



Galaksien synty ja kehitys kosmologian standardimallissa

Peter Johansson, Astrofysiikan professori
Fysiikan laitos, Helsingin yliopisto

Tieteen Päivät 2023

Helsinki 13.1.2023



Tällä luennolla käsitellään

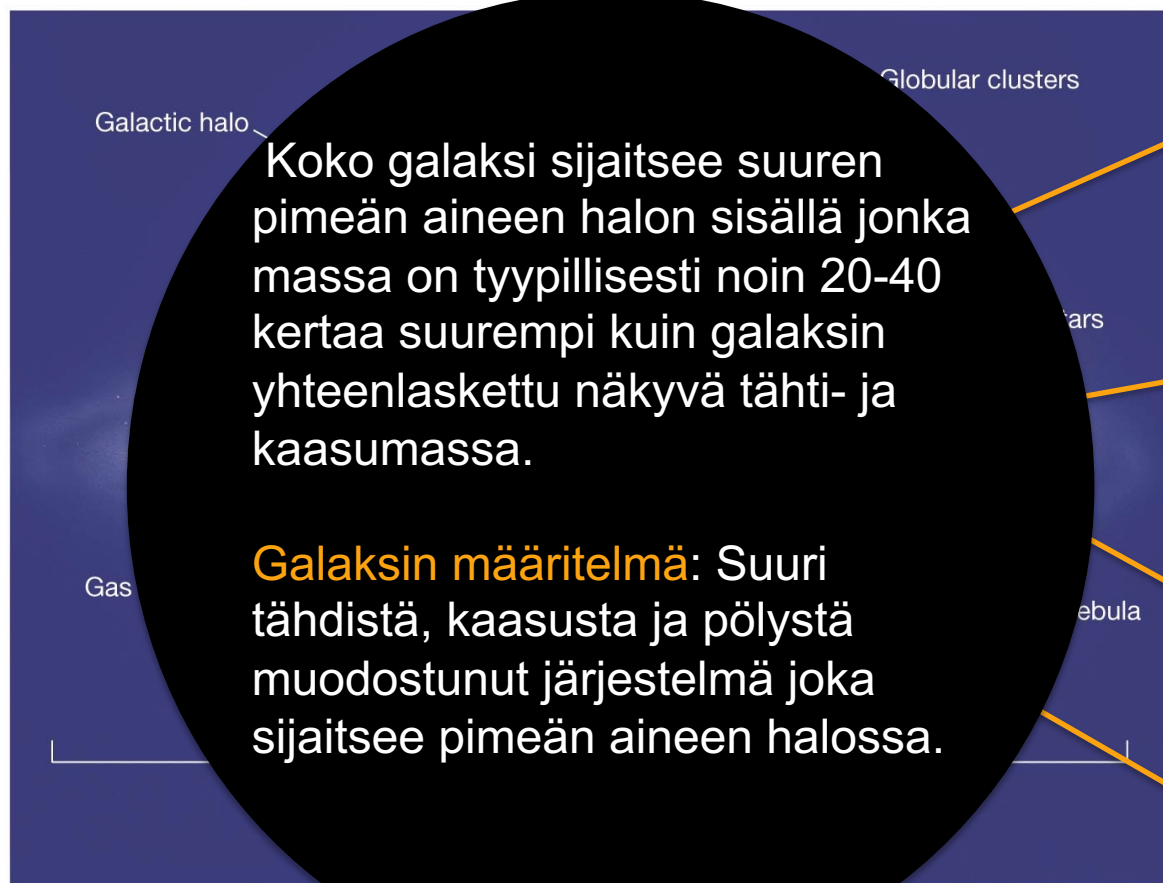
1. Mitä galaksit ovat?
 2. Mikä on kosmologian standardimalli?
 3. Miten galaksit syntyivät?
 4. Minkälaisia olivat ensimmäiset galaksit?
 5. Vastaavatko havainnot teoriaa?
 6. Mitä opimme?
- Värikoodi kertoo missä aiheessa mennään. **Luennon** oppimistavoitteena on luoda yleisnäkemys siitä mitä galaksit ovat, miten ne syntyvät ja kehittyvät, ja miksi ne ovat tärkeitä.



1. Mitä galaksit ovat?

- Galaksien rakenneosat

Credit: Pearson Education Inc.



Koko galaksi sijaitsee suuren pimeän aineen halon sisällä jonka massa on tyypillisesti noin 20-40 kertaa suurempi kuin galaksin yhteenlaskettu näkyvä tähti- ja kaasumassa.

Galaksin määritelmä: Suuri tähdistä, kaasusta ja pölystä muodostunut järjestelmä joka sijaitsee pimeän aineen halossa.

Galaksin keskeltä löytyy yleensä **keskuspullistuma** joka koostuu vanhoista punertavista tähdistä.

Galaksin **kiekk**o on laaja litteä rakennelma, jossa on runsaasti kaasua ja nuoria tähtiä.

Galaksin **halossa** on hyvin vanhoja tähtiä sekä pallo- maisia tähtijoukkoja.

