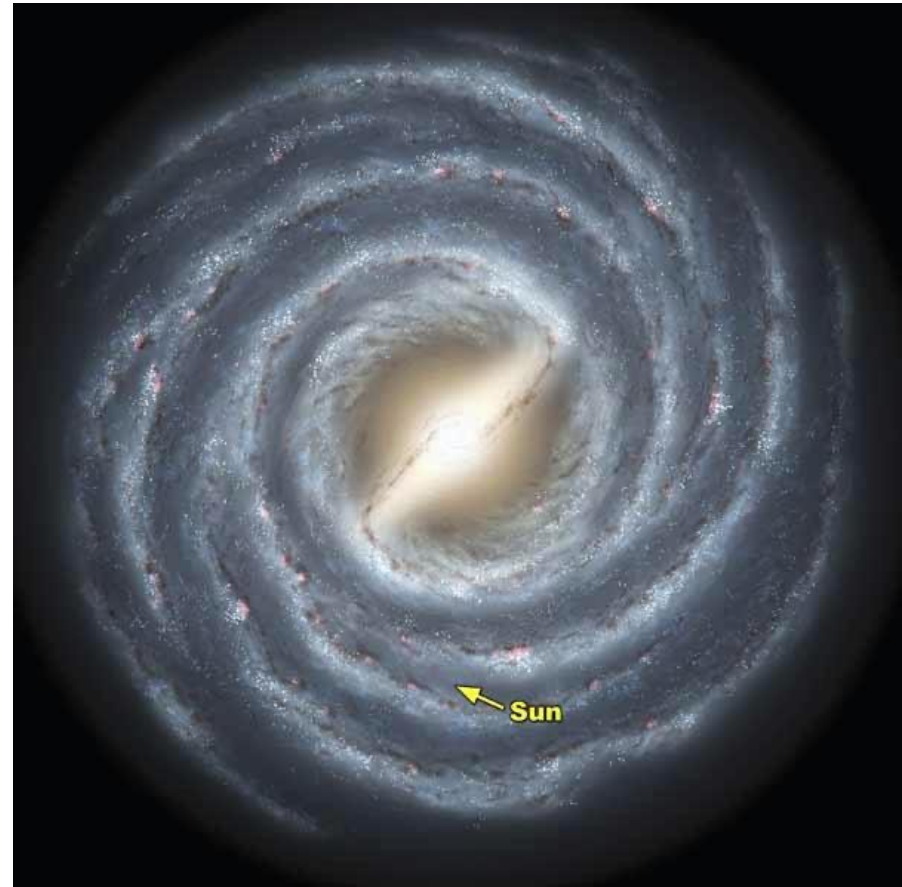
Vasemmalla kaasun liikettä tietokonesimulaatiossa ja oikealla tähtien ratoja sauvassa.





# Havaintoja Linnunradan sauvasta

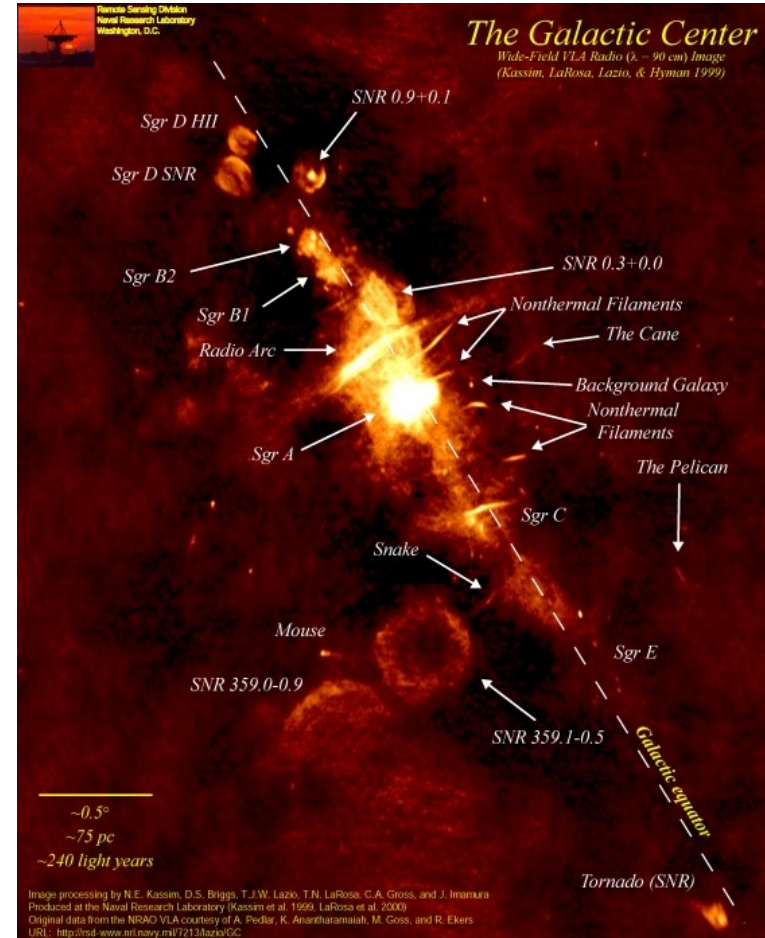
- Radiohavainnot 1980-luvulla antoivat viitteitä siitä että myös Linnunradassa olisi sauvarakenne.
- Lähi-infrapuna havainnot Spitzer-kaukoputkella 30 miljoonasta infrapunälähteestä vahvistivat havainnot (vuonna 2005).
- Linnunradassa on varsin kookas sauvarakenne, jonka halkaisija voi olla peräti  $\sim 6-8$  kpc. Sauva on hyvin vaikeasti havaittavissa.





