



Tähtienvälinen aine

Linnunrata

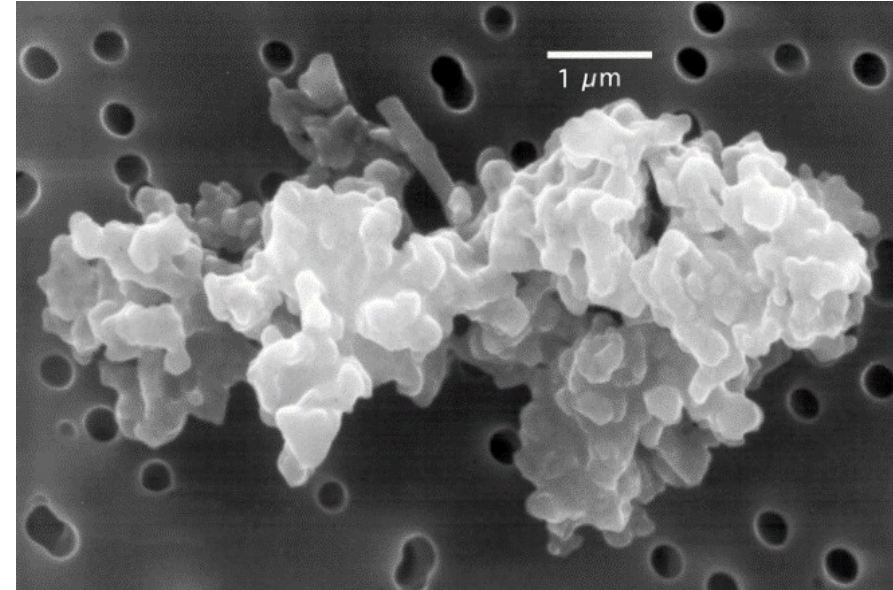
Galaksit

# Tähtienvälinen aine

- Tähtienvälinen avaruus ei ole täysin tyhjää
- Koostuu:
  - Kaasusta (yksittäisiä atomeja/molekyylejä), 99% massasta
    - Pääosin säteilylle ”läpinäkyvää”, tutkittu mm. vedyn 21 cm viivan kautta
  - Pölystä (molekyylien muodostamia suurempia hiukkasia), 1%
    - Aiheuttaa vahvaa ekstinktiota, eli peittää takanaan olevia kohteita näkyvistä
- Aurinkokunnan sisällä planeettojenvälisen aineen tiheys kymmeniä hiukkasia/cm<sup>3</sup>
- Tähtienvälisen kaasun tiheys keskimäärin n. 1 atomi/cm<sup>3</sup>
- Galaksienvälisen kaasun tiheys keskimäärin n. 1 atomi/m<sup>3</sup>
- Tähtienvälisissä kaasu/pölypilvissä tiheys selvästi suurempi

# Tähtienvälinen pöly

- Valtaosa tähtienvälisestä pölystä on hiilestä tai silikaateista (SiO) muodostuvia hiukkasia, joiden koko vaihtelee muutamista molekyyleistä mikrometreihin
- Pöly estää säteilyä kulkemasta tehokkaammin kuin kaasu => tiheiden, pimeiden pölypilvien sisällä erittäin kylmää => kylmä pöly ja kaasu luhistuu helpommin uusiksi tähdiksi
  - Tärkeää myös planeettojen synnyn kannalta
- Pölyhiukkasia muodostuu punaisten jättiläistähtien ulko-osissa sekä supernovissa, mistä ne leviävät avaruuteen tähtituulten ja supernovajäänteiden mukana
  - Kylmissä tähtienvälisissä pilvissä pölyhiukkaset takertuvat toisiinsa ja kasvavat suuremmiksi



Planeettojen välisen pölyn hiukkanen.  
Kuva: Donald E. Brownlee, Elmar Jessberger

# Erilaisia kaasupölypilviä

- Kaasupilvessä kaasu tiheämpää kuin muualla galaksissa, noin 10-100 atomia/cm<sup>3</sup>
- Tähtiensyntyalueet (suuret molekyylipilvet ja pienemmät Bokin globulit)
- Heijastussumut
  - Heijastavat läheisten tähtien valoa
- Emissiosumut (HII-alueet, emittoivat eli säteilevät omaa valoa)
  - Läheiset tähdet ionisoivat kaasua, joka siten säteilee valoa
  - Planetaariset sumut (kevyiden tähtien jäänteet)
  - Supernovajäänteet
- Pimeät sumut
  - Eivät välttämättä näy muuten kuin peittäen takanaan olevia tähtiä näkyvistä
  - Tiheitä pölypilviä, mahdollisesti tulevia tähtiensyntyalueita
- Heikommat rakenteet, tähtienvälinen cirrus



"Jumalan sormeksi" nimitetty pieni pimeä sumu, Bokin globuli, jonka sisällä luultavasti tulee syntymään muutamia tähtiä. NASA, ESA, N. Smith (University of California, Berkeley), and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).



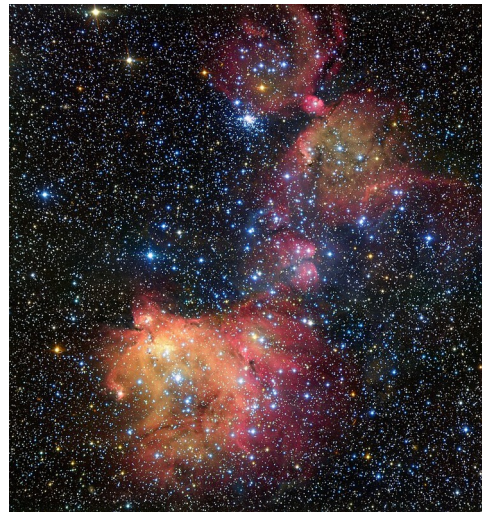
Kotkasumun sisältä löytyvät Luomisen pilarit on tunnetuimpia tähtienvälisen aineen muodostelmia, jonka sisällä luultavasti tapahtuu tähtien syntyä. Kuva: Hubble