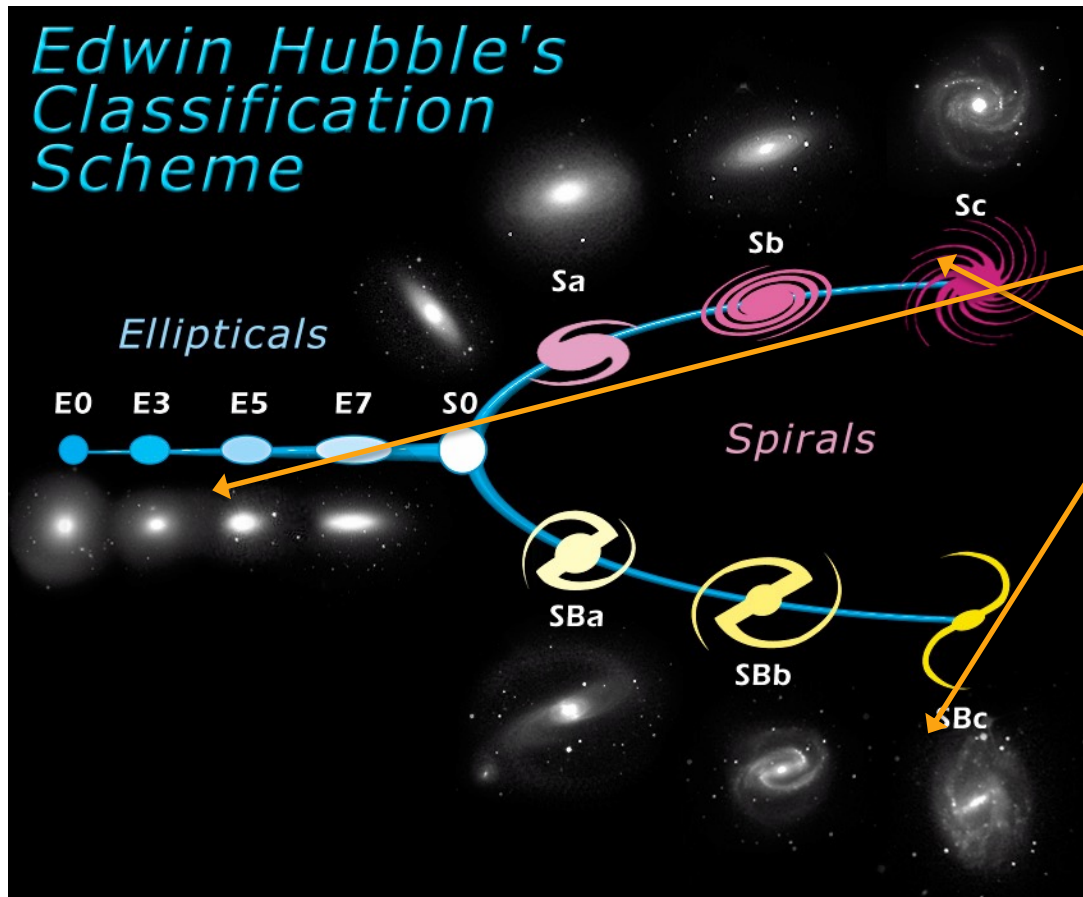
Galaksin ytimessä on yleensä **supermassiivinen musta aukko**.

Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley



Galaksien luokittelu

Credit: Wikipedia & NASA/ESA



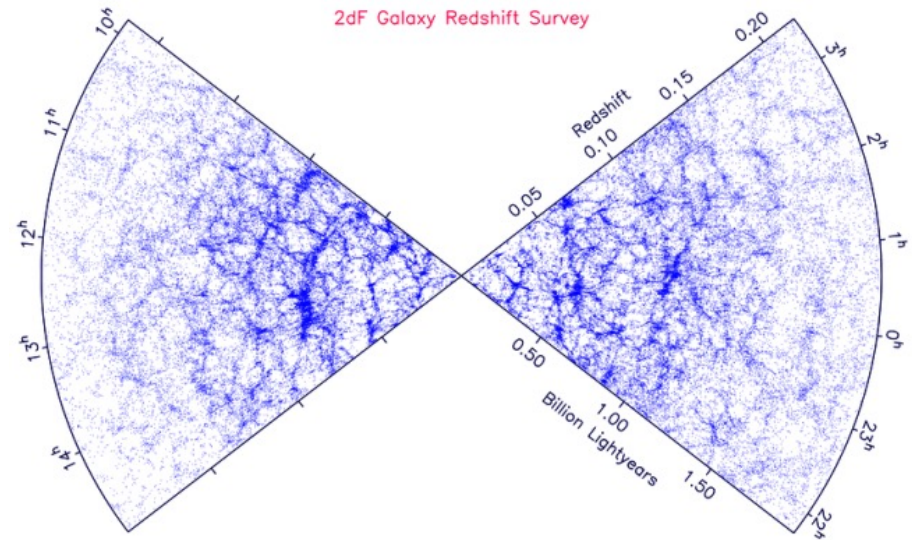
Spiraaligalakseissa on kiekko, jossa on selvää spiraalirakennetta. Myös paljon kaasua ja nuoria tähtiä, alaluokkana on normaalit ja sauva-spiraalit.



2. Kosmologinen standardimalli - Λ CDM malli

- Kosmologinen standardimalli perustuu Yleiseen suhteellisuusteoriaan ja periaatteeseen, jonka mukaan maailmankaikkeus on hyvin suurilla skaaloilla **homogeeninen ja isotrooppinen**.
- Tämä on **yleistys Kopernikaanisesta periaatteesta** jonka mukaan meidän paikkamme maailmankaikkeudessa ei ole mitenkään erityisasemassa.