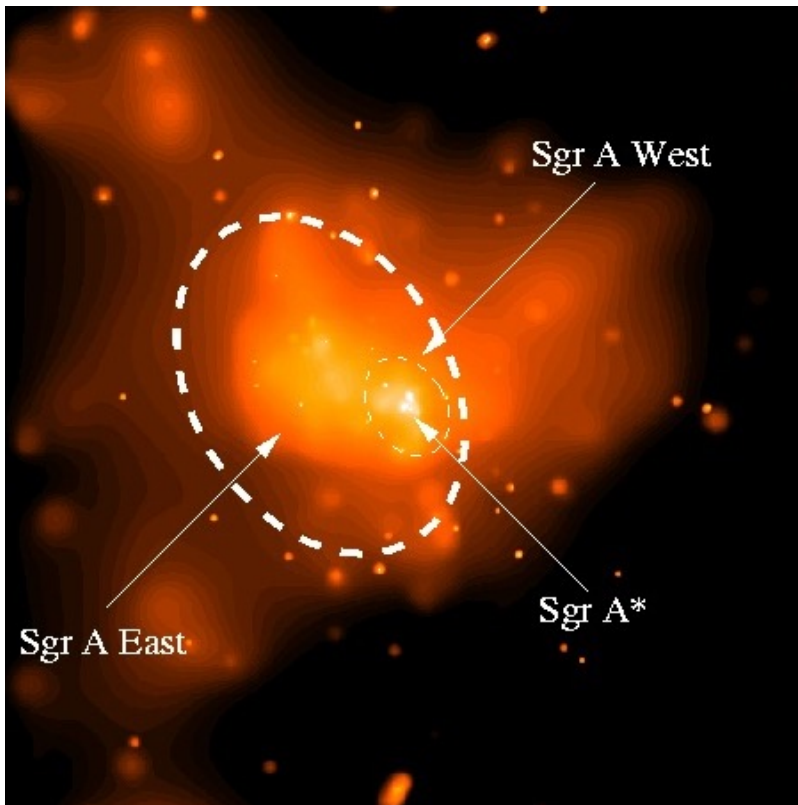
## 6.5 Linnunradan ydin: Kaasu I

- Linnunradan ydintä voi parhaiten tutkia radio- ja infrapuna-alueella.
- Linnunradan ytimen paikalla on kirkas radiolähde Sgr A\*.
- Ydintä ympäröi noin  $\sim 5$  pc päässä molekulaarisesta kaasusta muodostunut rengas, joka ei sijaitse Linnunradan tasossa.
- Renkaan sisällä sijaitsee ionisoituneesta kaasusta muodostunut minispiraali, joka kuljettaa kaasua keskustassa olevaan mustaan aukkoon.