Hevosenpääsumu on tunnettu pimeä sumu. Kuva: ESO

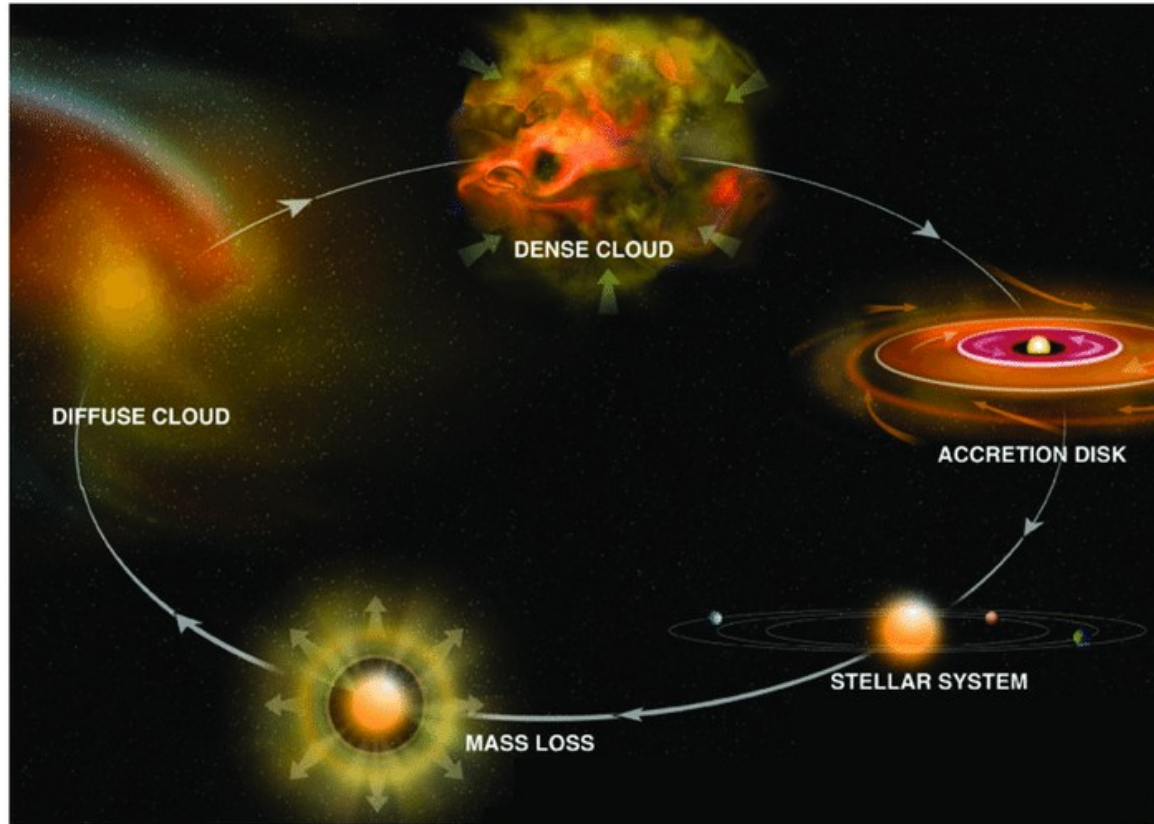


Heijastussumu M78 heijastaa kahden B-luokan tähden valoa. Kuva: ESO/Igor Chekalin



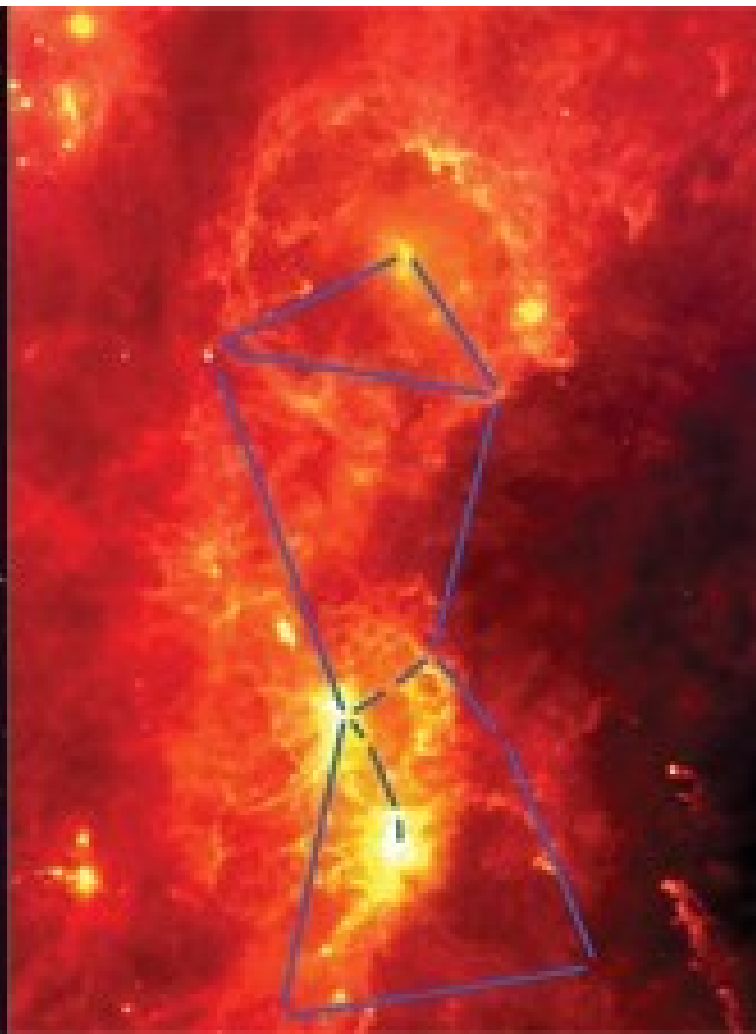
Naapurigalaksissa Suuressa Magellanin Pilvessä sijaitseva emissiosumu LHA 120-N55. Kuva: ESO

# Aineen kiertokulku

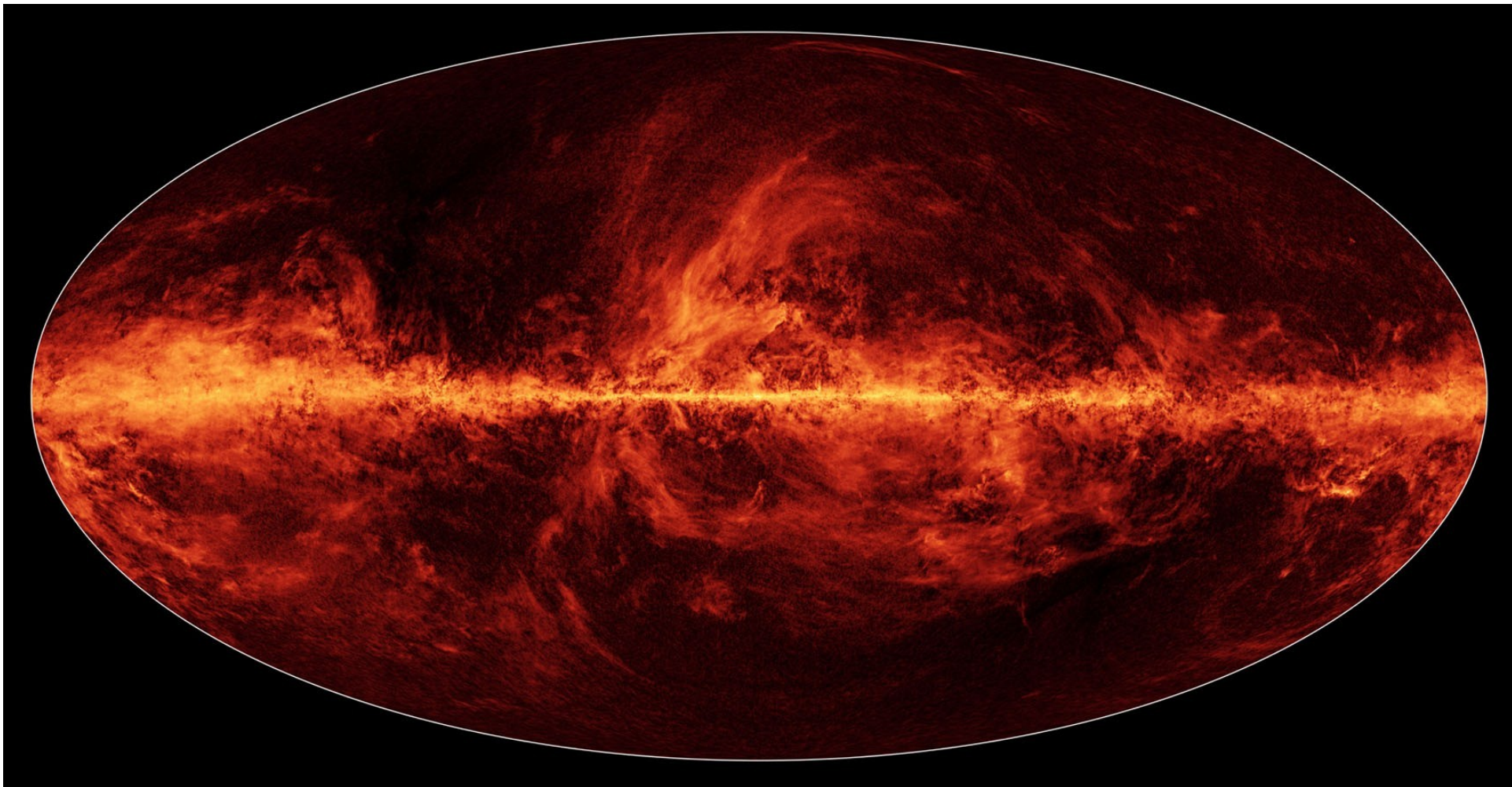




Maailmankaikkeus nyt 2026



Orion nähtynä näkyvässä valossa ja infrapunassa.  
Kuvat Akira Fujii & NASA



Koko taivaan kartta tähtienvälisestä pölystä. Pöly on keskittynyt kaikista voimakkaimmin Linnunradan tasoon.  
Kuva ESA/NASA/JPL-Caltech Maailmankaikkeus nyt 2026