Credit: 2dF Galaxy Redshift Survey

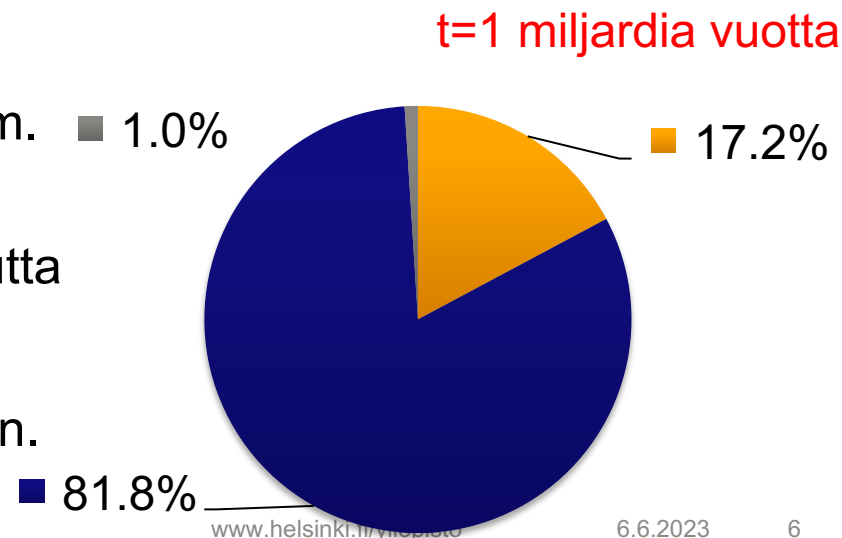
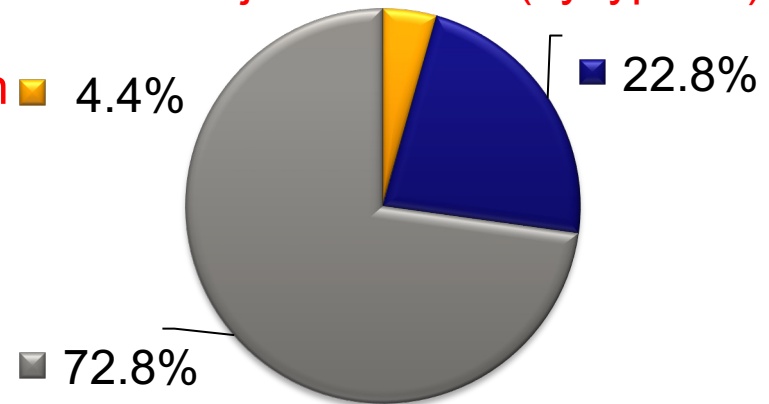


Lähiavaruuden suuren mittakaavan rakennetta, jokainen piste vastaa galaksia.



Maailmankaikkeuden koostumus

- Tänä päivänä maailmankaikkeus koostuu enimmäkseen **pimeästä aineesta (23%)** ja **pimeästä energiasta (73%)**. Tavallisen aineen osuus on vain 4.4%.
t=13.8 miljardia vuotta (nykypäivä).
- Kaikki **tavallinen aine**, kuten, planeetat, tähdet, vety jne. koostuvat baryoneista.
- Emme tiedä mitä **pimeä aine (CDM=cold dark matter)** on, mutta se vaikuttaa ainakin painovoiman välityksellä. Koostuu mahdollisesti eksoottisista hiukkasista, esim. WIMP:eistä.
t=1 miljardia vuotta.
- Emme tiedä mitä **pimeä energia (Λ)** on, mutta sitä voidaan kuvata tyhjiöenergiana joka täyttää koko avaruuden. Pimeä energia aiheuttaa avaruuden kiihtyvän laajenemisen.

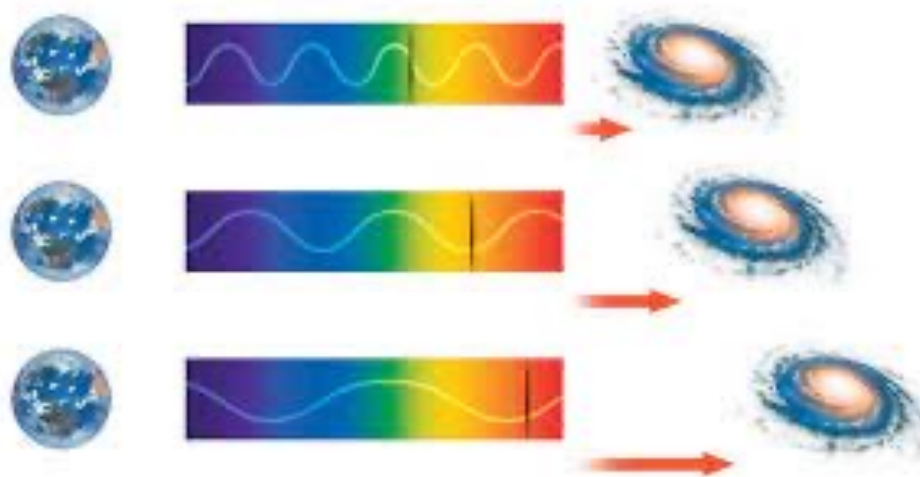




Punasiirtymä ja Jeansin massa

- **Punasiirtymä:** Kuvaa lähetetyn valosignaalin ja vastaanotetun valosignaalin aallonpituuksien suhdetta. Valon aallonpituus punasiirtyy (venyy) maailmankaikkeuden laajetessa. Mikäli kohde on punasiirtymällä $z=1$ oli maailmankaikkeuden koko $1/(1+z)=1/2$, eli puolet tämänhetkisestä koosta, kun valo lähti liikkeelle.

- **Jeansin massa** kaasun lämmön, paineen ja gravitaation välillä. Se on raja-arvo, kappaleen massa, jolla se on stabiili ja ne