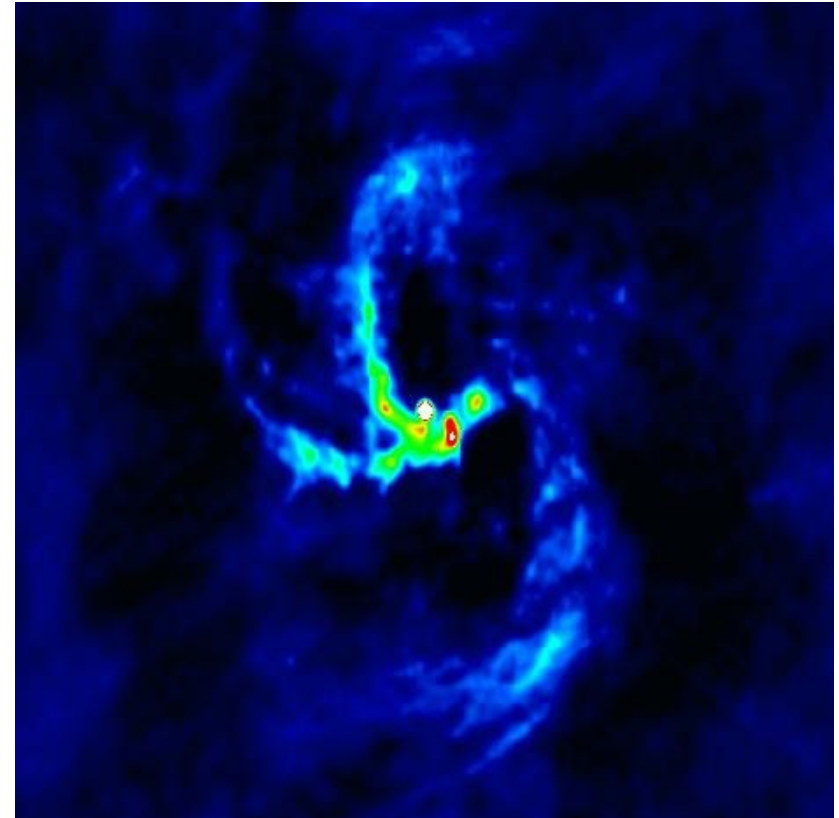




# Linnunradan ydin: Kaasu II



Röntgen-alueella.