# Linnunrata



Bruno Gilli/ESO

Maailmankaikkeus nyt 2026

# Linnunrata

- Sauvaspiraaligalaksi – keskuspullistuman ympärillä sauvat jotka yhdistävät spiraalihaarojen tyviä
- Kiekon halkaisija 30 kpc (100 000 valovuotta)
- Kiekon paksuus 300 pc (1000 valovuotta)
- Tähtiä noin 400 miljardia
- Auringon etäisyys keskustasta noin 8.5 kpc (28 000 valovuotta)
- Auringon kierros galaksin ympäri kestää noin 220 miljoonaa vuotta
- Kiekon ympärillä kuumasta ja harvasta kaasusta sekä pallomaisista tähtijoukoista koostuva pallomainen halo
- Kaiken ympärillä pimeän aineen halo

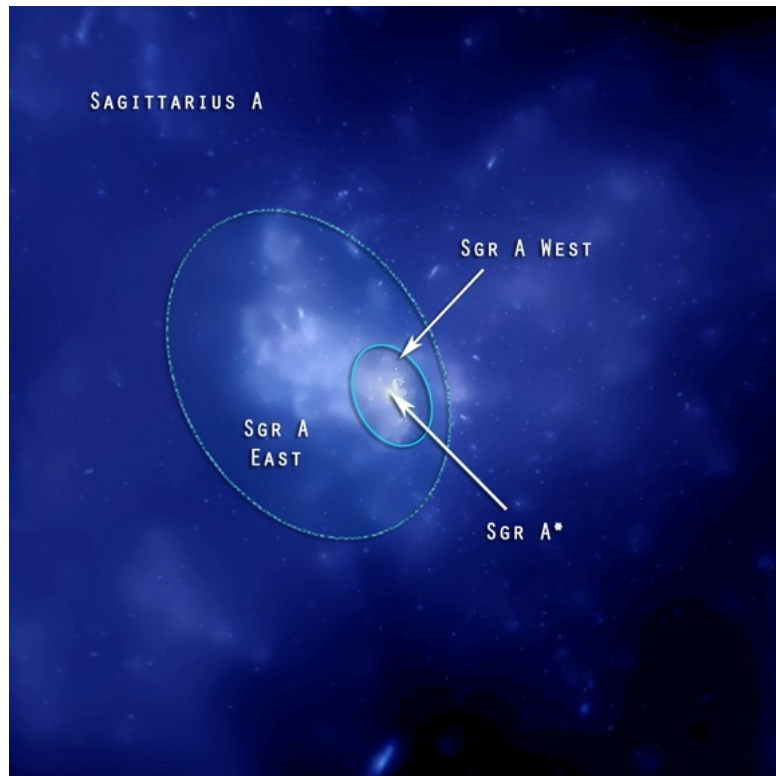


Pablo Carlos Budassi

# Keskusta: Sagittarius A



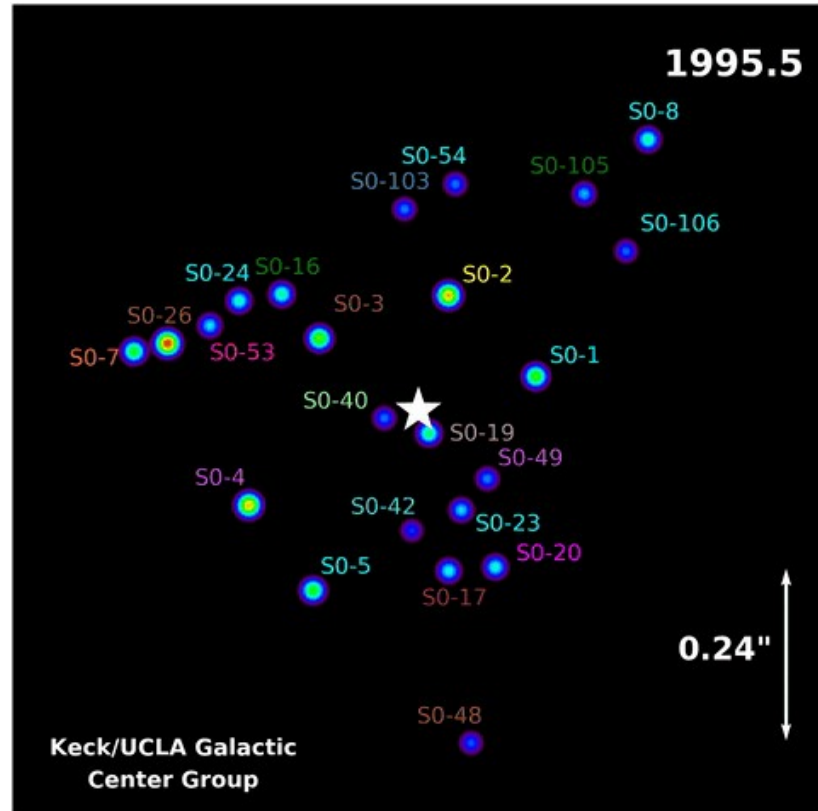
Linnunradan keskusalueet infrapunassa. Keskellä kuvaa näkyvä kirkas alue sisältää kirkkaan radiosäteilijän, Sagittarius A:n. Kuva: Nasa / JPL-Caltech / S. Stolovy (SSC/Caltech)