inossa, mikäli
ii hajottamaan
a pyrkii
sa on raja-
voi olla

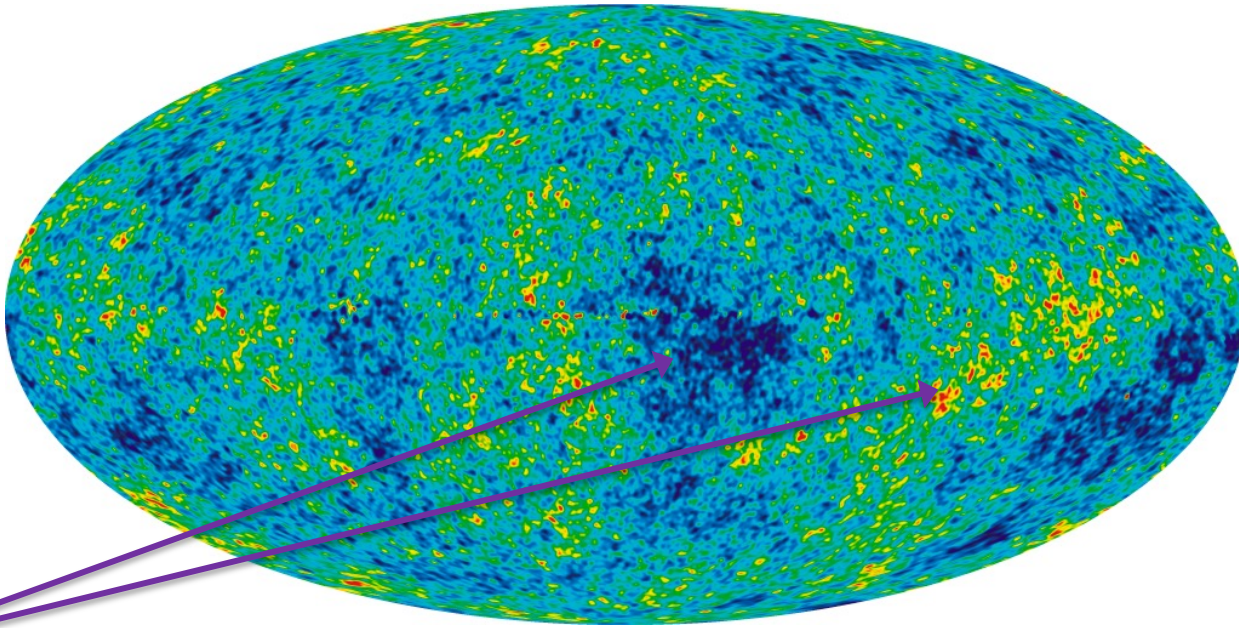
Credit: BBC Sky at Night Magazine



3. Miten galaksit syntyvät? - Kosminen taustasäteily

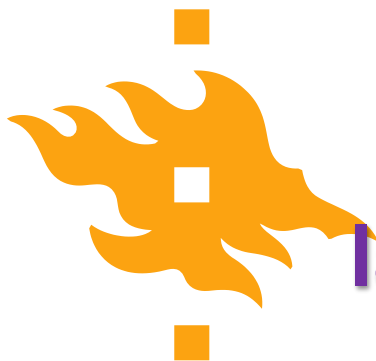
$t=400\,000$ vuotta ($z=1100$)

Alkuperäiset tiheyshäiriöt ovat todennäköisesti syntyneet hyvin varhaisessa maailmankaikkeudessa.



Credit: ESA

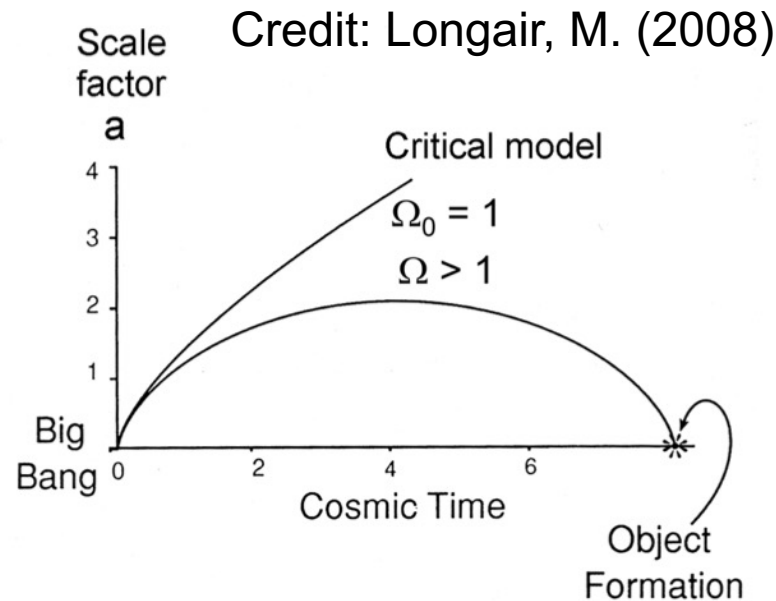
Miten $\frac{T - T_0}{T_0} \sim 10^{-5} \Rightarrow \delta = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \sim 10^{-5}$ pienistä tiheyshäiriöistä muodostuivat galaksit, joita näemme tänään?
Tänään galakseilla: $\delta \sim 10^6$
ja galaksijoukoilla: $\delta \sim 10^3$



Pienten häiriöiden kasvu laajenevassa maailmankaikkeudessa

- Laajenevassa maailmankaikkeudessa tiheyshäiriöt kasvavat hyvin hitaasti. Voidaan osoittaa, että tiheyshäiriöt kasvavat ajan funktiona kuten $\delta \propto t^{2/3}$.
- Tämä kasvu on myös suoraan verrannollinen punasiirtymään. Eli punasiirtymältä $z=1100$ nykyhetkeen ($z=0$), tiheyshäiriöiden pitäisi kasvaa vain tekijällä 1000.
- Standardimallissa ei ollut siis riittävästi aikaa tiheyshäiriöiden kasvulle. Galakseja, tähtiä ja meitäkään ei pitäisi siis olla olemassa!

$$\delta_k = 10^{-5}(z = 1100) \Rightarrow \delta_k = 10^{-2}(z = 0), \text{ Galaksit : } \delta_k = 10^6(z = 0)??$$