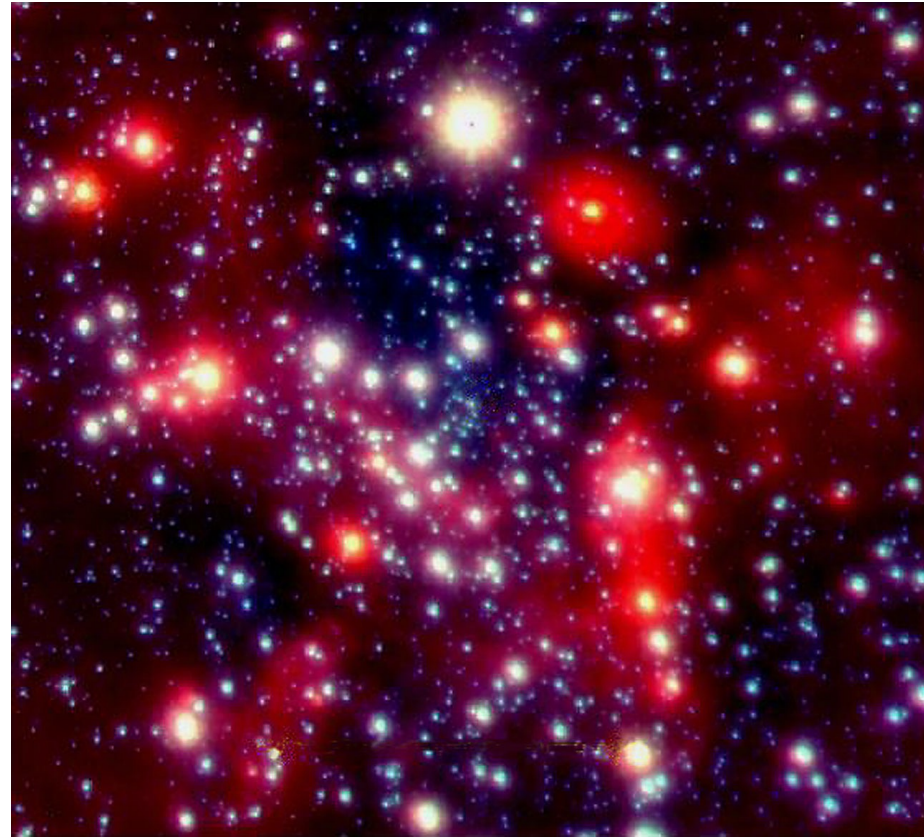


Radio-alueella: Minispiraali

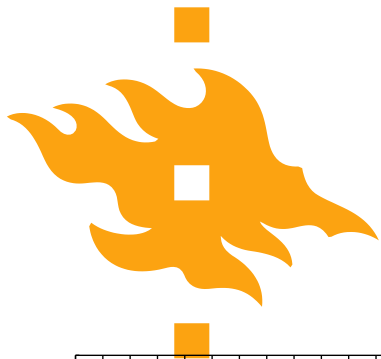


# Tähtipopulaatiot ytimessä

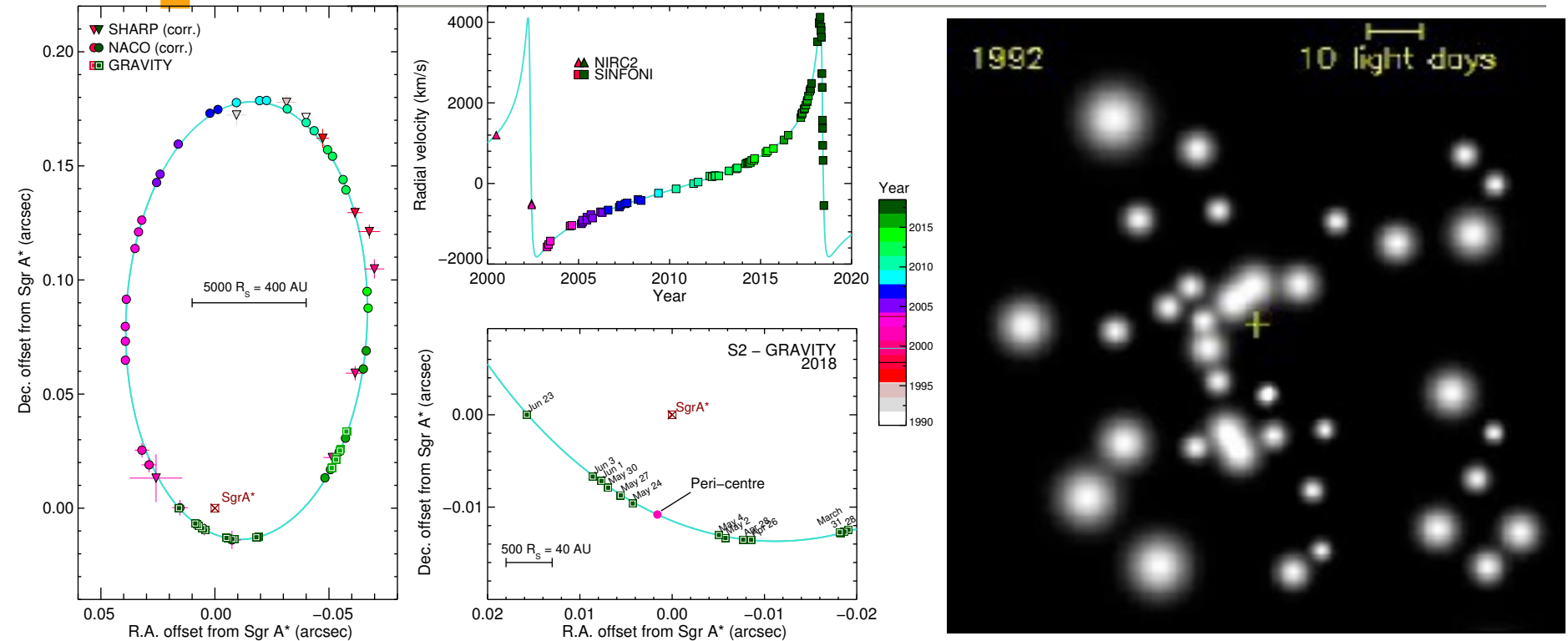
- Aivan Linnunradan ytimessä,  $\sim 0.5$  pc sisäpuolella sijaitsee tähtijoukko, jonka jäseninä on nuoria ja hyvin massiivisia tähtiä ( $M \sim 3-30 M_{\odot}$ ).
- Tähtien ikä on noin 10 miljoonaa vuotta, joten galaksin ytimessä on tapahtunut varsin hiljattain tähtiensyntyä.
- Nuorten tähtien lisäksi ytimessä on myös vanhempia pienempimassaisia tähtiä ja yleinen tähtitiheys on luokkaa  $\geq 10^6$  tähteä/ $\text{pc}^3$  (vrt. Auringon lähellä  $0.1$  tähteä/ $\text{pc}^3$ ).