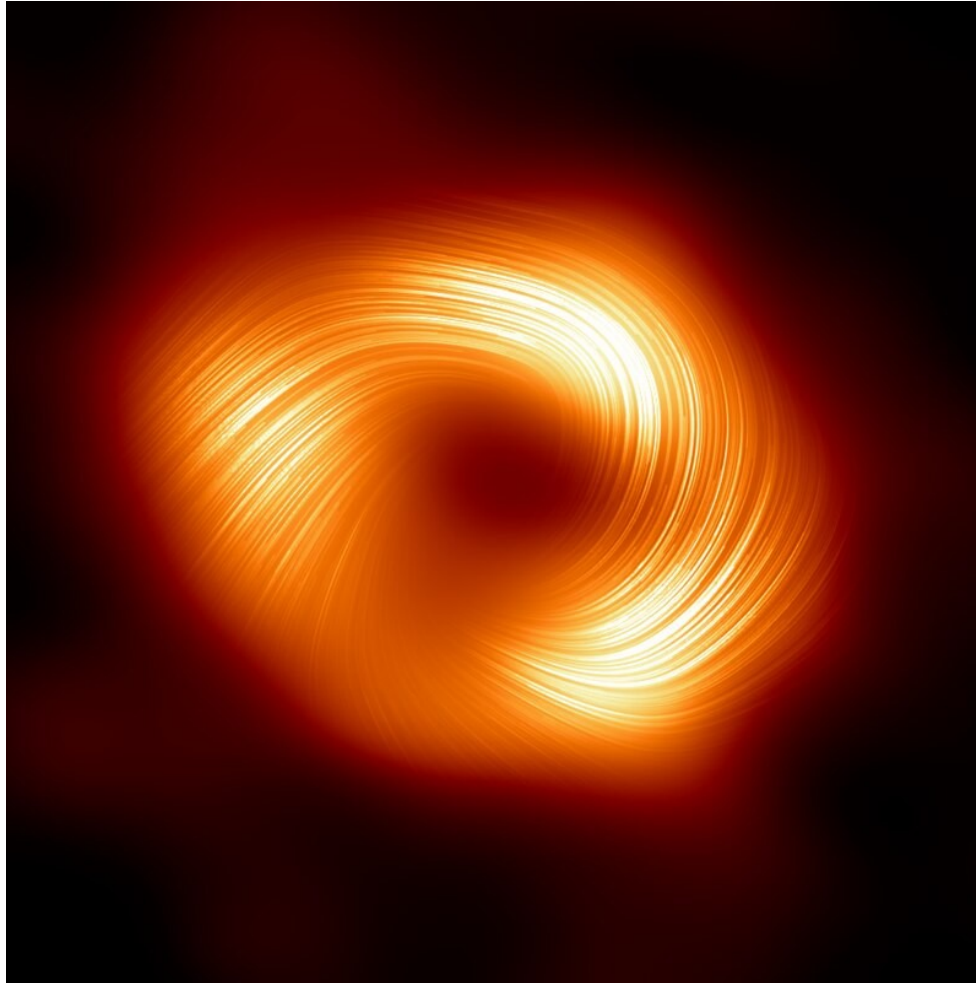
Sgr A:n sisältä löytyy kolme erillistä kohdetta: vanha supernovajäännös Sgr A East, nuorten, kirkkaiden tähtien ja kaasupilvien muodostama rakenne Sgr A West, sekä kirkas pistemäinen radiolähde Sgr A\*.

Maailmankaikkeus nyt 2026

# Sagittarius A\*



- Kirkkaan radiolähteen ympäristössä tähdet näyttävät kiertävän näkymätöntä, massiivista kappaletta
  - Keplerin lakeja soveltaen voidaan päätellä, että hyvin pienelle alueelle on keskittynyt noin 4 miljoonaa  $M_{\odot}$ : supermassiivinen musta aukko ainoa järkevä selitys
- Tapahtumahorisontin koko noin 0.08 AU



Maailmankaikkeus nyt 2026

# Linnunradan tulevaisuus

- Mahdollinen törmäys Andromedan galaksin kanssa: noin 50% todennäköisyys tapahtua seuraavan 10 miljardin vuden sisällä: jos törmäys tapahtuu, tulevat Linnunrata ja Andromeda luultavasti muodostamaan jättiläsellipsigalaksin
  - Pienempiä kääpiögalakseja törmää isompiin galakseihin jatkuvasti



# Galaksitörmäykset

- Tähdet ovat suhteessa kokoonsa todella kaukana toisistaan, mutta galaksit paljon lähempänä, joten galaksien väliset törmäykset ovat suhteellisen yleisiä



Antennigalaksit ovat esimerkki törmäävistä galakseista.  
Kuva: ESA/Hubble

# Galaksit

- Havaittava maailmankaikkeus sisältää satoja miljardeja isoja galakseja ja biljoonia kääpiögalakseja
  - Arvioiden mukaan noin  $10^{24}$  tähteä
- Galaksit koostuvat tähdistä, kaasusta ja pölystä, jotka ovat kasaantuneet pimeän aineen haloon
  - Galaksit koostuvat siis ensisijaisesti pimeästä aineesta, näkyvä galaksi pimeän aineen halon keskellä on vain pieni osa
  - Pallomaisilla tähtijoukoilla ei ole pimeän aineen haloa (erotuksena kääpiögalakseista)
- Suurimmat galaksit sisältävät biljoonia tähtiä, kääpiögalaksit ehkä vain miljoonia
  - Linnunradan pienimmät seuralaisgalaksit sisältävät väitetyksi vain kymmeniä tähtiä (mutta silti massiivisen pimeän aineen halon)

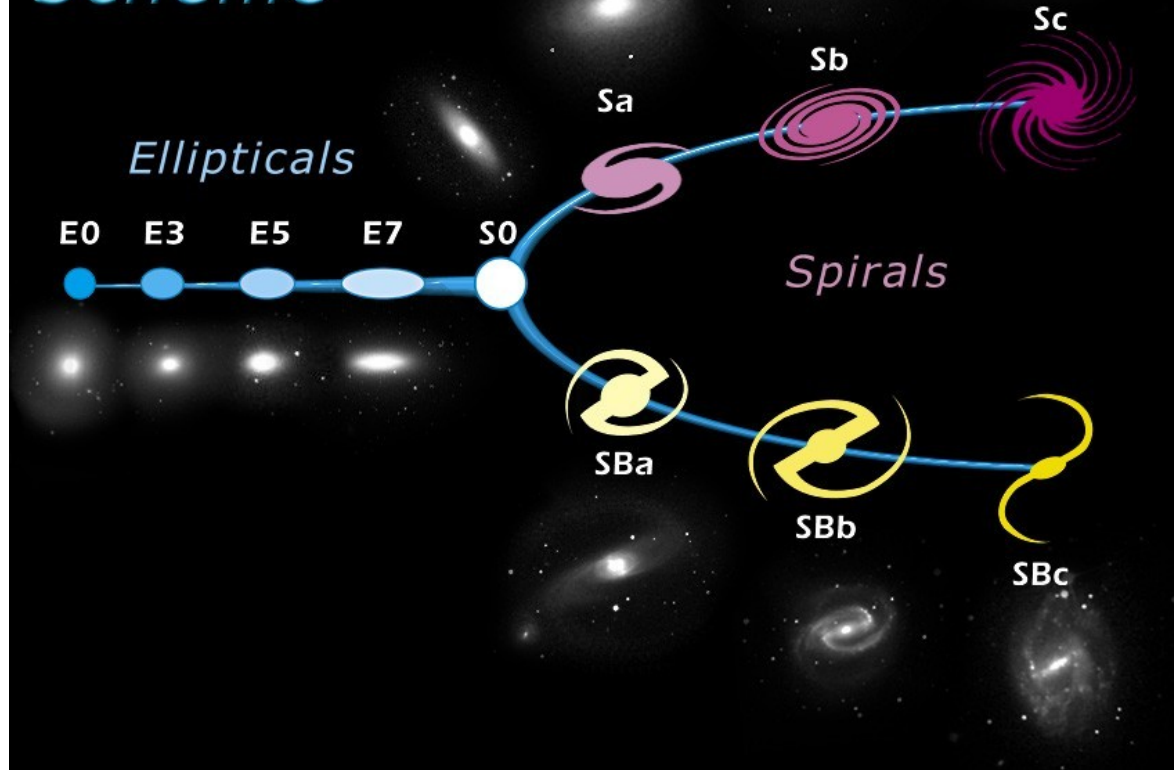
# Galaksiluetteloita

- Messierin luettelo (M1, M2...)
  - 110 Charles Messierin 1700-luvun lopulla luetteloimaa kohdetta (galakseja sekä tähtijoukkoja ja kaasusumuja)
  - Messier etsi komeettoja ja teki luettelon kohteista, jotka saattavat mennä sekaisin komeettojen kanssa
- NGC (New General Catalogue)
  - 7840 galaksia, tähtijoukkoa ja kaasusumua
  - IC (Index Catalogue): 5386 kohdetta lisätty NGC-luetteloon
- UGC (Uppsala General Catalogue)
  - 12921 galaksia
- PGC (Principal Galaxies Catalogue)
  - 73197 galaksia