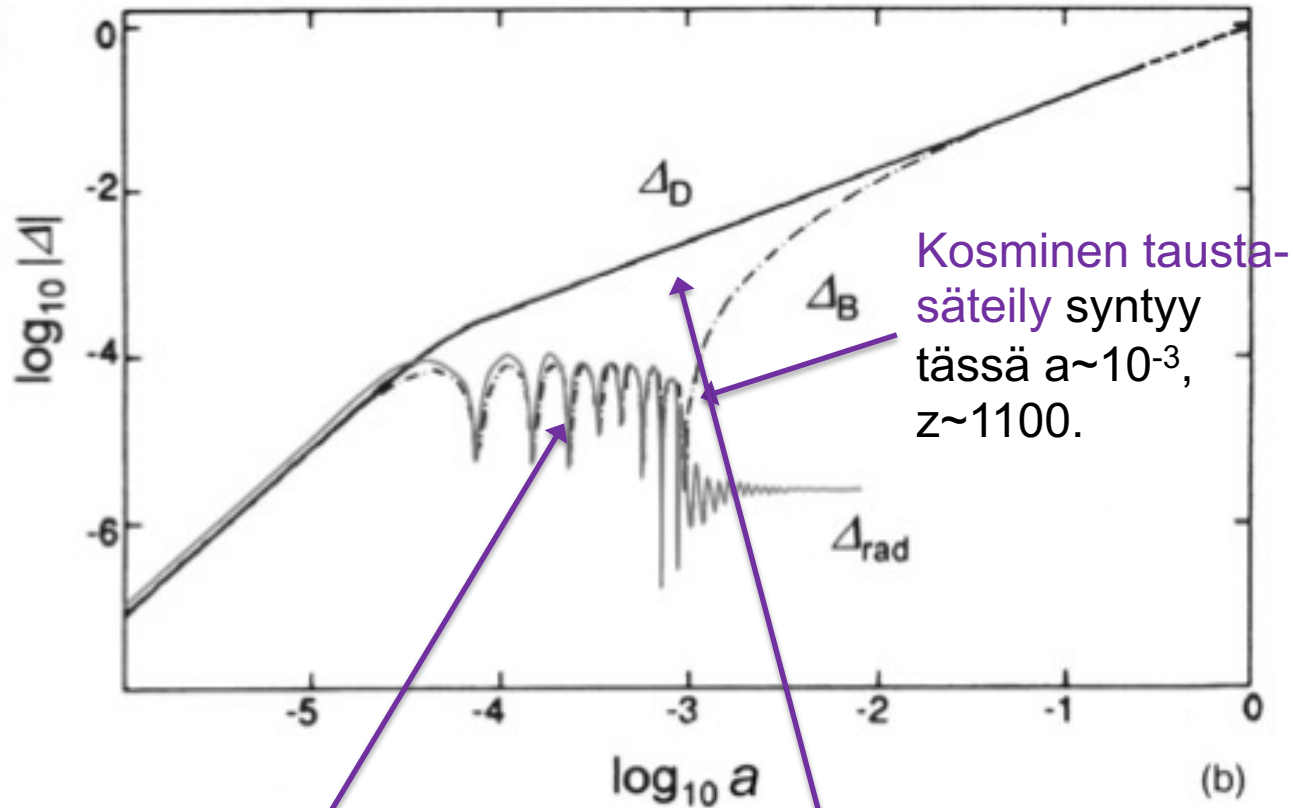


$$\delta_k \propto t^{2/3} \propto a = (1 + z)^{-1}$$



Pimeän aineen vaikutus rakenteen syntyyn

Credit: Longair, M. (2008)



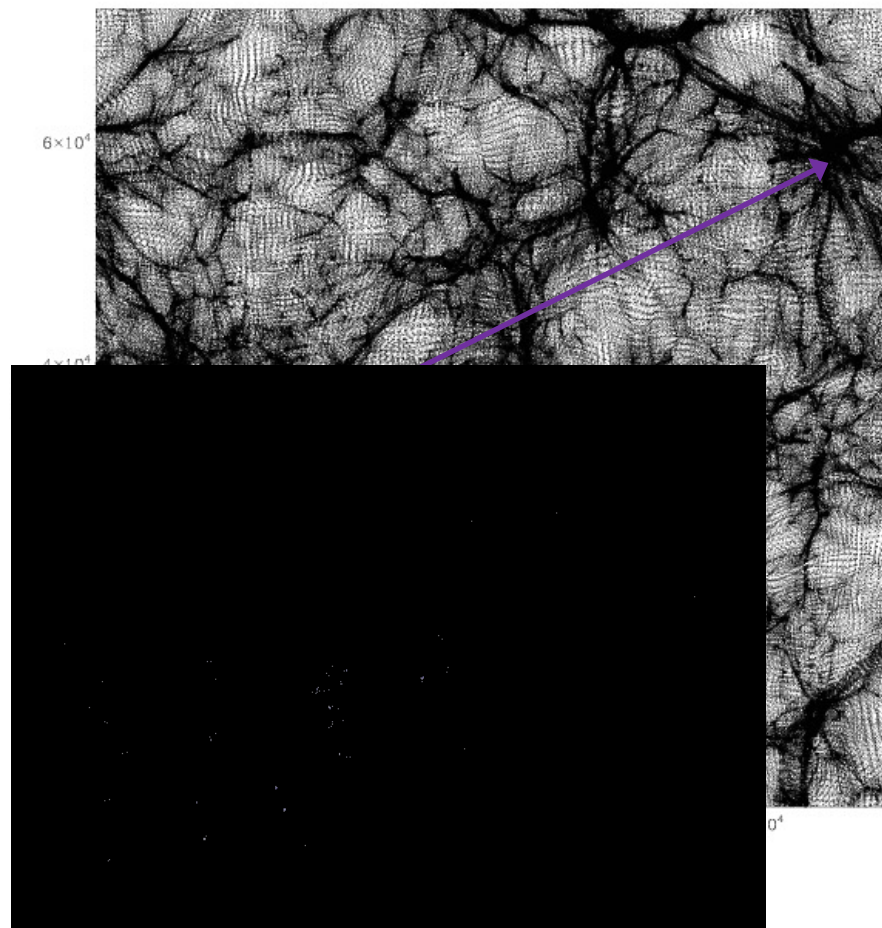
Bäroonikaation jälkeen $M_9 \sim 10^5 M_\odot$ ja näin ollen voisi muodotkayttä, pimeän aineen ei voi kasvaa. $M_9 \sim 10^{16} M_\odot$.



Rakenteen epälineaarinen kasvu

Tutkimusryhmämme simulaatio
muodostuvasta ellipsigalakseista.

- Kun tiheyshäiriöt ovat $\delta \sim 1$, lineaariteoria ei enää ole voimassa ja rakenteet romahtavat verrattain nopeasti muodostaen täten painovoimalla sidottuja galakseja.
- Mallintamisessa käytetään tällöin numeerisia simulaatioita.