Kirkkaita tähtiä Linnunradan ytimessä



# Mustan aukon massa (Fysiikan Nobelin palkinto 2020)

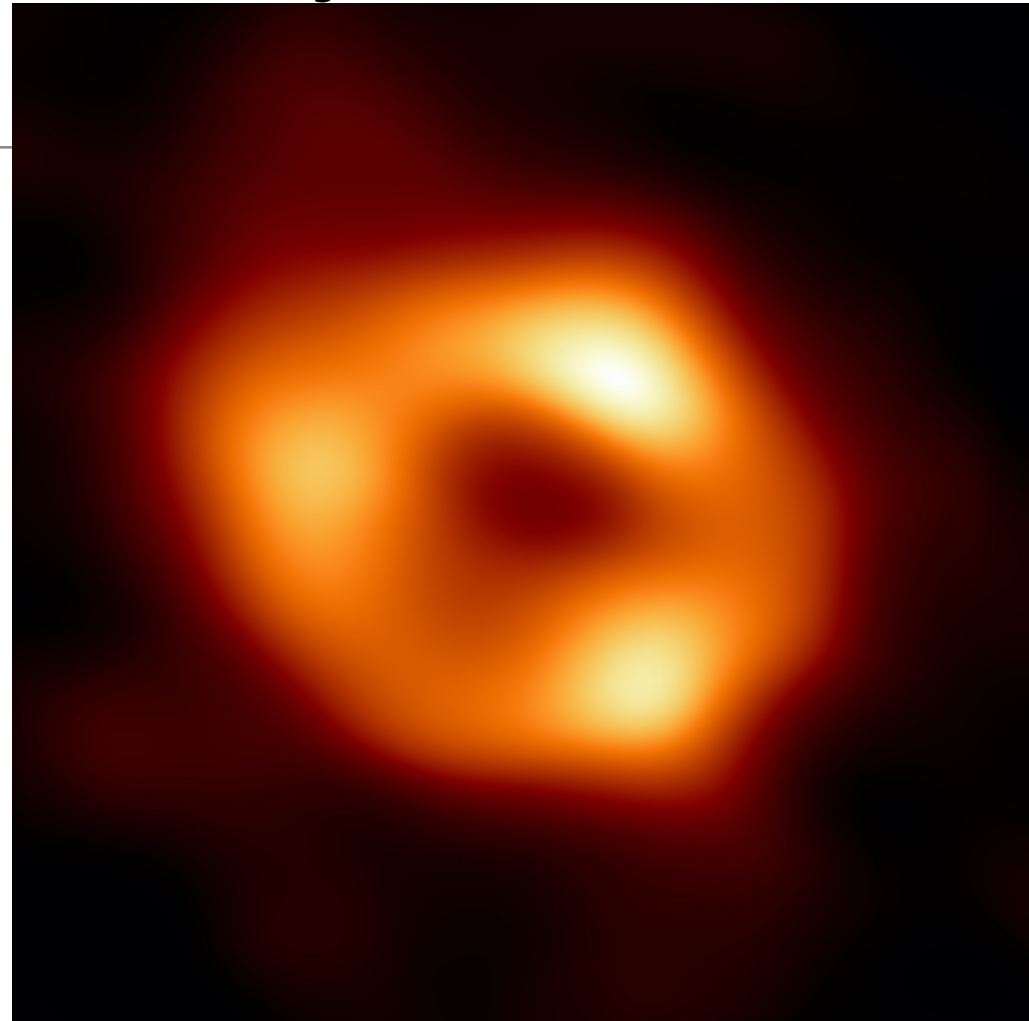


- Linnunradan ytimessä olevan mustan aukon massaksi on määritetty arvo  $M_{\text{BH}} = 4.3 \times 10^6 M_{\odot}$  havaitsemalla tähtien liikkeitä lähellä Sgr A\*:ta.