# Galaksien luokittelu

- Edwin Hubble'n galaksiluokittelu 1920-luvulta yhä käytössä
- Pääluokat: spiraali- ja ellipsigalaksit
  - Ellipsigalaksit jaotellaan niiden elliptisyyden mukaan
  - Spiraaligalaksit jaetaan sauvallisiin ja sauvattomiin, sekä edelleen spiraalihaarojen tiiviiden ja keskuspullistuman voimakkuuden mukaan
- Spiraali- ja ellipsigalaksien välissä linssigalaksit
- Lisäksi epäsäännöllisten galaksien luokka, joka jää varsinaisen luokittelun ulkopuolelle
- Hubble'n luokittelu soveltuu suurille galakseille, kääpiögalakseille huonommin

# Edwin Hubble's Classification Scheme



# Spiraaligalaksit

- Noin puolet lähiavaruuden (isoista) galakseista on spiraaligalakseja
- Keskuspulistuma
  - Pääosin vanhoja tähtiä epäsäännöllisillä radoilla
  - Sauvaspiraaleilla (noin 2/3 spiraaligalakseista) sauvat keskuspulistuman ympärillä
    - Sauva luultavasti epävaka, toistuva rakenne
- Kiekko, spiraalihaarat
  - Koko kiekko pyörii samansuuntaisesti, tähdet samassa tasossa, pyöreähköillä radoilla
  - Kaasua, pölyä, nuoria tähtiä, tähtien syntyä
  - Spiraalihaarat muodostuvat mahdollisesti tiheysaaltona, joka pyörii riippumattomasti galaksin materiasta

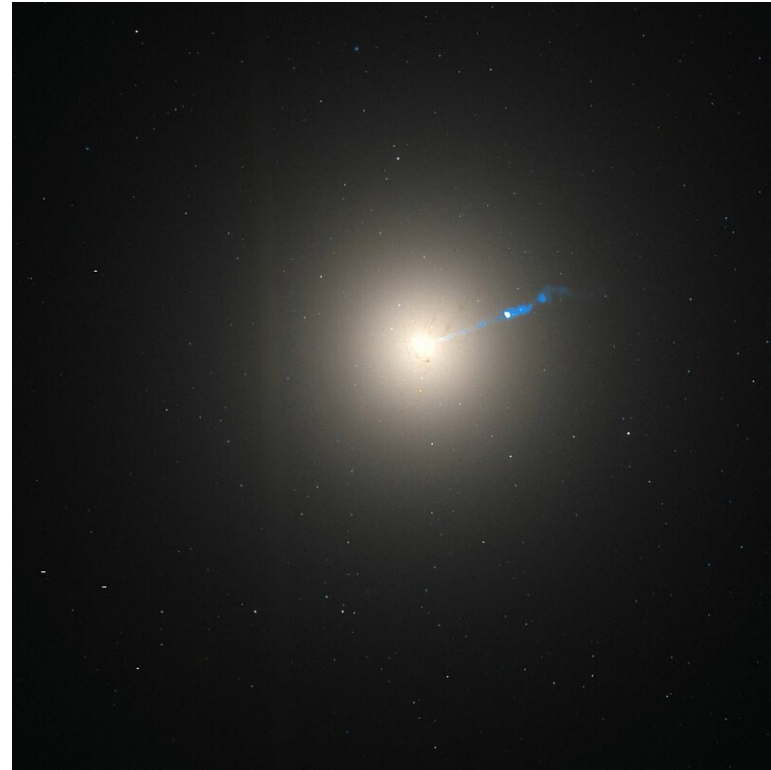


Tuulimyllygalaksi M101 on näyttävä spiraaligalaksi. NGC 1300 on selkeä esimerkki sauvaspiraaligalaksista. Kuvat: NASA/ESA/Hubble



# Ellipsigalaksit

- Noin 15% lähiavaruuden (isoista) galakseista
- Koostuvat pääosin vanhoista tähdistä, vain vähän kaasua, pölyä tai tähtien syntyä
- Tähdet kiertävät satunnaisilla radoilla, ei yhtenäistä pyörimisliikettä
  - Muistuttavat spiraaligalaksien keskuspullistumia
- Kaikista suurimmat galaksit kaikki ellipsejä
  - Mahdollisesti syntyneet spiraaligalaksien yhteentörmäyksissä



M87 on jättiläisellipsigalaksi. Galaksin keskustan supermassiivisesta mustasta aukosta lähtee pitkä suihku. Kuva: NASA

# Linssigalaksit

- Noin 20% lähiavaruuden (isoista) galakseista
- Kiekko sekä mahdollinen keskuspullistuma, joskus jopa sauvat, mutta ei spiraalihaaroja
- Yhteneväinen pyörimisliike
- Vain vähän kaasua ja pölyä



Linssigalaksi NGC 4866. Kuva: ESA/Hubble, NASA & Gilles Chapdelaine

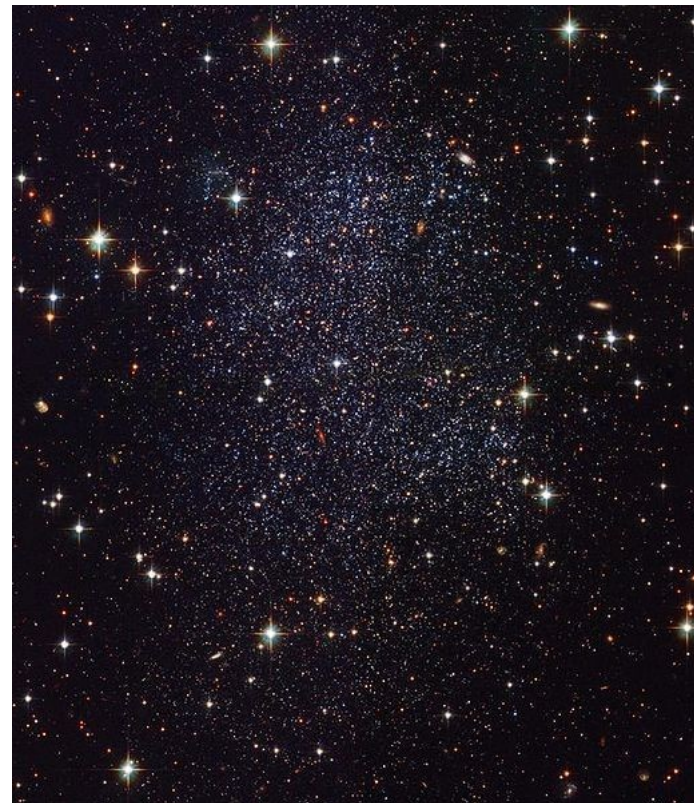
# Epäsäännölliset galaksit

- Suuri osa (lähiavaruudessa noin 15%) galakseista ei sovi mihinkään edellisistä luokista
- Yleensä kooltaan melko pieniä