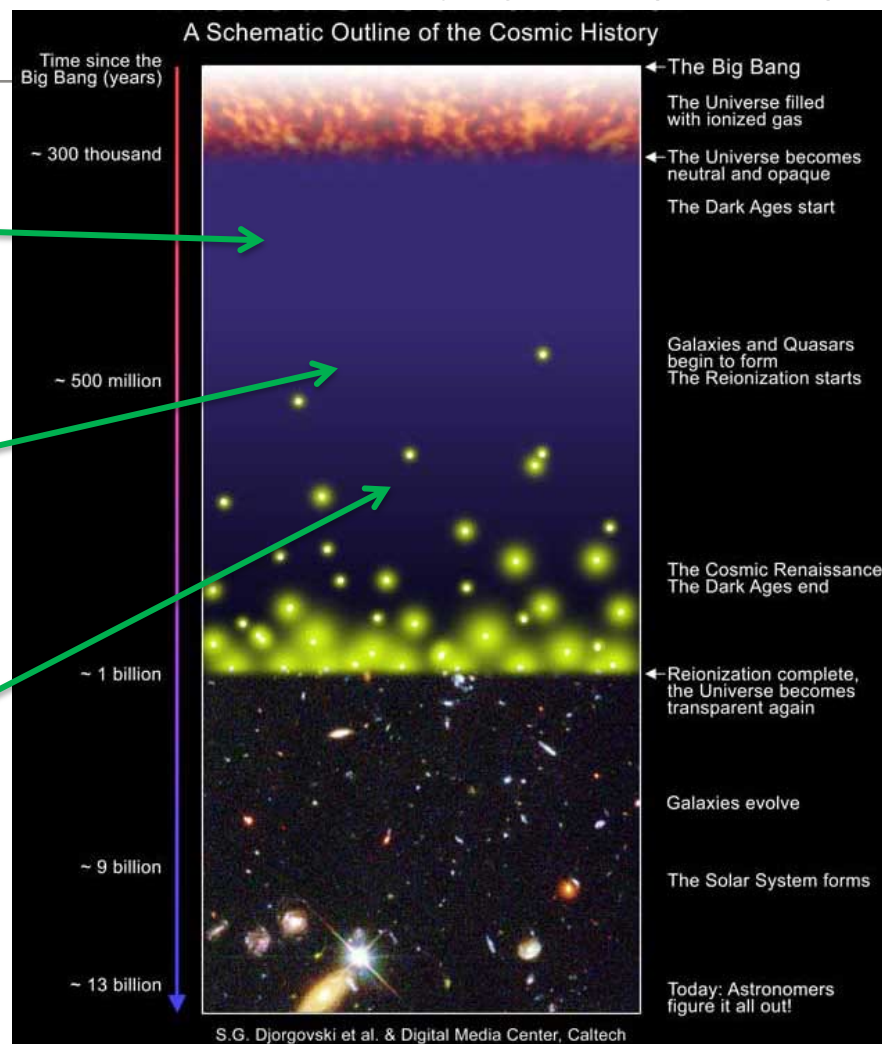
4. Minkälaisia olivat ensimmäiset galaksit? – Kosminen aikajana

Credit: Prof. S.G. Djorgovski (Caltech)

Ensimmäiset tähdet
muodostuvat noin
punasiirtymällä $z \sim 20-30$
($t \sim 100-200$ miljoonaa vuotta).

Ensimmäiset galaksit
muodostuvat noin
punasiirtymällä $z \sim 10-15$
($t \sim 300-500$ miljoonaa vuotta).

Kaukaisin varmistettu kohde:
GN-z11, $z=11$ $t \sim 400$ miljoonaa
vuotta. JWST: Myös galaksi-
kandidaatteja: $z \sim 13-15$.

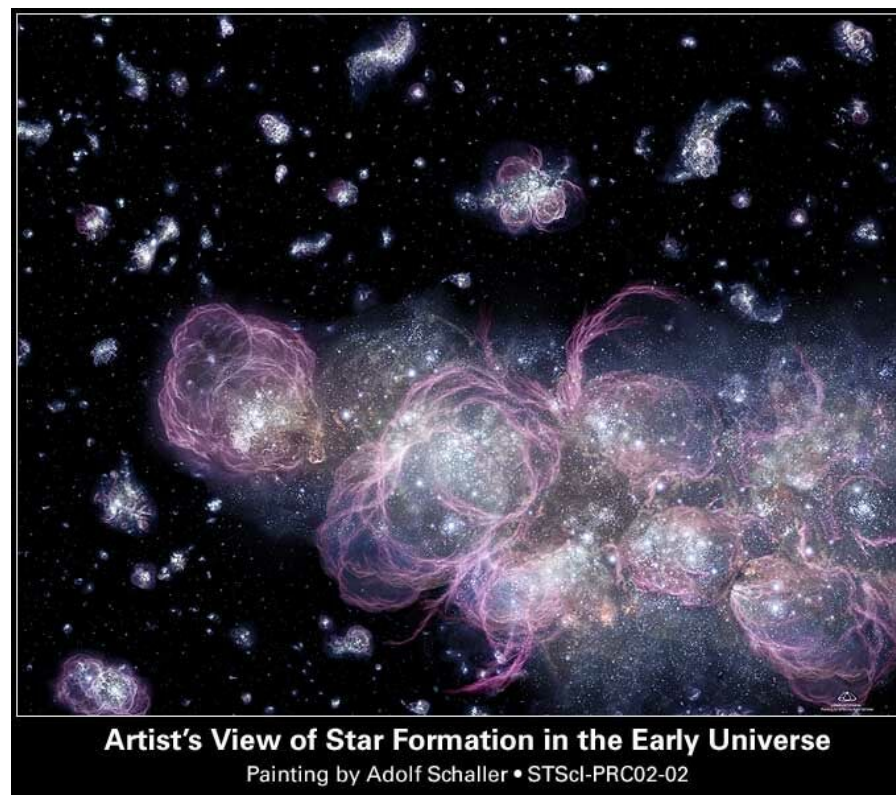




Ensimmäiset tähdet ja galaksit

- **Ensimmäiset tähdet:** Syntyivät kaasusta, joka koostui ainoastaan **vedystä ja heliumista**. Tähdet olivat olettavasti hyvin massiivisia ($50\text{--}200 M_{\odot}$) ja ne elivät vain lyhyen hetken, **räjähten lopulta valtavana supernovina**.
- **Ensimmäiset galaksit:** Olivat pieniä ja niiden massat olivat noin $10^7\text{--}10^8 M_{\odot}$ (**$<1/10000$ Linnunradasta**) ja ne muodostuivat pienistä minihaloista kerääntymällä, joiden keskustoissa oli ensimmäisiä tähtipopulaatioita.