# Suora havainto Linnunradan mustan aukon varjosta

- Keväällä 2022 Event Horizon Telescope kolloboraatio julkaisi ensimmäisen suoran kuvan Linnunradan keskuksen mustan aukon varjosta.
- Havaintojen analysointi hyvin vaativaa, säteily mustan aukon lähellä muuttuu ~10 minuutin aikaskaalalla.
- Havainnoista voidaan määrätä mustan aukon massa ja sen orientaatio, havaitsemme mustaa aukkoa aika lailla päältä päin pyörimisakselin suuntaisesti.

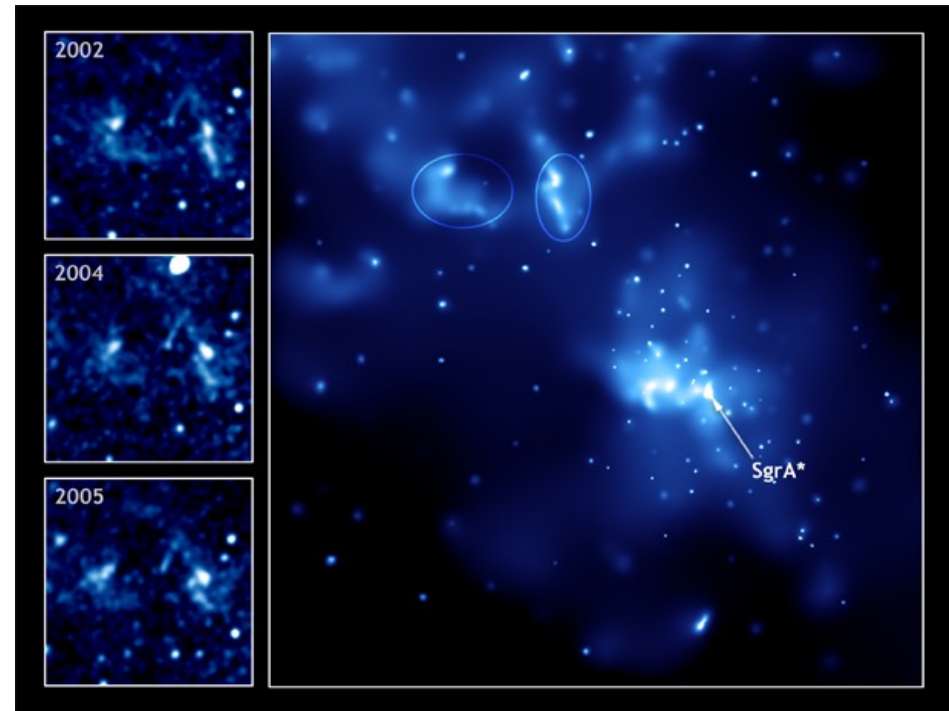


Event Horizon Collaboration



# Mustan aukon aktiivisuus

- Linnunradan musta aukko on tällä hetkellä erittäin inaktiivinen ja sen luminositeetti vastaa vain noin  $L=2500 L_{\odot}$ .
- Musta aukko säteilee miljoonia kertoja alle maksimiluminositeetin (=Eddingtonin luminositeetti).
- Mustan aukon aktiivisuus vaihtelee voimakkaasti ajan funktiona ja aukon aktiivisuuden historiaa voidaan tutkia 'valokaikujen' avulla.



Havaittuja 'valokaikuja' Linnunradan mustan aukon ympärillä.



# Mitä opimme?

1. Sykkivissä muuttujissa täytyy olla ionisoituneen vedyn tai heliumin kerros, jonka opasiteetti kasvaa lämpötilan funktiona. Tähdet sykkivät 'höyrykoneen' lailla, maksimikirkkaus kun tähden säde  $R$  on pienimmillään.
2. Pallomaiset tähtijoukot ovat hyvin vanhoja ja tiiviitä. Ne sijaitsevat suurilla etäisyyksillä Linnunradan halossa ja niissä ei ole pimeää ainetta.
3. Tähtitiheys Linnunradan halossa 100 kertaa pienempi kuin Auringon ympäristössä. Hyvin vanhoja tähtiä ja nopeasti liikkuvia kaasupilviä.
4. Linnunradan keskustassa sijaitsee keskuspullistuma, jossa on vanhoja verrattain korkean metallipitoisuuden tähtiä. Linnunradalla on myös varsin laaja sauvarakenne.
5. Linnunradan ytimessä sijaitsee supermassiivinen musta aukko, jonka massa on noin 4 miljoonaa Auringon massaa. Aukko on tällä hetkellä poikkeuksellisen inaktiivinen.