# Kääpiögalaksit

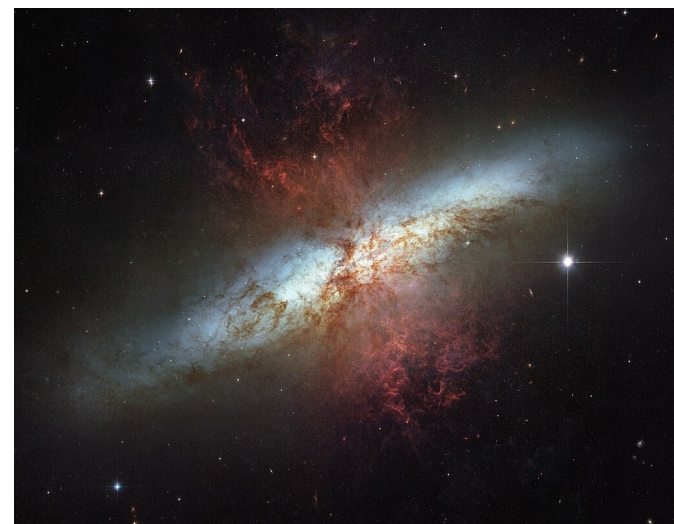
- Pienimmissä kääpiögalakseissa vain joitain tuhansia tähtiä
  - Linnunradan lähimmäksi arveltu seuralaisgalaksi Ursa Major III sisältää väitetyesti vain 60 tähteä
- Sisältävät kuitenkin paljon enemmän pimeää ainetta, jopa tuhansia kertoja enemmän kuin näkyvää ainetta
- Sisältävät usein hyvin vähän metalleja
  - Koostumus samankaltainen kuin varhaisessa maailmankaikkeudessa



# Aktiiviset galaksit

- Tähtiryöppygalaksit (voimakasta tähtien syntyä, yleensä galaksitörmäyksen tai lähiohituksen vaikutuksesta)
- Aktiiviset galaksinytimet: joidenkin galaksien ytimet lähettävät äärimmäisen voimakasta säteilyä
  - Supermassiiviseen mustaan aukkoon putoaa ainetta, joka säteilee voimakkaasti
- Seyfert-galaksit
  - Aktiivisia spiraaligalakseja
- Radiogalaksit
  - Aktiivisia ellipsigalakseja
- Kvasaarit
  - Kaikista aktiivisimmat galaksinytimet. Supermassiivisesta mustasta aukosta lähtee valtavat suihkut. Pistemäisenä näkyviä kaukaisia, mutta äärimmäisen kirkkaita kohteita; "Quasi-stellar object"
- Blasaarit
  - Kvasaari, jonka suihku on suuntautunut suoraan Maata kohti
- Kohteen luokittelu saattaa riippua siitä, mistä suunnasta sitä havaitaan!
- Suurella osalla galakseista saattanut joskus olla aktiivinen vaihe, nykymaailmankaikkeudessa harvinaisia

Maailmankaikkeus nyt 2026



M82 on epäsäännöllinen tähtiryöppygalaksi. NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)



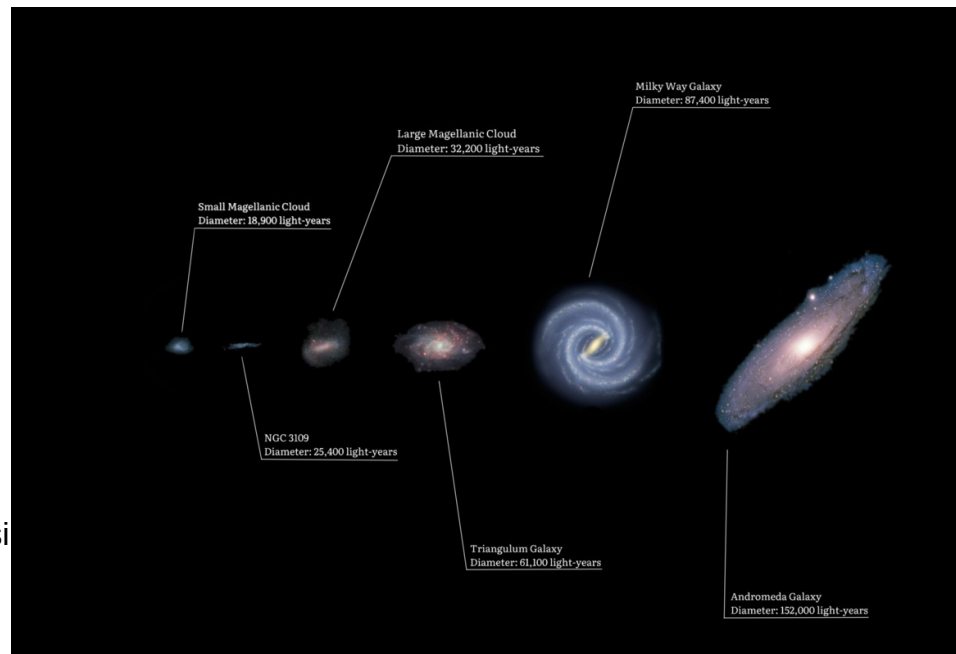
Taiteilijan näkemys kvasaarista. ESO/M. Kornmesser

# Supermassiiviset mustat aukot

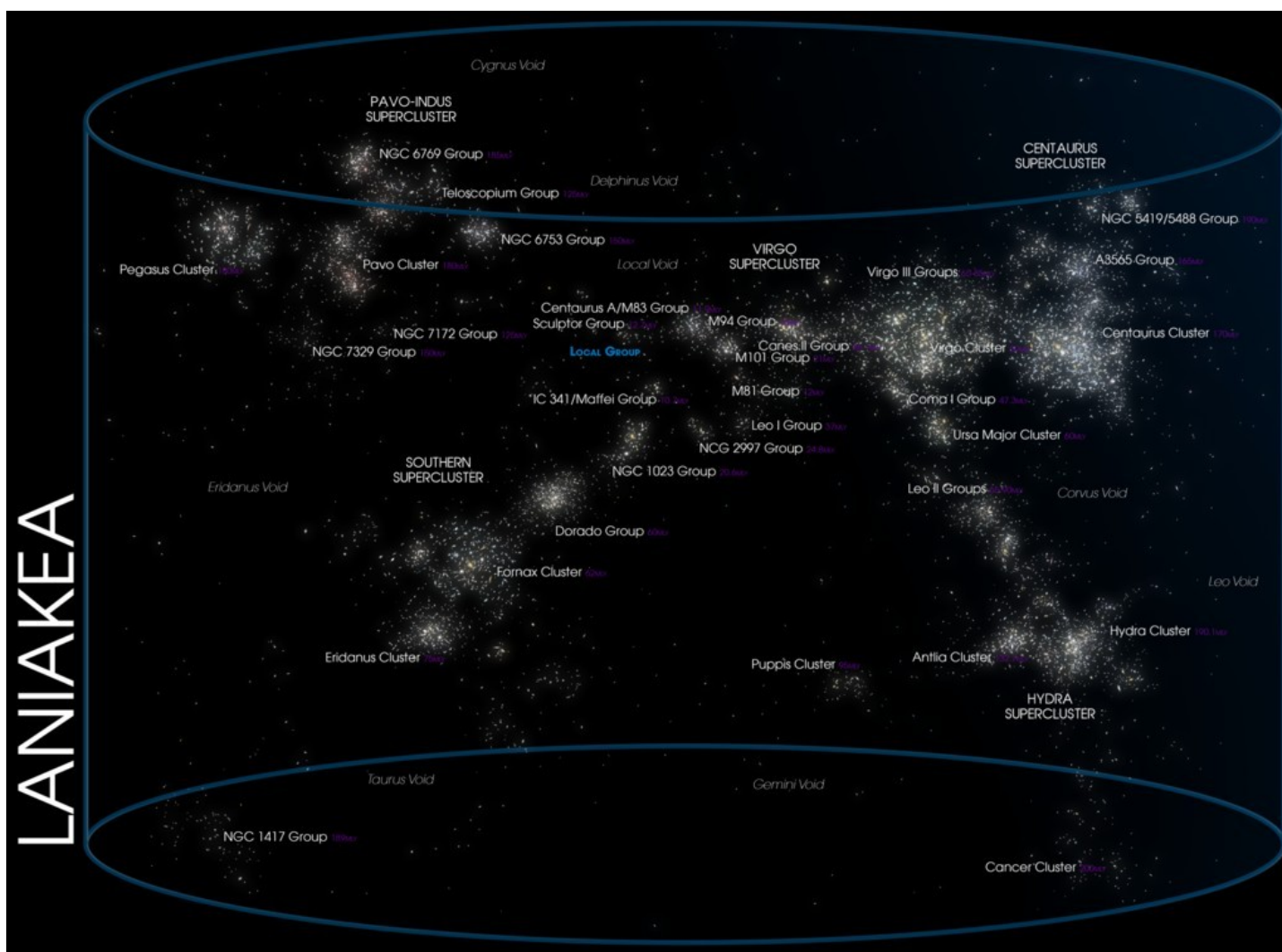
- Luultavasti ainakin kaikkien suurten galaksien ytimessä supermassiivinen musta aukko
- Massa satoja tuhansia – kymmeniä miljardeja  $M_{\odot}$ 
  - Mitä suurempi galaksi, sitä suurempi musta aukko (yleensä)
    - Linnunradan 4 miljoonaa  $M_{\odot}$ , suhteellisen pieni näinkin suurelle galaksille
  - Suurimpia tunnettuja mm. (massiivisimmat tunnetut yksittäiset kappaleet):
    - Kvasaarissa Ton 618, 66 miljardia  $M_{\odot}$ , tapahtumahorisontin leveys 1300 AU
    - Seyfertin galaksissa Phoenix A, mahdollisesti jopa 100 miljardia  $M_{\odot}$ , tapahtumahorisontin leveys 2000 AU
- Hyvin kaukaisissa kvasaareissa, eli nuorissa varhaisen maailmankaikkeuden kohteissa, jo hyvin massiivisia mustia aukkoja: kasvaneet siis todella nopeasti varhaisessa maailmankaikkeudessa