Taiteilijan näkemys ensimmäisistä tähdistä



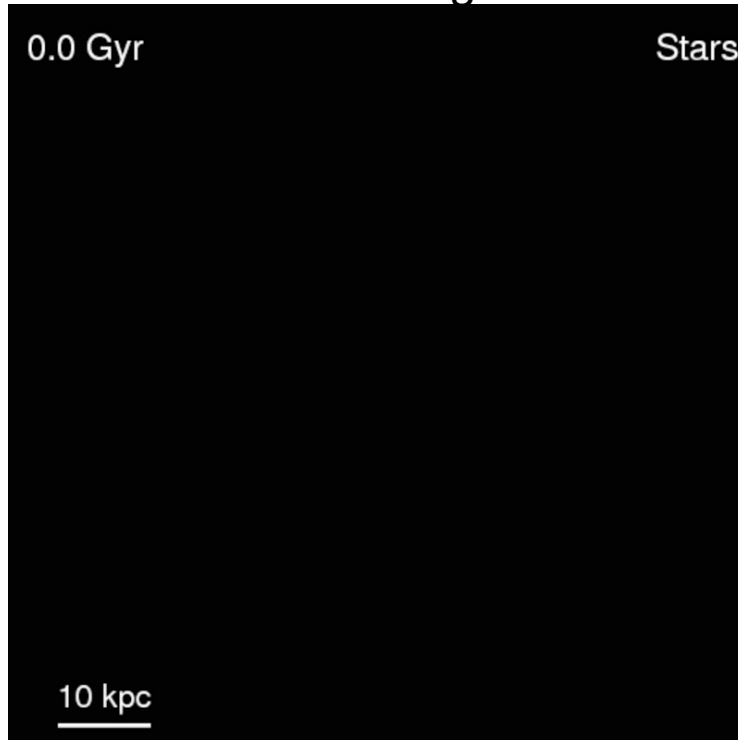
Credit: NASA/ESA



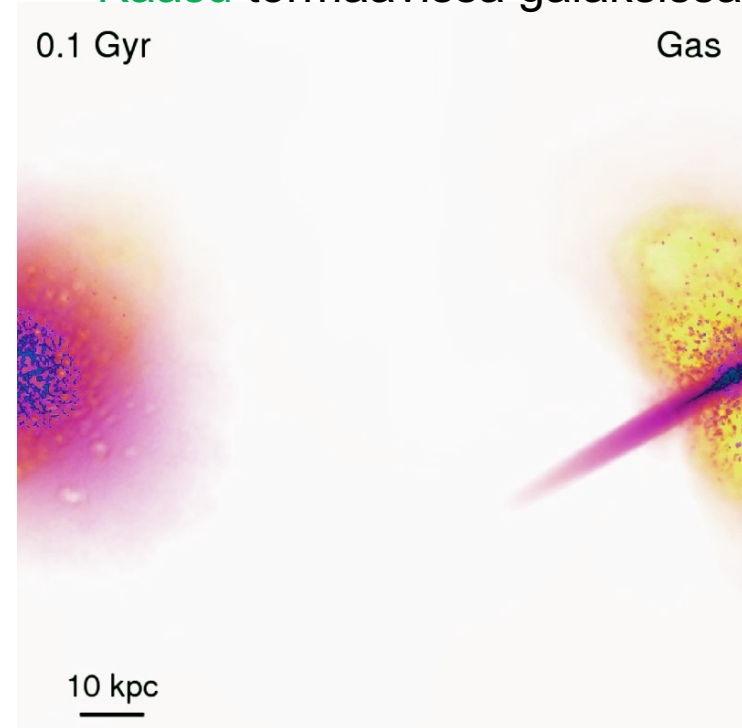
Galaksien kehitys – Galaksien väliset törmäykset

Animaatit: Prof. Phil Hopkins (Caltech)

Tähdet törmäävissä galakseissa



Kaasu törmäävissä galaksissa

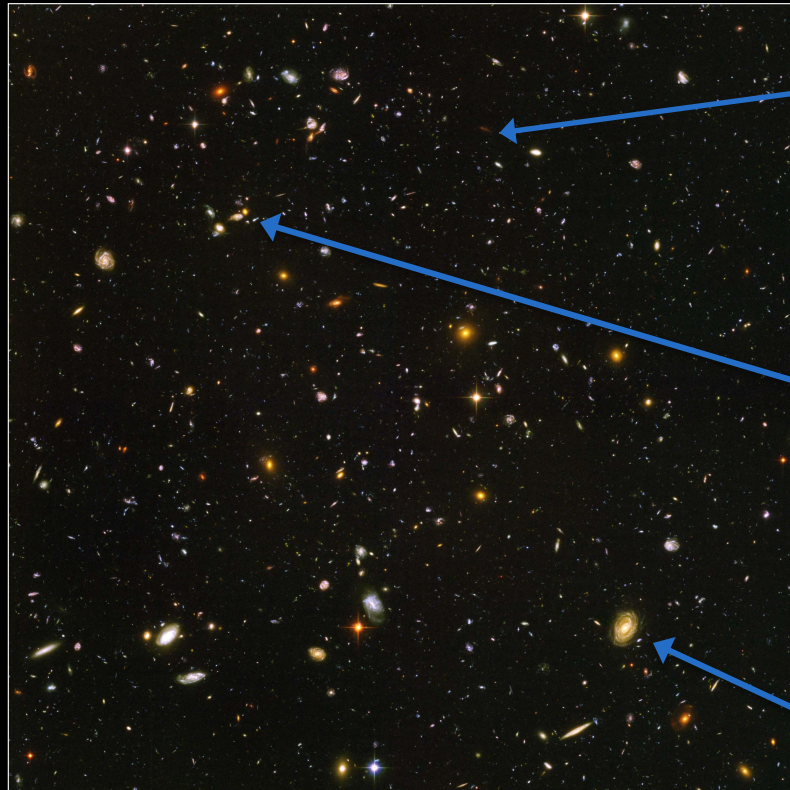


- Törmäykset ovat tärkeä osa galaksien elämää. Kaikki suuret galaksit ovat rakentuneet useista sadoista törmäyksistä pienempien galaksien kanssa.



5. Vastaavatko havainnot teoriaa?

Credit: NASA/ESA



Hubble Ultra Deep Field
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team

STScI-PRC04-07a

Kaukaisimmat galaksit ovat pieniä ja punasiirtymällä $z \sim 10-15$ noin 300 miljoonaa vuotta alkuräjähdyksen jälkeen.

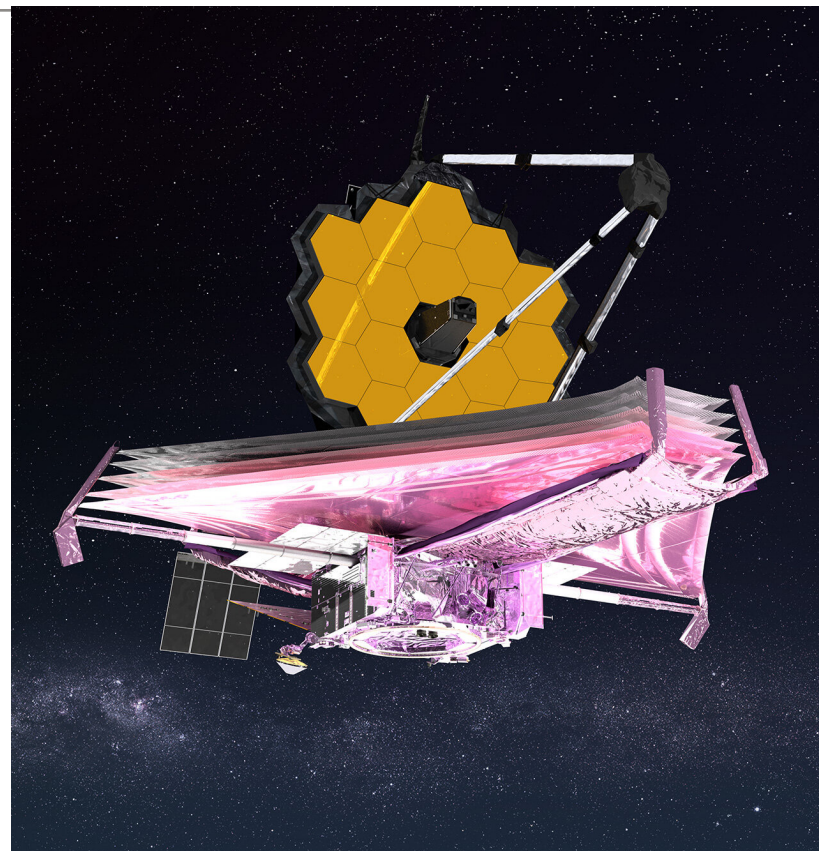
Monet galaksit ovat epä-säännöllisiä, painovoimavuorovaikutukset yleisempiä varhaisessa maailman-kaikkeudessa. Rakenne kasvaa pienemmästä suurempaan.

Suurimmat näkyvissä olevat galaksit ovat verrattain lähellä olevia ($z \sim 0.1$) säännöllisiä spiraali- ja ellipsigalakseja.



James Webb avaruuskaukoputki

- Joulukuussa 2021 avaruuteen laukaistu James Webb avaruuskaukoputki (JWST) on täysin mullistamassa galaksitutkimuksen.
- JWST:llä on 6.5 metrinen peili (6x suurempi pinta-ala kuin Hubblella) ja se on optimoitu infrapuna-alueen havainnointia varten, toisin kuin Hubble.
- JWST:n ensimmäiset havainnot ovat jo osoittaneet, että tähtien ja galaksien synty käynnistyi aikaisemmin ja nopeammin kuin teoreettiset mallit olivat ennustaneet.



Credit: NASA/ESA



Vertailussa Hubblen ja JWST galaksihavainnot (Credit NASA/ESA)

SMAP 080720 galaksitäikkyys 300 miljoonaa vuotta





Mitä opimme?

- Mitä galaksit ovat?** Galaksit ovat suuria tähdistä, kaasusta ja pölystä koostuvia järjestelmiä, jotka sijaitsevat pimeän aineen haloissa.
- Mikä on kosmologian standardimalli?** Λ CDM-mallissa maailmankaikkeus koostuu pimeästä aineesta (23%), pimeästä energiasta (73%), sekä tavallisesta aineesta (4.4%). Emme täysin ymmärrä pimeän aineen olemusta ja emme ollenkaan pimeää energiaa.
- Miten galaksit syntyivät?** Kylmä pimeä aine on olennainen osa galaksien muodostumista, ilman sitä galaksit eivät ehtisi syntyä pienistä taustasäteilyn havaituista häiriöistä. Galaksit syntyvät, kun kaasu jäähtyy muodostaen tähtiä pimeän aineen haloissa.
- Minkälaisia olivat ensimmäiset galaksit?** Ne olivat pieniä ja niissä ei ollut vielä säännöllistä rakennetta. Maailmankaikkeuden ensimmäiset tähdet olivat hyvin massiivisia ja ne elivät lyhyen ja väkivaltaisen elämän.
- Vastaavatko havainnot teoriaa?** Kyllä, ensimmäiset havaitut galaksit ovat pieniä ja niillä on oikeansuuntaiset massat. JWST on mullistamassa galaksitutkimuksen (ja koko tähtitieteen) uusilla havainnoillaan.