# Paikallinen galaksiryhmä

- Linnunrata ja lähigalaksit muodostavat Paikallisen galaksiryhmän, johon kuuluvat:
- Linnunrata
  - Kymmeniä seuralaisgalakseja, mm. Suuri ja Pieni Magellanin pilvi
- Andromedan galaksi (M31)
  - Kymmeniä seuralaisgalakseja, mm. M32 ja M110
  - Etäisyys 765 kpc (2.5 miljoonaa valovuotta)
- Kolmion galaksi (M33)
- Kymmeniä pienempiä galakseja, yhteensä vähintään 80
  - Mahdollisesti suuri määrä himmeitä kääpiögalakseja vielä löytämättä, simulaatioiden perusteella suurilla galakseilla tulisi olla enemmän seuralaisia kuin mitä tunnetaan
- Läpimitta 3 Mpc (10 miljoonaa valovuotta)
- Osa Neitsyen superjoukkoa, joka vielä osa Laniakean superjoukkoa, johon kuuluu noin 100 000 galaksia ja jonka koko on noin 160 Mpc (520 miljoonaa valovuotta)

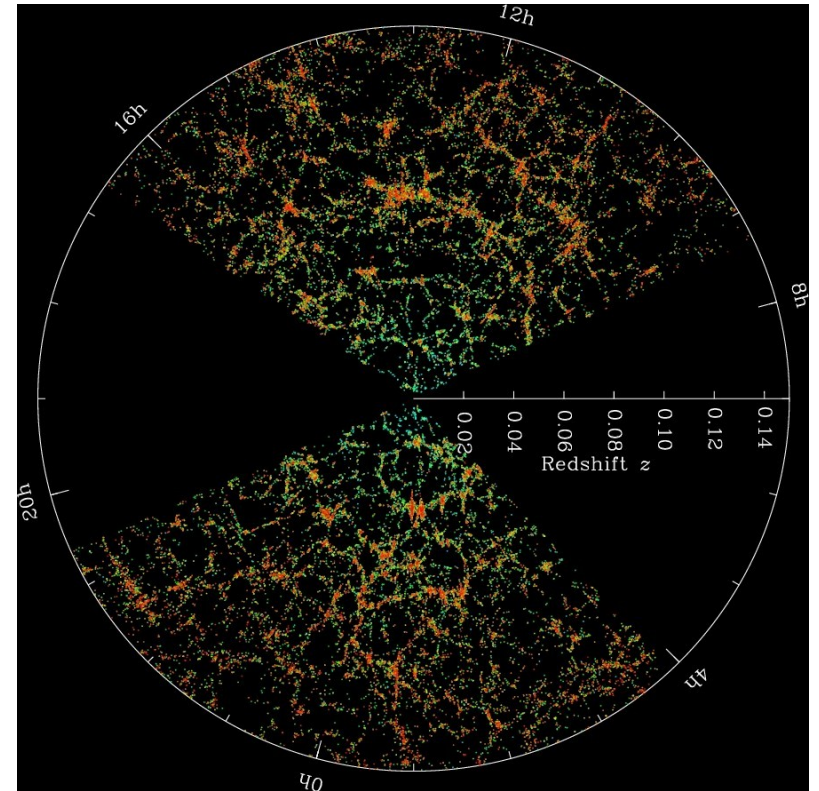


Paikallisen ryhmän suurimpia galakseja: Andromeda, Linnunrata, Kolmion galaksi, Suuri Magellanin Pilvi, NGC 3109, Pieni Magellanin Pilvi. Kuva: SkyFlubler



# Suurimmat rakenteet

- Suurilla mittakaavoilla galaksien superjoukot muodostavat tasaisen oloisen rihmaston, joka täyttää universumin
- Galaksijoukkojen väliin jää suuria tyhjiä alueita
- Kosmologinen periaate: suurilla mittakaavoilla maailmankaikkeus on homogeeninen ja isotrooppinen (eli samankaltainen kaikkialla ja joka suunnassa)



Maailmankaikkeus nyt 2026

Sloan Digital Sky Surveyn löytämät galaksit Linnunradan molemmin puolin. Kaukaisimmat galaksit ulkokehällä ovat meistä noin 2 mrd valovuoden etäisyydellä.  
Kuva M. Blanton ja the Sloan Digital Sky Survey

# Etäisyyden määrittäminen

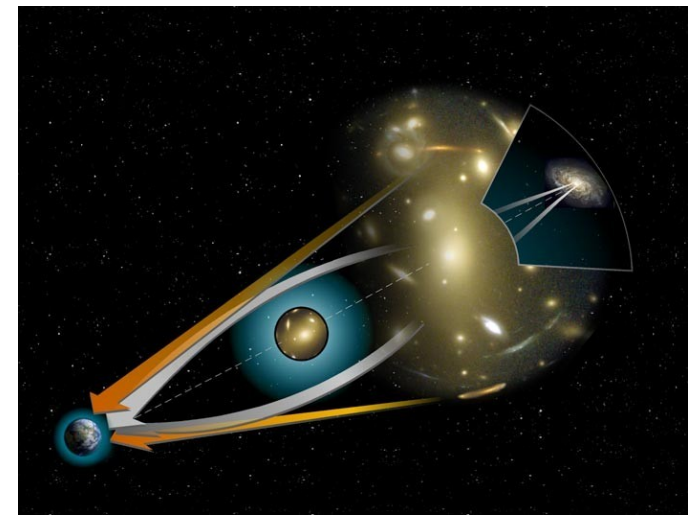
- Miten kaukaisten kohteiden etäisyys voidaan mitata?
- Aurinkokunta: suoria mittauksia, esim. luotainten lähettämien signaalien viiveen perusteella
- Parallaksi: toimii muutamien kymmenien tuhansien valovuosien päähän (galaktinen lähiseutu)
- ”Standardikynttilät”: kohteet, joiden todellinen kirkkaus tunnetaan
  - Kefeidit: sykkiviä tähtiä, joiden kirkkaus muuttuu tunnetulla tavalla ja joiden valokäyrästä voidaan päätellä niiden kirkkaus – 20 miljoonaa valovuotta (lähigalaksit)
  - Ia supernovat – 8 miljardia valovuotta
- Kosmologinen punasiirtymä  $z$ 
  - Universumi laajenee: mitä kaukaisempi kohde, sitä nopeammin se etääntyy, ja sitä enemmän sen valo punasiirtyy
  - $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$  (missä  $\lambda$  on kohteen säteilyn havaittu ja  $\lambda_0$  alkuperäinen aallonpituus)
- Hubblen vakio: miten nopeasti maailmankaikkeus laajenee?
  - Kosminen mikroaaltotausta: 67 km/s/Mpc
  - Supernovamittaukset: 74 km/s/Mpc
  - Hubblen vakion käänteisluku tunnetaan Hubblen aikana: 14.4 mrd vuotta (jos universumi laajenis tasaisella nopeudella, olisi se tämän ikäinen)

# Galaksien synty ja kehitys

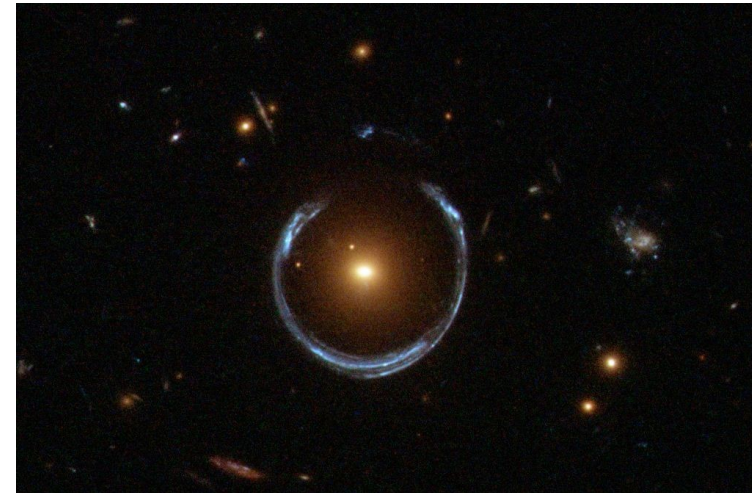
- Varhaisessa maailmankaikkeudessa gravitaatio veti ainetta kasaan
- Näkyvä aine oli kuumaa eikä kasaantunut yhtä tehokkaasti kuin pimeä aine, pimeä aine myös runsaampaa => galaksit alkoivat muodostua valmiisiin pimeän aineen rakenteisiin
  - Ilman pimeää ainetta galaksit eivät olisi vieläkään ehtineet muodostua nykyisen kaltaisiksi
- Epäsäännölliset galaksit yleisempiä varhaisessa maailmankaikkeudessa => spiraalit kehittyneet ajan myötä, ellipsigalakseja syntynyt galaksitörmäyksissä?

# Gravitaatiolinssit

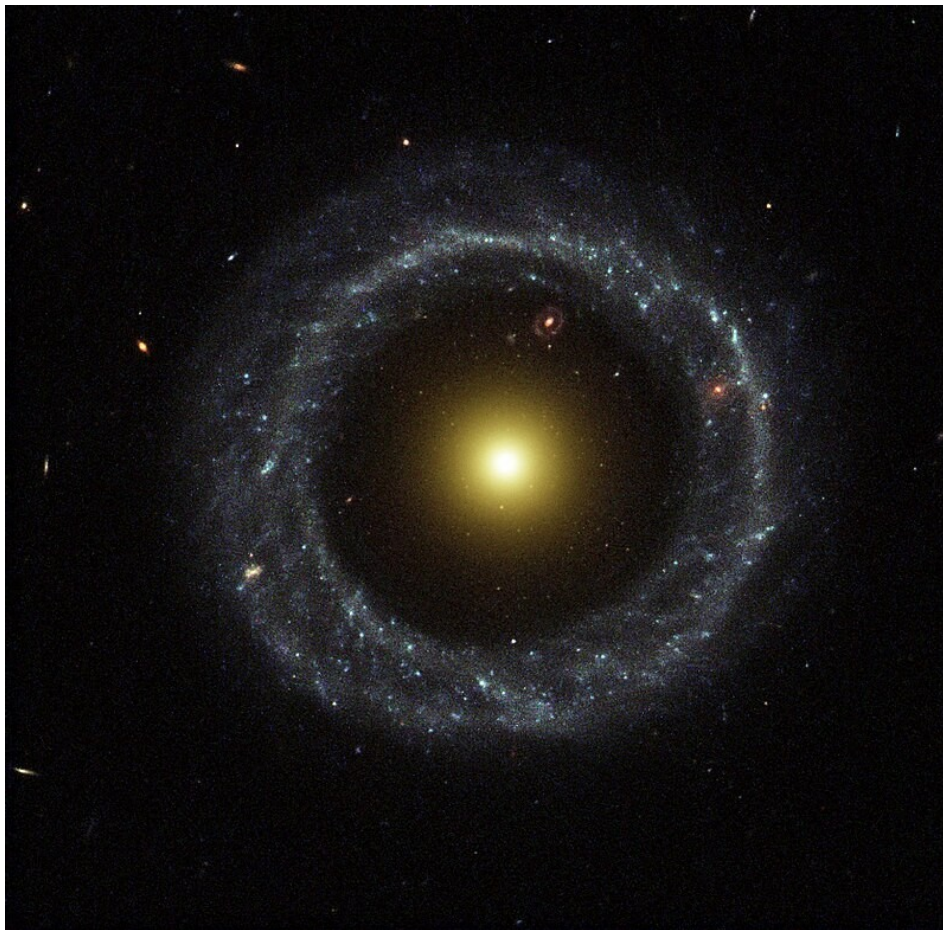
- Yleisen suhteellisuusteorian ennustama ilmiö: valo taipuu voimakkaassa gravitaatiokentässä
- Suuren galaksin/galaksijoukon takana olevan kohteen valo leviää etualan kohteen ympärille
  - Einsteinin rengas/risti
- Mahdollistaa linssinä toimivan kohteen massan (myös näkymättömän) jakauman tutkimisen
- Mikrolinssit: pienemmätkin kohteet (kuten tähdet) vaikuttavat valon kulkuun, mutta eivät riittävästi jotta taustakohteen sijainti näyttäisi muuttuvan – taustakohte saattaa kuitenkin kirkastua



Kuva: NASA



LRG 3-757. Taaemman sinisen galaksin valo leviää Einsteinin renkaaksi etualan galaksin ympärille. Kuva: NASA



"Hoagin kohde" (Hoag's object) on erikoinen rengasmainen galaksi, jonka epäiltiin aluksi olevan gravitaatiolinssi. Rengas ja galaksin keskusta ovat kuitenkin samalla etäisyydellä. Renkaan syntyhistoria on edelleen mysteeri. Mahdollisia vaihtoehtoja ovat galaksitörmäys ja sauvassa syntyneet epästabiiliudet. Kuva: NASA. Maailmankaikkeus nyt 2026